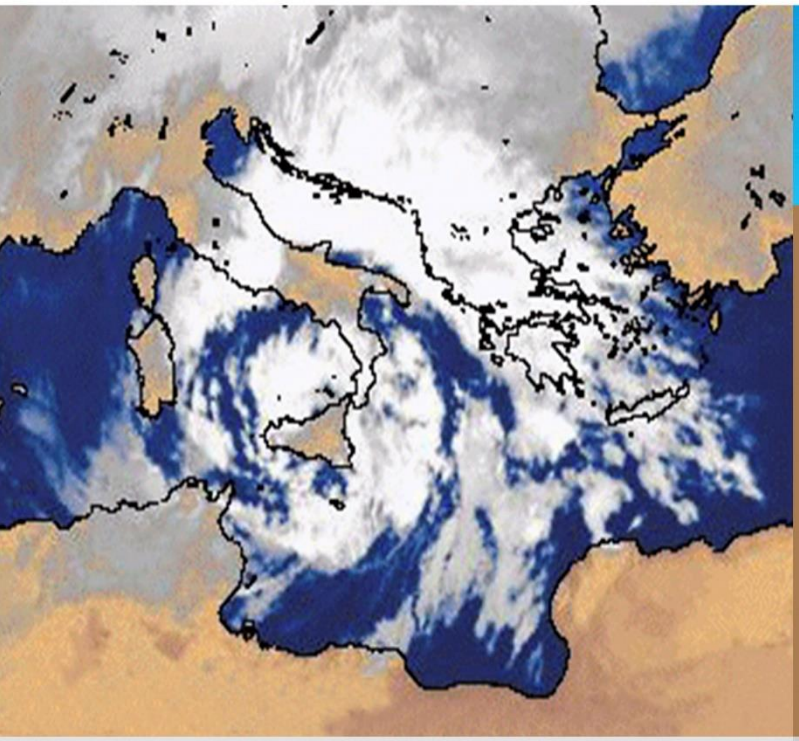
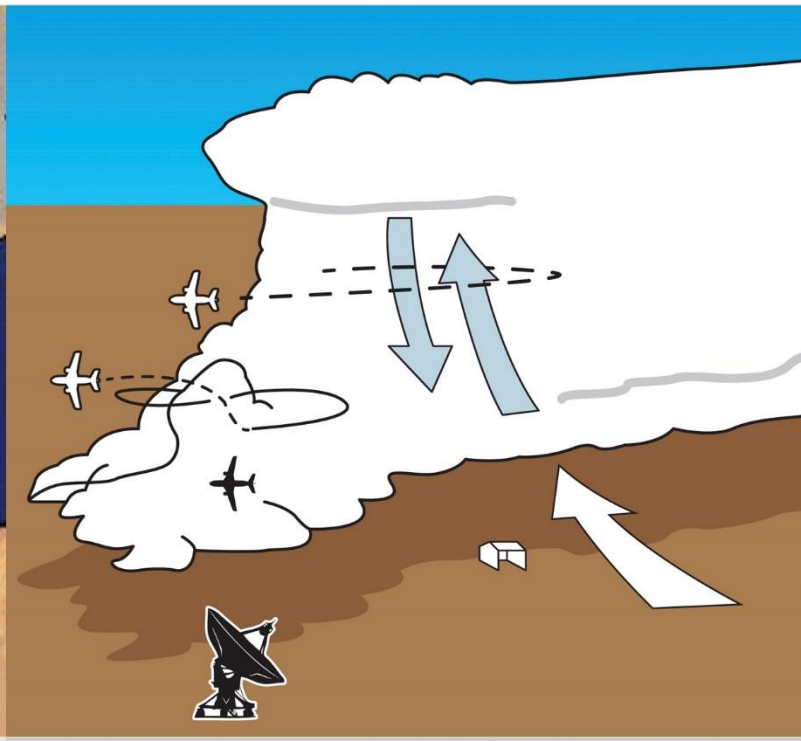
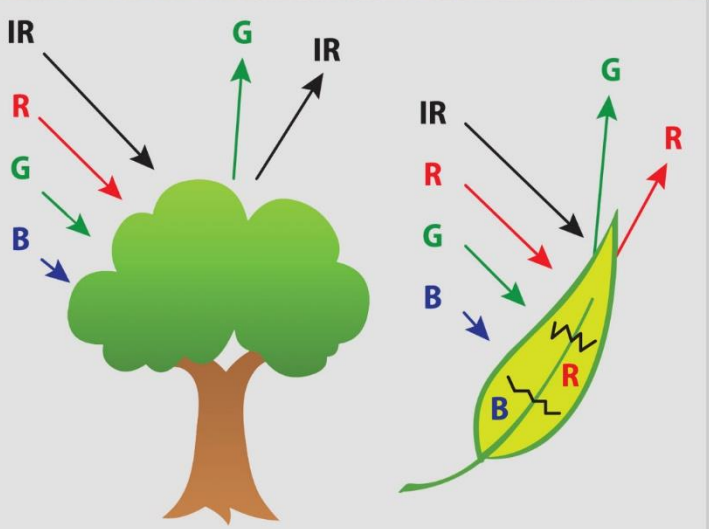
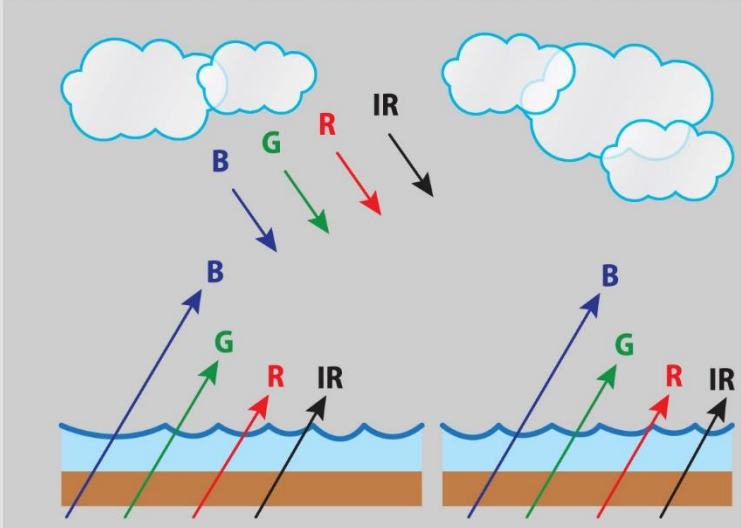
ΑΓΡΟΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑ
Ανάλυση και Προσομοίωση

Νικόλαος Ρ. Δαλέζιος
Καθηγητής Πανεπιστημίου Θεσσαλίας









Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράμματα και Βοηθήματα
www.kallipos.gr
HEALLINK
Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών
Ευρωπαϊκή Ένωση
ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ
ΕΣΠΑ 2007-2013
Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης

Νικόλαος Ρ. Δαλέζιος
Καθηγητής Πανεπιστημίου Θεσσαλίας

Αγρομετεωρολογία

Ανάλυση και Προσομοίωση



ΑΓΡΟΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑ: Ανάλυση και Προσομοίωση

Συγγραφή

Νικόλαος Ρ. Δαλέζιος

Κριτικοί αναγνώστες

Δημήτριος Μελάς

Παναγιώτης Νάστος

Συντελεστές έκδοσης

Γλωσσική Επιμέλεια: *Φωτεινή Ξιφαρά*

Γραφιστική Επιμέλεια: *Σταμάτης Παπαδήμος*

Τεχνική Επεξεργασία: *Παναγιώτης Βλασταρίδης, Αγγελική Στεφοπούλου*

ISBN: 978-960-603-134-2

Copyright © ΣΕΑΒ, 2015

Το παρόν έργο αδειοδοτείται υπό τους όρους της άδειας Creative Commons Αναφορά Δημιουργού - Μη Εμπορική Χρήση - Όχι Παράγωγα Έργα 3.0. Για να δείτε ένα αντίγραφο της άδειας αυτής επισκεφτείτε τον ιστότοπο https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/gr/

ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΩΝ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΩΝ

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 15780 Ζωγράφου

www.kallipos.gr

Για μια καλύτερη ποιότητα ζωής

ΑΓΡΟΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑ
Ανάλυση και Προσομοίωση

Πίνακας Περιεχομένων

ΜΕΡΟΣ 1: ΠΡΟΛΕΓΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1: Αντικείμενο της αγρομετεωρολογίας

1.1	Ορισμοί και στόχοι της αγρομετεωρολογίας	2
1.2	Αντικείμενο της αγρομετεωρολογίας	3
1.3	Εύρος της αγρομετεωρολογίας	4
1.3.1	Έδαφος	6
1.3.2	Φυτά	6
1.3.3	Ζώα του αγρού	6
1.3.4	Ασθένειες, εχθροί και ζηζάνια των φυτών και των ζώων	6
1.3.5	Κτίρια και εξοπλισμός των αγροκτημάτων	7
1.3.6	Τεχνητή μεταβολή των μετεωρολογικών και υδρολογικών παραγόντων	7
1.4	Σχέσεις και διαφοροποιήσεις με συναφή αντικείμενα	7
1.5	Σπουδαιότητα και σημασία της αγρομετεωρολογίας	9
1.6	Ιεραρχική μεθοδολογική προσέγγιση της αγρομετεωρολογίας	13
1.7	Τρέχουσες και μελλοντικές προκλήσεις της αγρομετεωρολογίας	15
1.8	Δυνατότητες της αγρομετεωρολογίας στην ελληνική γεωργία	17
1.8.1	Αγροκλιματική ζωνοποίηση για αναδιάρθρωση καλλιεργειών	17
1.8.2	Κλιματική αλλαγή και γεωργία: επιπτώσεις-αντιμετώπιση-προσαρμογή	17
1.8.3	Αγρομετεωρολογική προσομοίωση καλλιεργειών και εχθρών ασθενειών	18
1.8.4	Αγρομετεωρολογικό σύστημα υψηλής ευκρίνειας	18
1.8.5	Εκτίμηση και παρακολούθηση περιβαλλοντικών κινδύνων	19
1.8.6	Γεωργία ακριβείας	19
	Βιβλιογραφικές αναφορές	20

Κεφάλαιο 2: Βασική μετεωρολογία για τη γεωργία

2.1	Η ατμόσφαιρα της Γης	22
2.2	Θερμοκρασία ατμόσφαιρας	24
2.2.1	Θερμομετρικά εύρη	25
2.2.2	Θερμοβαθμίδα	26
2.2.3	Αναστροφή θερμοκρασίας	27
2.3	Θερμοκρασία εδάφους	28
2.3.1	Χωροχρονικές μεταβολές θερμοκρασίας εδάφους	28
2.3.2	Θερμικές ιδιότητες εδαφών	31
2.4	Θερμοκρασία νερού και θάλασσας	32
2.5	Ατμοσφαιρική πίεση	33
2.5.1	Μονάδες μέτρησης	33
2.5.2	Μεταβολές της ατμοσφαιρικής πίεσης	34
2.6.	Άνεμος	35
2.6.1	Κλίμακα Beaufort	36
2.6.2	Άνεμος στο ΑΟΣ	36
2.7	Υγρασία του αέρα	39
2.8	Ατμοσφαιρική αστάθεια	42
2.9	Νέφη	44
2.9.1	Ανώτερα νέφη	44
2.9.2	Μέσα νέφη	44
2.9.3	Κατώτερα νέφη	44
2.9.4	Νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης	44

2.10 Αέριες μάζες – Μέτωπα – Κυκλώνες και αντικυκλώνες 47
2.10.1 Αέριες μάζες 47
2.10.2 Μέτωπα 47
2.10.3 Κυκλώνες και αντικυκλώνες 49
2.11 Υδροσυμπυκνώσεις μικρής κλίμακας 52
2.11.1 Δρόσος 52
2.11.2 Πάχνη 52
2.11.3 Ορατότητα και ομίχλη 52
Βιβλιογραφικές αναφορές 54

ΜΕΡΟΣ 2: ΑΓΡΟΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Κεφάλαιο 3: Γεωργική μικρομετεωρολογία

3.1 Ηλιακή ακτινοβολία 56
3.1.1 Βασικά χαρακτηριστικά ηλιακής ακτινοβολίας 56
3.1.2 Νόμοι ακτινοβολίας 59
3.1.3 Μέτρηση και εκτίμηση ηλιακής ακτινοβολίας 61
3.2 Μικρομετεωρολογία 63
3.2.1 Ατμοσφαιρικές κλίμακες 63
3.3 Το Ατμοσφαιρικό Οριακό Στρώμα (ΑΟΣ) 64
3.4 Βασική δομή και χαρακτηριστικά του ΑΟΣ 66
3.4.1 Ημερήσιος κύκλος της δομής του ΑΟΣ 66
3.4.2 Το ύψος του ΑΟΣ 67
3.5 Αναταράξεις (τύρβη) στο ΑΟΣ 69
3.5.1 Διαδικασίες μεταφοράς αναταράξεων (τύρβης) 70
3.6 Το στρώμα επιφάνειας 72
3.7 Ισοζύγιο ενέργειας στην επιφάνεια της γης 73
3.7.1 Εισερχόμενη μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία 74
3.7.2 Εξερχόμενη μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία 77
3.7.3 Καθαρή ακτινοβολία στην επιφάνεια της γης και ροή θερμότητας στο έδαφος 80
3.7.4 Επιφανειακό ισοζύγιο ενέργειας 81
Βιβλιογραφικές αναφορές 86

Κεφάλαιο 4: Γεωργική υδρομετεωρολογία

4.1 Υετός 88
4.1.1 Σχηματισμός υετού 88
4.1.2 Μορφές και τύποι υετού 90
4.2 Μέτρηση και εκτίμηση υετού με βροχομετρικά δίκτυα 91
4.3 Εκτίμηση βροχόπτωσης με ραντάρ 92
4.3.1 Βασικές αρχές του radar καιρού 92
4.3.2 Μετεωρολογία του ραντάρ 94
4.3.3 Εκτίμηση περιοχικής βροχόπτωσης με ραντάρ 101
4.4 Εκτίμηση βροχόπτωσης με δορυφόρους 103
4.4.1 Δορυφορικές μέθοδοι εκτίμησης βροχόπτωσης 103
4.5 Εξάτμιση και εξατμισοδιαπνοή 110
4.5.1 Άμεση μέτρηση εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας 111
4.5.2 Μέθοδοι εκτίμησης εξατμισοδιαπνοής αναφοράς 112
4.5.3 Δορυφορικές μέθοδοι εκτίμησης εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας 115
Βιβλιογραφικές αναφορές 119

Κεφάλαιο 5: Γεωργική βιομετεωρολογία

5.1. Αντικείμενο βιομετεωρολογίας και βιοκλιματολογίας 122
5.1.1 Βιομετεωρολογικές και βιοκλιματικές μέθοδοι 122
5.1.2. Ανάλυση δεδομένων βιομετεωρολογίας 123

5.1.3 Γεωργική βιοκλιματική πληροφορία 123
5.2 Βιολογικοί κίνδυνοι 124
5.2.1 Επιδημιολογία ασθενειών σε φυσικές καταστροφές 124
5.2.2 Κίνδυνοι από έντομα 126
5.2.3 Κλίμα και βιολογικοί κίνδυνοι 126
5.3 Βιομετεωρολογικοί και βιοκλιματικοί δείκτες 128
5.3.1 Εξέλιξη και κατηγοριοποίηση 128
5.3.2 Βιομετεωρολογικοί δείκτες 130
5.4 Αεροβιολογία 138
5.4.1 Δεδομένα και μοντέλα διαθέσιμα για αεροβιολογική χρήση 140
5.4.2 Κλίμακες των αεροβιολογικών προβλημάτων 142
5.4.3 Παραδείγματα αεροβιολογικών μοντέλων για τη μεταφορά σπορίων 143
Βιβλιογραφικές αναφορές 146

ΜΕΡΟΣ 3: ΑΓΡΟΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑ ΓΙΑ ΤΗ ΓΕΩΡΓΙΑ

Κεφάλαιο 6: Αγρομετεωρολογία για τη φυτική παραγωγή
6.1 Αβιοτικοί παράγοντες ανάπτυξης των φυτών 150
6.1.1 Ηλιακή ακτινοβολία και φως 150
6.1.2 Αέρας 151
6.1.3 Θερμοκρασία 151
6.1.4 Νερό 153
6.2 Φυσιολογία των φυτών 153
6.2.1 Ετήσιοι δακτύλιοι 153
6.2.2 Πρόσληψη ύδατος και διαπνοή των φυτών 154
6.2.3 Αφομοίωση και θρέψη του φυτού 154
6.2.4 Λειτουργία της αναπνοής του φυτού 154
6.3 Φαινολογία 155
6.3.1 Εννοιολογικό πλαίσιο φαινολογίας 155
6.3.2 Σημασία φαινολογικών παρατηρήσεων 157
6.3.3 Φάσεις και κύκλος ζωής φυτού 159
6.3.4 Χρονική ακρίβεια φάσεων (sharpness) 161
6.4 Αγρομετεωρολογικές και φαινολογικές παρατηρήσεις 162
6.4.1 Στοιχεία αγρομετεωρολογικών παρατηρήσεων 164
6.4.2 Φαινολογικές παρατηρήσεις 165
6.4.3 Κατηγορίες αγρομετεωρολογικών παρατηρήσεων για φαινολογία 168
6.5 Μετεωρολογικές και αγρομετεωρολογικές προγνώσεις 173
6.5.1 Μετεωρολογικές προγνώσεις βραχείας και μέσης διάρκειας 174
6.5.2 Μετεωρολογικές προγνώσεις για τη γεωργία 176
6.5.3 Αγρομετεωρολογική πρόγνωση 178
Βιβλιογραφικές αναφορές 179

Κεφάλαιο7:Αγρομετεωρολογία για τη χερσαία και υδρόβια ζωική παραγωγή
7.1 Αγρομετεωρολογία για τη χερσαία ζωική παραγωγή 181
7.1.1 Βιομετεωρολογική διαχείριση χερσαίας ζωικής παραγωγής 182
7.2 Εφαρμογές χερσαίας ζωικής παραγωγής για τους αγρότες 188
7.2.1 Ιδιαιτερότητες-διακρίσεις και φυσιολογικές αντιδράσεις των ζώων 188
7.2.2 Μείωση των επιπτώσεων του κλίματος στη ζωική παραγωγή 189
7.2.3 Περιβαλλοντική τροποποίηση 190
7.2.4 Ζωοτροφές και βοσκότοποι 191
7.3 Αγρομετεωρολογία για την αλιεία και τις υδατοκαλλιέργειες 191
7.3.1 Αλιεία 191
7.3.2 Υδατοκαλλιέργεια 192
7.3.3 Κλίμα-καιρός και ποσότητα νερού 193

7.3.4 Κλίμα-καιρός και ποιότητα νερού 195
7.3.5 Ερευνητικές και εκπαιδευτικές ανάγκες 205
Βιβλιογραφικές αναφορές 206

Κεφάλαιο 8: Αγρομετεωρολογία για εχθρούς και ασθένειες ζώντων οργανισμών
8.1 Αγρομετεωρολογία για εχθρούς καλλιεργειών 210
8.1.1 Ακάρεα 211
8.1.2 Νηματώδεις 212
8.1.3 Μύκητες 212
8.1.4 Βακτήρια και βάκιλοι 212
8.1.5 Ιοί 213
8.1.6 Αρπακτικά 213
8.1.7 Παράσιτα 213
8.1.8 Ζιζάνια 213
8.1.9 Έντομα 213
8.2 Αγρομετεωρολογία για ασθένειες φυτών 214
8.3 Ζιζάνια και οικοσύστημα 216
8.3.1 Μοντέλα ανάπτυξης ζιζανίων υπό ελεγχόμενες συνθήκες 216
8.3.2 Τεχνικές αντιμετώπισης των παθογόνων 217
8.3.3 Ολοκληρωμένη καταπολέμηση 218
8.4 Αγρομετεωρολογικά μοντέλα εχθρών και ασθενειών 219
8.4.1 Εννοιολογικό πλαίσιο μοντέλων εχθρών και ασθενειών 219
8.4.2 Αγρομετεωρολογικά μοντέλα εχθρών και ασθενειών 221
8.5 Εφαρμογές 223
8.5.1 Εχθροί καλαμποκιού 223
8.5.2 Εχθροί και ασθένειες αμπέλου 229
8.5.3 Μέτρα προστασίας αμπέλου 232
8.5.4 Παράσιτο αμπέλου (Lobesia Botrana Denis and Schiff) 232
8.5.5 Εχθροί στο βαμβάκι (Petinophora Gossypiella Saund) 234
8.5.6 Εχθροί αποθηκών σίτου και άλλων δημητριακών 237
Βιβλιογραφικές αναφορές 237

ΜΕΡΟΣ 4: ΚΛΙΜΑ ΚΑΙ ΓΕΩΡΓΙΑ

Κεφάλαιο 9: Αγροκλιματολογία
9.1. Ταξινόμηση των κλιμάτων 240
9.1.1 Κλίμακες κλιμάτων 240
9.1.2 Κατηγορίες ταξινόμησης κλιμάτων 242
9.2 Αγροκλίμα 246
9.2.1 Αγροτοποκλίμα 246
9.2.2 Μικροκλίμα και φυτοκλίμα 249
9.3 Φαινολογική κλιματολογία 251
9.4 Θεματικοί τύποι κλιμάτων 252
9.4.1 Κλίμα εδάφους 253
9.4.2 Κλίμα λιβαδιών 256
9.4.3 Κλίμα δημητριακών 258
9.4.4 Κλίμα δένδρων, οπωρώνων και δασών 260
9.4.5 Κλίμα θερμοκηπίου 263
9.5 Βελτίωση κλίματος για γεωργικούς σκοπούς 267
Βιβλιογραφικές αναφορές 268

Κεφάλαιο 10: Κλιματική αλλαγή και γεωργία
10.1 Κλιματική μεταβλητότητα και αλλαγή 269
10.1.1 Κλιματική μεταβλητότητα 269
10.1.2 Κλιματικά μοντέλα 272

10.2 Διαχρονικά χαρακτηριστικά κλιματικής μεταβλητότητας 281
10.2.1 Παρελθόν κλίμα 282
10.2.2 Παρόν κλίμα 283
10.2.3 Μελλοντικό κλίμα στον 21ο αιώνα 283
10.3 Κλιματική μεταβλητότητα και γεωργικά οικοσυστήματα 285
10.4 Επιπτώσεις κλιματικής αλλαγής στη γεωργία 286
10.4.1 Μεταβολές σε κλιματικές παραμέτρους και οικοσυστήματα 286
10.4.2 Επιπτώσεις σε τομείς της οικονομίας 289
10.5 Αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής στη γεωργία 291
10.5.1 Παράγοντες αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής 291
10.5.2 Δράσεις της αντιμετώπισης 292
10.6 Προσαρμογή της γεωργίας στην κλιματική αλλαγή 294
10.6.1 Επιλογές προσαρμογής 294
10.6.2 Μέτρα προσαρμογής 296
Βιβλιογραφικές αναφορές 298

ΜΕΡΟΣ 5: ΑΓΡΟΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Κεφάλαιο 11: Αγρομετεωρολογική τηλεπισκόπηση

11.1 Συνιστώσες και συστήματα τηλεπισκόπησης 301
11.1.1 Φασματικές υπογραφές και διακριτικές ικανότητες 301
11.1.2 Συστήματα αισθητήρων 304
11.1.3 Συστήματα τηλεπισκόπησης 308
11.1.4 Τηλεπισκόπηση και ΓΣΠ 310
11.2 Επεξεργασία και ανάλυση εικόνας 311
11.2.1 Προεπεξεργασία εικόνας 311
11.2.2 Επεξεργασία εικόνας 314
11.2.3 Ανάλυση και ερμηνεία εικόνας 317
11.3 Αγρομετεωρολογικές εφαρμογές τηλεπισκόπησης 319
11.3.1 Θερμοκρασία επιφάνειας ξηράς και θάλασσας 320
11.3.2 Δείκτες βλάστησης 322
11.3.3 Υδατικό και ενεργειακό ισοζύγιο – Θερμική αδράνεια 324
11.3.4 Εδαφική υγρασία 325
11.3.5 Έλλειμμα νερού 326
11.3.6 Ταξινόμηση χρήσεων γης και καλλιεργειών 327
11.3.7 Παρακολούθηση καλλιεργειών και γεωργικής παραγωγής 328
11.3.8 Εκτίμηση περιβαλλοντικών κινδύνων 331
11.3.9 Γεωργία ακριβείας 332
Βιβλιογραφικές αναφορές 334

Κεφάλαιο 12: Αγρομετεωρολογική προσομοίωση

12.1 Αγρομετεωρολογική μοντελοποίηση 337
12.1.1 Συνιστώσες αγρομετεωρολογικών μοντέλων 337
12.1.2 Απαιτήσεις ακρίβειας αγρομετεωρολογικών μοντέλων 339
12.1.3 Βαθμονόμηση και πιστοποίηση αγρομετεωρολογικών μοντέλων 341
12.2 Συναρτησιακά μοντέλα 342
12.2.1 Μοντέλα βιομάζας 343
12.2.2 Μοντέλα βλάστησης 344
12.2.3 Ημιεμπειρικά μοντέλα για περιοχικές εφαρμογές 344
12.3 Στατιστικά μοντέλα 344
12.3.1 Μοντέλα παλινδρόμησης 345
12.3.2 Ανάλυση τάσεων και παλινδρόμηση 345
12.3.3 Μέθοδοι τηλεπισκόπησης 346
12.3.4 Νέες μεθοδολογίες 347
12.4 Μοντέλα προσομοίωσης 347

12.5 Στοχαστικά μοντέλα 352
12.5.1 Μοντέλα «μαύρου κουτιού» (black box) 353
12.5.2 Συστημικά μοντέλα 354
12.6 Φαινολογικά μοντέλα 355
12.6.1 Κατηγορίες φαινολογικών μοντέλων 358
12.6.2 Αγρομετεωρολογικοί δείκτες 359
12.7 Μοντέλα αξιολόγησης των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής 361
12.7.1 Μοντέλα καλλιεργειών 361
12.7.2 Ζωικά μοντέλα 362
12.7.3 Συστημικά μοντέλα 363
12.7.4 Μοντέλα βιολογικών πόρων 363
12.8 Εποχική κλιματική πρόγνωση 364
12.8.1 Στατιστική προσέγγιση 364
12.8.2 Προσέγγιση αριθμητικής πρόγνωσης καιρού 365
12.8.3 Ποιοτικός έλεγχος προγνώσεων 366
12.8.4 Σημασία εποχικών προγνώσεων 367
Βιβλιογραφικές αναφορές 368

Κεφάλαιο 13: Αγροϋδρολογική προσομοίωση
13.1 Υγρασία εδάφους 371
13.1.1 Έδαφος και νερό 371
13.1.2 Ορισμοί υγρασίας εδάφους και χαρακτηριστικές καμπύλες 371
13.1.3 Παράμετροι υγρασίας εδάφους 373
13.2 Στατιστική ανάλυση αγροϋδρολογικών μεταβλητών 376
13.2.1 Κατανομές πιθανοτήτων και ανάλυση χρονοσειρών 376
13.2.2 Ανάλυση συχνότητας ακραίων τιμών 378
13.3 Μοντέλα βροχόπτωσης-απορροής 383
13.3.1 Ταξινόμηση μοντέλων βροχόπτωσης-απορροής 383
13.3.2 Σχέσεις βροχόπτωσης-απορροής 384
13.3.3 Περιγραφή μοντέλων βροχόπτωσης – απορροής 386
13.4 Νερό για τη γεωργική παραγωγή 393
13.4.1 Αποτελεσματική χρήση βροχόπτωσης στη γεωργία 394
13.4.2 Βελτίωση επάρκειας χρήσης νερού (Water Use Efficiency/WUE) 395
13.5 Διαχείριση υδατικών πόρων στη γεωργία 396
13.5.1 Υδατικό δυναμικό για τη γεωργία 397
13.5.2 Διαχείριση αρδευτικού νερού 397
13.6 Διαχείριση ελλειμματικού νερού και ακραίων συνθηκών 399
13.6.1 Διαχείριση ελλειμματικού νερού 399
13.6.2 Διαχείριση ακραίων αγροϋδρολογικών κινδύνων 401
Βιβλιογραφικές αναφορές 401

Κεφάλαιο 14: Περιβαλλοντικοί κίνδυνοι
14.1. Κλιματική αλλαγή και περιβαλλοντικοί κίνδυνοι 405
14.1.1 Διαχείριση διακινδύνευσης (ρίσκου) περιβαλλοντικών κινδύνων 405
14.1.2 Επιπτώσεις κλιματικής αλλαγής σε περιβαλλοντικούς κινδύνους 407
14.2 Πλημμύρες και πλεονάζουσα βροχή 408
14.2.1 Ζημιές ακραίων βροχοπτώσεων 409
14.2.2 Πλημμυρικές απορροές 410
14.2.3 Αίτια πλημμυρών 411
14.3 Χαλάζι 412
14.3.1 Σχηματισμός χαλαζιού 412
14.3.2 Χωροχρονικά χαρακτηριστικά χαλαζιού 413
14.3.3 Μεθοδολογίες πρόγνωσης και εκτίμησης χαλαζιού 413
14.3.4 Μέθοδοι αντιχαλαζικής προστασίας 415
14.4. Ξηρασία 416

14.4.1 Είδη και ορισμοί ξηρασίας 417
14.4.2 Ποσοτικά χαρακτηριστικά ξηρασίας 419
14.4.3 Ποσοτική εκτίμηση της ξηρασίας 419
14.5 Ερημοποίηση 420
14.5.1 Αίτια και παράγοντες ερημοποίησης 421
14.5.2 Μεθοδολογίες και μοντελοποίηση 423
14.5.3 Στάδια και διαδικασίες ερημοποίησης 423
14.5.4 Αντιμετώπιση της ερημοποίησης 424
14.6 Παγετός 424
14.6.1 Είδη και χαρακτηριστικά παγετού 424
14.6.2 Μέθοδοι εκτίμησης παγετού 426
14.6.3 Επιπτώσεις και προστασία από τον παγετό 428
14.7 Καύσωνας 429
14.7.1 Μετεωρολογικά χαρακτηριστικά του καύσωνα 429
14.7.2 Κλιματική ανασκόπηση του καύσωνα 429
14.7.3 Παραδείγματα και εφαρμογές 430
14.8 Δασικές πυρκαγιές 431
14.8.1 Δασική μετεωρολογία 431
14.8.2 Αίτια δασικών πυρκαγιών 433
14.8.3 Χαρακτηριστικά και είδη δασικών πυρκαγιών 433
14.8.4 Μεθοδολογίες αντιμετώπισης δασικών πυρκαγιών 434
14.8.5 Μέτρα προστασίας και επιπτώσεις των δασικών πυρκαγιών 435
Βιβλιογραφικές αναφορές 436

ΜΕΡΟΣ 6: ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Κεφάλαιο 15: Αγρομετεωρολογική πληροφορία και διαχείριση

15.1 Αγρομετεωρολογικές πληροφορίες 440
15.1.1 Αγρομετεωρολογικές πληροφορίες για μεγάλους οργανισμούς 440
15.1.2 Αγροκλιματικές πληροφορίες 441
15.2 Πλαίσιο αγρομετεωρολογικών υπηρεσιών 443
15.2.1 Αγρομετεωρολογικές υπηρεσίες 443
15.2.2 Υπηρεσίες για το κλίμα στη γεωργία 444
15.3 Συστήματα διάχυσης αγρομετεωρολογικής πληροφορίας 445
15.3.1 Μέθοδοι και τρόποι επικοινωνίας 446
15.3.2 Διάδοση προγνώσεων και προειδοποιήσεων 447
15.3.3 Προγνώσεις πιθανοτήτων 447
15.4 Τύποι και κλίμακες γεωργικής σχεδίασης 448
15.4.1 Πλαίσιο γεωργικής σχεδίασης 448
15.4.2 Σχεδίαση σε επίπεδο αγροκτήματος 450
15.5 Αγρομετεωρολογική διαχείριση διακινδύνευσης (ή ρίσκου) 451
15.5.1 Πλαίσιο διαχείρισης διακινδύνευσης (ή ρίσκου) 451
15.5.2 Διαχείριση αγρομετεωρολογικού κινδύνου 456
Βιβλιογραφικές αναφορές 458

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

Παράρτημα 1: Ευρετήριο ελληνικών όρων 462
Παράρτημα 2: Βραχυγραφίες 466
Παράρτημα 3: Επιλογή ξενόγλωσσης βιβλιογραφίας στην αγρομετεωρολογία 469
Παράρτημα 4: Σύμβολα-Μονάδες-Ορισμοί 470
Παράρτημα 5: Πίνακες φαινολογικών μοντέλων 473

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν βιβλίο απευθύνεται σε προπτυχιακούς και μεταπτυχιακούς φοιτητές Γεωπονικών ή Πολυτεχνικών Σχολών, ή περιβαλλοντικών, ή γεωεπιστημών, ή/και θετικών επιστημών, καθώς επίσης σε ερευνητές και επαγγελματίες στους παραπάνω επιστημονικούς τομείς, αλλά και στους τομείς του αγροτικού περιβάλλοντος ευρύτερα και των οικοσυστημάτων. Στο βιβλίο επιχειρείται μια σύγχρονη, διεπιστημονική, πολυ-επίπεδη, πολλαπλής κλίμακας και επικαιροποιημένη προσέγγιση στην αγρομετεωρολογία, που παρουσιάζει διαχρονικά πολύ σημαντική σταδιακή επιστημονική και τεχνολογική εξέλιξη και αυξανόμενη σημασία.

Το παρόν δομείται σε 6 μέρη (ενότητες) ως ακολούθως.

Το 1ο μέρος (Προλεγόμενα) περιλαμβάνει τα Κεφάλαια 1 και 2, στα οποία περιγράφονται και αναλύονται, αντίστοιχα, το αντικείμενο και οι βασικές έννοιες της αγρομετεωρολογίας και η βασική μετεωρολογία για τη γεωργία.

Το 2ο μέρος (Αγρομετεωρολογική ανάλυση) περιλαμβάνει τα Κεφάλαια 3, 4 και 5, στα οποία αναλύεται το εύρος των μετεωρολογικών μεταβλητών και παραμέτρων κυρίως στο οριακό στρώμα, που συνθέτουν τη σύγχρονη αγρομετεωρολογική ανάλυση. Ειδικότερα, στο Κεφάλαιο 3 εξετάζονται η ηλιακή ακτινοβολία, οι νόμοι που τη διέπουν, το ισοζύγιο ενέργειας και οι ανταλλαγές θερμότητας στο οριακό στρώμα της ατμόσφαιρας, όπου αναπτύσσονται οι ζώντες οργανισμοί, που αποτελούν το κύριο αντικείμενο της αγρομετεωρολογίας. Στο Κεφάλαιο 4 αναλύονται η βροχόπτωση και η εξατμισοδιαπνοή. Στο Κεφάλαιο 5 περιγράφονται οι βιολογικές επιπτώσεις καιρού και κλίματος στους ζώντες οργανισμούς, στα φυτά και τα ζώα. Αρχικά, παρουσιάζονται βιομετεωρολογικοί και βιοκλιματικοί δείκτες και παράμετροι και στη συνέχεια αναλύεται η αεροβιολογία, δηλαδή η μεταφορά οργανισμών και βιολογικά σημαντικών υλικών μέσω της ατμόσφαιρας.

Το 3ο μέρος (Αγρομετεωρολογία για τη γεωργική παραγωγή) περιλαμβάνει τα Κεφάλαια 6, 7 και 8, στα οποία αναλύονται, αντίστοιχα, οι διεργασίες και σχέσεις μεταξύ αγρομετεωρολογίας και φυτικής παραγωγής, η χερσαία και υδρόβια ζωική παραγωγή, καθώς και οι εχθροί και οι ασθένειες ζώντων οργανισμών.

Το 4ο μέρος (Κλίμα και γεωργία) περιλαμβάνει τα Κεφάλαια 9 και 10, στα οποία γίνεται αναφορά, αντίστοιχα, στην κλιματολογία από τη σκοπιά της γεωργίας, καθώς και στην επικαιροποιημένη προσέγγιση της κλιματικής μεταβλητότητας και αλλαγής στη γεωργία στο τρίπτυχο επιπτώσεις-αντιμετώπιση-προσαρμογή.

Το 5ο μέρος (Αγρομετεωρολογική προσομοίωση και συστήματα) περιλαμβάνει τα Κεφάλαια 11, 12, 13 και 14, στα οποία, με βάση το 2ο και 3ο μέρος, παρουσιάζονται και επεξηγούνται επικαιροποιημένες διαδικασίες και μεθοδολογίες προσομοίωσης, καθώς και συστήματα, που εφαρμόζονται στην αγρομετεωρολογία. Ειδικότερα, το Κεφάλαιο 11 καλύπτει την αγρομετεωρολογική τηλεπισκόπηση, στο Κεφάλαιο 12 παρουσιάζεται η αγρομετεωρολογική προσομοίωση, στο Κεφάλαιο 13 περιγράφεται η αγρουδρολογική προσομοίωση, ενώ στο Κεφάλαιο 14 αναλύονται οι περιβαλλοντικοί κίνδυνοι, που ενδιαφέρουν τη γεωργία.

Το 6ο μέρος (Επίλογος) περιλαμβάνει το Κεφάλαιο 15, στο οποίο επιχειρείται σύνθεση των προηγούμενων κεφαλαίων σε θέματα σύγχρονων μεθόδων αγρομετεωρολογικής διαχείρισης και παρεχόμενης πληροφορίας.

Νικόλαος Ρ. Δαλέζιος
Βόλος, Οκτώβριος 2015

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στο παρόν βιβλίο, αποτέλεσμα της διαχρονικής εξέλιξης των πανεπιστημιακών παραδόσεων στο μάθημα της Αγρομετεωρολογίας, έχουν ενσωματωθεί πολύτιμα σχόλια ανθρώπων περισσότερο ειδικών από εμένα σε ορισμένα πεδία.

Το βιβλίο δεν θα είχε ολοκληρωθεί χωρίς τη γενναιόδωρη βοήθεια πολλών. Για το λόγο αυτό, θα ήθελα να ευχαριστήσω τωρινούς και παλαιούς συναδέλφους, για τη βοήθεια που έχουν παράσχει όλα αυτά τα χρόνια στο ευρύτερο γνωστικό αντικείμενο της αγρομετεωρολογίας στο Πανεπιστήμιο. Αρχικά, ευχαριστώ τους Ομότιμους Καθηγητές Δ. Μεταξά κα Γ. Τερζίδη, καθόσον αποτέλεσαν πηγή έμπνευσης για εμένα σε όλη την ακαδημαϊκή μου διαδρομή. Επιπλέον, αποτίω φόρο τιμής στους Καθηγητές Ζ. Παπαζαφειρίου και Α. Φλόκα, που δεν είναι πλέον στη ζωή, γιατί επίσης με ενέπνευσαν. Επίσης, ευχαριστώ τους κριτικούς αναγνώστες του βιβλίου, Καθηγητές Δ. Μελά και Π. Νάστο, γιατί, με τις σημαντικές και χρήσιμες επισημάνσεις τους, συνέβαλαν στη βελτίωσή του. Επιπλέον, για τη βοήθειά τους σε συγκεκριμένα κεφάλαια, οφείλω να ευχαριστήσω τον Καθηγητή Δ. Παπαμιχαήλ, την Prof. Ana Maria Tarquis (Spain), τη δρα Anne Gobin (Belgium) και τον δρα Pavol Nejedlik (Slovakia).

Στο βιβλίο έχει επίσης συμβάλει διαχρονικά η παλαιά ομάδα του Εργαστηρίου Αγρομετεωρολογίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, με τον Καθηγητή Α. Λουκά, τον δρα Χ. Δομενικιώτη, τον δρα Δ. Μπαμπζέλη, τον δρα Λ. Βασιλειάδη, τον δρα Μ. Σπηλιωτόπουλο, τις Α. Μπλάντα, Χ. Μακρή και Α. Κριτσάκη, και τους Ν. Παπαγεωργίου και Θ. Γεωργίου.

Στη δημιουργία του βιβλίου ανεκτίμητη ήταν η συμβολή της συγγραφικής ομάδας, της Φωτεινής Ξιφαρά στη γλωσσική επιμέλεια, του Σταμάτη Παπαδήμου στη γραφιστική επιμέλεια, και του Πάνου Βλασταρίδη και της δρος Αγγελικής Στεφοπούλου στην τεχνική επεξεργασία. Επίσης, ιδιαίτερη μνεία πρέπει να γίνει στο προσωπικό του Κάλλιπου, για την ακούραστη και συνεχή βοήθεια και ενθάρρυνση, που μας παρείχαν.

Επιπλέον, πρέπει να ευχαριστήσω θερμά την οικογένειά μου, για τη δημιουργία ενός ευνοϊκού οικιακού περιβάλλοντος εργασίας, αλλά και για τη βοήθεια που μου προσέφερε σε θέματα προετοιμασίας του βιβλίου.

Επισημαίνεται ότι το υλικό του βιβλίου προέρχεται από σημειώσεις και εργασίες του συγγραφέα. Τέλος, πρέπει να επισημάνω ότι έχει γίνει κάθε προσπάθεια για τον προσδιορισμό και την αναγνώριση των πρωτογενών πηγών, αν και μπορεί να υπάρχουν συμπτωματικές παραλείψεις ή σφάλματα οι οποίες εάν επισημανθούν αναμένεται να αποκατασταθούν.

Νικόλαος Ρ. Δαλέζιος
Βόλος, Οκτώβριος 2015

ΜΕΡΟΣ 1: ΠΡΟΛΕΓΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1: Αντικείμενο της αγρομετεωρολογίας
Κεφάλαιο 2: Βασική μετεωρολογία για τη γεωργία

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1
ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΑΓΡΟΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑΣ

Σύνοψη
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται αρχικά οι ορισμοί και οι στόχοι της αγρομετεωρολογίας, και μελετώνται το αντικείμενό της, το εύρος της, καθώς και οι σχέσεις και οι διαφοροποιήσεις της με συναφή αντικείμενα. Επίσης, επισημαίνονται η σπουδαιότητα και η σημασία της, παρουσιάζεται μια ιεραρχική μεθοδολογική προσέγγισή της, καθώς και οι τρέχουσες και μελλοντικές προκλήσεις της. Τέλος, περιγράφονται ορισμένες δυνατότητες της αγρομετεωρολογίας στην ελληνική γεωργία.

Προαπαιτούμενη γνώση
Ο αναγνώστης δεν απαιτείται να έχει ειδικές γνώσεις.

1.1 Ορισμοί και στόχοι της αγρομετεωρολογίας

Η αγρομετεωρολογία ασχολείται με τους μετεωρολογικούς, υδρολογικούς, εδαφολογικούς και βιολογικούς παράγοντες που επιδρούν στη γεωργική παραγωγή και εξετάζει τη διασύνδεση μεταξύ γεωργίας, δασών και περιβάλλοντος. Στόχος είναι να επεξηγηθούν αυτές οι επιδράσεις και να βοηθηθούν οι αγρότες, ώστε να προετοιμαστούν για την εφαρμογή αυτής της υποστηρικτικής πληροφορίας και γνώσης στις αγρομετεωρολογικές πρακτικές και μέσω αγρομετεωρολογικών υπηρεσιών (WMO, 2010).
Με βάση έναν σχετικό σύγχρονο ορισμό (Stigter, 2010), επισημαίνεται:

> Η γεωργική μετεωρολογία ασχολείται με το νερό, τη θερμότητα, τον αέρα και την ανάπτυξη σχετικής βιομάζας, πάνω και κάτω από το έδαφος, στο περιβάλλον της γεωργικής παραγωγής. Αυτό είναι το φυσικό περιβάλλον φυτών, δένδρων, ζώων και οργανισμών, σημαντικών για την τροφή και την παραγωγή ζωοτροφών, καθώς και για την παραγωγή φυσικών υλικών που χρησιμοποιούνται στις γεωργικές εργασίες και τη βιομηχανία. Αυτό περιλαμβάνει εχθρούς και ασθένειες, καθώς και ανάπτυξη βιομάζας, ακόμα και για ενεργειακούς σκοπούς. Για το καθένα από τα τρία παραπάνω στοιχεία, δηλαδή το νερό, τη θερμότητα και τον αέρα, μπορεί να αποδίδονται συνέπειες και χρήσεις. Τέλος, το περιβάλλον της γεωργικής παραγωγής περιλαμβάνει επίσης κοινωνικές και οικονομικές συνιστώσες, των οποίων διάφορα θέματα πρέπει να εξεταστούν στην αγρομετεωρολογία.

Επίσης, ο ορισμός της βιομετεωρολογίας, όπως τον υιοθετεί η Διεθνής Κοινωνία της Βιομετεωρολογίας (Hoppe, 2000), έχει ως εξής:

> Βιομετεωρολογία είναι ένα διεπιστημονικό πεδίο γνώσης που ασχολείται με την εφαρμογή πεδίων της μετεωρολογίας και κλιματολογίας σε βιολογικά συστήματα.

Η γενική στόχευση της βιομετεωρολογίας περιλαμβάνει όλα τα είδη αλληλεπιδράσεων μεταξύ ατμοσφαιρικών διαδικασιών και ζώντων οργανισμών, δηλαδή φυτών, ζώων και ανθρώπων. Με τον ορισμό αυτό καθίσταται σαφές ότι υπάρχουν γενικά τρία πεδία της βιομετεωρολογίας: η φυτική, η ζωική και η ανθρώπινη βιομετεωρολογία. Δύο πεδία καλύπτονται από το αντικείμενο της αγρομετεωρολογίας, το φυτικό πεδίο και το ζωικό πεδίο. Το τρίτο πεδίο, δηλαδή η ανθρώπινη βιομετεωρολογία, βρίσκεται εκτός των ορίων της αγρομετεωρολογίας.
Με την ευρεία έννοια, αγρομετεωρολογία είναι ο κλάδος της εφαρμοσμένης μετεωρολογίας που μελετά την ανταπόκριση των ζώντων οργανισμών στο φυσικό περιβάλλον και αποτελεί το σύνδεσμο μεταξύ μετεωρολογίας και γεωργίας.
Στο Σχήμα 1.1 απεικονίζεται η ταξινόμηση της εφαρμοσμένης μετεωρολογίας. Στο πρώτο επίπεδο ταξινομούνται η υδρομετεωρολογία, η τεχνική μετεωρολογία, με τρεις επιμέρους κλάδους, και η βιομετεωρολογία. Όπως φαίνεται στο σχήμα, η βιομετεωρολογία περιλαμβάνει επίσης τρεις κλάδους, εκ των

οποίων στον πρώτο ανήκουν η γεωργική μετεωρολογία ή αγρομετεωρολογία και η φαινολογία, στο δεύτερο η δασική μετεωρολογία και στον τρίτο η ανθρώπινη βιομετεωρολογία. Στόχος της αγρομετεωρολογίας είναι η βελτίωση ή/και η μεγιστοποίηση της αγροτικής παραγωγής μέσω περισσότερο ακριβούς πρόγνωσης και ελέγχου του φυσικού περιβάλλοντος, για την απώτερη βελτιστοποίηση της διαχείρισης του αγροτικού περιβάλλοντος. Η πρόγνωση μπορεί να καλύπτει ένα εύρος πεδίων, που περιλαμβάνει ποσοτικές προγνώσεις σοδειάς, καθώς και παρακολούθηση γεωργικής παραγωγής, με στόχο την αναβάθμιση της ποιότητας από τη μια μεριά, μέχρι την εκτίμηση της παραγωγής του ζωικού κεφαλαίου και των κλιματικών καταστροφών από την άλλη. Ο έλεγχος του φυσικού περιβάλλοντος μπορεί να περιλαμβάνει πρόληψη παγετού, έλεγχο πλημμύρας, ρύθμιση θερμοκρασίας σε στάβλους, καθώς και τροποποίηση καιρού για ξηρασία και χαλάζι, για τη βέλτιστη διαχείριση του αγροτικού περιβάλλοντος.

<table>
<tr><td colspan="7">Εφαρμοσμένη μετεωρολογία</td></tr>
<tr><td>Υδρομετεωρολογία</td><td colspan="3">Τεχνική μετεωρολογία</td><td colspan="3">Βιομετεωρολογία</td></tr>
<tr><td></td><td>Μετεωρολογία κατασκευών</td><td>Μετεωρολογία συγκοινωνιών</td><td>Βιομηχανική μετεωρολογία</td><td>Γεωργική μετεωρολογία</td><td>Δασική μετεωρολογία</td><td>Ανθρώπινη βιομετεω-ρολογία</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td>Μετεωρολογία μεταφορών</td><td></td><td>Φαινολογία</td><td></td><td></td></tr>
</table>

Σχήμα 1.1. *Ταξινόμηση εφαρμοσμένης μετεωρολογίας.*

Με τη στενή έννοια, αγρομετεωρολογία είναι η μελέτη των φυσικών διεργασιών στην ατμόσφαιρα που δημιουργούν τον καιρό και σχετίζεται με την αγροτική παραγωγή. Η αγρομετεωρολογία είναι μια οριζόντια επιστήμη, που εφαρμόζει τη φυσική της ατμόσφαιρας και του εδάφους στη γεωργία. Ακόμα, μελέτες και έρευνες του μικροκλίματος φυτών και ζώων, καθώς και στατιστική επεξεργασία μετεωρολογικών δεδομένων, αποτελούν αντίστοιχα αντικείμενα της αγρομετεωρολογίας. Το φυσικό περιβάλλον περιλαμβάνει ιδιότητες του φυσικού οικοσυστήματος, όπου παράγονται ζώντα όντα, όπως αέρας, έδαφος, νερό, φυτά, ζώα, μικροοργανισμοί και ξένη ύλη. Οι ζώντες οργανισμοί που μελετώνται στην αγρομετεωρολογία περιορίζονται στα καλλιεργούμενα φυτά, το ζωικό κεφάλαιο, τα έντομα και τους μικροοργανισμούς οικονομικής σημασίας.
Το βιβλίο αυτό περιλαμβάνει παραρτήματα, όπως το παράρτημα 1, που αναφέρεται στο ευρετήριο ελληνικών όρων, το παράρτημα 2, που αφορά τις βραχυγραφίες, το παράρτημα 3, που αναφέρεται στην ανασκόπηση ξενόγλωσης βιβλιογραφίας, το παράρτημα 4, που παραθέτει σύμβολα και μονάδες, καθώς και το παράρτημα 5, που παρουσιάζει πίνακες φαινολογικών μοντέλων.

1.2. Αντικείμενο της αγρομετεωρολογίας

Η αγρομετεωρολογία είναι ένα διεπιστημονικό πεδίο γνώσης, όπου τα κύρια επιστημονικά πεδία είναι ατμοσφαιρικές επιστήμες και επιστήμες γης, που ενδιαφέρονται για το φυσικό περιβάλλον, καθώς και επιστήμες φυτών και ζώων, περιλαμβανομένων φυσιολογίας, εντομολογίας, παρασιτολογίας και φυτοπροστασίας, που ασχολούνται με τα θέματα της βιόσφαιρας. Στην ουσία, η αγρομετεωρολογία είναι ένας συνδυασμός φυσικών και βιολογικών επιστημών και αποτελεί σημαντικό σύνδεσμο μεταξύ τους. Ο διεπιστημονικός χαρακτήρας της είναι συγχρόνως το μεγαλύτερο πλεονέκτημα, αλλά και το μεγαλύτερο μειονέκτημά της (Hollinger, 1994). Το πλεονέκτημά της συνίσταται στην κατανόηση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των φυσικών και βιολογικών κόσμων. Αντίθετα, το μειονέκτημά της οφείλεται στην επιστημονική πραγματικότητα ότι η γεωργική μετεωρολογία δεν εκτιμάται πλήρως από την παραδοσιακή προσέγγιση στις φυσικές και βιολογικές επιστήμες. Η προσέγγιση της αγρομετεωρολογίας είναι περισσότερο ολιστική από όσο είναι η προσέγγιση της κλιματολογίας ή της βιολογίας (Hatfield, 1994· Hollinger, 1994).
Κρίνεται σκόπιμο να επισημανθεί ότι ο διεπιστημονικός χαρακτήρας της αγρομετεωρολογίας συνδυάζει συγχρόνως το φυσικό περιβάλλον και τις βιολογικές αντιδράσεις σε φυσικές συνθήκες. Η αγρομετεωρολογία εφαρμόζει τις πιο σχετικές μετεωρολογικές μεθόδους, για να βοηθήσει τους αγρότες στην πιο αποτελεσματική αξιοποίηση του φυσικού περιβάλλοντος, με στόχο τόσο την ποιοτική όσο και την ποσοτική βελτίωση της γεωργικής παραγωγής, αλλά και τη διατήρηση της βιωσιμότητας του οικοσυστήματος (Burke, 1968). Στο πρώτο στάδιο της προσέγγισης μορφοποιείται μια ακριβής περιγραφή του φυσικού περιβάλλοντος και των

βιολογικών αντιδράσεων και ανταποκρίσεων. Στο δεύτερο στάδιο ερμηνεύονται και επεξηγούνται οι βιολογικές αντιδράσεις σχετικά με το φυσικό περιβάλλον. Στο τρίτο στάδιο επιχειρούνται αγρομετεωρολογικές προγνώσεις. Το τέταρτο και τελευταίο στάδιο περιλαμβάνει την ανάπτυξη αγρομετεωρολογικών υπηρεσιών και στρατηγικών, καθώς και συστημάτων υποστήριξης για στρατηγικές και τακτικές αποφάσεις στο πεδίο, όπως και την υλοποίηση των αποφάσεων αυτών σε συνεργασία με ειδικούς σε θέματα γεωργίας, ζωικής παραγωγής και δασολογίας. Στον Πίνακα 1.1 παρουσιάζεται η ιεραρχική προσέγγιση αγρομετεωρολογικών υπηρεσιών.

1.	Μορφοποίηση φυσικού περιβάλλοντος και βιολογικών αντιδράσεων
2.	Ερμηνεία βιολογικών αντιδράσεων
3.	Αγρομετεωρολογικές προγνώσεις
4.	Αγρομετεωρολογικές υπηρεσίες και στρατηγικές

Πίνακας 1.1 *Ιεραρχική προσέγγιση αγρομετεωρολογικών υπηρεσιών.*

Υπάρχει μια προοδευτική αύξηση των εφαρμογών της μετεωρολογίας στη γεωργία τις τελευταίες δεκαετίες, που οφείλεται τόσο σε τεχνολογικές όσο και σε εργαστηριακές και θερμοκηπιακές έρευνες, καθώς και σε έρευνες πεδίου, όπου οι βιολογικές αντιδράσεις και ανταποκρίσεις έχουν μετρηθεί σε ελεγχόμενες συνθήκες. Καθίσταται σαφές ότι η μεταφορά στο πεδίο εργαστηριακών και θερμοκηπιακών αποτελεσμάτων αποτελεί αντικείμενο της αγρομετεωρολογίας. Ακόμα, η σύγχρονη τεχνολογία, με μεθόδους και τεχνικές όπως η τηλεπισκόπηση, η προσομοίωση, η ψηφιακή ανάλυση δορυφορικών στοιχείων, τα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών, η γεωπληροφορική, τα συστήματα υποστήριξης αποφάσεων και οι τεχνολογίες πληροφορικής και επικοινωνιών έχουν συμβάλει στην αύξηση των μετεωρολογικών εφαρμογών στη γεωργία, με έμφαση στην πρόγνωση και την παρακολούθηση της γεωργικής παραγωγής, καθώς και των φυσικών περιβαλλοντικών κινδύνων (ακραίων μετεωρολογικών φαινομένων).
Στο Σχήμα 1.2 απεικονίζεται το αγρομετεωρολογικό σύστημα. Ειδικότερα, παρουσιάζονται οι συνιστώσες του συστήματος, η αλληλουχία των διαδικασιών, η διασύνδεση μεταξύ τους, καθώς και ένα εύρος εφαρμογών.

1.3. Εύρος της αγρομετεωρολογίας

Η αγρομετεωρολογία[1] περιλαμβάνει:

α) τις γήινες (φυσικές) επιστήμες, και συγκεκριμένα τη φυσική της ατμόσφαιρας (π.χ. μετεωρολογία και κλιματολογία), όπως επίσης τη γεωλογία και την υδρολογία,

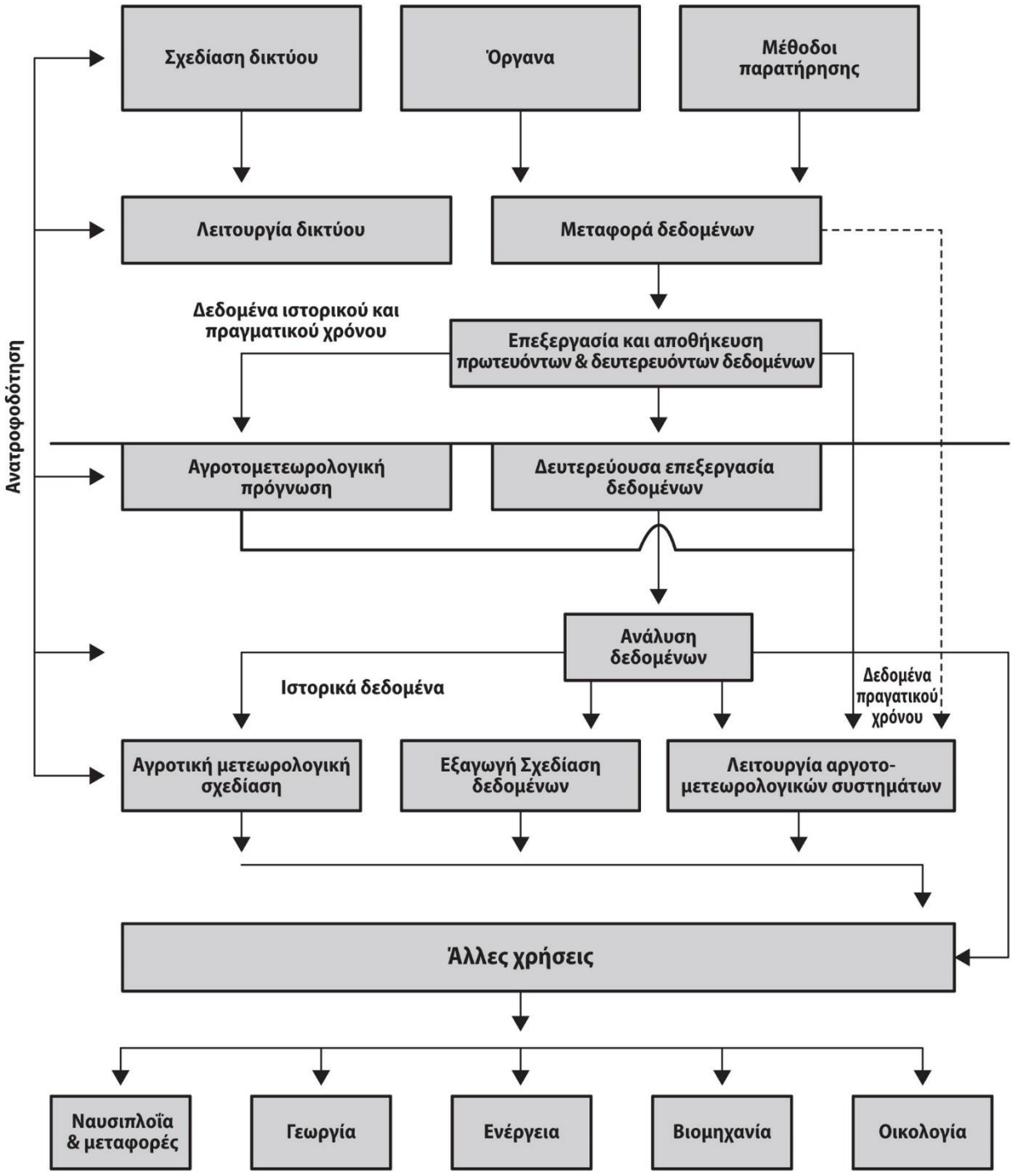
β) ορισμένες βιολογικές επιστήμες, και συγκεκριμένα τη βοτανολογία, τη φυσιολογία και την παθολογία φυτών και ζώων, αλλά και σχετικές τεχνολογίες της γεωργίας.

Μια πιο λεπτομερής περιγραφή του εύρους της αγρομετεωρολογίας δίνεται στις εισαγωγικές παραγράφους του οδηγού του Παγκόσμιου Μετεωρολογικού Οργανισμού (WMO, 2003), που αφορά την πρακτική αγρομετεωρολογία:

> Η αγρομετεωρολογία ενδιαφέρεται για την αλληλεπίδραση μεταξύ των μετεωρολογικών και υδρολογικών παραγόντων από τη μια και της γεωργίας με την ευρύτερη έννοια από την άλλη, συμπεριλαμβάνοντας τα οπωροκηπευτικά, την κτηνοτροφία και τη δασοκομία. Το πεδίο δράσης της εκτείνεται από το στρώμα εδάφους του βαθύτερου φυτού και των ριζών του, μέσω του στρώματος αέρος κοντά στο έδαφος, όπου αναπτύσσονται οι σπόροι και τα δέντρα και ζουν τα ζώα, μέχρι τα ανώτερα επίπεδα ενδιαφέροντος της αεροβιολογίας, με ιδιαίτερη έμφαση στη μεταφορά των σπόρων, της γύρης και εντόμων. Εκτός από το φυσικό κλίμα και τις τοπικές του διακυμάνσεις, η αγρομετεωρολογία ασχολείται και με τις τεχνητές μεταβολές στο περιβάλλον (π.χ. ανεμοφράχτες, άρδευση, θερμοκήπια, τροποποίηση καιρού κτλ.), τις κλιματικές συνθήκες κατά την αποθήκευση είτε σε κλειστό χώρο είτε στον αγρό, τις περιβαλλοντικές συνθήκες στα καταφύγια των ζώων και στα αγροκτήματα, καθώς και τις συνθήκες μεταφοράς γεωργικών προϊόντων μέσω γης, θάλασσας ή αέρα.

[1] Για την αγρομετεωρολογία, βλ. επίσης, μεταξύ πολλών άλλων, Δαλέζιος, 2005· Griffiths,1994· Holden, 2001· Monteith & Usworth, 2007· Murthy, 2002· Oke, 1988· Mavi & Tupper, 2004· Prasada Rao, 2008· Seemann κ.ά., 1979· Smith, 2008· Smith, 1975· Stigter, 2010· Wang, 1972· WMO, 2001· WMO, 2003· WMO, 2010.

Αυτονόητα, σε αυτό το σημείο αξίζει να επισημανθεί ότι πρέπει να εξεταστεί σε βάθος η σημασία των μετεωρολογικών παραγόντων όταν μελετώνται θέματα αλλαγών ή επικείμενων αλλαγών στη χρήση γης. Ειδικά, στις περισσότερο αναπτυγμένες και εύκρατες περιοχές υπάρχει έντονη πίεση στην καλλιεργούμενη γη, εξαιτίας της αστικής εξάπλωσης. Σε κάθε προσπάθεια θα έπρεπε να αναγνωρίζεται και να αξιολογείται η αγροκλιματική διάσταση, ώστε να μη χάνονται οι πιο παραγωγικές περιοχές ή, τουλάχιστον, να αναγνωρίζεται το πραγματικό κόστος της απώλειας και, κατόπιν, να γίνεται αποδεκτό.



Σχήμα 1.2. *Αγρομετεωρολογικό σύστημα.*

Στη συνέχεια εξετάζεται η σχέση μεταξύ καιρού και γεωργίας, που αφορά έξι κύριες ενότητες: α) το έδαφος, β) τα φυτά, γ) τα ζώα του αγρού, δ) τους εχθρούς, τις ασθένειες και τα ζιζάνια των καλλιεργειών και των ζώων, ε) τα κτίρια και τον εξοπλισμό των αγροκτημάτων, και τη λειτουργία των αγροκτημάτων, και στ) την τεχνητή τροποποίηση της μετεωρολογικής και υδρολογικής δίαιτας, δηλαδή την τροποποίηση του καιρού. Αναλυτικότερα:

1.3.1. Έδαφος

Οι καιρικές συνθήκες είναι ένας σημαντικός παράγοντας στη δημιουργία και κατόπιν στην αναγνώριση της φύσης του εδάφους. Το κλίμα και ο καιρός επηρεάζουν μηχανικά, φυσικά και χημικά τα χαρακτηριστικά του εδάφους, τους οργανισμούς που περιέχει και την ικανότητά του να απορροφά και να ελευθερώνει θερμότητα και υγρασία. Η βροχή μπορεί να προσθέτει χημικά στοιχεία στο έδαφος, τα οποία απομακρύνει όμως ταυτόχρονα με την έκπλυση. Η μηχανική κατάσταση του εδάφους, όπως επηρεάζει την καλλιέργεια, τη ζιζανιοκτονία, τη συγκομιδή και τη διαχείριση των βοσκοτόπων, έτσι επηρεάζεται και η ίδια σημαντικά από τις τοπικές καιρικές συνθήκες. Όσον αφορά στο παγκόσμιο πρόβλημα της διάβρωσης, τόσο ο αέρας όσο και το νερό επηρεάζονται ουσιαστικά από τους γεωγραφικούς και τους τοπικούς καιρικούς παράγοντες. Όμως ο βαθμός διάβρωσης ενός κομματιού γης καθορίζεται επίσης σημαντικά από την ύπαρξη και την πυκνότητα της φυτικής κάλυψης. Σε όλες τις περιοχές με καθορισμένη περιοδική διακύμανση στον καιρό, οι εποχικές αλλαγές επηρεάζουν ουσιαστικά την κατάσταση του εδάφους. Το αποτέλεσμα είναι ότι επηρεάζονται οι καλλιεργητικές εργασίες με την εποχική διακύμανση των βροχοπτώσεων σε μεσογειακά ή εύκρατα κλίματα, καθόσον υπάρχει ανισοκατανομή στη διαθεσιμότητα νερού στα διάφορα βλαστικά στάδια ανάπτυξης των καλλιεργειών.

1.3.2. Φυτά

Τα φυτά επηρεάζονται σε κάθε στάδιο της ανάπτυξής τους από τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Η επίδραση του καιρού επηρεάζει την περίοδο πριν από τη φύτευση, μέχρι και μετά τη συγκομιδή. Η ποιότητα του σπόρου που συλλέγεται εξαρτάται από τις μετεωρολογικές συνθήκες στη διάρκεια του χρόνου κατά τον οποίο παράχθηκε, αλλά ακόμα και στα προηγούμενα χρόνια, καθώς η παραγωγικότητα ορισμένων φυτικών καλλιεργειών, όπως τα αμπέλια, μπορεί να επηρεαστεί από τον καιρό σε πολύ προηγούμενες περιόδους. Τα δέντρα των δασών είναι ίσως το πιο προφανές παράδειγμα μιας δενδρώδους καλλιέργειας στις οποίες ο καιρός τα τελευταία χρόνια ή/και τις τελευταίες δεκαετίες συμβάλλει στην τελική απόδοση. Διαδικασίες μετά τη συγκομιδή, όπως η ξήρανση του χόρτου και άλλων φυτειών, επηρεάζονται από τον εποχικό καιρό, όπως και η ικανότητα των φρούτων, των λαχανικών και άλλων προϊόντων να διατηρούν την ποιότητά τους στην αποθήκη. Οι μετεωρολογικοί παράγοντες παίζουν σημαντικό ρόλο στην παρουσία και την καταπολέμηση των δασικών πυρκαγιών.

1.3.3. Ζώα του αγρού

Εκτός από τα άμεσα αποτελέσματα του κλίματος σε όλα τα στάδια της ζωής, αλλά και στην ανάπτυξη και την κατάσταση των υγιών και καλοτρεφόμενων ζώων, όπως και των ασθενών και μη επαρκώς διατρεφόμενων (κυρίως, αλλά όχι απολύτως, με βάση τα αποτελέσματα του υπερβολικού ψύχους ή της υπερβολικής ζέστης), ο καιρός επηρεάζει τα ζώα μέσω κυρίως της τροφής τους (π.χ. καλλιεργήσιμα προϊόντα) και των εδαφών στα οποία διαμένουν. Ο καιρός και το κλίμα επηρεάζουν τη διατροφή, την ανάπτυξη και την υγεία τους, και συνεπώς τη γεωγραφική τους εξάπλωση. Επίσης επηρεάζονται η ποσότητα και η ποιότητα των ζωικών προϊόντων, αλλά και η επεξεργασία και η δυνατότητα συντήρησης και μεταφοράς τους.

1.3.4. Ασθένειες, εχθροί και ζιζάνια των φυτών και των ζώων

Το αποτέλεσμα των ασθενειών και των εχθρών φυτών και ζώων έχει τρεις πτυχές. Ο καιρός επηρεάζει την ευαισθησία των φυτών και των ζώων σε επιθέσεις από ζιζάνια και ασθένειες. Επιπλέον, εισέρχεται στη βιολογία των εντόμων και των οργανισμών που προκαλούν ασθένειες, με συνέπεια να επηρεάζει τη φύση, τον αριθμό και τη δραστηριότητα των ζιζανίων και το μέγεθος της παθογόνου δράσης της ασθένειας. Σε σημαντικές περιπτώσεις, η επιδημιολογία της ασθένειας (διάδοση, μεταφορά με τον άνεμο) και ο έλεγχος ή η καταστροφή της εξαρτώνται από τους ατμοσφαιρικούς παράγοντες.

1.3.5. Κτίρια και εξοπλισμός των αγροκτημάτων

Για το σχεδιασμό των κτιριακών εγκαταστάσεων, ειδικά αυτών στις οποίες στεγάζονται ζώα ή αποθηκεύονται αγροτικά προϊόντα, πρέπει να ληφθούν υπόψη οι κλιματικές συνθήκες. Η επιλογή των μηχανημάτων των εγκαταστάσεων, το κόστος συντήρησης και η βέλτιστη εγκατάσταση σε οποιαδήποτε περίπτωση, τόσο των μηχανημάτων όσο και των εργασιών που απαιτούνται, έχει σχέση με τον καιρό.

1.3.6. Τεχνητή μεταβολή των μετεωρολογικών και υδρολογικών παραγόντων

Η άρδευση, οι ανεμοφράχτες και οι ζώνες ασφαλείας, η αποθήκευση και η συντήρηση του χιονιού και του νερού, καθώς και οι πρακτικές του εδάφους έχουν σημαντική επίδραση σε ορισμένες πλευρές του τοπικού περιβάλλοντος, όπως η εδαφική υγρασία, η ταχύτητα του ανέμου και η ατμοσφαιρική υγρασία. Ο έλεγχος των περιβαλλοντικών συνθηκών πραγματοποιείται κυρίως με τη χρήση των θερμοκηπίων και την εντατική στέγαση των ζώων (WMO, 2001). Ενώ επιτυγχάνονται (μερικές φορές, σε σημαντικό επίπεδο)οι διάφοροι βαθμοί αυτονομίας των εξωτερικών συνθηκών , ωστόσο το κόστος των υλικών και της ενέργειας που απαιτείται για την επίτευξη της αυτονομίας τείνει να αυξάνεται, καθώς η διαφορά μεταξύ του επιθυμητού εσωτερικού κλίματος και του καιρού και κλίματος στο εξωτερικό κέλυφος της κατασκευής γίνεται μεγαλύτερη. Σε αυτή την ενότητα περιλαμβάνεται και η εκτίμηση των κλιματικών αλλαγών σχετικά με τη γεωργία, τόσο ποσοτικά όσο και ποιοτικά, που βοηθά ή προκαλείται από την ανθρώπινη δραστηριότητα. Ως παράδειγμα αναφέρονται οι αλλαγές στο διοξείδιο του άνθρακα που περιέχει η ατμόσφαιρα, λόγω της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων, όπως το κάρβουνο και το πετρέλαιο.

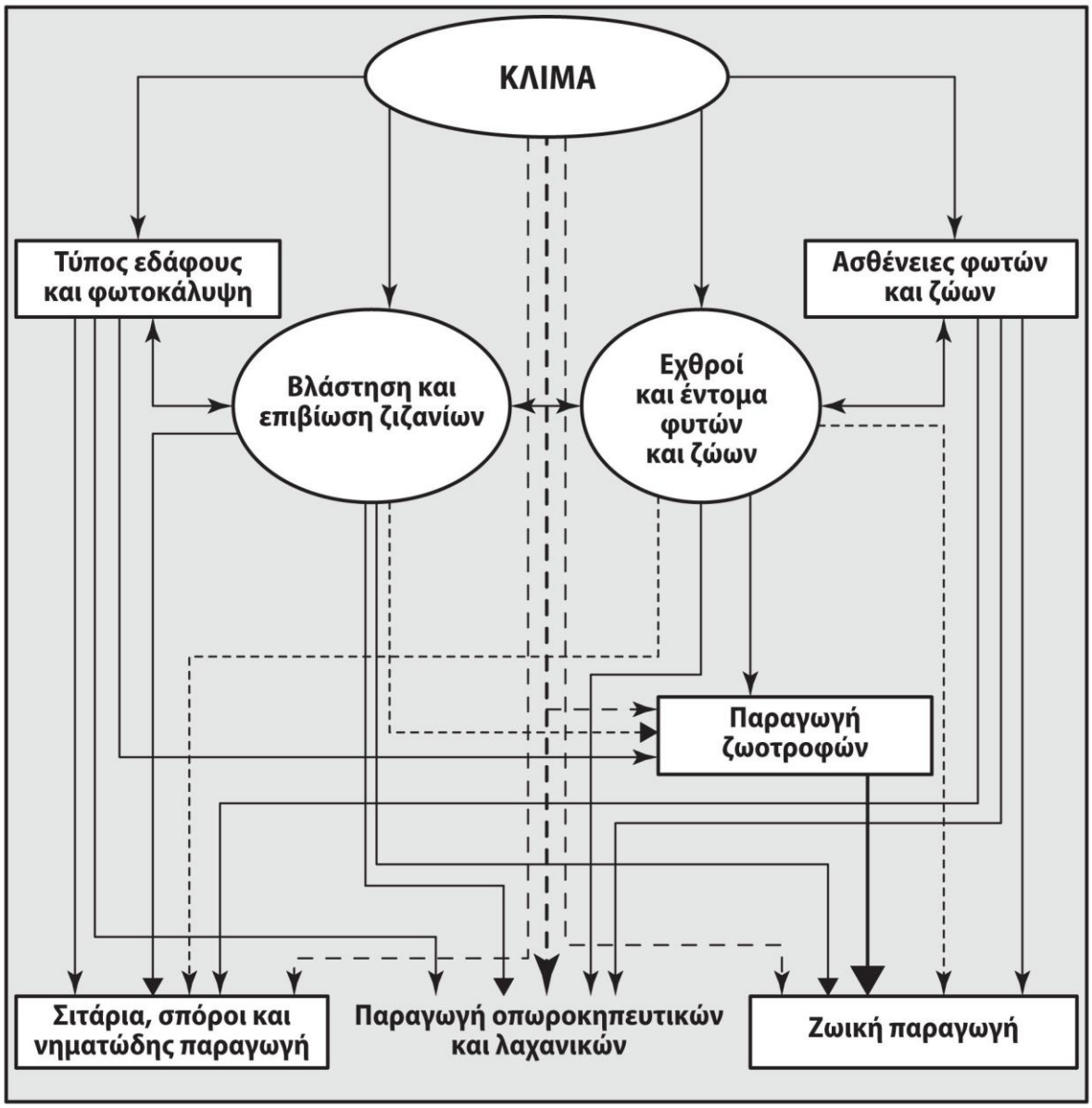
1.4. Σχέσεις και διαφοροποιήσεις με συναφή αντικείμενα

Υπάρχει μεγάλη σύγχυση σχετικά με τη μελέτη της αγρομετεωρολογίας και των συναφών αντικειμένων, όπως είναι η αγροκλιματολογία, η αγροτική οικολογία, η αγροφαινολογία, η αγροτική γεωγραφία, η βιοκλιματολογία, η αγροβιολογία και η φυσιολογία φυτών και ζώων.

Αρχικά, η **αγρομετεωρολογία** πρέπει να διαφοροποιηθεί από την **αγροκλιματολογία.** Για να γίνει αυτό, πρέπει πρώτα να εξεταστεί η διαφορά μεταξύ **μετεωρολογίας** και **κλιματολογίας**. Μετεωρολογία μπορεί να οριστεί η μελέτη των φυσικών διαδικασιών στην ατμόσφαιρα που δημιουργούν τον καιρό, ενώ η μελέτη της κλιματολογίας ασχολείται με τη συνολικότητα (ολότητα) του καιρού. Συνεπώς, ενώ η μελέτη της αγροκλιματολογίας ασχολείται εν μέρει με τις σχέσεις κλιματικών συνθηκών και αγροτικής παραγωγής, η αγρομετεωρολογία ασχολείται με ολόκληρο το πεδίο μελέτης, που περιλαμβάνει την αγροκλιματολογία, τα όργανα, την πρόγνωση της παραγωγής και άλλα συναφή θέματα.

Πολλοί **κλιματολόγοι** έχουν πραγματοποιήσει εκτεταμένες μελέτες των κλιματικών παραμέτρων, όπως είναι η βροχόπτωση και η θερμοκρασία. Για να έχουν σημασία στην αγρομετεωρολογία, οι κλιματικές μελέτες πρέπει να έχουν εφαρμογές στις βιολογικές ανταποκρίσεις των οργανισμών, όπως στις σχέσεις μεταξύ βροχόπτωσης και σοδειάς. Εξάλλου, η καθιέρωση φωτοθερμικών μονάδων, η μελέτη του μικροκλίματος ενός ανεμοφράκτη, η μελέτη του ενεργειακού ισοζυγίου ενός στρώματος, η παρατήρηση της συγκράτησης της βροχόπτωσης και του φωτός από το φύλλωμα, καθώς και άλλα συναφή συνεισφέρουν σημαντικά στην αγρομετεωρολογία. Επιπλέον, η **βιοκλιματολογία** συνίσταται κυρίως στην ανταπόκριση του ανθρώπου στις κλιματικές συνθήκες. Το αντικείμενο της διευρύνεται συνεχώς, ώστε να συμπεριλάβει μελέτες κλιματολογικής και βιολογικής ανταπόκρισης, και καλείται «βιοκλιματική». Στο Σχήμα 1.3 παρουσιάζεται το πλαίσιο της διασύνδεσης του κλίματος με τη γεωργική παραγωγή.

Η **αγροτική οικολογία** ή **αγροοικολογία** επικεντρώνεται στην αλληλεξάρτηση μεταξύ καλλιεργειών και περιβάλλοντος. Ένα άλλο αντικείμενο, η **αγροφαινολογία,** αποδίδει έμφαση στην ημερομηνία και το χρόνο εμφάνισης συγκεκριμένων περιοδικών συμβάντων στον κύκλο ζωής των καλλιεργειών και των ζώων, που είναι αποτέλεσμα της επίδρασης του καιρού σε μια χρονική περίοδο. Φύτρωμα, άνθηση και ωρίμανση καλλιεργειών είναι παραδείγματα της φαινολογίας καλλιεργειών. Αντίστοιχα, γενετικές περίοδοι, γέννηση νέων και θάνατος παλαιών είναι παραδείγματα της ζωικής φαινολογίας. Ο συνδυασμός της φαινολογίας καλλιεργειών και ζώων αποτελεί πεδίο μελέτης της **αγροφαινολογίας.**



Σχήμα 1.3 *Κλίμα και γεωργική παραγωγή.*

Η αγροτική γεωγραφία ή **αγρογεωγραφία** καλύπτει την ιστορική εξέλιξη των αγροτικών προτύπων, καθώς και την τρέχουσα κατανομή, αναφέρεται δε στη χωρική ταξινόμηση και διαφοροποίηση της γεωργίας. Σε σχέση με τα καλλιεργούμενα φυτά, ονομάζεται γεωγραφία καλλιεργειών (crop geography), καθώς ασχολείται με τις επιπτώσεις του κλίματος, της τοπογραφίας και του γεωγραφικού πλάτους στην κατανομή των καλλιεργειών για μεγάλες χρονικές περιόδους και σε μεγάλες γεωγραφικές περιοχές. Αυτό εφαρμόζεται και στη **ζωική γεωγραφία**.

Ένα άλλο αντικείμενο, γνωστό ως **αγροβιολογία**, αφορά κυρίως τις ανταποκρίσεις καλλιεργειών στη χρήση λιπασμάτων. Η προσέγγιση που χρησιμοποιείται στη φυσιολογία φυτών και ζώων διαφέρει σημαντικά από εκείνη της αγροοικολογίας, αγροφαινολογίας, αγροτικής γεωγραφίας, επειδή οι μελετώμενες βιολογικές επιδράσεις είναι μάλλον εσωτερικής, παρά εξωτερικής φύσης. Δηλαδή, οι μελέτες της φυσιολογίας ασχολούνται σε μεγάλο βαθμό με τις βιολογικές ανταποκρίσεις εντός ενός μεμονωμένου φυτού ή ζώου, ή ακόμα και ενός οργάνου τους, στο φυσικό περιβάλλον.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η αγρομετεωρολογία είναι μια οριζόντια επιστήμη, που κάνει χρήση διαφόρων φυσικών, βιολογικών και εφαρμοσμένων γεωπονικών επιστημών. Μεταξύ των φυσικών επιστημών, η

μετεωρολογία είναι το πιο συναφές αντικείμενο στην αγρομετεωρολογία. Ωστόσο, ενώ στην αγρομετεωρολογία γίνεται χρήση πολλών τεχνικών και μεθόδων της μετεωρολογίας, αναγκαστικά το ενδιαφέρον εστιάζεται στις αγροτικές εφαρμογές των μεθόδων αυτών. Τέλος, η μετεωρολογία ασχολείται με την εφαρμοσμένη μελέτη της φυσικής και όλες οι βασικές αρχές και θεωρίες της φυσικής είναι εξίσου σημαντικές στην αγρομετεωρολογία. Είναι γνωστό ότι η ημερήσια διακύμανση της υγρασίας του αέρα, καθώς και της εδαφικής υγρασίας, αποτελεί ζωτικό θέμα, που επιζητεί λύση. Η μελέτη αυτή εμπλέκει **μετεωρολογία** και **υδρολογία**. Τα όρια μεταξύ των δύο είναι θέμα έμφασης. Οι **μετεωρολογικές** μελέτες επικεντρώνονται στο σχηματισμό βροχής, χιονιού, δρόσου και υδρατμών στην ατμόσφαιρα, αλλά και στις διεργασίες της εξάτμισης, της συμπύκνωσης και της εξατμισοδιαπνοής από την επιφάνεια της γης. Οι **υδρολογικές** μελέτες περιορίζονται σε μεγάλο βαθμό στις διεργασίες της συγκράτησης, της απορροής, της διήθησης, του υπόγειου νερού και τις αλλαγές στην αποθήκευση του νερού στο έδαφος. Η υδρολογία είναι σημαντική σε μερικούς τύπους αγροτικών προβλημάτων, όπως και η μετεωρολογία. Πλημμύρες, ξηρασίες και γενικά χρήση νερού στη γεωργία είναι ενδεικτικά μερικά από αυτά τα παραδείγματα. Συνεπώς, υδρολογία, μετεωρολογία και φυσική είναι τρεις σημαντικές φυσικές επιστήμες που συνδέονται στενά με την αγρομετεωρολογία.

Η αγρομετεωρολογία συνδέεται επίσης με τη **χημεία**. Η χημική σύσταση του βρόχινου νερού, η όξινη βροχή, ο σχηματισμός καπνού (ή αιθάλης), οι πυρήνες συμπύκνωσης, τα αιωρούμενα σωματίδια, οι χαλαζόκοκκοι, η κατανομή του διοξειδίου του άνθρακα και άλλων στοιχείων στην ατμόσφαιρα είναι προβλήματα στα οποία εμπλέκεται η χημεία. Τέλος, η σύγχρονη **στατιστική**, ειδικότερα η **βιοστατιστική** και η **βιομετρία** αποτελούν σημαντικά εργαλεία της αγρομετεωρολογίας.

Εφόσον η μεγέθυνση (growth) και η ανάπτυξη ή εξέλιξη (development) τόσο των ζώων όσο και των φυτών εξαρτώνται βασικά από τις φυσικές συνθήκες των μέσων στις οποίες διαβιούν, η αγρομετεωρολογία υπεισέρχεται στους εξειδικευμένους κλάδους της γεωπονικής επιστήμης. Ουσιαστικά, μερικές μόνο από τις εφαρμοσμένες γεωπονικές επιστήμες θεωρούνται πλήρεις χωρίς την προσθήκη αγρομετεωρολογικής πληροφορίας. Η **εδαφολογία** επικεντρώνεται στο εδαφικό νερό, την εδαφική θερμοκρασία και τη διάβρωση των εδαφών, ενώ η **φυτοπαθολογία** σε εκείνους τους καιρικούς παράγοντες που επηρεάζουν την εξάπλωση των ασθενειών. Η αγρονομία και τα οπωροκηπευτικά αναφέρονται στις σχέσεις μεταξύ αγροτικής παραγωγής και καιρού, ενώ η **ζωοτεχνία** και τα **πουλερικά** στη σχεδίαση των στάβλων και των πτηνοτροφείων. Η **γεωργική μηχανική** αφορά τη σχεδίαση αρδεύσεων, στράγγισης εδαφών, ανεμοφρακτών και αγροκτημάτων, ενώ η **εντομολογία** εξετάζει τις κλιματικές συνθήκες εμφάνισης εντόμων. Όπως είναι φυσικό, η βασική έρευνα των παραπάνω πεδίων εξαρτάται από τις συνεισφορές των συναφών βιολογικών επιστημών.

Τέλος, η επιστήμη της αγρομετεωρολογίας βασίζεται σε καθορισμένη προσέγγιση, που σχετίζεται με τη θεωρία και τη μεθοδολογία. Η ανεξάρτητη θεωρία, οι υποθέσεις και η μεθοδολογία δεν μπορούν να αποκτηθούν συνολικά από οποιοδήποτε συναφές αντικείμενο. Η σταθερότητα των βιοτικών παραγόντων αποτελεί ένα παράδειγμα μιας υπόθεσης και τα κριτήρια των βροχερών ημερών των καλλιεργειών αποτελεί ένα παράδειγμα μεθοδολογίας. Συνεπώς, η αγρομετεωρολογία μπορεί να θεωρηθεί μια ανεξάρτητη επιστήμη, με αντικείμενο τη σύνδεση του φυσικού περιβάλλοντος με τις βιολογικές ανταποκρίσεις υπό φυσικές συνθήκες. Αυτό ανεξαρτητοποιεί την αγρομετεωρολογία τόσο από τις φυσικές όσο και από τις βιολογικές επιστήμες. Σήμερα, υπάρχει πραγματική ανάγκη να έρθουν κοντά οι δύο αυτές σφαίρες γνώσης. Πειράματα θερμοκηπίου, ελεγχόμενες κλιματικές μελέτες και μετρήσεις πεδίου, καθώς και μεθοδολογίες και μοντέλα με χρήση σύγχρονης τεχνολογίας αποτελούν τον καλύτερο τρόπο να καλυφθεί η ανάγκη αυτή.

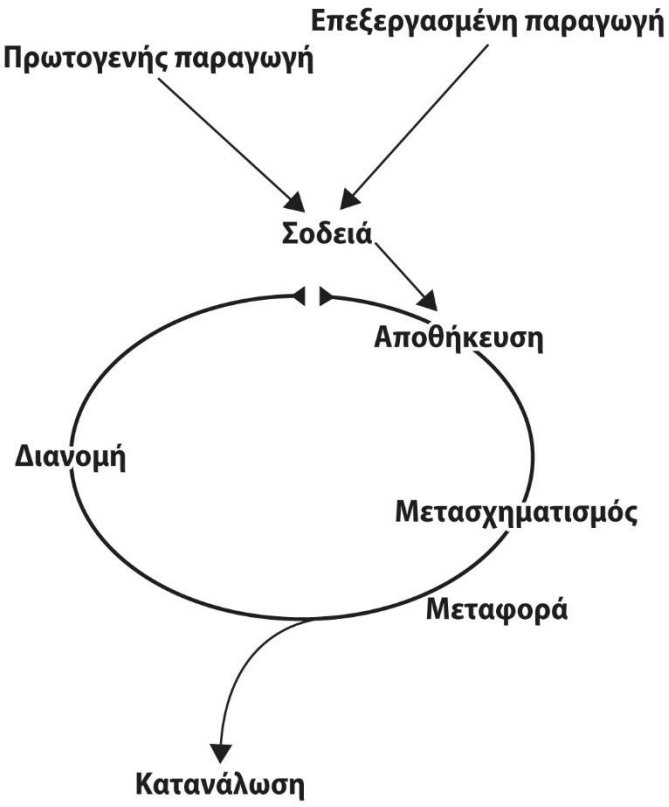
Η απόκτηση γνώσης στην αγρομετεωρολογία πρέπει να περάσει από κάποια στάδια. Αρχικά, πρέπει να αναπτυχθεί μια ακριβής περιγραφή του φυσικού περιβάλλοντος και των βιολογικών ανταποκρίσεων. Στη συνέχεια, πρέπει να επιχειρηθούν η ερμηνεία και η κατανόηση των φαινομένων αυτών. Το τελευταίο στάδιο περιλαμβάνει τη βελτίωση του καιρού, την πρόγνωση της παραγωγής και τον έλεγχο ή/και την τροποποίηση του φυσικού περιβάλλοντος.

1.5. Σπουδαιότητα και σημασία της αγρομετεωρολογίας

Δεν υπάρχει σχεδόν κανένας άλλος τομέας ανθρώπινης δραστηριότητας που να εξαρτάται τόσο πολύ από τον καιρό όσο η γεωργία. Ενδεικτικά, στο Σχήμα 1.4 παρουσιάζεται η διασύνδεση της αγρομετεωρολογίας με την τροφική αλυσίδα. Για τη σπουδαιότητα και τη σημασία της αγρομετεωρολογίας, επισημαίνονται επιγραμματικά τα ακόλουθα σημεία:

- Η γεωργική παραγωγή εξαρτάται, πράγματι, ακόμα σε μεγάλο βαθμό, από τον καιρό και το κλίμα, παρά τις εντυπωσιακές εξελίξεις στη γεωργική τεχνολογία το τελευταίο μισό του 20ού αιώνα.

- Οι αγρομετεωρολογικές υπηρεσίες καθίστανται αναγκαίες περισσότερο από ποτέ, λόγω των προκλήσεων που παρατηρούνται σε πολλές μορφές γεωργικής παραγωγής από την αυξανόμενη κλιματική μεταβλητότητα, σε συνδυασμό με τα ακραία φαινόμενα και με την κλιματική αλλαγή.
- Η γνώση των διαθέσιμων περιβαλλοντικών πόρων και των διεργασιών που συντελούνται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, στο στρώμα αλληλεπίδρασης εδάφους-αέρα και στο οριακό στρώμα της ατμόσφαιρας, παρέχει την αναγκαία καθοδήγηση για στρατηγικές αγρομετεωρολογικές αποφάσεις κατά τη σχεδίαση γεωργικών συστημάτων μεγάλου εύρους. Τυπικά παραδείγματα είναι η σχεδίαση αρδευτικών και στραγγιστικών έργων, οι αποφάσεις σχετικά με χρήσεις γης και πρότυπα καλλιεργειών, και, στο πλαίσιο αυτό, οι επιλογές σε καλλιέργειες και ζώα, σε ποικιλίες και γενετική βελτίωση, και σε γεωργικά μηχανήματα.



Σχήμα 1.4 *Αγρομετεωρολογία και διατροφική αλυσίδα.*

- Στη σύγχρονη γεωργία, η οικολογία και η οικονομία λειτουργούν με ίσους όρους. Μάλιστα, σήμερα χρησιμοποιείται και ο όρος βιοοικονομία. Η έλλειψη πόρων, η φθορά των οικολογικών συστημάτων και άλλα περιβαλλοντικά θέματα καθίστανται ακόμα πιο σημαντικά.
- Οι λεπτομερείς παρατηρήσεις και η παρακολούθηση και διάδοση της μετεωρολογικής πληροφορίας σε πραγματικό χρόνο, η ποσοτικοποίηση μέσω τηλεπισκόπησης (radar και δορυφόροι) και η εξαγωγή δεικτών και η επιχειρησιακή παροχή υπηρεσιών είναι σημαντικά για τη λήψη τακτικών αγρομετεωρολογικών αποφάσεων όσον αφορά τη σχεδίαση γεωργικών λειτουργειών βραχείας διάρκειας σε διάφορα βλαστικά στάδια.
- Η συνεχώς βελτιούμενη κατανόηση των επιπτώσεων του καιρού και του κλίματος σε εδάφη, φυτά, ζώα, δένδρα και παραγωγή συστημάτων καλλιεργειών καθίσταται απαραίτητη στη λήψη αποφάσεων από αγρότες και τεχνικούς, ώστε να επιβεβαιωθεί η ανάγκη έγκαιρης και αποτελεσματικής χρήσης της μετεωρολογικής και κλιματολογικής πληροφορίας, καθώς και των αγρομετεωρολογικών υπηρεσιών στη γεωργία.

- Οι ακριβείς και λεπτομερείς προγνώσεις του καιρού βραχείας διάρκειας (μέχρι 2 μέρες) και μέσης διάρκειας (μέχρι 10-15 μέρες) σε ειδικές κρίσιμες περιόδους, καθώς και οι εποχικές κλιματικές προγνώσεις, είναι ήδη διαθέσιμες.
- Η αξιόπιστη πρόγνωση του καιρού μακράς διάρκειας δεν είναι ακόμη διαθέσιμη για την αγροτική κοινότητα σε βάση ρουτίνας παγκοσμίως. Ωστόσο, σημαντικές υπηρεσίες παρέχονται υπό μορφή αγρομετεωρολογικών προγνώσεων, όπως οι ημερομηνίες φαινολογικών σταδίων, η ποσότητα και η ποιότητα σοδειάς, και η εμφάνιση επιδημιών σε καλλιέργειες και ζώα.
- Η πρόγνωση του καιρού συμβατικού τύπου μπορεί να διαδραματίσει βοηθητικό ρόλο, πάντα με την προϋπόθεση ότι είναι αξιόπιστη και εύκολα διαθέσιμη, και, κυρίως, ότι οι επιδράσεις του μελλοντικού καιρού είναι κατανοητές από τον αγρότη, που δεν έχει συνήθως τη δυνατότητα να αντιδράσει.
- Η δασική μετεωρολογία, ως συνιστώσα της αγρομετεωρολογίας, παρέχει χρήσιμες πληροφορίες και υπηρεσίες διεθνώς. Ειδικότερα, χρησιμοποιούνται πλέον επιχειρησιακά σε παγκόσμια κλίμακα αξιόπιστες μέθοδοι για την πρόγνωση της πιθανότητας έναρξης και εξάπλωσης, καθώς και παρακολούθησης της συμπεριφοράς δασικών πυρκαγιών.
- Οι αναπτυσσόμενες χώρες παρουσιάζουν αυξανόμενη ζήτηση σε αγρομετεωρολογικές υπηρεσίες, λόγω της συνεχούς πίεσης από την πλευρά του πληθυσμού και των συνεχώς εξελισσόμενων γεωργικών πρακτικών. Πράγματι, αναμένεται αύξηση των απαιτήσεων σε αγρομετεωρολογική πληροφορία και υπηρεσίες όσον αφορά τεχνολογίες, συστήματα και πρότυπα καλλιεργειών, διαχείριση νερού και μετεωρολογικό έλεγχο εχθρών και ασθενειών.
- Οι αναπτυγμένες χώρες δημιουργούν συνήθως, στο πλαίσιο της εθνικής πολιτικής, αγρομετεωρολογικές υπηρεσίες που περιλαμβάνουν την παροχή περιβαλλοντικών δεδομένων και πληροφοριών, τη λήψη αποφάσεων για την υποστήριξη της διατηρήσιμης παραγωγής τροφίμων, την αειφόρο ανάπτυξη, καθώς και πρακτικές διαχείρισης εδαφών, που επηρεάζουν τις διαδικασίες ανταλλαγής αερίων του θερμοκηπίου. Επίσης, η μεταφορά τεχνολογίας μπορεί να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο, λόγω της αρχικής προσαρμογής στην κλιματική μεταβλητότητα/αλλαγή.
- Σε ξηρότερα κλίματα, η παροχή υπηρεσιών περιλαμβάνει την πληροφορία σε διάφορες χωρικές και χρονικές κλίμακες, τόσο για τη μέση ημερομηνία σποράς, όσο και για την τρέχουσα περίοδο, καθώς και για την επιχειρησιακή προστασία των καλλιεργειών. Σε πιο υγρά κλίματα, επίσης παρέχεται πληροφορία για την εμφάνιση εχθρών και ασθενειών. Αυτές οι υπηρεσίες βασίζονται σε μετεωρολογική πληροφορία και αγρομετεωρολογικές υπηρεσίες τοπικής κλίμακας, και είναι φιλικές στο χρήστη.
- Υπάρχουν ακόμα σημαντικά πεδία παροχής υπηρεσιών, που χρήζουν προσοχής, όπως είναι:
  - η διαχείριση και η τροποποίηση του μικροκλίματος,
  - η προετοιμασία της αντιμετώπισης περιβαλλοντικών κινδύνων και καταστροφών, με στόχο την αύξηση της προστασίας και τον περιορισμό της τρωτότητας της γεωργίας,
  - η πρόγνωση El Nino και η χωροχρονική μεταβλητότητα βροχόπτωσης για γεωργική σχεδίαση,
  - η πληροφορία για μετεωρολογικές εφαρμογές σε εντομοκτόνα και παρασιτοκτόνα,
  - η μετεωρολογική πληροφορία για τη σχεδίαση και την ανάπτυξη αρδεύσεων και στραγγίσεων,
  - η αέρια μεταφορά ρυπαντών και η γνώση των ανέμων στο επιφανειακό οριακό στρώμα, για την επιχειρησιακή διαχείριση του περιβάλλοντος,
  - οι ημερολογιακές πιθανότητες, για την ημερήσια σχεδίαση γεωργικών εργασιών, όπως σπορά, φύτρωμα, συγκομιδή, άρδευση, θαλάσσια αλίευση,
  - οι αγρομετεωρολογικές υπηρεσίες για αγρότες σε περιφερειακό επίπεδο, με την παροχή προγνώσεων ακριβείας και συμβουλών στη γεωργική κοινότητα,
  - η επικοινωνία και η μεταφορά πληροφορίας σε μορφή φιλική προς το χρήστη,
  - η γεωργία ορεινών περιοχών.
- Σε πιο προηγμένη γεωργική παραγωγή, με δυνατότητα μεταφοράς τεχνολογίας, μπορεί να προστεθούν:
  - τα μετεωρολογικά μοντέλα καλλιεργειών, με ειδική έμφαση στα μοντέλα προσομοίωσης της ανάπτυξης καλλιέργειας,
  - η ανάπτυξη σύνθετων συστημάτων συλλογής δεδομένων και η τάχιστη επεξεργασία και ερμηνεία μεγάλων χωρικών συλλογών δεδομένων,
  - τα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών και η χρήση τους στη σχεδίαση καλλιεργειών με μικρότερες κλίμακες από τις υπάρχουσες,
  - η χρήση τεχνολογιών τηλεπισκόπησης, για πληροφορίες και συμβουλές σε μεγάλες περιοχές,
  - η ποσοτικοποίηση της απομάκρυνσης άνθρακα,

- η χρήση οπτικοακουστικών μέσων και διαδικτύου, για τη γρήγορη διάδοση της πληροφορίας στους χρήστες.

- Οι προγνώσεις σημαντικών μετεωρολογικών φαινομένων, που οδηγούν σε έκδοση συμβουλών και προειδοποιήσεων με επαρκώς μεγάλο χρόνο μέχρι την εμφάνισή τους, θεωρούνται εξαιρετικά πολύτιμες. Οι έγκαιρες προειδοποιήσεις φυσικών καταστροφών, όπως παγετός, χαλάζι ή καύσωνας, όχι μόνο συμβάλλουν στη διάσωση καλλιεργειών ή στον περιορισμό της ζημιάς με άμεσο στρατηγικό σχεδιασμό, αλλά επίσης παρέχουν στους αγρότες τη δυνατότητα να προωθήσουν ή να αναβάλουν γεωργικές εργασίες. Η διάδοση τέτοιων προειδοποιήσεων ηλεκτρονικά σε χρήστες και σε πραγματικό χρόνο μπορεί να είναι καθοριστική για τη γεωργική παραγωγή και προστασία.
- Η προστασία για την αποφυγή δυσμενών παραγόντων παραγωγής. Επισημαίνεται ότι πολλές πιθανές καταστροφές μπορούν, σε σημαντικό βαθμό, να αποφευχθούν ή, τουλάχιστον, να ελαττωθούν σε ισχύ από ανθρώπινες ενέργειες. Τέτοιοι κίνδυνοι, μετεωρολογικής προέλευσης, περιλαμβάνουν την ύπαρξη και έκταση των ζιζανίων και των ασθενειών ζώων και φυτών, τη ρύπανση του αέρα και του εδάφους, τη διάβρωση του εδάφους, τις απαιτήσεις των φυτών και των ζώων λόγω περιβαλλοντικών παραγόντων.
- Η βελτίωση των τεχνικών που βασίζονται στη χρήση της μετεωρολογικής γνώσης. Αναφέρονται χαρακτηριστικά η άρδευση, η προστασία από ριπαίους ανέμους και ψύχος, η κάλυψη από τον υπερβολικό ήλιο, τα αντιδιαβρωτικά και αντιπαγετικά μέτρα, οι θερμαινόμενες κατασκευές, η στέγαση και η περιποίηση των ζώων, η κάλυψη του εδάφους και των φυτών, ο κλιματικός έλεγχος κατά τη μεταφορά και αποθήκευση, οι ψεκασμοί φυτών, η κτηνιατρική φροντίδα, η χρήση λιπασμάτων, η αμειψισπορά και τα συστήματα διαχείρισης της γης. Τελικά, όλες οι ενέργειες αποσκοπούν στην αύξηση της παραγωγής.
- Οι μετεωρολογικοί παράγοντες στη διαδικασία φυτικής και ζωικής παραγωγής. Η διαχείριση των αγροτικών ζώων περιλαμβάνει τα αποτελέσματα του φυσικού περιβάλλοντος στη σύλληψη, στην εγκυμοσύνη και τη γέννα και στην ανάπτυξη και την παραγωγή ζωικών προϊόντων, συμπεριλαμβανομένης τόσο της ποιότητας, όσο και της ποσότητας. Αντίστοιχα, η γνώση της επίδρασης του καιρού στην παραγωγή των φυτών έχει δύο πλεονεκτήματα: υποδεικνύει τον δρόμο για τη βελτίωση της παραγωγής και επιτρέπει προγνώσεις παραγωγής, καθώς και τυχόν «προειδοποιήσεις» για απώλεια παραγωγής.
- Οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στην απορροή και ανατροφοδότηση υπόγειων υδροφορέων ακολουθούν εκτιμώμενες αλλαγές στη βροχόπτωση. Το αποτέλεσμα είναι η επίπτωση στη μείωση της άρδευσης, που βασίζεται στον ισοσκελισμό των αυξήσεων στην εξάτμιση από τις αλλαγές στη βροχόπτωση. Τελικά, υψηλότερες θερμοκρασίες, που οδηγούν σε μεγαλύτερη ανάγκη για εξάτμιση, μπορεί να προκαλέσουν αύξηση των απαιτήσεων για άρδευση σε πολλές χώρες.
- Οι εκτιμήσεις προσομοίωσης της ανάπτυξης καλλιεργειών δείχνουν ότι η σοδειά κάποιων καλλιεργειών σε τροπικές περιοχές μπορεί να μειωθεί ακόμα και με ελάχιστη αύξηση της θερμοκρασίας. Επίσης, όπου υπάρχει μεγάλη μείωση της βροχόπτωσης, η επίπτωση σε σοδειές τροπικών καλλιεργειών είναι ακόμα πιο μεγάλη. Τέλος, η ενδεχόμενη κλιματική αλλαγή, κυρίως με την αύξηση της συχνότητας και της έντασης ακραίων φαινομένων και την ενδεχόμενη χωροχρονική μετατόπισή τους, αναμένεται να δυσχεράνει την ασφάλεια των τροφίμων σε μερικές περιοχές του πλανήτη.
- Η αγρομετεωρολογία και η αγροκλιματολογία μπορούν να συμβάλουν στη διαδικασία λήψης αποφάσεων που έχει σχέση με την ορθή εκτίμηση των μετεωρολογικών παραγόντων σε θέματα όπως η επιλογή της καλλιέργειας, η επιλογή της ράτσας του ζώου, η σχεδίαση και έκταση της μηχανοποίησης του αγροκτήματος, οι μέθοδοι της καλλιέργειας της γης και ο συγχρονισμός στην εκτέλεση των εργασιών του αγροκτήματος.
- Οι αξιόπιστες μακροπρόθεσμες κλιματικές εκτιμήσεις για περιόδους δεκαετιών ή/και περισσότερο επιτρέπουν βέλτιστες λύσεις σε προβλήματα χρήσεων γης και αποθεμάτων. Συγχρόνως, έχει μεγάλη σημασία η προσεκτική μελέτη των παρελθόντων κλιμάτων με βάση τις πιθανότητες και η ανάλυση συχνοτήτων, ειδικά δε τα ακραία και επαναλαμβανόμενα ατμοσφαιρικά φαινόμενα.
- Η οικονομική αξία της μετεωρολογικής πληροφορίας αυξάνεται σταθερά, ως αποτέλεσμα της διαχρονικής αύξησης της παρεχόμενης ενημέρωσης του κοινού. Ενώ η παραγωγή πληροφορίας προς την αγροτική κοινότητα σε πραγματικό χρόνο για κοινωνικοοικονομικές δράσεις είναι πλέον δυνατή, οι αντίστοιχες υπηρεσίες δεν έχουν οργανωθεί μέχρι σήμερα. Αν και πολλά ακόμα πρέπει να γίνουν, ωστόσο διαφαίνονται ήδη ειδικές αγρομετεωρολογικές ανάγκες, όπως:
  - η αγροκλιματολογία, για τη σχεδίαση χρήσεων γης και τη ζωνοποίηση καλλιεργειών,
  - η επιχειρησιακή παρακολούθηση καλλιεργειών και αγρομετεωρολογικές πρακτικές με βάση εξαγόμενα από μοντέλα προσομοίωσης της ανάπτυξης,

- οι αξιόπιστες στατιστικές βροχόπτωσης σχετικά με ημερομηνίες σποράς και ημερολόγια καλλιεργειών,
- οι μετεωρολογικές απαιτήσεις και ανάγκες, για την παρακολούθηση των καλλιεργειών και τις εφαρμογές εισροών,
- οι στρατηγικές πρόγνωσης και διαχείρισης, για ξηρασίες και πλημμύρες,
- η παρακολούθηση εχθρών και ασθενειών, με τη χρήση μετεωρολογικών μοντέλων προειδοποιήσεων,
- η μικροκλιματική διαχείριση και οι τροποποιήσεις.

- Οι αγρομετεωρολογικές υπηρεσίες με τη μορφή τεχνολογικών υποδείξεων και συμβουλών κατάλληλων για το επίπεδο αγρού απαιτούνται συχνά στη διαδικασία λήψης αποφάσεων από αγρότες. Ωστόσο, περιορισμοί τίθενται από τη διαθεσιμότητα των πόρων παραγωγής, που μπορεί να εκτιμηθούν χρησιμοποιώντας:
  - τα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών, για εύκολη ανάκτηση και επικαιροποίηση της πληροφορίας,
  - την απεικόνιση αγρομετεωρολογικών ζωνών, με τη χρήση περιβαλλοντικής πληροφορίας,
  - η σχεδίαση σε εθνικό επίπεδο προσδοκώμενων εξαγόμενων παραγωγής,
  - τις πληροφορίες διαχείρισης καλλιεργειών, όπως πρότυπα καλλιεργειών, λίπανση, χρόνος σποράς και άλλα συναφή.
- Παρά την κατανομή και τις εναλλαγές ευνοϊκών ή μη καιρικών συνθηκών, η παροχή και τα αποθέματα τροφίμων μακροπρόθεσμα παραμένουν ανεπαρκή, για να θρέψουν τον πληθυσμό του πλανήτη με το σημερινό ρυθμό αύξησής του. Αλλαγή μπορεί να επέλθει μόνο με τη σημαντική βελτίωση της γεωργικής τεχνολογίας, με την πιο αποτελεσματική αξιοποίηση φυσικών πόρων, καθώς και από εθνικά και διεθνή κέντρα σχεδίασης και διαχείρισης αποθεμάτων τροφίμων, που λαμβάνουν ως βάση για τη λήψη αποφάσεων επικαιροποιημένες πληροφορίες για τις συνθήκες των καλλιεργειών και τις δυνητικές απώλειες σοδειάς.
- Ο κύριος ρόλος της αγρομετεωρολογίας σήμερα σε παγκόσμια κλίμακα είναι να διασφαλίσει τη βοήθεια στους αγρότες κυρίως για να αντιμετωπίσουν τα διάφορα προβλήματα στη γεωργική παραγωγή. Προϋπόθεση για την εκπλήρωση του ρόλου αυτού αποτελούν: η διάθεση κατάλληλων συστημάτων υποστήριξης, η ύπαρξη αξιοποιήσιμων και επαρκών αγρομετεωρολογικών δεδομένων, η ύπαρξη εργαλείων έρευνας και επιμόρφωσης διαθέσιμων στους αγρομετεωρολόγους, καθώς και σχετικών αγρομετεωρολογικών υπηρεσιών, για τη σχεδίαση και λήψη αποφάσεων ειδικά από τους αγρότες.

1.6. Ιεραρχική μεθοδολογική προσέγγιση της αγρομετεωρολογίας

Κατά τη σχεδίαση προγραμμάτων για αγρομετεωρολογικές υπηρεσίες και υποστήριξη αποφάσεων και ενεργειών από παραγωγούς, παρατηρούνται δύο βασικές προκλήσεις. Η πρώτη πρόκληση είναι η κατανόηση των τρόπων με τους οποίους σχετίζονται οι αγρομετεωρολογικές υπηρεσίες με τα αγρομετεωρολογικά συστήματα υποστήριξης. Αυτή η πρόκληση αφορά τους μηχανισμούς ή τις μεθοδολογίες που συσχετίζουν τα συστήματα με τις υπηρεσίες. Η δεύτερη πρόκληση είναι η κατανόηση ενός ευρέως φάσματος διασυνδεόμενων προβλημάτων και αποφάσεων που πρέπει να ληφθούν στη γεωργική παραγωγή όσον αφορά τον καιρό και το κλίμα, για τα οποία τέτοιες υπηρεσίες θα έπρεπε να αναπτυχθούν. Οι δύο αυτές προκλήσεις μπορεί να ικανοποιούνται μόνο εφόσον τα διαθέσιμα εργαλεία και μέσα χρησιμοποιούνται όσο το δυνατόν πιο επιχειρησιακά.

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται επιγραμματικά μια ιεραρχική κλιμάκωση των μεθοδολογιών ή μηχανισμών που αναπτύσσονται στην αγρομετεωρολογία και, χρησιμοποιώντας διαθέσιμα εργαλεία ή μέσα, επιχειρούν την επίλυση προβλημάτων για τον αγρότη. Έτσι, η προσέγγιση των αγρομετωρολογικών θεμάτων και των αντίστοιχων μεθοδολογιών ή μηχανισμών που τα συνοδεύουν ακολουθεί μια αλληλουχία και κλιμάκωση, ως συνάρτηση του συνεχώς αποκτώμενου απαραίτητου γνωστικού υπόβαθρου κάθε φορά:

- Διαγνωστικό και εννοιολογικό πλαίσιο, δηλαδή επιχειρησιακή διασύνδεση μεταξύ συστημάτων υποστήριξης και υπηρεσιών. Το πλαίσιο αυτό περιλαμβάνει τρία πεδία. Το πεδίο Α αφορά τη διατήρηση βιοποριστικών συστημάτων για τον αγρότη, το πεδίο Β την επιλογή και το συνδυασμό γνωστικών εργαλείων, για την καθιέρωση αγρομετεωρολογικών υπηρεσιών, και το πεδίο Γ τα βασικά αγρομετεωρολογικά συστήματα υποστήριξης. Μεταξύ των πεδίων Α και Β αναπτύσσονται αγρομετεωρολογικά συστήματα υποστήριξης, για την αντιμετώπιση των επιπτώσεων από καταστροφές, ενώ, μεταξύ των πεδίων Β και Γ αναπτύσσονται αγρομετεωρολογικές υπηρεσίες, για την υποστήριξη της δράσης των παραγωγών (Σχήμα 1.5).

- Αγρομετεωρολογική έρευνα. Διακρίνεται στη βασική έρευνα, για την υποστήριξη του πεδίου Γ, την εφαρμοσμένη έρευνα μεταξύ των πεδίων Α και Β, και την επιχειρησιακή έρευνα, για την υποστήριξη και των τριών πεδίων.

Α. Βιοποριστικά συστήματα για τον αγρότη	**Β. Γνωστικά εργαλεία για υπηρεσίες**	**Γ. Βασικά αγρομετεωρολογικά συστήματα υποστήριξης**
Βιωσιμότητα συστημάτων για τον αγρότη	1. Βελτιωμένες στρατηγικές προσαρμογής βασισμένες σε καινοτομίες του αγρότη	1. Δεδομένα 2. Έρευνα 3. Εκπαίδευση/Επιμόρφωση 4. Πολιτικές
	E2	**E1**
Ε1: Συστήματα υποστήριξης αγρομετεωρολογικής δράσης, για την αντιμετώπιση των επιπτώσεων από καταστροφές		
Ε2: Αγρομετεωρολογικής υπηρεσίες υποστήριξης της δράσης των παραγωγών		
	2. Συναρτησιακή επιλογή σύγχρονης επιστήμης και τεχνολογίας	
	3. Κατανόηση του επικρατούντος πλαισίου πολιτικών	

Σχήμα 1.5. *Διασύνδεση συστημάτων υποστήριξης και υπηρεσιών.*

- Πρωταρχικά εργαλεία έρευνας. Περιλαμβάνουν δεδομένα, ποσοτικοποίηση, στατιστικές, δείκτες και μοντέλα. Η διάθεση επαρκών και ποσοτικών αγρομετεωρολογικών δεδομένων αποτελεί απόλυτο προαπαιτούμενο για την ανάλυση, έρευνα και διαχείριση των διαδικασιών παραγωγής στη γεωργία.
- Αγρομετεωρολογική παρακολούθηση και έγκαιρες προειδοποιήσεις. Η παρατήρηση και η μέτρηση αγρομετεωρολογικών παραμέτρων με ικανοποιητική συχνότητα στο χώρο και στο χρόνο έχουν δημιουργήσει συστήματα παρακολούθησης που χρησιμοποιούνται ως εργαλεία ανάπτυξης, και, όπου απαιτείται, εκδίδονται προειδοποιήσεις. Η παρατήρηση της φαινολογίας καλλιεργειών σε συνδυασμό με δορυφορικά δεδομένα και Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (ΓΣΠ) μπορεί να οδηγήσουν σε συστήματα παρακολούθησης και προειδοποιήσεων.
- Πρόγνωση στην αγρομετεωρολογία. Η παρακολούθηση της γεωργικής παραγωγής, των εχθρών και των ασθενειών, των περιβαλλοντικών καταστροφών και η αγρομετεωρολογική υποστήριξη των αποφάσεων στην επιχειρησιακή γεωργία απαιτούν την πρόγνωση καιρού και κλίματος.
- Αγρομετεωρολογικά θέματα προστασίας καλλιεργειών, δασών και ζωικού κεφαλαίου. Η προστασία μπορεί να είναι προληπτική, με σχεδίαση καλλιεργειών, ποικιλιών και τοποθεσιών, προς αποφυγή ή αντιμετώπιση μετεωρολογικών ακραίων φαινομένων. Επίσης, είναι σημαντικός ο ρόλος της αγρομετεωρολογίας σε συστήματα ολοκληρωμένης διαχείρισης των εχθρών, με χρήση της μετεωρολογικής και μικροκλιματικής πληροφορίας. Ακόμα, η αύξηση της μεταβλητότητας της βροχόπτωσης προσθέτει κινδύνους σε συστήματα παραγωγής ζωικού κεφαλαίου, κυρίως σε ξηρότερες περιοχές. Τέλος, όσον αφορά την παρακολούθηση των δασών, στις κύριες εφαρμογές μετεωρολογίας και κλιματολογίας περιλαμβάνονται ο έλεγχος των εχθρών και των ασθενειών, η προστασία από παγετό και η πρόληψη πυρκαγιών.
- Θέματα πολιτικών σχετικών με την αγρομετεωρολογία. Ο στόχος είναι η αειφόρος ανάπτυξη. Κοινωνικοί και περιβαλλοντικοί περιορισμοί και προβληματισμοί σχετικά με στρατηγικές προετοιμασίας και προσαρμογής πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για ειδικές πολιτικές, που χρησιμοποιούνται ως εργαλεία προκειμένου να βοηθήσουν αγρότες ωφελούμενους από αγρομετεωρολογικές υπηρεσίες.
- Εκτίμηση κλιματικών πόρων για την αγρομετεωρολογία. Η αξιοποίηση της κλιματικής πληροφορίας στη γεωργική παραγωγή απαιτεί γνώση τόσο των ειδικών επιδράσεων των κλιματικών παραγόντων στον κύκλο ανάπτυξης των ζώντων οργανισμών, όσο και των κλιματικών χαρακτηριστικών μιας καλλιεργούμενης περιοχής με τη μορφή βασικών στατιστικών όρων. Ως παραδείγματα αναφέρονται η εκτίμηση επιπτώσεων της αυξημένης κλιματικής μεταβλητότητας, η αγροκλιματική ζωνοποίηση, για την αναδιάρθρωση καλλιεργειών και τη σχεδίαση χρήσεων γης, καθώς και οι περίοδοι επανεμφάνισης και οι συχνότητες ακραίων φαινομένων.
- Εκτίμηση υδατικών πόρων για την αγρομετεωρολογία. Παγκόσμιες και εθνικές πολιτικές αναπτύσσονται την τρέχουσα περίοδο, για να ενισχύσουν την ενημέρωση σε θέματα έλλειψης νερού, συντήρησης και συγκομιδής νερού, εξάλειψης της κακοδιαχείρισης του υπόγειου νερού, αύξησης της αποτελεσματικής

χρήσης νερού, προώθησης εναλλακτικών υδατικών πόρων και ενίσχυσης της ανακύκλωσης. Επίσης, σημαντικοί εθνικοί πόροι χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση πλημμυρών και ξηρασιών, τη σχεδίαση κατάλληλων συστημάτων άρδευσης και στράγγισης για τη γεωργία, καθώς και υδατικών ισοζυγίων, την εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής και της εδαφικής υγρασίας. Η χρήση τέτοιων εκτιμήσεων ως εργαλείων στην ανάπτυξη αγρομετεωρολογικών υπηρεσιών για τον αγρότη υπολείπεται ακόμα στις αναπτυσσόμενες χώρες.

- Εκτίμηση εδαφικών πόρων για την αγρομετεωρολογία. Το κλίμα και ο καιρός επηρεάζουν τις χημικές, φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των εδαφών, των οργανισμών που περιέχουν, καθώς και την ικανότητά τους να διατηρούν και να απελευθερώνουν θερμότητα και υγρασία. Η βροχόπτωση προσθέτει χημικά συστατικά στο έδαφος και απομακρύνει θρεπτικά στοιχεία του. Το επιφανειακό εδαφικό στρώμα υφίσταται την επίπτωση του ανέμου και της διάβρωσης. Η υποβάθμιση του εδάφους περιλαμβάνει χημικές και φυσικές συνιστώσες. Η λεπτομερής πληροφορία σε πλαίσιο ΓΣΠ των φυσικών χαρακτηριστικών διαφόρων τύπων εδαφών σε μια περιοχή, όπως πυκνότητα, υδατοϊκανότητα, σημείο μαρασμού, είναι χρήσιμα σε επιχειρησιακές εφαρμογές για την αποτελεσματική χρήση και διαχείριση του νερού στη γεωργική παραγωγή.
- Εκτίμηση βιομάζας για την αγρομετεωρολογία. Επισημαίνεται η σημασία της εδαφοκάλυψης από βλάστηση, για την πρόληψη της απορροής νερού και εδάφους σε επικλινείς επιφάνειες, καθώς και η αναμόρφωση πλήρως ερημοποιημένων περιοχών. Η αποφασιστική υλοποίηση στρατηγικών πολιτικών συντήρησης χρήσεων γης και εδαφών αποτελεί κρίσιμο εργαλείο στην καταπολέμηση τέτοιων προβλημάτων. Επιπλέον, η καταστροφή των δασών και η μετατροπή τους σε αγροτικές, αστικές ή άλλης χρήσης περιοχές έχουν επιφέρει αλλαγή του καιρού και του κλίματος, τοπικά, περιοχικά και παγκόσμια. Η ορθή εφαρμογή της μετεωρολογικής και κλιματολογικής πληροφορίας μπορεί να έχει σημαντικό όφελος στην προστασία, την αειφόρο ανάπτυξη και τη διατήρηση δασικών πόρων με το πρασίνισμα υποβαθμισμένων περιοχών. Τελικά, απαιτούνται πρωτοβουλίες για την αντιμετώπιση της κατάχρησης και της καταστροφής των πόρων της βιομάζας με αποτελεσματικά και πρακτικά μέτρα.
- Αγρομετεωρολογικές υπηρεσίες. Οι εφαρμογές μετεωρολογικών συστημάτων αποφάσεων αποτελούν πρακτικές συνεισφορές στην επιχειρησιακή διαχείριση. Το υπουργείο Γεωργίας του Ηνωμένου Βασιλείου προώθησε πρόσφατα την προστασία του αέρα, των νερών και των εδαφών, υιοθετώντας κώδικες πρακτικών βέλτιστης διαχείρισης και δημιουργώντας μια προσβάσιμη βάση δεδομένων. Επίσης, μεγάλος αριθμός συστημάτων έχουν πρόσφατα καθιερωθεί σε αναπτυγμένες χώρες για θέματα όπως είναι ο έλεγχος των εχθρών και των ασθενειών, οι εγκαταστάσεις του ζωικού κεφαλαίου, η σχεδίαση των ημερών χρήσης γεωργικών μηχανημάτων, η αποθήκευση και η ξήρανση καλλιεργειών, οι πελατειακές γεωργικές προγνώσεις του καιρού και η διαχείριση του κινδύνου δασικών πυρκαγιών. Απαιτείται εκτίμηση της οικονομικής αξίας των συστημάτων αυτών, μέσω της ανάλυσης κόστους/οφέλους. Τέλος, είναι απαραίτητη η επιπρόσθετη αξιοποίηση των τεχνολογιών πληροφορικής και επικοινωνιών, για τη διάδοση ακόμα και σε σχεδόν πραγματικό χρόνο αγρομετεωρολογικών πληροφοριών, προϊόντων και υπηρεσιών, που επίσης πρέπει συνεχώς να εξελίσσονται.

1.7. Τρέχουσες και μελλοντικές προκλήσεις της αγρομετεωρολογίας

Η σχέση του καιρού με τη γεωργία και τη γεωργική παραγωγή έχει αφετηρία, απ' όσο είναι γνωστό, τους Βαβυλώνιους και Αιγύπτιους, διαρκεί δε ήδη πάνω από 5.000 χρόνια και ακόμα εξελίσσεται (Dalezios, 2014). Κατά τον 19ο αιώνα πραγματοποιήθηκαν ποιοτικές μελέτες και έρευνες, που ακολουθήθηκαν από στατιστικές αναλύσεις, από μικροκλιματικές μετρήσεις και, πρόσφατα, από προσομοίωση (Monteith, 2000). Επισημαίνεται ότι κυρίως ο 20ός αιώνας χαρακτηρίζεται από σημαντική πρόοδο και πλούσια παραγωγή γνώσης και εφαρμογών στους τομείς της αγρομετεωρολογίας και της μετεωρολογίας (Fleming, 1996).

Παρατίθενται μερικά θέματα που αποτέλεσαν διαχρονικά τομές στη εξέλιξη της αγρομετεωρολογίας: ποσοτικοποίηση των σχέσεων καλλιέργειας-καιρού, ποσοτικοποίηση ενεργειακού ισοζυγίου, βιολογικές μελέτες σε ελεγχόμενα κλίματα, μοντέλα βιολογικής ανταπόκρισης σε περιβαλλοντικές συνθήκες, τηλεπισκόπηση στο περιβάλλον και τη βλάστηση, πληροφορίες καιρού και κλίματος για τη γεωργία, κλιματικές βάσεις δεδομένων σχετικές με καλλιέργειες, καθώς επίσης και κλιματική αλλαγή και επιπτώσεις (Mavi & Tupper, 2004).

Σήμερα, ο ορίζοντας της αγρομετεωρολογίας επαναπροσδιορίζεται και διευρύνεται (WMO, 2010). Ενδεικτικά επισημαίνεται ότι ο επαναπροσδιορισμός αυτός σηματοδοτεί διαφοροποιήσεις και αλλαγές στο χαρακτηρισμό

και τις μορφές των πληροφοριών καιρού και κλίματος, στις μεθοδολογίες εκτίμησης επιπτώσεων καιρού και κλίματος στη γεωργική παραγωγή, καθώς και στον τρόπο με τον οποίο η αγρομετεωρολογική γνώση αναμένεται να αξιοποιηθεί στη γεωργία. Τα θέματα αυτά έχουν θιγεί προηγουμένως (Ενότητα 1.5). Η νέα αυτή προσέγγιση καθιστά την αγρομετεωρολογία πολύ περισσότερο προσανατολισμένη σε υπηρεσίες.

Αναντίρρητα, υπάρχουν τρέχουσες και μελλοντικές προκλήσεις στο πεδίο της αγρομετεωρολογίας, που πηγάζουν από τη μέχρι σήμερα εξέλιξή της και δικαιολογούν τη σημασία και τον αυξανόμενο ρόλο της στη γεωργία και τη γεωργική παραγωγή. Παρατίθενται επιγραμματικά κάποια θέματα στο πλαίσιο των προκλήσεων αυτών:

- Διερεύνηση της σημασίας και του ρόλου της αγρομετεωρολογίας, μέσω του νέου προσανατολισμού της στις υπηρεσίες. Η διαπίστωση και η ανάγκη αυτή ανακύπτουν από την υποβάθμιση του γεωργικού περιβάλλοντος γενικά, εξαιτίας της αύξησης της κλιματικής μεταβλητότητας και της κλιματικής αλλαγής, για την ενίσχυση άλλων ιδιαιτεροτήτων του καιρού, και από την εμφάνιση συμφερόντων μη γεωργικών στον αγροτικό χώρο.
- Ανάγκη για καλύτερες ποσοτικές εκτιμήσεις και καλύτερες μεθόδους σχετικά με το ρόλο του καιρού και του κλίματος στην απόδοση διαφόρων καλλιεργητικών συστημάτων. Στο πεδίο αυτό, υπάρχει επείγουσα ανάγκη για καλύτερη προετοιμασία.
- Αγροκλιματικές βάσεις δεδομένων. Η ανάπτυξη και η διάθεση κατάλληλων μετεωρολογικών και αγρομετεωρολογικών βάσεων δεδομένων αποτελούν κύριο προαπαιτούμενο για τη μελέτη και διαχείριση των διαδικασιών γεωργικής και δασικής παραγωγής.
- Αγρομετεωρολογικά μοντέλα. Πολλές εφαρμογές στην επίλυση θεμάτων έρευνας και διαχείρισης καλλιεργειών και πολιτικών παρουσιάζουν τα αγρομετεωρολογικά μοντέλα. Εφόσον η τεχνολογία εξελίσσεται, αυξάνονται οι δυνατότητες εφαρμογής μοντέλων προσομοίωσης καλλιεργειών και συστημάτων λήψης αποφάσεων, για τη συμβολή στην επίλυση πραγματικών παγκόσμιων προβλημάτων, που σχετίζονται με την αειφορία στη γεωργία, την ασφάλεια των τροφίμων, την αξιοποίηση των φυσικών πόρων και την προστασία του περιβάλλοντος. Απαιτούνται, βέβαια, ακριβή και έγκαιρα εισαγόμενα στοιχεία, κυρίως στα αγρομετεωρολογικά συστήματα λήψης αποφάσεων. Επισημαίνεται ακόμα ότι τα μοντέλα προσομοίωσης εξελίσσονται, χρησιμοποιώντας σταδιακά παραμέτρους βιολογικής σημασίας για το οικοσύστημα, ώστε τα εισαγόμενα δεδομένα να οδηγούν σε αποτελέσματα με βιολογική σημασία και ερμηνεία. Ας σημειωθεί ότι τα μοντέλα βασίζονται σε υποθέσεις και εμπειρισμό, η δε ισχύς των υποθέσεων και η γενίκευση των εμπειρισμών αποτελούν αντικείμενο τρέχουσας έρευνας.
- Διαχείριση του περιβάλλοντος. Αντικείμενο της τρέχουσας και μελλοντικής έρευνας και πρόκλησης συνιστά η διαχείριση του περιβάλλοντος. Το ενδιαφέρον εστιάζεται στην ανταπόκριση και τις επιπτώσεις περιβαλλοντικά ευαίσθητων γεωργικών πρακτικών σε καιρικά φαινόμενα (Salinger et al., 2005· Sivakumar & Motha, 2008). Είναι ήδη γνωστό ότι υπάρχουν περιβαλλοντικές ανησυχίες, εξαιτίας της εντατικοποίησης της γεωργικής παραγωγής.
- Κλιματική μεταβλητότητα/αλλαγή. Από τα μεγαλύτερα προβλήματα παγκοσμίως είναι η πλανητική θέρμανση και οι επιπτώσεις στο περιβάλλον, τους υδατικούς πόρους, τη γεωργία και την ανθρώπινη υγεία. Η αγρομετεωρολογία καλείται να διαδραματίσει έναν καθοδηγητικό ρόλο στην έρευνα για την εκτίμηση της κλιματικής μεταβλητότητας και στο τρίπτυχο: επιπτώσεις – αντιμετώπιση – προσαρμογή (Δαλέζιος, 2011), όπου κύρια εξετάζονται οι επιπτώσεις στη βιόσφαιρα και οι στρατηγικές προσαρμογής, για τον περιορισμό της τρωτότητας στη γεωργία. Στο πλαίσιο αυτό, είναι απαραίτητη η διάκριση μεταξύ μεταβλητότητας και αλλαγής, όσον αφορά κυρίως τις επιπτώσεις, εξασφαλίζοντας την κάλυψη τρεχουσών αναγκών.
- Διαχείριση εχθρών και ασθενειών. Η αντιμετώπιση των εχθρών και των ασθενειών παρουσιάζει αυξανόμενες δυσκολίες, εξαιτίας περιβαλλοντικών, οικονομικών και πληθυσμιακών πιέσεων. Η κλιματική μεταβλητότητα δυσκολεύει ακόμα περισσότερο το πρόβλημα. Απαιτούνται βελτιωμένες αναλύσεις του καιρού, για την ανάπτυξη νέων τεχνικών και στρατηγικών σχετικά με εχθρούς και ασθένειες.
- Επιχειρησιακή αγρομετεωρολογία και υπηρεσίες. Η πληροφορία έχει αξία όταν διατίθεται με τέτοιον τρόπο ώστε ο χρήστης να δέχεται το μέγιστο όφελος από την αξιοποίησή της. Η ευκαιρία και η πρόκληση για αγρομετεωρολογικές υπηρεσίες αναμένεται να αυξηθούν δραματικά αν γίνουν γνωστά στο χρήστη η σημασία και τα οικονομικά οφέλη από την πληροφορία. Μεγάλη πρόκληση αποτελεί η χρήση από τον παραγωγό μετεωρολογικών δεδομένων σε διάφορες αποφάσεις γεωργικής διαχείρισης. Επισημαίνεται, επίσης, η ανάγκη να προσδιοριστούν οι προτεραιότητες των ωφελημένων από τις υπηρεσίες.

1.8. Δυνατότητες της αγρομετεωρολογίας στην ελληνική γεωργία

Παρουσιάζονται επιγραμματικά μερικές από τις πιο σημαντικές και επίκαιρες δυνατότητες συνεισφοράς της αγρομετεωρολογίας στην ελληνική γεωργία. Περισσότερες λεπτομέρειες και τεκμηριώσεις μπορούν να αναζητηθούν στα επιμέρους κεφάλαια του βιβλίου.

1.8.1. Αγροκλιματική ζωνοποίηση για την αναδιάρθρωση των καλλιεργειών

Σε συνθήκες αυξημένης κλιματικής μεταβλητότητας, είναι χρήσιμη μια μεθοδολογία που να μπορεί να ελέγχει την καταλληλόλητα μιας περιοχής, για την ανάπτυξη καλλιεργειών και τη δημιουργία ζωνών παραγωγής, με στόχο τη βελτιστοποίηση της αγροτικής παραγωγής. Πιθανές αναδιαρθρώσεις καλλιεργειών με έμφαση στις ζώνες υψηλής, μεσαίας και χαμηλής ή οριακής παραγωγικότητας, όπου ενδείκνυνται ενεργειακές καλλιέργειες, θα πρέπει να γίνονται με βάση την αγροκλιματική ταξινόμηση μιας περιοχής, ενώ η παρακολούθηση και ο έλεγχος των καλλιεργειών είναι σκόπιμο να συντελούνται σε επίπεδο αγροκλιματικών ζωνών.

Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία περιλαμβάνει τις εξής δυο ενότητες:

- **Δημιουργία ζωνών παραγωγής.** Αναπτύσσονται ζώνες παραγωγής της Ελλάδας (υψηλής, μεσαίας, χαμηλής παραγωγικότητας) με βάση υδροκλιματική-αγροκλιματική ταξινόμηση και δείκτες, χρησιμοποιώντας δορυφορικά και επίγεια μετεωρολογικά, εδαφολογικά, τοπογραφικά και αγρονομικά στοιχεία, καθώς επίσης και τεχνικές τηλεπισκόπησης. Αρχικά, αναπτύσσονται αγροκλιματικές-υδροκλιματικές ζώνες, σε καθεμία από τις οποίες προσδιορίζεται το εύρος των παραπάνω στοιχείων, για την επιλογή της κατάλληλης καλλιέργειας. Στη συνέχεια, δημιουργούνται ζώνες συστημάτων καλλιεργειών, που συνδυάζονται με τις υπάρχουσες καλλιέργειες, πχ. βαμβάκι, σιτάρι. επίσης, η μεθοδολογία επιτρέπει ιεραρχικά την εξέταση των υδροκλιματικών συνθηκών μικρών ζωνών, για την επιλογή ακόμα και ειδικών νέων καλλιεργειών. Στη δημιουργία ζωνών παραγωγής περιλαμβάνονται πεδινές και ορεινές περιοχές, για να καλυφθούν και οι ζώνες ζωικής παραγωγής.
- **Αναδιάρθρωση καλλιεργειών.** Αναπτύσσεται ένα σύστημα υποστήριξης αποφάσεων (Decision Support System/DSS) με βάση τη χωροχρονική ανάλυση πολυκριτηρίων, για τη βελτιστοποίηση της παραγωγής. Ειδικότερα, σε κάθε ζώνη, αρχίζοντας από τις υπάρχουσες καλλιέργειες, αναλύονται το κόστος παραγωγής (εισροές, νερό, λιπάσματα, ενέργεια κτλ.), η διάθεση της παραγωγής, η ανταγωνιστικότητα και οι τιμές αγορών σε DSS. Εξετάζονται επίσης εναλλακτικές καλλιέργειες σε κάθε αγροκλιματική ζώνη, για βέλτιστες λύσεις. Το τελικό DSS αποτελεί «εργαλείο» υποστήριξης αποφάσεων σε επίπεδο ομάδας παραγωγών, ενώσεων, εταιρειών, τοπικής αυτοδιοίκησης και περιφέρειας, για ενδεχόμενη αναδιάρθρωση καλλιεργειών, με τελικό στόχο τη βελτιστοποίηση της παραγωγής και την καλύτερη προστιθέμενη αξία.

1.8.2. Κλιματική αλλαγή και γεωργία: Επιπτώσεις, αντιμετώπιση, προσαρμογή

Στη λεκάνη της Μεσογείου έχουν ήδη διαπιστωθεί διαχρονική μείωση των βροχοπτώσεων (της τάξης του 20%), αύξηση της θερμοκρασίας και έξαρση των ακραίων φαινομένων (κυρίως ξηρασίας, καύσωνα, δασικών πυρκαγιών). Επισημαίνεται ακόμα ότι, ως γνωστόν, η γεωργία της Μεσογείου, στην οποία εντάσσεται και η ελληνική γεωργία, χαρακτηρίζεται ευπαθής, εξαιτίας κυρίως των ελλειμμάτων σε νερό ή, καλύτερα, της ανάγκης ορθολογικής διαχείρισης των υδατικών πόρων για τη γεωργία, καθώς και εξαιτίας των επιπτώσεων και της ανάγκης προσαρμογής της γεωργίας στην κλιματική αλλαγή, με έμφαση στα ακραία φαινόμενα, π.χ. ξηρασίες, καύσωνες, χαλάζι, δασικές πυρκαγιές, ερημοποίηση.

Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία περιλαμβάνει την ιεραρχική προσέγγιση των παρακάτω ενοτήτων:

- **Κλιματική μεταβλητότητα**. Ανάλυση χρονοσειρών (κυρίως βροχής και θερμοκρασίας), τάσεων, συχνοτήτων, περιοδικότητας, στοχαστικών χαρακτηριστικών.
- **Κλιματική αλλαγή**. Εφαρμογή κλιματικού μοντέλου γενικής κυκλοφορίας (General Circulation Model/GCM), με μελλοντικά σενάρια μέχρι το 2100, υποκλιμάκωση (downscaling) και εφαρμογή περιοχικού κλιματικού μοντέλου (Regional Climate Model/RCM) σε επίπεδο λεκάνης απορροής. Τα αποτελέσματα του μοντέλου συμβάλλουν στην προσέγγιση του τρίπτυχου επιπτώσεις-αντιμετώπιση-προσαρμογή ως ακολούθως:

- **Επιπτώσεις:** Στη γεωργία, οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής επικεντρώνονται στη γεωργική παραγωγή με χρήση αγρομετεωρολογικών μοντέλων, π.χ. CROPSYST, στη φαινολογία με χρήση φαινολογικών μοντέλων ή σε ακραία μετεωρολογικά φαινόμενα (διάρκεια, συχνότητα, δριμύτητα, έκταση) με χρήση αγροκλιματικών δεικτών και μοντέλων.
- **Αντιμετώπιση:** Για την αντιμετώπιση χρησιμοποιούνται συνήθως συστήματα έγκαιρων προειδοποιήσεων, διαχείριση ελλειμματικών φυσικών πόρων, πρόληψη καταστροφών (ξηρασία), συστήματα υποστήριξης αποφάσεων προετοιμασίας.
- **Προσαρμογή:** Η προσαρμογή της γεωργίας στην κλιματική αλλαγή συνδυάζεται κυρίως με την αντιμετώπιση και περιλαμβάνει «μαλακά», αλλά και «σκληρά» μέτρα, που εξετάζονται σε περιφερειακό επίπεδο. Ο στόχος είναι να μειωθεί η ευπάθεια των γεωργικών οικοσυστημάτων. Τα «μαλακά» μέτρα είναι χαμηλού κόστους και έντασης, όπως παραδοσιακές γεωργικές πρακτικές, ημερολόγια, αγρανάπαυση και άλλα συναφή, ενώ τα «σκληρά» είναι μεσοπρόθεσμα μέτρα, όπως ταμιευτήρες, σύγχρονα αρδευτικά δίκτυα και άλλα συναφή έργα.

- **Ανάπτυξη συστήματος υποστήριξης αποφάσεων ή έμπειρου συστήματος**. Όλα τα παραπάνω μπορούν να ενταχθούν σ' ένα σύστημα υποστήριξης αποφάσεων (DSS: Decision Support System) ή σε ένα έμπειρο σύστημα (expert system), για μια σύγχρονη υποστήριξη αποφάσεων από την κλιματική μεταβλητότητα, με έμφαση στον τομέα της γεωργίας. Επίσης, είναι σκόπιμο να ενταχθούν στο πλαίσιο της διαχείρισης διακινδύνευσης (risk management). Τέλος, η κλιματική μεταβλητότητα/αλλαγή πρέπει να εξεταστεί και σε συνδυασμό με τις διαμορφωθείσες ζώνες παραγωγής για ενδεχόμενες προσαρμογές.

1.8.3. Αγρομετεωρολογική προσομοίωση καλλιεργειών και εκτίμηση εχθρών και ασθενειών

Η αγρομετεωρολογική προσομοίωση αποτελεί σημαντική δυνατότητα της σύγχρονης αγρομετεωρολογίας διεθνώς. Η μεθοδολογία περιλαμβάνει την εξέταση των επιπτώσεων των διαφόρων μετεωρολογικών και κλιματικών μεταβλητών στην ανάπτυξη και εξέλιξη των καλλιεργειών κατά τη βλαστική περίοδο, καθώς και την εκτίμηση και πρόγνωση της γεωργικής παραγωγής. Πρόκειται για προσομοίωση του κύκλου φωτοσύνθεσης των καλλιεργειών και του ενεργειακού ισοζυγίου με μαθηματικές εξισώσεις και σύγχρονα συστήματα, όπως είναι τηλεπισκόπηση. Μάλιστα, η ακρίβεια των μεθόδων αυτών βελτιώνεται συνεχώς. Η προσομοίωση είναι δυνατόν να αφορά μόνο μεμονωμένα φαινολογικά στάδια, όπως επίσης εκτίμηση των εχθρών και των ασθενειών, αλλά και των αντίστοιχων επιπτώσεων στις καλλιέργειες.

Η σημασία της αγρομετεωρολογικής προσομοίωσης, εφόσον χαρακτηρίζεται αξιόπιστη, είναι προφανής για τη γεωργία και την εθνική οικονομία. Αρχικά, επιτρέπει καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς των καλλιεργειών στις κλιματικές μεταβλητές και τον καιρό. Επίσης, συμβάλλει στη βελτίωση της γεωργικής παραγωγής και προσδίδει μεγάλη προστιθέμενη αξία στη γεωργία, επιτρέποντας συγχρόνως καλύτερη διαχείριση της παραγωγής, που περιλαμβάνει αποθήκευση και διάθεση της παραγωγής, ρυθμούς εξαγωγών και γενικά σημαντικό όφελος στην εθνική οικονομία.

1.8.4. Αγρομετεωρολογικό σύστημα υψηλής ευκρίνειας

Η εξέλιξη της εφαρμοσμένης μετεωρολογικής επιστήμης έχει οδηγήσει στην αξιοποίηση της ψηφιακής τεχνολογίας, ώστε σήμερα να είναι πλέον εφικτή η αξιόπιστη παροχή ψηφιακής μετεωρολογικής πληροφορίας και πρόγνωσης, με συνεχώς αυξανομένη ευκρίνεια και χωρική διακριτική ικανότητα. Οι αγρότες είναι δυνατόν να έχουν πρόσβαση σε σημαντικές περιβαλλοντικές και αγρομετεωρολογικές πληροφορίες, για την ποιοτική αναβάθμιση της διαδικασίας παραγωγής. Οι πληροφορίες αυτές μπορεί να είναι διαθέσιμες στους χρήστες στις συντεταγμένες που επιθυμούν (πχ. pixel του αγρού) είτε με τη μορφή SMS, MMS, συνδρομητικά ή κατά περίπτωση, είτε στο διαδίκτυο (Web Internet) ή σε mobile portal μέσω κινητής τηλεφωνίας.

Μεθοδολογία

- **Ανάπτυξη ολοκληρωμένου αγρομετεωρολογικού συστήματος ψηφιακής υψηλής ευκρίνειας και χωρικής ανάλυσης**: Το σύστημα αυτό έχει ήδη εφαρμοστεί πειραματικά στη Θεσσαλία. Αναμένεται να παρέχει κάθε μέρα παροντική πρόγνωση (now-casting) ή βραχείας διάρκειας μέχρι 72 ωρών ανά μία ώρα, με διακριτική ικανότητα 1-2 km^2, για τη μετεωρολογία (βροχή, θερμοκρασία, άνεμος, νέφη, υγρασία και άλλοι κατά περίπτωση παράμετροι), για τα ακραία φαινόμενα (παγετός, καύσωνας, χαλάζι, δασικές πυρκαγιές, ομίχλες-ορατότητα, έντονες καταιγίδες, πλημμύρες, εκτίμηση ζημιών για

τα παραπάνω), για τη γεωργία (κατάσταση αγρού και καλλιέργειας, ανάγκες σε αρδευτικό νερό), για το περιβάλλον (UVB ακτινοβολία, δείκτης δυσφορίας, δείκτης ψύχους, χιονοκάλυψη, ισοδύναμη θερμοκρασία, βιομετεωρολογικοί δείκτες και άλλα συναφή). Σε μηνιαία ή εποχική βάση, δίνει στοιχεία για την ξηρασία, την ερημοποίηση, την κλιματική πρόγνωση, τους βιοκλιματικούς δείκτες. Επίσης, η μεθοδολογία περιλαμβάνει εκτίμηση της γεωργικής παραγωγής, των φαινολογικών σταδίων και των εχθρών και ασθενειών των καλλιεργειών.

1.8.5 Εκτίμηση και παρακολούθηση περιβαλλοντικών κινδύνων

Οι βασικοί φυσικοί περιβαλλοντικοί κίνδυνοι που επηρεάζουν τη γεωργία, τα δάση και τα αγροοικοσυστήματα και θεωρούνται ακραία δυσμενή καιρικά φαινόμενα είναι οι πλημμύρες και η πλεονάζουσα βροχή, η ξηρασία, το χαλάζι, ο παγετός, ο καύσωνας, οι ριπαίοι άνεμοι, οι δασικές πυρκαγιές και η ερημοποίηση. Σε κάθε κίνδυνο εξετάζονται και αναλύονται τα βασικά χαρακτηριστικά, η χωροχρονική κλιματική κατανομή, οι επιπτώσεις και η αντιμετώπιση, καθώς και μοντέλα και συστήματα στο τρίπτυχο «πρόγνωση-παρακολούθηση-εκτίμηση» μιας περιβαλλοντικής καταστροφής. Επισημαίνεται ότι, για την εκτίμηση διαφόρων χαρακτηριστικών στους περισσότερους κινδύνους, χρησιμοποιούνται μαθηματικά μοντέλα και δείκτες, καθώς και δεδομένα και μέθοδοι τηλεπισκόπησης. Τα συστήματα έγκαιρων προειδοποιήσεων για περιβαλλοντικούς κινδύνους αποτελούν πλέον μέρος των ολοκληρωμένων συστημάτων παρακολούθησης καλλιεργειών και αγροτικών οικοσυστημάτων διεθνώς, μπορούν δε να ενσωματωθούν σε αγρομετεωρολογικά συστήματα υψηλής ευκρίνειας, όπως περιγράφονται παραπάνω. Θεωρείται αυτονόητη η σημασία των παραπάνω για τη γεωργία και την εθνική οικονομία και λόγω κλιματικής αλλαγής, όσον αφορά τη μείωση του κόστους παραγωγής, αλλά και τη βέλτιστη διαχείριση. Ενδεικτικά, επισημαίνεται η μεγάλη σημασία για την Ελλάδα της αξιόπιστης πλέον δυνατότητας πρόγνωσης κυρίως παγετού, καύσωνα, χαλαζιού, πλημμυρών, ξηρασίας, καθώς και άλλων κινδύνων.

1.8.6. Γεωργία ακριβείας

Το αντικείμενο της γεωπληροφορικής, όπως ICT (Information and Communication Technologies) , GIS (Geographic Information System), τηλεπισκόπηση, μικροτηλεπισκόπηση, web-GIS και άλλα συναφή, παρουσιάζει ενδιαφέρον στην παρακολούθηση και εκτίμηση της γεωργικής παραγωγής, στην ιχνηλασιμότητα, σε εφαρμογές στη γεωργία ακριβείας και σε άλλα πεδία. Ειδικότερα, οι εφαρμογές γεωπληροφορικής στη γεωργία παρουσιάζουν σταδιακή διαχρονική ανάπτυξη διεθνώς τις τελευταίες δεκαετίες, αυτή δε την περίοδο παρουσιάζουν έξαρση, λόγω της συνεχιζόμενης επιστημονικής και τεχνολογικής εξέλιξης, καθώς και της αυξανόμενης ζήτησης εκ μέρους των χρηστών. Στην Ελλάδα, μόλις την τελευταία πενταετία εμφανίζονται εφαρμογές γεωπληροφορικής, με έμφαση στις ανάγκες του χρήστη, δηλαδή του αγρότη. Ωστόσο, όπως αναμένεται, παρατηρείται ένα χάσμα μεταξύ των ειδικών της γεωπληροφορικής, οι περισσότεροι εκ των οποίων δεν γνωρίζουν τα θέματα της γεωργίας, και των χρηστών (αγροτών), που δυσκολεύονται και εκδηλώνουν ακόμη δυσπιστία στα νέα τεχνολογικά εργαλεία. Είναι, λοιπόν, ανάγκη να εξαλειφθεί το χάσμα σταδιακά, διότι θα οδηγήσει, μεταξύ των άλλων, στην ευκολότερη πρόσβαση στις διεθνείς αγορές. Επίσης, οι εφαρμογές αυτές παρέχουν πολύ μεγάλη προστιθέμενη αξία, διότι στοχεύουν στη μεγιστοποίηση της παραγωγής με μείωση του λειτουργικού κόστους της και της αντίστοιχης περιβαλλοντικής επιβάρυνσης.

Στόχος των εφαρμογών γεωπληροφορικής στη γεωργία ακριβείας είναι η εκτίμηση των υδατικών αναγκών των καλλιεργειών (εκτατικών, οπωροκηπευτικών, δενδρωδών κτλ.) και ο έλεγχος των σταδίων λίπανσης, καθώς και η χρήση αυτών σε θέματα που αφορούν την καταγραφή της ευρωστίας των καλλιεργειών σε επίπεδο αγροτεμαχίου. Οι εφαρμογές αυτές αποτελούν καινοτομία διεθνώς, καθόσον τα στοιχειά είναι διαθέσιμα από το 2013. Η μικροτηλεπισκοπική ανάλυση για την επιχειρησιακή γεωργία ή γεωργία ακριβείας περιλαμβάνει ορθοαναγωγή των δορυφορικών δεδομένων και χαρτογράφηση των καλλιεργειών σε κλίμακες καλύτερες από 1:2.500, εκτίμηση του φυτικού συντελεστή (Kc), εκτίμηση της εδαφικής υγρασίας και κατάλληλου χρόνου άρδευσης. Οι παραγόμενοι ορθοφωτοχάρτες είναι θεματικοί, με ταξινόμηση των παραπάνω παραμέτρων σε ζώνες. Τα δεδομένα προέρχονται από πολυφασματικούς δορυφόρους, με δυνατότητα κάλυψης μεγάλων περιοχών σε σύντομα χρονικά διαστήματα και υψηλή επισκεψιμότητα, σε συνδυασμό με μέγεθος αρχικού εικονοστοιχείου (nominal ground resolution) στο δέκτη 2 m τουλάχιστον (ή καλύτερου), και παραγωγής ορθοφωτοχαρτών με μέγεθος εικονοστοιχείου 2 m τουλάχιστον (ή καλύτερου).

Χαρακτηριστικά, επισημαίνεται ότι δημιουργούνται χάρτες επιχειρησιακής γεωργίας που βασίζονται σε δεδομένα από τον ίδιο δορυφόρο. Ενδεικτικά, τονίζεται ότι δημιουργούνται:

- χάρτης εδαφοκάλυψης,
- δείκτης χλωροφύλλης, που απεικονίζει τις διαφορές στο «πράσινο» μέσα σε μια περιοχή και επιτρέπει να εκτιμηθεί η αποτελεσματικότητα λιπασμάτων που χρησιμοποιούνται και να προκαθοριστούν ζώνες με χρόνιες ελλείψεις σε άζωτο,
- χάρτης Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), που δείχνει τις διαφορές στην ανάπτυξη των φυτών,
- Χάρτης Kc (φυτικός συντελεστής), που εξαρτάται από τον τύπο της βλάστησης και το στάδιο φαινολογικού κύκλου, και χρησιμοποιείται για τις ανάγκες εκτίμησης της εξατμισοδιαπνοής και έμμεσα για τη ρύθμιση των υδατικών αναγκών του φυτού.

Βιβλιογραφικές αναφορές

Burke, P. M. A. (1994). The aims of Agrometeorology, in Agrometeorological Methods. *In Proceedings of the Reading Symposium* (pp. 11-15), Paris: UNESCO.

Dalezios, N. R. (2014). Evolution of Meteorology: from Aristotle to Satellites. In Kalavrouziotis & Angelakis (Eds.) Proceedings, *Regional Symposium on Water, Wastewater and Environment: Traditions and Culture*, IWA, 22-24 March, (pp. 201-211), Patras, Greece.

Δαλέζιος, Ν.Ρ. (2011). Κλιματική αλλαγή και γεωργία : Επιπτώσεις-αντιμετώπιση-προσαρμογή. *Γεωτεχνικά Επιστημονικά Θέματα*, 21(1):13-28.

Δαλέζιος, Ν.Ρ. (2005). *Αγρομετεωρολογία (Πανεπιστημιακές Παραδόσεις)*. 5η έκδοση. Θεσσαλία: Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

Fleming, J. (Ed.). (1996). *Historical Essays in Meteorology-1919-1995*. Boston, MA: American Meteorological Society.

Griffiths, J.F. (Eds.) (1994). *Handbook of Agricultural Meteorology*. New York and Oxford: Oxford University Press.

Hatfield, J.L. (1994). Future needs in agricultural meteorology: Basic and applied research. *Agricultural and Forest Meteorology*, 69(1-2):39-45.

Holden, N.M. (2001). *Agro-Meteorological Modeling: Principles, Data and Applications*. Dublin: AGMET Group, Met Eireann.

Hollinger, S.E. (1994). Future directions and needs in agricultural meteorology/climatology and modeling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 69(1-2):1-7.

Hoppe, P. (2000). Challenges for biometeorology on the turn of the century. In R. de Dear, T. Oke, J. Kalma, and A. Auliciems (Eds.), *Biometeorology and Urban Climatology on the Turn of the Millennium* (pp. 383-386). Geneva: WMO.

Mavi, H.S. & Tupper, G.J. (2004). *Agrometeorology: Principles and Applications of Climate Studies in Agriculture*. New York: The Haworth Press.

Monteith, J.L. (2000). Agricultural Meteorology: Evolution and application. *Agricultural and Forest Meteorology*, 103:5-9.

Monteith, J.L. & Unsworth, M.H. (2007). *Principles of Environmental Physics*. 3rd Edition, London: Edward Arnold.

Murthy, V.R.K. (2002). *Basic Principles of Agricultural Meteorology*. Hyderabad: B.S. Publications.

Oke, T.R. (1988). *Boundary Layer Climates*. 2nd Edition. New York: Routledge.

Prasada Rao, G.S.L.H.V. (2008). *Agricultural Meteorology*. PHI Learning Private Limited.

Salinger, J., Sivakumar, M.V.K. and Motha, R.P. (Eds.). (2005). *Increasing Climate Variability and Change*. Springer. Reprint from Climate Change, 70(1-2).

Seemann, I., Chirkov, Y.I., Lomas, J. and Primault, B. (1979). *Agrometeorology*. Berlin, Heidelberg: Springer.

Sivakumar, M.V.K. & Motha, R.P. (Eds.). (2008). *Managing Weather and Climate Risk in Agriculture*. Springer.

Smith, J.W. (2008). *Agricultural Meteorology, the Effect of Weather on Crops*, New York: Macmillan.

Smith, L.P. (1975). *Methods in Agricultural Meteorology*. Amsterdam – Oxford – New York: Elsevier Scientific Pub. Co.

Stigter, K. (Ed.). (2010). *Applied Agrometeorology*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.

Wang, J.Y. (1972). *Agricultural Meteorology*. 3rd Edition. San Jose, California: Milleu Information Service.
WMO. (2010). *Guide to Agricultural Meteorological Practices*. WMO - No134.
WMO. (2003). *Agrometeorology Related to Extreme Events*. WMO - No 943.
WMO. (2001). *Lecture Notes for training Agricultural Meteorological Personnel* (by J. Wieringa & J. Lomas), WMO - No 551.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2
ΒΑΣΙΚΗ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑ ΓΙΑ ΤΗ ΓΕΩΡΓΙΑ

Σύνοψη
Στο κεφάλαιο αυτό καλύπτονται βασικά θέματα Γενικής Μετεωρολογίας που αφορούν τη γεωργία. Αρχικά, παρουσιάζονται η δομή και τα χαρακτηριστικά της ατμόσφαιρας της Γης, και αναλύονται οι τρεις βασικές μετεωρολογικές παράμετροι, η θερμοκρασία, η ατμοσφαιρική πίεση και ο άνεμος, των οποίων οι συνδυασμοί των μεταβολών στο χώρο και το χρόνο, μαζί με την υγρασία, διαμορφώνουν τον καιρό, ενώ τονίζεται και η σημασία τους στη γεωργία. Επίσης, μελετώνται η υγρασία του αέρα και οι διάφορες υγρομετρικές παράμετροι που την προσδιορίζουν. Αναλύεται η ατμοσφαιρική αστάθεια, παρουσιάζονται και ταξινομούνται τα νέφη, ενώ περιγράφονται και επεξηγούνται οι αέριες μάζες, οι διάφορες κατηγορίες μετώπων, όπως επίσης οι κυκλώνες και οι αντικυκλώνες. Το κεφάλαιο κλείνει με την παρουσίαση και την ανάλυση των υδροσυμπυκνώσεων μικρής κλίμακας, όπως είναι η δρόσος, η πάχνη και η ομίχλη, που έχουν μεγάλη σημασία στη γεωργία και το αγροτικό περιβάλλον.

Προαπαιτούμενη γνώση
Ο αναγνώστης απαιτείται να έχει βασικές γνώσεις φυσικής και μαθηματικών.

2.1. Η ατμόσφαιρα της Γης

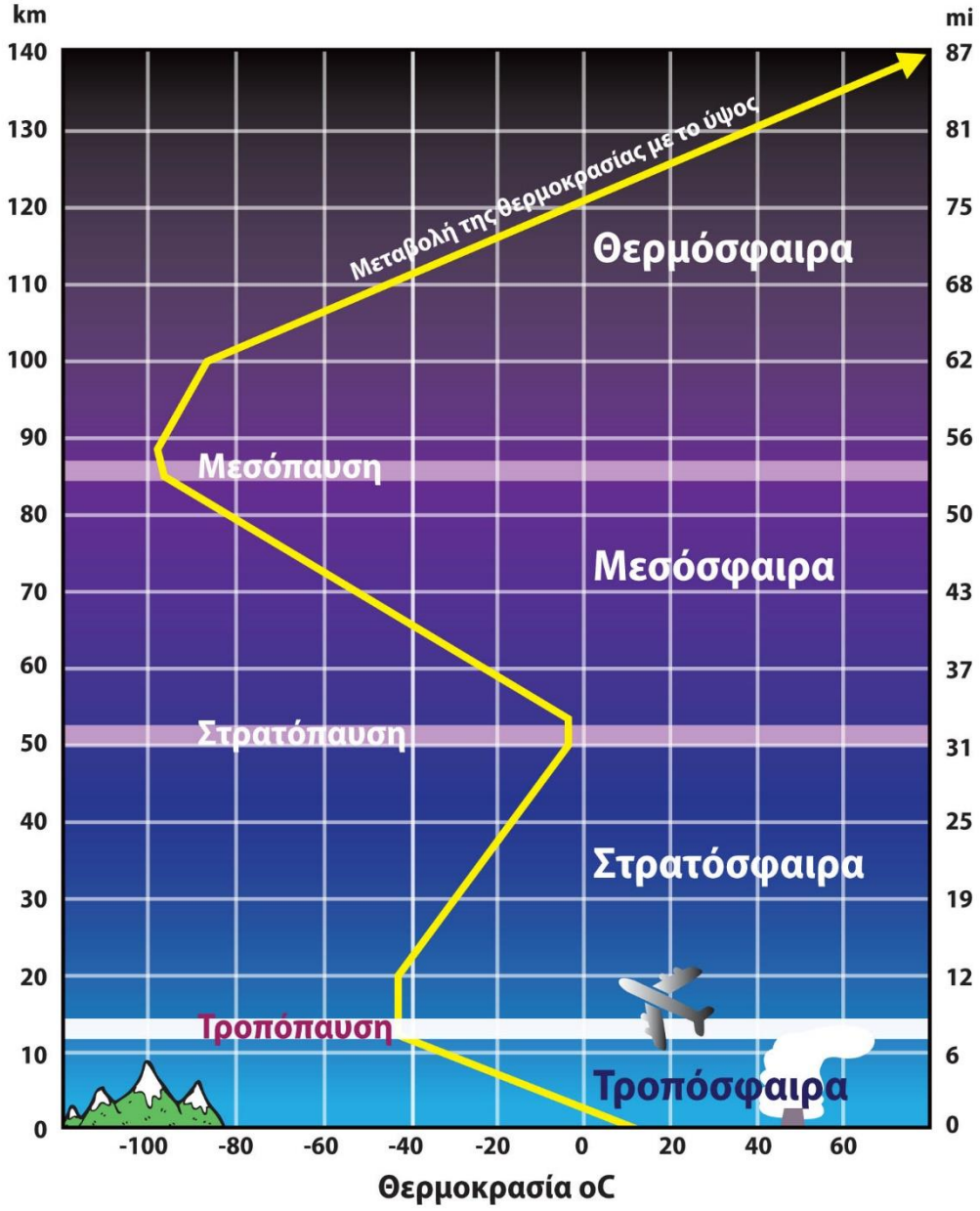
2.1.1. Σύνθεση της γήινης ατμόσφαιρας

Η ατμόσφαιρα είναι το αεριώδες περίβλημα της Γης, το οποίο συμμετέχει στις κινήσεις της, καθώς συγκρατείται από τις βαρυτικές δυνάμεις. Συνεπώς, η ατμόσφαιρα, εκτός των άλλων κινήσεών της, περιστρέφεται γύρω από τον άξονα της Γης, από τα δυτικά προς τα ανατολικά, με ταχύτητα διαφορετική από αυτήν της περιστροφής της Γης. Θεωρητικά, δεχόμαστε ότι ανώτερο όριο της ατμόσφαιρας είναι το ύψος εκείνο στο οποίο τα μόριά της συμμετέχουν στην περιστροφική κίνηση της Γης. Πρόκειται για το ύψος στο οποίο η βαρυτική δύναμη υπερισχύει της φυγόκεντρης και της τάσης διαφυγής των αερίων. Το ύψος αυτό εκτιμάται περίπου στα 28.000 km πάνω από τους πόλους και στα 42.000 km πάνω από τον Ισημερινό.
Η σύσταση της γήινης ατμόσφαιρας στα κατώτερα στρώματά της αποτελείται από ένα μείγμα αερίων, που αποτελούν τον ξηρό αέρα, από υδρατμούς και γενικά από νερό και στις τρεις καταστάσεις, δηλαδή στερεή, υγρή και αέρια, καθώς και από διάφορα αιωρούμενα σωματίδια σε στερεή ή υγρή κατάσταση. Πιο συγκεκριμένα, ο ξηρός αέρας αποτελείται από άζωτο (N_2) σε ποσοστό περίπου 78%, από οξυγόνο (O_2) σε ποσοστό περίπου 21% και από διάφορα άλλα αέρια, όπως το αργό (Ar), το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), το ήλιο (He), το νέο (Ne), το κρυπτό (Kr), το όζον (O_3) και άλλα σε ποσοστό που φτάνει μόλις το 1%. Οι υδρατμοί, που θεωρούνται φορείς της θερμικής ενέργειας της Γης, είναι υπεύθυνοι για τη δημιουργία νεφών, ομιχλών και άλλων ατμοσφαιρικών υδατωδών κατακρημνισμάτων, όπως είναι η βροχή, το χιόνι, το χαλάζι και γενικά όλες οι μορφές υετού. Τέλος, τα αιρούμενα σωματίδια, που διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο με την επίδρασή τους σε διάφορα μετεωρολογικά φαινόμενα, διακρίνονται σε αυτά που έχουν γήινη προέλευση, όπως είναι η σκόνη, η γύρη, ο καπνός, το αλάτι και άλλα συναφή, αλλά και σε αυτά που έχουν κοσμική προέλευση, όπως είναι η αστρική σκόνη.

2.1.2. Κατακόρυφη δομή της ατμόσφαιρας ως προς τη θερμοκρασία

Η ατμόσφαιρα, αποτελούμενη από διάφορα αέρια, διαπιστώθηκε ότι χωρίζεται σε στρώματα, με κύριο κριτήριο διαχωρισμού τους τις μέσες μεταβολές της θερμοκρασίας ανάλογα με το ύψος. Με βάση το κριτήριο αυτό, στην ατμόσφαιρα διακρίνονται τα εξής πέντε στρώματα, με τη σειρά που διατάσσονται πάνω από την επιφάνεια του εδάφους: η τροπόσφαιρα, η στρατόσφαιρα, η μεσόσφαιρα, η θερμόσφαιρα και η εξώσφαιρα. Ανάμεσα σε αυτά τα στρώματα παρεμβάλλονται κάποιες μεταβατικές ζώνες αρκετού πάχους, με χαρακτηριστικό τη σταθερή θερμοκρασία, οι οποίες ονομάζονται παύσεις (τροπόπαυση, στρατόπαυση, μεσόπαυση, θερμόπαυση), όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1.
Η **τροπόσφαιρα,** το κατώτερο στρώμα της ατμόσφαιρας, περιέχει το 75% της μάζας όλων των **ατμοσφαιρικών αερίων, καθώς επίσης το σύνολο σχεδόν της μάζας των υδρατμών και μεγάλες ποσότητες** αιωρούμενων σωματιδίων, όπως είναι η σκόνη. Το σύνολο των μετεωρολογικών φαινομένων παρατηρούνται στην τροπόσφαιρα, διότι, εξαιτίας της ισχυρής θέρμανσης που προκαλεί ο ήλιος στην επιφάνεια της Γης,

διαταράσσεται το μείγμα των αερίων που περιέχεται. Το ύψος της τροπόσφαιρας έχει αυξηθεί κατά αρκετές εκατοντάδες μέτρα από το 1979 μέχρι σήμερα, κυρίως λόγω ανθρωπογενών παραγόντων, και διαφέρει από πλάτος σε πλάτος. Στον Ισημερινό, το ανώτερο όριό της είναι περίπου 16-17 km, σε μέσα γεωγραφικά πλάτη φτάνει τα 11-12 km, ενώ στους πόλους μόλις τα 8-9 km. Οι διακυμάνσεις αυτές του ύψους της τροπόσφαιρας συνδέονται τόσο με τα βαρομετρικά συστήματα, όσο με τις εποχές και το διοξείδιο του άνθρακα. Πιο αναλυτικά, το ύψος της είναι γενικά αυξημένο σε περιοχές εμφάνισης βαρομετρικών υψηλών και ελαττωμένο σε περιοχές εμφάνισης βαρομετρικών χαμηλών. Σχετικά με τις εποχές, στην αρχή και το τέλος του καλοκαιριού βρίσκεται στο ανώτατο σημείο, ενώ στο τέλος του χειμώνα και τις αρχές της άνοιξης στο κατώτατο. Όσον αφορά το διοξείδιο του άνθρακα, θερμαίνει και διαστέλλει την ίδια την τροπόσφαιρα.



Σχήμα 2.1. *Μεταβολή της θερμοκρασίας ως συνάρτηση του ύψους της ατμόσφαιρας.*

Κύριο χαρακτηριστικό της τροπόσφαιρας είναι ότι η ομοιόμορφη μείωση της θερμοκρασίας με το ύψος, με ρυθμό περίπου 0,65^{o} ανά 100 m ύψους. Κύριος αποδέκτης της ηλιακής θερμότητας είναι η επιφάνεια της Γης, η οποία με τη σειρά της εκπέμπει θερμότητα προς την ατμόσφαιρα και στη συνέχεια προς το διάστημα. Η ατμόσφαιρα, ως κακός αγωγός της θερμότητας, έχει λοιπόν βασική πηγή θερμότητας την επιφάνεια της Γης,

με αποτέλεσμα ο αέρας της τροπόσφαιρας να είναι θερμότερος κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, εφόσον αυτή θερμαίνεται από τον ήλιο και θερμαίνει με τη σειρά της τα αέρια στρώματα που βρίσκονται σε άμεση επαφή μαζί της, και ψυχρότερος όσο απομακρύνεται από το έδαφος. Άλλα χαρακτηριστικά της τροπόσφαιρας είναι η μεγάλη περιεκτικότητα σε υδρατμούς, που μειώνεται με το ύψος, η συνεχής εναλλαγή μετεωρολογικών φαινομένων, οι κατακόρυφες κινήσεις αέριων μαζών και η ταχύτητα του ανέμου, που αυξάνεται με το ύψος, φτάνοντας στις μέγιστες τιμές του στην τροπόπαυση. Η **τροπόπαυση** είναι ένα λεπτό στρώμα που ακολουθεί την τροπόσφαιρα και τη διαχωρίζει από το επόμενο στρώμα, τη στρατόσφαιρα. Σε γεωγραφικά πλάτη 30^{o}-40^{o} παρουσιάζει μια διακοπή όλο το χρόνο, οπότε και παρατηρούνται δύο τροποπαύσεις, η μια πάνω από την άλλη. Στην περιοχή αυτή της ατμόσφαιρας πνέει ο αεροχείμαρρος (jet stream). Η μεταβατική αυτή ζώνη έχει κύριο χαρακτηριστικό τη σταθερή θερμοκρασία με το ύψος. Η τροπόπαυση και η τροπόσφαιρα είναι γνωστά με τον όρο «κατώτατη ατμόσφαιρα».

Η **στρατόσφαιρα** αποτελεί το επόμενο στρώμα της ατμόσφαιρας. Εκτείνεται μέχρι περίπου τα 55 km και περιέχει το 19% των ατμοσφαιρικών αερίων, καθώς και ελάχιστο ποσοστό υδρατμών. Η θερμοκρασία μέχρι και το ύψος των 35 km δεν παρουσιάζει αξιοσημείωτες μεταβολές, γι' αυτό και μπορεί να θεωρηθεί σχεδόν σταθερή. Ωστόσο, πάνω από αυτό το ύψος και ουσιαστικά μέχρι το ανώτερο όριο της στρατόσφαιρας, παρατηρείται κατακόρυφη αύξηση της θερμοκρασίας. Μέσα στη στρατόσφαιρα εμφανίζεται ένας λεπτός φλοιός, με πολύ μεγάλη περιεκτικότητα σε όζον O_3, η οζονόσφαιρα. Η οζονόσφαιρα, που αποτελεί το φυσικό «φίλτρο» για τη βλαβερή υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία, απορροφά αυτού του είδους τη μικρού κύματος ακτινοβολία, προκειμένου να πραγματοποιήσει χημικές αντιδράσεις, τη δεσμεύει και την επανεκπέμπει αργότερα με τη μορφή υπέρυθρης ακτινοβολίας, δηλαδή μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολίας, η οποία είναι υπεύθυνη για την αύξηση της θερμοκρασίας μέσα στη στρατόσφαιρα. Η **στρατόπαυση** είναι η διαχωριστική ζώνη που ακολουθεί τη στρατόσφαιρα και τη διαχωρίζει από το επόμενο στρώμα, τη μεσόσφαιρα.

Η **μεσόσφαιρα** αποτελεί το τρίτο κατά σειρά στρώμα της ατμόσφαιρας. Εκτείνεται μέχρι περίπου τα 80-85 km και χαρακτηρίζεται από τη συνεχή πτώση της θερμοκρασίας με το ύψος. Στο μέγιστο όριό της, η θερμοκρασία μπορεί να φτάσει τους -90^{o} C ή/και χαμηλότερα. Η πτώση της θερμοκρασίας σε αυτό το στρώμα οφείλεται αφενός μεν στην έλλειψη ύπαρξης του όζοντος και αφετέρου δε στην ύπαρξη αραιού στρώματος αερίων, και επομένως στη μικρή απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Η **μεσόπαυση** αποτελεί το διαχωριστικό όριο μεταξύ της μεσόσφαιρας και της θερμόσφαιρας, που αποτελεί το επόμενο στρώμα. Είναι ίσως η ψυχρότερη περιοχή της ατμόσφαιρας, με θερμοκρασίες που κυμαίνονται από τους –120^{o} C μέχρι τους –150^{o} C.

Η **θερμόσφαιρα** εκτείνεται μέχρι το ύψος των 400-500 km. Τα ατμοσφαιρικά αέρια της θερμόσφαιρας είναι αραιότερα από εκείνα της μεσόσφαιρας, ωστόσο απορροφούν την υπεριώδη ακτινοβολία, ανεβάζοντας την τιμή της θερμοκρασίας στους 1.500^{o} C. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της θερμόσφαιρας, είναι οι μεγάλες μεταβολές της θερμοκρασίας ανάλογα με το πλάτος, την ώρα της ημέρας και τις ηλιακές δραστηριότητες. Το πολικό σέλας είναι ένα μετεωρολογικό φαινόμενο που εμφανίζεται στη θερμόσφαιρα. Η **θερμόπαυση** είναι η μεταβατική ζώνη ανάμεσα στη θερμόσφαιρα και την εξώσφαιρα.

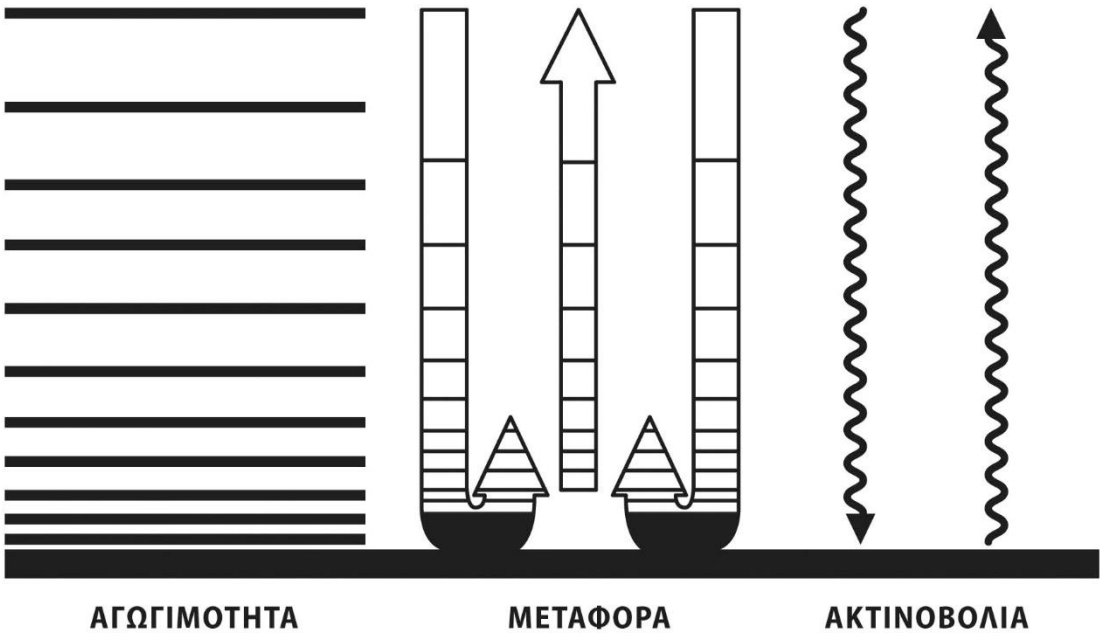
Η **εξώσφαιρα** είναι το εξωτερικό στρώμα της ατμόσφαιρας. Εκτείνεται σε απόσταση ίσως και μεγαλύτερη των 700 km μακριά από την επιφάνεια της Γης. Το οξυγόνο, λόγω μεγαλύτερου μοριακού βάρους, βρίσκεται στα κατώτερα στρώματα της εξώσφαιρας, ενώ το υδρογόνο στα ανώτερα. Τα αέρια σε αυτό το στρώμα έχουν πολύ μικρή πυκνότητα, με αποτέλεσμα στο όριο της εξώσφαιρας να τείνουν να αναμειχθούν σταδιακά με το κοσμικό διάστημα. Τα αέρια αυτά μπορούν να διαφύγουν από τη γήινη ατμόσφαιρα και, επομένως, από τη βαρύτητα της Γης μόνο αν η ταχύτητά τους είναι μεγαλύτερη της ταχύτητας διαφυγής.

2.2. Θερμοκρασία της ατμόσφαιρας

Θερμοκρασία υλικού χαρακτηρίζεται ο βαθμός της μοριακής δράσης ή της θερμότητάς του και βασίζεται στη ροή της θερμότητας από ένα σύστημα σε ένα άλλο. Υπάρχουν τρεις μηχανισμοί μετάδοσης της θερμότητας στην ατμόσφαιρα, με τους οποίους θερμαίνεται ο αέρας από την ηλιακή ακτινοβολία: μέσω **αγωγιμότητας**, όταν ο αέρας θερμαίνεται σε απευθείας επαφή με το έδαφος, μέσω **μεταφοράς**, όταν ο αέρας θερμαίνεται από τη Γη, διαστέλλεται και ανέρχεται, ενώ ο ψυχρός αέρας κατέρχεται, ως πυκνότερος και βαρύτερος, και θερμαίνεται από τη Γη, και μέσω **ακτινοβολίας**, όταν η Γη θερμαίνεται από την εισερχόμενη μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία και ο αέρας από την εξερχόμενη μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία (Σχήμα 2.2).

Η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας αποδίδεται σ' έναν τόπο με διάφορες παραμέτρους. Ειδικότερα, παράμετροι είναι η απολύτως μέγιστη (Tmax) και ελάχιστη (Tmin) τιμή της θερμοκρασίας του αέρα, που σημειώνεται στον τόπο αυτό στη διάρκεια της μελετώμενης χρονικής περιόδου, όπως είναι το 24ωρο, ο μήνας ή το έτος. Επίσης,

άλλη παράμετρος είναι η μέση τιμή της θερμοκρασίας για αντίστοιχες εξεταζόμενες χρονικές περιόδους. Η ημερήσια μεταβολή της θερμοκρασίας ακολουθεί μια ημιτονοειδή συνάρτηση με ένα μέγιστο το μεσημέρι, περίπου 1-2 ώρες μετά τον ηλιασμό σε ανέφελη μέρα και ένα ελάχιστο νωρίς το πρωί σε ανέφελη νύχτα. Η κατανομή της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας επηρεάζεται όχι μόνο από την ηλιακή ακτινοβολία, αλλά και από το γεωγραφικό πλάτος, την κατανομή ξηράς-θάλασσας, το υψόμετρο, τους επικρατούντες ανέμους, την κλίση της επιφάνειας και τη φύση του εδάφους, την παρουσία χιονιού ή πάγου, καθώς και τα θαλάσσια ρεύματα.



Σχήμα 2.2. *Μηχανισμοί μετάδοσης της θερμότητας στην ατμόσφαιρα.*

Επίσης, ημέρα μερικού παγετού ορίζεται η ημέρα στην οποία η τιμή της ελάχιστης θερμοκρασίας του αέρα είναι $< 0^{o}$ C. Αν συμβεί σε μια ημέρα η τιμή της μέγιστης θερμοκρασίας του αέρα να είναι $<0^{o}$ C, τότε η ημέρα αυτή χαρακτηρίζεται ημέρα ολικού παγετού. Τέλος, μια πολύ χρήσιμη κλιματική παράμετρος για τη γεωργία είναι η περίοδος ελεύθερης παγετού, δηλαδή ο αριθμός των διαδοχικών ημερών στις οποίες η ελάχιστη θερμοκρασία του αέρα βρίσκεται συνεχώς πάνω από τους 0^{o} C.

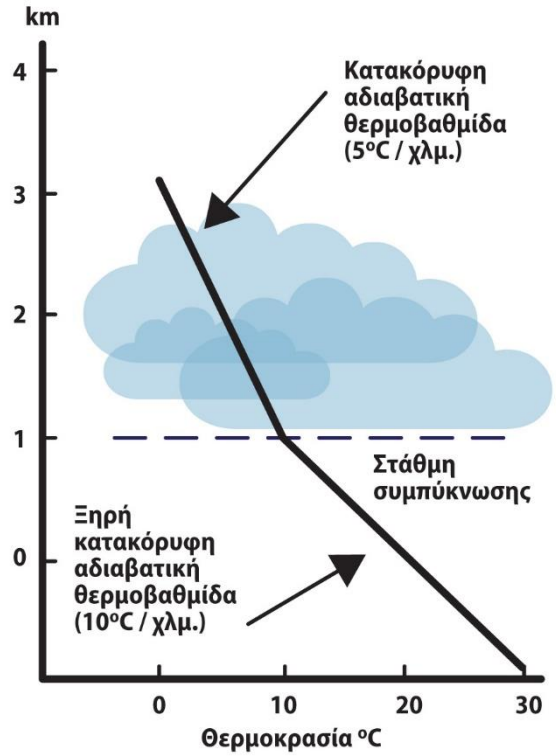
2.2.1. Θερμομετρικά εύρη

Ημερήσιο Θερμομετρικό Εύρος (ΗΘΕ) ορίζεται η διαφορά μεταξύ της μέγιστης και της ελάχιστης τιμής της θερμοκρασίας στο 24ωρο, δηλαδή ΗΘΕ = ($T_{max} - T_{min}$). Αντίστοιχα, Ετήσιο Θερμομετρικό Εύρος (ΕΘΕ) ορίζεται η διαφορά μεταξύ της μέσης θερμοκρασίας του αέρα τον ψυχρότερο μήνα και της μέσης θερμοκρασίας τον θερμότερο μήνα, που σημειώνονται μέσα στο έτος, δηλαδή ΕΘΕ = ($T_{mo(θερμοτ.)} - T_{mo(ψυχροτ)}$). Το ΗΘΕ και το ΕΘΕ επηρεάζονται από τη νέφωση, το υψόμετρο, τη φύση του εδάφους και της βλάστησης, το γεωγραφικό πλάτος, το βαθμό ηπειρωτικότητας, καθώς και την ύπαρξη αναταράξεων.

Σε επιφάνειες με βλάστηση παρατηρείται μείωση του ΗΘΕ, καθόσον παρατηρείται μείωση της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στο έδαφος λόγω της συγκράτησης από τα φυλλώματα. Στην ουσία, όταν υπάρχει βλάστηση, η προσπίπτουσα μικρού μήκους κύματος ηλιακή ακτινοβολία την ημέρα είναι μικρότερη από αυτήν όταν υπάρχει γυμνό έδαφος, ενώ τη νύχτα η εξερχόμενη μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία συγκρατείται από τη βλάστηση, ωστόσο μέρος της επιστρέφει στην επιφάνεια. Επίσης, όταν υπάρχει βλάστηση, παρατηρούνται επιβράδυνση της ψύξης, αύξηση της λανθάνουσας θερμότητας, λόγω εξατμισοδιαπνοής, αύξηση της τριβής, καθώς και πιο αποτελεσματικές ανταλλαγές αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας μεταξύ επιφάνειας και αέρα. Η ύπαρξη υγρασίας στην επιφάνεια και το υπέδαφος επηρεάζουν το ΗΘΕ, διότι παρατηρείται αύξηση της εξάτμισης, της θερμοχωρητικότητας και της θερμικής αγωγιμότητας του εδάφους. Αντίστοιχα, σε ελεύθερη επιφάνεια νερού, περίπου το 90% της καθαρής ακτινοβολίας διατίθεται για εξάτμιση. Τέλος, σε υγρό και γυμνό έδαφος, σημαντικό μέρος της καθαρής ακτινοβολίας διατίθεται για εξάτμιση, που μειώνεται όσο ξηραίνεται το έδαφος.

2.2.2. Θερμοβαθμίδα

Στην ατμόσφαιρα, σε ύψη κάτω από 1 cm ή πάνω από 100 km, η ανάμειξη πραγματοποιείται με την ανταλλαγή μικρών αέριων μαζών, των επονομαζόμενων «πακέτων αέρα» (air parcels). Στην ουσία, το πακέτο αέρα θεωρείται θερμικά μονωμένο από το περιβάλλον, και γι' αυτό η θερμοκρασία του αλλάζει αδιαβατικά καθώς κινείται κατακόρυφα στην ατμόσφαιρα. Επίσης, κινείται σχετικά αργά, με αποτέλεσμα η κινητική του ενέργεια να είναι ένα αμελητέο τμήμα της



Σχήμα 2.3 *Απεικόνιση ξηρής και υγρής κατακόρυφης αδιαβατικής θερμοβαθμίδας.*

ολικής ενέργειας, και προσαρμόζεται ακαριαία στην πίεση του περιβάλλοντα αέρα σε κάθε επίπεδο στο οποίο βρίσκεται. Η έννοια του πακέτου αέρα είναι πολύ χρήσιμη στην εξέταση των ατμοσφαιρικών διεργασιών. Πιο συγκεκριμένα, οι διεργασίες χαρακτηρίζονται αδιαβατικές όταν δεν παρατηρείται απώλεια ή προσθήκη θερμότητας, όπως συμβαίνει στην περίπτωση ενός πακέτου αέρα, που κινείται αδιαβατικά στην ατμόσφαιρα, δηλαδή είναι θερμικά μονωμένο.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η ηλιακή ακτινοβολία θερμαίνει κατά κύριο λόγο τη Γη, ενώ η ατμόσφαιρα δεν επηρεάζεται, γιατί είναι καλός μονωτής. Ωστόσο, με τη διαδικασία της αγωγιμότητας θερμαίνονται τα κατώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, λόγω της άμεσης επαφής τους με την επιφάνεια του εδάφους, ενώ τα υπερκείμενα στρώματα δεν θερμαίνονται με τον ίδιο τρόπο, ούτε και με τη διαδικασία της μεταφοράς, και ως εκ τούτου παραμένουν ψυχρότερα από τα υποκείμενα στρώματα.

Ο ρυθμός μείωσης της θερμοκρασίας με το ύψος ονομάζεται θερμοβαθμίδα. Η μείωση της θερμοκρασίας με το ύψος στην τροπόσφαιρα ονομάζεται **κατακόρυφη αδιαβατική θερμοβαθμίδα** και δίνεται από την εξίσωση:

$$\gamma_d = -(dT/dz) \quad (2.1)$$

Στην περίπτωση που η ατμόσφαιρα δεν είναι κορεσμένη σε υδρατμούς, δηλαδή είναι ξηρή, η θερμοβαθμίδα χαρακτηρίζεται **Ξηρή Κατακόρυφη Αδιαβατική Θερμοβαθμίδα** (ΞΑΘ) και έχει τιμή 10^o C ανά 1 km (Σχήμα 2.3). Ο μηχανισμός αυτός ονομάζεται αδιαβατική ψύξη και πραγματοποιείται με διαστολή της αέριας μάζας, λόγω ανόδου στην ατμόσφαιρα. Όταν η ατμόσφαιρα είναι κορεσμένη σε υδρατμούς, δηλαδή ο αέρας είναι υγρός, η θερμοβαθμίδα χαρακτηρίζεται **Υγρή Κατακόρυφη Αδιαβατική Θερμοβαθμίδα** (ΥΑΘ) και έχει τιμή 5^o C ανά 1 km (Σχήμα 2.3). Ο μηχανισμός αυτός ονομάζεται αδιαβατική ψύξη κορεσμένου αέρα. Υπάρχει και

η αδιαβατική θέρμανση, που πραγματοποιείται με συστολή της αέριας μάζας, λόγω καθόδου στην ατμόσφαιρα, και είναι διαφορετική από την ΥΑΘ.
Η κατακόρυφη κατανομή της θερμοκρασίας στο Ατμοσφαιρικό Οριακό Στρώμα (ΑΟΣ) και ενδεχόμενες αναστροφές εξαρτώνται από διάφορους παράγοντες, όπως είναι επιγραμματικά:

- ο τύπος της αέριας μάζας, δηλαδή η συνοπτική κατάσταση,
- τα θερμικά χαρακτηριστικά επιφάνειας και μέσου, δηλαδή το ΗΘΕ,
- η καθαρή ακτινοβολία στην επιφάνεια και η κατανομή καθ' ύψος, δηλαδή η θέρμανση και η ψύξη,
- η αισθητή ροή της θερμότητας και οι μεταβολές καθ' ύψος, δηλαδή ο ρυθμός θέρμανσης και ψύξης του αέρα λόγω σύγκλισης,
- οι ανταλλαγές λανθάνουσας θερμότητας στην εξάτμιση,
- η θερμή ή ψυχρή οριζόντια μεταφορά αέρα (advection) ως συνάρτηση του ύψους στο ΑΟΣ,
- το ύψος του ΑΟΣ, όπου η τύρβη περιορίζεται.
- Ομοίως, παράγοντες για ειδική υγρασία ή αναλογία μείγματος υδρατμών στο ΑΟΣ είναι:
- η ειδική υγρασία αέριας μάζας ακριβώς πάνω από το ΑΟΣ,
- ο τύπος της επιφάνειας, η θερμοκρασία, η διαθέσιμη υγρασία για εξάτμιση,
- ο ρυθμός εξατμισοδιαπνοής ή συμπύκνωσης στην επιφάνεια και οι μεταβολές υδρατμών καθ' ύψος,
- η οριζόντια μεταφορά (advection) υδρατμών ως συνάρτηση του ύψους,
- η μέση κατακόρυφη κίνηση στο ΑΟΣ και ο πιθανός σχηματισμός νεφών και οι διαδικασίες υετού,
- το βάθος του ΑΟΣ, όπου οι υδρατμοί αναμειγνύονται.

Επισημαίνεται ακόμα ότι κατακόρυφες ανταλλαγές θερμότητας και υδρατμών γίνονται με τυρβώδεις κινήσεις στο ΑΟΣ. Υπάρχουν δύο τύποι κινήσεων τύρβης, η ωθούμενη ανοδική μεταφορά και η ελεύθερη ανοδική μεταφορά, που προκαλεί θέρμανση της επιφάνειας. Επιπλέον, σύγκλιση ή απόκλιση της αισθητής ροής θερμότητας προκαλεί θέρμανση ή ψύξη του αέρα, όπως η καθαρή ακτινοβολούμενη ροή απόκλισης ή σύγκλισης. Τέλος, η οριζόντια μεταφορά θερμότητας και υγρασίας είναι σημαντική μόνο όταν υπάρχουν απότομες μεταβολές χαρακτηριστικών επιφάνειας, όπως αστική-αγροτική ή στεριά-νερό.

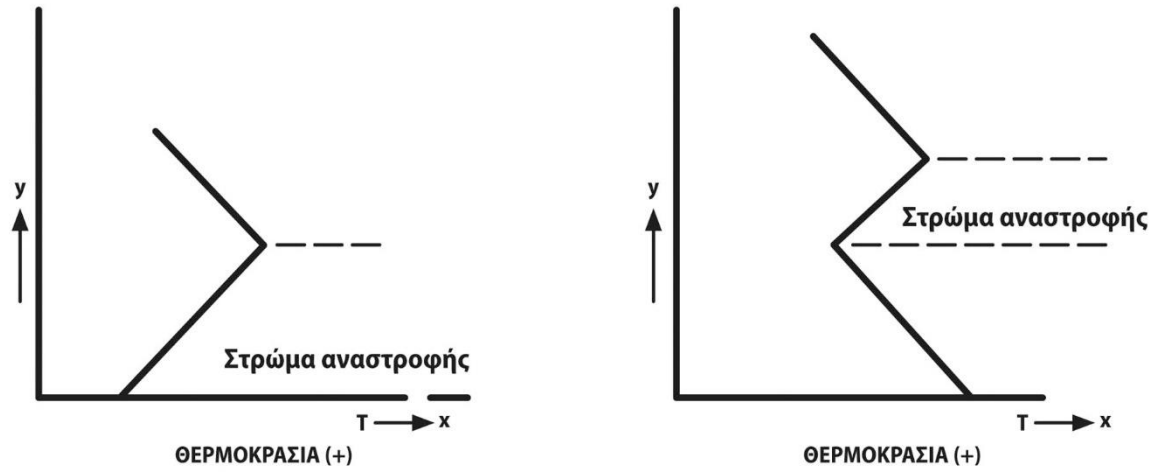
2.2.3. Αναστροφή θερμοκρασίας

Αναστροφή θερμοκρασίας λέγεται το φαινόμενο κατά το οποίο η θερμοκρασία αυξάνεται με το ύψος ή παραμένει ισόθερμη (Σχήμα 2.4). Οι αναστροφές επιφάνειας (Σχήμα 2.4α) διακρίνονται σε ακτινοβολίας, θερμού αέρα, χιονοσκεπούς εδάφους και ορογραφίας, και περιγράφονται επιγραμματικά στη συνέχεια:

- **Ακτινοβολίας**. Αν το έδαφος ακτινοβολεί μεγαλύτερα ποσά θερμότητας από αυτά που δέχεται, τότε ψύχεται, με αποτέλεσμα το παρεδάφιο στρώμα του αέρα να γίνεται ψυχρότερο από το υπερκείμενο και, έτσι. η θερμοκρασία να αυξάνεται με το ύψος. Συνήθως, το βάθος κυμαίνεται από 10 μέχρι 400 m, το δε μέγεθος του στρώματος αναστροφής φτάνει μέχρι και το μισό του ΗΘΕ. Ευνοϊκές συνθήκες για τις αναστροφές ακτινοβολίας είναι ο αίθριος νυκτερινός ουρανός και ο ασθενής άνεμος, με ταχύτητα < 3 m sec^{-1} κατά μέγιστο.
- **Θερμού αέρα**. Όταν μια θερμή αέρια μάζα, κατά την οριζόντια κίνησή της, διέλθει πάνω από μια ψυχρότερη περιοχή, τότε τα παρεδάφια στρώματά της ψύχονται ισχυρότερα από τα υπερκείμενα, με αποτέλεσμα να δημιουργείται αναστροφή θερμοκρασίας.
- **Χιονοσκεπούς εδάφους**. Οι αναστροφές της κατηγορίας αυτής δημιουργούνται όπως ακριβώς οι αναστροφές θερμού αέρα. Το παρεδάφιο στρώμα της αέριας μάζας, εξαιτίας της κατανάλωσης ποσότητας θερμότητας για την τήξη του χιονιού, ψύχεται περισσότερο από το υπερκείμενο, με αποτέλεσμα να σημειώνεται αναστροφή θερμοκρασίας.
- **Ορογραφίας**. Οι αναστροφές αυτές δημιουργούνται όταν ψυχρότερες παρεδάφιες αέριες μάζες από τις τοπογραφικά ψηλότερες περιοχές του εδάφους κατέρχονται σε λεκανοειδείς χαμηλότερες περιοχές.

Όταν το στρώμα αναστροφής δεν είναι επιφανειακό (Σχήμα 2.4β), διακρίνονται οι παρακάτω κατηγορίες αναστροφών, που χαρακτηρίζονται αναστροφές ελεύθερης ατμόσφαιρας: η αναστροφή τριβής, που εμφανίζεται

στο στρώμα τριβής, οι μετωπικές αναστροφές στην ανολίσθηση θερμού αέρα, οι δυναμικές στην περίπτωση



ισχυρών ανέμων και οι αντικυκλωνικές αναστροφές κατά την καθίζηση θερμού αέρα.
Σχήμα 2.4. *Σχηματική παράσταση θερμοκρασιακής αναστροφής.*

2.3. Θερμοκρασία του εδάφους

2.3.1. Χωροχρονικές μεταβολές της θερμοκρασίας του εδάφους

Η θερμοκρασία του εδάφους είναι συνάρτηση της ποσότητας της θερμότητας, της προσπίπτουσας και ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας και των θερμικών ιδιοτήτων του εδάφους. Η επιφάνεια του εδάφους εκπέμπει θερμική ακτινοβολία. Συγκρίνοντας τις θερμοκρασίες δύο τύπων εδαφών, ενός χλοερού και ενός γυμνού, επισημαίνεται ότι το γυμνό είναι θερμότερο από το χλοερό, οι απόλυτα ελάχιστες θερμοκρασίες είναι περίπου ίσες, ενώ οι απόλυτα μέγιστες θερμοκρασίες του γυμνού είναι πολύ μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες του χλοερού.

2.3.1.1. Μεταβολές με το βάθος

Για ομογενή εδάφη, με συμμετρικές κυμάνσεις θερμοκρασίας, η κατανομή των εξαρτώμενων από το βάθος διακυμάνσεων της θερμοκρασίας του εδάφους, καθώς και η στιγμή κατά την οποία σημειώνονται η μέγιστη και η ελάχιστη θερμοκρασία, ακολουθούν τους νόμους του Fourier:

- Εάν το βάθος αυξάνεται με αριθμητική πρόοδο, τότε το θερμομετρικό εύρος ελαττώνεται κατά γεωμετρική πρόοδο. Συνεπώς, το εύρος ελαττώνεται γρήγορα με την αύξηση του βάθους.
- Η επιβράδυνση της στιγμής κατά την οποία σημειώνεται η μέγιστη-ελάχιστη θερμοκρασία είναι ανάλογη του βάθους.
- Ένα στρώμα εδάφους του οποίου η θερμοκρασία δεν μεταβάλλεται εντός ενός 24ώρου ονομάζεται σταθερό ημερήσιο στρώμα θερμοκρασίας. Στα μεσαία πλάτη, αυτό το στρώμα βρίσκεται σε βάθος 70-100 cm. Ένα σταθερό, σε ετήσιες θερμοκρασίες, στρώμα εδάφους στα μεσαία πλάτη βρίσκεται σε βάθος 15-20 m. Οι μέγιστες και οι ελάχιστες θερμοκρασίες εγκαθίστανται αργότερα στα βάθη αυτά και όχι στην επιφάνεια του εδάφους. Η συγκεκριμένη καθυστέρηση είναι ευθέως ανάλογη του βάθους. Σύμφωνα με τα δεδομένα μακροχρόνιων παρατηρήσεων, τα ημερήσια μέγιστα και ελάχιστα καθυστερούν κατά μέσον όρο 2,5- ,5 ώρες για κάθε 10 cm βάθους, ενώ τα ετήσια μέγιστα και ελάχιστα καθυστερούν 20-30 ημέρες για κάθε 1 m βάθους. Στο Σχήμα 2.5 απεικονίζεται η μεταβολή των μέσων μέγιστων και ελάχιστων θερμοκρασιών εδάφους σε σχέση με το βάθος. Φαίνεται λοιπόν ότι το ΗΘΕ είναι περίπου 0 σε βάθος 70-80 cm.

Γενικά, τα εύρη των μεταβολών της θερμοκρασίας του εδάφους μειώνονται όσο αυξάνεται το βάθος παρατηρήσεων. Ισχύει η σχέση:

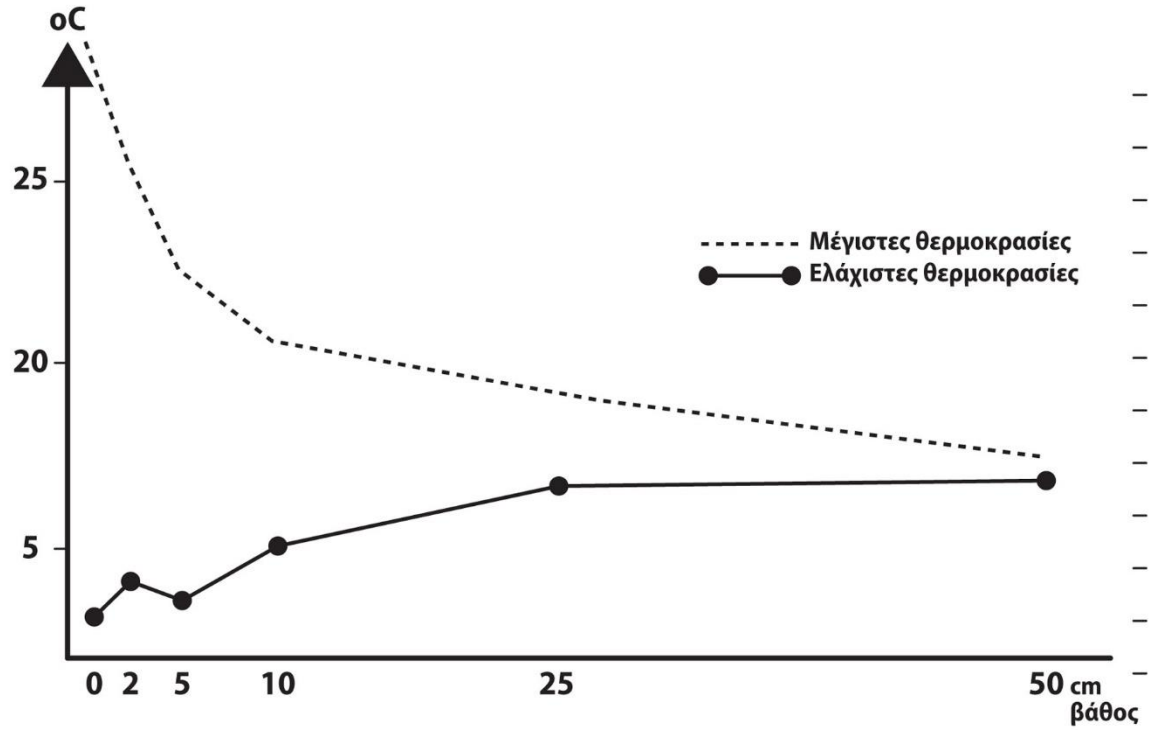
$$d_h = d_o e^{-h\left(\frac{\pi}{kt}\right)^{1/2}} \quad (2.2)$$

όπου d_h είναι η τιμή του εύρους της μεταβολής σε βάθος h, d_o η τιμή του εύρους της μεταβολής στην επιφάνεια του εδάφους, h το βάθος σε μέτρα, k ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας εδάφους και t η χρονική διάρκεια κατά την οποία υπολογίζεται η θερμική μεταβολή. Για $d_h = d_o$, ισχύει:

$$h\left(\frac{\pi}{kt}\right)^{1/2} = h_1\left(\frac{\pi}{k_1 t_1}\right)^{1/2} \Rightarrow \quad \frac{h}{h_1} = \left(\frac{kt}{k_1 t_1}\right)^{1/2} \quad \text{Για } k=k_1 \Rightarrow h/ h_1 = (t/ t_1)^{1/2} \quad (2.3)$$

Οι παραπάνω σχέσεις σημαίνουν ότι τα βάθη όπου τα θερμοκρασιακά εύρη έχουν την ίδια τιμή σε μια θέση παρατήρησης είναι ανάλογα των τετραγωνικών ριζών των χρονικών διαστημάτων για τα οποία σημειώνεται το ίδιο θερμοκρασιακό εύρος. Για παράδειγμα, για δύο ίσες κυμάνσεις με περιόδους άνισης διάρκειας, ισχύουν για ημερήσια και ετήσια εύρη οι σχέσεις:

$\Rightarrow h/ h_1 = (t/ t_1)^{1/2} \Rightarrow h/ h_1 = (365/ 1)^{1/2}$
$\Rightarrow h/ h_1 = 19{,}1 \Rightarrow h= 19{,}1\ h_1$ (2.4)

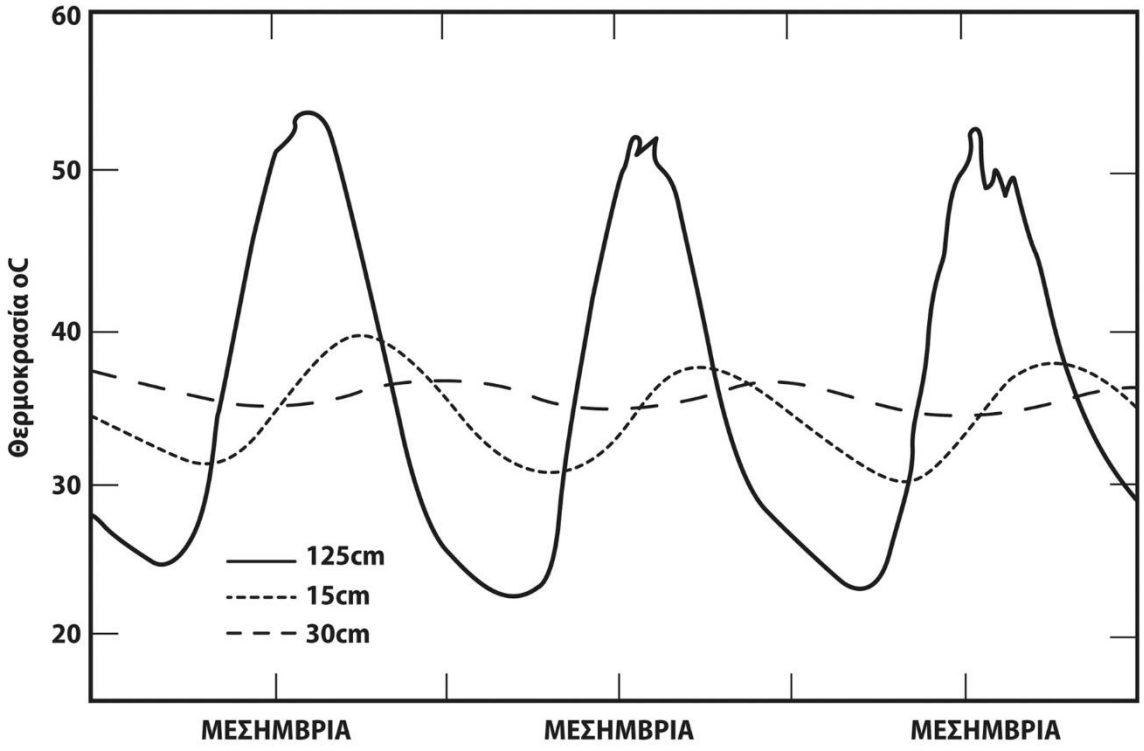


Σχήμα 2.5. *Μεταβολή των μέσων μέγιστων και ελάχιστων θερμοκρασιών του εδάφους ως συνάρτηση του βάθους.*

Η παραπάνω σχέση σημαίνει ότι, για βάθος h_1= 12 cm, το εύρος της ημερήσιας κύμανσης μειώνεται στο μισό. Συνεπώς, το εύρος της ετήσιας κύμανσης μειώνεται επίσης στο μισό σε βάθος: h= 12 ×19,1≈ 229 cm.
Γενικά, σε βάθος 10 m, οι μέσες θερμοκρασίες είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες στην επιφάνεια. Επίσης, η μέση θερμοκρασία της επιφάνειας του εδάφους είναι υψηλότερη από την αντίστοιχη του αέρα. Ένα αμετάβλητο στρώμα αντιστοιχεί στο βάθος μηδενισμού των ετήσιων κυμάνσεων. Θερμοκρασίες εδάφους κάτω από την επιφάνεια μετρώνται πιο εύκολα. Το εύρος της ημερήσιας κύμανσης μειώνεται εκθετικά με το βάθος μέχρι 1 m ή λιγότερο. Ημερήσιες ή εβδομαδιαίες μέσες θερμοκρασίες δείχνουν ημιτονοειδή «ετήσιο κύμα» περίπου 10 m.

2.3.1.2. Ημερήσιες μεταβολές

Η μέση θερμοκρασία του εδάφους είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του αέρα. Επίσης, η μέγιστη θερμοκρασία της επιφάνειας του εδάφους εμφανίζεται 1-2 ώρες νωρίτερα απ' ό,τι η αντίστοιχη του αέρα. Αντίθετα, η ελάχιστη θερμοκρασία εμφανίζεται περίπου τον ίδιο χρόνο. Οι χρονικές περίοδοι εμφάνισης μέγιστων και ελάχιστων τιμών παρουσιάζουν υστέρηση με την αύξηση του βάθους. Η μέγιστη θερμοκρασία παρατηρείται για 13 ώρες περίπου, έπειτα αρχίζει να παρουσιάζει μείωση, συνεχίζοντας μέχρι να φτάσει στο πρωινό ελάχιστο. Η διαφορά μεταξύ μεγίστου και ελαχίστου αποκαλείται ημερήσιο εύρος παρέκκλισης. Παράγοντες που επηρεάζουν το ημερήσιο εύρος της θερμοκρασίας του εδάφους είναι η εποχή του έτους, το γεωγραφικό πλάτος, η ύπαρξη νεφών, το χρώμα του χώματος, η θερμική χωρητικότητα και θερμική αγωγιμότητα, η κάλυψη βλάστησης ή χιονιού, η ηλιακή ακτινοβολία, καθώς και η έκθεση των πλαγιών. Στο Σχήμα 2.6 απεικονίζεται το ΗΘΕ θερμοκρασίας εδάφους σε διάφορα βάθη. Γίνεται εμφανές ότι το ΗΘΕ μειώνεται όσο αυξάνεται το βάθος, ενώ συγχρόνως παρατηρείται χρονική υστέρηση με το βάθος στην εμφάνιση μεγίστων και ελαχίστων.



Σχήμα 2.6. *Ημερήσιο εύρος της θερμοκρασίας του εδάφους σε 3 βάθη.*

2.3.1.3. Ετήσιες μεταβολές

Η ετήσια μεταβολή της θερμοκρασίας του εδάφους με το βάθος έχει μεγάλη πρακτική αξία. Με την αύξηση του βάθους υπάρχει μετατόπιση του χρόνου εμφάνισης του θερμότερου και του ψυχρότερου μήνα, ενώ και η τιμή του ΕΘΕ αέρα είναι μικρότερη του αντίστοιχου ΕΘΕ της επιφάνειας του εδάφους. Η επιφάνεια του εδάφους θερμαίνεται το καλοκαίρι πολύ περισσότερο απ' ό,τι θερμαίνεται η αντίστοιχη του αέρα.

Στο Σχήμα 2.7 απεικονίζονται οι ετήσιες μεταβολές των εβδομαδιαίων μέσων θερμοκρασιών του εδάφους. Φαίνεται ότι το ΕΘΕ μειώνεται με το βάθος, ενώ συγχρόνως παρατηρείται χρονική υστέρηση στην εμφάνιση των ελαχίστων.

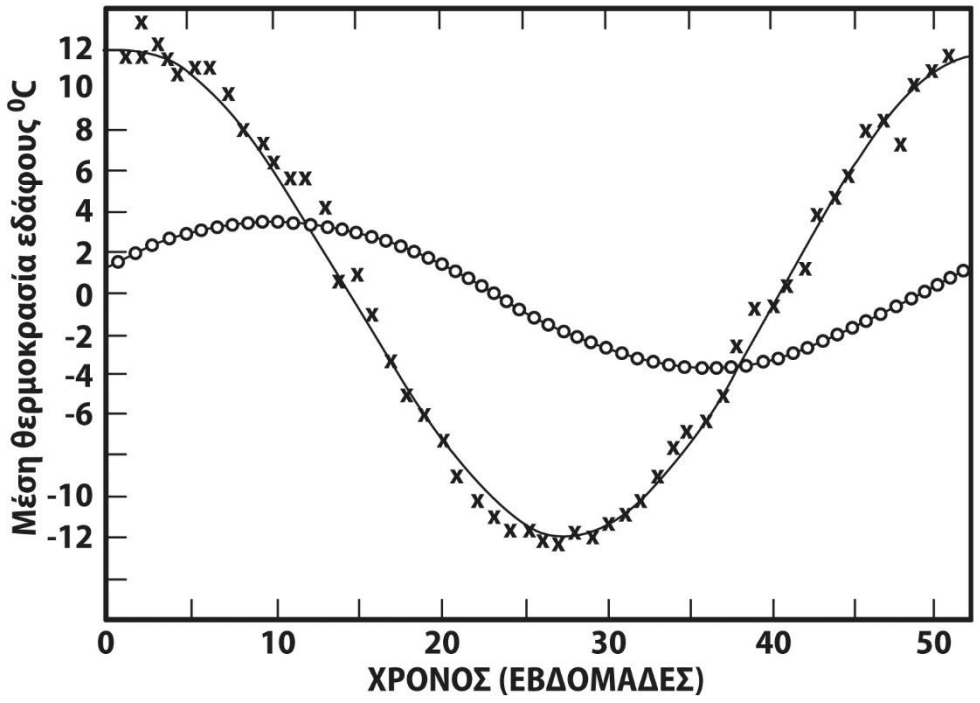
2.3.2. Θερμικές ιδιότητες του εδάφους

Η διάδοση της θερμότητας και οι επιπτώσεις της στη μέση ή στην κατανομή της θερμοκρασίας εξαρτάται από την πυκνότητα της μάζας, την ειδική θερμότητα, τη θερμοχωρητικότητα και τη θερμική αγωγιμότητα. **Ειδική θερμότητα** (c) ενός υλικού ορίζεται το ποσό της θερμότητας που απορροφάται ή απελευθερώνεται για την αύξηση ή τη μείωση της θερμοκρασίας της μοναδιαίας μάζας του υλικού κατά 1°. **Θερμοχωρητικότητα** (C) είναι το γινόμενο της **πυκνότητας μάζας** (ρ) και της ειδικής θερμότητας (c) ανά μονάδα όγκου. Ο ρυθμός διάδοσης της θερμότητας ή ροή θερμότητας προς μια κατεύθυνση είναι ανάλογος της βαθμίδας θερμοκρασίας προς την κατεύθυνση αυτή και ισχύει η σχέση:

$$H = -K(dt/dz) \quad (2.5)$$

όπου K είναι η **θερμική αγωγιμότητα**.
Θερμική διαχυσιμότητα (a_h) ονομάζεται ο λόγος της θερμικής αγωγιμότητας (K) προς τη θερμοχωρητικότητα (C) και ισχύει η σχέση:

$$H/\rho c = -a_h(dt/dz) \quad (2.6)$$



Σχήμα 2.7. *Ετήσιες κυμάνσεις των εβδομαδιαίων μέσων θερμοκρασιών του εδάφους σε δύο βάθη.*

Η θερμότητα διαδίδεται σε έδαφος, πετρώματα και άλλα υλικά υπεδάφους μέσω της αγωγιμότητας, εκτός από το νερό σε κίνηση, με συνέπεια οι μοριακές θερμικές ιδιότητες να χαρακτηρίζουν και το μέσο. Οι ημερήσιες και ετήσιες διακυμάνσεις της επιφανειακής θερμοκρασίας του εδάφους εξαιτίας της θερμικής αγωγιμότητας μεταδίδονται στα βαθύτερα στρώματα του εδάφους. Ένα στρώμα χώματος του οποίου η θερμοκρασία παρουσιάζει ημερήσιες και ετήσιες αποκλίσεις ονομάζεται ενεργό στρώμα. Ο αέρας χαρακτηρίζεται από χαμηλότατη θερμοχωρητικότητα, χαμηλότατη θερμική αγωγιμότητα, πολύ υψηλή θερμική διαχυσιμότητα και χαμηλή πυκνότητα. Αντίθετα, το νερό χαρακτηρίζεται από υψηλότατη θερμοχωρητικότητα. Οι θερμικές ιδιότητες αέρα και νερού είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας. Αντίστοιχα, οι θερμικές ιδιότητες του εδάφους εξαρτώνται από τα στερεά σωματίδια, την κατανομή του μεγέθους, το πορώδες και την υγρασία του εδάφους. Επίσης, η προσθήκη νερού σε ξηρό έδαφος αυξάνει τη θερμοχωρητικότητα και τη θερμική αγωγιμότητα.

2.3.2.1. Θεωρία διάδοσης της θερμότητας του εδάφους
Έστω ομοιόμορφο αγώγιμο έδαφος, όπου η θερμότητα ρέει μόνο κατακόρυφα. Έστω επίσης το ισοζύγιο ενέργειας ενός κυλίνδρου με οριζόντια διατομή. Σύμφωνα με το νόμο διατήρησης της ενέργειας, ο καθαρός ρυθμός θέρμανσης σε όγκο ισούται με το ρυθμό αλλαγής της εσωτερικής ενέργειας και ισχύει:

$(d/dt)(\rho cT) = -dH/dz$ (2.7)

Δηλαδή, από τις (4.1) και (4.2) εξάγεται η εξίσωση Fourier (4.3) θερμικής αγωγής.
Συνεπώς:

$dT/dt = (d/dz)[(K/\rho c)(dT/dz)] = (d/dz)[a_h(dT/dz)]$ (2.8)

Από την (4.2) υπολογίζεται η ροή θερμότητας στο έδαφος H_G στην εξίσωση ισοζυγίου ενέργειας από μετρήσεις της θερμοκρασίας του εδάφους. Συνεπώς, η ολοκλήρωση της (4.2) από z = 0 έως D οδηγεί στη σχέση:

$H_G = H_D + \int d/dt\ (\rho cT)dz$ (2.9)

2.3.2.2. Διάδοση του θερμικού κύματος σε ομογενές έδαφος
Η θερμοκρασία επιφάνειας ως ημιτονοειδής συνάρτηση του χρόνου t δίνεται από τη σχέση:

$T_s = T_m + A_s \sin[(2\pi/P)(t-t_m)]$ (2.10)

όπου T_m είναι η μέση θερμοκρασία, A_s το εύρος, P η περίοδος κύματος της επιφανειακής θερμοκρασίας, t_m ο χρόνος, με $T_s = T_m$.
Η λύση της εξίσωσης (4.3), με οριακές συνθήκες, $z = 0 \rightarrow T = T_s(t)$ και $z = \infty \rightarrow T = T_m$, οδηγεί στη σχέση:

$T = T_m + A_s \exp(-z/d)\sin[(2\pi/P)(t - t_m) - z/d]$ (2.11)

όπου d είναι το βάθος του θερμικού κύματος, που δίνεται από τη σχέση:

$d = (Pa_h/\pi)^{1/2}$ (2.12)

που εφαρμόζεται σε ημερήσια και ετήσια κύματα θερμοκρασίας.

2.4. Θερμοκρασία του νερού και της θάλασσας

Η θερμοκρασία της επιφάνειας των ωκεανών και των θαλασσών από μετεωρολογική άποψη έχει μεγάλη σημασία, γιατί ρυθμίζει τη θερμοκρασία των αέριων μαζών που κινούνται πάνω από αυτούς. Η μέση θερμοκρασία της επιφάνειας της θάλασσας είναι μεγαλύτερη στο βόρειο (19° C) από ό,τι στο νότιο (16° C) ημισφαίριο. Λόγω της διαπερατότητας των ηλιακών ακτίνων στη θάλασσα και της ειδικής θερμότητας (ή θερμοχωρητικότητας) της θάλασσας, που είναι τριπλάσια από εκείνη της ξηράς, καθώς και του συνεχούς κυματισμού, που αναμειγνύει το νερό της θάλασσας, το ημερήσιο εύρος της επιφάνειας της θάλασσας είναι μικρό, περίπου 1° C, στις εύκρατες περιοχές. Το μέγιστο της θερμοκρασίας παρατηρείται τον Σεπτέμβριο και το ελάχιστο τον Μάρτιο ή και αργότερα. Στην ουσία, δεν υπάρχει ημερήσια κύμανση της θερμοκρασίας στη θάλασσα, ενώ και η ετήσια κύμανση είναι πολύ περιορισμένη Η τριπλάσια θερμοχωρητικότητα της θάλασσας σε σχέση με αυτήν της ξηράς, όπως έχει επισημανθεί, την καθιστά λιγότερο ευμετάβλητη στη θερμοκρασία. Έτσι, η ξηρά θερμαίνεται ισχυρότερα από τη θάλασσα και αποκτά μεγαλύτερες μέγιστες τιμές θερμοκρασίας, και αντίστοιχα ψύχεται εξίσου ισχυρά, με αποτέλεσμα να αποκτά ακόμα χαμηλότερες τιμές θερμοκρασίας από αυτήν. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε γεωγραφικά πλάτη μεγαλύτερα των 40° στο νότιο ημισφαίριο παρατηρείται στη θάλασσα μια σχεδόν παράλληλη κατανομή των ισόθερμων, τόσο τη χειμερινή, όσο και τη θερινή περίοδο. Αυτό συμβαίνει γιατί στα συγκεκριμένα πλάτη επικρατεί η ωκεάνια περιοχή έναντι της ηπειρωτικής, οπότε, εφόσον δεν υπάρχει ανομοιογένεια στην κατανομή ξηράς-θάλασσας, οι ισόθερμες καμπύλες εμφανίζονται σχεδόν παράλληλες. Στο Σχήμα 2.8 απεικονίζονται μηνιαίες θερμοκρασίες της επιφάνειας της θάλασσας.

2.5 Ατμοσφαιρική πίεση

Ατμοσφαιρική πίεση ή **βαρομετρική πίεση** ορίζεται η δύναμη που ασκείται στη μονάδα επιφάνειας από την επίδραση του βάρους της υπερκείμενης αέριας στήλης. Επομένως, όσο πιο ψηλά στην ατμόσφαιρα, τόσο πιο μικρή γίνεται η τιμή της πίεσης, εξαιτίας της μείωσης του υπερκείμενου αέρα και, συνεπώς, της μείωσης του βάρους. Η πίεση θεωρείται στατική όταν η ατμόσφαιρα είναι σε ηρεμία και δυναμική όταν υπάρχουν έντονες μεταβολές. Η ατμοσφαιρική πίεση είναι από τις πιο σημαντικές μετεωρολογικές παραμέτρους, γιατί συνδέεται με τη θερμοκρασία και τους ανέμους.

2.5.1. Μονάδες μέτρησης

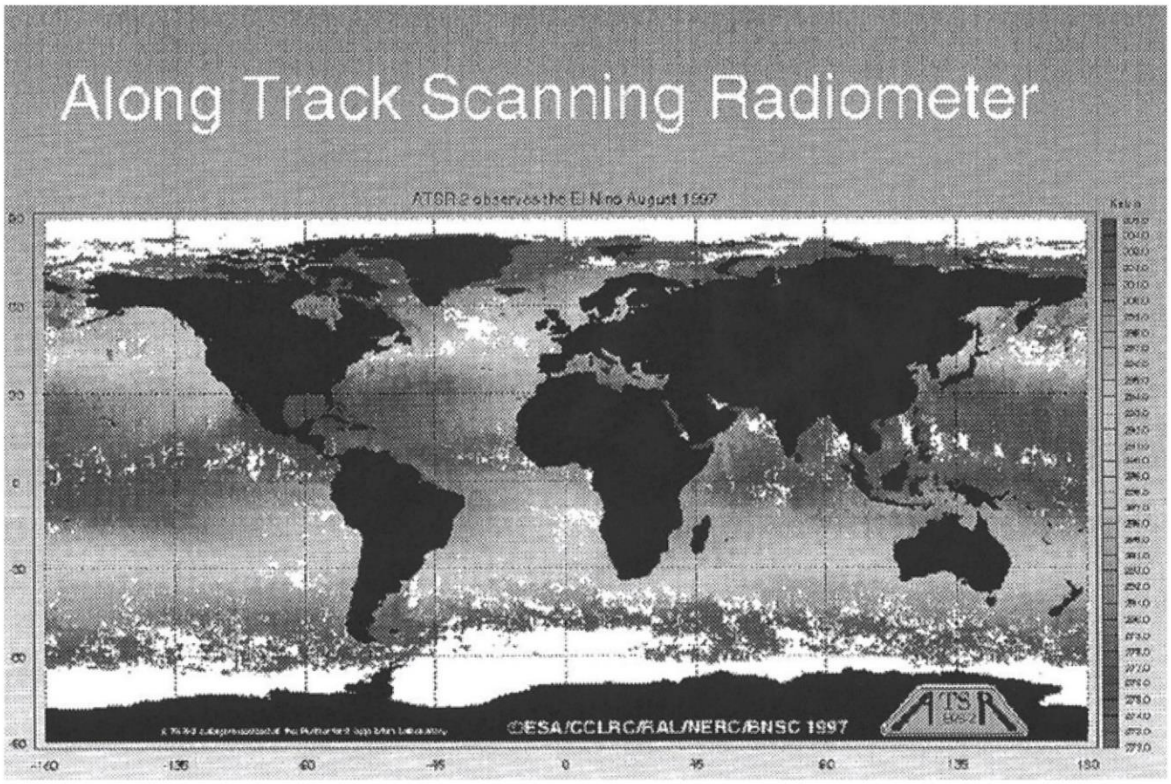
Οι μονάδες μέτρησης της ατμοσφαιρικής πίεσης είναι αρκετές. Πιο συγκεκριμένα, η μονάδα της πίεσης στο Διεθνές Σύστημα Μονάδων (SI) είναι το 1 Νιούτον ανά τετραγωνικό μέτρο (N/m^2), όπως προκύπτει από τη σχέση πίεσης P, δύναμης F και εμβαδού επιφάνειας s:

$$P = F / s \quad (2.13)$$

Το 1 Πασκάλ (Pa) εισήχθη ως μονάδα πίεσης αφού πρώτα εξισώθηκε με τη μονάδα πίεσης του SI. Ωστόσο, επειδή το 1 Pa είναι σχετικά μικρή μονάδα, έχει επικρατήσει ως συνηθέστερη μονάδα μέτρησης της ατμοσφαιρικής πίεσης το πολλαπλάσιό του, το 1 εκατοπασκάλ (hPa). Με αφορμή το πείραμα του Torricelli, για μονάδα πίεσης, έχει προκύψει το χιλιοστό υδραργύρου (mm Hg) και η ίντσα στήλης υδραργύρου (in Hg). Άλλες μονάδες είναι η 1 ατμόσφαιρα (atm) και το 1 μπαρ (bar), με πιο συχνό το υποπολλαπλάσιό του, το χιλιοστό του μπαρ (millibar/mbar). Οι ισοδυναμίες των μονάδων αυτών είναι:

Μονάδες

1 mbar = 10^{-3} bar = 10^3 dyn/ cm^2 = 10^2 Nt/ m^2 = 0,75 mmHg
1 At = 760 mmHg= 1.013,25 mbar
1 Pa = 1Nt/ m^2
(1 mmHg = 1,333 mbar, 1 inch Hg = 25,4 mmHg = 33,86 mbar) (2.14)



Σχήμα 2.8. *Μέση μηνιαία θερμοκρασία της επιφάνειας της θάλασσας (SST: Sea Surface Temperature) τον Αύγουστο του1997. Το μέγεθος του εικονοστοιχείου είναι 30'.*

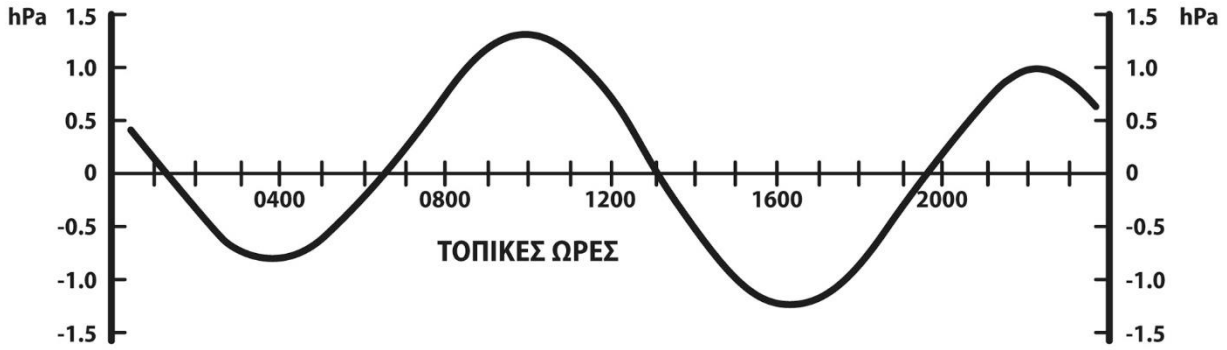
2.5.2. Μεταβολές της ατμοσφαιρικής πίεσης

Η ατμοσφαιρική πίεση δεν παραμένει σταθερή σε κάθε τόπο, αλλά μεταβάλλεται διαρκώς. Οι μεταβολές αυτές μπορεί να είναι είτε τυχαίες είτε περιοδικές. Οι τυχαίες μεταβολές παρουσιάζουν μεγαλύτερο μετεωρολογικό ενδιαφέρον, επειδή συνδέονται άμεσα με τις καιρικές μεταβολές πάνω από έναν τόπο. Όσο για τις περιοδικές, αυτές επιβεβαιώνονται μέσω αριθμητικών μοντέλων και στατιστικών αναλύσεων. Η ατμοσφαιρική πίεση σε κάθε τόπο παρουσιάζει δύο μέγιστες και δύο ελάχιστες τιμές στη διάρκεια του 24ώρου. Πιο αναλυτικά, παρουσιάζει το πρωτεύον μέγιστο στις 10:00 το πρωί και το δευτερεύον μέγιστο στις 10:00 το βράδυ, ενώ το πρωτεύον ελάχιστο παρατηρείται στις 4:00 το απόγευμα και το δευτερεύον στις 4:00 τα ξημερώματα (Σχήμα 2.9). Η διαφορά πρωτεύοντος μεγίστου και ελαχίστου ονομάζεται ημερήσιο εύρος, και αντίστοιχα η διαφορά δευτερεύοντος μεγίστου και ελαχίστου ονομάζεται νυχτερινό εύρος. Επίσης, η ετήσια μεταβολή της ατμοσφαιρικής πίεσης παρουσιάζει πολύ μεγαλύτερο εύρος απ' ό,τι η ημερήσια μεταβολή. Τέλος, η γεωγραφική κατανομή της ατμοσφαιρικής πίεσης στη Γη είναι πολύπλοκη, με μόνιμους αντικυκλώνες στο βόρειο ημισφαίριο, στις Αζόρες και στον Βόρειο Ειρηνικό, στο δε Νότιο ημισφαίριο στον Ν. Ειρηνικό, Ν. Ινδικό και Ν. Ατλαντικό.

Η κατακόρυφη μεταβολή της ατμοσφαιρικής πίεσης είναι 1 mmHg ανά 10-11 m, σύμφωνα με τη σχέση:

$\Delta z = 18429\ A\ (1 + \alpha T) \log (H_o / H)$ (2.15)

όπου Δz είναι η υψομετρική διαφορά σε m, H_o, Η οι τιμές της ατμοσφαιρικής πίεσης (σε mmHg), α ο συντελεστής διαστολής του υδραργύρου, Τ η μέση τιμή της θερμοκρασίας του αέρα μεταξύ τόπων και Α ο συντελεστής της υγρομετρικής κατάστασης του αέρα.
Αντίστοιχα, οι οριζόντιες μεταβολές είναι πολύ μικρότερες από τις κατακόρυφες, δηλαδή περίπου 30-40 mbar σε 10 ημέρες.



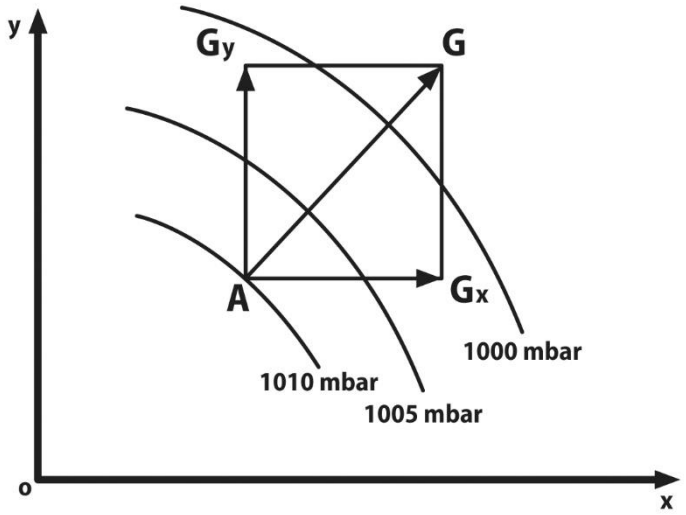
Σχήμα 2.9 *Ημερήσια μεταβολή της ατμοσφαιρικής πίεσης στην επιφάνεια.*

Βαροβαθμίδα ονομάζεται το πηλίκο της μεταβολής της πίεσης Ρ μεταξύ δύο ισοβαρών καμπύλων με τη μεταξύ τους απόσταση n [εξίσωση (2.16)] σε διεύθυνση κάθετη πάνω στις ισοβαρείς, στη μονάδα του μήκους (Σχήμα 2.10). Η βαροβαθμίδα έχει μεγάλη σημασία από μετεωρολογική άποψη, γιατί συνδέεται άμεσα με την ένταση του ανέμου. Πιο συγκεκριμένα, όσο πιο πυκνές είναι οι ισοβαρείς καμπύλες (μικρό Δχ), τόσο πιο μεγάλη θα είναι η τιμή της βαροβαθμίδας (μικρός παρονομαστής συνεπάγεται μεγάλο κλάσμα) και, επομένως, τόσο πιο μεγάλη θα είναι η ένταση του ανέμου.
Για παράδειγμα (Σχήμα 2.10), έστω ΑΒ = 60 km, ΒΓ = 90 km. Τότε, θα είναι βαροβαθμίδα (ΑΒ) = 5 mbar/60 km ~ 0,083 mbar/km, (ΒΓ) = 5 mbar/90 km ~ 0,055 mbar/km.

Γενικά: $G = -\dfrac{\partial P}{\partial n}$ (2.16)

$$G_x = -\frac{\partial P}{\partial x} \quad , \quad G_y = -\frac{\partial P}{\partial y} \quad \Rightarrow \quad G = \sqrt{\left[\left(\frac{\partial P}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial y}\right)^2\right]} \quad (2.17)$$

Βαρομετρική τάση ονομάζεται η μεταβολή της ατμοσφαιρικής πίεσης σε μια περιοχή, σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, π.χ. 17-20 ώρες. Η μέτρηση γίνεται συνήθως ανά τρεις ώρες. Η βαρομετρική τάση είναι πολύ σημαντική για την εκτίμηση των συστημάτων πίεσης, επειδή ελαττώνεται όταν πλησιάζει βαρομετρικό χαμηλό και αυξάνεται όταν πλησιάζει βαρομετρικό υψηλό.



Σχήμα 2.10. *Απεικόνιση της έννοιας της βαροβαθμίδας.*

2.6. Άνεμος

Ο άνεμος είναι ένα οριζόντιο ρεύμα αέρα κοντά στο έδαφος, που κινείται από μια περιοχή σε μια άλλη. Ειδικότερα, ο άνεμος κινείται από μια περιοχή υψηλών πιέσεων σε μια περιοχή χαμηλών πιέσεων, προκειμένου να τείνει να εξισορροπήσει τις πιέσεις στις δυο περιοχές. Όσο ισχυρότερη είναι η βαροβαθμίδα, τόσο ισχυρότερος θα είναι και ο άνεμος. Πρακτικά, όσο πυκνότερες είναι οι ισοβαρείς καμπύλες σε έναν πραγματικό μετεωρολογικό χάρτη, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η ένταση του ανέμου. Τα βασικά στοιχεία του ανέμου είναι η **διεύθυνση**, δηλαδή το σημείο του ορίζοντα από το οποίο πνέει ο άνεμος, που εκφράζεται είτε σε μοίρες, με αρχή τον μαγνητικό Βορρά, είτε με σύμβολα ανεμολογίου (ανεμορρόμβοι) είτε ονομαστικά (Σχήμα 2.11), και η **ένταση**, που εκφράζει την ταχύτητα με την οποία πνέει ο άνεμος. Επιπλέον, ο άνεμος μπορεί να χαρακτηρίζεται λείος, ριπαίος, μεταβλητός και σταθερός. **Λείος** είναι ο άνεμος που δεν παρουσιάζει αυξομειώσεις στην έντασή του, **ριπαίος** ο άνεμος του οποίου η ένταση μεταβάλλεται κατά σύντομα χρονικά διαστήματα, **μεταβλητός** ο άνεμος του οποίου η ένταση μεταβάλλεται και **σταθερός** ο άνεμος που διατηρεί τη διεύθυνσή του για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Οι δυνάμεις που ρυθμίζουν την κίνηση του ανέμου είναι η δύναμη **βαροβαθμίδας**, η δύναμη **Coriolis** ή εκτρεπτική ή γεωστροφική δύναμη, η δύναμη της **τριβής** και η **φυγόκεντρη** δύναμη. Τα είδη των ανέμων είναι ο γεωστροφικός άνεμος, ο άνεμος βαροβαθμίδας και ο φαινόμενος άνεμος. **Γεωστροφικός** χαρακτηρίζεται ο άνεμος που είναι απαλλαγμένος από τη δύναμη της τριβής. Αυτό μπορεί να συμβεί σε μεγάλο ύψος, στην ελεύθερη ατμόσφαιρα, όπου το ανάγλυφο παύει να επιδρά στην κίνηση της αέριας μάζας. Αν οι ισοβαρείς καμπύλες δεν είναι ευθύγραμμες, αλλά καμπύλες, τότε, εκτός από την επίδραση της δύναμης βαροβαθμίδας (F_P) και της δύναμης Coriolis (F_C), υπάρχει και η επίδραση της φυγόκεντρης δύναμης ($F < p$). Στην περίπτωση ενός κέντρου χαμηλών πιέσεων, η δύναμη **βαροβαθμίδας** έχει φορά προς το κέντρο και αντισταθμίζεται από τη δύναμη Coriolis και τη φυγόκεντρη δύναμη. Ο άνεμος πνέει εφαπτομενικά στις ισοβαρείς και έχει την ορθή φορά για το βόρειο ημισφαίριο (Σχήμα 2.12α). Στην περίπτωση ενός κέντρου υψηλών πιέσεων, ο άνεμος πνέει

εφαπτομενικά στις ισοβαρείς και έχει την ανάδρομη φορά για το βόρειο ημισφαίριο (Σχήμα 2.12β). Τέλος, ο άνεμος που μετρούν τα όργανα του πλοίου ενώ αυτό κινείται ονομάζεται **φαινόμενος**.

2.6.1. Κλίμακα Beaufort

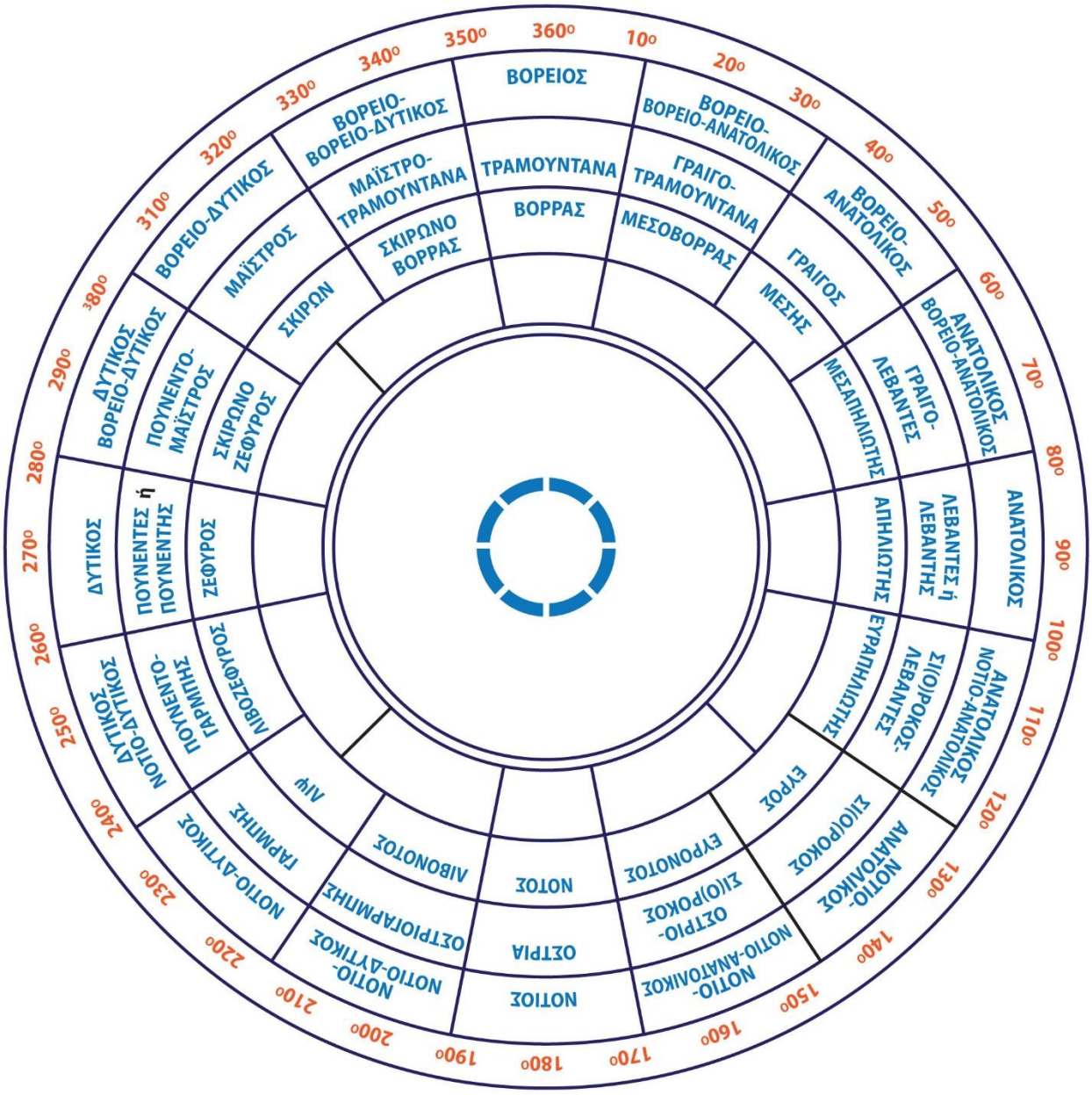
Η κλίμακα Beaufort είναι μια κλίμακα μέτρησης της έντασης του ανέμου, που βασίζεται κυρίως στην παρατήρηση, παρά σε ακριβείς μετρήσεις. Είναι ίσως το πιο διαδεδομένο σύστημα μέτρησης της έντασης του ανέμου που υπάρχει αυτήν τη στιγμή. Αναπτύχθηκε το 1805 από τον Sir Francis Beaufort, ναύαρχο του Βρετανικού Ναυτικού και υδρογράφο. Η κλίμακα Beaufort κατατάσσει τους ανέμους σε 13 κατηγορίες με βάση την έντασή τους. Υπάρχουν, για την ακρίβεια, δώδεκα τιμές και επιπλέον το μηδέν, που αντιστοιχεί στην άπνοια (Πίνακας 2.1). Από το 1946 μέχρι το 1970 εισήχθησαν κλίμακες από το 13 μέχρι το 17. Αυτές οι τιμές σχετίστηκαν με τους κυκλώνες.

2.6.2. Άνεμος στο ΑΟΣ

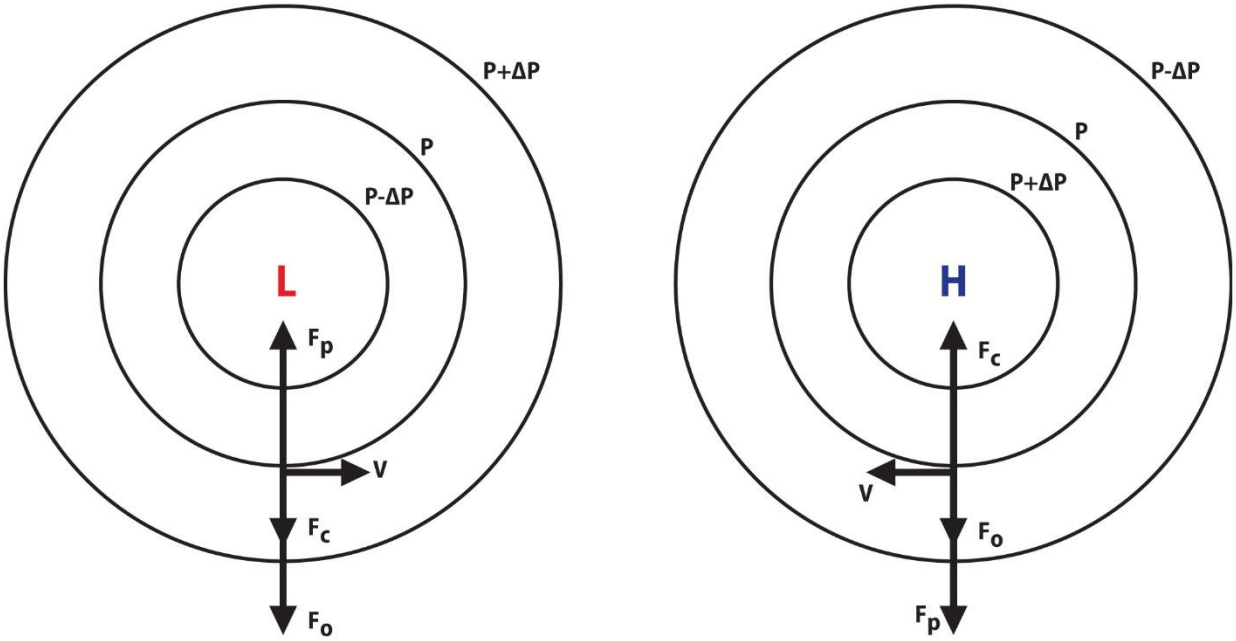
Στο ΑΟΣ, οι παράγοντες που προκαλούν τον άνεμο είναι οι μεγάλης κλίμακας οριζόντιες βαθμίδες πίεσης και θερμοκρασίας στην κατώτερη ατμόσφαιρα, η τραχύτητα της επιφάνειας, η περιστροφή της Γης, ο ημερήσιος κύκλος θέρμανσης-ψύξης της επιφάνειας, που προκαλεί θερμική στρωμάτωση του ΑΟΣ, το βάθος του ΑΟΣ, που προκαλεί διάτμηση (shear) του ανέμου, η εισχώρηση (entrainment) ελεύθερου αέρα, οι οριζόντιες μεταβολές (advection) ορμής και θερμότητας, οι μεγάλης κλίμακας οριζόντια σύγκλιση ή απόκλιση, που προκαλεί μέση κατακόρυφη κίνηση στην κορυφή του ΑΟΣ, η παρουσία νεφών και υετού στο ΑΟΣ, που επιφέρει θερμική στρωμάτωση, καθώς και τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας. Επιπλέον, οι μεταβολές του ανέμου στο ΑΟΣ οφείλονται στην κατακόρυφη θερμοβαθμίδα, στις στροβιλοειδής κινήσεις και στην τριβή με το ανάγλυφο.

Βαθμοί	Περιγραφή	Ταχύτητα ανέμου (knot)	Ταχύτητα ανέμου (km/h)	Πιθανά αποτελέσματα
0	Νηνεμία	< 1	0	Επίπεδη όψη θάλασσας, σαν καθρέπτης.
1	Υποπνέων	1-2	3	Όψη ρυτιδιασμένη. Κυματισμοί χωρίς κορυφές.
2	Ασθενής	3-6	9	Μικρά κυματάκια, με κορυφές που δεν σπάνε.
3	Λεπτός	7-10	15	Μεγάλα κυματάκια, με κορυφές που δεν σπάνε.
4	Μέτριος	11-15	25	Μικρά κύματα, με κορυφές που σπάνε.
5	Λαμπρός	16-20	35	Μεσαίου μεγέθους κύματα. Μικρές ποσότητες ψεκασμού. Αρχίζουν να σχηματίζονται μακρά κύματα.
6	Ισχυρός	21-26	45	Συχνά παρατηρείται αφρός στις κορυφές. Ψεκασμός.
7	Σφοδρός	27-33	56	Η θάλασσα διογκώνεται. Παρατηρείται κάποιος αφρός από κύματα που θραύονται και δημιουργούνται ραβδώσεις κατά την κατεύθυνση του ανέμου.
8	Ορμητικός	34-40	68	Σχετικά μεγάλα κύματα, που θραύονται σχηματίζοντας αφρό. Σημαντική ποσότητα ψεκασμού. Καλά σχηματισμένες ραβδώσεις.
9	Θύελλα	41-47	81	Μεγάλα κύματα, των οποίων οι κορυφές πέφτουν και κυλούν. Ο ψεκασμός αρχίζει να περιορίζει την ορατότητα. Πολύ υψηλά κύματα, με κορυφές που κρέμονται.
10	Ισχυρή θύελλα	48-55	94	Ο αφρός δίνει μια λευκή όψη στη θάλασσα. Το κύλισμα των κυμάτων είναι έντονο. Σημαντικός περιορισμός της ορατότητας.
11	Σφοδρή θύελλα	56-63	110	Εξαιρετικά υψηλά κύματα. Αφροί που καλύπτουν τη μεγαλύτερη θαλάσσια επιφάνεια. Έντονος περιορισμός της ορατότητας.
12	Τυφώνας	> 64	118	Τεράστια κύματα. Η θάλασσα είναι τελείως λευκή από αφρούς. Παρασυρόμενοι ψεκασμοί περιορίζουν εξαιρετικά την ορατότητα.

Πίνακας 2.1. *Αντιστοιχία κλίμακας Beaufort, με χαρακτηρισμό, ένταση ανέμου και συσχέτισή του, με πιθανά αποτελέσματα στη θάλασσα.*



Σχήμα 2.11. *Το ανεμολόγιο με τις 16 βασικές διευθύνσεις των ανέμων.*

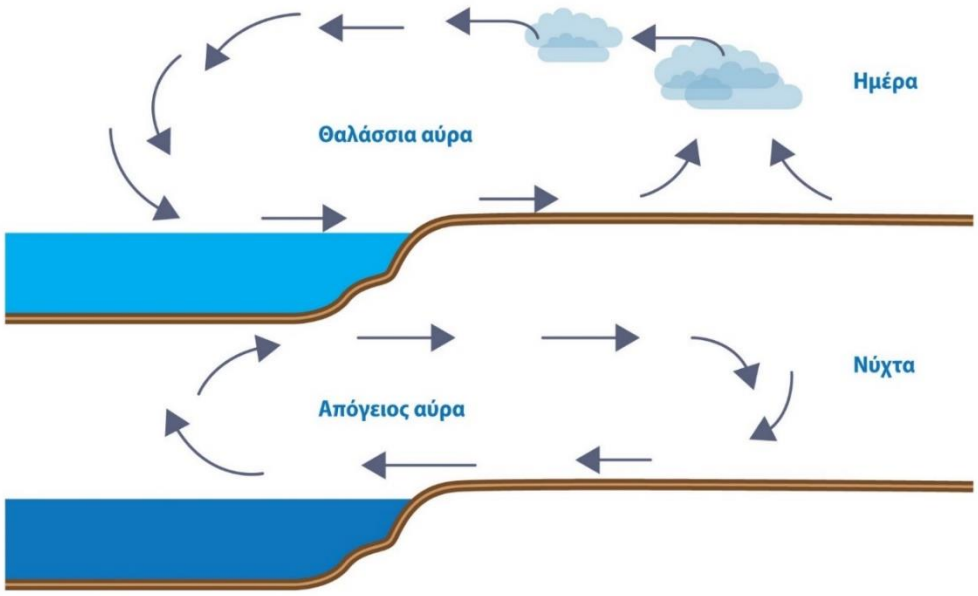


Σχήμα 2.12. *Απεικόνιση ανέμου βαροβαθμίδας για το βόρειο ημισφαίριο: (α) γύρω από ένα κέντρο χαμηλών πιέσεων και (β) γύρω από ένα κέντρο υψηλών πιέσεων.*

2.6.2.1. Ημερήσιοι άνεμοι

Ημερήσιοι ονομάζονται οι άνεμοι που δημιουργούνται στη διάρκεια του 24ώρου, λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας, τόσο την ημέρα όσο και τη νύχτα, μεταξύ ξηράς και θάλασσας. Τέτοιοι είναι η θαλάσσια και η απόγεια αύρα.

- **Θαλάσσια αύρα.** Ο τρόπος θέρμανσης της ξηράς και της θάλασσας την ημέρα προκαλεί οριζόντιες βαθμίδες θερμοκρασίας. Η πίεση πάνω από τη θάλασσα έχει μεγαλύτερη τιμή από αυτήν στην ξηρά, ενώ δημιουργείται θερμική κυκλοφορία, με άνεμο που έχει φορά από τη θάλασσα προς την ξηρά στην επιφάνεια, και αντίθετα υψηλότερα (Σχήμα 2.13).

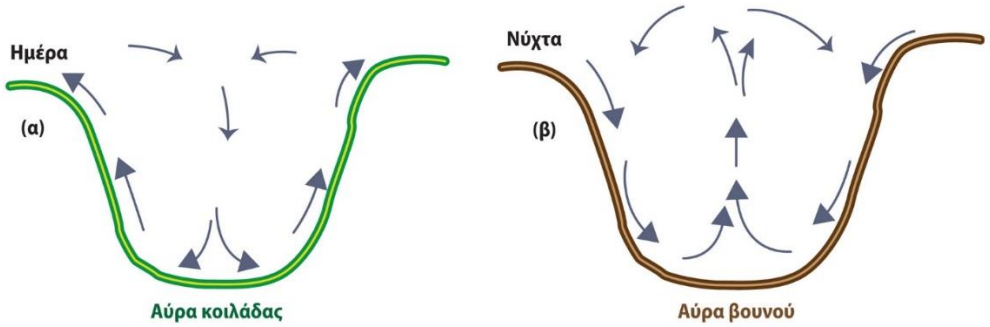


Σχήμα 2.13: *Θαλάσσια και απόγεια αύρα.*

- **Απόγεια αύρα.** Για τη δημιουργία της απόγειας αύρας, απαιτούνται οι αντίστροφες συνθήκες της θαλάσσιας αύρας. Πιο συγκεκριμένα, τη νύχτα η ξηρά ψύχεται εντονότερα και γρηγορότερα από τη θάλασσα. Συνεπώς, παρατηρείται μικρότερη θερμοκρασία πάνω από την ξηρά και μεγαλύτερη πάνω από τη θάλασσα, άρα και η πίεση πάνω από την ξηρά θα είναι μεγαλύτερη συγκριτικά με τη θάλασσα. Οπότε, λόγω αυτής της βαθμίδας πίεσης, δημιουργείται άνεμος με φορά από την ξηρά προς τη θάλασσα, που ονομάζεται απόγεια αύρα (Σχήμα 2.13).

2.6.2.2. Τοπικοί άνεμοι

- **Αύρες (α) κοιλάδων και (β) βουνών.** Στο Σχήμα 2.14 απεικονίζεται ο μηχανισμός κυκλοφορίας σε αύρες (α) κοιλάδας και (β) βουνού, που αποτελούν τοπικούς ανέμους.



Σχήμα 2.14. *Κυκλοφορία σε αύρα:(α) κοιλάδας και (β) βουνού.*

2.7. Υγρασία του αέρα

Ο όρος «υγρασία του αέρα» αναφέρεται στην ποσότητα των υδρατμών που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα σε δεδομένη στιγμή. Η τροπόσφαιρα, το κατώτερο στρώμα της ατμόσφαιρας, περιέχει υδρατμούς μεταβλητής ποσότητας, που προέρχονται κατά κύριο λόγο από την εξάτμιση των υδάτινων επιφανειών, όπως είναι οι ωκεανοί, οι θάλασσες, τα ποτάμια και οι λίμνες (Σχήμα 2.15). Η *εξάτμιση* είναι η διαδικασία μετατροπής του νερού από την υγρή κατάσταση στην αέρια, δηλαδή η μετατροπή σε υδρατμούς, κάτι που εμφανίζεται σε οποιαδήποτε υγρή επιφάνεια. Σε μια ορισμένη θερμοκρασία, ο ατμοσφαιρικός αέρας μπορεί να συγκρατήσει ορισμένη ποσότητα υδρατμών. Οπότε, ο αέρας λέγεται κορεσμένος, ενώ σε αντίθετη περίπτωση, ο αέρας λέγεται ακόρεστος. Η ποσότητα αυτή υδρατμών μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία του αέρα, δηλαδή όσο πιο υψηλή είναι η θερμοκρασία, τόσο πιο έντονη θα είναι η εξάτμιση και, άρα, τόσο πιο μεγάλη θα είναι η ποσότητα των υδρατμών στην ατμόσφαιρα. Όταν η ποσότητα αυτή υπερβεί τη μέγιστη τιμή της, λόγω περαιτέρω εξάτμισης, τότε οι πλεονάζοντες υδρατμοί συμπυκνώνονται. Η διαδικασία αυτή μετατροπής της αέριας κατάστασης του νερού, δηλαδή των υδρατμών, σε υγρή κατάσταση λέγεται συμπύκνωση. Όταν οι υδρατμοί συμπυκνωθούν, σχηματίζουν τα νέφη και επιστρέφουν στην επιφάνεια της Γης μέσω της βροχής ή, γενικά, του υετού. Όλη αυτή η πορεία των υδρατμών είναι γνωστή και ως υδρολογικός κύκλος (Σχήμα 2.15). Η υγρασία του αέρα είναι πολύ σημαντική μετεωρολογική μεταβλητή και εκφράζεται με μία από τις παρακάτω περιγραφόμενες υγρομετρικές παραμέτρους, όπως επίσημα ονομάζονται.

Τάση υδρατμών (e) ονομάζεται η μερική πίεση που ασκούν όσοι υδρατμοί δημιουργούνται κατά την εξάτμιση του νερού και διαχέονται στον περιβάλλοντα ατμοσφαιρικό αέρα. Η **μέγιστη τάση (e_s)** σε κορεσμένο αέρα δίνεται από τη σχέση:

$$e_s = e_{sD} \times 10^{\frac{\alpha t}{\beta + t}} \text{ (mbar)} \quad (2.18)$$

Όπου e_{sD} = 6,11 mbar, α = 7,5, β = 237,3° C και t = θερμοκρασία αέρα.

Αντίστοιχα, η τάση υδρατμών υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$e = e_s(t_w) - \frac{C_{p\alpha}}{0.622 L_\upsilon}(t - t_w)P \quad (2.19)$$

όπου t είναι η θερμοκρασία του αέρα (ξηρού θερμομέτρου), P η ατμοσφαιρική πίεση, t_w η θερμοκρασία του υγρού θερμομέτρου ^oC, e_s (t_w) η μέγιστη τάση των υδρατμών στην t_w και $C_{p\alpha}$ η ειδική θερμότητα του ξηρού αέρα σε σταθερή πίεση.

Απόλυτη υγρασία (β) ή συγκέντρωση/πυκνότητα υδρατμών ορίζεται ο λόγος της μάζας των υδρατμών m_υ προς τον όγκο V_α του αέρα στον οποίο περιέχονται ή η ποσότητα β των υδρατμών σε γραμμάρια, που περιέχονται στη μονάδα του όγκου ($1m^3$) ατμοσφαιρικού αέρα και εκφράζεται σε g/m^3:

$$\beta = \frac{m_\upsilon}{V_\alpha} (g/\ m^3) \quad (2.20)$$

Αναλογία μίγματος (τ) ορίζεται ο λόγος της μάζας (m_υ) των υδρατμών του μείγματος προς τη μάζα (m_d) του ξηρού αέρα με τον οποίο συνδυάζονται στο θεωρούμενο δείγμα ($m_\alpha = m_d + m_\upsilon$):

$$\tau = \frac{m_\upsilon}{m_d} \quad \eta' \quad \tau = 0{,}622 \frac{e}{P - e}, \quad (2.21)$$

Ειδική υγρασία (q) ορίζεται ο λόγος της μάζας m_υ των υδρατμών ενός δείγματος υγρού αέρα προς τη μάζα m_α του δείγματος ($m_\alpha = m_d + m_\upsilon$) και εκφράζεται σε γραμμάρια υδρατμών ανά χιλιόγραμμο υγρού αέρα:

$$q = \frac{m_\upsilon}{m_\alpha} = \frac{m_\upsilon}{m_d + m_\upsilon} = \frac{m_\upsilon / m_d}{1 + m_\upsilon / m_d} \Rightarrow q = \frac{\tau}{1+\tau} \ \text{ή} \ q = 0.622 \frac{e}{P - 0{,}378e} \quad (2.22)$$

και $q_s = \frac{\tau_s}{1+\tau_s}$.

Σχετική υγρασία (Relative humidity/RH) λέγεται ο λόγος της μάζας m_υ των υδρατμών που περιέχονται σε δοσμένο όγκο υγρού αέρα προς τη μάζα των υδρατμών $m_{s\upsilon}$ που θα περιείχε ο όγκος αυτός αν ήταν κορεσμένος με υδρατμούς, κάτω από τις ίδιες συνθήκες πίεσης, P, και θερμοκρασίας, T:

$$RH = \frac{m_\upsilon}{m_{s\upsilon}} \quad (2.23)$$

Η σχετική υγρασία είναι καθαρός αριθμός, εκφράζεται ως ποσοστό επί τοις εκατό (%) και ταυτίζεται με το λόγο τάσης των υδρατμών, e, προς τη μέγιστη τάση τους, e_s, στην ίδια τιμή θερμοκρασίας του δείγματος:.

$$RH = \frac{m_\upsilon}{m_{s\upsilon}} = \frac{m_\upsilon / V_\alpha}{m_{s\upsilon} / V_\alpha} = \frac{1{,}0599 \cdot e / (1 + 0{,}00367t)}{1{,}0599 \cdot e_s / (1 + 0{,}00376t)} = \frac{e}{e_s} \times 100, \quad (2.24)$$

Ακόμα, σχετική υγρασία θεωρείται ο λόγος της παρατηρούμενης αναλογίας μείγματος προς την αναλογία μείγματος κορεσμένου ατμοσφαιρικού αέρα, που βρίσκεται στις ίδιες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης:

$$RH = \frac{\tau}{\tau_s} \ \text{ή} \ RH = \frac{q}{q_s} \quad (2.25)$$



Σχήμα 2.15. *Υδρολογικός κύκλος*.

Έλλειμμα κόρου (Saturation Deficit/SD) θεωρείται η διαφορά ανάμεσα στην τάση των υδρατμών (e) του ατμοσφαιρικού αέρα και στη μέγιστη τάση των υδρατμών (e_s) στην ίδια θερμοκρασία:

$$SD = e_s - e \quad (2.26)$$

Θερμοκρασία σημείου δρόσου (t_d) θεωρείται η θερμοκρασία στην οποία φέρεται ο αέρας με σταθερή πίεση μέχρις ότου κορεστεί (RH = 100%), δηλαδή η θερμοκρασία στην οποία πρέπει να ψυχτεί ο αέρας κάτω από σταθερή πίεση, για να καταστεί κορεσμένος με υδρατμούς:

$$e = e_s(t_d) = e_{sD} \times 10^{\frac{\alpha t_d}{\beta + t_d}} \quad (2.27)$$

Θερμοκρασία υγρού θερμομέτρου (t_w) θεωρείται η θερμοκρασία που αποκτά ο ατμοσφαιρικός αέρας, κάτω από σταθερή πίεση, όταν μέσα σε αυτόν γίνεται συνεχής εξάτμιση νερού, μέχρι να καταστεί κορεσμένος, χωρίς ανταλλαγή θερμότητας με το περιβάλλον. Ισχύουν για ακόρεστο αέρα $t > t_w > t_d$ και για κορεσμένο αέρα $t = t_w = t_d$, ενώ για το ψυχρόμετρο ισχύει:

$$e = e_s(t_w) - \alpha (t - t_w) P \quad (2.28)$$

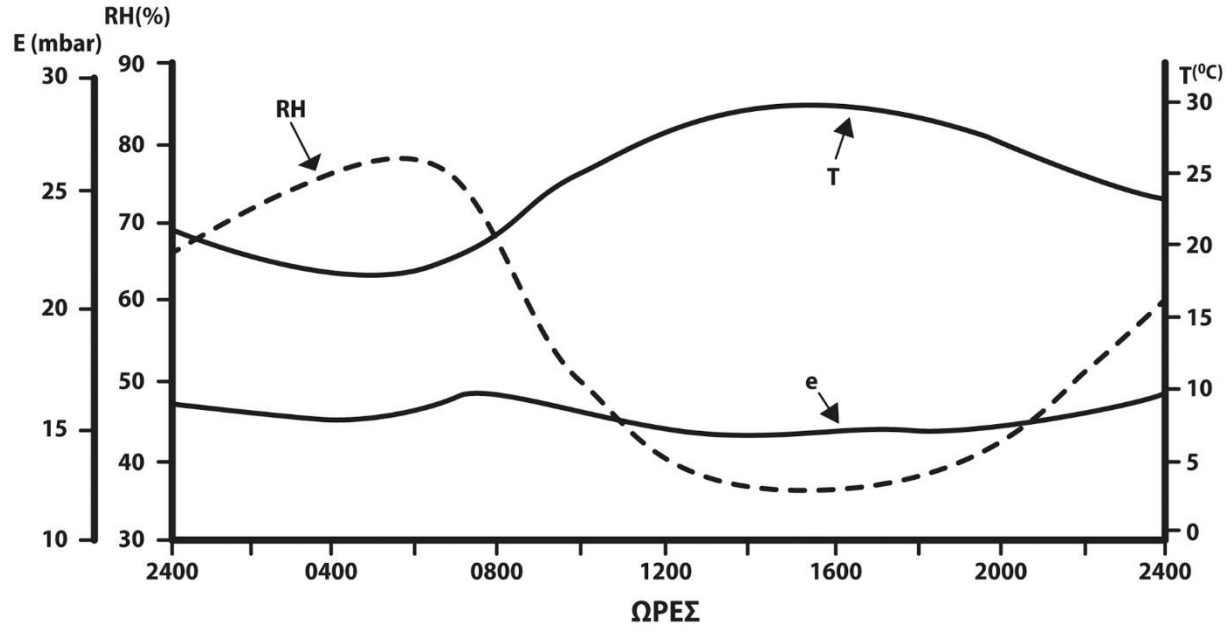
Υετίσιμο νερό (P_w) ορίζεται το σύνολο των υδρατμών που περιέχονται σε μια κατακόρυφη ατμοσφαιρική στήλη μοναδιαίας τομής μεταξύ δύο καθορισμένων επιπέδων:

$$P_w = 0.01 \int_{P_1}^{P_o} q dP \text{ (mm)} \quad (2.29)$$

όπου P σε mbar, q σε g/kg.
Η καθ' ύψος μεταβολή της υγρασίας δίνεται από τη σχέση:

$$e_z = e_o \times 10^{-bz} \quad (2.30)$$

Στο Σχήμα 2.16 απεικονίζεται η ημερήσια μεταβολή της σχετικής υγρασίας (RH), της τάσης των υδρατμών (e) και της θερμοκρασίας (T).

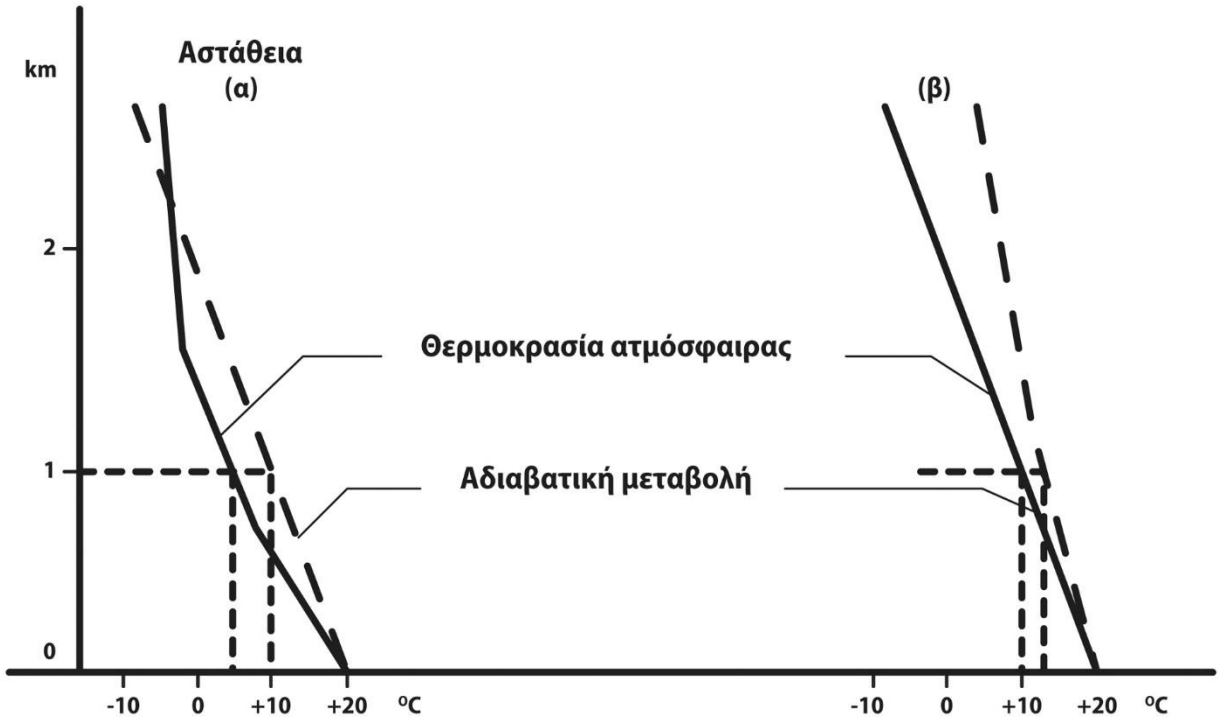


Σχήμα 2.16. *Ημερήσια πορεία της RH, της e και της T.*

2.8 Ατμοσφαιρική αστάθεια

Η ευκολία με την οποία τα πακέτα αέρα μετακινούνται κατακόρυφα στον περιβάλλοντα αέρα ονομάζεται ευστάθεια. Ένα ρευστό λέγεται ότι είναι ευσταθές αν ένα πακέτο τείνει να επιστρέψει στην αρχική του θέση ύστερα από μια μικρή μετατόπιση. Αντίθετα, το ρευστό λέγεται ότι είναι σε κατάσταση αστάθειας όταν η αρχική μικρή μετατόπιση του πακέτου ενισχύεται, με αποτέλεσμα την περαιτέρω απομάκρυνσή του από την αρχική θέση. Σε προηγούμενο εδάφιο ορίστηκαν η ΥΑΘ, η ΞΑΘ και η ΚΘ (κατακόρυφη θερμοβαθμίδα). Για τα δύο είδη αδιαβατικών θερμοβαθμίδων, ισχύει η σχέση: **ΥΑΘ < ΞΑΘ.**
Οι αδιαβατικές μεταβολές της θερμοκρασίας των αέριων μαζών είναι απαραίτητες για την κατανόηση της στατικής ευστάθειας και αστάθειας της ατμόσφαιρας (Σχήμα 2.17). Επομένως, η ισορροπία της ατμόσφαιρας εξαρτάται από τη σχέση της εκάστοτε θερμοκρασίας των διαφόρων τμημάτων της με τη θερμοκρασία των γειτονικών τμημάτων. Επειδή ο θερμός αέρας, ως ελαφρύς και αραιός, έχει την τάση να κινείται ανοδικά, ενώ ο ψυχρός αέρας, ως βαρύς και πυκνός, τείνει να κινείται καθοδικά, οι συνθήκες στατικής ευστάθειας και αστάθειας της ατμόσφαιρας συνδέονται στενά με τις διαφορές στις πυκνότητες ανάμεσα στην αέρια μάζα και τον περιβάλλοντα αέρα. Όταν μια αέρια μάζα αναγκάζεται για διάφορους λόγους να ανέλθει μέσα στην ατμόσφαιρα, τότε η θερμοκρασία της μειώνεται, σύμφωνα με το ρυθμό μείωσης της ΞΑΘ, εφόσον δεν υπάρχουν συμπυκνώσεις. Παράλληλα με την αέρια μάζα, παρατηρείται μείωση της θερμοκρασίας και του περιβάλλοντα αέρα, αυτή η οποία ακολουθεί το ρυθμό της ΚΘ. Αν η αέρια μάζα, στο ύψος που έχει φτάσει, είναι πιο θερμή από το περιβάλλον, τότε εξακολουθεί να ανέρχεται, επειδή είναι ελαφρύτερη. Στην περίπτωση αυτή, ευνοούνται οι ανοδικές κινήσεις στην ατμόσφαιρα, με αποτέλεσμα αυτή να χαρακτηρίζεται από **απόλυτη αστάθεια**. Η ασταθής ατμόσφαιρα, λόγω ύπαρξης ανοδικών κινήσεων, επιτρέπει με μεγάλη πιθανότητα το σχηματισμό νεφών κατακόρυφης ανάπτυξης. Ισχύει:

ΥΑΘ < ΞΑΘ < ΚΘ — ΑΠΟΛΥΤΗ ΑΣΤΑΘΕΙΑ (2.31)



Σχήμα 2.17. *Η ατμόσφαιρα, ανάλογα με την επικρατούσα θερμοκρασία με το ύψος, είναι δυνατόν να παρουσιάζει: α) αστάθεια και β) ευστάθεια.*

Αν η αέρια μάζα, στο ύψος που φτάνει, είναι πιο ψυχρή από το περιβάλλον, τότε αυθόρμητα οδηγείται σε κάθοδο, επειδή είναι βαρύτερη από τον περιβάλλοντα αέρα, οπότε ευνοούνται οι καθοδικές κινήσεις στην ατμόσφαιρα. Σε συνθήκες ευστάθειας δεν ευνοούνται οι κατακόρυφες κινήσεις στην ατμόσφαιρα, ούτε ανοδικές, ούτε καθοδικές. Η ευσταθής ατμόσφαιρα επιτρέπει, με κάποια πιθανότητα, το σχηματισμό νεφών μικρής κατακόρυφης ανάπτυξης, όπως είναι τα στρωματόμορφα νέφη, που περιγράφονται σε επόμενο εδάφιο. Επίσης, στην ευσταθή ατμόσφαιρα μπορεί να εμφανίζεται ομίχλη, καπνός ή ξηρά αχλύς. Ισχύει:

ΚΘ < ΥΑΘ < ΞΑΘ – ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ (2.32)

Υπάρχει και η περίπτωση όπου η ΚΘ είναι μικρότερη από την ΞΑΘ, αλλά είναι συγχρόνως μεγαλύτερη από την ΥΑΘ. Στην περίπτωση αυτή, όσο δεν υπάρχουν υγροποιήσεις, η ατμόσφαιρα χαρακτηρίζεται ευσταθής. Ωστόσο, μόλις ξεκινήσει η υγροποίηση, η ατμόσφαιρα χαρακτηρίζεται από **υπό όρους αστάθεια**:

ΥΑΘ < ΚΘ < ΞΑΘ — ΥΠΟ ΟΡΟΥΣ ΑΣΤΑΘΕΙΑ (2.33)

Πρέπει να επισημανθεί ότι η ΚΘ παρουσιάζει αρνητική τιμή όταν στην ατμόσφαιρα υπάρχει αναστροφή θερμοκρασίας. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι η τιμή της είναι μικρότερη τόσο από την ΥΑΘ, όσο και από την ΞΑΘ. Επομένως, στην περίπτωση της αναστροφής, η ατμόσφαιρα χαρακτηρίζεται ευσταθής και έτσι δεν ευνοούνται οι κατακόρυφες κινήσεις. Η στάθμη στην οποία ο αέρας καθίσταται κορεσμένος κατά την άνοδό του στην ατμόσφαιρα ονομάζεται στάθμη συμπύκνωσης. Το ύψος της στάθμης συμπύκνωσης είναι ουσιαστικά το ύψος στο οποίο αρχίζει να σχηματίζεται νέφος, με αποτέλεσμα να αποτελεί το ύψος της βάσης νεφών. Ο υπολογισμός του ύψους της βάσης ενός νέφους κατακόρυφης ανάπτυξης μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη θερμοκρασία και το σημείο δρόσου. Πιο αναλυτικά, ως γνωστόν, ο ακόρεστος αέρας ψύχεται με ρυθμό ίσο με

την τιμή της ΞΑΘ, ενώ το σημείο δρόσου μειώνεται με το ύψος κατά 1,5° C ανά 1.000 m. Το ύψος της βάσης του νέφους αποτελεί το ύψος εκείνο στο οποίο η θερμοκρασία γίνεται ίση με το σημείο δρόσου.

2.9. Νέφη

Τα νέφη διαφέρουν σημαντικά ως προς τη μορφή, το ύψος, την έκταση και τους χρωματισμούς τους. Η ταξινόμησή τους βασίζεται σε δύο κριτήρια, τη μορφή τους και το ύψος στο οποίο βρίσκονται. Οι βασικές μορφές που εμφανίζουν τα νέφη είναι οι ακόλουθες τρεις: θύσανοι (Cirrus), σωρείτες (Cumulus) και στρώματα (Stratus). Σύμφωνα με τον Διεθνή Άτλαντα Νεφών, δέκα είναι οι κυριότεροι τύποι νεφών. Με βάση το ύψος στο οποίο βρίσκονται, αυτοί οι δέκα τύποι διακρίνονται σε τέσσερις επιμέρους: τα ανώτερα νέφη, τα μέσα νέφη, τα κατώτερα νέφη και τα νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης. Οι ονομασίες των νεφών της κάθε ομάδας προκύπτουν είτε με το συνδυασμό των βασικών μορφών είτε με την προσθήκη των λατινικών προθεμάτων alto και nimbo ή nimbus, που υποδηλώνουν το ύψος όπου βρίσκονται και την ιδιότητά τους ως βροχοφόρα νέφη, αντίστοιχα. Στη συνέχεια αναλύονται τα χαρακτηριστικά και η μορφή των νεφών.

2.9.1. Ανώτερα νέφη

Οι **θύσανοι** (Ci) είναι λεπτά ινώδη νέφη, που συναντώνται στα μεγαλύτερα ύψη στην ατμόσφαιρα. Έχουν λευκό χρώμα και πολύ συχνά εμφανίζονται ως φτερά. Αποτελούνται αποκλειστικά από παγοκρυστάλλους. Τα **θυσανοστρώματα** (Cs) είναι λεπτά νέφη, που μοιάζουν με λευκά πέπλα. Σχηματίζουν μεγάλο φωτεινό κύκλο με τα χρώματα της ίριδας γύρω από τον ήλιο. Όταν αρχίζουν να πυκνώνουν, τότε συνήθως ακολουθεί βροχή. Οι **θυσανοσωρείτες** (Cc) είναι λεπτά και λευκά νέφη, που δεν δημιουργούν σκιές. Έχουν γενικά σχήμα σφαιρικό και μοιάζουν πολύ με μικρά κύματα σε σειρές. Αποτελούνται από λεπτούς παγοκρυστάλλους. Η παρουσία τους προαναγγέλλει ένα θερμό μέτωπο.

2.9.2. Μέσα νέφη

Τα **υψιστρώματα** (As) είναι νέφη που μοιάζουν με πυκνά πέπλα, έχουν χρώμα ανοικτό γκρίζο και αποτελούνται από υδροσταγονίδια. Εμφανίζονται με μεγάλη οριζόντια έκταση μήκους μερικών δεκάδων ή και εκατοντάδων χιλιομέτρων. Αν τα υψιστρώματα αυξάνουν, ίσως να επίκειται βροχή. Οι **υψισωρείτες** (Ac) είναι νέφη που έχουν συνήθως σφαιρικό σχήμα και χρώμα από υπόλευκο ως γκρίζο. Αποτελούνται από υδροσταγονίδια και γι' αυτό δεν παρουσιάζουν άλω, αλλά μόνο ιριδισμούς. Αν εμφανιστούν σε ύψος διαφορετικό των 2-6 km, τότε προβλέπεται βροχή ή καταιγίδα.

2.9.3. Κατώτερα νέφη

Τα **στρώματα** (St) είναι νέφη που έχουν μορφή χαμηλού εκτεταμένου ομοιόμορφου στρώματος και χρώμα υπόγκριζο, που καλύπτει ολόκληρο ή μεγάλο μέρος του ουρανού. Αποτελούνται συνήθως από υδροσταγονίδια ή λεπτούς πρισματικούς κρυστάλλους, ειδικά όταν επικρατεί χαμηλή θερμοκρασία. Από αυτά πέφτουν μόνο ψιχάλες ή ασθενής βροχή. Τέλος, στα στρώματα δεν παρατηρούνται ανοδικές κινήσεις, και, αν παρατηρηθούν, θα είναι ελάχιστες. Οι **στρωματοσωρείτες** (Sc) είναι νέφη που έχουν χρώμα γκρίζο και υπόλευκο, με ασαφή σκοτεινά τμήματα. Εμφανίζονται σε γραμμές, κατά ομάδες ή σε κύματα, και δεν παράγουν βροχή, αλλά μπορεί να μετατραπούν σε **μελανοστρώματα**, δηλαδή σε σύννεφα βροχής. Όταν είναι πυκνά, παρουσιάζουν ιριδισμούς. Αποτελούνται κυρίως από υδροσταγονίδια. Τα **μελανοστρώματα** (Ns) είναι πολύ πυκνά νέφη και έχουν χρώμα βαθύ γκρίζο και πολύ σκοτεινό. Συνήθως καλύπτουν όλο τον ουρανό και είναι βροχοφόρα νέφη, με συνεχείς βροχές, χιόνια ή ακόμα και χαλάζι.

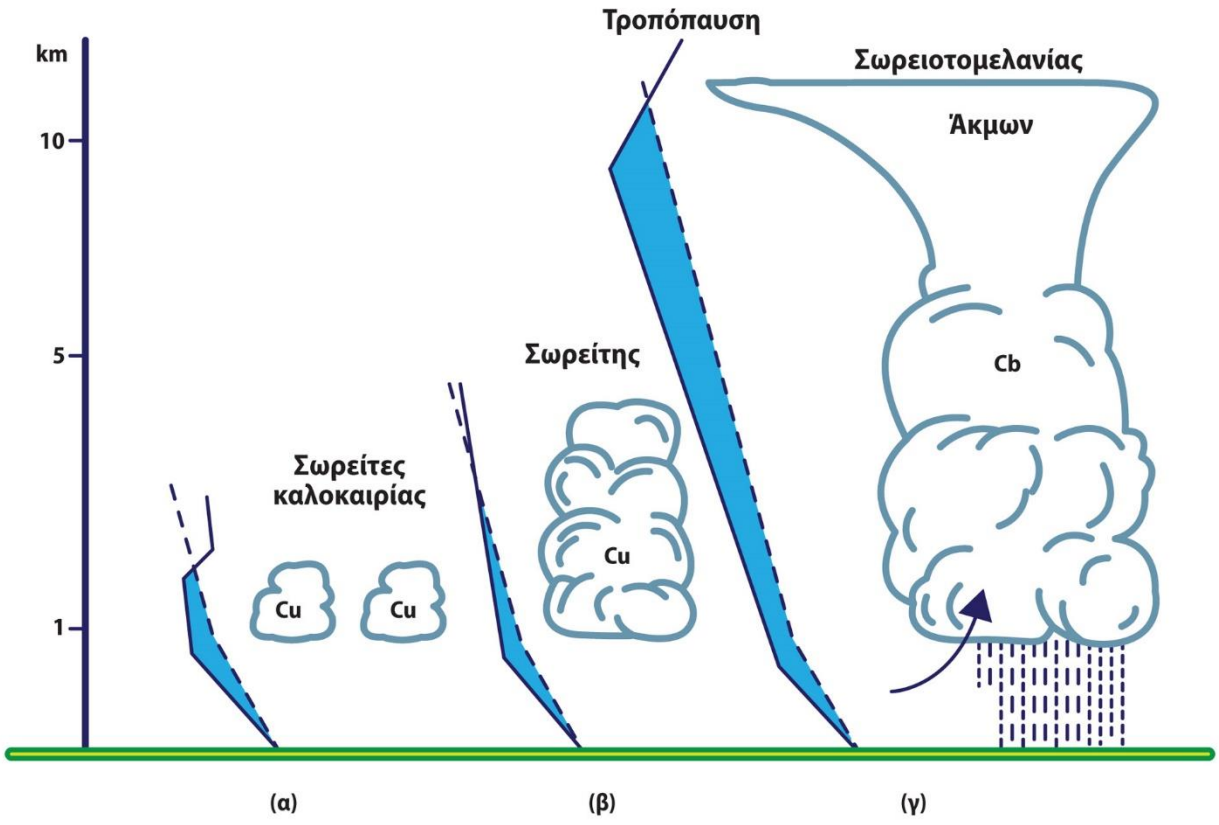
2.9.4. Νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης

Οι **σωρείτες** (Cu) είναι νέφη που εμφανίζονται ως αυτοτελείς πυκνές μάζες, με επίπεδη βάση και κατακόρυφη ανάπτυξη. Έχουν τη μορφή σωρού και χρώμα λευκό (Σχήμα 2.18). Αποτελούνται από υδροσταγόνες ή και παγοκρυστάλλους. Σχηματίζονται όταν η αστάθεια της ατμόσφαιρας δεν επεκτείνεται σε μεγάλα ύψη (Σχήμα 2.18α και 2.18β). Συνήθως σχηματίζονται την ημέρα, όταν ο θερμός αέρας πάνω από την ξηρά ανέρχεται καθ' ύψος, και διαλύονται μέχρι το βράδυ. Θεωρούνται νέφη καλοκαιρίας, αν και αρκετές φορές μετατρέπονται σε

καταιγιδοφόρα νέφη, όπως είναι οι σωρειτομελανίες, οπότε και παρουσιάζουν διαλείπουσες βροχοπτώσεις. Οι **σωρειτομελανίες** (Cb) είναι νέφη πυκνά και συνήθως ογκώδη (Σχήμα 2.18). Παρουσιάζουν πολύ μεγάλη κατακόρυφη ανάπτυξη, με κορυφές ακόμα και στα 15.000 m, εκτεινόμενα έτσι και μέσα στην τροπόπαυση, όπου και παρουσιάζουν οριζόντια ινώδη μορφή, που μοιάζει με αμόνι (Σχήμα 2.18γ). Λόγω της μεγάλης κατακόρυφης ανάπτυξής τους, σχηματίζονται και στα ανώτερα στρώματα των θερμών και ψυχρών μετώπων, εξαιτίας της μεγάλης αστάθειας που παρουσιάζουν καθ' ύψος. Έτσι, μέσα στην τεράστια μάζα τους, παρατηρούνται ανοδικά και καθοδικά αέρια ρεύματα, που μεταφέρουν υδροσταγόνες ή παγοκρυστάλλους, αντίστοιχα, ή και χαλάζι. Από τα νέφη αυτά προέρχονται βίαιες και διαλείπουσες καταρρακτώδεις βροχές, που συχνά συνοδεύονται και από χαλάζι.

Στον Πίνακα 2.2 αναγράφονται οι δέκα βασικοί τύποι νεφών, με τις συντομογραφίες τους και τα τυπικά ύψη εμφάνισής τους ανά περιοχή. Στο Σχήμα 2.19 απεικονίζονται τα είδη των νεφών. Πιο αναλυτικά, εμφανίζονται οι τέσσερις προαναφερθείσες κατηγορίες νεφών, η μορφή τους, τα σύμβολά τους και το ύψος εμφάνισής τους.

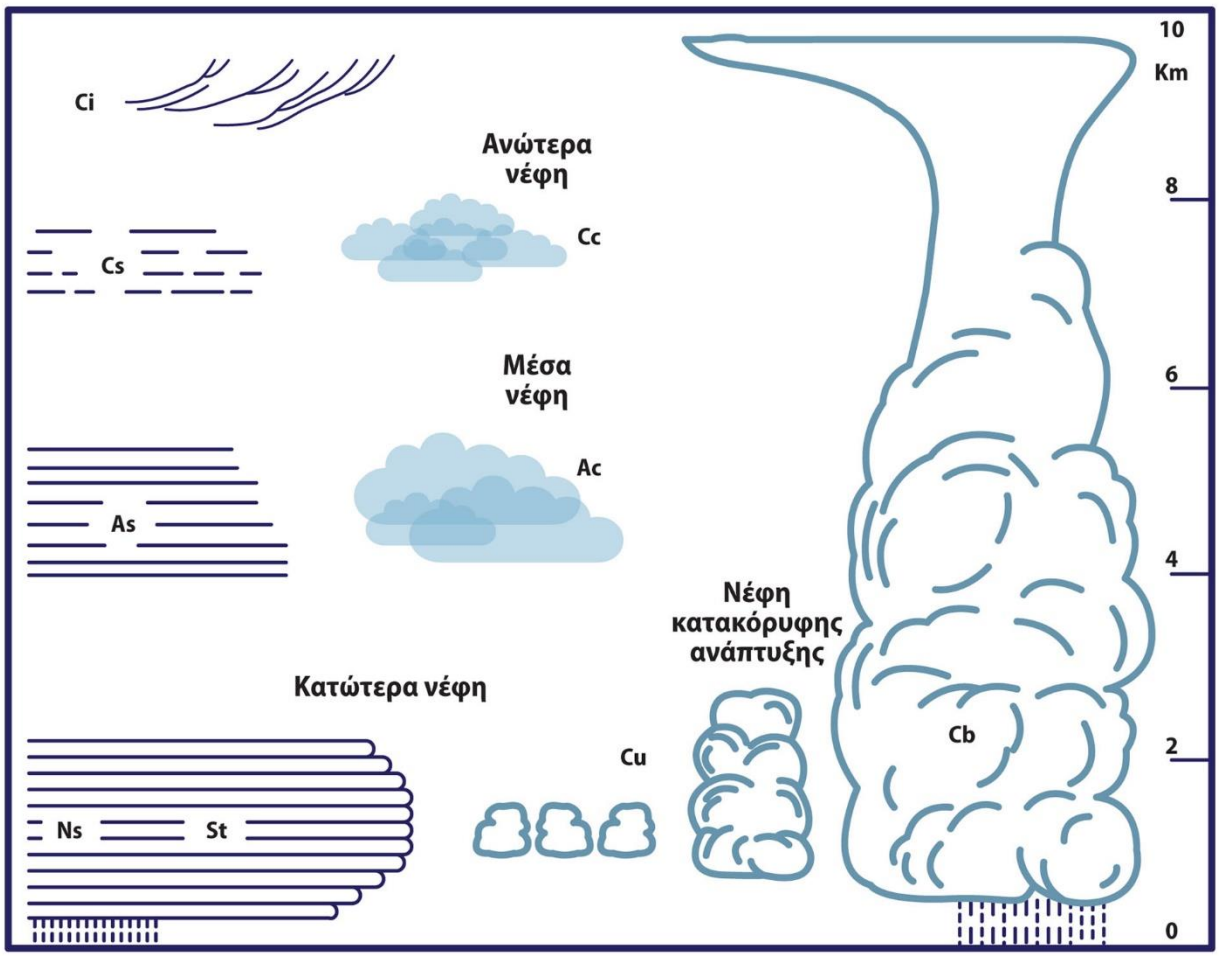
Η **νέφωση** είναι το τμήμα του ουράνιου θόλου που καλύπτεται από νέφη. Αποτελεί σπουδαίο κλιματολογικό κυρίως στοιχείο, γιατί ρυθμίζει την ηλιοφάνεια, δηλαδή το χρονικό διάστημα στη διάρκεια μιας ημέρας κατά το οποίο ο ήλιος λάμπει ελεύθερος, χωρίς να καλύπτεται από νέφη. Η παρατήρηση της νέφωσης γίνεται με βάση μια κλίμακα, που έχει τις εξής οκτώ βαθμίδες: μηδέν όγδοα, που αντιστοιχούν σε αίθριο καιρό, ένα έως δύο όγδοα, που αντιστοιχούν σε σχεδόν αίθριο καιρό τα τρία έως τέσσερα όγδοα, που αντιστοιχούν σε λίγο νεφελώδη καιρό, πέντε έως επτά όγδοα, που αντιστοιχούν σε νεφελώδη καιρό, οκτώ όγδοα, που αντιστοιχούν σε νεφοσκεπή ουρανό.



Σχήμα 2.18. *Το μέγεθος των νεφών κατακόρυφης ανάπτυξης εξαρτάται από την αστάθεια της ατμόσφαιρας.*

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	ΟΝΟΜΑΣΙΑ	ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ	ΤΥΠΙΚΑ ΥΨΗ ΚΑΤΑ ΠΕΡΙΟΧΕΣ (σε km)		
			Πολικές	Εύκρατες	Τροπικές
Ανώτερα	Θύσανοι Θυσανοστρώματα Θυσανοσωρείτες	Ci (Cirrus) Cs (Cirrostratus) Cc (Cirrocumulus)	3-4	5-13	6-18
Μέσα	Υψιστρώματα Υψισωρείτες	As (Altostratus) Ac (Altocumulus)	2-4	2-7	2-8
Κατώτερα	Στρώματα Στρωματοσωρείτες Μελανοστρώματα	St (Stratus) Sc (Stratocumulus) Ns (Nimbostratus)	< 2	< 2	< 2
Κατακόρυφης ανάπτυξης	Σωρείτες Σωρειτομελανίες	Cu (Cumulus) Cb (Cumulonimbus)	0,5-6	0,5-6	0,5-6

Πίνακας 2.2 *Αντιστοιχία κατηγορίας νεφών, ονομασίας, συντομογραφίας και ύψους εμφάνισης.*



Σχήμα 2.19. *Είδη νεφών.*

2.10 Αέριες μάζες – μέτωπα – κυκλώνες και αντικυκλώνες

2.10.1. Αέριες μάζες

Με τον όρο «αέρια μάζα» εννοείται μια εκτεταμένη μάζα αέρα με ομοιογενή φυσικά χαρακτηριστικά, δηλαδή θερμοκρασία και υγρασία, κατά την οριζόντια διεύθυνση. Θεωρείται πρακτικά αδύνατο μια αέρια μάζα να παρουσιάζει απόλυτη ομοιογένεια στα χαρακτηριστικά της, κυρίως εξαιτίας της μετακίνησής της. Για παράδειγμα, είναι δυνατόν μια αέρια μάζα να καλύπτει ταυτόχρονα μια ηπειρωτική και μια θαλάσσια περιοχή ή ακόμα να καλύπτει περιοχές που διαφέρουν σημαντικά ως προς το γεωγραφικό πλάτος. Επομένως, μια αέρια μάζα θεωρείται ότι παρουσιάζει ομοιογένεια στα χαρακτηριστικά της όταν αυτά μεταβάλλονται με πολύ αργό ρυθμό σε σχέση με την απόσταση. Επιπλέον, οι αέριες μάζες αποκτούν χαρακτηριστικά των υποκείμενων επιφανειών. Ως αποτέλεσμα, σχηματίζονται αέριες μάζες πάνω από εκτεταμένες ηπειρωτικές ή θαλάσσιες περιοχές με ομοιογενή χαρακτηριστικά, στις οποίες η ατμόσφαιρα δεν παρουσιάζει έντονη κυκλοφορία, όπως οι μόνιμοι ή οι εποχικοί αντικυκλώνες. Σε αυτές τις περιοχές, τα ασθενή ρεύματα αέρα, σε συνδυασμό με την αποκλίνουσα κίνησή τους, τείνουν να εξαπλώσουν την αέρια μάζα. Οι περιοχές σχηματισμού αέριων μαζών ονομάζονται πηγές αέριων μαζών.

Οι αέριες μάζες ταξινομούνται σε τέσσερις κατηγορίες ανάλογα με την πηγή προέλευσής τους (Πίνακας 2.3). Αέριες μάζες που δημιουργούνται στους πόλους συμβολίζονται με P (Polar), ενώ εκείνες που σχηματίζονται στις θερμές τροπικές περιοχές συμβολίζονται με T (Tropical). Αν η πηγή βρίσκεται στην ξηρά, τότε η αέρια μάζα είναι ξηρή και πριν από το P ή το T προσθέτουμε το c (continental). Αντίστοιχα, αν η αέρια μάζα δημιουργείται πάνω από τη θάλασσα, τότε είναι υγρή, τουλάχιστον στα κατώτερα στρώματα, και πριν από το P ή το T προσθέτουμε το m (maritime). Για παράδειγμα, πολική αέρια μάζα που δημιουργείται σε ξηρά συμβολίζεται με cP, ενώ τροπική αέρια μάζα που δημιουργείται πάνω από θάλασσα συμβολίζεται με mT. Συχνά, μια πολύ ψυχρή ηπειρωτική αέρια μάζα (cP) χαρακτηρίζεται ηπειρωτική αρκτική (continental Arctic/cA), ενώ μια θαλάσσια τροπική χαρακτηρίζεται θαλάσσια ισημερινή (maritime Equatorial/mE).

Πηγές	**Πολικές (P)**	**Τροπικές (T)**
Ξηρά Ηπειρωτικές (continental/c)	cP Πολύ ψυχρές, ξηρές και ευσταθείς	cT Πολύ θερμές, ξηρές ευσταθείς στα ανώτερα στρώματα και ασταθείς κοντά στο έδαφος.
Νερό Θαλάσσιες (maritime/m)	mP Ψυχρές, υγρές και ασταθείς	mT Θερμές, υγρές και συνήθως ασταθείς

Πίνακας 2.3. *Ταξινόμηση των αέριων μαζών και τα χαρακτηριστικά τους.*

2.10.2. Μέτωπα

Μέτωπο θεωρείται μια μεταβατική ζώνη ανάμειξης δύο αερίων μαζών με διαφορές στην πυκνότητα, που προκαλούνται από διαφορές στη θερμοκρασία και, αρκετά συχνά, στην υγρασία. Με δεδομένο ότι οι αέριες μάζες εκτείνονται οριζόντια και κατακόρυφα, η επέκταση του μετώπου προς τα πάνω δημιουργεί μια διακριτή κεκλιμένη επιφάνεια, που συνήθως αναφέρεται ως μετωπική επιφάνεια ή μετωπική ζώνη. Συνεπώς, μέτωπο θεωρείται η τομή της μετωπικής επιφάνειας με την επιφάνεια του εδάφους. Οι μετωπικές επιφάνειες διαθέτουν πολύ μικρό πάχος σε σχέση με τις διαστάσεις των αέριων μαζών, ώστε να θεωρείται αμελητέο, με συνέπεια στους χάρτες καιρού τα μέτωπα να απεικονίζονται μόνο με γραμμές.

2.10.2.1. Θερμό μέτωπο

Στο θερμό μέτωπο, η ψυχρή αέρια μάζα προηγείται και έπεται η ψυχρή. Γι' αυτό, το θερμό μέτωπο κινείται από τις υψηλές προς τις χαμηλές θερμοκρασίες. Ο θερμός αέρας εισβάλλει σε μια περιοχή ψυχρού αέρα και, ως ελαφρύτερος και αραιότερος, συγκριτικά με τον ψυχρό, γλιστρά πάνω από τον ψυχρό (Σχήμα 2.20α). Επειδή δεν μπορούν οι θερμές αέριες μάζες να ωθήσουν και να εκτοπίσουν τις ψυχρές, τα θερμά μέτωπα κινούνται με σχετικά μικρότερη ταχύτητα από αυτήν της γενικής κυκλοφορίας (Σχήμα 2.20α). Η μετωπική επιφάνεια παρουσιάζει κλίση κατά τη διεύθυνση τις κίνησης του μετώπου και κυμαίνεται μεταξύ 1:300 και 1:1000. Στον Πίνακα 2.4 παρουσιάζονται οι έξι βασικότερες μετεωρολογικές παράμετροι, με τις μεταβολές που υφίστανται πριν από, κατά και μετά τη διέλευση του θερμού μετώπου. Στο Σχήμα 2.20α, η κατακόρυφη τομή του θερμού μετώπου δηλώνει τις διαστάσεις του, την κίνηση των αέριων μαζών, τη διαδοχή των νεφών, τον τομέα της

βροχόπτωσης και, φυσικά, τον θερμό και τον ψυχρό τομέα, δηλαδή τις περιοχές όπου επικρατούν η θερμή και η ψυχρή αέρια μάζα, αντίστοιχα.

2.10.2.2. Ψυχρό μέτωπο

Στο ψυχρό μέτωπο, η θερμή αέρια μάζα προηγείται και έπεται η ψυχρή. Επομένως, το ψυχρό μέτωπο κινείται από τις χαμηλές προς τις υψηλές θερμοκρασίες. Ο ψυχρός αέρας εισβάλλει σε μια περιοχή θερμού αέρα και τον ωθεί βίαια προς τα πάνω (Σχήμα 2.20β). Η άνοδος της θερμής αέριας μάζας σε υψηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας προκαλεί την εκτόνωσή της, με αποτέλεσμα να ψύχεται, φτάνοντας στο σημείο κορεσμού, όπου και συμπυκνώνεται, δημιουργώντας βροχή (Σχήμα 2.20β). Πίσω από ένα αργά κινούμενο ψυχρό μέτωπο υπάρχουν νεφοκάλυψη και βροχή. Η μετωπική επιφάνεια παρουσιάζει αντίθετη κλίση σε σχέση με τη διεύθυνση της κίνησής της και κυμαίνεται μεταξύ 1:50 και 1:150. Εξαιτίας τις τριβής με την επιφάνεια του εδάφους, οι ταχύτητες των ανέμων είναι μικρότερες χαμηλότερα απ' ό,τι πιο ψηλά, με συνέπεια να επιβραδύνεται η κίνηση της μετωπικής επιφάνειας κοντά στο έδαφος. Αν η διαφορά θερμοκρασίας του μετώπου μειώνεται, το μέτωπο εξασθενεί και διαλύεται, ενώ αντίθετα το μέτωπο ενισχύεται. Παρότι τα ψυχρά μέτωπα είναι γενικά σφοδρότερα από τα θερμά, μπορούν τα καιρικά γνωρίσματα να διαφοροποιηθούν ανάλογα με τις συνθήκες. Αν ο ανερχόμενος θερμός αέρας είναι ξηρός και ευσταθής, σχηματίζονται διασκορπισμένα νέφη και δεν βρέχει. Στον Πίνακα 2.5 παρουσιάζονται οι έξι βασικότερες μετεωρολογικές παράμετροι, με τις μεταβολές που υφίστανται πριν από, κατά και μετά τη διέλευση του ψυχρού μετώπου.

2.10.2.3. Στάσιμο μέτωπο

Στάσιμο ονομάζεται το μέτωπο που δεν παρουσιάζει αισθητή μετακίνηση. Ειδικότερα, όταν μια ψυχρή και μια θερμή αέρια μάζα βρίσκονται σε επαφή και καμία από τις δύο δεν εμφανίζει τάση εκτόπισης της άλλης, τότε η τομή της διαχωριστικής τους επιφάνειας με την επιφάνεια του εδάφους καλείται στάσιμο μέτωπο. Όταν ο θερμός αέρας διαθέτει αρκετή υγρασία και οι συνθήκες ευνοούν την άνοδό του πάνω από τον ψυχρό, τότε αναπτύσσονται νέφωση και ασθενής υετός σε μεγάλη έκταση μέσα στον ψυχρό τομέα του μετώπου. Στην περίπτωση εκτόπισης του ψυχρού αέρα από τον θερμό, το στάσιμο μέτωπο μετατρέπεται σε θερμό. Αντίθετα, αν ο ψυχρός αέρας αρχίζει να μετατοπίζει τον θερμό, τότε γεννιέται ένα ψυχρό μέτωπο (Σχήμα 2.21).

ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΠΡΙΝ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΕΛΕΥΣΗ (ΨΥΧΡΟΣ ΤΟΜΕΑΣ)	ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΕΛΕΥΣΗ	ΜΕΤΑ ΤΗ ΔΙΕΛΕΥΣΗ (ΘΕΡΜΟΣ ΤΟΜΕΑΣ)
ΑΝΕΜΟΣ	Αντιστρέφεται (πνέει κατά την ορθή φορά) στο Βόρειο Ημισφαίριο και ενισχύεται.	Στρέφεται στο Βόρειο Ημισφαίριο.	Σταθερός σε διεύθυνση.
ΒΑΡΟΜΕΤΡΟ	Σταθερή πτώση.	Σταματά η πτώση.	Μικρή μεταβολή (πτώση).
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ	Σταθερή ή μικρή αύξηση.	Αυξάνεται.	Σταθερή ή μικρή αλλαγή.
ΝΕΦΩΣΗ	Ci, Cs, As, Ns	Ns	St ή Sc
ΚΑΤΑΚΡΗΜΝΙΣΜΑΤΑ	Αρχικά, ελαφριά βροχόπτωση, έπειτα συνεχής και στη συνέχεια μέτριας έντασης.	Σταματά η βροχόπτωση, δίνοντας τη θέση της σε ψεκαδισμό.	Διαλείπουσα, ελαφριά βροχόπτωση.
ΟΡΑΤΟΤΗΤΑ	Αρχικά, είναι καλή, έπειτα χειροτερεύει σταδιακά.	Φτωχή.	Μέτρια ή φτωχή, λόγω ύπαρξης ομίχλης.

Πίνακας 2.4. *Διαδοχή του καιρού σε ένα θερμό μέτωπο.*

ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΠΡΙΝ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΕΛΕΥΣΗ (ΨΥΧΡΟΣ ΤΟΜΕΑΣ)	ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΕΛΕΥΣΗ	ΜΕ ΤΗ ΔΙΕΛΕΥΣΗ (ΨΥΧΡΟΣ ΤΟΜΕΑΣ)
ΑΝΕΜΟΣ	Σταθερός σε διεύθυνση, έπειτα αντιστρέφεται στο ΒΗ και δίνει λαίλαπες στο πλησίασμα.	Στρέφεται στο ΒΗ, δίνοντας λαίλαπες.	Συνήθως είναι σχετικά σταθερός σε διεύθυνση και εξασθενεί σταδιακά.
ΒΑΡΟΜΕΤΡΟ	Αρχικά, μικρή αλλαγή, έπειτα μικρή πτώση, κατά το πλησίασμα.	Απότομη αύξηση.	Εξακολουθεί να αυξάνει αρχικά γρήγορα, έπειτα αργά
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ	Μικρή μεταβολή αρχικά, έπειτα πέφτει.	Απότομη πτώση.	Μικρή μεταβολή, συνήθως αργή πτώση
ΝΕΦΩΣΗ	St ή Sc, μετά Cu ή Cb	Cu ή Cb	As, Ac, μετά Cu και πιθανών Cb
ΚΑΤΑΚΡΗΜΝΙΣΜΑΤΑ	Διαλείπουσα, ελαφριά βροχόπτωση, έντονη βροχόπτωση κατά το πλησίασμα.	Ραγδαία βροχόπτωση, μερικές φορές με χαλάζι και πιθανές καταιγίδες.	Έντονη βροχόπτωση, που συνήθως εξασθενεί γρήγορα και ακολουθείται από μεμονωμένες μπόρες.
ΟΡΑΤΟΤΗΤΑ	Μέτρια ή φτωχή.	Φτωχή.	Γρήγορη βελτίωση, γίνεται καλή, με εξαίρεση τις μπόρες.

Πίνακας 2.5. *Διαδοχή του καιρού σε ένα ψυχρό μέτωπο*.

2.10.2.4. Συνεσφιγμένο μέτωπο

Όταν ένα ψυχρό μέτωπο κινείται ταχύτερα από ένα προπορευόμενο θερμό μέτωπο και το συναντήσει ή το προσπεράσει, τότε ο θερμός αέρας εγκλωβίζεται και εκτοπίζεται προς τα πάνω. Στην περίπτωση αυτή, τα δύο μέτωπα αποτελούν ένα ενιαίο μέτωπο, που λέγεται συνεσφιγμένο μέτωπο ή, απλώς, σύσφιξη. Ένα συνεσφιγμένο μέτωπο έχει τα χαρακτηριστικά της ψυχρής σύσφιξης ή του ψυχρού μετώπου, όταν ο ψυχρός αέρας του ψυχρού μετώπου είναι ψυχρότερος από τον ψυχρό αέρα του θερμού μετώπου. Σε αντίθετη περίπτωση, δηλαδή αν ο ψυχρός αέρας του ψυχρού μετώπου είναι θερμότερος από τον ψυχρό αέρα του θερμού μετώπου, τότε η σύσφιξη καλείται θερμή και το μέτωπο έχει τα χαρακτηριστικά ενός θερμού μετώπου. Με την προσέγγιση ενός ψυχρού μετώπου σε μια περιοχή όπου προηγείται το θερμό μέτωπο, τα καιρικά φαινόμενα μοιάζουν με αυτά ενός θερμού μετώπου, δηλαδή μειώνεται η ατμοσφαιρική πίεση και αναπτύσσεται μέση και χαμηλή νέφωση, με ασθενή υετό. Ωστόσο, με το προσπέρασμα του ψυχρού μετώπου, ο καιρός διαμορφώνεται παρόμοιος με εκείνον του ψυχρού μετώπου, με έντονες και ισχυρές βροχοπτώσεις (Σχήμα 2.21).

2.10.3. Κυκλώνες και αντικυκλώνες

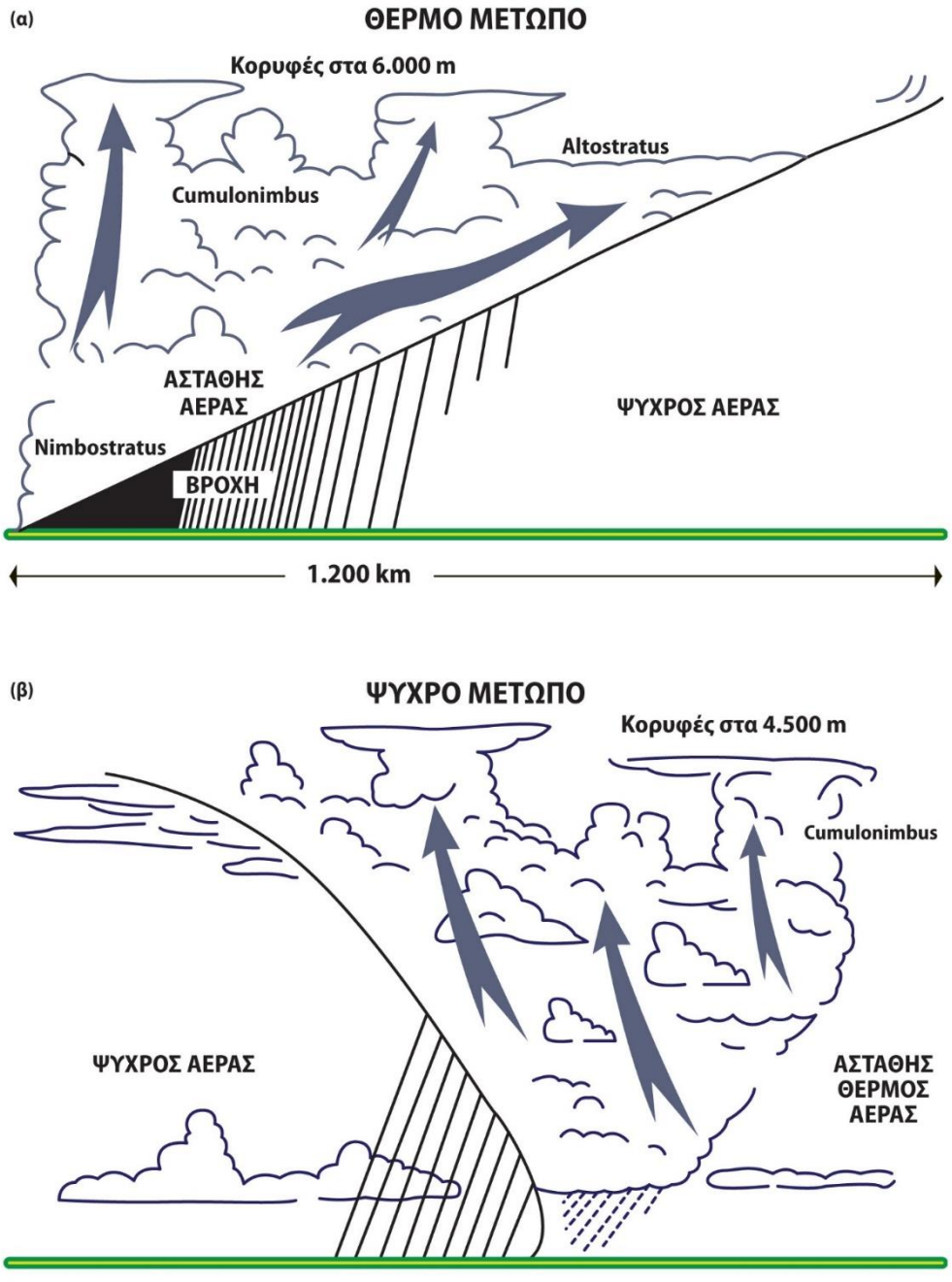
2.10.3.1. Κυκλώνες ή υφέσεις

Κυκλώνας, ύφεση ή βαρομετρικό χαμηλό καλείται το σύστημα που στην επιφάνεια του εδάφους εμφανίζει τιμές ατμοσφαιρικής πίεσης μικρότερες από τη γύρω περιοχή. Στους χάρτες καιρού, η ύφεση απεικονίζεται με κλειστές κυκλικές ή ελλειψοειδείς ισοβαρείς καμπύλες, ενώ η πίεση ελαττώνεται από την περιφέρεια προς το κέντρο. Ο άνεμος κινείται παράλληλα προς τις ισοβαρείς και στο βόρειο ημισφαίριο ακολουθεί την κυκλωνική κυκλοφορία, δηλαδή η ροή του είναι αντίστροφη της κίνησης των δεικτών του ρολογιού, ενώ το αντίθετο συμβαίνει στο νότιο ημισφαίριο.

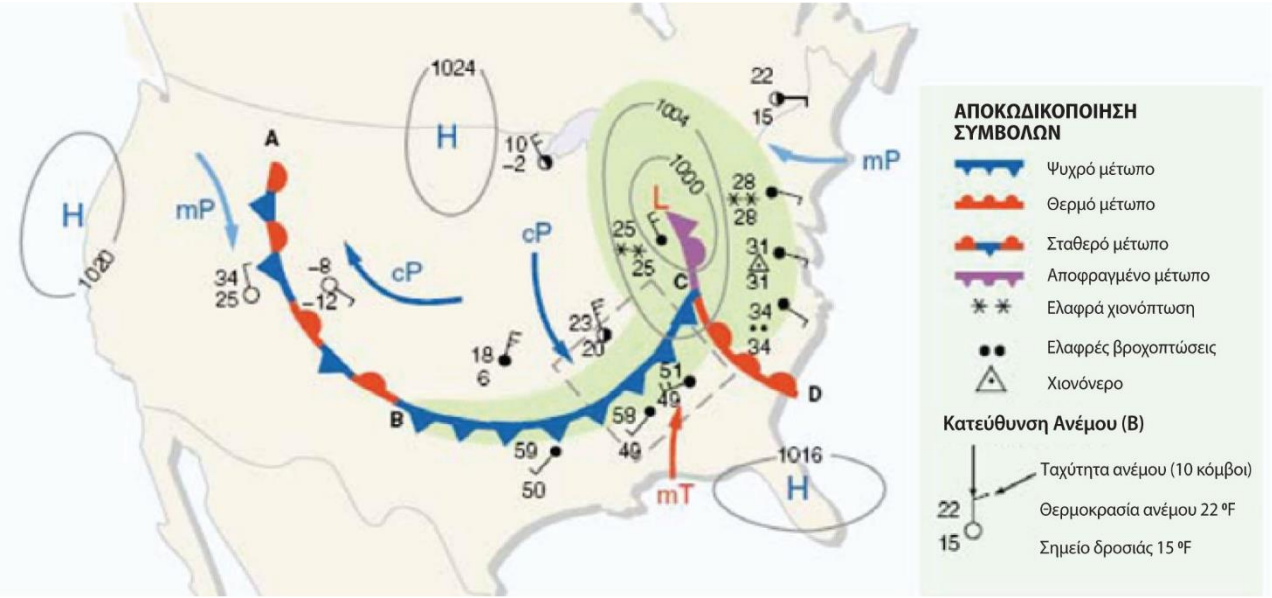
2.10.3.2. Αντικυκλώνες

Αντικυκλώνας ή κέντρο υψηλών πιέσεων ή βαρομετρικό υψηλό καλείται το σύστημα που στο κέντρο του και στην επιφάνεια του εδάφους παρουσιάζει τιμές ατμοσφαιρικής πίεσης μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες της γύρω περιοχής. Στους χάρτες καιρού, ο αντικυκλώνας απεικονίζεται με κλειστές ισοβαρείς περίπου κυκλικές ή ελλειπτικές, όπου η πίεση αυξάνεται από την περιφέρεια προς το κέντρο. Ο άνεμος κινείται παράλληλα προς τις ισοβαρείς, με ένταση που αυξάνεται από το κέντρο προς την περιφέρεια, και στο βόρειο ημισφαίριο ακολουθεί την αντικυκλωνική κυκλοφορία, δηλαδή η ροή του αέρα είναι σύμφωνη με την κίνηση των δεικτών

του ρολογιού. Στην περιοχή του κέντρου του αντικυκλώνα επικρατεί νηνεμία ή ασθενείς άνεμοι. Γενικά, οι αντικυκλώνες χαρακτηρίζονται από καλό καιρό, με μέτριους ανέμους, που μπορεί να είναι ισχυροί στην περιφέρειά τους, κυρίως στην περίπτωση γειτνίασης με βαρομετρικό χαμηλό. Σε περιπτώσεις εξασθενημένου αντικυκλώνα μπορεί να διέλθουν μέσα από αυτόν μετωπικές επιφάνειες, μεταφέροντας τα αντίστοιχα πρότυπα καιρού, δηλαδή κακοκαιρία και βροχοπτώσεις. Στις κεντρικές περιοχές του αντικυκλώνα, ιδίως στη διάρκεια της ψυχρής περιόδου, σχηματίζεται συνήθως ομίχλη ακτινοβολίας.

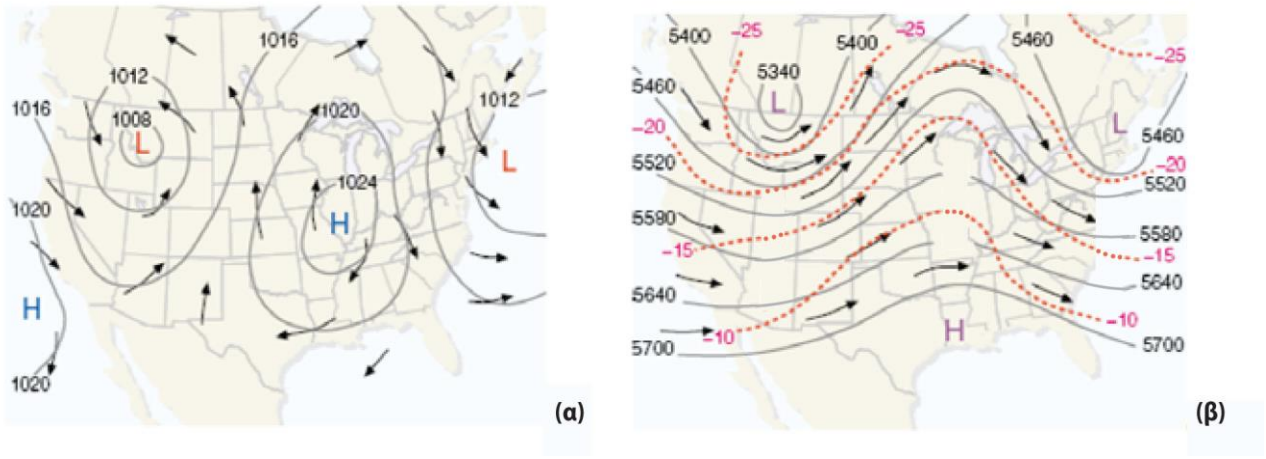


Σχήματα 2.20. *Κατακόρυφη δομή μετώπων: (α) θερμού και (β) ψυχρού μετώπου.*



Σχήμα 2.21. *Μέτωπα (ψυχρό, θερμό και συνεσφιγμένο) σε χάρτη επιφάνειας.*

Οι αντικυκλώνες, ανάλογα με τον τρόπο δημιουργίας τους, την κινητική τους κατάσταση και τη συμπεριφορά τους, ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες, τους μόνιμους, τους εποχικούς και τους κινητούς. Επιπλέον, ανάλογα με την τιμή της θερμοκρασίας που επικρατεί στην κεντρική τους περιοχή, διακρίνονται σε ψυχρούς και θερμούς. Στους ψυχρούς αντικυκλώνες, ο αέρας στα κατώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας είναι γενικά πιο ψυχρός από τον αέρα στις γειτονικές περιοχές. Η θερμοκρασία και η πίεση στους συγκεκριμένους αντικυκλώνες ελαττώνονται γρήγορα με το ύψος, με συνέπεια η κατακόρυφη έκτασή τους να είναι σχετικά μικρή, φτάνοντας τα 2-3 km από το έδαφος. Συνήθως, οι εποχικοί αντικυκλώνες, όπως ο Σιβηρικός και ο Καναδικός, ανήκουν στους ψυχρούς αντικυκλώνες. Αντίθετα, στους θερμούς αντικυκλώνες και σε όλες τις στάθμες, ο αέρας είναι πιο θερμός από τον αντίστοιχο που τους περιβάλλει. Επίσης, οι θερμοί αντικυκλώνες εκτείνονται σε μεγαλύτερο ύψος και η έντασή τους αυξάνεται με την αύξηση του ύψους. Τέτοιοι αντικυκλώνες είναι κυρίως οι μόνιμοι (Σχήμα 2.22).



Σχήμα 2.22. *Κυκλώνας και αντικυκλώνας σε χάρτη (α) επιφάνειας και (β) 500 mb*.

2.11. Υδροσυμπυκνώσεις μικρής κλίμακας

2.11.1. Δρόσος

Δρόσος λέγεται το φαινόμενο σχηματισμού υδροσταγόνων πάνω στις διάφορες επιφάνειες του εδάφους, όπως χλόη ή φύλλα δένδρων, τις νυχτερινές ή τις πρώτες πρωινές ώρες. Είναι το αποτέλεσμα της ψύξης γενικά του εδάφους κατά τη νύχτα, λόγω θερμικής ακτινοβολίας προς την ατμόσφαιρα. Ειδικότερα, όταν με τη διαδικασία της ψύξης η ελάχιστη θερμοκρασία (T_{min}) των διαφόρων επιφανειακών στρωμάτων του εδάφους γίνει ίση ή μικρότερη της θερμοκρασίας του σημείου δρόσου (T_d) του παρεδάφιου στρώματος του αέρα, τότε οι υδρατμοί του αέρα συμπυκνώνονται με διάφορες μορφές πάνω στις επιφάνειες αυτές. Στην περίπτωση της δρόσου, ισχύει ότι $0^o C < T_{min} < T_d$. Αν η ελάχιστη θερμοκρασία γίνει μικρότερη από $0^o C$ μετά το σχηματισμό της δρόσου, τότε το φαινόμενο λέγεται παγωμένη δρόσος και ισχύει $T_{min} < 0^0 C < T_d$. Συνθήκες που ευνοούν το σχηματισμό δρόσου περιλαμβάνουν ανέφελο ουρανό κατά τη νύχτα, άπνοια ή υποπνέοντα άνεμο και υψηλή σχετική υγρασία των παρεδάφιων στρωμάτων του αέρα. Η δρόσος αποκτά μεγάλη σημασία στη γεωργία σε περιόδους ξηρασίας, καθόσον τότε αποτελεί πηγή νερού για το έδαφος.

2.11.2. Πάχνη

Πάχνη λέγεται το φαινόμενο σχηματισμού λευκών παγοκρυστάλλων, και όχι υδροσταγόνων, στην επιφάνεια του εδάφους. Οπότε, ισχύει ότι $T_{min} < T_d < 0^o C$, δηλαδή τόσο η ελάχιστη θερμοκρασία όσο και η θερμοκρασία του σημείου δρόσου έχουν τιμές κάτω από το μηδέν ($0^o C$). Τα φυσικά βυθίσματα ή κοιλάδες της επιφάνειας της Γης ευνοούν το σχηματισμό πάχνης. Ευνοϊκές συνθήκες σχηματισμού πάχνης περιλαμβάνουν άπνοια ή υποπνέοντα άνεμο ταχύτητας μικρότερης των 2 m/s, ανέφελο ουρανό τη νύχτα και αρκετά ψυχρό παρεδάφιο στρώμα αέρα. Η πάχνη θεωρείται μάλλον καταστρεπτική για τα φυτά.

2.11.3. Ορατότητα και ομίχλη

Η **ορατότητα** είναι η μέγιστη απόσταση στην οποία μπορούν να αναγνωριστούν αντικείμενα στη διάρκεια της ημέρας. Η ορατότητα μπορεί να περιοριστεί για διάφορους λόγους, που σχετίζονται κυρίως με την ύπαρξη είτε υδροσταγόνων είτε στερεών σωματιδίων, που αιωρούνται στην ατμόσφαιρα. Η ομίχλη αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες που επιδρούν στον περιορισμό της ορατότητας. Για να επικρατήσει καλή ορατότητα σε κάποια περιοχή, πρέπει η θερμοκρασία του αέρα να είναι χαμηλότερη από την αντίστοιχη της υποκείμενης επιφάνειας, αλλά και η ένταση των επικρατούντων ανέμων να είναι μεγάλη, ώστε να τείνει να διαλύσει την ήδη σχηματισμένη ομίχλη ή να διασπείρει τα αιωρούμενα σωματίδια, που έχουν παραμείνει μέσα στην ατμόσφαιρα.

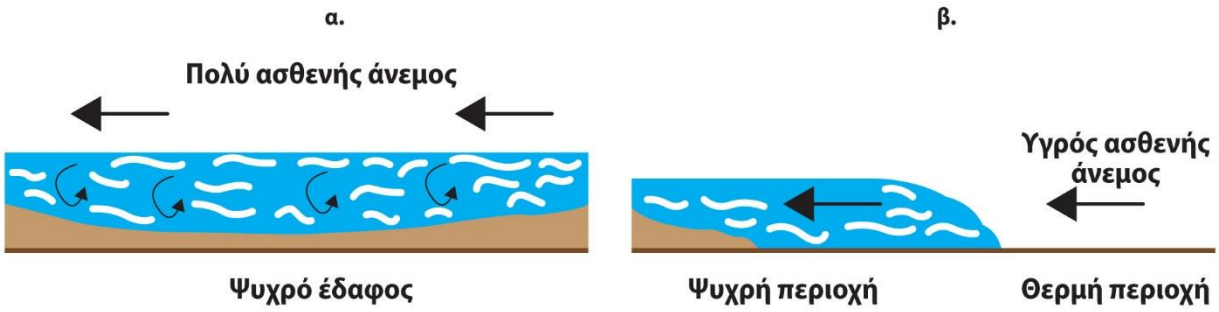
Ο όρος **«ομίχλη»** (fog) χρησιμοποιείται από τον Παγκόσμιο Μετεωρολογικό Οργανισμό (ΠΜΟ) όταν η ορατότητα δεν ξεπερνά τα 1.000 m. Εάν η οριζόντια ορατότητα είναι μεγαλύτερη από τα 1.000 m, αλλά μικρότερη από τα 2.000 m, τότε χρησιμοποιείται ο όρος **«υγρή αχλύς»** (mist), για να περιγράψει τη μείωση της ορατότητας που οφείλεται στη συγκέντρωση των υδροσταγονιδίων στην ατμόσφαιρα. Η ορατότητα μπορεί να μειωθεί και από στερεά αιωρούμενα σωματίδια, οπότε χρησιμοποιείται ο όρος **«ξηρά αχλύς»** (haze). Η ομίχλη δημιουργείται από τη συμπύκνωση των υδρατμών σε θερμοκρασίες χαμηλότερες της θερμοκρασίας του σημείου δρόσου, σε στρώματα της ατμόσφαιρας που βρίσκονται πολύ κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, με αποτέλεσμα τη δημιουργία μεγάλου αριθμού υδροσταγονιδίων. Τα σταγονίδια αυτά διαχέουν το φως σε όλες τις διευθύνσεις, προκαλώντας περιορισμό της ορατότητας. Η δημιουργία ομίχλης μπορεί να προκύψει και από την εξάτμιση των υδρατμών στον αέρα. Το ύψος του στρώματος της ομίχλης μπορεί να φτάσει τα 300-500 m πάνω από την ξηρά και τα 15-20 m πάνω από τη θάλασσα.

Οι τύποι της ομίχλης, ανάλογα με τις φυσικές διαδικασίες που συντελούν στη μείωση της θερμοκρασίας και στο σχηματισμό της, είναι: η ομίχλη ακτινοβολίας (radiation fog), η ομίχλη ανάμειξης (mixing or frontal fog), η ομίχλη οριζόντιας μεταφοράς (advection fog), η ομίχλη εξάτμισης/κατακόρυφης μεταφοράς (steam fog).

Ειδικότερα:

- **Ομίχλη ακτινοβολίας.** Σχηματίζεται πάνω από ξηρά, στη διάρκεια της νύχτας και μέχρι τις πρώτες πρωινές ώρες, με ανέφελο ουρανό, πολύ ασθενείς ανέμους και αυξημένη υγρασία. Ο μηχανισμός δημιουργίας της είναι η νυχτερινή ψύξη της επιφάνειας της Γης, λόγω της γήινης ακτινοβολίας. Η ψύξη αυτή προκαλεί τη συμπύκνωση των υδρατμών του αέρα, με αποτέλεσμα τα υδροσταγονίδια που σχηματίζονται με τον τρόπο αυτό να παραμένουν στην ατμόσφαιρα, μειώνοντας έτσι σημαντικά την ορατότητα (Σχήμα 2.23α). Το πάχος της ποικίλλει από 1 έως 300 m. Η ομίχλη ακτινοβολίας είναι πιο συχνή το φθινόπωρο και το χειμώνα.

- **Ομίχλη ανάμειξης.** Σχηματίζεται όταν συναντώνται δυο αέριες μάζες διαφορετικής θερμοκρασίας και υγρασίας. Η δημιουργία αυτού του τύπου ομίχλης, προϋποθέτει ότι η αέρια μάζα, που προκύπτει από την ανάμειξη των δυο επιμέρους αερίων μαζών, παρουσιάζει μικρότερη θερμοκρασία από αυτή που θα χρειαζόταν για να συγκρατηθούν οι υδρατμοί χωρίς να συμπυκνωθούν. Η μετωπική ομίχλη αποτελεί ειδική περίπτωση της ομίχλης ανάμειξης.
- **Ομίχλη μεταφοράς**. Σχηματίζεται και πάνω από την ξηρά και πάνω από τη θάλασσα, αρκεί θερμός και υγρός αέρας να μεταφερθεί πάνω από ψυχρότερη επιφάνεια (Σχήμα 2.23β). Τότε, η αέρια μάζα ψύχεται, συμπυκνώνοντας ένα μέρος των υδρατμών που περιέχει. Ευνοϊκές συνθήκες σχηματισμού ομίχλης μεταφοράς είναι η επικράτηση ασθενών ανέμων μέχρι 3 Beaufort, οι οποίοι τείνουν να μεταφέρουν τη θερμή και υγρή αέρια μάζα πάνω από ψυχρή επιφάνεια. Απαραίτητη προϋπόθεση αποτελεί επίσης η αυξημένη υγρασία της ατμόσφαιρας στα χαμηλά της στρώματα. Και όσον αφορά τις θερμοκρασίες, θα πρέπει η θερμοκρασία του αέρα να τείνει να εξισωθεί με τη θερμοκρασία του σημείου δρόσου. Η ομίχλη μεταφοράς παρατηρείται πάνω από την ξηρά, συχνά κατά την ψυχρή περίοδο, σε χιονοσκεπείς και παγωμένες εκτάσεις, όταν θαλάσσιες αέριες μάζες, που παρουσιάζουν μεγαλύτερη θερμοκρασία από την αντίστοιχη της ξηράς, μεταφέρονται πάνω από ηπειρωτικές εκτάσεις και ψύχονται. Μπορεί, ωστόσο, να παρατηρηθεί και πάνω από θαλάσσιες εκτάσεις, όταν ο αέρας πάνω από ένα θερμό θαλάσσιο ρεύμα πλησιάσει σε περιοχή στην οποία επικρατεί ένα ψυχρό θαλάσσιο ρεύμα. Συνθήκες που οδηγούν στη διάλυση της ομίχλης μεταφοράς είναι η άπνοια, οι ισχυροί άνεμοι, μεγαλύτεροι των 10 κόμβων, και, τέλος, η αλλαγή της διεύθυνσης του ανέμου.



Σχήμα 2.23. *Διαδικασία σχηματισμού ομίχλης: α) ακτινοβολίας και β) μεταφοράς.*

- **Ομίχλη εξάτμισης**. Ο θαλάσσιος καπνός λέγεται και ομίχλη εξάτμισης. Σχηματίζεται στην επιφάνεια θαλασσών ή μεγάλων λιμνών, όταν ο ατμοσφαιρικός αέρας έχει μικρότερη θερμοκρασία από εκείνη της υδάτινης επιφάνειας. Ο όρος «ομίχλη εξάτμισης» προκύπτει εξαιτίας της γρήγορης εξάτμισης των υδρατμών από την υποκείμενη θερμότερη θάλασσα, οι οποίοι συμπυκνώνονται τελικά μέσα στην ψυχρή μάζα αέρα. Η θάλασσα, που παρέχει μεγάλες ποσότητες θερμότητας, αποδίδει τεράστιες ποσότητες υδρατμών, οι οποίοι συμπυκνώνονται γρήγορα μέσα στον ψυχρό αέρα. Η ομίχλη αυτή σχηματίζεται όταν η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ αέρα και θάλασσας είναι μεγαλύτερη των 9^{o} C, που παρατηρείται συνήθως τους χειμερινούς μήνες. Γενικά, πρόκειται για αραιή ομίχλη. Η ορατότητα είναι περίπου 1 ναυτικό μίλι και μπορεί να επεκτείνεται σε ύψος 1.500 m.

Επειδή η ομίχλη μπορεί να αποβεί πολύ επικίνδυνη, για οποιαδήποτε δραστηριότητα σε ξηρά ή θάλασσα, έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι διάλυσής της. Η πιο γνωστή είναι η θέρμανση της περιοχής κατά μερικούς βαθμούς. Μπορεί να διαλυθεί ακόμα και με τη μέθοδο της υγροσκοπικής διασποράς, δηλαδή με τη διασπορά στην ατμόσφαιρα κάποιων χημικών παραγόντων που έχουν την ιδιότητα να απορροφούν και να δεσμεύουν τους υδρατμούς. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι, όσο επιτυχείς και να θεωρούνται οι παραπάνω τεχνικές και μέθοδοι, δεν εφαρμόζονται ευρέως, αλλά περιορισμένα, εξαιτίας του υψηλού τους κόστους.

Βιβλιογραφικές αναφορές

Ahrens, C.D. (2006). *Meteorology Today*. Book Cole, 8th Edition, Cengage Learning.

Βίγλας, Π. (2007). *Εισαγωγή στη Μετεωρολογία*. Κέντρο Περιβαλλοντικής. Εκπαίδευσης Μακρινίτσας. ΥΠΕΠΘ.

Δαλέζιος, Ν.Ρ. (2010). *Μικρομετεωρολογία-Βιομετεωρολογία (Πανεπιστημιακές Παραδόσεις)*. Βόλος: Εκδόσεις Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

Κατσαφάδος, Π. και Μαυροματίδης, Η. (2010). *Αρχές Μετεωρολογίας-Κλιματολογίας (Πανεπιστημιακές Παραδόσεις)*. Αθήνα: Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο.

Φλόκας, Α. (1988). Μετεωρολογία και κλιματολογία. Εκδόσεις Ζήτη.

Ψύχα, Α. (2010). *Σημειώσεις Ναυτικής Μετεωρολογίας.* Ελληνική Ιστιοπλοϊκή Ομοσπονδία, Αθήνα.

ΜΕΡΟΣ 2: ΑΓΡΟΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Κεφάλαιο 3: Γεωργική Μικρομετεωρολογία
Κεφάλαιο 4: Γεωργική Υδρομετεωρολογία
Κεφάλαιο 5: Γεωργική Βιομετεωρολογία

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3
ΓΕΩΡΓΙΚΗ ΜΙΚΡΟΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑ

Σύνοψη
Στο κεφάλαιο αυτό καλύπτονται δύο σημαντικές ενότητες της αγρομετεωρολογίας, η ηλιακή ακτινοβολία και το Ατμοσφαιρικό Οριακό Στρώμα (ΑΟΣ). Ειδικότερα, εξετάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά της ηλιακής ακτινοβολίας, που αποτελεί την κύρια και βασική πηγή ενέργειας της Γης, όπως επίσης οι νόμοι της και οι μέθοδοι μέτρησης και εκτίμησής της. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται διεξοδικά το αντικείμενο της μικρομετεωρολογίας, με στόχο να τονιστεί η σπουδαιότητά της για τη γεωργία. Επίσης, αναλύονται το ΑΟΣ, η δομή και τα χαρακτηριστικά του, οι μεταβολές των βασικών μετεωρολογικών παραμέτρων αλλά και οι αναταράξεις (τύρβη) σε αυτό, καθώς και το στρώμα επιφάνειας. Τέλος, γίνεται αναφορά στο ισοζύγιο ενέργειας στην επιφάνεια της Γης, στο ισοζύγιο ενέργειας υδάτινων επιφανειών και στο ισοζύγιο θερμότητας στο έδαφος. Επισημαίνεται το ενδιαφέρον της αγρομετεωρολογίας σε διεργασίες όπως είναι η απόθεση φυσικών αερίων και αέριων ρύπων στα φυτά, η εξάτμιση, ο σχηματισμός πάχνης και άλλα συναφή. Και όλα αυτά μέσα από παραδείγματα σε αγροτικές περιοχές και καλλιέργειες, που σχετίζονται άμεσα με το ισοζύγιο ενέργειας στην επιφάνεια, το ισοζύγιο θερμότητας στο έδαφος, την κατάσταση του ΑΟΣ και την ένταση των στροβίλων.

Προαπαιτούμενη γνώση
Ο αναγνώστης απαιτείται να έχει βασικές γνώσεις φυσικής και μαθηματικών.

3.1. Ηλιακή ακτινοβολία

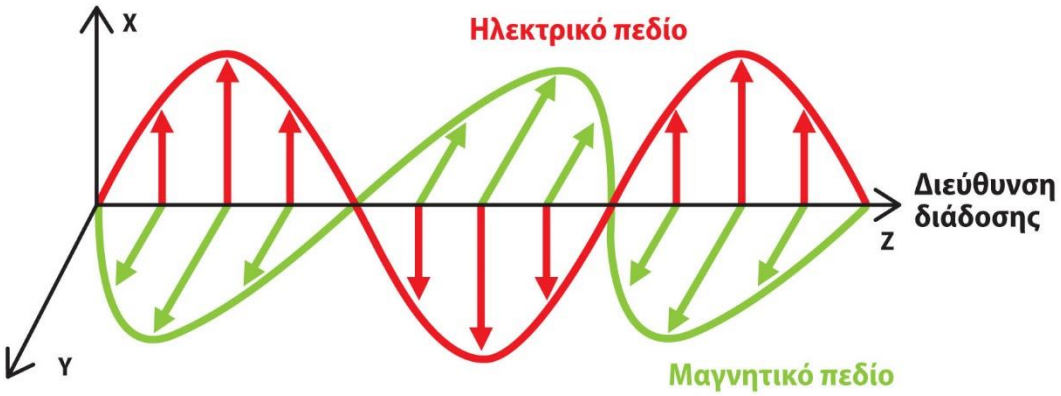
Ο Ήλιος αποτελεί τη βασική και πρακτικά τη μοναδική πηγή ενέργειας όλων σχεδόν των φαινομένων που διαδραματίζονται στην ατμόσφαιρα της Γης. Πολύ μικρά ποσά ενέργειας προέρχονται από διάφορες ανθρωπογενείς δραστηριότητες (0,01%), από το εσωτερικό της Γης (0,005%) και τα υπόλοιπα άστρα (10^{-5}%). Η ηλιακή ακτινοβολία είναι πολύ σημαντική για πολλές διεργασίες στην επιφάνεια της Γης, όπως οι ροές ενέργειας και υγρασίας, η φωτοσύνθεση και η εξατμισοδιαπνοή. Οι μικρής κλίμακας διακυμάνσεις της ακτινοβολίας επηρεάζουν τη βλάστηση και την ανάπτυξη των φυτών, την παραγωγικότητα και την υγρασία τους, καθώς και τα ισοζύγια ενέργειας και νερού στο έδαφος.

3.1.1. Βασικά χαρακτηριστικά της ηλιακής ακτινοβολίας

Η ηλιακή ακτινοβολία είναι μικρού μήκους κύματος (0,3-3,0 μm) και αποτελεί την κύρια πηγή ενέργειας του συστήματος γης-ατμόσφαιρας. Η ηλιακή ενέργεια εκπέμπεται και διαδίδεται στο διάστημα ως ενέργεια ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Σύμφωνα με την κλασική θεωρία του Maxwell, η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία διαδίδεται στο χώρο με τη μορφή κύματος (Σχήμα 3.1). Κάθε στοιχείο ύλης με θερμοκρασία μεγαλύτερη από το απόλυτο μηδέν εκπέμπει ακτινοβολία.
Η ταχύτητα διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος, c, είναι σταθερά και ίση με την ταχύτητα του φωτός ($c = 2{,}998 \times 10^8$ m/s), ενώ η συχνότητα, f, και το μήκος κύματος, λ, συνδέονται με την παρακάτω σχέση, γνωστή ως θεμελιώδη εξίσωση της κυματικής:

$$c = \lambda \cdot f \quad (3.1)$$

Στοιχεία ύλης απορροφούν ακτινοβολία σε μήκη κύματος, τα οποία μπορούν να εκπέμψουν. Τα μήκη κύματος, όπου τα στοιχεία ύλης εκπέμπουν ενέργεια, εξαρτώνται από τη θερμοκρασία τους, δηλαδή όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία, τόσο μικρότερο το μήκος κύματος. Τα αέρια εκπέμπουν και απορροφούν ακτινοβολία σε συγκεκριμένα μήκη κύματος. Το σύνολο των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, δηλαδή όλα τα δυνατά μήκη κύματος, συνιστά το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα (Σχήμα 3.2). Το τμήμα του φάσματος που αναφέρεται στη μελέτη της ατμόσφαιρας εκτείνεται από 10^{-2} μm μέχρι 10^2 μm, δηλαδή από το υπεριώδες μέχρι και το υπέρυθρο. Επισημαίνεται ότι από το σύνολο της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας που εκπέμπει ο ήλιος, το 50% περίπου εμπίπτει στο υπέρυθρο (λ > 0,7 μm), το 40% περίπου βρίσκεται στην περιοχή του ορατού (0,4-0,7 μm) και το 10% περίπου στο υπεριώδες (λ < 0,4 μm).



Σχήμα 3.1. *Παράδειγμα διάδοσης ηλεκτρομαγνητικού κύματος.*

Ο ρυθμός μεταφοράς ενέργειας ακτινοβολίας λέγεται **ροή ακτινοβολίας** (radiant flux) και η μέτρησή του γίνεται σε μονάδες ενέργειας ανά μονάδα χρόνου (J/s ή W), όπως η ροή ακτινοβολίας από τον Ήλιο είναι ίση με 3,91 x 10^{26} W. Αντίστοιχα, **ολική ένταση ακτινοβολίας** (irradiance) είναι το μέγεθος που προκύπτει αν διαιρεθεί η ροή ακτινοβολίας με το εμβαδόν της περιοχής μέσω της οποίας διαδίδεται. Συμβολίζεται δε με Ε και η μέτρησή της γίνεται σε W/m^2. **Ηλιακή σταθερά** S είναι η ροή ηλιακής ακτινοβολίας, δηλαδή η μέση ηλιακή ισχύς ή ολική ένταση, που προσπίπτει κάθετα ανά μονάδα επιφανείας στο εξωτερικό όριο της ατμόσφαιρας της Γης. Η ηλιακή σταθερά έχει μέση τιμή S = 1,370 W m^{-2}, που αντιστοιχεί σε μέση ροή ηλιακής ενέργειας ανά μοναδιαία περιοχή στην επιφάνεια της Γης ίση με 350 W m^{-2}. Υπόψη ότι η ηλιακή σταθερά είναι μόνο προσεγγιστικά σταθερή, εξαρτώμενη από την απόσταση της Γης από τον ήλιο, η δε τιμή της κυμαίνεται περίπου από 1,360 έως 1,380 W m^{-2}. Από την ενέργεια αυτή, το 31% περίπου διαχέεται πίσω στο διάστημα, το 43% απορροφάται από την επιφάνεια της Γης και το 26% από την ατμόσφαιρα. Ειδικότερα, η ηλιακή σταθερά είναι η ολοφασματική ηλιακή ενέργεια, που διέρχεται από τη μονάδα επιφάνειας (1 cm^2), κάθετα στις ηλιακές ακτίνες, στη μονάδα χρόνου (1 min) χωρίς την επίδραση της ατμόσφαιρας, για την οποία ισχύει:

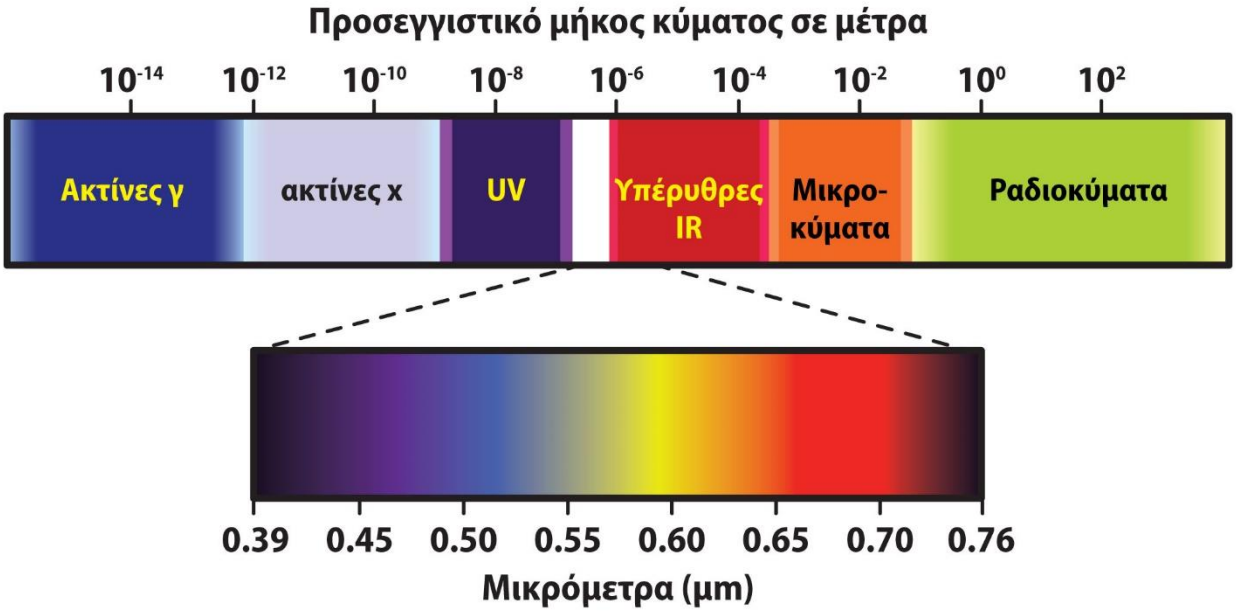
$$S = \int_o^\infty W_\lambda d\lambda \quad , \quad W_\lambda = E_\lambda \left(\frac{R}{\overline{R}} \right)^2 \quad (3.2)$$

όπου S = 1,98 cal/cm^2 min ± 2%, $\overline{R}$ = 149,5 × 10^6 km (μέση απόσταση), R = Γη-Ήλιος.
Ο λόγος της εξερχόμενης προς την εισερχόμενη ροή ηλιακής ακτινοβολίας από το σύνολο του συστήματος Γης-ατμόσφαιρας, γνωστός και ως **λευκαύγεια** (albedo), είναι περίπου 0,31, επιτρέποντας κατά μέσον όρο περίπου 225 W m^{-2} διαθέσιμα για άμεση και έμμεση θέρμανση του συστήματος Γης-ατμόσφαιρας (Kiehl & Trenberth, 1997). Η μέση λευκαύγεια της επιφάνειας της Γης είναι περίπου 0,18. Επισημαίνεται ότι η προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια στην επιφάνεια της Γης δεν είναι ομοιόμορφη και εξαρτάται από τη γεωγραφική θέση, τον προσανατολισμό της επιφάνειας, το χρόνο της ημέρας και του έτους, καθώς και τις ατμοσφαιρικές συνθήκες (Boes, 1981).
Μονοχρωματική ένταση της ακτινοβολίας, E_λ, είναι η ένταση της ακτινοβολίας ανά μονάδα μήκους κύματος, για την οποία ισχύει:

$$E = \int_0^\infty E_\lambda \cdot d\lambda \quad (3.3)$$

Απορροφητικότητα, A_λ, είναι το τμήμα της ακτινοβολίας στο διάστημα μηκών κύματος [λ, λ+dλ] που απορροφά ένα σώμα και εξαρτάται από τη θερμοκρασία και τη φύση του σώματος. Η ολική απορροφητικότητα Α δίνεται από τη σχέση:

$$A = \int_0^\infty A_\lambda \cdot d\lambda, \quad (3.4)$$



Σχήμα 3.2 *Εύρος ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.*

Αφετική ικανότητα ή **ικανότητα εκπομπής**, Ε(λ, Τ), ενός σώματος για ορισμένο μήκος κύματος, λ, και για ορισμένη θερμοκρασία, Τ, είναι η ενέργεια που εκπέμπει το σώμα αυτό από τη μονάδα επιφανείας στη μονάδα χρόνου (Watt/cm^2 και cal/cm^2 min ή ly/min). **Απορροφητική ικανότητα** ή **συντελεστής απορρόφησης**, α, είναι το ποσοστό της απορροφούμενης ενέργειας. **Ανακλαστική ικανότητα** ή **συντελεστής ανάκλασης**, τ, είναι το ποσοστό της ακτινοβολίας που ανακλάται. **Συντελεστής διαφάνειας** ή **διαφάνεια** ή **συντελεστής μεταφοράς**, t, είναι το ποσοστό της ακτινοβολίας που διαπερνά το σώμα.
Μεταξύ των τριών αυτών θερμοφυσικών συντελεστών ισχύει:

$$\alpha + \tau + t = 1,$$

όπου, αν α = 1, τότε είναι μελανό σώμα. Υπάρχει μια κατηγορία υποθετικών σωμάτων, τα **μελανά σώματα**. ένα μελανό σώμα μπορεί να εκπέμπει και να απορροφά ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σε όλο το φάσμα. Επίσης, ένα μελανό σώμα αποτελείται από ικανό αριθμό μορίων, ώστε να απορροφά το σύνολο της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και να εκπέμπει τη μέγιστη δυνατή ακτινοβολία σε όλα τα μήκη κύματος και προς όλες τις κατευθύνσεις. Κατά συνέπεια, το μελανό σώμα παρουσιάζει απορροφητικότητα ίση με τη μονάδα (A_λ = 1) για κάθε μήκος κύματος και επίσης φτάνει σε ενεργειακή ισορροπία εκπέμποντας τον ίδιο αριθμό φωτονίων με αυτά που απορροφά. Η ακτινοβολία ενός μελανού σώματος εφαρμόζεται στην ηλιακή και στη γήινη εκπομπή ακτινοβολίας, καθώς ο Ήλιος εκπέμπει σχεδόν ως μελανό σώμα θερμοκρασίας περίπου 5.800^o Κ, ενώ και η Γη λειτουργεί ως μελανό σώμα θερμοκρασίας περίπου 288^o Κ.
Το πλανητικό μέσο ετήσιο ισοζύγιο ενέργειας υπολογίζεται με βάση την καθαρή ροή ενέργειας ακτινοβολίας στην κορυφή της ατμόσφαιρας και στην επιφάνεια της Γης. Στην κορυφή της ατμόσφαιρας, η καθαρή εξερχόμενη ενέργεια υπολογίζεται από την προσπίπτουσα μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία μείον τη ανακλώμενη μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία. Η διαφορά αυτή υπολογίζει την καθαρή ροή μικρού μήκους ακτινοβολίας στην κορυφή της ατμόσφαιρας. Για εξισορρόπηση της εισροής αυτής μικρού μήκους κύματος ενέργειας, το σύστημα Γη-ατμόσφαιρα εκπέμπει μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία στο διάστημα. Δορυφορικές παρατηρήσεις στην κορυφή της ατμόσφαιρας παρουσιάζουν σχετικά ακριβείς εκτιμήσεις του μέσου ετήσιου πλανητικού ισοζυγίου. Σύμφωνα με τις εκτιμήσεις αυτές, η πλανητική μέση ετήσια εξερχόμενη μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία είναι 235 W m^{-2} και η μέση ετήσια απορροφούμενη μικρού μήκους κύματος ροή είναι 238 W m^{-2}. Κατά συνέπεια, το μετρούμενο ισοζύγιο στην κορυφή της ατμόσφαιρας εξισορροπεί εντός 3 W m^{-2}, όπου ένα μέρος της διαφοράς αυτής αποδίδεται στα αέρια του θερμοκηπίου και το υπόλοιπο συνδέεται, μάλλον, με τις εμφανίσεις του El Nino (Kiehl & Trenberth, 1997).

3.1.2. Νόμοι της ακτινοβολίας

Παρουσιάζονται επιγραμματικά οι τέσσερις βασικοί νόμοι της ακτινοβολίας: ο νόμος του Kirchoff, ο νόμος του Planck, ο νόμος του Wien και ο νόμος των Stefan και Boltzmann, καθώς και ο νόμος του Lambert.

1. Νόμος του Kirchoff

Δίνει την σχέση μεταξύ προσπίπτουσας και απορροφούμενης ακτινοβολίας

$$E' = a \cdot E \quad (3.5)$$

όπου E' είναι η απορροφούμενη ενέργεια, α ο συντελεστής εκπομπής και E η προσπίπτουσα ενέργεια υπό μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, όταν το σώμα βρίσκεται σε θερμοδυναμική ισορροπία.

2. Νόμος του Planck

Η μονοχρωματική ακτινοβολία που εκπέμπει ένα μελανό σώμα Τ° Κ εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία και το μήκος κύματος, λ, της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας. Δηλαδή:

$$E_\lambda = c_1 \lambda^{-5} \left(e^{c_2 / \lambda \mathrm{T}} - 1 \right)^{-1} \quad (3.6)$$

όπου λ είναι το μήκος κύματος σε μm, Τ η απόλυτη θερμοκρασία (° Κ), c_1 και c_2 οι σταθερές, με τιμές c_1 = 1,193 × 10^{16} W m^2 και c_2 = 1,441 × 10^{-2} km, αντίστοιχα.

Στο Σχήμα 3.3 δίνεται η ισχύς εκπομπής της μονοχρωματικής ακτινοβολίας σε συνάρτηση με το μήκος κύματος, λ, για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας.

3. Νόμος του Wien

Το γινόμενο της απόλυτης θερμοκρασίας του μελανού σώματος και του μήκους κύματος, λ_m, που αντιστοιχεί στο μέγιστο της εκπεμπόμενης απ' αυτό ισχύος, είναι σταθερό:

1ος νόμος: $\lambda_m \mathrm{T}\alpha$ = 2.897,8 (° Κ μm) (3.7)

2ος νόμος: $E_{\lambda,m}$ = 1,3 $\left(\frac{T}{1000} \right)^5$ (3.8)

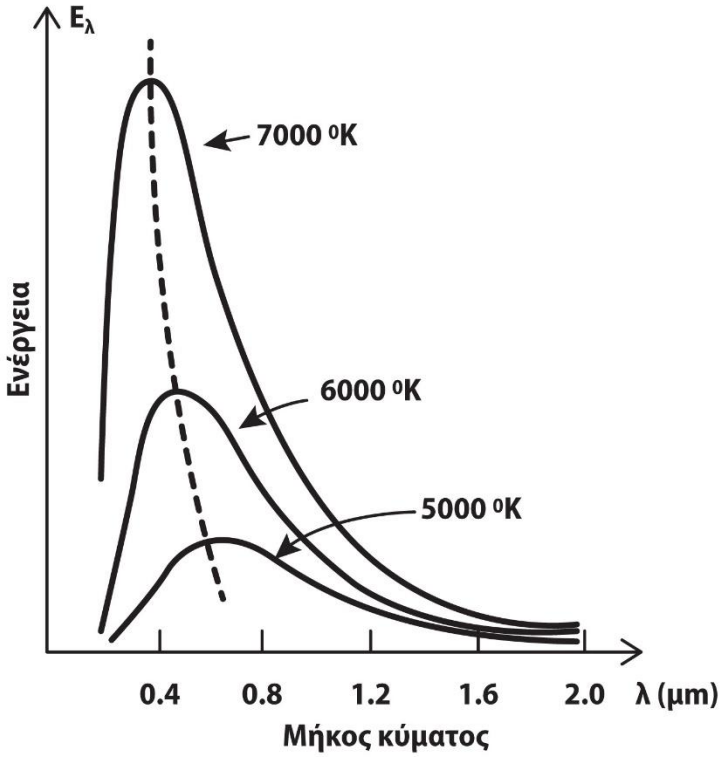
4. Νόμος των Stefan και Boltzmann

Η ολική ισχύς που εκπέμπεται από τη μονάδα επιφανείας μελανού σώματος είναι ανάλογος της τέταρτης δύναμης της απόλυτης θερμοκρασίας. Δηλαδή:

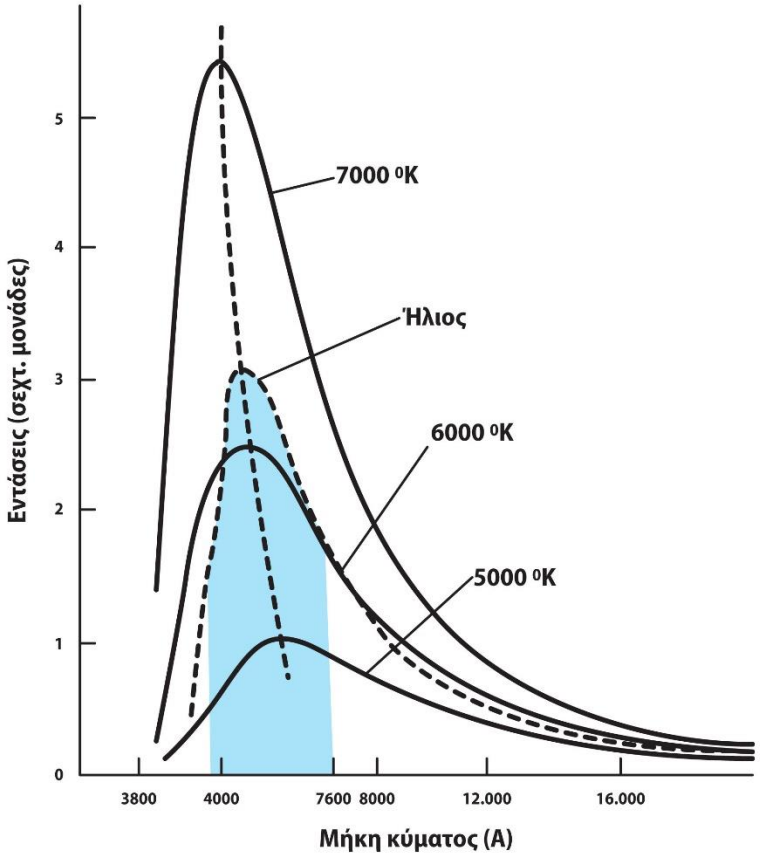
$$\mathrm{E} = \int_0^\infty E_\lambda d\lambda = \sigma \mathrm{T}^4 \quad (3.9)$$

όπου E (W/ m^2), T (° Κ), σ = (5,674 ± 0,004) × 10^{-8} W/ m^2 ° K^4. Συνεπώς, E = 5,7 (T/ 100)^4.

Στο Σχήμα 3.4 απεικονίζεται η φασματική καμπύλη Ήλιου και μελανού σώματος.



Σχήμα 3.3. *Σχέση μονοχρωματικής εκπομπής μήκους κύματος και θερμοκρασίας.*



Σχήμα 3.4. *Φασματική καμπύλη ήλιου και μελανού σώματος.*

5. Νόμος του Lambert
Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας σε κατακόρυφη ακτινοβολία στην επιφάνεια της Γης δίνεται από την εξίσωση:

$$I_m = I_0 \cdot q \cdot m \quad (3.10)$$

όπου I_0 είναι η ηλιακή σταθερά, q ο παράγοντας μεταφοράς για το στρώμα πάχους l και m η απόσταση που διανύει ο αέρας.
Αν ο παράγοντας μεταφοράς q αντικατασταθεί από το συντελεστή α, όπου α = ln q, τότε η εξίσωση (3.10) γίνεται:

$$I_m = I_0 \cdot e^{-a \cdot m} \quad (3.11)$$

Μια χαρακτηριστική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας ανάλογα με τη συχνότητα και το μήκος κύματος δίνεται στον Πίνακα 3.1.

Χρώμα	λ (μm)	Ολική ένταση ακτινοβολίας Wm^{-2}	% ηλιακής σταθεράς
Υπεριώδες	< 0,4	109,81	8,03
Ορατό	0,390-0,770	634,40	46,41
Υπέρυθρο	> 0,77	634,40	46,40

Πίνακας 3.1. *Ζώνες του ηλιακού φάσματος.*

3.1.3. Μέτρηση και εκτίμηση της ηλιακής ακτινοβολίας

Οι μετρήσεις της ακτινοβολίας με πυρανόμετρα περιορίζονται κυρίως για ορισμένους ερευνητικούς σκοπούς, καθώς και για τις ανάγκες της γεωργίας, σε αγρομετεωρολογικούς σταθμούς. Ωστόσο, οι μετεωρολογικοί δορυφόροι δίνουν μια νέα δυνατότητα όσον αφορά την εκτίμηση της ηλιακής ακτινοβολίας στο έδαφος. Η υψηλή χρονική διακριτική ικανότητα των γεωστάσιμων δορυφόρων και η καλή χωρική διακριτική ικανότητα των δορυφόρων πολικής τροχιάς επιτρέπουν τη δημιουργία χαρτών ακτινοβολίας για ολόκληρη την επιφάνεια της Γης. Από την εκτόξευση του πρώτου μετεωρολογικού δορυφόρου, οι επιστήμονες έχουν αναπτύξει μεθόδους για τον προσδιορισμό της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στο έδαφος. Υπάρχουν τρεις μέθοδοι για την εκτίμηση της ηλιακής ακτινοβολίας: οι παραμετρικές μέθοδοι, τα φυσικά μοντέλα και οι στατιστικές μέθοδοι. Αναλυτικότερα:
1. Παραμετρικές μέθοδοι. Ο K.J. Hanson (1976) εφάρμοσε μια παραμετρική μέθοδο χρησιμοποιώντας δορυφορικά δεδομένα παγκόσμιας νέφωσης και μετρήσεις της ηλιακής ακτινοβολίας από δύο σταθμούς τροπικών νησιών, για την εκτίμηση των ζωνικών τιμών της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της Γης, καθορίζοντας μια γραμμική σχέση μεταξύ της προσδιορισμένης τιμής στο νέφος και της κανονικοποιημένης τιμής της ακτινοβολίας. Επίσης, οι Hay και Hanson (1978) ανέπτυξαν μια απλή γραμμική σχέση μεταξύ της ορατής ακτινοβολίας, που μετριέται από τον αισθητήρα του δορυφόρου και της διαπερατότητας της ατμόσφαιρας στη μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία. Επιπλέον, ο J.D. Tarpley (1979) χρησιμοποίησε μετρήσεις από το δορυφόρο GOES, για την εκτίμηση της προς τα κάτω ηλιακής ακτινοβολίας. Με αυτόματη ανίχνευση και οριοθέτηση των νεφών, υπολογίστηκαν οι συντελεστές παλινδρόμησης a, b, c, και d, για τα εικονοστοιχεία χωρίς νέφη, μέσα από μια διαδικασία που στηρίζεται σε υπολογισμούς της τυπικής απόκλισης:

$$B = a + b\cos\theta_0 + c\sin\theta_0\cos\varphi + d\sin\theta_0\cos\varphi \quad (3.12)$$

όπου B είναι η καθαρή ορατή λαμπρότητα του στόχου, φ η αζιμούθια γωνία ανάμεσα στον Ήλιο και στο δορυφόρο, και θ_0 η τοπική ηλιακή ζενίθια γωνία.

2. Φυσικά μοντέλα. Η μέθοδος της ομάδας του C. Gautier (Gautier et al., 1980) εφάρμοσε ένα σχετικά απλό φυσικό μοντέλο, για τον καθορισμό της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στο έδαφος. Ανέπτυξε ένα μοντέλο

για απουσία νεφών και ένα μοντέλο για νεφοσκεπή ουρανό. Η εισερχόμενη μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία στην επιφάνεια μπορεί να γραφεί:

$$FD = F_0 (1-a_2) [1-a(u_{1t})] (1-a_{cld}) (1-abs) [1-(a(u_{1b})] \quad (3.13)$$

όπου $a(u_{lt})$ είναι η απορρόφηση της ακτινοβολίας πάνω από τα σύννεφα, abs η απορρόφηση των νεφών, $a(u_{lb})$ η απορρόφηση κάτω από τα σύννεφα, a_{cld} η ανακλαστικότητα των νεφών και a_2 ο συντελεστής ανάκλασης για την ακτινοβολία.

Η βαθμονόμηση του ραδιόμετρου πραγματοποιήθηκε με τη χρήση εν πτήση μετρήσεων αναφοράς. Τα ιχνοστοιχεία των νεφών επιλέχθηκαν εφαρμόζοντας κατώφλι λαμπρότητας, που λαμβάνεται από τις τιμές λαμπρότητας του καθαρού αέρα. Η επιφανειακή ανακλαστικότητα εκτιμήθηκε από τις ελάχιστες τιμές λαμπρότητας. Επιπλέον, η μέθοδος που αναπτύχθηκε από τους W. Moser και E. Raschke (1983) συνδυάζει τα αποτελέσματα από τους υπολογισμούς της μετάδοσης ακτινοβολίας, βασισμένης σε μια τροποποιημένη μορφή μιας καλά βαθμονομημένης προσέγγισης (Kerschgens et al., 1978), με παραμέτρους που προέρχονται από τα δορυφορικά δεδομένα σε μια στατιστική βάση. Η κύρια εισαγόμενη παράμετρος για το μοντέλο είναι η ανακλώμενη ακτινοβολία, που καθορίζεται από το ορατό του METEOSAT. Επίσης, λαμβάνεται πρόσθετη πληροφορία για το ύψος και την ομοιογένεια των νεφών από το υπέρυθρο. Στη μέθοδο αυτή ορίστηκε η κανονικοποιημένη ολική ακτινοβολία, G_N, και η κανονικοποιημένη ανακλώμενη ακτινοβολία, FU_N. Οι μετρούμενες από το δορυφόρο ακτινοβολίες συμβολίζονται με L και η κανονικοποιημένη ανακλώμενη ακτινοβολία είναι η L_{RN}, για την οποία ισχύει:

$$L_{RN} = \frac{L - L_{RO}}{L_{RU} - L_{RO}} \quad (3.14)$$

όπου L_{RO} είναι η ελάχιστη τιμή του L κάτω από ανέφελες συνθήκες και L_{RU} η μέγιστη τιμή του L πάνω από ένα συμπαγές και οπτικά παχύ στρώμα νέφους.

Η L_{RN} καθορίστηκε από τα δεδομένα του ορατού για την εκτίμηση της ολικής ακτινοβολίας. Για τον υπολογισμό των L_{RN}, οι τιμές των L_{RO} και L_{RU} καθορίστηκαν από δορυφορικά δεδομένα. Η μέθοδος αυτή εφαρμόστηκε για την εκτίμηση της ηλιακής ακτινοβολίας από μετρήσεις των METEOSAT-1 και 2, στην Ευρώπη και τη Βόρεια Αφρική την περίοδο Ιουνίου 1979-Απριλίου1982, αντίστοιχα. Η τιμή της ολικής ακτινοβολίας καθορίστηκε από τη σχέση:

$$G(\theta_0) = [1 - f(L_{RN}, \theta_0)] G_0(\theta_0) \quad (3.15)$$

όπου G_o είναι η ολική ακτινοβολία για καθαρό ουρανό στην ηλιακή ζενίθια γωνία θ_o.

Η συνάρτηση $f(L_{RN},\theta_O)$ λήφθηκε από υπολογισμούς και είναι σχεδόν γραμμική με το L_{RN}. Το G_o υπολογίστηκε με τη χρήση της προσέγγισης του μοντέλου. Το ίδιο μοντέλο εφαρμόστηκε από τους A. Tuzet, W. Moser και E. Raschke (1984), για την εκτίμηση της ολικής ακτινοβολίας στην περιοχή Σαχέλ της Αφρικής από δεδομένα του METEOSAT. Επίσης, υπολογίστηκαν και συγκρίθηκαν τα ημερήσια αθροίσματα για 15 ημέρες, με τις μετρήσεις πυρανόμετρων για δώδεκα σταθμούς στον Νίγηρα και στην Μπουργκίνα Φάσο της Αφρικής. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι, παρ' όλο που η μέθοδος αναπτύχθηκε για περιοχές μέσων γεωγραφικών πλατών, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για διάφορες κλιματικές ζώνες.

3. Στατιστικές μέθοδοι. Μια στατιστική προσέγγιση εφαρμόστηκε από τους D. Cano, J.M. Monget, M. Albuisson, H. Guillard, N. Regas και L. Wald (1986), βασισμένη στην ιδέα ότι το ποσό της νεφοκάλυψης μιας περιοχής καθορίζει την ολική ακτινοβολία για την περιοχή αυτή. Ορίστηκε λοιπόν ένας δείκτης νεφοκάλυψης και ακολούθησε μια στατιστική εκτίμηση. Για τον καθορισμό του δείκτη νεφοκάλυψης, κατασκευάστηκε ένας χάρτης αναφοράς της πλανητικής ανακλαστικότητας καθαρού ουρανού. Η σύγκριση της τρέχουσας δορυφορικής εικόνας με την ανακλαστικότητα αναφοράς δίνει το δείκτη νεφοκάλυψης. Η ολική ακτινοβολία

στην επιφάνεια υπολογίζεται από ένα συντελεστή μεταφοράς, για τον ορισμό του οποίου χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις σταθμών επιφάνειας, καθώς και ο δείκτης νεφοκάλυψης.

3.2 Μικρομετεωρολογία

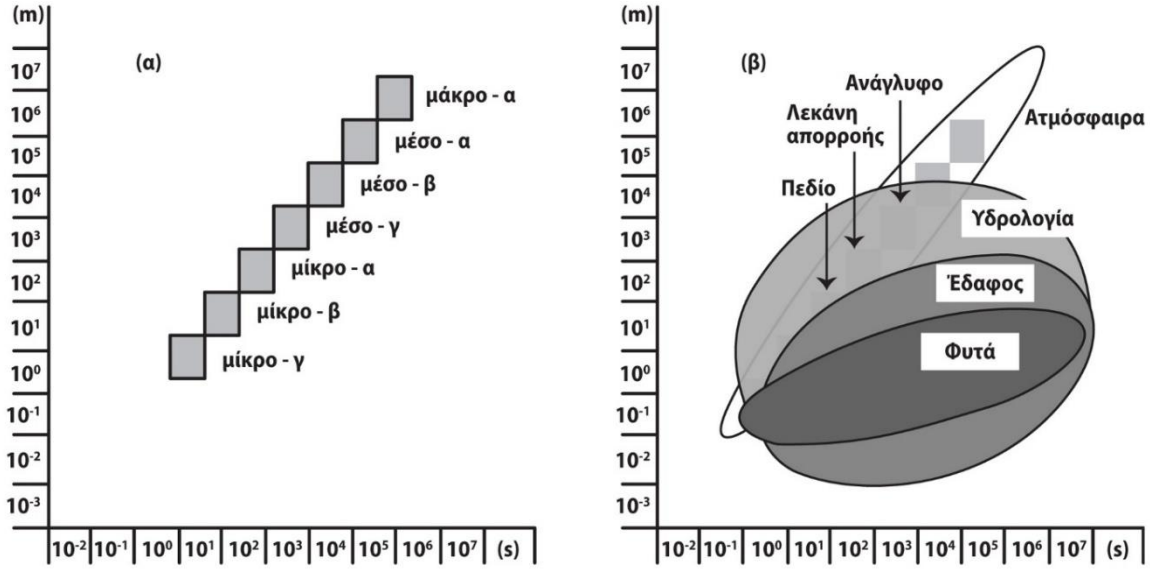
Οι ατμοσφαιρικές κινήσεις βασίζονται στο εύρος των κλιμάκων, που κυμαίνεται από το 1 χιλιοστό (1 mm) μέχρι την περίμετρο της Γης στην οριζόντια διεύθυνση και ολόκληρο το ύψος της ατμόσφαιρας στην κατακόρυφη διεύθυνση. Οι αντίστοιχες κλίμακες χρόνου κυμαίνονται από ένα μικρό κλάσμα του δευτερολέπτου μέχρι μερικούς μήνες ή χρόνια. Γενικά, οι κλίμακες αυτές των κινήσεων ταξινομούνται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες, στη μικροκλίμακα, τη μεσοκλίμακα και τη μακροκλίμακα. Συνήθως, όροι όπως τοπικές, περιοχικές και πλανητικές κλίμακες χρησιμοποιούνται για να χαρακτηρίσουν αντίστοιχες ατμοσφαιρικές κλίμακες και αντίστοιχα φαινόμενα. Η μικρομετεωρολογία είναι ένας κλάδος της μετεωρολογίας που ασχολείται με παρατηρήσεις και διαδικασίες στις μικρότερες κλίμακες χρόνου και χώρου, περίπου μικρότερες από 1 km και μία ημέρα. Μικρομετεωρολογικές διαδικασίες περιορίζονται σε αβαθή στρώματα, με την επίδραση της τριβής, δηλαδή ελαφρώς μεγαλύτερα φαινόμενα, όπως η θερμική μεταγωγή, δεν εξετάζονται από τη μικρομετεωρολογία. Επομένως, αντικείμενο της μικρομετεωρολογίας είναι το κατώτερο τμήμα του Ατμοσφαιρικού Οριακού Στρώματος (ΑΟΣ), δηλαδή το επιφανειακό στρώμα. Διαδικασίες ανταλλαγής ενέργειας, αερίων και άλλα συναφή μεταξύ της ατμόσφαιρας και της υποκείμενης επιφάνειας, δηλαδή νερού, εδάφους ή φυτών, αποτελούν σημαντικά θέματα. Όλες οι διαδικασίες στο ΑΟΣ κυρίως κοντά στην επιφάνεια του εδάφους μπορεί να συγκριθούν με μετρήσεις στο εργαστήριο, όπως σήραγγες ανέμου και υδάτινα κανάλια. Συνεπώς, η γνώση των μικρομετεωρολογικών διαδικασιών βασίζεται σε μεγάλο βαθμό σε υδροδυναμικές έρευνες (Foken, 2008). Αντίστοιχα, η μικροκλιματολογία περιγράφει τις διαχρονικά μέσες ή μακροπρόθεσμες μικρομετεωρολογικές διαδικασίες, καθώς και τις διακυμάνσεις τους. Επισημαίνεται ότι τα κύρια θέματα της εφαρμοσμένης μετεωρολογίας σχετίζονται με διαδικασίες μικροκλίμακας. Η μικρομετεωρολογία παρέχει τη θεωρητική, πειραματική και τοποκλιματική βάση για τους περισσότερους τομείς της εφαρμοσμένης μετεωρολογίας, που σχετίζονται με το επιφανειακό στρώμα και το ΑΟΣ. Επιπλέον, πρόσφατα χρησιμοποιούμενοι όροι, όπως περιβαλλοντική μετεωρολογία, σχετίζονται με τη μικρομετεωρολογία (Μελάς, 2007).

3.2.1. Ατμοσφαιρικές κλίμακες

Σε αντίθεση με άλλες γεωφυσικές διαδικασίες, οι μετεωρολογικές διαδικασίες παρουσιάζουν σαφή χωροχρονική κλίμακα (Haeberli & Beniston, 1998). Ειδικότερα, τα μεγαλύτερα μήκη κύματος είναι εκείνα των συστημάτων ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας με διάρκεια 3-6 ημερών και επέκταση μερικών χιλιάδων χιλιομέτρων (κύματα Rossby), όπου ο ημερήσιος κύκλος είναι μια προφανής συχνότητα. Το χρονικό διάστημα από λεπτά σε δευτερόλεπτα αφορά διαδικασίες ανταλλαγής ενέργειας και ύλης στην περιοχή των μικροαναταράξεων, που αποτελούν το κύριο αντικείμενο της μικρομετεωρολογικής έρευνας. Η αρχική ταξινόμηση των κλιμάκων, όπως δίνεται στο Σχήμα 3.5α, ανήκει στον J. Orlanski (1975). Ωστόσο, σε αντίθεση με τις ατμοσφαιρικές διαδικασίες, οι υδρολογικές διαδικασίες σε εδαφικά και φυτικά οικοσυστήματα παρουσιάζουν για τις ίδιες χρονικές κλίμακες σημαντικά μικρότερες χωρικές κλίμακες (Σχήμα 3.5β). Για παράδειγμα, στο συνδυασμό υδρολογικών και ατμοσφαιρικών μοντέλων είναι απαραίτητο να αναπτυχθούν στρατηγικές μεταφοράς υδρολογικών διαδικασιών στις μεγαλύτερες ατμοσφαιρικές χωρικές κλίμακες. Επίσης, τα καιρικά φαινόμενα ταξινομούνται σύμφωνα με χωροχρονικές κλίμακες. Κατά συνέπεια, οι χωροχρονικές κλίμακες κλιματικών μοντέλων, καθώς και μοντέλων πρόγνωσης καιρού, πρέπει να ταξινομούνται με παρόμοιο τρόπο. Για παράδειγμα, μεγάλης κλίμακας κυκλοφορίας μοντέλα ανήκουν στη macro-β κατηγορία. Επίσης, η κλασική πρόγνωση καιρού ανήκει επισήμως στη meso-α κατηγορία, αλλά τα πρόσφατα πρότυπα υψηλής ευκρίνειας σχετίζονται με τη meso-β κλίμακα. Τέλος, η μικρομετεωρολογία σχετίζεται με όλες τις μικροκλίμακες, όπως εν μέρει και με τη meso-γ κλίμακα. Στο Σχήμα 3.6 παρουσιάζονται οι χωρικές και χρονικές κλίμακες διαφόρων ατμοσφαιρικών φαινομένων σε σχέση με το ΑΟΣ.

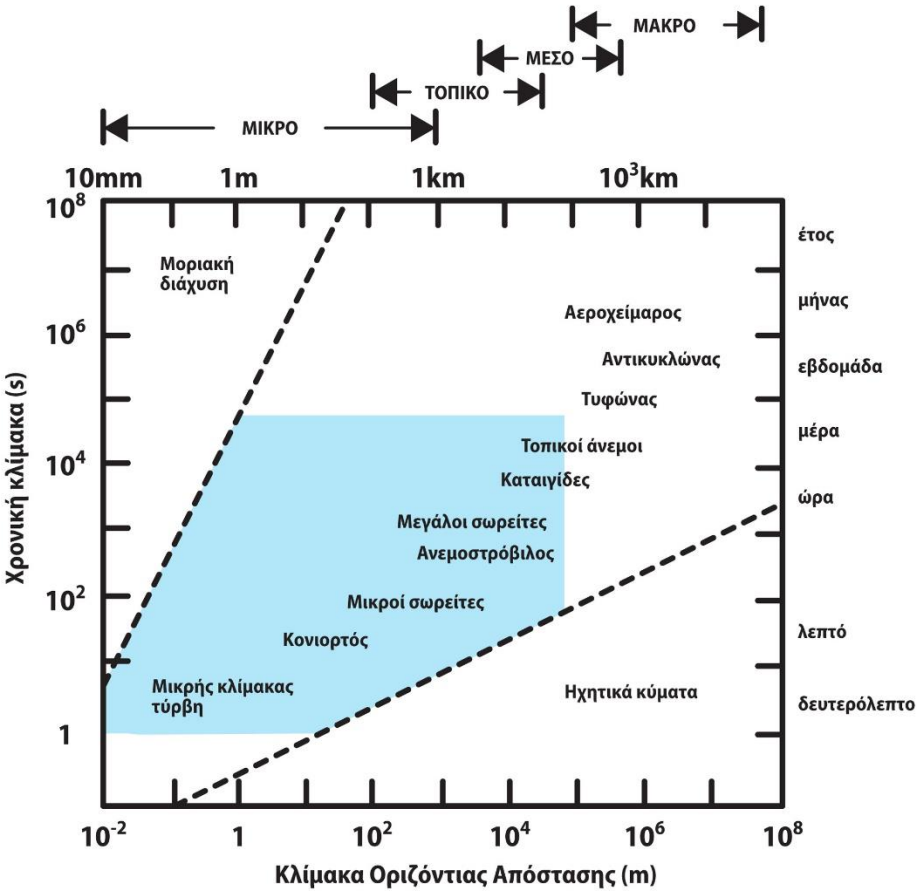
3.3 Το ΑΟΣ

Η τροπόσφαιρα εκτείνεται από το έδαφος μέχρι περίπου 11 km, αλλά μόνο περίπου τα κατώτερα 2 km επηρεάζονται άμεσα από την υποκείμενη επιφάνεια (Σχήμα 3.7). ΑΟΣ ή πλανητικό οριακό στρώμα ορίζεται το τμήμα εκείνο της τροπόσφαιρας, που επηρεάζεται άμεσα από την παρουσία της επιφάνειας της Γης και ανταποκρίνεται στις δυνάμεις της επιφάνειας με χρονικές κλίμακες περίπου μιας ημέρας ή ολίγων ωρών ή ακόμα λιγότερο.
Οι δυνάμεις αυτές περιλαμβάνουν επίδραση της τριβής, που μειώνεται με το ύψος, εξάτμιση και διαπνοή, σημαντική ανταλλαγή ορμής, θερμότητας ή μάζας μεταξύ της επιφάνειας και του ρευστού, μεταφορά θερμότητας, εκπομπή ρύπων, καθώς και τροποποίηση ροής, λόγω ανάγλυφου. Το πάχος του ΑΟΣ μεταβάλλεται σημαντικά στο χώρο και το χρόνο, και είναι περίπου 1-2 km πάνω από την ξηρά και 0,5 km πάνω από τους ωκεανούς.

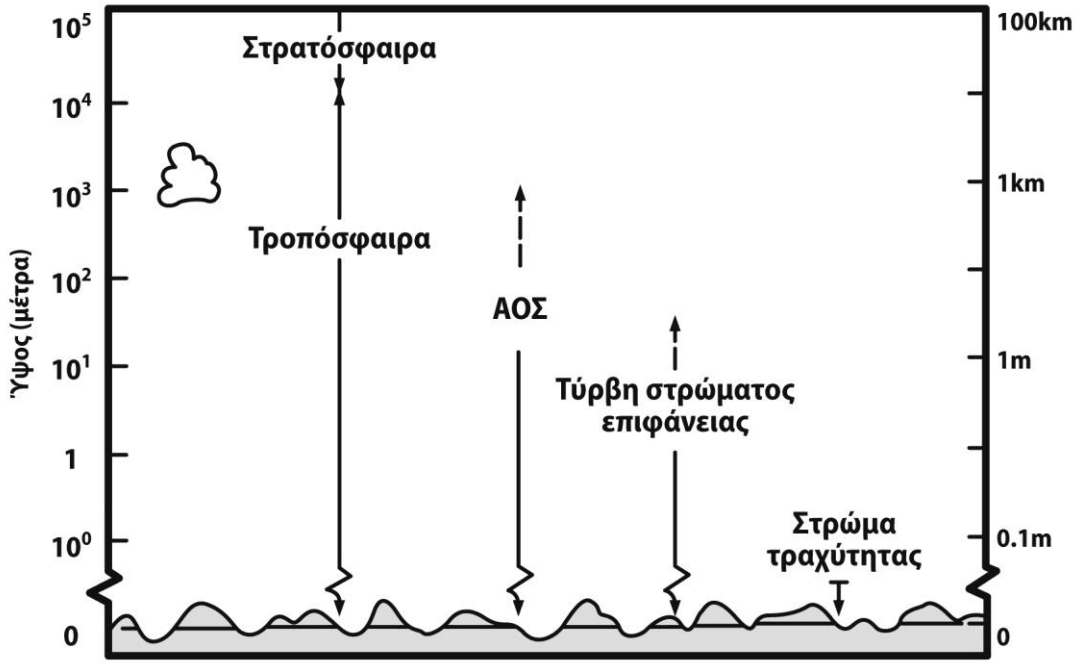


Σχήμα 3.5. *(α) Οι κλίμακες των ατμοσφαιρικών διαδικασιών σύμφωνα με το Orlanski (1975). (β) Η σχέση υδρολογικών και ατμοσφαιρικών κλιμάκων.*

Οι μετεωρολογικές παράμετροι μεταβάλλονται σημαντικά μέσα στο ΑΟΣ και παρουσιάζουν μεγάλες ημερήσιες διακυμάνσεις. Η ημερήσια μεταβολή της **θερμοκρασίας** κοντά στην επιφάνεια αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό του οριακού στρώματος πάνω από την ξηρά και δεν παρατηρείται σε μεγαλύτερα ύψη, όπου η θερμοκρασία στην ελεύθερη ατμόσφαιρα παρουσιάζει μικρή ημερήσια διακύμανση. Επίσης, το ΑΟΣ επηρεάζεται και από θερμικές ιδιότητες. Αντίστοιχα, ο μέσος **άνεμος** παρουσιάζει πολύ απότομη οριζόντια μεταφορά ή σύγκλιση. Οριζόντιοι άνεμοι από 2 έως 10 m/s θεωρούνται συνήθεις στο ΑΟΣ. Ακόμα, η ταχύτητα του ανέμου μειώνεται σημαντικά στο ΑΟΣ κοντά στο έδαφος και η διεύθυνση του ανέμου μεταβάλλεται μέχρι 30-45^{o} αντίθετα από τη φορά των δεικτών του ρολογιού στο βόρειο ημισφαίριο. Επιπλέον, η **τριβή** προκαλεί επιβράδυνση της μέσης ταχύτητας του ανέμου κοντά στο έδαφος. Κατακόρυφοι μέσοι άνεμοι είναι πολύ μικροί, συνήθως της τάξης του mm ή cm/s. Επίσης, παρατηρούνται συχνά **κύματα** στο νυχτερινό οριακό στρώμα, που μεταφέρουν μικρά ποσά θερμότητας, υγρασίας και ρυπαντών. Ωστόσο, τα κύματα αυτά μεταφέρουν αποτελεσματικά ορμή και ενέργεια, μπορούν δε να δημιουργηθούν τοπικά από τη διατμητική τάση του μέσου ανέμου και τη ροή πάνω από το ανάγλυφο. Τέλος, η σχετικά μεγάλη συχνότητα εμφάνισης **αναταράξεων** ή **τύρβης** κοντά στο έδαφος αποτελεί ένα από τα χαρακτηριστικά που διαφοροποιούν το ΑΟΣ από την υπόλοιπη ατμόσφαιρα. Έξω από το ΑΟΣ, οι αναταράξεις εμφανίζονται κυρίως στα μεταγωγικά νέφη και κοντά στον αεροχείμαρρο, όπου η ισχυρή διατμητική τάση του ανέμου μπορεί να δημιουργήσει αναταράξεις καθαρού ουρανού. Στον Πίνακα 3.2 παρουσιάζονται συγκρίσεις της συμπεριφοράς παραμέτρων και χαρακτηριστικών στο ΑΟΣ και στην ελεύθερη ατμόσφαιρα.



Σχήμα 3.6. *Χωρική και χρονική κλίμακα διαφόρων ατμοσφαιρικών φαινομένων σχετιζόμενων με το οριακό στρώμα καθενός (σκιασμένη επιφάνεια).*



Σχήμα 3.7. *Κατακόρυφη απεικόνιση ατμόσφαιρας και ΑΟΣ.*

3.4 Βασική δομή και χαρακτηριστικά του ΑΟΣ

Στο Σχήμα 3.8 απεικονίζεται η δομή του ΑΟΣ. Διακρίνονται κυρίως δύο στρώματα, το εξωτερικό ή **στρώμα Ekman** και το εσωτερικό ή **στρώμα επιφάνειας**, ενώ υπάρχει και ένα πολύ ρηχό υπόστρωμα, μέσα στο οποίο εντοπίζεται η άμεση επίδραση του εδάφους. Το βάθος του εξωτερικού στρώματος είναι περίπου μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερο του εσωτερικού, η δε εξάρτηση της ροής από τη φύση του εδάφους είναι μικρή, ενώ η επίδραση της δύναμης Coriolis είναι σημαντική. Οι ταχύτητες του ανέμου μέσα στο εξωτερικό στρώμα είναι υπογεωστροφικές. Το κυριότερο χαρακτηριστικό του ΑΟΣ είναι ότι σε αυτό κυριαρχούν τυρβώδεις στρόβιλοι, που είναι υπεύθυνοι για την κατακόρυφη μεταφορά θερμότητας, ορμής, υδρατμών και ρύπων. Αυτό όμως δεν συμβαίνει πάντα στο πολύ ρηχό στρώμα αέρα, που βρίσκεται ανάμεσα και ακριβώς υπεράνω των στοιχείων τραχύτητας. Επάνω από λείες επιφάνειες, το στρώμα αυτό λέγεται ιξώδες υπόστρωμα (interfacial sublayer). Μέσα στο στρώμα αυτό, η μοριακή διάχυση είναι πολύ σημαντική και υπερισχύει της τυρβώδους. Αντίθετα, σε τραχείς επιφάνειες, το στρώμα αυτό ονομάζεται **υπόστρωμα τραχύτητας** και η τυρβώδης μεταφορά υπερισχύει της αντίστοιχης μοριακής.

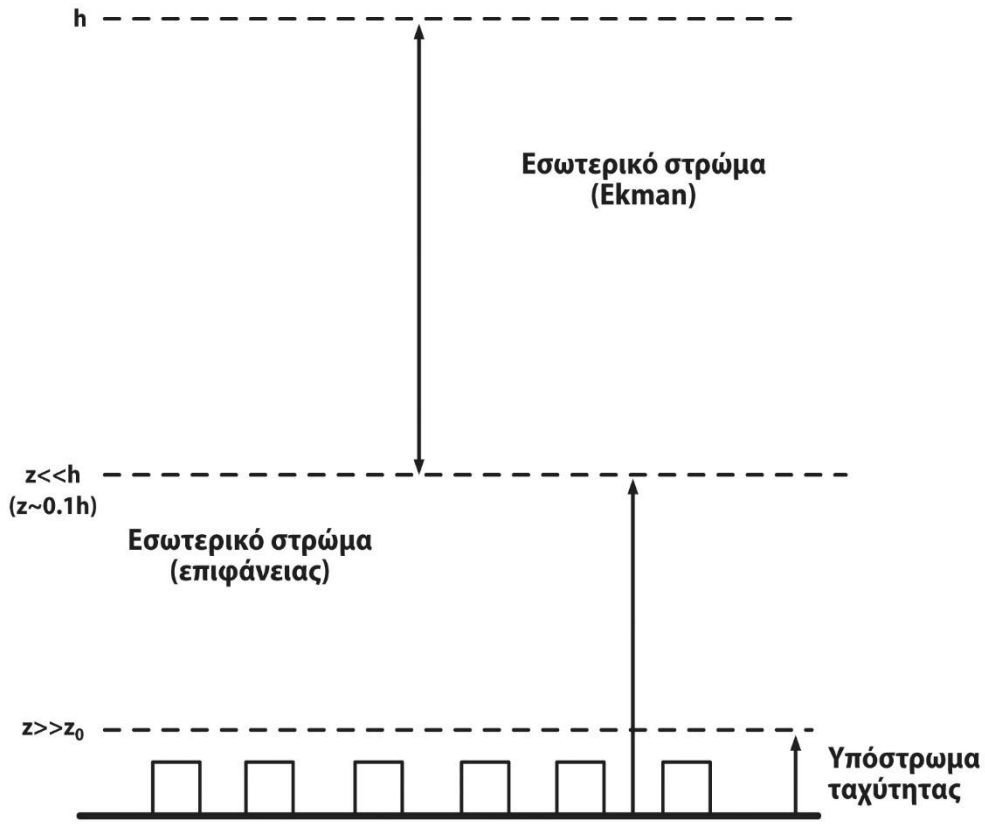
Ιδιότητα	ΑΟΣ	Ελεύθερη ατμόσφαιρα
Τύρβη	Σχεδόν συνεχώς τυρβώδης σε όλο το βάθος.	Ασταθής μεταφοράς σύννεφα και σποραδικές CAT σε λεπτές στρώσεις μεγάλης οριζόντιας έκτασης.
Τριβή	Ισχυρή αντίσταση έναντι της επιφάνειας της Γης. Ισχυρή διάχυση της ενέργειας.	Μικρά ιξώδη διαλύματα.
Διασπορά	Ταχεία κατακόρυφη και οριζόντια τυρβώδης ανάμειξη.	Μικρή μοριακή διάχυση. Συχνά ταχεία οριζόντια μεταφορά, με μέτριους ανέμους.
Άνεμοι	Σχεδόν λογαριθμικό προφίλ ταχύτητας ανέμου κοντά στο επιφανειακό στρώμα. Υπογεωστροφική ροή.	Άνεμοι σχεδόν γεωστροφικοί.
Κατακόρυφη μεταφορά	Κυριαρχούν οι στροβιλισμοί.	Μέτριοι άνεμοι και πυκνά σύννεφα.
Πάχος	Κυμαίνεται από 100 m έως 3 km στο χρόνο και στο χώρο. Ημερήσιες χερσαίες ταλαντώσεις.	Λιγότερο σημαντικό, 8-18 km. Αργές χρονικές μεταβολές.

Πίνακας 3.2. *Σύγκριση χαρακτηριστικών ΑΟΣ και ελεύθερης ατμόσφαιρας.*

3.4.1. Ημερήσιος κύκλος της δομής του ΑΟΣ

Ο ημερήσιος κύκλος θέρμανσης και ψύξης της επιφάνειας της Γης επηρεάζει έντονα τη δομή του ΑΟΣ. Αυτό συμβαίνει ιδιαίτερα πάνω από την ξηρά, που, σε αντίθεση με τους ωκεανούς, παρουσιάζει μεγάλη ημερήσια διακύμανση στη θερμοκρασία επιφάνειας. Η εξέλιξη του ΑΟΣ σε αίθριες συνθήκες για μέσα γεωγραφικά πλάτη παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.9. Όπως ήδη επισημάνθηκε, στη διάρκεια της νύχτας το οριακό στρώμα είναι ευσταθές, εξαιτίας της ψύξης του εδάφους, που οφείλεται στην εκπομπή υπέρυθρης ακτινοβολίας. Το ύψος του ευσταθούς οριακού στρώματος είναι συνήθως 100-500 m. Η αποικοδόμηση της νυχτερινής αναστροφής λόγω θέρμανσης του εδάφους ξεκινά τυπικά περίπου μία ώρα μετά την ανατολή, η δε διαδικασία αυτή αναφέρεται πολλές φορές και με τον όρο «κάψιμο της αναστροφής». Τότε ξεκινά η ανοικοδόμηση ενός ασταθούς οριακού στρώματος, που στην αρχή είναι πολύ ρηχό. Η ανάπτυξη του ασταθούς οριακού στρώματος γίνεται στην αρχή με σχετικά αργό ρυθμό και στη συνέχεια, όταν η διάβρωση της νυχτερινής αναστροφής ολοκληρωθεί, με πολύ γοργούς ρυθμούς. Το ασταθές οριακό στρώμα φθάνει τυπικά το μέγιστο ύψος του, 1-2 km, τις μεσημεριανές ώρες. Λίγο πριν από τη δύση του Ήλιου, η ηλιακή ακτινοβολία δεν επαρκεί, για να διατηρήσει την ανοδική ροή θερμότητας, που αποτελεί τη σημαντικότερη πηγή ενέργειας του ασταθούς οριακού στρώματος. Μέσα περίπου σε μία ώρα, το ΑΟΣ καταρρέει και οι τυρβώδεις κινήσεις, που προέρχονται πλέον από τη διάτμηση του ανέμου, περιορίζονται μέσα σε ένα ρηχό στρώμα. Με την πάροδο του χρόνου, οικοδομείται το νυχτερινό ευσταθές οριακό στρώμα και εμφανίζεται ένα στρώμα με ευσταθή στρωμάτωση, όπου συχνά υπάρχει αναστροφή θερμοκρασίας. Αυτό ονομάζεται στρώμα **εισροής**, γιατί εδώ γίνεται η εισροή αέρα από την ελεύθερη ατμόσφαιρα. Στη διάρκεια της νύχτας, η συνεχής ψύξη του εδάφους, που εκπέμπει υπέρυθρη ακτινοβολία, οδηγεί στο σχηματισμό ενός ευσταθούς οριακού στρώματος (stable boundary layer), που εμφανίζεται στη βιβλιογραφία και με το όνομα **νυχτερινό** οριακό στρώμα. Στη διάρκεια ανέφελων νυχτών, αναπτύσσεται συνήθως αναστροφή εδάφους, δηλαδή επικρατεί ακραία ευστάθεια. Μετά το σχηματισμό του νυχτερινού

οριακού στρώματος, το υπερκείμενο στρώμα αέρα αποκόπτεται από το έδαφος, με αποτέλεσμα να μην επηρεάζεται άμεσα από τις συνθήκες που επικρατούν εκεί, δηλαδή την ψύξη στη διάρκεια της νύχτας, λόγω ακτινοβολίας. Κατά συνέπεια, το στρώμα αυτό διατηρεί καταρχάς τις ιδιότητες που είχε στη διάρκεια της ημέρας, δηλαδή ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας. Το στρώμα αυτό εμφανίζεται στη βιβλιογραφία με το όνομα **αποκομμένο** στρώμα.



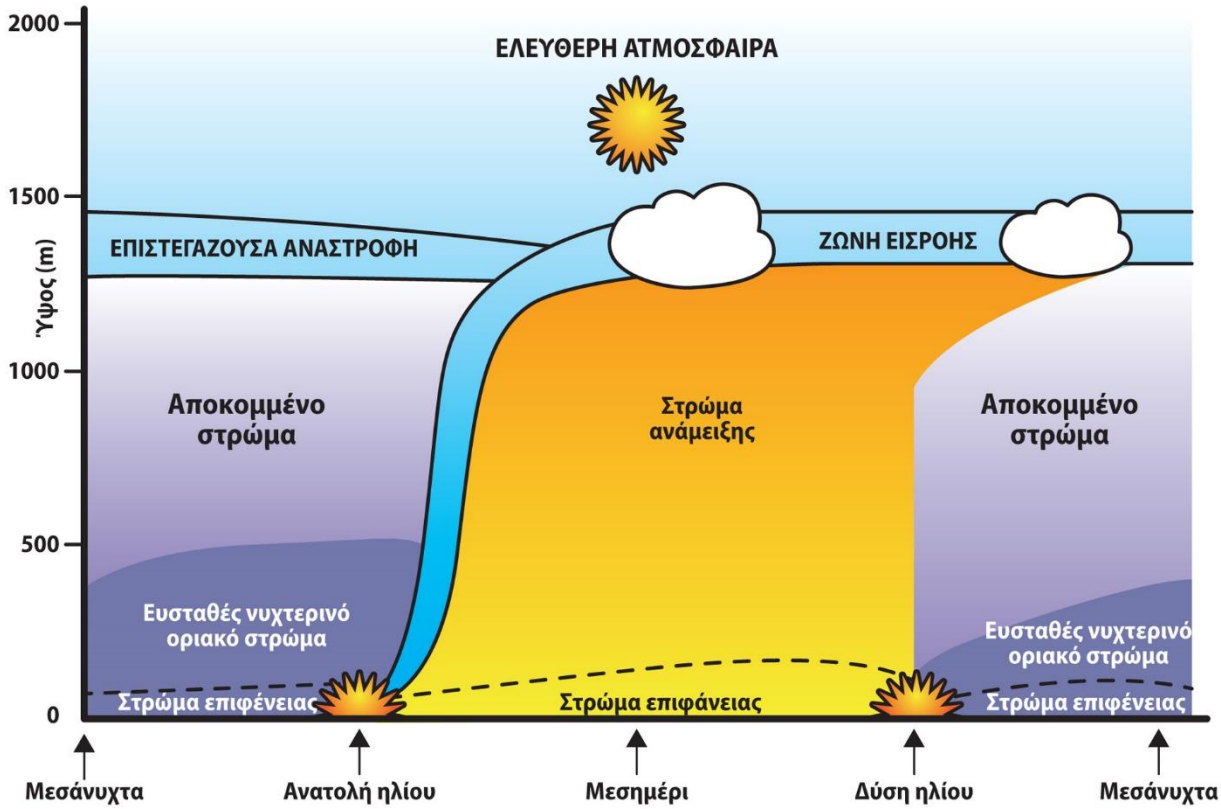
Σχήμα 3.8 *Σχηματική εικόνα της δομής του ΑΟΣ πάνω από τραχείς επιφάνειες. Με h συμβολίζεται το ύψος του οριακού στρώματος, με z το ύψος πάνω από την επιφάνεια και με z0 το μήκος της τραχύτητας.*

Κατά τον ημερήσιο κύκλο, τα στρώματα της δομής του ΑΟΣ παρουσιάζουν τα χαρακτηριστικά που απεικονίζονται στο Σχήμα 3.9. Το στρώμα **επιφάνειας** καταλαμβάνει περίπου το χαμηλότερο 10% του οριακού στρώματος, τυπικά μερικές δεκάδες μέτρα. Βρίσκεται υπό την άμεση επίδραση της επιφάνειας της Γης και οι κατακόρυφες βαθμίδες του ανέμου, της θερμοκρασίας και της υγρασίας είναι μεγάλες. Η ροή μέσα σε αυτό εξαρτάται κυρίως από τα χαρακτηριστικά της υποκείμενης επιφάνειας και ο άνεμος παρουσιάζει αμελητέα περιστροφή με το ύψος, δηλαδή η διεύθυνσή του είναι σχεδόν σταθερή. Οι ταχύτητες του ανέμου είναι υπογεωστροφικές. Σε συνθήκες ουδέτερης στρωμάτωσης, ο άνεμος μεταβάλλεται λογαριθμικά με το ύψος. Το στρώμα **ανάμειξης** καταλαμβάνει περίπου το 75% του ασταθούς οριακού στρώματος. Στο στρώμα αυτό κυριαρχούν οι μεγάλοι τυρβώδεις στρόβιλοι, τα θερμικά. Λόγω της μεγάλης έντασης των τυρβωδών στροβίλων, η ανάδευση του στρώματος είναι πολύ ισχυρή, με αποτέλεσμα να εμφανίζεται μια περίπου ομοιόμορφη κατανομή της δυναμικής θερμοκρασίας, του ανέμου, της υγρασίας, αλλά και των ρύπων.

3.4.2. Το ύψος του ΑΟΣ

Το ύψος του ΑΟΣ, δηλαδή το βάθος επίδρασης της επιφάνειας, μεταβάλλεται ευρέως από μερικές δεκάδες μέτρα μέχρι μερικά χιλιόμετρα και εξαρτάται από το ρυθμό θέρμανσης ή ψύξης της επιφάνειας, την ενίσχυση της ταχύτητας και της έντασης των ανέμων, τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας, τη μεγάλης κλίμακας κατακόρυφη κίνηση, την οριζόντια μεταφορά θερμότητας και υγρασίας, καθώς και άλλους παράγοντες. Το ύψος του οριακού στρώματος, h, είναι σημαντική παράμετρος, η οποία επιδρά ουσιαστικά στη δομή του. Κατά συνέπεια, σε πολλές εφαρμογές, η γνώση του ύψους του ΑΟΣ συνεισφέρει σημαντικά στην

κατανόηση των σχετικών διεργασιών και φαινομένων. Για παράδειγμα , η κατακόρυφη διάχυση των ρύπων περιορίζεται μέσα στο ΑΟΣ και η γνώση του h είναι καθοριστικής σημασίας σε μελέτες για την ατμοσφαιρική ρύπανση, όπου οι υψηλότερες τιμές συγκεντρώσεων των πρωτογενών ρύπων εμφανίζονται τις πρωινές ώρες, όταν το ΑΟΣ είναι χαμηλό, ενώ οι μικρότερες νωρίς το απόγευμα, όταν το h παίρνει τη μέγιστη τιμή του. Με βάση τον ορισμό, το ύψος του ΑΟΣ, h, συμπίπτει με το πάχος του τυρβώδους στρώματος, που συνορεύει με το έδαφος. Πάνω από τους ωκεανούς, το ύψος του ΑΟΣ παρουσιάζει μικρές μεταβολές στο χώρο και το χρόνο. Η πολύ αργή μεταβολή της θερμοκρασίας της επιφανείας του νερού έχει αποτέλεσμα αντίστοιχες αργές μεταβολές στη δομή του ΑΟΣ. Παράλληλα, όταν δεν υπάρχουν σημαντικές συνοπτικές αλλαγές, το ύψος του ΑΟΣ μπορεί να μεταβάλλεται μόλις 10% σε αποστάσεις 1.000 km.



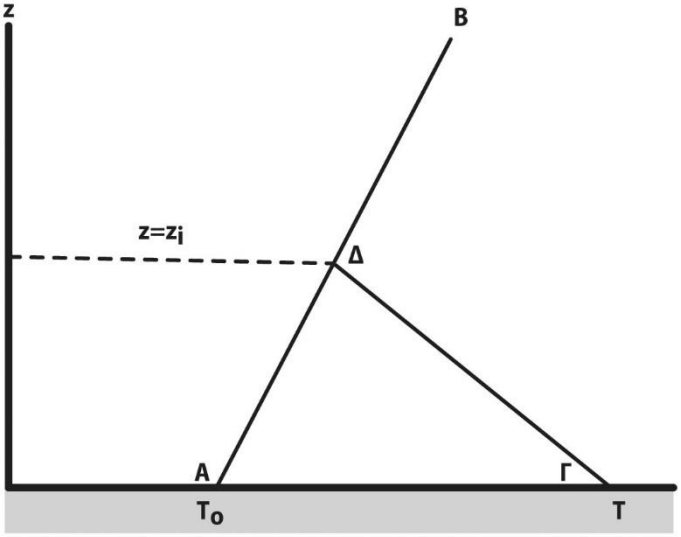
Σχήμα 3.9 *Η ημερήσια πορεία της δομής του ΑΟΣ πάνω από την ξηρά σε αίθριες συνθήκες.*

Η οροφή του ΑΟΣ μπορεί εύκολα να υπολογισθεί με συσκευές τηλεπισκόπησης από το έδαφος, όπως ο ακουστικός ηχολήπτης (LIDAR: Light Detection And Ranging), καθώς επίσης και έμμεσα από ραδιοβολίσεις θερμοκρασίας, υγρασίας και ανέμου. Η πιο συνηθισμένη μέθοδος προσδιορισμού του ύψους του ΑΟΣ στη διάρκεια της ημέρας βασίζεται στην κατακόρυφη κατανομή της δυναμικής θερμοκρασίας. Η δυναμική θερμοκρασία μειώνεται σημαντικά με το ύψος μέσα στο στρώμα επιφανείας, ενώ παραμένει περίπου σταθερή στο ανώτερο τμήμα του ΑΟΣ. Αντίθετα, το στρώμα αέρα που βρίσκεται επάνω από το ΑΟΣ χαρακτηρίζεται από ευστάθεια και η δυναμική θερμοκρασία αυξάνεται σημαντικά με το ύψος. Συχνά, ακόμα και η απόλυτη θερμοκρασία αυξάνεται με το ύψος, οπότε το στρώμα αυτό μπορεί να ταξινομηθεί ως στρώμα αναστροφής. Στη βιβλιογραφία, μάλιστα, χρησιμοποιείται για το στρώμα αυτό ο όρος «επιστεγάζουσα ή επικαλύπτουσα αναστροφή». Σε αυτές τις περιπτώσεις, το ύψος του ΑΟΣ, h, θεωρείται ότι συμπίπτει με το ύψος της βάσης της αναστροφής, zi (Σχήμα 3.10). Για τον πρακτικό προσδιορισμό ή την εκτίμηση του ύψους του ΑΟΣ, χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές μια μέθοδος που βασίζεται στο Σχήμα 3.10. Σύμφωνα με αυτήν τη μέθοδο, τις πρώτες πρωινές ώρες επικρατεί στην ατμόσφαιρα αναστροφή, που περιγράφεται από την καμπύλη ΑΒ. Μερικές ώρες αργότερα, η θέρμανση του εδάφους από την ηλιακή ακτινοβολία δημιουργεί ένα αδιαβατικό (ισεντροπικό) στρώμα ΓΔ, από το έδαφος μέχρι το ύψος z_i. Αν λοιπόν είναι γνωστές η καμπύλη ΑΒ (π.χ. από

μια πρωινή ραδιοβόλιση του ΑΟΣ για τη συγκεκριμένη ώρα) και η θερμοκρασία επιφανείας, Τ, σε κάποια ώρα της ημέρας, τότε το ύψος προκύπτει ως το σημείο στο οποίο η αδιαβατική καμπύλη (με κλίση ~ –10-2 K/m), που ξεκινά από τη συγκεκριμένη θερμοκρασία της επιφάνειας, τέμνει την καμπύλη ΑΒ. Έτσι, για παράδειγμα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η προγνωστική μέγιστη θερμοκρασία της ημέρας και, με τη βοήθεια μιας πρωινής ραδιοβόλισης, να προσδιορισθεί το μέγιστο ύψος του ΑΟΣ για τη συγκεκριμένη μέρα. Αντίστοιχα, η πιο διαδεδομένη μέθοδος σε συνθήκες ευστάθειας βασίζεται στο γεγονός ότι τη νύχτα το έδαφος ψύχεται συνήθως πολύ γρήγορα, με αποτέλεσμα το σχηματισμό αναστροφής εδάφους. Οι τυρβώδεις στρόβιλοι μεταφέρουν θερμότητα από όλο το ΑΟΣ στο έδαφος. Κατά συνέπεια, το h συμπίπτει περίπου με το βάθος του στρώματος της αναστροφής.

3.5. Αναταράξεις (τύρβη) στο ΑΟΣ

Στρωτή ροή ονομάζεται η ροή στην οποία όλα τα στοιχεία του ρευστού κινούνται προς την ίδια διεύθυνση (Σχήμα 3.11). Αντίστοιχα, ατμοσφαιρικές αναταράξεις (τύρβη) αφορά την κίνηση της ατμόσφαιρας, όταν, ειδικότερα, όγκος αέρα με τυρβώδη στοιχεία



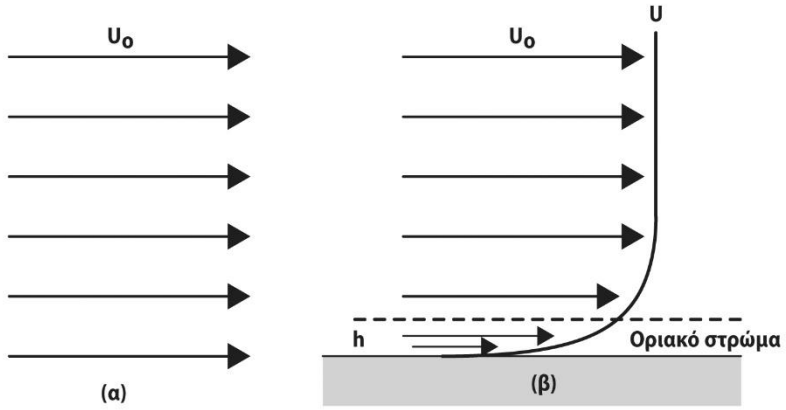
Σχήμα 3.10. *Αντικατάσταση νυχτερινής αναστροφής (καμπύλη ΑΒ) από τη θερμοκρασιακή κατανομή της ημέρας (καμπύλη ΓΔ).*

και στροβίλους φτάνει σε ακανόνιστες και στοχαστικές (χαοτικές) κινήσεις γύρω από μια μέση κατάσταση. Οι αναταράξεις (τύρβη) αποτελούν διαφορετική τάξη μεγέθους, με χαρακτηριστικές προεκτάσεις και κύκλους ζωής από εκατοστά και δευτερόλεπτα σε χιλιάδες χιλιόμετρα και μέρες. Η τύρβη είναι στην ουσία η τυχαία κίνηση των στοιχείων ενός ρευστού με στροβίλους (δίνες) μικρής κλίμακας (Σχήμα 3.12). Η μετάβαση από τη στρωτή στην τυρβώδη ροή γίνεται πάνω από μια συγκεκριμένη τιμή κατωφλίου του αριθμού Reynolds, Re, που ορίζεται από τη σχέση:

$$R_e = \frac{U \cdot d}{v} \quad (3.16)$$

όπου U είναι η ταχύτητα ροής, d η διάμετρος του σωλήνα και ν το κινηματικό ιξώδες του ρευστού σε $m^2\ s^{-1}$.
Ο αριθμός Reynolds είναι αδιάστατος και εκφράζει το λόγο των δυνάμεων αδρανείας διά της δύναμης ιξώδους. Με την αύξηση της τιμής του αριθμού Reynolds, η στρωτή ροή γίνεται ασταθής, με συνέπεια τη μερική διάσπασή της σε ακανόνιστες διακυμάνσεις. Η ακριβής διεργασία μετάβασης σε τυρβώδη ροή δεν είναι ακριβώς γνωστή, ωστόσο οι κινήσεις στο ΑΟΣ είναι σχεδόν πάντοτε τυρβώδεις.
Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της τύρβης συνοψίζονται ως εξής: Η ροή περιλαμβάνει στροβίλους/δίνες (eddies). Οι στρόβιλοι είναι ακανόνιστοι στροβιλισμοί της κίνησης. Το ΑΟΣ περιλαμβάνει στροβίλους διαφόρων

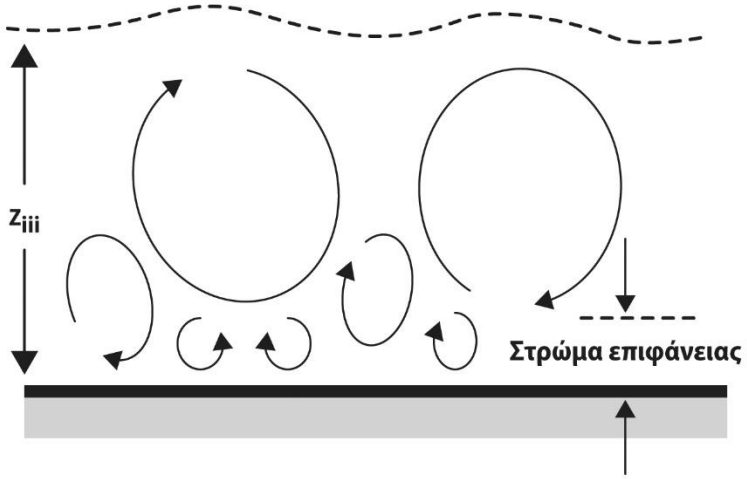
διαστάσεων, που αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους. Το μέγεθος των μικρότερων στροβίλων είναι μόλις λίγα χιλιοστά, ενώ των μεγαλύτερων είναι συγκρίσιμο με το ύψος του ΑΟΣ (Σχήμα 3.12). Οι μεγαλύτεροι στρόβιλοι γίνονται ορατοί (π.χ. μέσω των βρόχων, που σχηματίζει ο καπνός από καμινάδες στη διάρκεια ημερών με αίθριο καιρό), ενώ οι μικροί στρόβιλοι κάνουν, μεταξύ άλλων αισθητή, την παρουσία με τους στροβιλισμούς των φύλλων. Επιπλέον, η ροή είναι τρισδιάστατη, δηλαδή στην τυρβώδη ροή του αέρα μέσα στο ΑΟΣ και οι τρεις συνιστώσες του ανέμου είναι της ίδιας τάξης μεγέθους. Επίσης, είναι μη γραμμική, δηλαδή σε τυρβώδη ροή υπάρχει ισχυρή αλληλεπίδραση ανάμεσα σε στροβίλους διαφορετικών διαστάσεων, με αποτέλεσμα την εξομάλυνση των διαφορών στη ροή.
Οι παραπάνω ιδιότητες είναι υπεύθυνες για τη λεγόμενη διεργασία καταρράκτη (cascade process). Ειδικότερα, οι μεγαλύτεροι στρόβιλοι διασπώνται συνεχώς σε μικρότερους, μέχρι να καταλήξουν σε άτακτες θερμικές κινήσεις. Αυτό οφείλεται στο μοριακό ιξώδες του αέρα, που προκαλεί τριβή μεταξύ των στροβίλων, τείνοντας να μειώσει την ένταση της τύρβης. Επίσης, η ροή είναι στοχαστική (τυχαία), δηλαδή, παρ' όλο που οι κλασικοί νόμοι της κίνησης ισχύουν, η προσδιοριστική περιγραφή των τυρβωδών κινήσεων είναι πολύ δύσκολη. Ειδικότερα, οι αναταράξεις (ή τύρβη) αναφέρονται στην προφανώς χαοτική φύση πολλών ροών, όπου επικρατεί η μορφή των ακανόνιστων, σχεδόν τυχαίων, διακυμάνσεων της ταχύτητας, της θερμοκρασίας και των βαθμωτών συγκεντρώσεων γύρω από τις μέσες τιμές στο χώρο και το χρόνο. Έτσι, η μελέτη τους γίνεται κυρίως με τρόπο στατιστικό. Ακόμα, η τυρβώδης ροή διαχέεται, δηλαδή η κατακόρυφη μεταφορά της ορμής, της θερμότητας και των υδρατμών στο ΑΟΣ γίνεται με πολύ αποτελεσματικό τρόπο από τις τυρβώδεις κινήσεις. Επίσης, η χρονική και η χωρική κλίμακα είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με τις αντίστοιχες των μεταφερόμενων ποσοτήτων, δηλαδή υπάρχουν στρόβιλοι των οποίων οι διαστάσεις είναι συγκρίσιμες με την απόσταση όπου μετριέται η βαθμίδα της μεταφερόμενης ποσότητας. Βέβαια, δεν ισχύει το ίδιο για τη μοριακή μεταφορά. Τέλος, η τύρβη είναι ένα συνεχές φαινόμενο, σε αντίθεση με τη μοριακή μεταφορά, που δεν είναι συνεχές φαινόμενο.



Σχήμα 3.11. *Στρωτή ροή (α) χωρίς οριακή επιφάνεια και (β) πάνω από οριακή επιφάνεια. Uo είναι η ταχύτητα ελεύθερης ροής, h είναι το ύψος του ΑΟΣ.*

3.5.1. Διαδικασίες μεταφοράς αναταράξεων (τύρβης)

Αν και το ΑΟΣ αποτελεί μόνο ένα μικρό κλάσμα της ατμόσφαιρας, οι μικρής κλίμακας διαδικασίες που εμφανίζονται στο ΑΟΣ είναι χρήσιμες σε διάφορες ανθρώπινες δραστηριότητες και σημαντικές για την αειφορία, αλλά και τη διατήρηση της ζωής στον πλανήτη. Αυτό δεν συμβαίνει μόνο διότι ο αέρας κοντά στο έδαφος παρέχει το αναγκαίο οξυγόνο για τον άνθρωπο και γενικά τους ζώντες οργανισμούς, αλλά επίσης διότι ο αέρας αυτός βρίσκεται πάντα σε τυρβώδη κίνηση, που προκαλεί αποτελεσματική ανάμειξη ρυπαντών και ανταλλαγές θερμότητας, ορμής και υδρατμών με την επιφάνεια. Ειδικότερα, οι αναταράξεις (τύρβη) στο επιφανειακό στρώμα ευθύνονται για τις ανταλλαγές αυτών των ιδιοτήτων μεταξύ ατμόσφαιρας και επιφάνειας της Γης. Χωρίς αναταράξεις τέτοιες ανταλλαγές εμφανίζονται στη μοριακή κλίμακα (10^{-3} – 10^{-6} φορές οι μεταφορές αναταράξεων που τώρα εμφανίζονται). Σχεδόν όλη η ενέργεια που «πηδαλιουχεί» τα μεγάλης κλίμακας καιρικά συστήματα και τη γενική κυκλοφορία της ατμόσφαιρας προέρχεται από το ΑΟΣ.



Σχήμα 3.12. *Το ΑΟΣ περιλαμβάνει στροβίλους διαφόρων διαστάσεων, που αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους. Το μέγεθος των μικρότερων στροβίλων είναι μόλις λίγα χιλιοστά, ενώ των μεγαλύτερων είναι συγκρίσιμο με το ύψος του ΑΟΣ.*

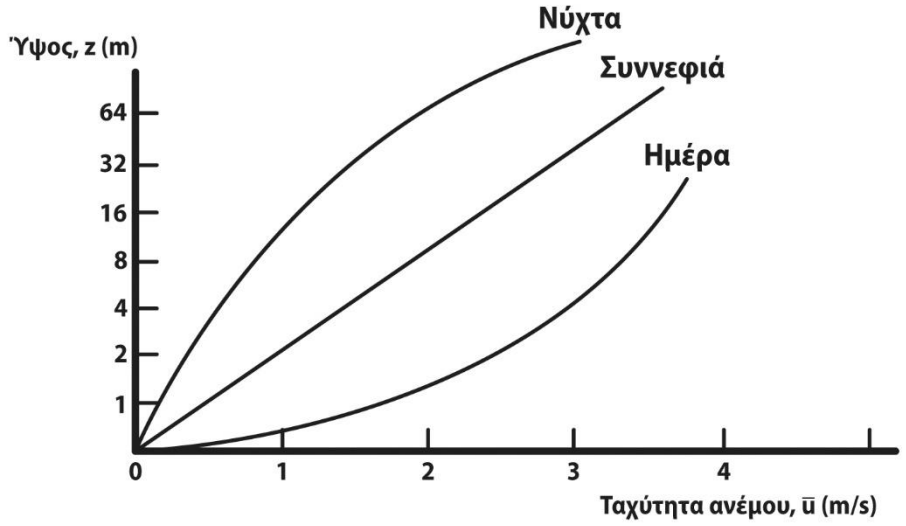
Μέσω της αποτελεσματικής μεταφοράς θερμότητας και υγρασίας, οι αναταράξεις του ΑΟΣ συντελούν στη διαμόρφωση του μικροκλίματος κοντά στο έδαφος, με αποτέλεσμα αυτό να καθίσταται κατοικήσιμο για ζώα, οργανισμούς και φυτά. Η ατμόσφαιρα λαμβάνει τελικά όλους τους **υδρατμούς** μέσω των ανταλλαγών αναταράξεων κοντά στην επιφάνεια. Η εξάτμιση από γήινες και υδάτινες επιφάνειες δεν είναι μόνο σημαντική στο επιφανειακό υδατικό ισοζύγιο και τον υδρολογικό κύκλο, αλλά η λανθάνουσα θερμότητα της εξάτμισης αποτελεί σημαντική συνιστώσα του επιφανειακού ισοζυγίου ενέργειας. Οι υδρατμοί αυτοί, όταν συμπυκνώνονται σε μικροσκοπικά σωματίδια σκόνης και άλλα αιωρούμενα σωματίδια ή πυρήνες συμπύκνωσης νεφών, οδηγούν στο σχηματισμό ομίχλης, αχλύος και νεφών στην ατμόσφαιρα.
Παράλληλα με τους υδρατμούς, υπάρχουν και άλλες σημαντικές ανταλλαγές **μάζας** εντός του ΑΟΣ, που περιλαμβάνουν διάφορα αέρια και ουσίες. Οι αναταράξεις είναι σημαντικές στην ανταλλαγή **διοξειδίου του άνθρακα** (CO_2) μεταξύ φυτών και ζώων. Μέσω της αποτελεσματικής διάχυσης των διαφόρων ρυπαντών που απελευθερώνονται κοντά στο έδαφος και αναμειγνύονται εντός του ΑΟΣ και τμημάτων της κατώτερης τροπόσφαιρας, οι ατμοσφαιρικές αναταράξεις προφυλάσσουν τη μόλυνση της ζωής στη Γη. Η ποιότητα του εισπνεόμενου αέρα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ικανότητα ανάμειξης των αναταράξεων στο ΑΟΣ. Οι αναταράξεις του ΑΟΣ συλλέγουν ακόμα σπόρους και γύρη ζωής, τα διασπείρουν και τα εναποθέτουν σε ανοιχτές περιοχές μακριά από την προέλευσή τους. Ακόμα, οι αναταράξεις ανασηκώνουν σκόνη, υφάλμυρα σωματίδια από την επιφάνεια και τα διασπείρουν στην κατώτερη τροπόσφαιρα. Μεταξύ αυτών, οι αποκαλούμενοι πυρήνες συμπύκνωσης νεφών αποτελούν βασικό συστατικό στις διαδικασίες συμπύκνωσης και υετού στην ατμόσφαιρα.
Μέσω των παραπάνω διαδικασιών ανταλλαγής **μάζας** μεταξύ της επιφάνειας της Γης και της ατμόσφαιρας, επηρεάζεται επίσης σημαντικά το **ισοζύγιο ακτινοβολίας** και το **ισοζύγιο θερμικής ενέργειας** πάνω ή κοντά στην επιφάνεια της Γης. Περισσότερο άμεσες επιπτώσεις από τη μεταφορά αναταράξεων στο επιφανειακό ισοζύγιο θερμικής ενέργειας παρατηρούνται μέσω των ανταλλαγών της αισθητής και της λανθάνουσας θερμότητας μεταξύ επιφάνειας και ατμόσφαιρας. Πάνω από το έδαφος, η ανταλλαγή αισθητής θερμότητας είναι συνήθως πιο σημαντική από τη λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης, αλλά το αντίθετο αληθεύει πάνω από μεγάλες λίμνες και ωκεανούς.
Η μεταφορά αναταράξεων **ορμής** μεταξύ Γης και ατμόσφαιρας είναι επίσης πολύ σημαντική. Αποτελεί βασικά μια μονοδιάστατη διαδικασία, στην οποία η Γη ενεργεί ως δέκτης της ατμοσφαιρικής ορμής, δηλαδή η επιφάνειά της εξασκεί αντίσταση τριβής σε ατμοσφαιρικές κινήσεις και τις επιβραδύνει στη διαδικασία. Αντίστοιχα, μπορεί να υποστηριχθεί ότι ο κινούμενος αέρας κοντά στην επιφάνεια εξασκεί μια ισοδύναμη δύναμη τριβής (υστέρηση) σε αυτήν. Όσο πιο τραχεία είναι η επιφάνεια, τόσο μεγαλύτερη είναι η δύναμη τριβής ανά μονάδα επιφάνειας. Μερικά παραδείγματα αποτελούν οι επισημασμένες καθυστερήσεις επιφανειακών ανέμων όταν κινούνται από μεγάλη λίμνη, κόλπο ή θάλασσα προς περιοχές της ενδοχώρας, καθώς και από αγροτικές προς αστικές περιοχές. Ίσως οι πιο εμφανείς περιπτώσεις της επίπτωσης της αυξημένης επιφανειακής τριβής είναι η απότομη εξασθένηση και η συνεπαγόμενη διάλυση των τυφώνων και άλλων τροπικών καταιγίδων καθώς κινούνται προς την ενδοχώρα. Άλλος παράγοντας που ευθύνεται για το

φαινόμενο αυτό είναι η σημειούμενη μείωση ή η διακοπή της διαθέσιμης λανθάνουσας επιφανειακής θερμικής ενέργειας σε εξέλιξη καταιγίδας.
Πάνω από μεγάλες λίμνες και ωκεανούς, η τριβή του ανέμου είναι υπεύθυνη για τη δημιουργία κυμάτων και ρευμάτων στο νερό, καθώς και για την κίνηση του πάγου στη θάλασσα. Στις παράκτιες περιοχές, η τριβή του ανέμου προκαλεί παλιρροϊκές θύελλες και διάβρωση της παραλίας. Πάνω από την ξηρά, η τριβή προκαλεί φορτία ανέμων σε οχήματα, κτίρια, πύργους, γέφυρες, καλωδιώσεις και άλλες κατασκευές. Καταπόνηση του ανέμου πάνω από αμμώδεις επιφάνειες διεγείρει σκόνη και δημιουργεί κυματισμούς και αμμοθίνες. Όταν συνοδεύονται από ισχυρούς ανέμους, οι αναταράξεις του επιφανειακού στρώματος μπορεί να προκαλούν δυσφορία και να είναι ακόμα και επιζήμιες σε ανθρώπους, ζώα και βλάστηση.
Τέλος, διαδικασίες ανταλλαγής αναταράξεων στο ΑΟΣ έχουν προφανείς επιπτώσεις στην εξέλιξη του τοπικού καιρού. Η τριβή στο ΑΟΣ ευθύνεται κυρίως για τη χαμηλής στάθμης σύγκλιση και απόκλιση ροής στις περιοχές πεδίων χαμηλών και υψηλών επιφανειακών πιέσεων, αντίστοιχα. Η σύγκλιση λόγω τριβής σ' ένα υγρό οριακό στρώμα ευθύνεται επίσης για τη χαμηλής στάθμης σύγκλιση των περιοχών χαμηλών πιέσεων. Η κινητική ενέργεια της ατμόσφαιρας συνεχώς διαλύεται από μικρής κλίμακας αναταράξεις στην ατμόσφαιρα. Σχεδόν η μισή αυτή απώλεια σε ετήσια βάση εμφανίζεται εντός του ΑΟΣ, αν και το ΑΟΣ αποτελεί μόλις ένα μικρό ποσοστό, λιγότερο από 2%, της ολικής κινητικής ενέργειας της ατμόσφαιρας.

3.6. Το στρώμα επιφάνειας

Το στρώμα επιφάνειας είναι το κατώτερο τμήμα του ΑΟΣ, που συνορεύει με την επιφάνεια της Γης και σε αυτό οι τυρβώδεις ροές θεωρούνται περίπου σταθερές, δηλαδή μεταβάλλονται με λιγότερο από 10%. Για το λόγο αυτό, συναντάται στη βιβλιογραφία και με το όνομα στρώμα σταθερών ροών. Γενικά, λόγω της σχετικής ευκολίας στην πραγματοποίηση μετρήσεων, στο στρώμα επιφάνειας έχει συσσωρευτεί σημαντικό πειραματικό υλικό, με αποτέλεσμα οι γνώσεις για τη δομή του να είναι σημαντικότερες από ό,τι οι αντίστοιχες για τα άλλα τμήματα του ΑΟΣ. Επιπλέον, είναι το στρώμα στο οποίο άνθρωποι, ζώα και βλάστηση ζουν και λαμβάνουν χώρα οι περισσότερες ανθρώπινες δραστηριότητες. Οι πιο σημαντικές ανταλλαγές ορμής, θερμότητας και μάζας εμφανίζονται στο στρώμα αυτό.
Συνήθως, οι τυρβώδεις ροές εμφανίζουν τις μέγιστες τιμές τους στο έδαφος και μειώνονται με το ύψος, μέχρι να μηδενιστούν στην κορυφή του ΑΟΣ. Το στρώμα επιφάνειας θεωρείται ότι καταλαμβάνει το χαμηλότερο 10% του ΑΟΣ. Αντίστοιχα, το ύψος του παρουσιάζει πολύ μεγάλες μεταβολές. Αν και είναι τυπικά μερικές δεκάδες μέτρα, η τιμή αυτή διαφοροποιείται σημαντικά ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν. Έτσι, στη διάρκεια μιας πολύ ψυχρής νύχτας, με άπνοια, το ύψος αυτό μπορεί να είναι μικρότερο από 10 m, ενώ σ' ένα θερμό καλοκαιρινό μεσημέρι, μπορεί να ξεπεράσει τα 100 m. Μέσα στο στρώμα επιφάνειας, οι μετεωρολογικές μεταβλητές παρουσιάζουν συνήθως έντονες κατακόρυφες βαθμίδες, με εξαίρεση τη διεύθυνση του ανέμου, που θεωρείται κατά προσέγγιση σταθερή με το ύψος. Στο Σχήμα 3.13 εμφανίζεται σχηματικά η μεταβολή του ανέμου με το ύψος για διαφορετικές συνθήκες ευστάθειας. Ειδικότερα, στη διάρκεια ημερών με συννεφιά, αλλά και στις μεταβατικές ώρες το πρωί και το απόγευμα, η ατμόσφαιρα χαρακτηρίζεται κατά προσέγγιση από ουδέτερη στρωμάτωση και η κατακόρυφη κατανομή του ανέμου είναι περίπου λογαριθμική. Αντίστοιχα, στη διάρκεια ζεστών, κυρίως, ημερών, κυριαρχούν στην ατμόσφαιρα συνθήκες αστάθειας και η κατακόρυφη κατανομή του ανέμου έχει σχήμα κοίλο. Αντίστροφα, η νύχτα χαρακτηρίζεται συνήθως από συνθήκες ευστάθειας και το σχήμα της κατακόρυφης κατανομής του ανέμου είναι κυρτό.
Οι περισσότερες φυσικές επιφάνειες δεν είναι αεροδυναμικά ομαλές. Τα χαρακτηριστικά που προσδιορίζουν τη φύση της επιφάνειας είναι δύο: το ύψος των στοιχείων τραχύτητας και η απόσταση μεταξύ τους. Το υπόστρωμα τραχύτητας ονομάζεται πολλές φορές και στρώμα φυλλώματος (canopy layer). Η ονομασία αυτή έχει χρησιμοποιηθεί αρχικά για να δηλώσει το στρώμα αυτό σε περιοχές με υψηλή βλάστηση, όπως σε ένα δάσος, αλλά σήμερα χρησιμοποιείται και σε άλλες περιπτώσεις, όπως σε πόλεις, στις οποίες το στρώμα φυλλώματος είναι τ στρώμα όπου βρίσκονται τα κτίρια. Στο στρώμα φυλλώματος, η ροή του αέρα επηρεάζεται άμεσα από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των στοιχείων τραχύτητας, όπως το ύψος, την πυκνότητα και τη δομή, είναι δε πολύ δύσκολο να βρεθεί μια γενική εξίσωση που να περιγράφει την κατακόρυφη κατανομή της ταχύτητας. Στο ανώτερο στρώμα όμως ισχύει η εξίσωση:

$$u = (u/k) \cdot \ln((z-d)/z_o) \quad (3.17)$$



Σχήμα 3.13. *Σχηματική διακύμανση της ημερήσιας μεταβολής της κατακόρυφης κατανομής της ταχύτητας του ανέμου.*

όπου u είναι η μέση ταχύτητα του ανέμου, u_* η ταχύτητα τριβής, k η σταθερά von Karman, z το ύψος πάνω από το έδαφος, d η μετατόπιση του μηδενός και z_0 το αεροδυναμικό μήκος τραχύτητας.
Η εξίσωση (3.17) λέγεται λογαριθμικός νόμος κατανομής (logarithmic profile law), του οποίου η ισχύς έχει αποδειχθεί πειραματικά σε ροές τόσο σε αεροσήραγγα όσο και στην ατμόσφαιρα. Η σταθερά von Karman θεωρείται παγκόσμια σταθερά, με τιμή $k \approx 0{,}40$. Όπως προαναφέρθηκε, η ισχύς του λογαριθμικού νόμου περιορίζεται στο στρώμα επιφάνειας σε συνθήκες ουδέτερης στρωμάτωσης. Τυπικά λοιπόν, ο λογαριθμικός νόμος ισχύει σε περιόδους (μέρες ή νύχτες) με πυκνή νέφωση ή/και ισχυρούς ανέμους, μέχρι ένα ύψος αρκετών δεκάδων μέτρων (~ 60 m). Σε κάποιες περιπτώσεις, η κατακόρυφη κατανομή του ανέμου ακολουθεί τον λογαριθμικό νόμο και σε μεγαλύτερα ύψη. Για ύψη z σημαντικά μεγαλύτερα από το ύψος φυλλώματος hc ($z > 10\ hc$), το d μπορεί να παραληφθεί από την εξίσωση (3.17). Έτσι, για παράδειγμα, σε μελέτες πάνω από το γρασίδι, το d μπορεί να παραληφθεί για το σύνολο των περιπτώσεων. Πάνω από άλλες επιφάνειες, που χαρακτηρίζονται από μεγάλη τραχύτητα, πρέπει στις περισσότερες περιπτώσεις να χρησιμοποιείται ο λογαριθμικός νόμος στην πλήρη μορφή του.
Στο επιφανειακό στρώμα, οι αναταράξεις είναι περίπου συνεχείς, ενώ μπορεί να είναι διακοπτόμενες στο ανώτερο τμήμα του ΑΟΣ και μερικές φορές να αναμειγνύονται με εσωτερικά κύματα βαρύτητας. Κοντά στην επιφάνεια, οι ατμοσφαιρικές αναταράξεις χαρακτηρίζονται από πτώσεις των φύλλων των δένδρων και ξυρίσματα του γρασιδιού, κυματισμούς κλαδιών, δένδρων και φυτών, μη κανονικές κινήσεις καπνού και σωματιδίων κονιορτού, κύματα στην επιφάνεια του νερού και διάφορα άλλα ορατά φαινόμενα.

3.7. Ισοζύγιο ενέργειας στην επιφάνεια της Γης

Η επιφάνεια της Γης είναι η κύρια περιοχή μεταφοράς ενέργειας για ατμοσφαιρικές διαδικασίες. Θερμαίνεται από την προσπίπτουσα από τον Ήλιο μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία και μόνο μέρος της ανακλάται πίσω. Επιπλέον, απορροφά μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία, λόγω της εκπομπής μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολίας από νέφη, σωματίδια και αέρια. Ωστόσο, μέρος μόνο της απορροφούμενης ενέργειας εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα, ως μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία. Στο ολικό ισοζύγιο, η επιφάνεια της Γης λαμβάνει περισσότερη ενέργεια ακτινοβολίας από όση χάνει. Το πλεόνασμα αυτό ενέργειας μεταφέρεται πίσω στην ατμόσφαιρα μέσω δύο αναταρακτικών ροών ενέργειας, της αισθητής ροής θερμότητας και της λανθάνουσας ροής θερμότητας (για εξάτμιση). Επίσης, ενέργεια μεταφέρεται στο έδαφος μέσω της ροής θερμότητας του εδάφους και αποθηκεύεται από τα φυτά, τα κτίρια και άλλα συναφή. Τέλος, η αισθητή ροή θερμότητας είναι υπεύθυνη για τη θέρμανση της ατμόσφαιρας από την επιφάνεια μέχρι περίπου τα 100 m στη διάρκεια της μέρας, εκτός από μέρες με ισχυρή μεταγωγή. Οι συνιστώσες του ισοζυγίου ενέργειας απεικονίζονται στο Σχήμα 3.14, για ανέφελη μέρα, χωρίς περιορισμό στην ακτινοβολία.

Ειδικότερα, σε μέσους πλανητικούς όρους, η επιφάνεια της Γης απορροφά περίπου 168 W m^{-2} ηλιακής ακτινοβολίας κάθε χρόνο και, αποτελεσματικά, ακτινοβολεί 66 Wm^{-2} μεγάλου μήκους κύματος ενέργεια στην ατμόσφαιρα. Η διαφορά, +102 Wm^{-2}, είναι το καθαρό όφελος ακτινοβολίας της επιφάνειας της Γης. Αντίστοιχα, το καθαρό ισοζύγιο ακτινοβολίας της ατμόσφαιρας είναι –102 Wm^{-2} κάθε χρόνο. Συνεπώς, η ατμόσφαιρα χάνει τόση ακτινοβολούμενη ενέργεια σε ένα χρόνο όση κερδίζει η επιφάνεια της Γης. Για τη διατήρηση του θερμικού ισοζυγίου σε ισορροπία, ενέργεια μεταφέρεται από την επιφάνεια της Γης στην ατμόσφαιρα. Η κατακόρυφη αυτή ανταλλαγή θερμότητας εμφανίζεται κυρίως είτε μέσω της εξάτμισης νερού από την επιφάνεια της Γης, δηλαδή ως απώλεια θερμότητας, είτε μέσω της συμπύκνωσης στην ατμόσφαιρα, δηλαδή ως όφελος θερμότητας, είτε μέσω της αγωγής αισθητής θερμότητας (sensible heat) από την επιφάνεια και της μεταφοράς στην ατμόσφαιρα μέσω μεταγωγής. Τέλος, επισημαίνεται ότι μια αύξηση 1^{o} K στην πλανητική μέση θερμοκρασία κατά τον περασμένο αιώνα, λόγω ανθρωπογενών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, αντιστοιχεί σε μια πρόσθετη ενέργεια ακτινοβολίας 2Wm^{-2} (Foken, 2008). Κατά συνέπεια, αλλαγές στην ακτινοβολία και στις ροές ενέργειας (π.χ. λόγω αλλαγών στις χρήσεις γης) μπορεί να επιφέρουν σημαντικές επιπτώσεις στο κλιματικό σύστημα.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται αρχικά η εισερχόμενη μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία και η εξερχόμενη μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται η καθαρή ακτινοβολία, η ροή θερμότητας στο έδαφος και οι τυρβώδεις ροές.

3.7.1. Εισερχόμενη μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία

Η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει σε σώματα στερεάς, υγρής ή αέριας μορφής καλείται προσπίπτουσα ακτινοβολία. Η διάδραση με σώματα μπορεί να αλλάξει τις ιδιότητες της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, όπως την ένταση, τη διεύθυνση, το μήκος κύματος, την πολικότητα και τη φάση. Ακτινοβολία που συγκρατείται από τη Γη απορροφάται τελικά και χρησιμοποιείται στις διαδικασίες ενέργειας ή επιστρέφει στο διάστημα, μέσω σκέδασης ή ανάκλασης (Σχήμα 3.15). Το ισοζύγιο ακτινοβολίας δίνεται από την εξίσωση:

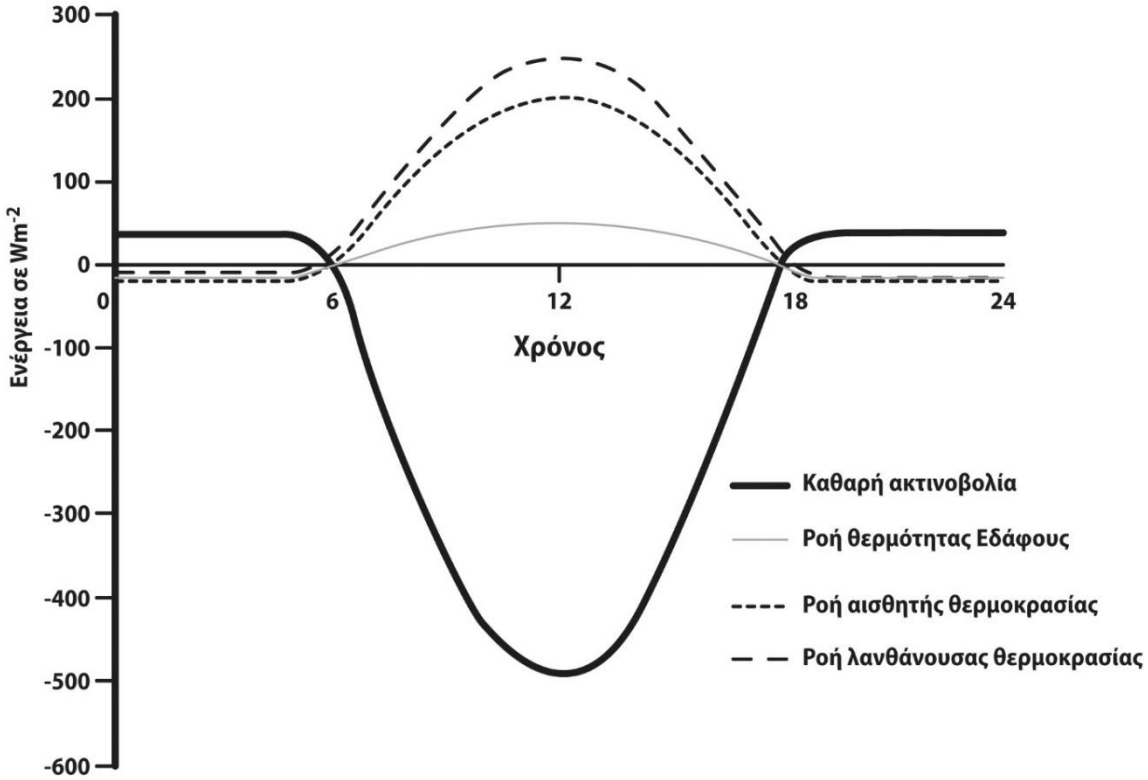
$$Q_s = C_r + A_r + C_\alpha + A_\alpha + (Q + q)(1 - \alpha) + (Q + q)\alpha \quad (3.18)$$

όπου Q_s είναι η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στην κορυφή της ατμόσφαιρας, C_r η ανάκλαση και σκέδαση από τα νέφη πίσω στο διάστημα, A_r η ανάκλαση και σκέδαση πίσω από αέρα, σκόνη και υδρατμούς, A_α η απορρόφηση από αέρα, σκόνη και υδρατμούς, $(Q + q)\alpha$ η ανάκλαση από τη Γη, $(Q + q)(1 - \alpha)$ η απορρόφηση από την επιφάνεια της Γης (όπου Q και q είναι η άμεση δέσμη και η διαχεόμενη ηλιακή ακτινοβολία από την προσπίπτουσα στη Γη, αντίστοιχα) και α η λευκαύγεια (albedo). Στον Πίνακα 3.4 παρουσιάζεται η κατανομή της μικρού μήκους κύματος ακτινοβολίας.

Ηλιακή ενέργεια	**Wm^{-2}**	**Ολική ανακλώμενη/ απορροφούμενη**
Προσπίπτουσα στην κορυφή της ατμόσφαιρας	342	
Ανακλώμενη από τα σύννεφα, τα αερολύματα και την ατμόσφαιρα	77	107
Ανακλώμενη από τη Γη	30	
Απορροφούμενη από την ατμόσφαιρα	67	235
Απορροφούμενη από τη Γη	168	

.

Πίνακας 3.3. *Κατανομή μικρού μήκους κύματος ηλιακής ακτινοβολίας.*

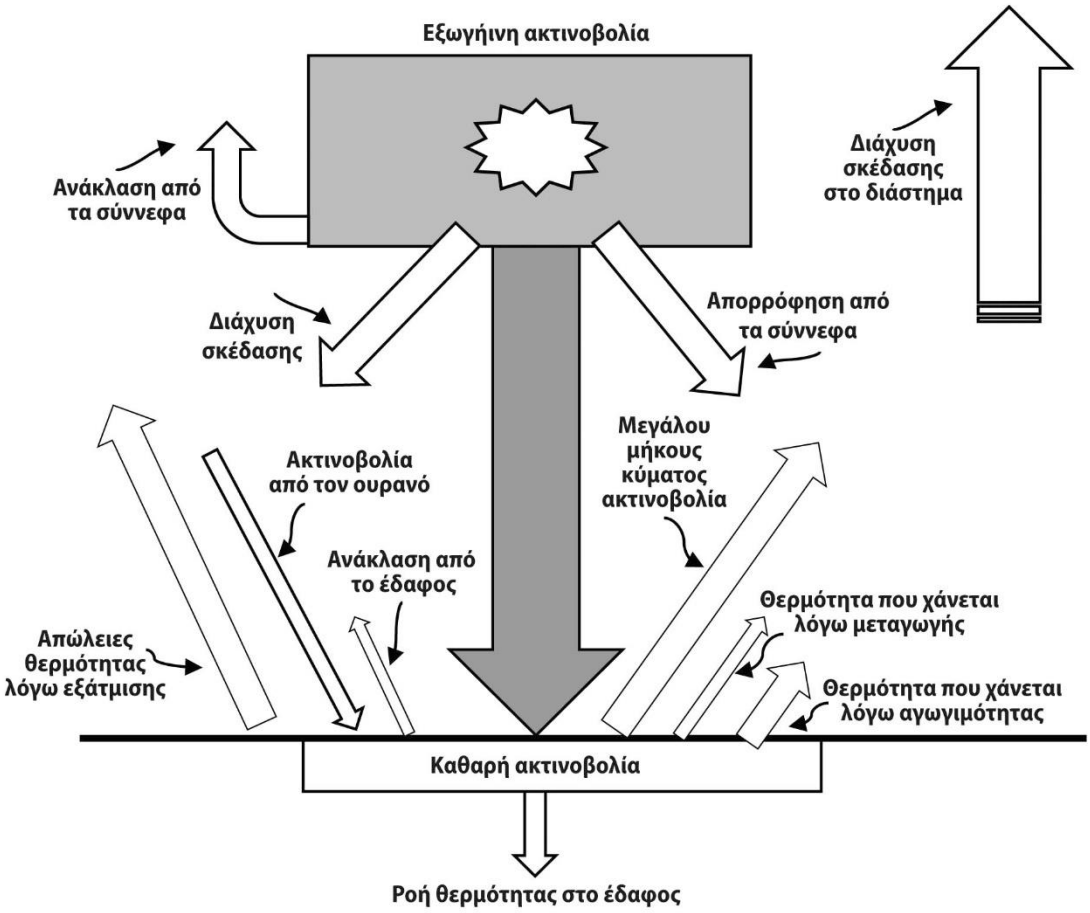


Σχήμα 3.14. *Σχηματική απεικόνιση ημερήσιου κύκλου ισοζυγίου ενέργειας.*

Η ηλιακή ακτινοβολία εξασθενεί στην ατμόσφαιρα, μέσω των μηχανισμών της απορρόφησης, της σκέδασης και της ανάκλασης. **Σκέδαση-διάχυση** (scattering-diffusion) ονομάζεται το φαινόμενο κατά το οποίο η ακτινοβολία που προσπίπτει σε ένα σώμα κατευθύνεται στη συνέχεια προς όλες τις διευθύνσεις ομοιόμορφα ή ανομοιόμορφα.

Ένα μικρό ποσοστό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σκεδάζεται πίσω στο διάστημα από τα αιωρούμενα σωματίδια της ατμόσφαιρας. Περίπου 30% της ακτινοβολίας σκεδάζεται προς τα κάτω. Υπάρχει επιλεκτική σκέδαση, που προκαλείται από ατμούς και αέρια, όπως άζωτο, οξυγόνο και διοξείδιο του άνθρακα. Στην περίπτωση αυτή, η μικρότερου μήκους κύματος ενέργεια του υπεριώδους (Ultraviolet/UV) και του μπλε φωτός σκεδάζεται περισσότερο έντονα από τη μεγαλύτερου μήκους κύματος ενέργεια του κόκκινου και του υπέρυθρου (Infrared/IR). Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως σκέδαση Rayleigh και αποτελεί την κύρια αιτία του μπλε χρώματος του ουρανού. Για μεγαλύτερου μεγέθους σωματίδια, η σκέδαση είναι ανεξάρτητη του μήκους κύματος, δηλαδή το λευκό φως σκεδάζεται. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως σκέδαση Mei. Η ακτινοβολία μετά τη σκέδαση ονομάζεται **διάχυτη** ακτινοβολία. Η σκέδαση στην ατμόσφαιρα πραγματοποιείται από μόρια ή μικρά σωματίδια, είναι επιλεκτική και εξαρτάται από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Αντίστοιχα, **ανάκλαση** (reflection) ονομάζεται το φαινόμενο κατά το οποίο ένα μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας επιστρέφει πίσω στο διάστημα, μετά τη σύγκρουση με σωματίδια μεγαλύτερα από 0,7 μm. Περίπου 25% της ηλιακής ακτινοβολίας ανακλάται στο διάστημα από νέφη. Γενικά, η ανάκλαση είναι μέγιστη στα μέσα και υψηλά πλάτη και ελάχιστη στις υποτροπικές περιοχές.

Απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε θερμότητα από τα μόρια των ατμοσφαιρικών αερίων. Η ατμόσφαιρα απορροφά περίπου 20% της ηλιακής ακτινοβολίας, κυρίως από οξυγόνο, όζον, διοξείδιο του άνθρακα και υδρατμούς. Στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, η απορρόφηση του ορατού φάσματος είναι μικρή. Ωστόσο, η απορρόφηση της υπεριώδους ακτινοβολίας ($\lambda < 0,37$ μm) είναι ιδιαίτερα σημαντική, κυρίως από το όζον και τα άλλα αέρια στην ανώτερη ατμόσφαιρα, ώστε τελικά στην επιφάνεια της Γης να μη φτάνει ακτινοβολία με μήκος κύματος μικρότερο των 0,29 μm. Στην τροπόσφαιρα, την ηλιακή ακτινοβολία απορροφούν το διοξείδιο του άνθρακα, οι υδρατμοί, το οξυγόνο και τα οξείδια του αζώτου.



Σχήμα 3.15. *Ισοζύγιο εισερχόμενης μικρού μήκους κύματος ακτινοβολίας.*

Επιφάνεια	**Λευκαύγεια (%)**	**Επιφάνεια**	**Λευκαύγεια (%)**
Αμμώδη εδάφη	37	Μηδική (Alfalfa)	2-5
Σκούρα μαύρα εδάφη	14	Βαμβάκι	20-22
Υγρά μαύρα εδάφη	8	Γρασίδι (ξερό)	31-33
Φυλλοβόλα δάση	17	Γρασίδι (πράσινο)	26
Πευκοδάση	14	Μαρούλι	22
Λειμώνες	12-13	Μηδική (Lucerne)	23-32
Θάμνοι ερήμου	20-29	Καλαμπόκι	16-23
Στρώμα πάγου με νερό	26	Ρύζι	11-21
Θαλάσσιος πάγος	36	Ζαχαρότευτλα	18
Πυκνό, καθαρό και στεγνό χιόνι	86-95	Σίκαλη	11-21
Επιφάνεια του νερού σε 30^{o} γεωγραφικό πλάτος	6-9	Σιτάρι	16-23

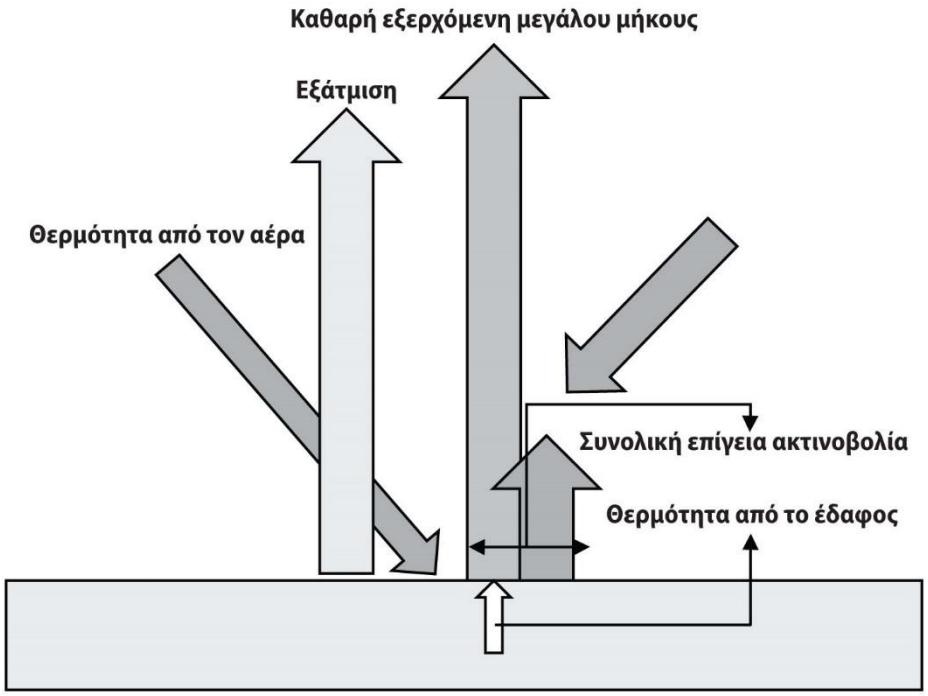
.

Πίνακας 3.4. *Λευκαύγεια μικρού μήκους κύματος ακτινοβολίας.*

Η απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας έχει μεγάλη σημασία για τη ζωή στην επιφάνεια της Γης, καθόσον ακόμα και ένα πολύ μικρό ποσό της μπορεί να βλάψει ζώντες οργανισμούς, αν φτάσει στην επιφάνεια. Στην πραγματικότητα, μετά την ανάκλαση, τη σκέδαση και την απορρόφηση στην ατμόσφαιρα, στην επιφάνεια της Γης φτάνει περίπου η μισή ηλιακή ακτινοβολία. Από την ακτινοβολία αυτή, περίπου το 6% ανακλάται πίσω στο διάστημα, η γνωστή λευκαύγεια, η οποία ορίζεται ως το κλάσμα της εισερχόμενης μικρού μήκους κύματος ακτινοβολίας που ανακλάται από την επιφάνεια της Γης. Στον Πίνακα 3.4 δίνονται τιμές της λευκαύγειας για επιλεγμένες επιφάνειες και καλλιέργειες.
Με βάση όλα αυτά, η ηλιακή ακτινοβολία ταξινομείται στις παρακάτω κατηγορίες. **Άμεση** είναι η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε μια επιφάνεια κάθετη προς τις ηλιακές ακτίνες για μια πολύ λεπτή δέσμη ακτίνων. Επισημαίνεται ότι οι υπόλοιπες συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας αναφέρονται σε οριζόντια επιφάνεια. **Διάχυτη** είναι το σύνολο της μικρού μήκους κύματος ακτινοβολίας που προσπίπτει σε στοιχειώδη οριζόντια επιφάνεια όταν η επιφάνεια προστατεύεται. Η διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία προέρχεται από σκέδαση της ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα. Το άθροισμα της άμεσης και της διάχυτης ακτινοβολίας που προσπίπτει σε οριζόντια επιφάνεια ονομάζεται **ολική** ηλιακή ακτινοβολία. Επιπλέον, ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία είναι το ποσοστό της ολικής ακτινοβολίας που ανακλάται από το έδαφος και τα σωματίδια της ατμόσφαιρας σε συγκεκριμένο μήκος κύματος. Επίσης, **καθαρή** ακτινοβολία είναι η διαφορά μεταξύ όλων των εισερχόμενων και όλων των εξερχόμενων ροών ακτινοβολίας σε οριζόντια επιφάνεια, ανεξάρτητα από το μήκος κύματος, δηλαδή η γήινη και η ηλιακή ακτινοβολία. Από τη συνολική ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της Γης, συνήθως λιγότερο από το 60% είναι άμεση σε μορφή δέσμης ακτίνων. Η υπόλοιπη είναι διάχυτη, διότι έχει προηγουμένως υποστεί σκέδαση και ανάκλαση από διάφορα αιωρούμενα σωματίδια στην ατμόσφαιρα, ανάλογα με την έντασή της και το μήκος διαδρομής της ακτινοβολίας μέσα σε αυτήν.

3.7.2. Εξερχόμενη μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία

Η επιφάνεια της Γης καθίσταται πηγή ακτινοβολίας μετά τη θέρμανσή της από την απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας (Σχήμα 3.16). Επειδή η μέση θερμοκρασία της επιφάνειας της Γης είναι περίπου 285^{o} K, το 99% της ακτινοβολίας εκπέμπεται στο υπέρυθρο (IR), από 4 έως 120 μm, με αιχμή γύρω στα 10 μm, όπως ισχύει στο νόμο του Wien. Αυτή είναι η μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία, γνωστή και ως γήινη ακτινοβολία.



Σχήμα 3.16*: Ισοζύγιο εξερχόμενης μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολίας τη νύχτα.*

Το μέσο ετήσιο πλανητικό ισοζύγιο υπέρυθρης ακτινοβολίας δίνεται από τις εξισώσεις:

I (e) = Iα + Is (3.19)

I (α) = I + I (α) s (3.20)

I = I (e) - I (3.21)

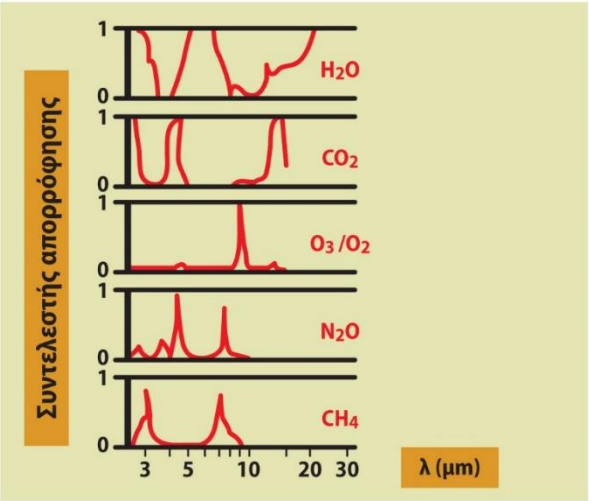
όπου I(e) είναι εκπεμπόμενη υπέρυθρη ακτινοβολία από την επιφάνεια της Γης, Ια η υπέρυθρη ακτινοβολία από την επιφάνεια της Γης που απορροφάται από την ατμόσφαιρα, Is η υπέρυθρη ακτινοβολία που από τη Γη χάνεται στο διάστημα, I η επιστρεφόμενη ακτινοβολία, I (α) η υπέρυθρη ακτινοβολία που από την ατμόσφαιρα χάνεται στο διάστημα και I η αποτελεσματική εξερχόμενη ακτινοβολία από τη Γη.
Το ποσοτικό ισοζύγιο μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολίας από το σύστημα Γη-ατμόσφαιρα (Wm^{-2} κατ' έτος) συνοψίζεται στον Πίνακα 3.5.
Το σύστημα Γη-ατμόσφαιρα απορροφά περίπου το 70% της ηλιακής ακτινοβολίας. Ωστόσο, η θερμοκρασία του συστήματος δεν παρουσιάζει μεγάλες μεταβολές σε βάθος χρόνου, με αποτέλεσμα η ενέργεια που απορροφάται να επανεκπέμπεται στο διάστημα. Ουσιαστικά, στην εκπεμπόμενη μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία, η επιφάνεια της Γης συμπεριφέρεται ως φαιό σώμα, δηλαδή παρόμοια με τη συμπεριφορά του μελανού σώματος, όπως ήδη επισημάνθηκε. Πολύ μεγάλη ικανότητα εκπομπής παρουσιάζουν οι χιονοσκεπείς εκτάσεις, τα νεφικά συστήματα, αλλά και η ατμόσφαιρα, που εκπέμπει ως φαιό σώμα, με ικανότητα εκπομπής ίση με 90%.

Μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία	**Wm^{-2}**	**Μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία**	**Wm^{-2}**
Εκπέμπεται από την επιφάνεια της Γης.	390	Χάνεται στο διάστημα.	40
		Απορροφάται από την ατμόσφαιρα.	350
Εκπέμπεται από την ατμόσφαιρα και τα σύννεφα.	519	Χάνεται στο διάστημα από την ατμόσφαιρα.	195
		Επιστρέφεται από την ατμόσφαιρα και απορροφάται από τη Γη.	324
Συνολική εξερχόμενη μεγάλου μήκους ακτινοβολία.	235		

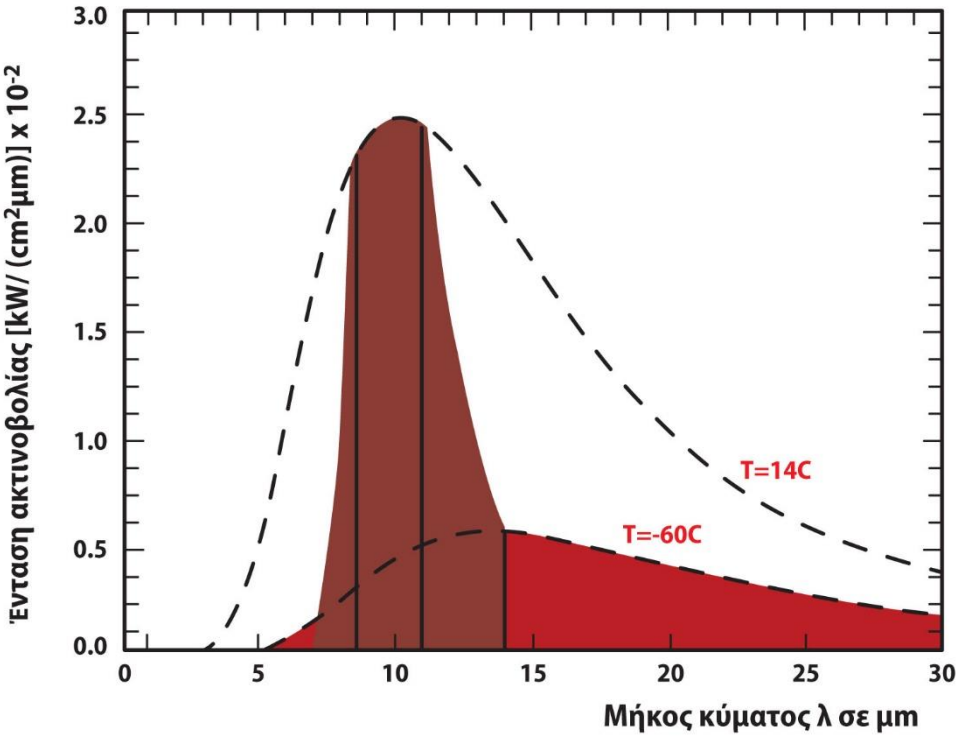
Πίνακας 3.5. *Διάθεση μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολίας.*

Η ατμόσφαιρα απορροφά έντονα τη μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία, με μέση τιμή απορροφητικότητας γύρω στο 90%. Ειδικότερα, η μεγάλη ικανότητα απορρόφησης της γήινης ακτινοβολίας από την ατμόσφαιρα παρουσιάζεται στα δευτερεύοντα αέρια, όπως το διοξείδιο του άνθρακα, οι υδρατμοί και το όζον, και όχι στα κύρια αέρια, όπως το άζωτο και το οξυγόνο. Στο Σχήμα 3.17 απεικονίζονται τα κύρια και δευτερεύοντα αέρια της ατμόσφαιρας που απορροφούν τη μεγάλου μήκους ακτινοβολία με τα αντίστοιχα μήκη κύματος, καθώς και οι συντελεστές απορρόφησης.
Ως γνωστόν, σύμφωνα με τον νόμο του Kirchoff, η ικανότητα εκπομπής ενός σώματος είναι ίση με την ικανότητα απορρόφησης. Κατά συνέπεια, η ατμόσφαιρα απορροφά τα μήκη κύματος που εκπέμπει ως μελανό σώμα και είναι διαφανής στα μήκη κύματος που δεν εκπέμπει. Η μεταφορά της γήινης ακτινοβολίας διαμέσου της ατμόσφαιρας απεικονίζεται στο Σχήμα 3.18. Η εκπομπή ακτινοβολίας από το έδαφος περνά αδιατάρακτη διαμέσου της ατμόσφαιρας μόνο στην περιοχή του ατμοσφαιρικού παραθύρου ($7 < \lambda < 14$ μm), όπου η ατμόσφαιρα είναι διαφανής. Σε περιοχές στις οποίες τα λεπτά στρώματα απορροφούν ως μελανά στρώματα, δηλαδή για $\lambda < 7$ μm και $\lambda > 14$ μm, η ενέργεια που ακτινοβολείται από το έδαφος απορροφάται εξ ολοκλήρου από το πρώτο υπερκείμενο ατμοσφαιρικό στρώμα. Η ολική απώλεια ενέργειας διαμέσου της ατμόσφαιρας δίνεται στο Σχήμα 3.18. Αν δεν υπήρχε η ατμόσφαιρα, η Γη θε εξέπεμπε ως μελανό σώμα και η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία θα μπορούσε να εξισορροπηθεί από πολύ μικρότερη θερμοκρασία εδάφους. Ωστόσο, η ύπαρξη της ατμόσφαιρας, που είναι διαπερατή από τα μικρού μήκους κύματα, δηλαδή την ηλιακή ακτινοβολία,

αλλά απορροφά μερικά άλλα, καθώς και την εξερχόμενη μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία, δηλαδή τη γήινη ακτινοβολία, οδηγεί σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες στο έδαφος, ώστε να διατηρείται το ισοζύγιο ακτινοβολιών.



Σχήμα 3.17. *Τα κύρια και δευτερεύοντα αέρια της ατμόσφαιρας που απορροφούν τη μεγάλου μήκους ακτινοβολία.*



Σχήμα 3.18. *Ολική απώλεια ενέργειας στην ατμόσφαιρα.*

3.7.3 Καθαρή ακτινοβολία στην επιφάνεια της Γης και ροή θερμότητας στο έδαφος

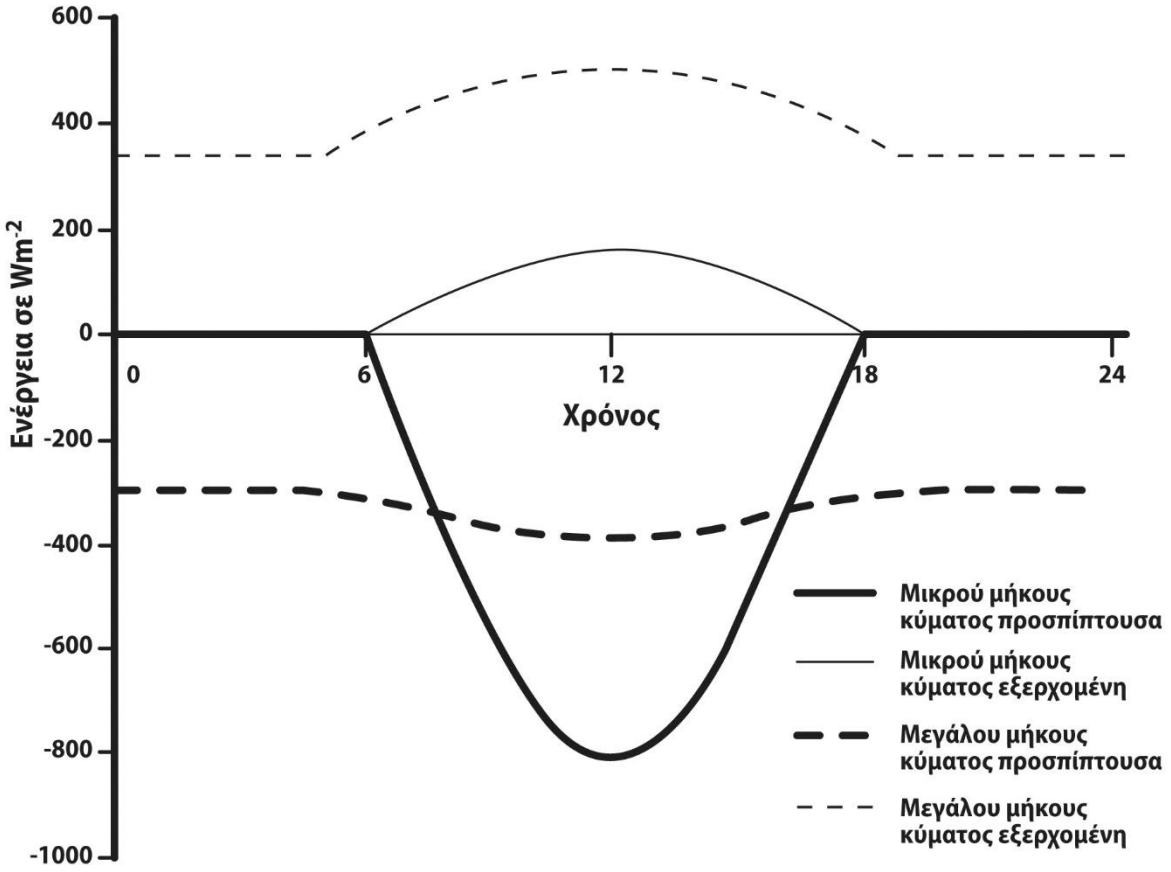
Ως γνωστόν, η ακτινοβολία στην ατμόσφαιρα ταξινομείται σε μικρού μήκους κύματος (ηλιακή) ακτινοβολία και σε μεγάλου μήκους κύματος (θερμότητα) ακτινοβολία. Η καθαρή ακτινοβολία στην επιφάνεια του εδάφους R_N είναι το αποτέλεσμα του ισοζυγίου ακτινοβολίας μεταξύ μικρού μήκους κύματος R_S και μεγάλου μήκους κύματος R_L, που δίνεται από την εξίσωση:

$$R_N = R_S + R_L \quad (3.22)$$

όπου $R_S = R_S^{\downarrow} + R_S^{\uparrow}$ και $R_L = R_L^{\downarrow} + R_L^{\uparrow}$.
Συνεπώς, το ολικό ισοζύγιο ακτινοβολίας γίνεται:

$$R_N = R_S^{\downarrow} + R_S^{\uparrow} + R_L^{\downarrow} + R_L^{\uparrow} \quad (3.23)$$

όπου η κατεύθυνση του βέλους δηλώνει την εισερχόμενη και την εξερχόμενη ακτινοβολία, αντίστοιχα.
Από την εξίσωση (3.23) διαπιστώνεται ότι η καθαρή ακτινοβολία είναι το άθροισμα της μικρού μήκους κύματος προσπίπτουσας ακτινοβολίας κυρίως από τον ήλιο (ολική ακτινοβολία), της μεγάλου μήκους κύματος προσπίπτουσας υπέρυθρης ακτινοβολίας (θερμότητα) από νέφη, αιωρούμενα σωματίδια και αέρια, της μικρού μήκους κύματος ανακλώμενης ακτινοβολίας (ηλιακή) και της μεγάλου μήκους κύματος ανακλώμενης υπέρυθρης ακτινοβολίας (θερμότητα).



Σχήμα 3.19. *Ημερήσιος κύκλος συντελεστών καθαρής ακτινοβολίας.*

Ως γνωστόν, επίσης, η μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία μπορεί να ταξινομηθεί σε διάχυτη ακτινοβολία από τον ουρανό και άμεση ηλιακή ακτινοβολία. Στο Σχήμα 3.19 απεικονίζεται ο τυπικός ημερήσιος κύκλος των συνιστωσών της καθαρής ακτινοβολίας. Οι ροές μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολίας υπολογίζονται σύμφωνα με τον νόμο Stefan-Boltzmann, αν είναι γνωστή η θερμοκρασία. Μετρήσεις ολικής ακτινοβολίας

είναι συνήθως διαθέσιμες σε μετεωρολογικά δίκτυα, αλλά για άλλες συνιστώσες ακτινοβολίας, συνήθως δεν υπάρχουν μετρήσεις. Ωστόσο, η **παραμετροποίηση** των συνιστωσών αυτών συμβάλλει σε αξιόπιστες εκτιμήσεις. Αναντίρρητα, πρέπει να επισημανθεί ότι τέτοιες παραμετροποιήσεις βασίζονται συχνά σε μέσες κλιματικές τιμές και ισχύουν για τις περιοχές που έχουν αναπτυχθεί. Η δυνατότητα αξιοποίησης παρατηρήσεων νεφών για την παραμετροποίηση των ροών ακτινοβολίας έχει ήδη εξεταστεί (Stull, 1988). Η μικρού μήκους κύματος εισερχόμενη ακτινοβολία μπορεί να υπολογιστεί μέσω της ηλιακής σταθεράς, ενώ η μικρού μήκους κύματος ανακλώμενη ακτινοβολία μπορεί να υπολογιστεί μέσω τυπικών τιμών λευκαύγειας της υποκείμενης επιφάνειας. Ομοίως, η μεγάλου μήκους κύματος προσπίπτουσα ακτινοβολία μπορεί να υπολογιστεί μέσω της λευκαύγειας, ενώ το ισοζύγιο ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος μπορεί να παραμετροποιηθεί μέσω της νεφοκάλυψης. Επιπλέον, πολύ συχνά, σε παραμετροποιήσεις χρησιμοποιείται η διάρκεια της ηλιοφάνειας, εφόσον υπάρχουν ήδη αντίστοιχες χρονοσειρές μετρήσεων σε γεωργικά δίκτυα. Επισημαίνεται, ωστόσο, ότι αυτές οι παραμετροποιήσεις βασίζονται σε κλιματολογικές δομές νεφών και μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο για μέσες μηνιαίες και ετήσιες τιμές. Τέλος, επισημαίνεται ότι υπάρχουν σήμερα διαθέσιμες άμεσες μετρήσεις των συνιστωσών ακτινοβολίας, με συνέπεια οι παραμετροποιήσεις να χρησιμοποιούνται μόνο για υπολογισμούς με ιστορικά δεδομένα.

3.7.3.1. Ροή και αποθήκευση θερμότητας στο έδαφος

Ως γνωστόν, η επιφάνεια του εδάφους που περιλαμβάνει φυτά και αστικές περιοχές θερμαίνεται στη διάρκεια της ημέρας από την προσπίπτουσα μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία. Αντίστοιχα, στη διάρκεια της νύχτας, η επιφάνεια ψύχεται, λόγω της ανακλώμενης μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολίας, και είναι ψυχρότερη από τον αέρα και τα βαθύτερα στρώματα του εδάφους. Παρατηρούνται υψηλές βαθμίδες θερμοκρασίας σε στρώματα πάχους λίγων μόνο χιλιοστών. Σύμφωνα με την καθαρή ακτινοβολία, το πλεόνασμα ενέργειας ισοσκελίζεται από την τυρβώδη ροή αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας, και κυρίως από τη μοριακή ροή θερμότητας του εδάφους. Για τη δημιουργία ροής λανθάνουσας θερμότητας, είναι απαραίτητο ένα πλεόνασμα ενέργειας στην επιφάνεια του εδάφους, όπου το νερό μεταφέρεται στο έδαφος μέσω των πόρων του. Το πλεόνασμα αυτό ενέργειας, που είναι απαραίτητο για την εξάτμιση, μπορεί επίσης να προέλθει από τη ροή θερμότητας του ανώτερου στρώματος του εδάφους.

Στη μετεωρολογία, το έδαφος και οι ροές θερμότητας εδάφους περιγράφονται συνήθως με έναν πολύ απλό τρόπο, αγνοώντας τις μεγάλες διαφορές κλίμακας μεταξύ εδάφους και ατμόσφαιρας. Ειδικότερα, η ετερογένεια των ιδιοτήτων του εδάφους στην κλίμακα από 10^{-2} έως 10^{-3} m δεν λαμβάνεται υπόψη και το έδαφος θεωρείται ομογενές για δεδομένη μετεωρολογική κλίμακα. Περισσότερα για τη ροή και αποθήκευση θερμότητας, τη θερμοκρασία του εδάφους και τη θερμοχωρητικότητα παρατίθενται στο Κεφάλαιο 11.

3.7.4. Επιφανειακό ισοζύγιο ενέργειας

Αρχικά, εξετάζεται η ροή ενέργειας σε μια ιδανική επιφάνεια. Ιδανική επιφάνεια ονομάζεται η ομαλή, οριζόντια, ομογενής, εκτενής επιφάνεια, στην οποία πραγματοποιούνται μόνο κατακόρυφες ροές ενέργειας. Υπάρχουν βασικά τέσσερις μορφές ενεργειακής ροής σε μια ιδανική επιφάνεια: η καθαρή ακτινοβολία προς ή από την επιφάνεια, η αισθητή ακτινοβολία, η λανθάνουσα ροή θερμότητας από ή προς την ατμόσφαιρα και η ροή θερμότητας από ή προς το μέσο (έδαφος ή νερό). Η αισθητή ροή ενέργειας πηγάζει από τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ επιφάνειας και υπερκείμενου αέρα, η δε λανθάνουσα θερμότητα ή ροή υδρατμών συμβάλλει στην εξάτμιση ή την εξατμισοδιαπνοή. Με βάση τον ορισμό μιας απλοποιημένης σχέσης για το ισοζύγιο ενέργειας σε μια ιδανική επιφάνεια, η επιφάνεια μεταξύ των δύο μέσων (αέρα, εδάφους ή νερού) είναι ένα πολύ λεπτό στρώμα, που στερείται μάζας και θερμικής ικανότητας. Οι ροές ενέργειας είναι δυνατόν να εισέρχονται και να εξέρχονται από μια τέτοια επιφάνεια, χωρίς απώλειες ή όφελος. Η εξίσωση του ισοζυγίου ενέργειας σε μια επιφάνεια παρουσιάζεται στη σχέση:

$$R_N = H + H_L + H_G \quad (3.24)$$

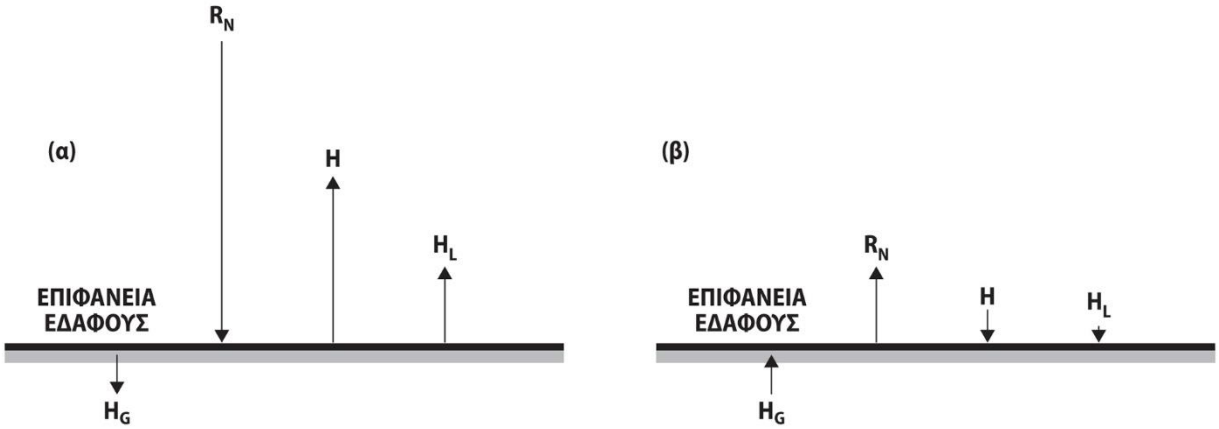
όπου R_N είναι η καθαρή ακτινοβολία, H η αισθητή ροή θερμότητας, H_L η λανθάνουσα ροή θερμότητας και H_G η εδαφική ροή θερμότητας.

Οι ροές ακτινοβολίας με κατεύθυνση προς την επιφάνεια είναι θετικές. Στη διάρκεια της ημέρας, η επιφάνεια λαμβάνει ενέργεια ακτινοβολίας ($R_N > 0$), που επιμερίζεται σε αισθητή και λανθάνουσα ροή θερμότητας στην ατμόσφαιρα και ροή θερμότητας στο έδαφος. Τυπικά, H, H_L και H_G είναι όλες θετικές πάνω από την επιφάνεια της ξηράς την ημέρα (Σχήμα 3.20α). Στη διάρκεια της νύχτας, η επιφάνεια χάνει ενέργεια από την εξερχόμενη

ακτινοβολία, ειδικά σε ανέφελες ή μερικά νεφοσκεπείς συνθήκες. Η απώλεια αυτή ισοσκελίζεται από τα οφέλη της θερμότητας στον αέρα και το έδαφος και, κατά περίπτωση, από τη λανθάνουσα θερμότητα συμπύκνωσης που απελευθερώνεται κατά το σχηματισμό δρόσου. Συνεπώς, στη διάρκεια της νύχτας, όλοι οι όροι της εξίσωσης (3.24) για επιφάνειες ξηράς είναι αρνητικοί. Ωστόσο, τα μεγέθη των όρων αυτών είναι γενικά πολύ μικρότερα από τα αντίστοιχα μεγέθη ροών την ημέρα, εκτός από τα μεγέθη της ροής θερμότητας στο έδαφος H_G, που παρουσιάζουν μικρές διαφορές μεταξύ ημέρας και νύχτας (Σχήμα 3.20β). Από τα παραπάνω, καθίσταται σαφές ότι οι ροές αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας προς ή από την επιφάνεια καθοδηγούνται από τον ημερήσιο κύκλο της καθαρής ακτινοβολίας.

3.7.4.1. Ισοζύγιο ενέργειας στρώματος

Ως γνωστόν, ιδανική οριζόντια ομογενής επιφάνεια σπάνια συναντάται στην πράξη. Πολύ συχνά, η επιφάνεια της Γης παρουσιάζει οριζόντιες ανομοιογένειες, είτε μικρής κλίμακας, όπως φυτά, δένδρα και σπίτια, είτε μέσης κλίμακας, όπως διαφορές αστικών-περιαστικών περιοχών, ακτογραμμές, λόφους και κοιλάδες, είτε μεγάλης κλίμακας, όπως μεγάλες οροσειρές. Αν η επιφάνεια είναι σχετικά επίπεδη και ομογενής, ώστε το στρώμα να μπορεί να θεωρηθεί ότι ορίζεται από οριζόντιες επιφάνειες στην κορυφή και στη βάση, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα απλοποιημένο μονοδιάστατο (1-D) ισοζύγιο ενέργειας για το στρώμα, που δίνεται από τη σχέση:



Σχήμα 3.20. *Σχηματική αναπαράσταση του τυπικού επιφανειακού ισοζυγίου ενέργειας στη διάρκεια α) της ημέρας και β) της νύχτας.*

$$R_N = H + H_L + H_G + \Delta H_S \quad (3.25)$$

όπου ΔH_S είναι η αλλαγή στην αποθήκευση ενέργειας ανά μονάδα χρόνου, ανά μοναδιαία οριζόντια περιοχή σε όλο το πάχος του στρώματος.
Συνεπώς, η κύρια διαφορά στο ισοζύγιο ενέργειας από μια ιδανική επιφάνεια είναι η ύπαρξη του όρου ΔH_S. Ωστόσο, στην πραγματικότητα, Η και H_L σχετίζονται μόνο με την επιφάνεια στην κορυφή, οπότε το κατώτερο όριο μπορεί να επιλεγεί, ώστε να μην παρουσιάζει σημαντική διαφορά εισερχόμενης και εξερχόμενης ροής ακτινοβολίας (Σχήμα 3.21α). Ο όρος ΔH_S, δηλαδή ο ρυθμός αποθήκευσης ενέργειας, μπορεί να εκφραστεί από τη σχέση:

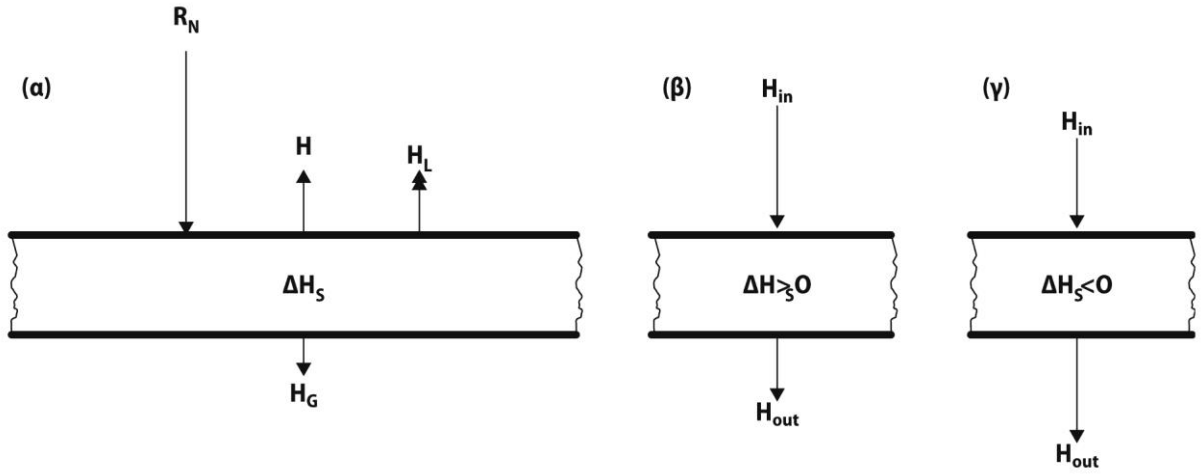
$$\Delta H_s = \int (\theta/\theta_t) \cdot (\rho \cdot c \cdot T)\, d_z \quad (3.26)$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα μάζας, c η ειδική θερμότητα, Τ η απόλυτη θερμοκρασία της ύλης σε κάποια στάθμη z και το ολοκλήρωμα καλύπτει όλο το πάχος του στρώματος.
Αν η θερμοχωρητικότητα του μέσου θεωρηθεί σταθερή, ανεξάρτητη του z, τότε η εξίσωση (3.27) εκφράζει την άμεση σχέση μεταξύ ρυθμού αποθήκευσης ενέργειας και ρυθμού θέρμανσης ή ψύξης του στρώματος. Αντίστοιχα, ο όρος αποθήκευσης ενέργειας ΔH_S στην εξίσωση (3.26) μπορεί επίσης να ερμηνευτεί ως η διαφορά μεταξύ της εισερχόμενης και της εξερχόμενης ενέργειας του στρώματος, που προκύπτει από κατάλληλους συνδυασμούς των R_N, Η, H_L και H_G, ανάλογα με τα πρόσημά τους (Oke, 1987).

Ειδικότερα, όταν η εισερχόμενη στο στρώμα ενέργεια υπερέχει της εξερχόμενης ενέργειας, τότε υπάρχει σύγκλιση ροής ($\Delta H_S > 0$), με αποτέλεσμα τη θέρμανση του στρώματος. Αντίθετα, όταν η εξερχόμενη ενέργεια υπερέχει της εισερχόμενης ενέργειας, τότε το στρώμα ψύχεται, ως αποτέλεσμα της απόκλισης ροής ($\Delta H_S < 0$). Τέλος, στις ειδικές περιπτώσεις ισορροπίας μεταξύ εισερχόμενης και εξερχόμενης ενέργειας, δεν υπάρχει αλλαγή στην αποθήκευση ενέργειας στο στρώμα ($\Delta H_S = 0$) ή στη θερμοκρασία του διαχρονικά (Σχήμα 3.21α, β και γ).
Στη συνέχεια, παρουσιάζονται παραδείγματα ισοζυγίου ενέργειας γυμνής επιφάνειας, καθώς και επιφανειών διαφόρων τύπων βλάστησης. Επισημαίνεται ότι τα σχετικά μεγέθη των διαφόρων όρων του ισοζυγίου ενέργειας μπορεί να διαφέρουν σημαντικά ανάλογα με τον τόπο, το χρόνο και τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες.

3.7.4.2. Ισοζύγιο ενέργειας γυμνής επιφάνειας

Στο Σχήμα 3.22 απεικονίζονται οι μετρήσεις ροών ενέργειας πάνω από μια αποξηραμένη λίμνη (έρημο), μια ζεστή καλοκαιρινή μέρα. Αυτό αντιπροσωπεύει την απλούστερη περίπτωση ισοζυγίου ενέργειας [εξίσωση (3.25)], για μια επίπεδη ξηρή και γυμνή επιφάνεια, με έλλειψη εξάτμισης ή συμπύκνωσης ($H_L = 0$). Αποτελεί επίσης παράδειγμα θερμικά ακραίου κλιματικού περιβάλλοντος, όπου η παρατηρούμενη μέγιστη διαφορά θερμοκρασιών μεταξύ της επιφάνειας και του αέρα στα 2 m είναι περίπου 28° C. Σε γυμνό, ξηρό έδαφος, η καθαρή ακτινοβολία ισοσκελίζεται πλήρως από άμεσες ανταλλαγές θερμότητας με την επιφάνεια μέσω του αέρα και του εδάφους. Ωστόσο, τα σχετικά μεγέθη των ροών αυτών μπορεί να αλλάζουν σημαντικά από μέρα σε νύχτα (Σχήμα 3.22).



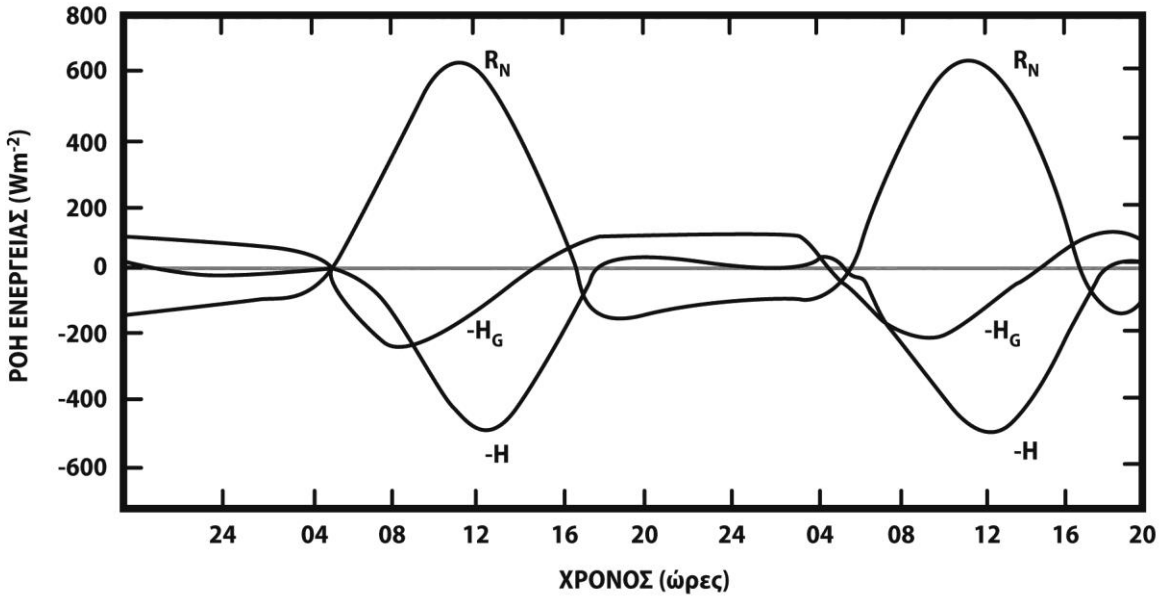
Σχήμα 3.21. *Σχηματική αναπαράσταση (α) ενεργειακού ισοζυγίου μιας επιφάνειας, (β) σύγκλισης ροής και (γ) απόκλισης ροής.*

Ύγρανση του εδάφους κάτω από την επιφάνεια, με βροχή ή τεχνητή άρδευση, μπορεί να αλλάξει δραματικά το επιφανειακό ισοζύγιο ενέργειας, καθώς και το μικροκλίμα κοντά στην επιφάνεια. Η ημερήσια καθαρή ακτινοβολία για το ίδιο πλάτος, την ίδια εποχή και τις ίδιες καιρικές συνθήκες καθίσταται μεγαλύτερη για την υγρή επιφάνεια, λόγω της μείωσης της λευκαύγειας και της αυξημένης απορρόφησης της μικρού μήκους κύματος ακτινοβολίας από την επιφάνεια. Η λανθάνουσα ροή θερμότητας (H_L) γίνεται μια σημαντική ή και κυρίαρχη συνιστώσα του επιφανειακού ισοζυγίου ενέργειας [εξίσωση (3.25)], ενώ η αισθητή ροή θερμότητας (Η) στον αέρα μειώνεται σημαντικά. Η κατάσταση αυτή ονομάζεται «επίπτωση της όασης», διότι είναι παρόμοια εκείνης του θερμού ξηρού αέρα πάνω από μια υγρή όαση. Στην περίπτωση αυτή, παρατηρείται ισχυρή εξάτμιση από την υγρή επιφάνεια, με αποτέλεσμα να ψυχρανθεί η επιφάνεια, λόγω μεταφοράς λανθάνουσας θερμότητας. Συνεπώς, η H_L είναι θετική, ενώ η Η γίνεται αρνητική, ωστόσο πολύ μικρότερη σε μέγεθος. Η «επίπτωση της όασης» στην άρδευση εξαφανίζεται όταν η άρδευση εφαρμόζεται σε μεγαλύτερες περιοχές, οπότε και η οριζόντια απόκλιση γίνεται λιγότερο σημαντική.

3.7.4.3. Ισοζύγια ενέργειας σε επιφάνειες με βλάστηση

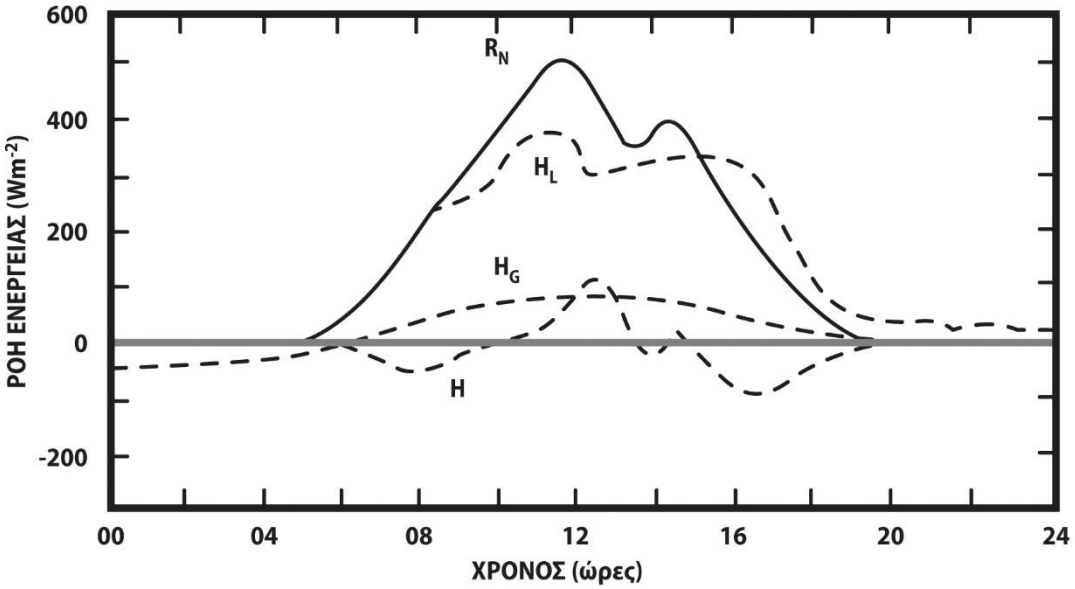
Η ανάπτυξη της βλάστησης σε επίπεδες επιφάνειες δημιουργεί διάφορες επιπλοκές στο ισοζύγιο ενέργειας. Πρώτον, η επιφάνεια του εδάφους δεν αποτελεί πλέον το πιο κατάλληλο μέσο για το επιφανειακό ισοζύγιο

ενέργειας, διότι οι ροές της αισθητής και της λανθάνουσας θερμότητας μεταβάλλονται στο χώρο εντός του φυλλώματος της βλάστησης. Θεωρείται πιο κατάλληλο να εξετάζεται το ισοζύγιο ενέργειας για ολόκληρο το στρώμα φυλλώματος [εξίσωση (3.26)]. Για το λόγο αυτό, απαιτούνται μετρήσεις των R_N, H_L και Η στην κορυφή του φυλλώματος. Δεύτερον, ο ρυθμός αποθήκευσης ενέργειας (ΔH_S) αποτελείται από δύο μέρη, δηλαδή από το ρυθμό φυσικής αποθήκευσης θερμότητας και από το ρυθμό βιοχημικής αποθήκευσης θερμότητας, λόγω της φωτοσύνθεσης και της ανταλλαγής διοξειδίου του άνθρακα. Το τελευταίο μπορεί να μην είναι σημαντικό για χρονικές κλίμακες λίγων ωρών έως μιας ημέρας, που χρησιμοποιούνται στη μικρομετεωρολογία. Ωστόσο, ο ρυθμός αποθήκευσης θερμότητας από το φύλλωμα δεν μπορεί να μετρηθεί ή να υπολογιστεί εύκολα. Τρίτον, η ανταλλαγή λανθάνουσας θερμότητας εμφανίζεται, όχι μόνο λόγω της εξάτμισης ή της συμπύκνωσης στην επιφάνεια, αλλά σε μεγάλο βαθμό, λόγω της διαπνοής από τα φύλλα των φυτών. Η εξατμισοδιαπνοή δημιουργεί μια σχεδόν σταθερή ροή υδρατμών πάνω από το στρώμα φυλλώματος.
Στο Σχήμα 3.23 απεικονίζονται οι παρατηρήσεις ισοζυγίου ενέργειας πάνω από καλλιέργεια κριθαριού μια καλοκαιρινή ημέρα στην Αγγλία. Επισημαίνεται ότι η ροή λανθάνουσας θερμότητας λόγω εξατμισοδιαπνοής είναι η κυρίαρχη συνιστώσα ενέργειας, που σχεδόν εξισορροπεί την καθαρή ακτινοβολία, ενώ οι Η και H_G είναι μια τάξη μεγέθους μικρότερες. Επίσης, αργά το απόγευμα και το βράδυ η H_L υπερέχει της καθαρής ακτινοβολίας, ενώ η Η γίνεται αρνητική. Τέλος, ο ρυθμός αποθήκευσης ενέργειας εκτιμάται από το ισοζύγιο ενέργειας ότι είναι μικρός.

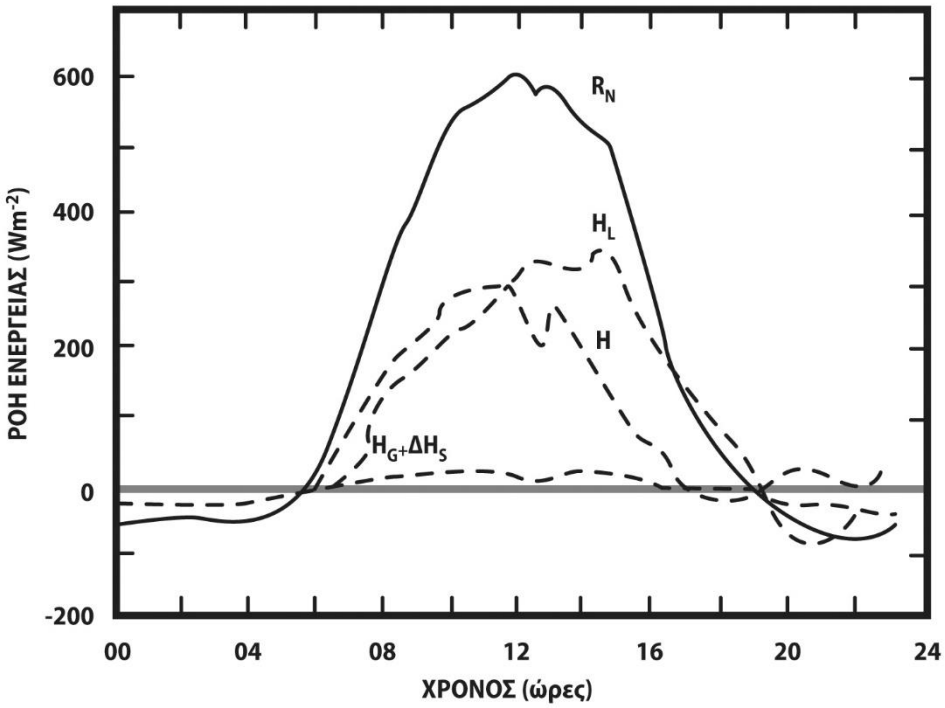


Σχήμα 3.22. *Παρατηρούμενες ημερήσιες διακυμάνσεις ενεργειακού ισοζυγίου πάνω από αποξηραμένη λίμνη στην περιοχή Ελ Μιράζ, της Καλιφόρνιας, στις 10-11 Ιουνίου 1950.*

Δασικά φυλλώματα παρουσιάζουν παρόμοια χαρακτηριστικά με τα φυλλώματα φυτών, εκτός από τις προφανείς διαφορές στο μέγεθος και στη δομή τους. Τα μεγαλύτερα ύψη των δένδρων και η βιομάζα του δασικού φυλλώματος στοιχειοθετούν ότι ο ρυθμός αποθήκευσης θερμότητας δεν είναι αμελητέος, ακόμα και για περιόδους μιας ημέρας. Τυπικό παράδειγμα παρατήρησης ισοζυγίου ενέργειας δασικού φυλλώματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.24. Το ΔH_S υπολογίζεται από εκτιμήσεις της βιομάζας και της θερμοχωρητικότητας των δένδρων και μετρήσεις της θερμοκρασίας του αέρα εντός του φυλλώματος, και προστίθεται στις μετρήσεις της ροής θερμότητας στο έδαφος, για την εξαγωγή του όρου ($H_G + \Delta H_S$). Ο όρος αυτός είναι σχετικά μικρός στη διάρκεια της ημέρας, αλλά της ίδιας τάξης μεγέθους με την καθαρή ακτινοβολία (R_N) τη νύχτα. Επισημαίνεται ότι στη διάρκεια της ημέρας, η R_N επιμερίζεται σχεδόν εξ ίσου μεταξύ των ροών της αισθητής, Η, και της λανθάνουσας, H_L, θερμότητας στον αέρα.



Σχήμα 3.23. *Παρατηρούμενες ημερήσιες διακυμάνσεις ενεργειακού ισοζυγίου πάνω από καλλιέργεια κριθαριού στην περιοχή Ρόθαμστεντ, της Αγγλίας, στις 23 Ιουλίου 1963.*



Σχήμα 3.24. *Παρατηρούμενες ημερήσιες διακυμάνσεις ενεργειακού ισοζυγίου σε δάσος ελάτης στην περιοχή Μπρίτις Κολούμπια, στις 23 Ιουλίου 1970.*

3.7.4.4. Ισοζύγιο ενέργειας υδάτινων επιφανειών

Το νερό καλύπτει περισσότερο από τα δύο τρίτα της επιφάνειας της Γης. Επομένως, είναι σημαντική η κατανόηση του ισοζυγίου ενέργειας υδάτινων επιφανειών. Ωστόσο, το θέμα είναι πολύπλοκο, καθόσον το νερό αποτελεί ένα ρευστό με δυναμικά ενεργή επιφάνεια και ένα επιφανειακό οριακό στρώμα ή στρώμα ανάμειξης στο οποίο οι κινήσεις είναι γενικά τυρβώδεις. Συνεπώς, μεταφορές θερμότητας εντός του επιφανειακού οριακού στρώματος στο νερό υπολογίζουν, ουσιαστικά, την H_G, ωστόσο με αρκετή δυσκολία και ασάφεια. Θεωρείται πιο κατάλληλο να εξεταστεί το ισοζύγιο ενέργειας ενός στρώματος νερού που εκτείνεται σε κάποιο βάθος, όπου οι ανταλλαγές θερμότητας τόσο για μεταγωγή όσο και για ακτινοβολία καθίστανται αμελητέες. Βέβαια, αυτό δεν είναι εφικτό για ρηχές στήλες νερού, με βάθη μικρότερα των 10 m. Ωστόσο, ακόμα και σε μεγάλες λίμνες και ωκεανούς, μετρήσεις όλων των όρων ροής ενέργειας [εξίσωση (3.26)] δεν είναι διαθέσιμες. Επισημαίνεται ότι μόνο οι ροές αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας μετρούνται ή εκτιμώνται με κάποια αποδεκτή συχνότητα. Επίσης, ο ρυθμός αποθήκευσης ενέργειας στο ωκεάνιο μεικτό στρώμα αποτελεί σημαντικό παράγοντα στο ισοζύγιο ενέργειας. Ειδικότερα, το στρώμα αυτό αποβάλλει θερμότητα ($\Delta H_S > 0$) την ημέρα και αποτελεί πηγή θερμότητας ($\Delta H_S < 0$) τη νύχτα. Τέλος, η σημασία της καθαρής ακτινοβολίας στο ισοζύγιο ενέργειας σε νερό παραμένει αβέβαιη.

Το ισοζύγιο ενέργειας [εξίσωση (3.26)] συνδέεται με την εξάτμιση, μέσω της εξίσωσης υδατικού ισοζυγίου, που σε απλοποιημένη μορφή δίνεται από τη σχέση:

$$0 = P - H_L - R \pm \Delta H_W \quad (3.27)$$

όπου P είναι ο υετός, R η απορροή, H_L η ροή λανθάνουσας θερμότητας για εξάτμιση και ΔH_W το σύνολο της αποθήκευσης νερού στο έδαφος και στον υπόγειο υδροφορέα.

Ως γνωστόν, η εξάτμιση διακρίνεται συνήθως σε δύο τμήματα. Το πρώτο τμήμα αφορά τη φυσική διεργασία, δηλαδή την εξάτμιση, που εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα νερού, την εισερχόμενη ενέργεια και την ένταση των τυρβωδών κινήσεων. Το δεύτερο τμήμα αφορά τη διαπνοή, που προκαλείται από τη φυσιολογία του φυτού, το έλλειμμα κορεσμού των υδρατμών και τη φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία. Το άθροισμα των δύο αυτών τμημάτων καλείται εξατμισοδιαπνοή και καλύπτεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4. Η εξάτμιση εμφανίζεται στο έδαφος, τις υδάτινες επιφάνειες και τις υγρές επιφάνειες των φυτών, και προέρχεται από τη συγκράτηση της βροχόπτωσης. Τέλος, κρίνεται σκόπιμο να επισημανθεί ότι η μικρομετεωρολογία διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής και στην ολοκλήρωση του υδρολογικού κύκλου.

Βιβλιογραφικές αναφορές

Arya, S.P. (2001). *Introduction to Micrometeorology*. 2nd edition. Academic Press. NY.

Boes, E. (1981). Fundamentals of solar radiation. In Krieder & Krieth (Eds.), *Solar Energy Handbook* (pp. 2.1-2.76), New York: McGraw-Hill.

Cano, D., Monget, J.M., Albuisson, M., Guillard, H., Regas, N., and Wald, L. (1986). A method for the determination of the global solar radiation from meteorological satellite data, *Solar Energy*. 37:31-39.

Foken, Th. (2008). *Micrometeorology*. Springer. NY.

Gautier, C., Diak, G. and Masse, S. (1980). A simple physical model to estimate incident solar radiation at the surface from GOES sate11ite data. *Journal of Applied Meteorology*. 19:1005-1012.

Haeberli, W. & Beniston, M. (1998). Climate Change and its Impacts on Glaciers and Permafrost in the Alps. *Ambio*. 27:258–265.

Hanson, K.J. (1976). An estimate of solar irradiance at the Earth's surface of zonal and global scale. *Journal of Geophysical Research*. 81:445-4443.

Hay, 1. E. & Hanson, KJ. (1978). A satellite-based methodology for determining solar irradiance at the ocean surface during GATE, Abstract of paper presented at the 12th Conference of Hurricanes and Tropical Meteorology, *Bulletin of American Meteorological Society*, 59:1549.

Κατσαφάδος, Π. και Μαυρoματίδης Η. (2010). *Αρχές Μετεωρολογίας-Κλιματολογίας (Πανεπιστημιακές Παραδόσεις)*. Αθήνα: Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο.

Kerschgens, M., Pilz, U. and Raschke, E.(1978). A modified two-stream approximation for computation of the solar radiation budget in a cloudy atmosphere. *Tellus*. 30:429-435.

Kiehl, J.T. & Trenberth K.E. (1997). Earth's annual global mean energy budget. *Bulletin of the American Meteorology Society*. 78:197-208.

Μελάς, Δ. (2007). *Φυσική Ατμοσφαιρικού Περιβάλλοντος*. Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

Moser, W. & Raschke, E. (1983). Mapping of global radiation and of cloudiness from METEOSAT image data, *Meteorology Research*. 36:33-41.

Oke, T.R. (1987). *Boundary Layer Climates*. 2nd Edition, New York: Halsted. 435.

Orlanski, J. (1975). A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bulletin of American Meteorology Society*. 56:529-530.

Stull, R.B. (1988). *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Springer, NY.

Tarpley, J.D. (1979). Estimating incident Solar Radiation at the surface from geostationary satellite data, *Journal of Applied Meteorology*, 18:1172-1181.

Tuzet, A., Moser, W. and Raschke, E. (1984). Estimating global solar radiation at the surface from METEOSAT-data in Sahel region. *Journal de Recherchees Atrnosphériques*. 18(1):31-39.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4
ΓΕΩΡΓΙΚΗ ΥΔΡΟΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑ

Σύνοψη
Στο κεφάλαι αυτό καλύπτεται το αντικείμενο της υδρομετεωρολογίας, με έμφαση στις ανάγκες και τις εφαρμογές στις γεωπονικές επιστήμες και το αγροτικό περιβάλλον. Η υδρομετεωρολογία αποτελεί τον κλάδο της μετεωρολογικής επιστήμης που ασχολείται με το νερό στην ατμόσφαιρα μέχρι να φτάσει στην επιφάνεια του εδάφους και περιλαμβάνει τη μελέτη κυρίως του υετού, της εξάτμισης και της εξατμισοδιαπνοής, καθώς και της ηλιακής ακτινοβολίας.
Αρχικά, εδώ γίνεται εκτενής ανάλυση του υετού, παρουσιάζονται οι βασικές θεωρίες σχηματισμού του, οι διάφορες μορφές και οι διάφοροι τύποι, καθώς και οι μέθοδοι περιοχικής εκτίμησής του που ενδιαφέρουν τις γεωπονικές επιστήμες. Ειδικότερα, παρουσιάζονται οι μέθοδοι εκτίμησης τόσο με συμβατικά βροχομετρικά δίκτυα, όσο και με μεθόδους τηλεπισκόπησης, που προσφέρονται για περιοχικές εκτιμήσεις. Συγκεκριμένα, εξετάζονται τα ραντάρ καιρού, τόσο τα συμβατικά ή μη συνεκτικά, όσο και τα σύγχρονα συνεκτικά, δηλαδή τα ογκομετρικά ραντάρ, τα Doppler ραντάρ και τα ραντάρ πολικότητας. Περιγράφονται οι αρχές και τα χαρακτηριστικά τους, καθώς και οι μέθοδοι εκτίμησης της περιοχικής βροχόπτωσης. Στη συνέχεια, αναλύεται το εύρος των μεθόδων εκτίμησης της περιοχικής βροχόπτωσης με μετεωρολογικούς δορυφόρους, επιχειρείται η επικαιροποίηση των μεθοδολογιών και επισημαίνονται οι σύγχρονες επιστημονικές και τεχνολογικές τάσεις, που χρησιμοποιούν ορατό ή/και υπέρυθρο φάσμα, καθώς και μικροκύματα.
Σχετικά με την εξάτμιση και την εξατμισοδιαπνοή, αφού προσδιορίζεται αρχικά το φαινόμενο και εξηγείται η μεγάλη σημασία του για τη γεωργία, στη συνέχεια περιγράφονται και επεξηγούνται μέθοδοι εκτίμησης του ισοζυγίου ενέργειας, αλλά και ημιεμπειρικές και εμπειρικές μέθοδοι. Ειδικότερα, παρουσιάζεται ένα εύρος συμβατικών, καθώς και δορυφορικών μεθόδων, τόσο για τον υπολογισμό του φυτικού συντελεστή, όσο και για την εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς και καλλιέργειας. Τονίζονται οι σύγχρονες επιστημονικές και τεχνολογικές τάσεις και επισημαίνεται η συνεχής βελτίωση στην ακρίβεια των περιοχικών εκτιμήσεων με μεθόδους τηλεπισκόπησης, καθώς και η μεγάλη σημασία της εξάτμισης στη γεωργία.

Προαπαιτούμενη γνώση
Ο αναγνώστης απαιτείται να έχει βασικές γνώσεις φυσικής και μαθηματικών.

4.1. Υετός

Υετός είναι το σύνολο των κατακόρυφων, κυρίως, ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων, που αναφέρουν μετρήσιμη ποσότητα νερού. Αποτελεί την πρωταρχική εισαγόμενη παράμετρο του υδρολογικού κύκλου και παράγεται από το ατμοσφαιρικό νερό. Η μορφή και η ποσότητά του επηρεάζονται από τις συνδυαστικές χωροχρονικές μεταβολές των βασικών μετεωρολογικών παραμέτρων στην ατμόσφαιρα, που διαμορφώνουν τον καιρό και τα καιρικά φαινόμενα, δηλαδή τη θερμοκρασία, την ατμοσφαιρική πίεση και τον άνεμο, ενώ η υγρασία της ατμόσφαιρας αποτελεί αναγκαία, αλλά όχι ικανή συνθήκη για τον υετό.

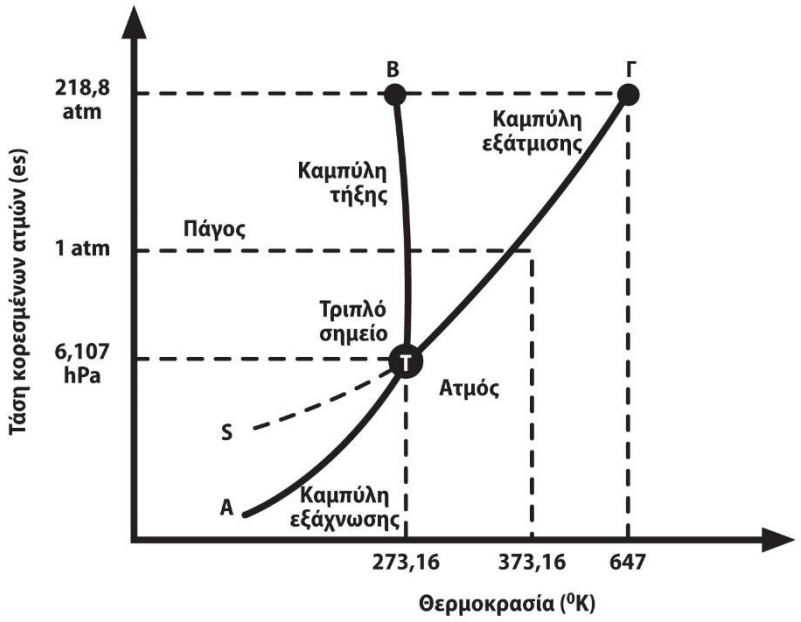
4.1.1. Σχηματισμός υετού

Προκειμένου να κατανοηθεί η συμπεριφορά του ατμοσφαιρικού νερού στις διάφορες μεταβολές του για το σχηματισμό υετού, παρατίθενται ορισμένα θερμοδυναμικά στοιχεία (Μακρογιάννης και Σαχσαμάνογλου, 1993). Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται το γράφημα του νερού στο επίπεδο P-T και ιδιαίτερα το τμήμα εκείνο το οποίο αντιστοιχεί σε πιέσεις ίσες με τις τιμές που μπορεί να λάβει η τάση των κορεσμένων ατμών e_s. Η γραμμή ΤΒ είναι η καμπύλη ισορροπίας μεταξύ της υγρής και της στερεάς φάσης του νερού (καμπύλη τήξης ή πήξης). Η γραμμή ΤΚ είναι η καμπύλη ισορροπίας μεταξύ της υγρής και της αέριας φάσης του νερού (καμπύλη εξάτμισης ή εξαέρωσης). Η γραμμή ΤΑ είναι η καμπύλη ισορροπίας μεταξύ της αέριας και της στερεάς φάσης του νερού (καμπύλη εξάχνωσης). Οι τρεις αυτές καμπύλες τέμνονται στο σημείο Τ, στο ονομαζόμενο «τριπλό σημείο» (e_{ST} = 6,11mb, T_K = 273,16^o K), όπου συνυπάρχουν και οι τρεις φάσεις του νερού. Ειδικότερα, στο σημείο Τ υπάρχει ταυτόχρονα πήξη και βρασμός του νερού, δηλαδή σε πίεση 6,11mb το νερό παγώνει και στους 0,16^o C βράζει. Οι τρεις παραπάνω καμπύλες χωρίζουν το επίπεδο (e_s – Τ) σε τρεις διακεκριμένους χώρους, ατμό, νερό και πάγο. Τέλος, η τάση κορεσμένων ατμών e_s, που εκφράζει το μέγιστο περιεχόμενο νερό σε δοσμένη θερμοκρασία σημείου δρόσου T_d, δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση της καμπύλης κορεσμού:

$$e_s = 6{,}11 - 0{,}339 \cdot (T_d - 32) \cdot m \cdot b. \quad (4.1)$$

Η εξέλιξη ενός νέφους σε βροχοφόρο εξαρτάται από ορισμένους βασικούς παράγοντες, όπως η συνύπαρξη των τριών φάσεων του νερού στο νέφος, η ύπαρξη διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ των γειτονικών περιοχών του νέφους, καθώς και η ύπαρξη αναταρακτικών κινήσεων μέσα στο νέφος. Απαραίτητη προϋπόθεση για την έναρξη του μηχανισμού σχηματισμού υετού είναι η δημιουργία νεφομεριδίων, δηλαδή «ηγετικών» νεφοσταγονιδίων ή παγοκρυστάλλων με διαφορετικές φυσικές ιδιότητες από τα υπόλοιπα. Οι επικρατέστερες θεωρίες είναι οι εξής δύο, που περιγράφονται συνοπτικά:

- **Θεωρία Bergeron-Findeisen.** Η θεωρία αυτή ισχύει, καταρχάς, μόνο για την περίπτωση κατά την οποία ένα βροχοφόρο νέφος αποτελείται από υδροσταγονίδια και παγοκρυστάλλους μαζί. Είναι γνωστό ότι η συνύπαρξη μέσα στο νέφος και των τριών φάσεων του νερού δημιουργεί αστάθεια. Σε συνθήκες υπέρτηξης του νερού (π.χ. σε –30° C), όταν συνυπάρχουν και οι τρεις φάσεις του νερού, παγοκρύσταλλοι, νεφοσταγονίδια και υδρατμοί (Σχήμα 4.1), δημιουργείται διαφορά τάσης, με συνέπεια τη συνεχή ροή υδρατμών από τα σε κατάσταση υπέρτηξης νεφοσταγονίδια (μεγάλη τάση) προς τους παγοκρυστάλλους (μικρή τάση). Άρα, δημιουργείται ένα «ηγετικό» νεφομερίδιο διαφορετικό από τα άλλα, ονομαζόμενο και πυρήνας συμπύκνωσης, που συνεχώς μεγεθύνεται και αποκτά το απαραίτητο για την πτώση βάρος. Κατά την πτώση τους, τα νεφομερίδια αυτά, σε συνθήκες θερμοκρασίας μεγαλύτερης του 0° C εντός ή εκτός του νέφους, τήκονται και πέφτουν στο έδαφος με τη μορφή βροχής, διαφορετικά με τη μορφή χιονιού.



Σχήμα 4.1 *Γράφημα νερού στο επίπεδο (e_s – T). Τριπλό σημείο.*

- **Θεωρία σύγκρουσης και συνένωσης.** Η θεωρία αυτή ισχύει για «θερμή», όπως λέγεται, βροχή σε νέφη, όταν δεν σημειώνονται θερμοκρασίες μικρότερες από 0° C. Τα νέφη του είδους αυτού (St, S_c) αποτελούνται κυρίως από μικρά υδροσταγονίδια. Ωστόσο, μέσα σε αυτά και μεγαλύτερα σε μέγεθος υδροσταγονίδια, που μπορούν να παίξουν το ρόλο των «ηγετικών» νεφομεριδίων ή πυρήνων συμπύκνωσης, που δεν είναι όλοι όμοιοι, ούτε σε μέγεθος, ούτε σε φυσικές ιδιότητες. Τα μεγαλύτερα αυτά νεφοσταγονίδια, λόγω των διαστάσεών τους, έχουν μικρότερη τάση υδρατμών στην επιφάνειά τους από ό,τι τα κοινά νεφοσταγονίδια. Κατά συνέπεια, εμφανίζεται μια συνεχής ροή των διάχυτων υδρατμών και νεφοσταγονιδίων (με τυπική ακτίνα 0,01 mm) προς τα μεγάλα νεφοσταγονίδια μέσα στην ίδια νεφική μάζα υδρατμών, δηλαδή πραγματοποιείται σύγκρουση και συνένωση κινούμενων υδροσταγονιδίων με διαφορετικές ταχύτητες σε μια βροχοσταγόνα (Lutgens & Tarbuck, 1979). Οι δημιουργούμενες βροχοσταγόνες παρασύρονται αρχικά προς τα πάνω, λόγω των ανοδικών κινήσεων

που επικρατούν στα νέφη του είδους αυτού (Cu, St, S_c), και αυξάνουν σε μέγεθος, λόγω των συγκρούσεων. Κάποια στιγμή, όμως, λόγω βάρους, αρχίζουν να πέφτουν, οπότε συγκρούονται και συνενώνονται εκ νέου κατά την κάθοδό τους, φτάνοντας τελικά στο έδαφος υπό τη μορφή ισχυρών βροχών. Είναι προφανές, συνεπώς, ότι το μέγεθος των βροχοσταγόνων αυτών εξαρτάται από την κατακόρυφη ανάπτυξη του νέφους, από την πυκνότητα των νεφοσταγονιδίων και από την ταχύτητα των ανοδικών κινήσεων μέσα στη νεφική μάζα.

4.1.2 Μορφές και τύποι υετού

Στην υδρομετεωρολογία και ειδικά στη μορφή και τον τύπο του υετού θεωρείται σημαντική διαδικασία η μεταφορά ενέργειας, ορμής και μάζας, καθώς και τα ισοζύγιά τους, στο σύστημα ατμόσφαιρα-έδαφος-ωκεανοί. Η μεταφορά πραγματοποιείται ανάλογα με την κλίμακα και την ένταση του φαινομένου, είτε μέσω ακτινοβολίας (radiation) είτε μέσω μεταγωγής (convection) ή αγωγιμότητας (conduction). Ακτινοβολία θεωρείται η διαδικασία μέσω της οποίας η ηλιακή ενέργεια εισέρχεται στον υδρολογικό κύκλο. Η μεταγωγή αφορά την ανακατανομή ενέργειας στο σύστημα ατμόσφαιρα-έδαφος-ωκεανοί και συνεπάγεται ατμοσφαιρική αστάθεια, με συνέπεια γενικά έντονες βροχοπτώσεις. Τέλος, η αγωγιμότητα ως διαδικασία μεταφοράς σημαίνει ανταλλαγή μορίων σε γειτνιάζοντα στρώματα της ατμόσφαιρας που βρίσκονται σε επαφή, όπως σε στρώματα με διαφορετικές θερμοκρασίες, όπου εμφανίζεται καθαρή μεταφορά θερμότητας, με αποτέλεσμα ασθενή υετό υπό τη μορφή ψεκάδων, δρόσου ή πάχνης.

Το **νερό** εμφανίζεται στην ατμόσφαιρα και με τις τρεις καταστάσεις ή μορφές του, δηλαδή την υγρή (βροχή, νέφη), τη στερεή (παγοκρύσταλλοι, χιόνι, χαλάζι) και την αέρια (υδρατμοί). Ανάμεσα στις διάφορες μορφές του, οι σπουδαιότερες είναι η βροχή, το χιόνι και το χαλάζι.

Η **βροχή** δημιουργείται όταν οι παγοκρύσταλλοι τήκονται κατά την κάθοδό τους ή οι βροχοσταγόνες διατηρούνται, με αποτέλεσμα να φτάνουν στο έδαφος ως υγρή μορφή υετού.

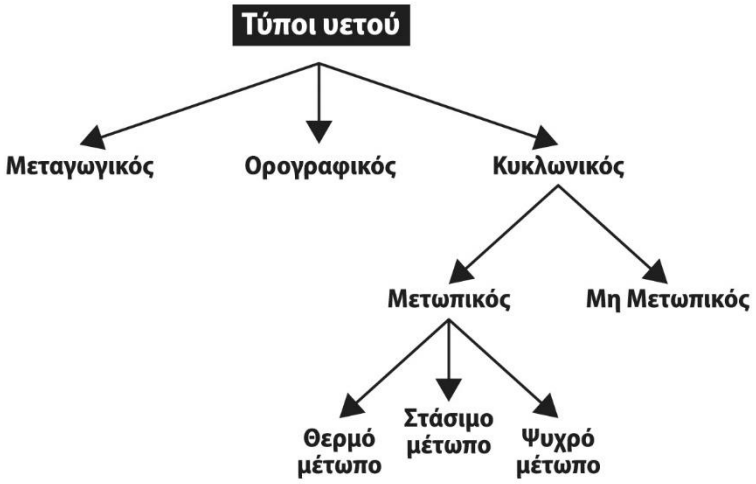
Το **χιόνι** είναι η συνηθέστερη από τις στερεές μορφές υετού. Αποτελείται από παγοκρυστάλλους, που φτάνουν στο έδαφος χωρίς να τηκούν, δηλαδή, τόσο μέσα στο νέφος, όσο και στο στρώμα αέρα μεταξύ νέφους και εδάφους, διατηρούνται θερμοκρασίες μικρότερες από 0^o C.

Το **χαλάζι** δημιουργείται πάντοτε μέσα σε νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης (C_b). Είναι συνήθως φαινόμενο τοπικού χαρακτήρα, μεγάλης έντασης, αλλά μικρής διάρκειας. Στη γεωργία, αποτελεί σημαντική αιτία φυσικών καταστροφών στις καλλιέργειες. Περισσότερα για το χαλάζι αναφέρονται στο Κεφάλαιο 14.

4.1.2.1. Τύποι υετού

Οι τύποι του υετού είναι τρεις, ο μεταγωγικός, ο ορογραφικός και ο κυκλωνικός. Αναλυτικότερα:

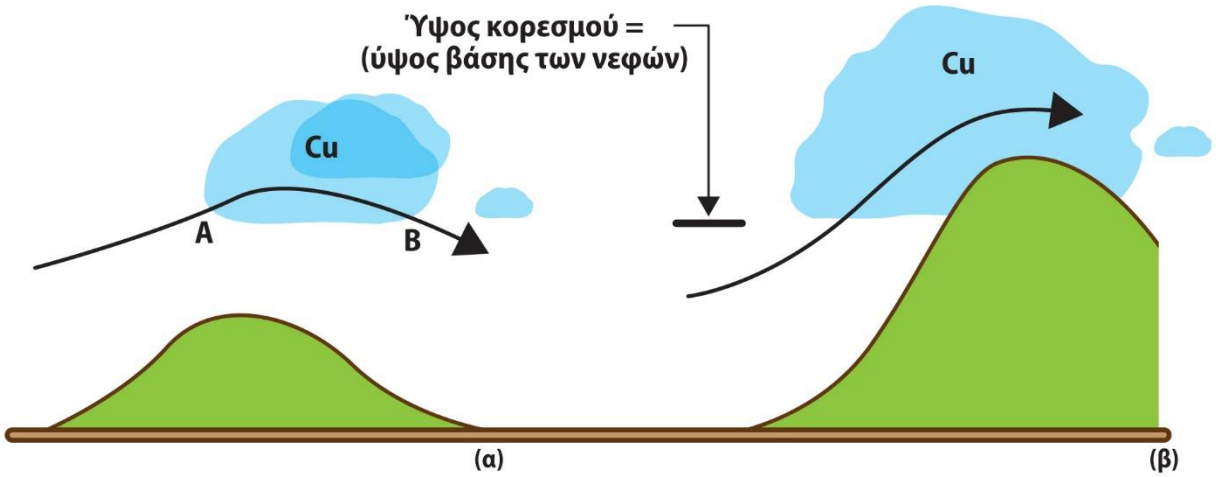
- Ο **μεταγωγικός** (convective) υετός προκαλείται από θέρμανση στην επιφάνεια του εδάφους, κυρίως τις θερμές ώρες της ημέρας, άνοδο των υδροσταγονιδίων προς τα πάνω, εξάπλωση με μείωση του βάρους, ανάπτυξη κατακόρυφων κινήσεων στην ατμόσφαιρα, λόγω δημιουργούμενης αστάθειας, με αποτέλεσμα έντονες βροχοπτώσεις και καταιγίδες (Σχήμα 4.2).
- Ο **ορογραφικός (orographic)** υετός δημιουργείται στην προσήνεμη πλευρά του όρους, λόγω μηχανικής ανύψωσης υγρών οριζόντιων αερίων ρευμάτων. Η εξαναγκασμένη αυτή άνοδος του αέρα ονομάζεται δυναμικό ανοδικό ρεύμα. Αν ο αέρας περιέχει αρκετούς υδρατμούς και αναγκάζεται να ανέλθει σε αρκετά μεγάλο ύψος, τότε φτάνει σε σημείο κορεσμού και δημιουργούνται στην προσήνεμη πλευρά του όρους νέφη, τα ονομαζόμενα ορογραφικά νέφη. Λόγω της ορογραφικής δράσης, οι ορογραφικές βροχές είναι συνήθως ραγδαίες και παρατεταμένες στην προσήνεμη πλευρά, κυρίως όταν προσπίπτουν πολύ υγρές αέριες μάζες, όπως οι προερχόμενες από τη θάλασσα (Σχήμα 4.3).
- Ο **κυκλωνικός (cyclonic)** υετός προκαλείται από την κυκλωνική κυκλοφορία της ατμόσφαιρας. Διακρίνεται σε μη μετωπικό και μετωπικό. Ο μη μετωπικός υετός δημιουργείται από βαρομετρικό χαμηλό στην επιφάνεια, με οριζόντια σύγκλιση στην περιοχή χαμηλών πιέσεων. Ο μετωπικός υετός δημιουργείται κατά τη διέλευση από μια περιοχή ψυχρού, θερμού ή στάσιμου μετώπου, αντίστοιχα, και ακολουθεί τα ισχύοντα για τα μέτωπα.



Σχήμα 4.2. *Τύποι υετού.*

4.2. Μέτρηση και εκτίμηση υετού με βροχομετρικά δίκτυα

Μεταξύ των συνιστωσών του υδρολογικού κύκλου, τα στοιχεία του υετού, ειδικά δε η βροχή και το χιόνι, είναι τα περισσότερο μετρούμενα. Η βροχή μετράται με βροχόμετρα ή αυτογραφικά όργανα, δηλαδή βροχογράφους, που παρέχουν τιμές για τον ολικό όγκο (m^3) ή για το ισοδύναμο ύψος της βροχής (mm) ανά μοναδιαία επιφάνεια. Τα όργανα αυτά θεωρούνται αρκετά αξιόπιστα για τη μέτρηση της σημειακής βροχόπτωσης. Ωστόσο, το ζητούμενο στις γεωπονικές επιστήμες είναι, μεταξύ των άλλων, η μέτρηση ή η εκτίμηση της περιοχικής βροχόπτωσης σε μια περιοχή ή σε μια λεκάνη απορροής. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιούνται είτε δίκτυα βροχομετρικών σταθμών εντός της λεκάνης απορροής είτε μέθοδοι τηλεπισκόπησης με ραντάρ καιρού ή μετεωρολογικούς δορυφόρους είτε, ακόμα, συνδυασμοί μερικών ή όλων των παραπάνω μεθόδων.
Υπάρχουν οι εξής κλασικές μέθοδοι εκτίμησης της περιοχικής βροχόπτωσης σε λεκάνες απορροής, που βασίζονται σε συμβατικά δίκτυα βροχομετρικών σταθμών, οι οποίες παρουσιάζονται συνοπτικά:



Σχήμα 4.3. *Ορογραφικά νέφη.*

- **Αριθμητικός μέσος**. Αποτελεί την απλούστερη αντικειμενική μέθοδο εκτίμησης της μέσης βροχόπτωσης σε μια περιοχή, με την οποία υπολογίζεται ο μέσος όρος των μετρήσεων όλων των βροχόμετρων μιας περιοχής για την εξεταζόμενη περίοδο. Για να είναι αξιόπιστη η μέθοδος, χρειάζεται το δίκτυο να είναι αντιπροσωπευτικό της περιοχής, η δε περιοχή να έχει ομοιόμορφη τοπογραφία, για να αποφεύγεται η επίπτωσή της στη χωρική μεταβλητότητα της βροχής.

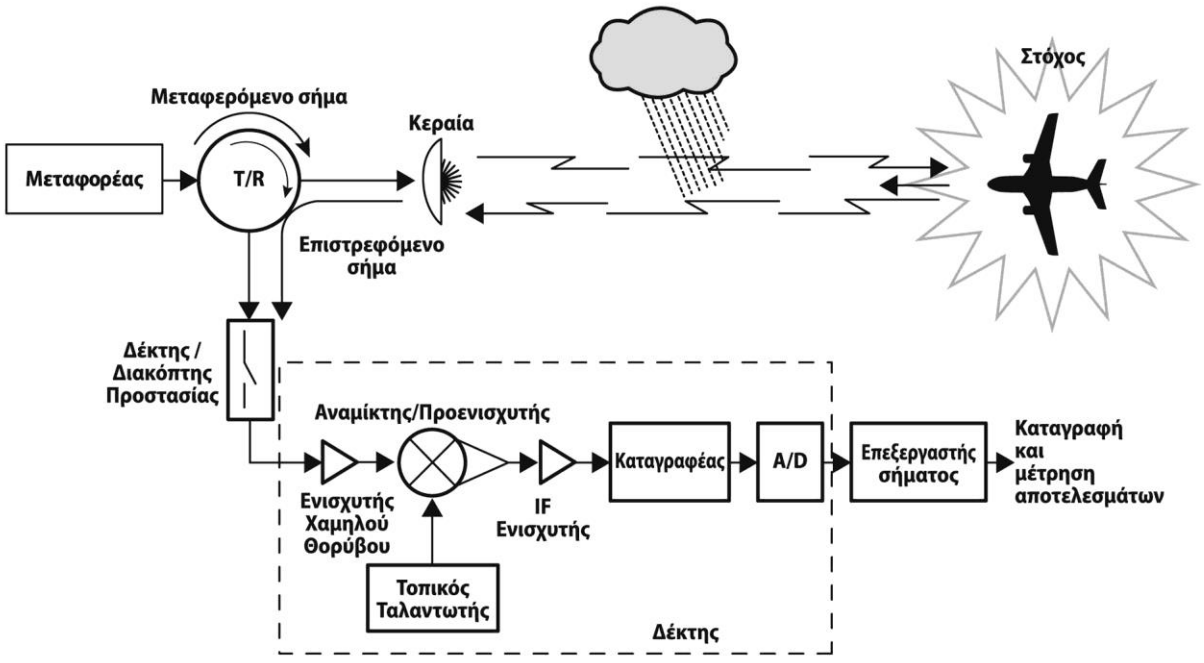
- **Πολύγωνα Thiessen**. Είναι από τις πλέον γνωστές διεθνώς αντικειμενικές μεθόδους (Thiessen,1911). Οι τιμές βροχόπτωσης κάθε σταθμού πολλαπλασιάζονται επί ένα σταθμικό μέσο και τελικά αθροίζονται. Η λεκάνη διαιρείται σε πολύγωνα, με βάση τη μεσοκάθετο μεταξύ των γειτονικών σταθμών ανά δύο, και έτσι υπολογίζεται το ποσοστό της λεκάνης που αντιπροσωπεύει κάθε σταθμός.
- **Ισοΰετη μέθοδος**. Θεωρείται από τις πλέον ακριβείς μεθόδους, αλλά είναι υποκειμενική, διότι βασίζεται στην εμπειρία και τη δεξιότητα των αναλυτών. Στο χάρτη της λεκάνης χαράσσονται ισούετες, δηλαδή ίσης βροχόπτωσης καμπύλες, που παρεμβάλλονται μεταξύ των βροχομέτρων.
- **Υψομετρική μέθοδος**. Λαμβάνεται υπόψη η τοπογραφία της λεκάνης, σε συνδυασμό με τις μετρημένες βροχοπτώσεις. Συνίσταται σε μικρές ή μεσαίες αντιπροσωπευτικές λεκάνες, σε ορεινές ή ημιορεινές περιοχές (WMO, 1965).
- **Πολυεδρική μέθοδος**. Επέκταση της προηγούμενης μεθόδου οδηγεί σε μια τρισδιάστατη μαθηματική περιγραφή της επιφάνειας βροχόπτωσης. Απαιτείται ανάπτυξη λογισμικού. Η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για διαφορετικές χρονικές περιόδους και προϋποθέτει τη χάραξη ισοϋέτων χαρτών της λεκάνης (Shaw & Lynn, 1972).

4.3. Εκτίμηση βροχόπτωσης με ραντάρ

4.3.1. Βασικές αρχές του ραντάρ καιρού

Το ραντάρ (radar: ακρώνυμο του όρου «RAdar Detection And Ranging») αποτελεί ένα ηλεκτρονικό σύστημα ανίχνευσης, εντοπισμού και ιχνηλάτησης αντικειμένων ή στόχων, όπως μεταλλικά αντικείμενα (π.χ. αεροσκάφη ή πλοία) ή νεφικά συστήματα (Σχήματα 4.4 και 4.5). Τα ραντάρ καιρού ή μετεωρολογικά ραντάρ λειτουργούν σε συχνότητες ευαίσθητες σε νεφικά συστήματα, δηλαδή ο στόχος είναι η τρισδιάστατη δομή καταιγίδων μέσα στη δέσμη του ραντάρ. Υπάρχουν και τα λεγόμενα ατμοσφαιρικά ραντάρ, με την κεραία στραμμένη κατακόρυφα προς τα πάνω, για μελέτες στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας.

Οι κύριες συνιστώσες του συστήματος ραντάρ είναι ο μεταδότης, που παράγει τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, η κεραία, που στέλνει το σήμα στην ατμόσφαιρα, και η συσκευή μετάδοσης/λήψης (T/R). Η συσκευή αυτή συνδέει την κεραία τόσο με το μεταδότη, όσο και με το δέκτη, και συγχρόνως παρέχει μόνωση μεταξύ των δύο μερών, για προστασία του ευαίσθητου δέκτη από το πολύ ισχυρό σήμα του μεταδότη. Τέλος, υπάρχει και ο ενδείκτης, που απεικονίζει το επιστρεφόμενο σήμα (Σχήμα 4.4). Κατά συνέπεια, το ραντάρ θεωρείται σύστημα ενεργής τηλεπισκόπησης.



Σχήμα 4.4. *Συνιστώσες συστήματος ραντάρ.*

Υπάρχουν τα συμβατικά ή μη συνεκτικά ραντάρ, που έχουν αναπτυχθεί από τις αρχές της δεκαετίας του 1950, και δεν συνυπολογίζουν τη φάση του επιστρεφόμενου κύματος σε σχέση με τη φάση του μεταδιδόμενου κύματος, δηλαδή εντοπίζουν τη θέση ενός στόχου και την ανακλαστικότητα Z του ραντάρ (Battan, 1973·Dalezios, 2012). Τα τελευταία περίπου 30 χρόνια (από το 1985) έχουν αναπτυχθεί τα συνεκτικά ραντάρ, που είναι Doppler ραντάρ ή/και ραντάρ πολικότητας (polarimetric) (Richards et al., 2010·Bringi & Chandrasekar, 2004). Τα Doppler ραντάρ μετρούν επιπλέον την ταχύτητα των στόχων κατά μήκος του άξονα της δέσμης του ραντάρ, σημειώνοντας το ρυθμό αλλαγής στη διαφορά φάσης μεταξύ εξερχόμενου και επιστρεφόμενου σήματος (Σχήμα 4.5).



Σχήμα 4.5. *Εικόνες διαφόρων τύπων συνεκτικών ραντάρ: α) ογκομετρικό ραντάρ, Γαλλία, β) Doppler ραντάρ, ΗΠΑ, γ) ραντάρ πολικότητας, ΗΠΑ.*

4.3.1.1. Παράμετροι του ραντάρ

Οι βασικές παράμετροι του ραντάρ είναι αρχικά η συχνότητα, στην οποία μεταδίδονται οι παλμοί, γνωστή ως **συχνότητα επανάληψης παλμών** (Pulse Repetition Frequency/PRF), f_r. Εφόσον η ενέργεια μεταδίδεται με την ταχύτητα του φωτός c (c = 2,998 x 10^8 m/s), το χρονικό διάστημα σε δευτερόλεπτα μεταξύ μετάδοσης και λήψης σήματος σχετίζεται με το **εύρος** ή την απόσταση r σε μέτρα του στόχου από τη θέση του ραντάρ και δίνεται από τη σχέση:

$$r = c \cdot (t/2). \quad (4.2)$$

Ισχύει για τη συχνότητα f του ημιτονοειδούς σήματος σε hertz ότι $f = 1/T_0$, όπου T_0 είναι η χρονική εξέλιξη του σήματος, δηλαδή η περίοδος σε δευτερόλεπτα. Συνδέοντας τις παραμέτρους χώρου και χρόνου του σήματος προκύπτει η σχέση:

$$f = c \cdot \lambda, \quad (4.3)$$

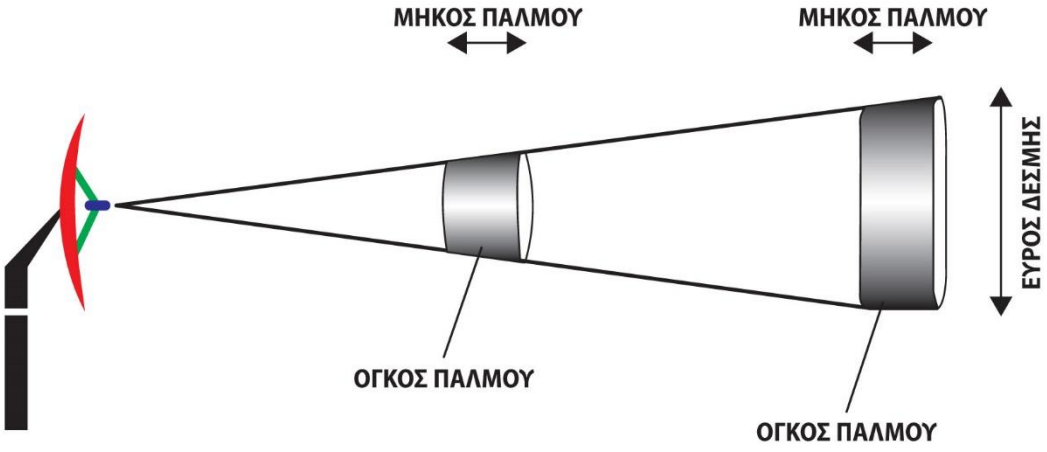
όπου λ είναι το **μήκος κύματος**, δηλαδή το μήκος της απόστασης μεταξύ δύο αιχμών του ημιτονοειδούς σήματος. Με βάση αυτά, παρατίθεται ο Πίνακας 4.1 για τα ραντάρ καιρού. Υπόψη ότι όσο μικρότερο είναι το μέγεθος των υδροσταγόνων, τόσο μικρότερο είναι και το μήκος κύματος για να τις προσδιορίσει, δηλαδή ραντάρ με μήκος κύματος 3 εκατ. (ή δέσμη X) προσδιορίζει μικρότερα σε μέγεθος υδροσταγονίδια.

Συχνότητες (GHz)	**Μήκος κύματος λ (σε cm)**	**Δέσμη (Band)**
18-27	1	K
8-12	3	X
4-8	5	C
2-4	10	S
1-2	20	L

Πίνακας 4.1. *Συχνότητες ραντάρ καιρού.*

Το μέγιστο εύρος r_{max} με βάση και την παραπάνω σχέση δίνεται από την:
$r_{max} = c \cdot (T_0/2) = c/(2 \cdot f_r)$, (4.4)

όπου f_r είναι η PRF.
επίσης, η διανυθείσα απόσταση από το σήμα ισούται με c/PRF. Για PRF = 1000 Hz, η απόσταση είναι περίπου 300 km, με αποτέλεσμα το μέγιστο εύρος του ραντάρ να είναι περίπου 150 km. Η ακρίβεια των μετρήσεων της αζιμούθιας γωνίας, καθώς και της γωνίας ύψους, είναι συνάρτηση του σχήματος της **δέσμης** που παράγεται από την κεραία. Τα ραντάρ καιρού διαθέτουν συμμετρικές δέσμες συνήθως 1°, που αυξάνουν σε όγκο με την απόσταση από την κεραία (Σχήμα 4.6).



Σχήμα 4.6. *Δέσμη ραντάρ.*

4.3.1.2. Η εξίσωση του ραντάρ

Από τα πρώτα στάδια ανάπτυξης του ραντάρ καιρού, γίνεται προσπάθεια εξεύρεσης της μαθηματικής σχέσης που απεικονίζει τη λειτουργία του συστήματός του (Σχήμα 3.4) και συνδέει τις παραμέτρους τόσο του συστήματος ραντάρ όσο και του στόχου, δηλαδή νεφικών συστημάτων ή καταιγίδων. Αναπτύσσεται, συνεπώς, η εξίσωση του ραντάρ, γνωστή και ως Marshall-Palmer εξίσωση (Marshall & Palmer, 1948), που ισχύει μέχρι σήμερα και δίνεται από τη σχέση:

$$\bar{P}_r = \frac{\pi^3 c}{1024 \ln 2} \left[\frac{P_t \tau G^2 \theta^2}{\lambda^2}\right] \left[|K|^2 \frac{Z}{r^2}\right], \quad (4.5)$$

όπου $\bar{P}_r$ είναι η μέση επιστρεφόμενη ισχύς, P_t η μεταδιδόμενη ή εκπεμπόμενη ισχύς, τ το μήκος παλμού σε μονάδες χρόνου (sec), G το μετρούμενο όφελος της κεραίας, Θ το οριζόντιο πλάτος δέσμης, Φ το κατακόρυφο πλάτος δέσμης, $|K|^2$ ο παράγοντας του δείκτη διάθλασης (για νερό, είναι 0,93 και, για πάγο, είναι 0,21), λ το μήκος κύματος, r το εύρος ή η απόσταση του στόχου (υετού) σε km. και Z η ανακλαστικότητα του ραντάρ (mm^6/m^3).
Η εξίσωση του ραντάρ αποτελείται από σταθερές, καθώς και παραμέτρους. Οι παράμετροι P_t, τ, G, Θ, Φ και λ θεωρούνται παράμετροι του συστήματος ραντάρ, ενώ οι παράμετροι $|K|^2$, Z και r θεωρούνται παράμετροι του στόχου (υετού).

4.3.2. Μετεωρολογία του ραντάρ

Τα ραντάρ καιρού είναι ραντάρ εδάφους. Το ραντάρ παράγει ηλεκτρομαγνητικά κύματα στο μεταδότη, η κεραία του εκπέμπει έναν μικρό παλμό ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε δοσμένη διεύθυνση και ένα μικρό ποσοστό της ενέργειας αυτής ανακλάται και διαχέεται από στόχους μετεωρολογικούς και μη μετεωρολογικούς, και τελικά επιστρέφει πίσω στην κεραία του (Σχήμα 3.4). Τα ραντάρ καιρού σαρώνουν την ατμόσφαιρα σε προεπιλεγμένες σχετικά χαμηλές γωνίες ύψους, δηλαδή από τον ορίζοντα ή 0° μέχρι περίπου 25° ανά 0,5° ή 1°. Η σάρωση γίνεται σε πολικές συντεταγμένες μέχρι 360° για κάθε γωνία ύψους ανά 0,1° και κάθε 300 ή 600 m απόσταση από τη θέση του ραντάρ, ανάλογα με τη συχνότητα λειτουργίας του. Η θέση του στόχου προσδιορίζεται από τη διεύθυνση του επιστρεφόμενου σήματος στην κεραία και η απόσταση υπολογίζεται από το χρόνο μετάβασης και επιστροφής των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από το ραντάρ στο στόχο. Ποσοτική ανάλυση μπορεί να γίνει για σήματα ραντάρ εύρους ή απόστασης μέχρι περίπου 150 km.

Η ανακλαστικότητα Z συνδέεται με την κατανομή του μεγέθους των υδροσταγόνων στο δείγμα όγκου του ραντάρ με τη σχέση:

$$Z = \int_0^\infty D^6 \cdot N_v \cdot (D) dD, \text{ (4.6)}$$

όπου το $N_v(D)dD$ αντιπροσωπεύει τον μέσο αριθμό υδροσταγόνων με ισοδύναμες σφαιρικές διαμέτρους μεταξύ D και D + dD (mm) ανά μοναδιαίο όγκο αέρα. Οι μονάδες του $N_v(D)$ είναι $mm^{-1}\ m^{-3}$.
Κατά συνέπεια, αν και το Z καλείται παράγοντας ανακλαστικότητας του ραντάρ, είναι καθαρά μετεωρολογικό μέγεθος, ανεξάρτητο από κάθε ιδιότητα του ραντάρ. Λόγω του πολύ μεγάλου εύρους τιμών, χρησιμοποιείται η λογαριθμική ανακλαστικότητα του ραντάρ, που ορίζεται ως 10 logZ και εκφράζεται σε μονάδες dBZ (Battan, 1973). Για ένα μεγάλο εύρος σταγόνων βροχής και χιονιού μεταξύ 1 και 23 mm/hr, ισχύει η σχέση:

$$N_v(D) = N_0 \exp(-\Lambda D), \text{ (4.7)}$$

όπου N_0 ($mm^{-1}\ m^{-3}$) είναι η σύντμηση του $N_v(0)$ και Λ (mm^{-1}) η κλίση της ημιλογαριθμικής καμπύλης $N_v(D)$.
Έχει βρεθεί (Marshall και Palmer, 1948) ότι ο N_0 παρουσιάζει περίπου σταθερά τιμή, την $N_0 = 8 \times 10^3$, ανεξάρτητα από την ένταση της βροχής, και ότι το Λ μειώνεται με την αύξηση της έντασης της βροχής R (mm/hr), σύμφωνα με τη σχέση:

$$\Lambda = 4.1\ R^{-0.21}. \text{ (4.8)}$$

Υπό την προϋπόθεση ότι δεν λαμβάνονται υπόψη οι αναταράξεις που προκαλεί ο άνεμος και οι επιπτώσεις στις υδροσταγόνες, η ένταση της βροχής R (mm/hr) συνδέεται με την κατανομή μεγέθους υδροσταγόνων $N_v(D)$ με την εξίσωση:

$$R = 6 \cdot \pi \cdot 10^{-4} \int_0^\infty D^3 \cdot v(D) \cdot N_v(D) dD, \text{ (4.9)}$$

όπου v(D) είναι η συναρτησιακή σχέση μεταξύ της τελικής ταχύτητας των υδροσταγόνων και της ισοδύναμης σφαιρικής διαμέτρου D(mm) των υδροσταγόνων, και δίνεται από τη σχέση:

$$v(D) = c \cdot D^\gamma, \text{ (4.10)}$$

όπου συνήθως c = 3,778 και γ = 0,67 για εύρος σταγόνων βροχής $0,5 \leq D \leq 5$ mm.
Με βάση μετρήσεις κατανομών μεγέθους υδροσταγόνων στο έδαφος και την εξίσωση (3.25), για v(D), μπορεί να εξαχθούν εμπειρικές σχέσεις Z – R μέσω παλινδρόμησης. Γενικά, οι σχέσεις αυτές ακολουθούν τη μορφή (Battan, 1973):

$$Z = a \cdot R^b = \sum (D/2)^6, \text{ (4.11)}$$

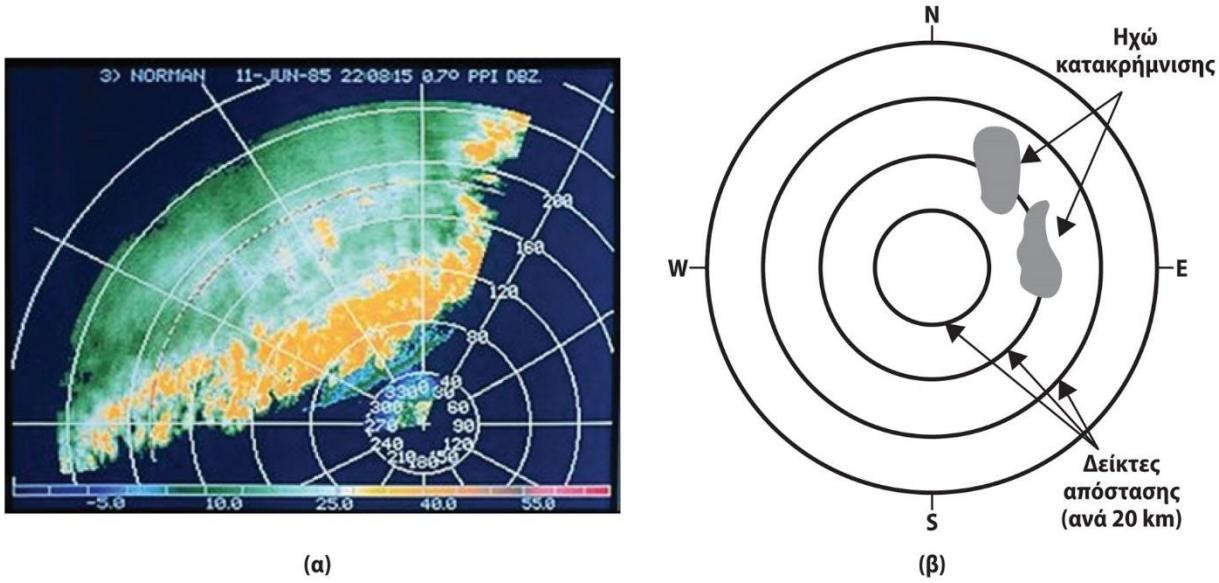
όπου a και b είναι συντελεστές που μεταβάλλονται στο χώρο και στο χρόνο, αλλά παραμένουν ανεξάρτητοι από την ένταση της βροχής R. Οι συντελεστές αυτοί εκφράζουν τα κλιματικά χαρακτηριστικά μιας περιοχής ή, καλύτερα, τον τύπο του υετού.
Στον Πίνακα 4.2 περιλαμβάνονται τυπικές σχέσεις Z – R για διάφορους τύπους υετού (Dalezios, 1988).

Τύπος υετού	**Σχέση Z-R**
Στρατόμορφα	$Z = 200R^{1.6}$
Ορογραφική βροχή	$Z = 31R^{1.7}$
Καταιγίδες	$Z = 486R^{1.37}$
Χιόνι	$Z = 2.000R^2$

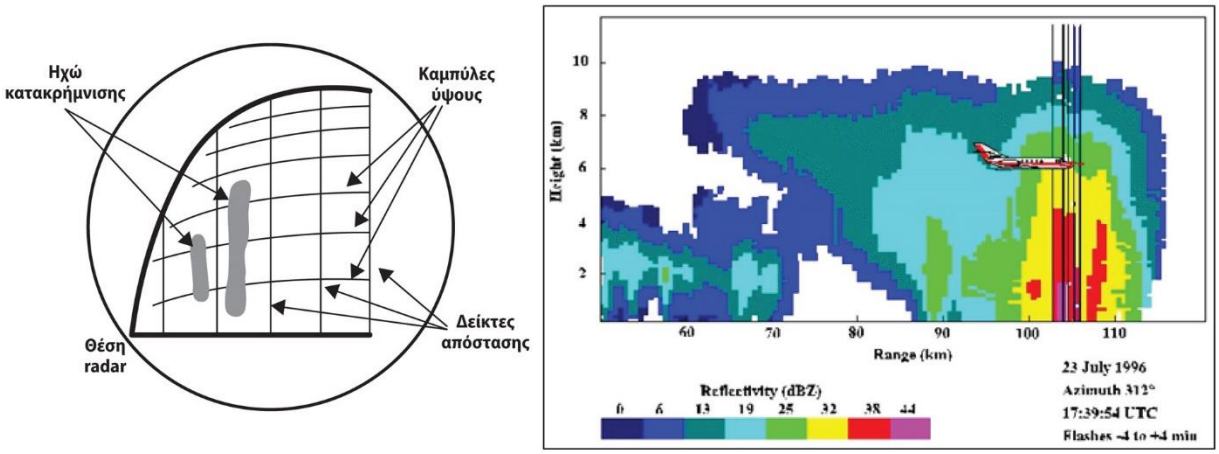
Πίνακας 4.2. *Τυπικές σχέσεις Z – R.*

Στο Σχήμα 4.7 απεικονίζεται η θέση των ανακλαστικοτήτων Z του ραντάρ από καταιγίδες (Plan Position Indicator/PPI) σε πολικές συντεταγμένες, για επιλεγμένη γωνία ύψους. Αντίστοιχα, στο Σχήμα 4.8 απεικονίζεται σε δύο γραφήματα η σχέση απόστασης και ύψους (Range Height Indicator/RHI) των

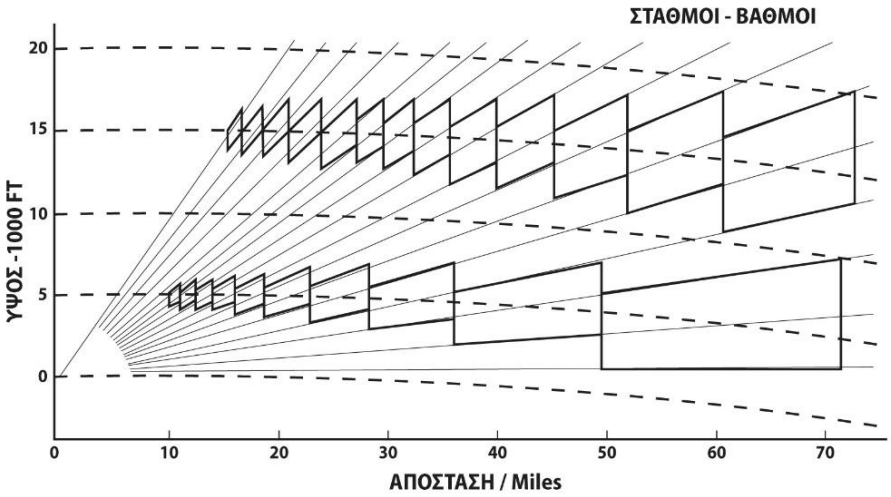
ανακλαστικοτήτων του ραντάρ. Επιπλέον, στο Σχήμα 4.9 απεικονίζονται οι γραμμές σταθερού υψομέτρου διορθωμένες, λόγω της καμπυλότητας της Γης (Constant Altitude Plan Position Indicator/CAPPI) και τα τετράπλευρα ανακλαστικότητας σε σχέση με την απόσταση από τη θέση του ραντάρ. Στο Σχήμα 4.10 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα εικόνας Cappi στο 1,5 km τα ου ραντάρ του Montreal. Τέλος, στο Σχήμα 4.11 παρουσιάζεται η στόχευση της δέσμης του ραντάρ προς ένα νέφος.



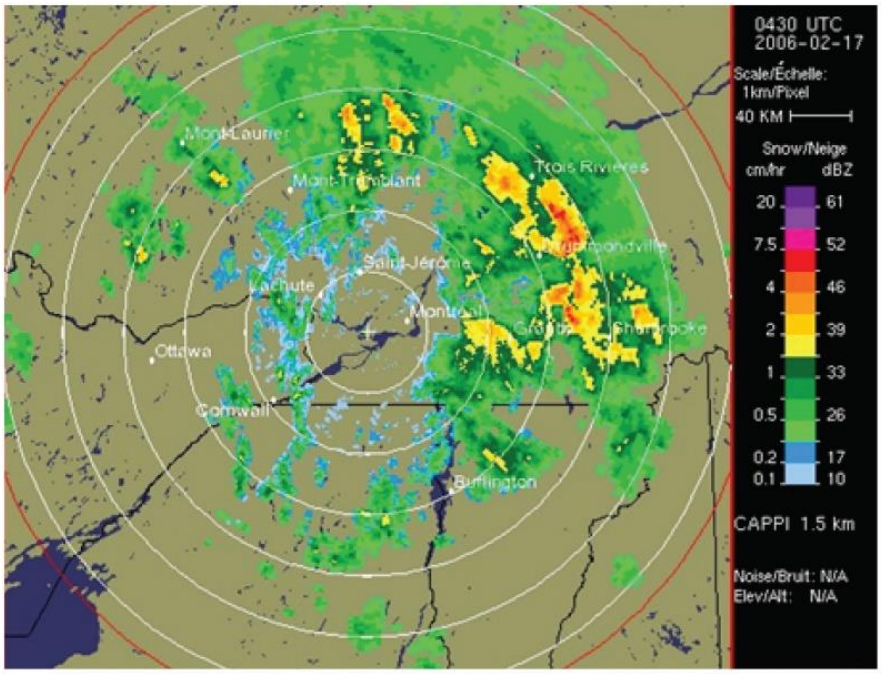
Σχήμα 4.7. *Ενδείκτης PPI του ραντάρ (α) 0,7^0 γωνία ύψους σε εκτεταμένο χαλάζι, (β) δύο μεμονωμένα κύτταρα βροχής*



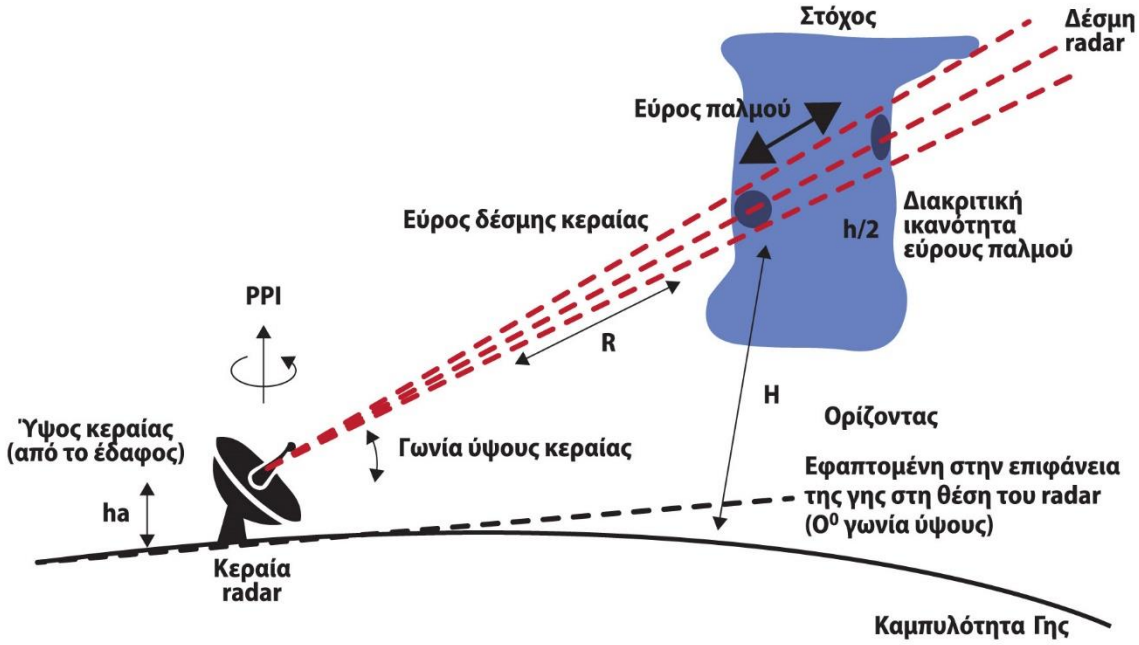
Σχήμα 4.8. *Ενδείκτης RHI του ραντάρ.*



Σχήμα 4.9. *Ενδείκτης CAPPI του ραντάρ.*



Σχήμα 4.10. *Εικόνα Cappi στο 1,5 km του ραντάρ.*



Σχήμα 4.11. *Η διαδρομή της δέσμης του ραντάρ με το ύψος ανίχνευσης βροχοφόρου νέφους (στόχος).*

Πλεονεκτήματα, μειονεκτήματα, εφαρμογές και πηγές σφαλμάτων ραντάρ

Τα πλεονεκτήματα, τα μειονεκτήματα, οι εφαρμογές και οι πηγές σφαλμάτων του ραντάρ καιρού παρουσιάζονται στη συνέχεια συνοπτικά:

1. Πλεονεκτήματα του ραντάρ

Μερικά βασικά πλεονεκτήματα της χρήσης του ραντάρ είναι:

- Ακριβής οριοθέτηση της έκτασης της χωρικής κατανομής της βροχόπτωσης για περιοχές μέχρι 50.000 km^2.
- Πολύ καλή διακριτική ικανότητα. Χωρική: 0.1° x 300 ή 600 m. Χρονική: πλήρης σάρωση 360°, για γωνίες ύψους μέχρι περίπου 22°-25° και εύρος μέχρι 150 km. Διαρκεί περίπου 10 λεπτά.
- Υπολογισμός περιοχικής βροχόπτωσης, που θα απαιτούσε πυκνά βροχομετρικά δίκτυα. επίσης, κάλυψη απομακρυσμένων περιοχών.
- Παροχή χωρικών και χρονικών συνεχών μετρήσεων, που διατίθενται άμεσα σε μια θέση. Τα δεδομένα είναι δυνατόν να μεταφέρονται ηλεκτρονικά σε χρήστες, σε συνθήκες πραγματικού χρόνου.
- Ιχνηλάτηση βροχόπτωσης και μεμονωμένων καταιγίδων.
- Αξιοπιστία στην εκτίμηση του χρόνου αιχμής του υδρογραφήματος πλημμύρας.

2. Μειονεκτήματα του ραντάρ

Τα βασικά μειονεκτήματα της χρήσης του ραντάρ είναι:

- Υψηλό κόστος απόκτησης και εγκατάστασης ενός συστήματος ραντάρ.
- Υψηλό κόστος λειτουργίας-συντήρησης και ανάγκη εξειδικευμένου προσωπικού.
- Μεγάλη προεπεξεργασία, επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων, μέχρι να αποκτηθούν μετρήσεις και εκτιμήσεις περιοχικής βροχόπτωσης.
- Μείωση της ακρίβειας για σημειακές μετρήσεις και εκτιμήσεις βροχόπτωσης σε σχέση με βροχόμετρα.
- Αβεβαιότητες και πηγές σφαλμάτων στην τεχνολογία του ραντάρ.

3. Εφαρμογές του ραντάρ

Το ραντάρ καιρού χρησιμοποιείται όπου απαιτείται το στοιχείο της βροχόπτωσης. Αναφέρονται ενδεικτικά χρήσεις και εφαρμογές, που περιλαμβάνουν και τις γεωπονικές επιστήμες, όπως: αρδεύσεις, πλημμύρες και ξηρασίες, διαχείριση υδατικών πόρων, ιχνηλάτηση νεφικών συστημάτων και καταιγίδων, έντονα καιρικά φαινόμενα, δασοπονία και χρήσεις γης, μεταφορές και επικοινωνίες, καθώς και τροποποίηση καιρού (αύξηση βροχής ή καταπολέμηση χαλαζιού).

4. Πηγές σφαλμάτων του ραντάρ

Οι βασικές πηγές σφαλμάτων του ραντάρ, που συνεισφέρουν στην εκτίμηση της βροχόπτωσης, είναι:

- Εξασθένηση του σήματος με την απόσταση από το ραντάρ, ως συνάρτηση της συχνότητας και του μήκους κύματος.
- Μη ομοιόμορφη πλήρωση της δέσμης του ραντάρ, ως συνάρτηση της απόστασης από τη θέση του ραντάρ.
- Διαφοροποίηση στον κρυσταλλικό τύπο χιονιού, με επίπτωση στην ανακλαστικότητα του σήματος του στόχου.
- Επίδραση του ανέμου μεταξύ γωνίας ύψους μέτρησης και εδάφους, και ως συνάρτηση της απόστασης από τη θέση του ραντάρ. Αντίστοιχα, εξάτμιση ή δημιουργία βροχής μεταξύ γωνίας ύψους μέτρησης και εδάφους.
- Ηχώ σταθερών μη μετεωρολογικών στόχων, όπως βουνά, ως συνάρτηση της απόστασης και της γωνίας ύψους.
- Ανώμαλη διάδοση του σήματος και λόγω της καμπυλότητας της Γης.
- Συγκράτηση της δέσμης από τη στάθμη παγοποίησης.
- Συχνότητα συλλογής στοιχείων του ραντάρ.
- Παρουσία χαλαζιού ή άλλων υδρομετεώρων.
- Σφάλματα στον μέσο όρο της επιστρεφόμενης ισχύος, λόγω ισχυρών χωρικών μεταβολών (βαθμίδας) του υετού.
- Σφάλματα ηλεκτρονικής βαθμονόμησης του ραντάρ.
- Μεταβολές στην κατανομή μεγέθους υδροσταγόνων, με επίπτωση στη σχέση Z – R.

Τρέχοντες τύποι ραντάρ καιρού

Υπάρχουν τρεις σχετικά νέοι τύποι ραντάρ, που έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία 30 χρόνια και χρησιμοποιούνται σήμερα. Πρόκειται για το ογκομετρικό ραντάρ, το Doppler ραντάρ και το ραντάρ πολικότητας (Σχήμα 4.5.). Ειδικότερα:

1. Ογκομετρικό ραντάρ (voluminal radar)

Πρόκειται για τύπο συμβατικού ραντάρ, που μπορεί να απεικονίζει την ένταση μιας καταιγίδας, αλλά μόνο σε σχέση με τον υετό. Ειδικότερα, μπορεί να υπολογίζει την ένταση βροχόπτωσης και το συνολικό ποσό υετού εντός της τετραδιάστατης (4D) δομής του υετού. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιεί διαδοχικές ενδείξεις PPI (Σχήμα 4.7). Τα πλεονεκτήματα του ογκομετρικού ραντάρ στην απεικόνιση σε σχέση με τα κλασικά συμβατικά ραντάρ είναι, συνοπτικά:

- Εντοπισμός της δέσμης και της θέσης του υετού σε σχέση με την έντασή του, μέσω της τετραδιάστατης δομής.
- Ηχώ «αγκίστρου» ή «αγκώνα», όταν πρόκειται για ισχυρά κυκλωνικά συστήματα μέσης κλίμακας.
- Διόρθωση του κατακόρυφου προφίλ της ανακλαστικότητας.
- Διάκριση μεταξύ τύπων υετού και βελτίωση της εκτίμησης βροχόπτωσης.

2. Doppler ραντάρ

Βασίζονται στην «επίπτωση Doppler» ή «μεταβολή Doppler», που αναφέρεται στην αλλαγή της συχνότητας ενός κύματος ή, γενικά, ενός περιοδικού συμβάντος, για κάποιον παρατηρητή κινούμενο σε σχέση με την πηγή. Κατά συνέπεια, η κίνηση του στόχου στο επιστρεφόμενο σήμα επιβάλλει αλλαγή στη συχνότητα του κύματος ανάλογη με την ταχύτητα του στόχου. Το Doppler ραντάρ στέλνει μια δέσμη μικροκυματικού σήματος προς έναν επιθυμητό στόχο, καταγράφει την αντίδραση και αναλύει τη μεταβολή του επιστρεφόμενου σήματος από την κίνηση του στόχου. Ως γνωστόν, τα ραντάρ καιρού δεν μετρούν την ακτινική ταχύτητα των μετεωρολογικών στόχων, καθόσον η μεταβολή της συχνότητας είναι πολύ μικρή. Στην περίπτωση αυτή, υπολογίζεται η μεταβολή φάσης και τελικά εκτιμάται η ταχύτητα. Από τη μέτρηση της ακτινικής ταχύτητας του στόχου είναι εύκολο να εξαχθούν πληροφορίες για τη μονοδιάστατη (1D) ταχύτητα ανέμου (Σχήμα 4.12). Επισημαίνεται ότι μόνο μια συνιστώσα του διανύσματος του ανέμου μπορεί να μετρηθεί, η ακτινική συνιστώσα.

Βασικά πλεονεκτήματα και χαρακτηριστικά του Doppler ραντάρ είναι:

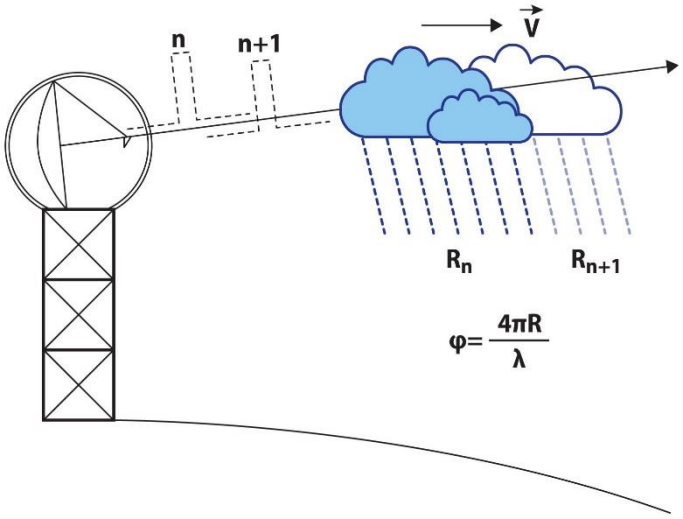
- Εντοπισμός της δέσμης και της θέσης, καθώς και της έντασης του υετού, δηλαδή της τετραδιάστατης δομής του.
- Καταγραφή ανεμοστροβίλων και κυκλώνων μέσης κλίμακας.

- Υπολογισμός της διατμητικής τάσης του ανέμου, δηλαδή της κατακόρυφης μεταβολής του.
- Κάθε πληροφορία σχετικά με τη μονοδιάστατη δομή του πεδίου του ανέμου.
- Δυνατότητα απεικόνισης δισδιάστατων και τρισδιάστατων πεδίων ανέμου, μέσω προσομοίωσης ή χρήσης πρόσθετων Doppler ραντάρ.

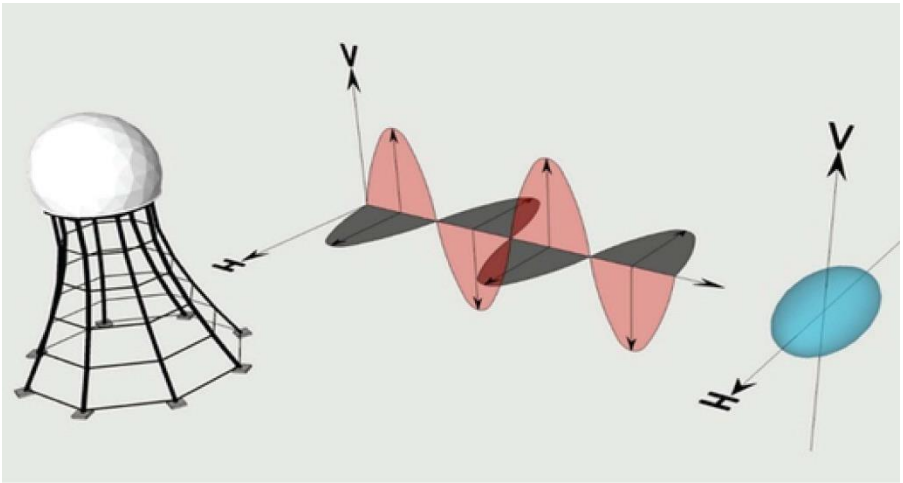
3. Ραντάρ πολικότητας (polarimetric radar)

Τα συμβατικά ραντάρ καιρού μεταδίδουν και λαμβάνουν ραδιοκύματα με μόνο μία οριζόντια πόλωση. Αντίθετα, το ραντάρ πολικότητας μεταδίδει και λαμβάνει οριζόντιες, αλλά και κατακόρυφες πολώσεις (Σχήμα 4.13). Η πλέον κοινή μέθοδος μείξης οριζόντιων και κατακόρυφων παλμών μαζί σε ένα σχήμα μετάδοσης είναι η εναλλαγή μεταξύ οριζόντιων και κατακόρυφων πολώσεων με κάθε διαδοχικό παλμό. Το ραντάρ πολικότητας αναφέρεται επίσης και ως ραντάρ διπλής πόλωσης (Σχήμα 4.13).

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται μερικές παράμετροι του ραντάρ πολικότητας που του προσδίδουν σημαντικά **πλεονεκτήματα**:



Σχήμα 4.12. *Μετρήσεις με Doppler ραντάρ, όπου φ είναι η φάση, V η ταχύτητα και R το ποσοστό βροχόπτωσης.*



Σχήμα 4.13. *Πόλωση του ραντάρ πολικότητας.*

- Διαφορική ανακλαστικότητα (differential reflectivity) $Z_{DR,}$ που δίνεται από τη σχέση:

$Z_{DR} = 10 \log 10 (Z_{HH}/Z_{VV})$, (4.12)

όπου Z_{HH} και Z_{VV} είναι οι ανακλαστικότητες της οριζόντιας και κατακόρυφης πόλωσης, αντίστοιχα, στη μετάδοση και λήψη σήματος. Η Z_{DR} εξαρτάται από το πρότυπο των σταγόνων και όχι από τον αριθμό τους, δηλαδή από τον τύπο υετού, δηλαδή μπορεί να γίνει άμεσα διάκριση μεταξύ, για παράδειγμα, βροχής και χαλαζιού, που θεωρείται πάρα πολύ σημαντικό. Επιπλέον, η Z είναι ευαίσθητη στην εξασθένηση του σήματος, που είναι μεγαλύτερη οριζόντια παρά κατακόρυφα, με συνέπεια η Z_{DR} να υπερεκτιμάται συνήθως λόγω εξασθένησης.
- Συντελεστής συσχέτισης ρ_{HV} μεταξύ χρονοσειρών Z_H και Z_V. Ο συντελεστής συσχέτισης είναι πολύ χρήσιμος στον υπολογισμό μη μετεωρολογικών στόχων, όπως είναι τα βουνά, καθώς και σε προβλήματα ανώμαλης διάδοσης σήματος.
- Διαφορική φάση φ_{DP} είναι η συσσωρευμένη μετατόπιση της φάσης μεταξύ οριζόντιων (H) και κατακόρυφων (V) πολωτικών κυμάτων. Η φ_{DP} εξαρτάται από την απόσταση του στόχου, αλλά δεν είναι ευαίσθητη στην εξασθένηση του σήματος.
- Λόγος γραμμικής αποπόλωσης L_{DR} , που δίνεται από τη σχέση:

$L_{DR} = 10 \log 10 (Z_{HV}/Z_H)$. (4.13)

Θεωρείται χρήσιμη παράμετρος, για τον υπολογισμό των μη μετεωρολογικών στόχων και της ζώνης λαμπρότητας.
Οι δυνατότητες και τα **χαρακτηριστικά** του ραντάρ πολικότητας είναι, συνοπτικά:
- Προσδιορισμός του τύπου των υδρομετεώρων, δηλαδή διάκριση μεταξύ πάγου, χαλαζιού (και μέγεθος), χιονιού και βροχής, ακόμα και σε χειμερινές καταιγίδες.
- Βελτίωση εκτίμησης της έντασης της βροχής, ακόμα και με εξασθένηση του σήματος, καθώς και βελτίωση εκτίμησης της έντασης του χιονιού. Εκτίμηση της διαμέτρου των σταγόνων.
- Αναγνώριση του τύπου του στόχου, δηλαδή διάκριση μεταξύ μετεωρολογικών (π.χ. καταιγίδων) και μη μετεωρολογικών στόχων (π.χ. βουνών).
- Προσδιορισμός και διόρθωση πηγών σφαλμάτων του ραντάρ, όπως μετεωρολογικοί στόχοι, ανώμαλη διάδοση, ζώνη λαμπρότητας και εξασθένηση σήματος.

4.3.3. Εκτίμηση περιοχικής βροχόπτωσης με ραντάρ

Η περιοχική βροχόπτωση ενδιαφέρει τις γεωπονικές επιστήμες και γενικά τις επιστήμες περιβάλλοντος. Το ραντάρ καιρού μετρά με πολύ μεγάλη ακρίβεια και πιστότητα την περιοχική κάλυψη και την έκταση του υετού. Ωστόσο, υστερεί στην ποσοτική μέτρηση και εκτίμηση του υετού σε σχέση με σημειακές μετρήσεις βροχομέτρων, αφενός, λόγω διαφορετικής δειγματοληψίας, καθώς το ραντάρ ανιχνεύει και ιχνηλατεί τις καταιγίδες στις τρεις διαστάσεις (όγκος), και, αφετέρου, λόγω των ορίων και των περιορισμών της τεχνολογίας του, που συνεπάγεται έναν αριθμό πηγών σφαλμάτων. Κρίνεται σκόπιμο να επισημανθεί το τεράστιο μέγεθος της έρευνας, που πραγματοποιείται σταθερά διεθνώς από το τέλος του Β΄ Παγκόσμιου Πολέμου μέχρι σήμερα, με διεθνή συνέδρια κάθε 18 μήνες περίπου και πολύτομα πρακτικά και αναρίθμητες άλλες δημοσιεύσεις. Ωστόσο, η βελτίωση της ακρίβειας των εκτιμήσεων θεωρείται οριακή.
Σήμερα υπάρχουν δύο γενικές προσεγγίσεις για την εκτίμηση της βροχόπτωσης με ραντάρ. Η πρώτη είναι η παραδοσιακή, που χρησιμοποιεί αιτιοκρατικές ή προσδιοριστικές μεθοδολογίες και αλγόριθμους, για την επίλυση και τη διόρθωση των διαφόρων πηγών σφαλμάτων του ραντάρ. Η προσέγγιση αυτή ακολουθείται συνήθως από τους μετεωρολόγους που πρώτοι ασχολήθηκαν με τα θέματα του ραντάρ. Η δεύτερη είναι η διμεταβλητή στατιστική ανάλυση, που χρησιμοποιεί συνδυαστικά αρχικές εκτιμήσεις βροχόπτωσης με ραντάρ, μέσω της σχέσης Z – R, με δίκτυα επίγειων βροχομετρικών σταθμών, για την αντικειμενική εκτίμηση του περιοχικού υετού. Ιδανικά, ο συνδυασμός των δύο προσεγγίσεων φαίνεται ότι είναι η βέλτιστη λύση, καθόσον αφενός η προσδιοριστική διόρθωση κάποιων σφαλμάτων του ραντάρ θεωρείται αναπόφευκτη, αφετέρου η στατιστική μέθοδος παρουσιάζει αντικειμενικότητα για περιοχικές εκτιμήσεις. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται συνοπτικά οι εμπειρικές διμεταβλητές μέθοδοι, καθώς και η διμεταβλητή στατιστική ανάλυση.

- **Εμπειρικές διμεταβλητές μέθοδοι**. Στην εξεταζόμενη περιοχή ή λεκάνη απορροής δημιουργείται ένα τετραγωνικό πλέγμα με τη μέθοδο της εσχάρας με ιχνοστοιχεία (pixels) μοναδιαίας επιφάνειας συνήθως 1 km^2. Σε κάθε ιχνοστοιχείο υπολογίζεται η βροχόπτωση με μεθόδους χωρικής στατιστικής παρεμβολής, όπως γεωστατιστική ανάλυση, από το υπάρχον βροχομετρικό δίκτυο της λεκάνης. Κάθε τιμή βροχόπτωσης ιχνοστοιχείου πολλαπλασιάζεται επί έναν σταθμικό συντελεστή και εξάγεται η τελική τιμή βροχόπτωσης του ιχνοστοιχείου. Με τον τρόπο αυτό, δημιουργείται το δισδιάστατο πεδίο βροχόπτωσης της λεκάνης από βροχόμετρα. Αντίστοιχα, το πεδίο βροχόπτωσης της λεκάνης από ραντάρ δημιουργείται μέσω της σχέσης Z – R για κάθε ιχνοστοιχείο, αφού προηγουμένως έχει γίνει αναγωγή στις ανακλαστικότητες Z του ραντάρ από πολικές σε καρτεσιανές συντεταγμένες. Ο συνδυασμός των δύο πεδίων χρησιμοποιείται για την τελική εκτίμηση της περιοχικής βροχόπτωσης της λεκάνης (Brandes, 1975). Παράδειγμα σταθμικού συντελεστή αποτελεί η εξής εξίσωση του μοντέλου της αντίστροφης απόστασης:

$$W_i(x, y) = (1/d_i^n)/\sum (1/d_i^n), \quad (4.14)$$

όπου $w_i(x, y)$ είναι ο σταθμικός συντελεστής για το βροχόμετρο i του ιχνοστοιχείου με συντεταγμένες (x, y), d_i είναι η απόσταση σε km του μέσου σημείου του ιχνοστοιχείου από το βροχόμετρο i και ο εκθέτης n είναι ένας εμπειρικός συντελεστής, που συνήθως παίρνει τιμές μεταξύ 1 και 2.

- **Διμεταβλητή στατιστική ανάλυση**. Με τη μέθοδο αυτή επιχειρείται όχι απλώς μια προσαρμογή των μετρήσεων ραντάρ, αλλά, μάλλον, μια πληρέστερη εξήγηση των διαφορών που εμπεριέχονται στα διμεταβλητά πεδία δεδομένων (Dalezios, 1988). Η διμεταβλητή στατιστική αντικειμενική ανάλυση δίνεται από τη σχέση:

$$Y = X_r\ b_r + X_g\ b_g, \quad (4.15)$$

όπου Y είναι η εκτίμηση της άγνωστης «αληθινής» επιφανειακής βροχόπτωσης Y, X_r η εκτίμηση της βροχόπτωσης από ραντάρ για ένα ιχνοστοιχείο, X_g η εκτίμηση της βροχόπτωσης από το πεδίο βροχομέτρων για το ίδιο ιχνοστοιχείο, b_r και b_g οι εκτιμήσεις των συντελεστών παλινδρόμησης σχετικά με το πεδίο ραντάρ και βροχομέτρων, αντίστοιχα, για κάθε χρονικό βήμα.
Επειδή τα δεδομένα μπορεί να παρουσιάζουν χωρική συσχέτιση μεταξύ τους, με αποτέλεσμα οι συντελεστές παλινδρόμησης να μην είναι ελάχιστης διακύμανσης, τότε χρησιμοποιούνται σταθμικοί συντελεστές ελάχιστων τετραγώνων ως εξής:.

$$b_w = (X^T W X)^{-1} (X^T W Y, \quad (4.16)$$

όπου b_w είναι ένα διάνυσμα 2 x 1, W ο σταθμικός πίνακας, $C = X^TWX$ ένας 2 x 2 πίνακας συνδιακύμανσης και $c = X^TWY$ το διάνυσμα διασυνδιακύμανσης (2 x 1) της άγνωστης «αληθινής» επιφανειακής βροχόπτωσης. Βασικός περιορισμός είναι ότι ο σταθμικός πίνακας W πρέπει να είναι συμμετρικός, θετικός και ορισμένος. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη σχέση:

$$W = R^{-1}, \text{ όπου } R = E[e^T e], \quad (4.17)$$

όπου R είναι ο πίνακας σφάλματος συνδιακύμανσης και E(.) η μαθηματική ελπίδα.
Από τα παραπάνω συνεπάγεται ότι είναι απαραίτητη η προσομοίωση του τυχαίου πεδίου e(x, y) δύο διαστάσεων. Εφαρμόζεται, λοιπόν, στον πίνακα σφάλματος συνδιακύμανσης μια χωρική συνάρτηση δύο διαστάσεων, που είναι ομογενής, ισοτροπική, ακολουθεί την κατανομή Gauss και μοναδιαίας διακύμανσης, και παίρνει τη μορφή:

$$r(d) = \exp(-a\ d^2), \quad (4.18)$$

όπου $d^2 = u^2 + v^2 = (x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2$ είναι η τετραγωνική απόσταση κάθε ζεύγους σημείων στο χώρο (x_1, y_1) και (x_2, y_2), και a η παράμετρος απόστασης ή απόσταση αποσυσχέτισης, στη οποία ο συντελεστής αυτοσυσχέτισης μειώνεται στην τιμή 1/e. Η παράμετρος a είναι συνάρτηση μετεωρολογικών παραμέτρων και μεταβάλλεται χρονικά, ακόμα και εντός της ίδιας καταιγίδας.

Τέλος, απαιτείται προσομοίωση του διανύσματος διασυνδιακύμανσης c = X^TWY, εφόσον η «αληθινή» επιφανειακή βροχόπτωση Y είναι άγνωστη. Στην παρούσα περίπτωση, χρησιμοποιείται η τριγωνική συνάρτηση συσχέτισης, που έχει τη μορφή:

$$\rho(|x - x_i|) = \begin{cases} 1 - \gamma|x - x_i| \,, \gamma\iota\alpha\ |x - x_i| \ \leq\ 1/\gamma \\ 0 \end{cases}, \quad (4.19)$$

όπου το γ παίρνει την τιμή 0,1.

4.4. Εκτίμηση βροχόπτωσης με δορυφόρους

Ο υετός θεωρείται από τα πλέον μεταβλητά μετεωρολογικά μεγέθη στο χώρο και στο χρόνο. Επίσης, παρουσιάζει άμεση επίπτωση στην ανθρώπινη ζωή, όπως έντονες καταιγίδες και αστραπιαίες πλημμύρες (flash floods). Βασικός στόχος της εκτίμησης βροχόπτωσης από δορυφόρους είναι η παροχή πληροφοριών για την εμφάνιση, το μέγεθος και την κατανομή της βροχόπτωσης στον πλανήτη, όσον αφορά όλο το εύρος των περιβαλλοντικών εφαρμογών και χρήσεων. Ωστόσο, μόλις πρόσφατα οι νέοι δορυφόροι σε τροχιά και οι προγραμματιζόμενες πλατφόρμες και αισθητήρες επιτρέπουν συνεχή πλανητική κάλυψη, με τη δυνατότητα αξιόπιστων επιχειρησιακών εφαρμογών. Βέβαια, οι επιχειρησιακές εφαρμογές απαιτούν ποσοτική εκτίμηση βροχόπτωσης, ως σύνθεση διαφόρων συστημάτων εκτίμησης υετού, όπως βροχομετρικά δίκτυα, ραντάρ καιρού και δορυφόροι, με διαφορετικά μικροφυσικά και δυναμικά χαρακτηριστικά, που στοιχειοθετούν μη μοναδικές λύσεις. Σήμερα, είναι δεδομένη η πλανητική κάλυψη από μετεωρολογικούς δορυφόρους με χαμηλό κόστος λήψης δεδομένων, καθώς και η ύπαρξη επίγειων βροχομετρικών δικτύων στον πλανήτη, που ήδη διαθέτουν επαρκείς χρονοσειρές. Επομένως, καθίσταται εφικτός ο συνδυασμός των δύο αυτών συστημάτων, για την αξιόπιστη ποσοτική εκτίμηση της περιοχικής βροχόπτωσης σε πλανητικό επίπεδο, ενώ τα ραντάρ καιρού, όπου υπάρχουν, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο επιχειρησιακά, όσο και επικουρικά, για την πιστοποίηση των εκτιμήσεων της βροχόπτωσης. Στη συνέχεια, επιχειρείται μια σύντομη παρουσίαση των υπαρχόντων δορυφορικών συστημάτων, για την παρακολούθηση της βροχόπτωσης, και ακολουθεί περιγραφή των υπαρχόντων μεθόδων και τεχνικών.

Δορυφορικά συστήματα για βροχόπτωση

Εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από έναν μικρό αριθμό διαφόρων τύπων αισθητήρων, που είναι:

- Τα ραδιόμετρα σάρωσης σε δορυφόρους πολικής τροχιάς, όπως το προηγμένο πολύ υψηλής διακριτικής ικανότητας ραδιόμετρο (Advanced Very High Resolution Radiometer/AVHRR) της σειράς TIROS-N ή NOAA-N. Τα μήκη κύματος που χρησιμοποιούνται για τη βροχόπτωση περιλαμβάνουν το ορατό (VIS (Visible): 0,5-0,7 μm), το υπέρυθρο και το θερμικό υπέρυθρο (IR (Infra Red): 3,5-4,2 μm ή 10,5-12,5 μm), καθώς και τα μικροκύματα (MW (MicroWave): 0,81-1,55 cm).
- Τα ραδιόμετρα περιστροφικής σάρωσης σε γεωστάσιμους δορυφόρους, όπως ο Ευρωπαϊκός METEOSAT, τόσο στο VIS, όσο και στο IR, αλλά και στην περιοχή των υδρατμών (WV (Water Vapour): 5,7-7,1 μm).
- Τα ραδιόμετρα κατακόρυφου προφίλ σε δορυφόρους πολικής τροχιάς, όπως τα συστήματα TIROS Operational Vertical Sounder (TOVS), που διαθέτουν 20 κανάλια ή συχνότητες για υγρασία χαμηλής χωρικής διακριτικής ικανότητας, αλλά σχετικά αμφίβολης ακρίβειας.

4.4.1. Δορυφορικές μέθοδοι εκτίμησης βροχόπτωσης

Παρουσιάζεται μια επικαιροποιημένη προσέγγιση των μεθοδολογιών εκτίμησης της βροχόπτωσης από δορυφόρους. Οι δορυφορικές μέθοδοι ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες, σε τεχνικές, που βασίζονται μόνο σε ένα σύστημα, και σε συνδυαστικές, που βασίζονται σε περισσότερα του ενός συστήματα.[2] Ακολουθεί σύντομη περιγραφή των μεθόδων και των τεχνικών των δύο κατηγοριών:

1. Μέθοδοι δεικτών νεφών (cloud indexing methods). Κατηγοριοποιούνται οι εντάσεις βροχής για κάθε τύπο νεφών που ταυτοποιείται στην εικόνα του δορυφόρου. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι, εκ των οποίων ο πιο

[2] Για τις μεθόδους εκτίμησης του υετού από δορυφόρους, βλ., μεταξύ πολλών άλλων, Barrett & Martin, 1981· Kidder & Vonder Haar, 1995· Levizzani, Amorati & Meneguzzo, 2002· Dalezios, 2011, 2012.

χαρακτηριστικός είναι ο δείκτης υετού GOES (GOES Precipitation Index/GPI), ο οποίος αναπτύχθηκε στη διάρκεια του GARP Atlantic Tropical Experiment (GATE), στο πλαίσιο του Global Atmospheric Research Programme (GARP) (Arkin & Meisner, 1987). Βασίζεται στην υψηλή συσχέτιση μεταξύ της βροχόπτωσης από ραντάρ και του ποσοστού της υπέρυθρης περιοχής, που είναι ψυχρότερη από 235° K. Με τον τρόπο αυτό, προσδιορίζονται περιοχές σταθερής έντασης βροχής 3 mm/h, κατάλληλες για τροπικό υετό σε περιοχές έκτασης 2,5 x 25. Ο GPI έχει τυποποιηθεί για κλιματολογικές αναλύσεις βροχόπτωσης περιόδων που διαρκούν από πέντε μέρες μέχρι ένα μήνα.

- **Οι μέθοδοι Bristol**. Μια σειρά μεθόδων δεικτών νεφών έχει αναπτυχθεί στο University of Bristol, της Μεγάλης Βρετανίας, αρχικά σε δορυφόρους πολικής τροχιάς (NOAA) και αργότερα και σε γεωστάσιμους δορυφόρους (METEOSAT). Στις μεθόδους αυτές αρχικά προσδιορίζονται ημέρες βροχής σε μια περιοχή από τις τιμές θερμοκρασίας λαμπρότητας T_B στο υπέρυθρο, που είναι μικρότερες από μια τιμή κατωφλίου. Στη συνέχεια, οι ημέρες βροχής συνδυάζονται με χωρικής μεταβλητότητας βροχή ανά ημέρα, προκειμένου να παραχθούν τελικά εκτιμήσεις βροχόπτωσης για περιόδους από 10 μέρες και πάνω (Todd et al., 1999). Ενδεικτικά, παρατίθεται η αθροιστική βροχόπτωση για μια περίοδο από τη σχέση:

$$R = f(c, i(A)), \quad (4.20)$$

όπου R είναι η αθροιστική βροχόπτωση για μια περίοδο σε ένα τετραγωνικό ιχνοστοιχείο ή κέλυφος, c η περιοχή νεφών, i ο τύπος νεφών και A το υψόμετρο.
Ενδεικτικός είναι και ο Πίνακας 4.3 για την ταξινόμηση των νεφών και την αντίστοιχη της εμφάνισης και της έντασης της βροχής.

Κατηγορίες νεφών	Πιθανότητες βροχόπτωσης (0-1,0)	Ένταση βροχόπτωσης (0-1,0)
Σωρειτομελανίες (Cb)	0,90	0,80
Στρατόμορφα (St)	0,50	0,50
Σωρειτόμορφα (Cu)	0,10	0,20
Στρατοσωρείτες (Sc)	0,10	0,01
Θυσανόμορφα (Ci)	0,10	0,01
Ανέφελος ουρανός	---	---

Πίνακας 4.3. *Πιθανότητες και εντάσεις βροχόπτωσης σε σχέση με τη δορυφορική ταξινόμηση των νεφών.*

- **Οι μέθοδοι NESS**. Βασίζονται σε απογευματινές εικόνες δορυφόρων πολικής τροχιάς (NOAA). Η μέση βροχόπτωση 24ώρου R υπολογίζεται από τη σχέση:

$$R = (K_1 A_1 + K_2 A_2 + K_3 A_3) / A_0 , \quad (4.21)$$

όπου A_0 είναι η εξεταζόμενη περιοχή, A_1, A_2 και A_3 οι περιοχές της A_0 οι οποίες καλύπτονται από τους τρεις πιο σημαντικούς τύπους νεφών που προκαλούν βροχή (σωρειτομελανίες, μελανοστρώματα, σωρειτοσυσσωρεύσεις), και K_1, K_2 και K_3 οι εμπειρικοί συντελεστές. Η μέθοδος έχει εφαρμοστεί με επιτυχία σε τροπικές και υποτροπικές περιοχές, και βελτιώνεται έπειτα από συνεχή βαθμονόμηση με βροχόμετρα (Follansbee, 1973).

2. Μέθοδοι κλιματολογίας νεφών (cloud climatology methods). Βάση αυτών των μεθόδων είναι μια γενική συσχέτιση μεταξύ συχνότητας εμφάνισης ψυχρών κορυφών νεφών (cold cloud tops) από δορυφορικά δεδομένα και μέσων τιμών επίγειων μετρήσεων βροχόπτωσης. Χαρακτηριστική μέθοδος της κατηγορίας αυτής είναι η TAMSAT ή μέθοδος της διάρκειας ψυχρού νέφους (Cold Cloud Duration/CCD) (Domenikiotis et al., 2005). Ειδικότερα:

- **Η μέθοδος TAMSAT**. Διάρκεια ψυχρού νέφους ορίζεται η χρονική διάρκεια σε ώρες κατά την οποία η θερμοκρασία νέφους σε μια περιοχή παραμένει μικρότερη από μια τιμή κατωφλίου. Η διαδικασία προϋποθέτει την προσαρμογή στις συνθήκες της κάθε περιοχής και την εκτίμηση της αθροιστικής χρονικής διάρκειας. Συσχετίσεις έχουν υπολογιστεί μεταξύ δεκαήμερων ποσών βροχής και διάρκειας ψυχρού νέφους. Θεωρείται καθοριστική η επιλογή της θερμοκρασίας κατωφλίου, καθόσον εξαρτάται από τα δορυφορικά δεδομένα, αλλά και από την περιοχή ενδιαφέροντος. Ισχύει η σχέση:

$R = a\ D + b$, (4.22)

όπου R είναι η βροχόπτωση, π.χ. δεκαημέρου σε mm, D η διάρκεια σε ώρες και a και b οι συντελεστές παλινδρόμησης.
Η σχέση (4.22) εφαρμόζεται σε κάθε ιχνοστοιχείο της περιοχής. Έτσι, ισχύει R = 0, εφόσον D = 0. Οι μέθοδοιαυτές, παρ' όλο που είναι αρκετά απλές, παρουσιάζουν μεγάλη ακρίβεια, για μεγάλες χρονικές περιόδους ή μεγάλες περιοχικές εκτάσεις.
3. Μέθοδοι σταδίων εξέλιξης (life history methods). Χρησιμοποιούν εικόνες γεωστάσιμων δορυφόρων και στηρίζονται στην αναγνώριση καταιγιδοφόρων νεφών, τη διαχρονική παρακολούθηση της εξέλιξης και τη λεπτομερή ανάλυση του κύκλου ζωής νεφών, κυρίως κατακόρυφης ανάπτυξης, που προκαλούν μεταγωγικό υετό. Διακρίνονται στις εξής:

- **Η μέθοδος Stout-Martin-Sikdar**. Το ποσό της βροχόπτωσης που παράγεται από νέφη σωρειτομελανίες (Cb) ή νεφικά συστήματα υπολογίζεται ως το άθροισμα της περιοχικής έκτασης και της αλλαγής στην έκταση από τη σχέση (Stout et al., 1979):

$R_v = a_o\ A_c + a_1\ (d\ A_c/d\ t)$, (4.23)

όπου R_v είναι ο ογκομετρικός ρυθμός βροχόπτωσης για συγκεκριμένο νέφος σε m^3/s, A_c η περιοχική έκταση του νέφους σε m^2 κατά το χρόνο t, dA_c/dt η αλλαγή της περιοχικής έκτασης του νέφους και a_o (σε m/s) και a_1 (σε m) οι εμπειρικοί συντελεστές. Η μέθοδος αυτή έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία στη χαρτογράφηση και την απεικόνιση της μεταγωγικής βροχόπτωσης στο πείραμα GATE.

- **Η μέθοδος Griffith-Woodley**. Εμπειρική μέθοδος (Griffith et al., 1978 Negri et al., 1984), η οποία εστιάζεται στην εκτίμηση της επιφανειακής βροχόπτωσης από βαθιά τροπικά μεταγωγικά συστήματα. Βασίζεται στην παρατήρηση ότι στις τροπικές περιοχές βαθιάς μεταγωγής η βροχόπτωση εμφανίζεται με λαμπρότερα νέφη στο ορατό φάσμα και ψυχρότερα στο αντίστοιχο υπέρυθρο από ό,τι σε μη ενεργές περιοχές. Επίσης, παρατηρείται ότι η ένταση στους σωρειτομελανίες είναι συνάρτηση του σταδίου ανάπτυξης του νέφους. Η μέθοδος αυτή παρέχει εκτιμήσεις βροχόπτωσης πέρα από το εύρος των βαθμονομημένων ραντάρs, των οποίων η ανακλαστικότητα συνδέεται με την περιοχική κάλυψη σωρειτομελανιών και μεταβάλλεται με την εξέλιξη του νέφους. Τελικά, η περιοχή ανακλαστικότητας σχετίζεται γραμμικά με τον ογκομετρικό ρυθμό βροχόπτωσης, που μπορεί να υπολογιστεί από μια αλληλουχία μετρήσεων της περιοχής του νέφους. Ισχύει η σχέση:

$R_v = R\ x\ f\ (A_e, A_m)$, (4.24)

όπου R_v είναι ο ογκομετρικός ρυθμός βροχόπτωσης σε m^3/s, A_e η περιοχή ανακλαστικότητας με κατώφλι περίπου 1 mm/h, A_m η μέγιστη περιοχή νέφους και R ένας μεταβλητός συντελεστής, που συνδέει την περιοχή ανακλαστικότητας με τον ογκομετρικό ρυθμό βροχόπτωσης και εξαρτάται από την αύξηση ή τη μείωση της περιοχής αυτής. Η f είναι υψηλότερης στάθμης συνάρτηση, που αποτυπώνεται με πίνακες ή σχήματα. Εκτιμήσεις βροχόπτωσης μπορεί να πραγματοποιηθούν στο ορατό ή το υπέρυθρο. Η μέθοδος παρουσιάζει ομοιότητες με την προηγούμενη, εκτός από την προσθήκη της περιοχής ανακλαστικότητας και τη δυνατότητα αλλαγών και μεταβολών στην περιοχή ανακλαστικότητας.

- **Η μέθοδος Scofield-Oliver**. Στοχεύει σε εκτιμήσεις έντασης μεταγωγικής βροχόπτωσης σε συγκεκριμένες θέσεις ή σταθμούς και στηρίζεται στις ακόλουθες βασικές υποθέσεις:
  (α) Η βροχόπτωση ευνοείται από νέφη υψηλής λαμπρότητας στο ορατό φάσμα.
  (β) Η ισχυρή βροχόπτωση ευνοείται από χαμηλές θερμοκρασίες κορυφής νεφών στο υπέρυθρο, από ανάπτυξη και σύγκλιση. Αντίθετα, η ασθενής βροχόπτωση ευνοείται από συρρικνούμενα νέφη με θερμότερες κορυφές.
  (γ) Η βροχόπτωση επικεντρώνεται στην προσήνεμη πλευρά ενός μεταγωγικού συστήματος ή του άκμονα ενός σωρειτομελανία.
  Η μέθοδος αυτή αποτελεί στην ουσία ένα ιεραρχικό επιχειρησιακό σύστημα υποστήριξης αποφάσεων με βάση τις παραπάνω τρεις υποθέσεις και προσομοιώνει την κατακόρυφη δομή καταιγίδων μέσω της ραδιοβόλισης, προσθέτοντας όρους και παράγοντες, με στόχο τη βελτίωση της τελικής ποσοτικής εκτίμησης βροχόπτωσης. Θεωρείται από τις πιο αξιόπιστες μεθόδους εκτίμησης μεταγωγικής βροχόπτωσης από το υπέρυθρο φάσμα γεωστάσιμων δορυφόρων (Scofield και Oliver, 1977).

Παρουσιάζει τη δυνατότητα ευελιξίας για άμεση διαδραστικότητα με μετεωρολόγους. Τέλος, χρησιμοποιείται ήδη επιχειρησιακά στις ΗΠΑ, για την πρόγνωση βραχείας διάρκειας ισχυρών καταιγίδων και αστραπιαίων πλημμυρών.

4. Δυφασματικές μέθοδοι (bispectral methods). Χρησιμοποιεί συνδυαστικά δορυφορικές εικόνες τόσο του υπέρυθρου, όσο και του ορατού φάσματος, για τη χαρτογράφηση της έκτασης και της κατανομής του υετού. Ως γνωστόν, οι αισθητήρες του υπέρυθρου φάσματος παρέχουν πληροφορίες για τη θερμοκρασία και, κατά συνέπεια, για τα ύψη των κορυφών νεφών. Αντίστοιχα, οι αισθητήρες του ορατού φάσματος παρέχουν πληροφορίες για το πάχος των νεφών, τη γεωμετρία και τη σύνθεσή τους. Γενικά, οι δυφασματικές μέθοδοι βασίζονται στην πολύ απλή σχέση μεταξύ ψυχρών και λαμπρών νεφών και της υψηλής πιθανότητας υετού, που είναι χαρακτηριστικό των σωρειτομελανιών. Μια επιχειρησιακή δυσκολία προκύπτει από το γεγονός ότι οι εικόνες στην ορατή περιοχή του φάσματος δεν είναι διαθέσιμες στη διάρκεια της νύχτας. Ειδικότερα:

- **Η μέθοδος RAINSAT**. Είναι μια δισιάστατη προσέγγιση σύμπτωσης προτύπων, που έχει αναπτυχθεί για να απεικονίσει περιοχές νεφών με βροχή από ζεύγη δορυφορικών εικόνων στο ορατό και υπέρυθρο φάσμα, και χρησιμοποιεί τα στοιχεία του ραντάρ επικουρικά, για επίγεια επαλήθευση (Lovejoy και Austin, 1979). Το ζητούμενο είναι να ελαχιστοποιηθεί μια αντικειμενική συνάρτηση δύο κατηγοριών (R = βροχή, N = όχι βροχή) σε ένα δισδιάστατο πεδίο, δηλαδή υπέρυθρο και ορατό με τις εξής τέσσερις μεταβλητές: N_N = όχι εκτίμηση βροχής, όχι βροχή, στην πραγματικότητα, N_R = όχι εκτίμηση βροχής, βροχή, στην πραγματικότητα, R_N = εκτίμηση βροχής, όχι βροχή, στην πραγματικότητα, R_R = εκτίμηση βροχής, βροχή, στην πραγματικότητα.

Η γενική συνάρτηση απωλειών, που πρέπει να ελαχιστοποιηθεί, βασίζεται στη θεωρία αποφάσεων Bayes και δίνεται από τη σχέση:

$$f = (l_R R_N + l_N N_R)/(N + R), \quad (4.25)$$

όπου $N = N_N + N_R$, $R = R_N + R_R$ και l είναι ο σταθμικός συντελεστής για λανθασμένη εκτίμηση.
Αν l_R και l_N είναι ίσα με τη μονάδα, τότε η σχέση (4.25) γίνεται:

$$f = (R_N + N_R)/(N + R), \quad (4.26)$$

που αντιστοιχεί στο ποσοστό των λαθών ή σφαλμάτων.
Συνεπώς, μπορεί να θεωρηθεί ότι $l_R = (N + R)/R$ και $l_N = (N + R)/N$, δηλαδή οι σταθμικοί συντελεστές για κάθε τάξη, είναι αντιστρόφως ανάλογοι του δείγματος της τάξης. Οπότε, η συνάρτηση απωλειών απλοποιείται σε:

$$f_f = (R_N / R) + (N_R /N). \quad (4.27)$$

Για κάθε ζεύγος εικόνων, υπάρχει μια συνάρτηση g ανακλαστικότητας υπέρυθρου και ορατού, που αντιστοιχεί στο ελάχιστο της f ή f_f. Η συνάρτηση f_f οριοθετεί μια βέλτιστη διαχωριστική γραμμή μεταξύ των κατηγοριών βροχής ή μη βροχής από δορυφόρο. Εφόσον υπολογιστεί η f_f, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί η συνάρτηση g για να δημιουργηθούν χάρτες δορυφορικής βροχόπτωσης. Αν θεωρηθεί ότι βροχή είναι η μονάδα και μη βροχή είναι το μηδέν, τότε ο συντελεστής συσχέτισης ρ για κάθε χάρτη δίνεται από τη σχέση:

$$\rho = (R_R N_N – R_N N_R)/N R. \quad (4.28)$$

5. Μέθοδοι νεφικών μοντέλων (cloud modeling methods). Στοχεύουν στην αξιοποίηση της φυσικής νεφών, για τη βελτίωση της φυσικής περιγραφής της διαδικασίας σχηματισμού βροχής. Ειδικότερα, στη μεταγωγική στρατόμορφη μέθοδο (Convective Stratiform Technique/CST) (Adler & Negri, 1988), ένα μονοδιάστατο μοντέλο νέφους συνδέει αρχικά τη θερμοκρασία κορυφής νέφους με το ρυθμό και την περιοχική έκταση της βροχής (Σχήματα 4.14 και 4.15). Στη συνέχεια, υπολογίζεται μια παράμετρος κλίσης S, για κάθε ελάχιστη θερμοκρασία T_{min} του ιχνοστοιχείου (i, j) στο υπέρυθρο, που δίνεται από τη σχέση:

$$S = T_{1\text{-}6} – T_{min}, \quad (4.29)$$

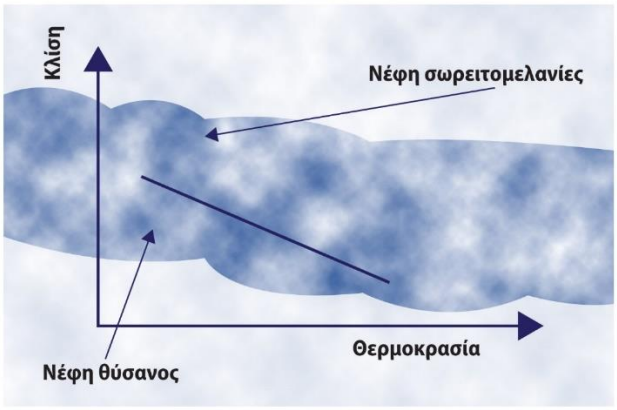
όπου $T_{1\text{-}6}$ είναι η μέση θερμοκρασία των έξι γειτονικών ιχνοστοιχείων, που επίσης δίνεται από τη σχέση:

$$T_{1\text{-}6} = (T_{i\text{-}2,j} + T_{i\text{-}1,j} + T_{i+1,j} + T_{i+2,j} + T_{i,j+1} + T_{i,j\text{-}1})/6. \quad (4.30)$$

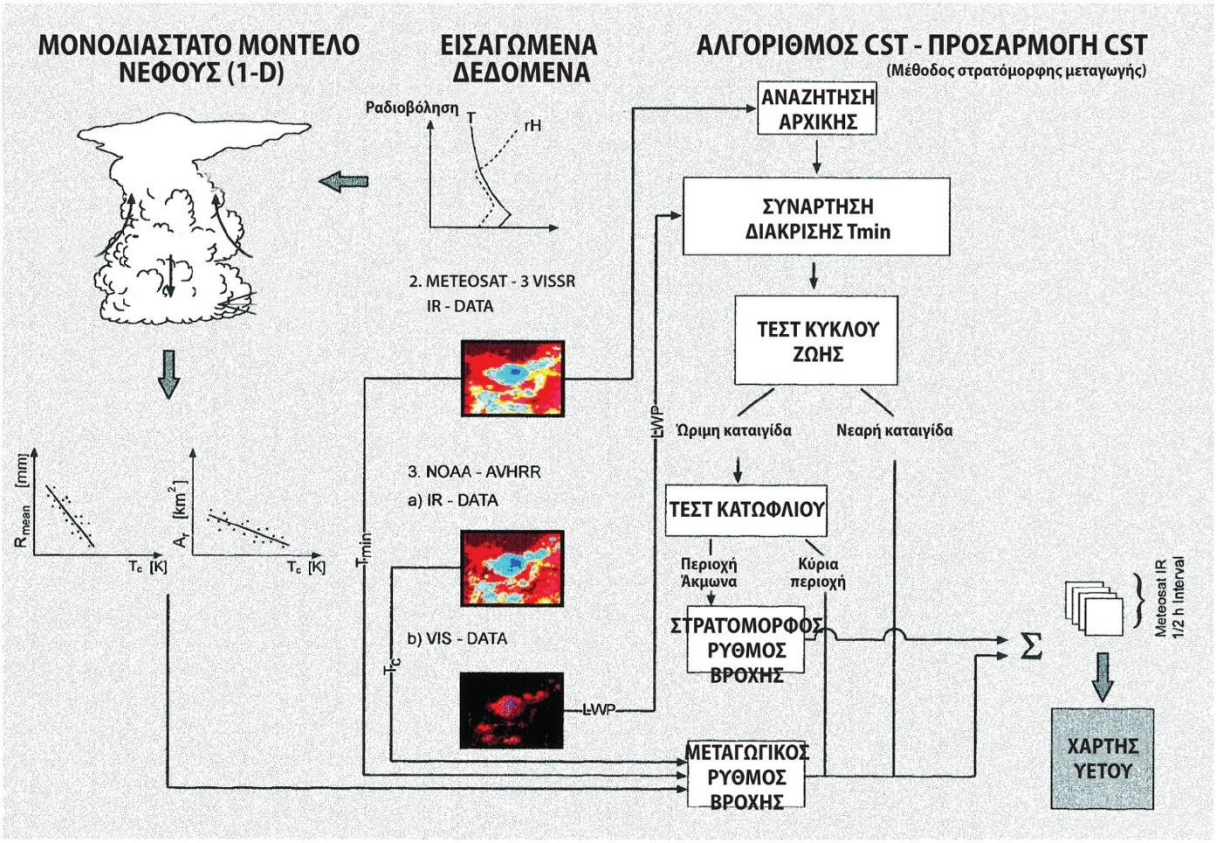
Με την αφαίρεση του T_{min} από τη σχέση (4.29) εξαιρούνται οι θύσανοι, που δεν προκαλούν βροχή, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.13, ενώ η εξίσωση της διαχωριστικής ευθείας κλίσης δίνεται από τη σχέση:

$$S = 0{,}568\ (T_{min} - 217). \quad (4.31)$$

Υπάρχουν τροποποιήσεις της μεθόδου CST, με την προσθήκη αριθμητικών μοντέλων μέσης κλίμακας μαζί με το μονοδιάστατο μοντέλο νέφους, ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί και σε μέσα πλάτη, πέρα από τις τροπικές περιοχές. Τα νεφικά μοντέλα βασίζονται στη διαδικασία ανάπτυξης και προσαρμογής, όπως το μοντέλο CST. Η απόδοση των νεφικών μοντέλων θεωρείται ισάξια εκείνης των εμπειρικών μοντέλων, ωστόσο η χρήση των νεφικών μοντέλων αναμένεται να αυξηθεί μελλοντικά, καθώς και η απόδοσή τους.



Σχήμα 4.14 *Παράμετρος κλίσης και ελάχιστη θερμοκρασία.*



Σχήμα 4.15 *Μονοδιάστατο μοντέλο νέφους της μεθόδου CST.*

6. Μέθοδοι παθητικών μικροκυμάτων (passive microwave methods). Στις συχνότητες των παθητικών μικροκυμάτων, τα μόρια ή σταγόνες υετού αποτελούν την κύρια πηγή εξασθένησης της επιστρεφόμενης ακτινοβολίας. Κατά συνέπεια, οι μέθοδοι μικροκυμάτων παρουσιάζουν περισσότερη φυσική αμεσότητα σε σχέση με τις μεθόδους που βασίζονται στην ακτινοβολία ορατού/υπέρυθρου (VIS/IR). Ειδικότερα, η εκπομπή ακτινοβολίας από ατμοσφαιρικά μόρια ή σταγόνες έχει αποτέλεσμα μια αύξηση του λαμβανόμενου σήματος από τον αισθητήρα του δορυφόρου, ενώ συγχρόνως η διάθλαση λόγω υδρομετεώρων περιορίζει τη ροή ακτινοβολίας. Ο τύπος και το μέγεθος των μετρούμενων υδρομετεώρων εξαρτώνται από τη συχνότητα της επιστρεφόμενης ακτινοβολίας (Πίνακας 4.4). Σε διαφορετικές συχνότητες, τα ραδιόμετρα παρατηρούν διαφορετικά μέρη της στήλης βροχής. Σχετικά με τα άλλα μέρη του φάσματος, η ακτινοβολία μικροκυμάτων (MW) απορροφάται, αλλά δεν διαχέεται, από μόρια ή σταγόνες νέφους, υδρατμούς και οξυγόνο, γεγονός που καθιστά δυνητικά δύσκολες τις εκτιμήσεις υετού που βασίζονται στην απορρόφηση.
Τα μόρια ή σταγόνες υετού αλληλοεπιδρούν έντονα με την ακτινοβολία μικροκυμάτων και υπολογίζονται από ραδιόμετρα χωρίς την έντονη τάση του υπέρυθρου. Ωστόσο, το μεγαλύτερο μειονέκτημα είναι η μικρή χωρική και χρονική διακριτική ικανότητα. Ειδικότερα, η μεν χωρική διακριτική ικανότητα είναι μικρή, καθόσον, λόγω διάθλασης, περιορίζεται η επίγεια διάκριση για δεδομένη κεραία δορυφόρου μικροκυμάτων, η δε χρονική συχνότητα επηρεάζεται από το γεγονός ότι οι αισθητήρες μικροκυμάτων ακολουθούν πολικές τροχιές. Επιπλέον, η εκπομπή ακτινοβολίας από την επιφάνεια της θάλασσας είναι σχετικά σταθερή και χαμηλή (ε = 0,4), με αποτέλεσμα την αύξηση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας από υετό (ε = 0,8), που καταγράφεται από τον αισθητήρα. Αντίθετα, οι χερσαίες επιφάνειες παρουσιάζουν μεταβλητή και υψηλή εκπομπή ακτινοβολίας (ε = 0,7 – 0,9), όπως και ο υετός, καθώς και χαμηλή πολικότητα, καθόσον η εκπομπή εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας, όπως η βλάστηση και η περιεχόμενη υγρασία. Ως αποτέλεσμα, η βροχόπτωση πάνω από χερσαίες επιφάνειες αυξάνει τη ροή της επιστρεφόμενης ακτινοβολίας, αλλά συγχρόνως απορροφά ακτινοβολία, προκαλώντας σημαντικές δυσκολίες στον προσδιορισμό της περιοχικής έκτασης της βροχής. Συνεπώς, η λύση στις μεθόδους μικροκυμάτων εκτίμησης της βροχόπτωσης πάνω από χερσαίες επιφάνειες βρίσκεται στη διάθλαση και το κανάλι των 85,5 GHz του SSM/I είναι πολύ ευαίσθητο σε διάθλαση από μικρά μόρια ή σταγόνες.

Κανάλια SSM/I	**Συχνότητα**	**Χωρική διακριτική ικανότητα**	**Δυνατές χρήσεις**
1,2	19,35 GHz	25 km	- θαλάσσιος πάγος και βροχή - υγρασία εδάφους - κάλυψη βλάστησης
3	22,235 GHz	25 km	- ατμός στους ωκεανούς
4,5	37,0 GHz	25 km	- θαλάσσιος πάγος και βροχή - άνεμος στην επιφάνεια της θάλασσας - ακραία βροχή στα ηπειρωτικά - χιονοκάλυψη
6,7	85,5 GHz	12,5 km	- βροχόπτωση - μη βροχοφόρα νέφη στους ωκεανούς - θαλάσσιος πάγος και χιονοκάλυψη

Πίνακας 4.4. *Μικροκυματικά χαρακτηριστικά του παθητικού αισθητήρα SSM/I*.

Τα σημαντικά όργανα και οι σημαντικοί αισθητήρες που χρησιμοποιούνται στις εκτιμήσεις της βροχόπτωσης από μικροκύματα είναι το SSM/I, ένα όργανο ή αισθητήρας τύπου σάρωσης, που μετρά ακτινοβολία μικροκυμάτων σε μια ζώνη 1.400 km σε τέσσερις συχνότητες (Πίνακας 4.4)τα, το ραδιόμετρο, που λειτουργεί σε διπλή πόλωση (οριζόντια και κατακόρυφα) σε κάθε συχνότητα, εκτός από τη συχνότητα υδρατμών (22,235 GHz), όπου λειτουργεί μόνο σε κατακόρυφη πόλωση, το όργανο TMI στο σύστημα TRMM, που αποτελεί εξέλιξη του SSM/I, με μια νέα συχνότητα 10,7 GHz οριζόντιας και κατακόρυφης πόλωσης και μετατόπιση της συχνότητας υδρατμών στα 21,3 GHz, και, τέλος, το SSMI/S, που αποτελεί αναβάθμιση του SSM/I, με 24 συχνότητες, μεταξύ 19 και 183 GHz, σε ταυτόχρονη κάλυψη, με κωνικό σύστημα σάρωσης, δυνατότητα ραδιοβόλισης μέχρι 70 km και ευρύτερη ζώνη στα 1.700 km.
Η σημερινή εξέλιξη έχει οδηγήσει στην προχωρημένη μονάδα ραδιοβόλισης μικροκυμάτων (Advanced Microwave Sounding Unit/AMSU-B). Η AMSU-B διαθέτει δώδεκα συχνότητες στη ζώνη οξυγόνου, μεταξύ 5-60 GHz, τέσσερις συχνότητες στη γραμμή υδρατμών γύρω από τα 183 GHz και τέσσερα παράθυρα

συχνοτήτων, στα 23,8, 31,4, 50,3 και 89 GHz, αντίστοιχα. Η σειρά των AMSU αφορά τις ραδιοβολίσεις θερμοκρασίας, αλλά οι συχνότητες μπορεί να χρησιμοποιηθούν για μετρήσεις υετού, υδρατμών, υγροποιημένου νέφους, χιονοκάλυψης, συγκέντρωσης θαλάσσιου πάγου και επιφανειακής ύγρανσης. Με βάση τα δεδομένα από τα συστήματα AMSU, έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι εκτίμησης της βροχόπτωσης. Αναφορά γίνεται στον παρακάτω αλγόριθμο (Groby et al., 1999), που βασίζεται σε δείκτες διάθλασης (Scattering Index/SI) και μεταβάλλεται σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά του οργάνου (AMSU-A). Οι δύο δείκτες για ξηρά και θάλασσα είναι, αντίστοιχα:

$SI_{land} = T_B(23) - T_B(89)$ (4.32)
$SI_{ocean} = -113{,}2 + [\,2{,}41 - 0{,}0049\, T_B(23)]\, T_B(23) + 0{,}454\, T_B(31) - T_B(89)$ (4.33)

όπου T_B είναι η θερμοκρασία λαμπρότητας για την αντίστοιχη συχνότητα, $SI_{land} \geq 3$ και $SI_{ocean} \geq 9$.
Μετά τη βαθμονόμηση με στοιχεία βροχόπτωσης από ραντάρ καιρού υπολογίζεται ο υετός. Ειδικότερα, η σχέση της έντασης βροχής R για την ξηρά είναι:

$R = 0{,}005\, [SI_{land} + 18/1{,}3]$ (4.34)

Επιπλέον, για AMSU-B, χρησιμοποιούνται οι συχνότητες 89 και 150 GHz, αντίστοιχα, προκειμένου να εξαχθούν εντάσεις βροχής υψηλότερης διακριτικής ικανότητας, δηλαδή 16 km στο ναδίρ, σε σύγκριση με 48 km του AMSU-A. Έπειτα από επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων, οι αντίστοιχοι SI γίνονται:

$SI_{land} = [-42{,}72 + 0{,}85\, T_B(91)] - T_B(150)$ (4.35)

$SI_{oceaTRMMn} = 0{,}013\, \{T_B(91) + 33{,}58 \ln[300 - T_B(150)] - 341{,}17\}$ (4.36)

Με βάση τις σχέσεις (4.35) και (4.36), και ακολουθώντας την προηγούμενη διαδικασία με χρήση ραντάρ καιρού, υπολογίζεται η σχέση για την ένταση της βροχής, αντίστοιχη της σχέσης (4.34).
7. Μέθοδοι ενεργών μικροκυμάτων (active microwave methods). Στις μεθόδους ενεργών μικροκυμάτων, η εκτίμηση βροχόπτωσης βασίζεται σε δορυφορικά συστήματα ραντάρ, δηλαδή εγκατάσταση ραντάρ καιρού πάνω σε δορυφόρους. Η πιο χαρακτηριστική εφαρμογή είναι η αμερικανοϊαπωνική αποστολή, γνωστή ως Αποστολή Παρακολούθησης Τροπικής Βροχόπτωσης (Tropical Rainfall Monitoring Mission/TRMM). Τα χαρακτηριστικά του συστήματος TRMM καταγράφονται στον Πίνακα 4.5. Το TRMM, μέσω του συστήματος αισθητήρων SSM/I, με χρονική συχνότητα δύο φορές τη μέρα, έχει παρουσιάσει θετικά αποτελέσματα στην εκτίμηση της βροχόπτωσης πάνω από θαλάσσιες περιοχές, καθώς και στον προσδιορισμό των μεταγωγικών συστημάτων μέσης κλίμακας και τροπικών κυκλώνων, όχι όμως εξίσου ικανοποιητικά αποτελέσματα πάνω από την ξηρά, τουλάχιστον στα αρχικά στάδια. Η εξέλιξη και η αναβάθμιση του SSM/I στα SSMI/S και SSM/T2, αντίστοιχα, καθώς και η συνδυαστική χρήση τους επιτρέπουν τον προσδιορισμό και την εκτίμηση της βροχόπτωσης πάνω από ηπειρωτικές περιοχές. Υπάρχουν ήδη θετικά αποτελέσματα, ωστόσο η εφαρμοσμένη έρευνα συνεχίζεται τόσο στη βελτίωση των αλγορίθμων, όσο και στην προσθήκη νέων αισθητήρων.

Κανάλι	Συχνότητα (GHz)	Πολικότητα	Χωρική διακριτική ικανότητα (km)
1	10,7	V, H	38,3
2	19,4	V, H	18,4
3	21,3	H	16,5
4	37,0	V, H	9,7
5	85,5	V, H	4,4

Πίνακας 4.5. *Μικροκυματικά χαρακτηριστικά του ενεργού συστήματος SSM/I*.

8. Συνδυαστικές δορυφορικές μέθοδοι εκτίμησης βροχόπτωσης. Μικροκυματικά δεδομένα χαμηλής τροχιάς μπορούν να συνδυαστούν με γεωσύγχρονες υπέρυθρες ακτινοβολίες, χρησιμοποιώντας διάφορες προσεγγίσεις, που παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές χρονικής κλίμακας, από τη μηνιαία στη στιγμιαία. Σήμερα, γενικό είναι το συμπέρασμα ότι οι μέθοδοι MW θεωρούνται υπέρτερες για στιγμιαίες εφαρμογές σε ωκεανούς, ενώ οι μέθοδοι IR ή οι συνδυαστικές μέθοδοι IR/MW παρουσιάζουν βελτιωμένες μηνιαίες εκτιμήσεις βροχόπτωσης, κυρίως λόγω της υψηλής χρονικής συχνότητας των γεωσύγχρονων παρατηρήσεων.

Ειδικότερα, για τα μικροκυματικά και υπέρυθρα δεδομένα έχει αναβαθμιστεί ο δείκτης GPI και πρόκειται πλέον για καθολικά προσαρμοσμένο δείκτη GPI (Universally Adjusted GOES Precipitation Index/UAGPI), που παρέχει σταθερές εκτιμήσεις μηνιαίας βροχόπτωσης σε διάφορες χωρικές κλίμακες (Xu et al., 1999). Επίσης, αναπτύσσονται νέες στρατηγικές εκτίμησης στιγμιαίας βροχόπτωσης, με κοινή χρήση μικροκυμάτων και υπέρυθρου (Vicente et al., 1998). Επιπλέον, η σύνθεση MW, VIS και IR, που είναι διαθέσιμα στον ίδιο δορυφόρο, όπως τα συστήματα αισθητήρων TMI και VIRS πάνω στο σύστημα TRMM, παρέχουν παραπέρα δυνατότητες για βελτίωση της στιγμιαίας εκτίμησης (Bauer et al., 1998). Αναφορά πρέπει επίσης να γίνει στους νέους πολυφασματικούς αισθητήρες SEVIRI στο MSG ή GOES, που έχουν οδηγήσει σε νέα ερευνητικά προγράμματα, όπως είναι το EURAISAT (Levizzani et al., 2001). Ακόμα, το πρότυπο των αλγόριθμων βροχόπτωσης του υβριδικού MW-PR (MicroWave-Precipitation Radar) είναι το σύστημα TRMM «Day-1», το οποίο επίσης χρησιμοποιεί την προσέγγιση του προφίλ βροχής, που προσδίδει ίση σημασία σε μετρήσεις TMI και Precipitation Radar (PR) (Haddad et al., 1997). Τέλος, γίνεται αναφορά στο Global Precipitation Mission (GPM), ένα διεθνές πρόγραμμα από τη NASA και τη NASDA, με στόχο τη μέτρηση της βροχόπτωσης σε παγκόσμια βάση με ικανοποιητική ποιότητα, καθώς και τη βελτίωση της κλιματικής πρόγνωσης καιρού και ειδικών συνιστωσών του υδατικού ισοζυγίου σε παγκόσμια κλίμακα.

4.5. Εξάτμιση και εξατμισοδιαπνοή

Η μετάπτωση του νερού από την υγρή ή τη στερεά στην αέρια φάση και η μετέπειτα μετακίνησή του από την επιφάνεια αυτή προς την υπερκείμενη ατμόσφαιρα αποτελούν τη διαδικασία εξάτμισης. Γενικά, το νερό, είτε πάνω από υδάτινες επιφάνειες είτε πάνω στα φύλλα ή τις καλλιέργειες είτε μέσα στα ανοικτά στόματα των φύλλων, χρειάζεται για τη διαδικασία της εξάτμισης ενέργεια υπό μορφή θερμότητας, κύρια πηγή της οποίας είναι ο ήλιος. Η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της Γης είναι η βασική πηγή ενέργειας, για την κάλυψη των αναγκών της εξάτμισης σε θερμότητα, και ο άνεμος ο βασικός παράγοντας διατήρησης της απαιτούμενης τάσης υδρατμών (Παπαζαφειρίου,1999). Η ποσότητα αυτή θερμότητας καλείται λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης και απαιτείται για τη δημιουργία υδρατμών, που στη συνέχεια μεταφέρονται στην ατμόσφαιρα. Επίσης, επισημαίνεται ότι το νερό που εγκαταλείπει μια καλλιέργεια ή επιφάνεια, δηλαδή η διαδικασία της εξάτμισης, εξαρτάται τόσο από φυτικούς και εδαφικούς παράγοντες, όσο και από κλιματικούς παράγοντες. Φυτικοί παράγοντες θεωρούνται χαρακτηριστικά το φυτικό είδος, η λευκαύγεια ή ανακλαστικότητα (albedo) της καλλιέργειας, το ποσοστό κάλυψης του εδάφους από την καλλιέργεια, το ύψος της καλλιέργειας και η τραχύτητα του φυλλώματος, το βάθος και η πυκνότητα του ριζικού συστήματος, καθώς και το στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας. Τέλος, κύριοι κλιματικοί παράγοντες θεωρούνται η καθαρή ακτινοβολία, ο άνεμος, η υγρασία και η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας, που διαμορφώνουν το μηχανισμό μετακίνησης των υδρατμών από τη φυτική επιφάνεια.

Υπολογισμοί και μετρήσεις της εξατμισοδιαπνοής χρησιμοποιούν διάφορους τρόπους και διάφορες μεθοδολογίες. Ωστόσο, κρίνεται σκόπιμο να ξεκαθαριστεί τι ακριβώς αντιπροσωπεύουν. Για το λόγο αυτό, παρατίθενται οι κοινής αποδοχής και χρήσης ορισμοί που αναφέρονται στις διαδικασίες μέτρησης και εκτίμησης της εξατμισοδιαπνοής (Doorenbos & Pruitt, 1977):

Εξάτμιση (E) είναι η φυσική διαδικασία με την οποία ένα στερεό ή ένα υγρό σώμα μεταπίπτει στην αέρια φάση. Στις αρδεύσεις και γενικά στη γεωργία, η εξάτμιση περιορίζεται στη μεταβολή του νερού από την υγρή στην αέρια φάση.

Δυναμική εξάτμιση (E_p) είναι η εξάτμιση από μια επιφάνεια της οποίας όλες οι επαφές με την ατμόσφαιρα είναι υγρές, ώστε να μην υπάρχει κανένας περιορισμός στην ένταση της εξάτμισης που να οφείλεται στην επιφάνεια. Το μέγεθος της E_p εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τις συνθήκες που επικρατούν στην ατμόσφαιρα και τη λευκαύγεια της επιφάνειας, αλλά υπάρχει παραλλακτικότητα ανάλογα με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας, όπως είναι η αεροδυναμική τραχύτητα.

Διαπνοή είναι το φαινόμενο της εξάτμισης του νερού από τα φυτά και προϋποθέτει τη μετακίνηση του νερού μέσω του φυτού στις εξατμιζόμενες επιφάνειες. Το νερό των φυτών απορροφάται από το έδαφος μέσα από τις ρίζες και, μέσω του αγγειακού συστήματος, οδηγείται στους πόρους των φυλλωμάτων, γνωστούς ως στόματα, απ' όπου διαπνέεται.

Εξατμισοδιαπνοή (ET) είναι η συνδυασμένη διαδικασία με την οποία νερό μεταφέρεται προς την ατμόσφαιρα, με τη διαπνοή από τα φυτά και την εξάτμιση από την επιφάνεια του εδάφους και των φύλλων, όταν αυτά είναι υγρά. Η φυσική της μεταβολής φάσης του νερού, σε γενικές γραμμές, είναι η ίδια, είτε πρόκειται για υδάτινη

επιφάνεια είτε για βλάστηση είτε για γυμνό έδαφος. Έτσι λοιπόν, εισάγεται ο όρος «εξατμισοδιαπνοή» για τον τρόπο μελέτης τόσο της εξάτμισης, όσο και της διαπνοής.

Δυναμική εξατμισοδιαπνοή είναι η ένταση με την οποία το νερό, υπό συνθήκες πλήρους διαθεσιμότητας, απομακρύνεται από υγρό έδαφος ή υδάτινη ή φυτική επιφάνεια. Εκφράζεται είτε ως ροή λανθάνουσας θερμότητας ανά μονάδα επιφανείας (λET_p) είτε ως ισοδύναμο πάχος εξατμιζόμενου νερού ανά μονάδα χρόνου (ET_p).

Εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας αναφοράς (ET_r) είναι η ένταση με την οποία νερό απομακρύνεται από τις εδαφικές και φυτικές επιφάνειες αναφοράς, εφόσον είναι άμεσα διαθέσιμο. Καλλιέργεια αναφοράς θεωρείται ο χορτοτάπητας με ομοιόμορφο ύψος 8-15 cm ή η μηδική με μέσο ύψος 50 cm. Οι επιφάνειες των φύλλων της καλλιέργειας αναφοράς δεν είναι, τυπικά, υγρές. Η εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας αναφοράς ή, απλώς, **εξατμισοδιαπνοή αναφοράς** εκφράζεται είτε ως ροή λανθάνουσας θερμότητας ανά μονάδα επιφανείας (λET_p) είτε ως ισοδύναμο πάχος εξατμιζόμενου νερού ανά μονάδα χρόνου (ET_r).

Εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας (ET_c) είναι η ένταση με την οποία νερό, εφόσον είναι άμεσα διαθέσιμο, απομακρύνεται από τις εδαφικές και φυτικές επιφάνειες μιας καλλιέργειας που αναπτύσσεται δυναμικά, δηλαδή είναι ελεύθερη από ασθένειες και οποιουσδήποτε άλλους παράγοντες ανασχετικούς της ανάπτυξης, και έχει στη διάθεση της όλα τα απαιτούμενα θρεπτικά συστατικά, και επιτυγχάνει το μέγιστο της ανάπτυξης και της απόδοσης υπό τις επικρατούσες συνθήκες του περιβάλλοντος στο οποίο αναπτύσσεται. Η συνήθης έκφρασή της είναι σε ισοδύναμο πάχος εξατμιζόμενου νερού ανά μονάδα χρόνου. Πολλές φορές η ET_c αναφέρεται και ως μέγιστη εξατμισοδιαπνοή (ET_{max}).

Πραγματική εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας (ET_a) είναι η ένταση με την οποία νερό απομακρύνεται από το έδαφος και τις φυτικές επιφάνειες, υπό συγκεκριμένες συνθήκες εδάφους, δηλαδή πλήρης ή μερική διαθεσιμότητα νερού και θρεπτικών στοιχείων, προσβολή ή μη από ασθένειες και άλλα συναφή, και εκφράζεται ως ισοδύναμο πάχος εξατμιζόμενου νερού ανά μονάδα χρόνου. Είναι προφανές ότι $ET_a \leq ET_c$.

4.5.1. Άμεση μέτρηση εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας

Η εξατμισοδιαπνοή μιας καλλιέργειας μπορεί να μετρηθεί στον αγρό από παρατηρήσεις εδαφικής υγρασίας, καθώς και με λυσίμετρα. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται συνοπτικά οι συνήθεις μέθοδοι:

α) Μέθοδος των διαδοχικών δειγματοληψιών. Η εξατμισοδιαπνοή μιας καλλιέργειας, υπό πραγματικές συνθήκες αγρού, γίνεται με μέτρηση των μεταβολών της εδαφικής υγρασίας στη διάρκεια μιας χρονικής περιόδου. Η σχέση έχει τη μορφή:

$$ET_c = (1/\Delta t) \sum (\theta_1 - \theta_2)_i \; d_i \,, \quad (4.37)$$

όπου ET_c είναι η ημερήσια εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας, Δt ο χρόνος σε ημέρες (4-7 ημέρες) που μεσολαβεί μεταξύ των δύο μετρήσεων, θ_1 και θ_2 η κατ' όγκο περιεχόμενη στο έδαφος υγρασία στην αρχή και στο τέλος της περιόδου, αντίστοιχα, d το πάχος κάθε εδαφικής στρώσης και n ο αριθμός των στρώσεων στο βάθος του ενεργού ριζοστρώματος.

β) Μέθοδος του υδατικού ισοζυγίου. Η μέθοδος αυτή βρίσκει εφαρμογή σε μεγάλες εκτάσεις, όπως είναι οι κλειστές λεκάνες, όπου το υδατικό ισοζύγιο της λεκάνης μπορεί να εκφραστεί από τη σχέση:

$$ET_c = P + IRR - SRO \pm \Delta\theta, \quad (4.38)$$

όπου ET_c είναι η εξατμισοδιαπνοή από τη φυτοκάλυψη της λεκάνης, δηλαδή καλλιέργειες και λοιπή βλάστηση, στη διάρκεια μιας περιόδου, όπως η βλαστική περίοδος ή το υδρολογικό έτος, P η βροχόπτωση της λεκάνης, IRR το προστιθέμενο νερό της άρδευσης, SRO η επιφανειακή απορροή, που μετράται στην έξοδο της λεκάνης, και $\Delta\theta$ η μεταβολή της εδαφικής υγρασίας μεταξύ της αρχής και του τέλους της χρονικής περιόδου.

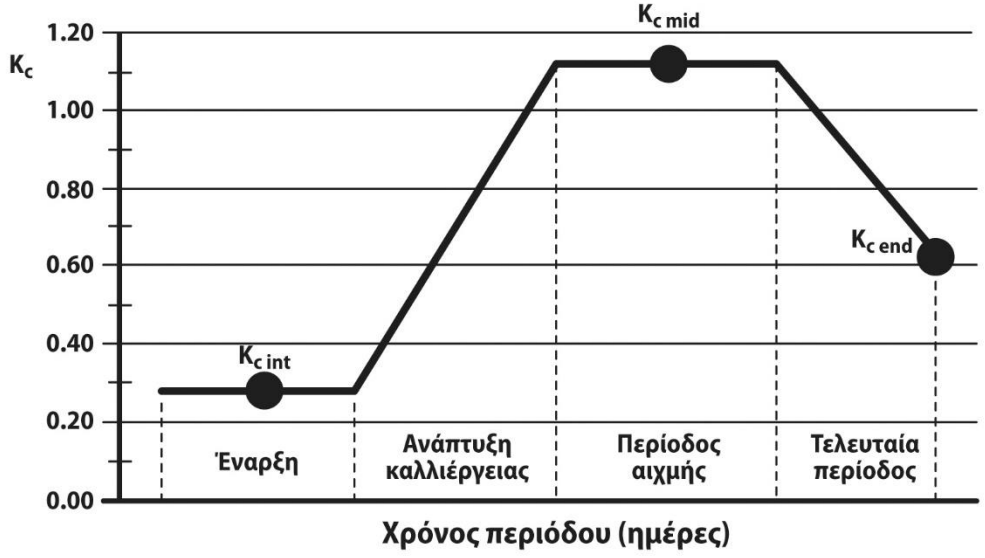
γ) Μέθοδος του λυσίμετρου. Τα λυσίμετρα είναι κατασκευές των οποίων το κύριο σώμα αποτελείται από ένα δοχείο, που γεμίζει με χώμα, στο οποίο αναπτύσσονται καλλιέργειες υπό φυσικές συνθήκες, και χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση του νερού που χάνεται με εξάτμιση και διαπνοή. Το βάθος του δοχείου είναι τέτοιο που επιτρέπει την απρόσκοπτη ανάπτυξη του ριζικού συστήματος της καλλιέργειας και έχει επιφάνεια όχι μικρότερη των 3 m^2.

4.5.2. Μέθοδοι εκτίμησης εξατμισοδιαπνοής αναφοράς

Οι διαδικασίες εκτίμησης και υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας χρησιμοποιούν μετεωρολογικές παρατηρήσεις, μετρήσεις ή υπολογισμούς της ηλιακής ακτινοβολίας και χαρακτηριστικά των καλλιεργειών, κυρίως αυτών που επηρεάζουν τη μεταφορά υδρατμών στην περιοχή της φυτοκόμης. Οι περισσότερες από τις σύγχρονες μεθόδους εκτίμησης της ET_c, περιλαμβάνουν δύο μέρη. Το πρώτο μέρος αφορά στην εκτίμηση της ET_r μιας καλά αρδευόμενης καλλιέργειας, με σταθερά χαρακτηριστικά φυτοκόμης, που αναφέρεται ως «καλλιέργεια αναφοράς», όπως χορτοτάπητας και μηδική. Το δεύτερο μέρος περιλαμβάνει τον υπολογισμό της ET_c της καλλιέργειας. Η ET_c προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό της ET_r με έναν «φυτικό συντελεστή», K_c, που είναι χαρακτηριστικός της κάθε καλλιέργειας. Ο φυτικός συντελεστής μεταβάλλεται κατά τη βλαστική περίοδο, σύμφωνα με τη λεγόμενη καμπύλη καλλιέργειας, όπως ενδεικτικά φαίνεται στο Σχήμα 4.16. Είναι αυτονόητο ότι η διάρκεια της βλαστικής περιόδου και των επιμέρους σταδίων ανάπτυξης διαφέρει από καλλιέργεια σε καλλιέργεια. Με βάση τα παραπάνω, διαμορφώνεται η εξής σχέση, της οποίας οι όροι έχουν ήδη εξηγηθεί:

$$ET_c = K_c\ ET_r \quad (4.39)$$

Υπάρχουν διαφορετικές μέθοδοι εκτίμησης της ET_r (Jensen et al.,1990 Dalezios et al., 2002). Μεταξύ αυτών, υπάρχουν θεωρητικές μέθοδοι, όπως η μέθοδος του ισοζυγίου ενέργειας και η αεροδυναμική μέθοδος. Επίσης, υπάρχουν ημιεμπειρικές μέθοδοι, με σημαντικότερες τη μέθοδο Penman, τη μέθοδο Doorenbos και Pruitt και τη μέθοδο Penman-Monteith. Υπάρχουν, βέβαια, και εμπειρικές μέθοδοι, που βασίζονται σε κλιματικούς παράγοντες, όπως η μέθοδος Blaney-Criddle, η μέθοδος Thornthwaite, η μέθοδος Turk, η μέθοδος Jensen-Haize και η μέθοδος Hargreaves. Στη συνέχεια, περιγράφονται συνοπτικά οι πιο γνωστές διεθνώς και ευρέως χρησιμοποιούμενες μέθοδοι από αυτές:



Σχήμα 4.16. *Τυπικά στάδια K_c κατά τη βλαστική περίοδο.*

α) Μέθοδος Penman. Η συνδυαστική μέθοδος του Penman για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς έχει τύχει παγκόσμιας εφαρμογής, λόγω της θεωρητικής της βάσης. Ειδικότερα, γίνεται συνδυασμός των εξισώσεων του ενεργειακού ισοζυγίου μιας επιφάνειας και της αεροδυναμικής μεθόδου, με αποτέλεσμα η μέθοδος να περιλαμβάνει τον αεροδυναμικό, αλλά και τον ενεργειακό όρο, ως εξής:

$$ETo = [(\Delta/\gamma)Rn + LEa]/(1 + \Delta/\gamma)\ [Watts\ m^{-2}], \quad (4.40)$$

ή $$ETo = 0{,}0344[(\Delta/\gamma)Rn + LEa]/(1 + \Delta/\gamma)\ [mm\ ημέρα^{-1}], \quad (4.41)$$

όπου γ είναι η ψυχρομετρική σταθερά, Rn η καθαρή πυκνότητα ροής ακτινοβολίας, L η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης και Ea η αποξηραντική ικανότητα της ατμόσφαιρας ή αεροδυναμικός όρος.

Εφαρμόζεται για την εκτίμηση της εξάτμισης από μια υδάτινη επιφάνεια. Βασική είναι η παραδοχή σχετικά με την ανάπτυξή της, που ευσταθεί για την υδάτινη επιφάνεια, σύμφωνα με την οποία οι υδρατμοί κοντά στην επιφάνεια είναι κορεσμένοι. Στην περίπτωση της διαπνοής, οι υδρατμοί δεν είναι κορεσμένοι στην επιφάνεια των φύλλων. Ο Penman θεωρεί ότι η επιφανειακή θερμοκρασία του εδάφους είναι ίση με τη θερμοκρασία του αέρα σε ύψος 2 m, δηλαδή eo(To) = eo,s. Ακόμα, δέχεται ότι η πυκνότητα ροής θερμότητας προς το έδαφος είναι αμελητέα, δηλαδή G = 0.

Υπολογισμός του αεροδυναμικού όρου (Ea). Ο όρος αυτός αναφέρεται και ως αποξηραντική ικανότητα της ατμόσφαιρας της εξίσωσης (4.41) και είναι το γινόμενο δύο παραγόντων, της συνάρτησης του ανέμου και του ελλείμματος κόρου. Αρχικά, ο Penman χρησιμοποιεί για την Ea μια εξίσωση του Dalton (1802) της μορφής:

$$Ea = f(u) (eos – e2), \quad (4.42)$$

όπου f(u) είναι μια συνάρτηση της οριζόντιας ταχύτητας του ανέμου, eos η πίεση κορεσμένων υδρατμών στην επιφάνεια του εδάφους και e2 η πραγματική πίεση υδρατμών σε ύψος 2 m από την επιφάνεια του εδάφους. Στην εξέλιξη της μεθόδου, ο Penman παρουσιάζει την εξής εξίσωση για τον αεροδυναμικό όρο:

$$Ea = 0,263 (1 + 0,537 U2)(es – ed) \text{ [mm ημέρα}^{-1}\text{]}. \quad (4.43)$$

Επισημαίνεται ότι η μέθοδος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του ελλείμματος κόρου πρέπει να διαφέρει κάθε φορά, ανάλογα με την εξίσωση υπολογισμού f(u).

β) Μέθοδος Doorenbos και Pruitt. Οι Doorenbos και Pruitt (1977) έχουν προτείνει μια τροποποιημένη εξίσωση του Penman, εισάγοντας νέους συντελεστές για τις περιοχές στις οποίες υπάρχουν διαθέσιμα τα απαραίτητα δεδομένα. Σε γενικές γραμμές, για την εξίσωσή τους ισχύουν οι ίδιες προϋποθέσεις που ισχύουν για την εξίσωση του Penman. Η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιήσει έως και μέσες ημερήσιες τιμές κλιματικών δεδομένων. Εφόσον οι ημερήσιες και νυχτερινές κλιματικές συνθήκες επιδρούν σημαντικά στην εξατμισοδιαπνοή, ένας αντισταθμιστικός παράγοντας λαμβάνεται υπόψη και γι' αυτό. Η συνιστώμενη εξίσωση από τους Doorenbos και Pruitt είναι η:

$$ETo = c[W Rn + (1 – W) f(u) (es – ea)], \quad (4.44)$$

όπου ETo είναι η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς σε mm ημέρα^{-1}, c ένας παράγοντας διευθέτησης για την αντιστάθμιση των ημερήσιων και νυκτερινών καιρικών συνθηκών, που εξαρτάται από τη θερμοκρασία του αέρα, Rn η καθαρή πυκνότητα ροής ακτινοβολίας σε mm ημέρα,[1] f(u) η συνάρτηση της ταχύτητας του ανέμου και (es – ea) το έλλειμμα πίεσης κορεσμού σε mbars.

γ) Μέθοδος Penman-Monteith. Οι σχέσεις της αεροδυναμικής αντίστασης και της αντίστασης της κάλυψης του εδάφους με τη διαδικασία της εξάτμισης ενσωματώνονται στην εξίσωση του Penman, οπότε προτείνεται η εξής συνδυαστική εξίσωση (Monteith, 1975):

$$ETo = [\Delta(Rn-G)+\gamma Ea]/(\Delta+\gamma) \text{ [Watts m}^{-2} \text{ ή ημέρα}^{-1}\text{]}, \quad (4.45)$$

όπου ETo είναι η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (mm day^{-1}), Rn η καθαρή πυκνότητα ροής ακτινοβολίας σε mm ημέρα-^{1}, G η πυκνότητα ροής θερμότητας του εδάφους (MJ m^{-2} day^{-1}), Ea η αποξηραντική ικανότητα της ατμόσφαιρας, γ η ψυχρομετρική σταθερά (kPa ^{o}C^{-1}) και Δ η καμπύλη πίεσης ατμού κλίσεων (kPa ^{o}C^{-1}).

Υπολογισμός του φυτικού συντελεστή K_c. Ο K_c μπορεί να υπολογιστεί με βάση χρονοσειρές επίγειων μετεωρολογικών και φαινολογικών δεδομένων πεδίου. Σύμφωνα με την εξίσωση Penman-Monteith, ισχύει η σχέση:

$$K_{cmid} = K_{cmid(Tab)} + [0,04 (u_2 – 2) – 0,0004(RH_{min} – 45)] (h/3)^{0.3}, \quad (4.46)$$

όπου $K_{cmid(Tab)}$ είναι η τιμή του K_{cmid} από πίνακες (π.χ., για βαμβάκι, είναι 0,14, u_2 η μέση ημερήσια ταχύτητα ανέμου σε ύψος 2 m πάνω από γρασίδι στο μέσον της βλαστικής περιόδου, RH_{min} η μέση ημερήσια ελάχιστη σχετική υγρασία στο μέσον της βλαστικής περιόδου και h το ύψος της καλλιέργειας στο μέσον της βλαστικής περιόδου.

Η ίδια διαδικασία ακολουθείται για τον υπολογισμό του K_{cend} στο τελευταίο στάδιο της βλαστικής περιόδου, χρησιμοποιώντας τιμές των u_2, RH_{min} και h, επίσης του τελευταίου σταδίου, αντίστοιχα.

δ) Μέθοδος Blaney-Criddle. Αυτή η μέθοδος συνιστάται όταν υπάρχουν διαθέσιμα μόνο δεδομένα θερμοκρασίας του αέρα. Η αυθεντική εξίσωση (Blaney & Criddle, 1950) χρησιμοποιεί μετρήσεις της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας Ta, σε ^{o}C, του ποσοστού των ολικών ετησίων ωρών ημέρας PBc, που παρατηρούνται την περίοδο κατά την οποία γίνεται ο προσδιορισμός της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς, καθώς και ένα συντελεστή καλλιέργειας, η τιμή του οποίου εξαρτάται όχι μόνο από τα χαρακτηριστικά της βλάστησης, αλλά και από τις κλιματικές συνθήκες. Με αυτόν τον τρόπο, η μέθοδος δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα μόνο για μικρές εκτάσεις και για τις συγκεκριμένες χρονικές περιόδους, για τις οποίες έχουν υπολογιστεί οι χρησιμοποιούμενοι συντελεστές. Έχει διαπιστωθεί, όμως, πως η επίδραση του κλίματος πάνω στην εξατμισοδιαπνοή αναφοράς ορίζεται ανεπαρκώς μόνο με τα δεδομένα της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας και τη διάρκεια της ημέρας, και έτσι έχει εισαχθεί ένας νέος συντελεστής, που εκφράζει τις συγκεκριμένες κλιματολογικές συνθήκες της εξεταζόμενης περιοχής. Σήμερα, η εξίσωση που συνιστάται προς χρήση για τη μέθοδο αυτή είναι η εξής (Doorenbos & Pruitt, 1977):

$$ETo = c\ PBc\ (0{,}46\ Ta + 8)/30 [mm\ ημέρα^{-1}], \quad (4.47)$$

όπου ETo είναι η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς για τον εξεταζόμενο μήνα, Ta η μέση ημερήσια θερμοκρασία σε ^{o}C, PBc το μέσο ημερήσιο ποσοστό ωρών ημέρας για τον συγκεκριμένο μήνα και το συγκεκριμένο γεωγραφικό πλάτος, c ένας συντελεστής διόρθωσης, που εξαρτάται από την ελάχιστη σχετική υγρασία κατά τις ώρες ηλιοφάνειας και από την εκτιμούμενη ταχύτητα του ανέμου.

ε) Μέθοδος Thornthwaite. Η μέθοδος αυτή (Thornthwaite, 1948) χρησιμοποιεί μόνο τη μέση θερμοκρασία σε ^{o}C, για να εκφράσει την επίδραση του κλίματος πάνω στην τιμή της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς. Για το λόγο αυτό, παρουσιάζει καλά αποτελέσματα όταν δεν χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς σε μικρά χρονικά διαστήματα, γιατί η μέση μηνιαία θερμοκρασία από μόνη της δεν είναι επαρκής για να εκφράσει την ενέργεια που διατίθεται για την εξατμισοδιαπνοή. Κατά τον Thornthwaite, η τιμή της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς δίνεται από την εξίσωση:

$$ETo = 0{,}533\ Ld\ (10Ta/I)^{a}\ [mm\ ημέρα^{-1}], \quad (4.48)$$

όπου Ta είναι η μέση μηνιαία θερμοκρασία σε ^{o}C, υπολογιζόμενη από τις μέσες ημερήσιες, και I ο δείκτης θερμότητας, που δίνεται από την εξίσωση:

$$I = \sum_{n=1}^{12} (T_a/5)^{1{,}514}, \quad (4.49)$$

όπου $a = 0{,}000000675\ I^3 - 0{,}000077\ I^2 + 0{,}49239$, Ld είναι ένας διορθωτικός συντελεστής, συνάρτηση του μήνα και του γεωγραφικού πλάτους.

Θα πρέπει και πάλι να τονιστεί ότι η μέθοδος αυτή δίνει καλά αποτελέσματα όταν δεν χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς για μικρά χρονικά διαστήματα, καθόσον η μέση θερμοκρασία δεν είναι ένα κατάλληλο μέτρο για την ενέργεια που διατίθεται για την εξατμισοδιαπνοή.

στ) Μέθοδος Turk. Ο Turk (1954) έχει προτείνει την παρακάτω εξίσωση για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς:

$$ETo = 0{,}1(P + 80)/ - \{1 + [(P + 45)/LTc]^2\}\ [mm\ ημέρα^{-1}], \quad (4.50)$$

όπου P είναι η βροχόπτωση σε mm/10 ημέρες. Ο παράγοντας LTc δίνεται από την εξίσωση:

$$LTc = 0{,}0899\ (2+Ta) - Rs, \quad (4.51)$$

όπου Ta είναι η μέση θερμοκρασία του αέρα σε ύψος 2 m, σε ^{o}C, και Rs η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος σε Watts m^{-2}.

ζ) Μέθοδος Jensen-Haize. Η εξίσωση που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς είναι η εξής:

$$ETo = 0{,}035(0{,}025\ Ta + 0{,}08)Rs\ [mm\ ημέρα^{-1}], \quad (4.52)$$

όπου Rs είναι η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος σε Watts m^{-2} και Ta η μέση θερμοκρασία του αέρα σε ύψος 2m, σε ^oC.
Η μέθοδος αυτή, όπως και η προηγούμενη, δίνει μικρότερες τιμές της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς από τις πραγματικά μετρούμενες στη διάρκεια της άνοιξης και μεγαλύτερες στη διάρκεια του καλοκαιριού, καθόσον πιστεύεται ότι υπερεκτιμάται η επίδραση της θερμοκρασίας σε σχέση με την επίδραση της ακτινοβολίας.
η) Μέθοδος Hargreaves-Samani. Η εμπειρική αυτή μέθοδος υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς ET_0 (mm/day) δίνεται από την εξίσωση (Hargreaves, 1974):

$$ET_0 = 0{,}0023\,(T_{max} - T_{min})^{0.5}\,(T_m + 17{,}8)R_a\,, \quad (4.53)$$

όπου T_{max}, T_{min} είναι η ημερήσια μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία σε ^oC, αντίστοιχα, T_m η μέση ημερήσια θερμοκρασία σε ^0C και R_a η προσπίπτουσα ακτινοβολία στο όριο της ατμόσφαιρας σε mm/day.
Η μέθοδος αυτή θεωρείται εύχρηστη, καθόσον βασίζεται κυρίως σε δεδομένα θερμοκρασίας, αλλά και ακτινοβολίας, μπορεί δε να εφαρμοστεί σε περιοχές στις οποίες δεν διατίθενται μετρήσεις ακτινοβολίας. Τέλος, επισημαίνεται ότι έχει προταθεί από την ειδική επιτροπή για την εξατμισοδιαπνοή της Αμερικανικής Κοινότητας Πολιτικών Μηχανικών.

4.5.3 Δορυφορικές μέθοδοι εκτίμησης εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας

Η δορυφορική αγρομετεωρολογική τηλεπισκόπηση περιλαμβάνει εκτίμηση μετεωρολογικών παραμέτρων, εκτίμηση ισοζυγίων ενέργειας και νερού, παρακολούθηση καλλιεργειών και βιομάζας, καθώς και φυσικούς περιβαλλοντικούς κινδύνους, όπως πλημμύρες, ξηρασίες, χαλάζι, παγετό, καύσωνα, δασικές πυρκαγιές, ερημοποίηση, ανεμοθύελλες. Στις μετεωρολογικές παραμέτρους που ενδιαφέρουν την αγρομετεωρολογική ανάλυση περιλαμβάνονται ο υετός, η ηλιακή ακτινοβολία, η θερμοκρασία επιφάνειας, οι δείκτες βλάστησης, η εξατμισοδιαπνοή, η εδαφική υγρασία, καθώς και το έλλειμμα νερού (Dalezios, 2011). Ακόμα, δεδομένα από πλατφόρμες τηλεπισκόπησης μπορεί να αποτελέσουν συμπληρωματικά μετεωρολογικά στοιχεία στην αγρομετεωρολογική ανάλυση. Συστήματα τηλεπισκόπηση, που παρέχουν δεδομένα χαμηλής χωρικής και υψηλής χρονικής διακριτικής ικανότητας κρίνονται κατάλληλα για τέτοιες εφαρμογές, καθώς διαθέτουν ημερήσια κάλυψη και συλλογή δεδομένων. Δορυφορικά στοιχεία που ικανοποιούν τις παραπάνω απαιτήσεις προέρχονται από τον μετεωρολογικό δορυφόρο NOAA/AVHRR.
Η εκτίμηση της περιοχικής εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας, ET_c, έχει μεγάλη σημασία για αγρονομικούς σκοπούς, όπως είναι η ικανοποίηση των αναγκών των φυτών σε νερό και, επομένως, η βέλτιστη διαχείριση του αρδευτικού νερού. Επίσης, οι πληροφορίες για την ET_c σε κάθε περιοχή είναι απαραίτητες για την πρόβλεψη της γεωργικής παραγωγής. Η ET_c είναι επίσης ένας από τους όρους της εξίσωσης ισοζυγίου ενέργειας και νερού. Οι προσεγγίσεις που έχουν αναπτυχθεί για τον προσδιορισμό και την εκτίμηση της ET_c χρησιμοποιώντας συμβατικά μετεωρολογικά δεδομένα είναι δυνατές μόνο σε τοπική κλίμακα (10-100m^2). Οι μετεωρολογικοί δορυφόροι με τις χωρικές τους αναλύσεις είναι δυνατόν να συμβάλουν στην εκτίμηση της περιοχικής ET_c. Όπως ισχύει στις σύγχρονες, αλλά συμβατικές, μεθόδους εκτίμησης της ET_c, όπως έχει ήδη επισημανθεί, έτσι και οι δορυφορικές μέθοδοι περιλαμβάνουν δύο μέρη, σύμφωνα και με την εξίσωση (3.39). Ειδικότερα, το πρώτο μέρος αφορά την εκτίμηση της περιοχικής εξατμισοδιαπνοής αναφοράς, ET_r, με μεθόδους τηλεπισκόπησης, και το δεύτερο μέρος περιλαμβάνει τον υπολογισμό του φυτικού συντελεστή, K_c, επίσης με μεθόδους τηλεπισκόπησης. Οι τηλεπισκοπικές μέθοδοι μπορεί να χρησιμοποιούνται για κάθε μέρος ανεξάρτητα ή συνδυαστικά, και για τα δύο μέρη.

4.5.3.1. Εκτίμηση της ET_r

Στην περίπτωση της εκτίμησης της ET_r, διακρίνονται δύο κατηγορίες μεθόδων για τη χρήση δορυφορικών δεδομένων, σε συνδυασμό πάντοτε και με μετεωρολογικές παραμέτρους, κυρίως θερμοκρασία και ακτινοβολία, τα ημιεμπειρικά και στατιστικά μοντέλα, καθώς και οι αναλυτικές και αριθμητικές μέθοδοι. Στην πρώτη κατηγορία, οι μέθοδοι παρέχουν μια προσεγγιστική λύση της εξίσωσης ισοζυγίου, οδηγώντας σε μια ημιεμπειρική φόρμουλα, συνδέοντας εξατμισοδιαπνοή και υγρασία με την επιφανειακή θερμοκρασία (Idso et al., 1977 Seguin & Iter, 1983). Στη δεύτερη κατηγορία, οι αναλυτικές και αριθμητικές μέθοδοι βασίζονται στην επίλυση του αντιστρόφου προβλήματος, δηλαδή της μεταφοράς τόσο της θερμότητας, όσο και της μάζας. Έχουν χρησιμοποιηθεί μοντέλα Fourier για να εξάγουν τη θερμική αδράνεια από την ημερήσια θερμοκρασιακή διακύμανση και για να προσδιορίσουν τη διαθεσιμότητα της επιφανειακής υγρασίας (Watson, 1975·Price, 1977· Becker et al., 1982). Επίσης, οι ίδιες βασικές φυσικές αρχές εφαρμόζονται και σε αριθμητικά μοντέλα

(Carlson et al.,1981). Κανένα από τα μοντέλα που παρουσιάστηκαν παραπάνω δεν αφορούν σαφώς τις καλλιέργειες, καθώς αναφέρονται μόνο σε φυσικούς μηχανισμούς πάνω από το γυμνό έδαφος. Παρουσιάζονται ενδεικτικά μερικά παραδείγματα μοντέλα εκτίμησης της ET_r:

- Ο ρόλος της καλλιέργειας ελήφθη υπόψη (Wetzel & Atlas, 1983). Η μέθοδος του Taconet και άλλων (1986) βασίζεται στην εφαρμογή του μοντέλου μονοδιάστατου οριακού στρώματος (καλλιέργεια) εδάφους και της υπέρυθρης επιφανειακής ημερομηνίας από τον NOAA-7, ως δεδομένων εισαγωγής. Το μοντέλο επιτρέπει ευρέως τη χρήση μικρών αριθμών από μέσης κλίμακας επιφανειακής καλλιεργητικής βλάστησης. Οι έλεγχοι ευαισθησίας του μοντέλου δείχνουν ότι μια επιφανειακή θερμοκρασία, μετρημένη περίπου στο μέσον της ημέρας, είναι αρκετή για τη λήψη της ενεργειακής ροής της επιφάνειας, αλλά μόνο πάνω από πυκνή βλάστηση.

Η ανάπτυξη ενός απλού μοντέλου (Caselles et al., 1992a) για την εκτίμηση της ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής από δορυφορικές εικόνες θερμοκρασίας και ανακλαστικότητας:

$$ET_r = (aT_a + b)\, R_g + c, \quad (4.54)$$

όπου T_a, είναι η μέση ημερήσια θερμοκρασία, R_g η παγκόσμια ηλιακή ακτινοβολία και τα a, b, c εμπειρικές σταθερές που καθορίζονται για κάθε περιοχή ανάλογα με το υψόμετρο, τη σχετική ατμοσφαιρική υγρασία και την ταχύτητα του ανέμου.
Επίσης, διαπιστώνεται ότι είναι καλύτερο να χρησιμοποιείται η μέγιστη θερμοκρασία (T_{max}), παρά ο ημερήσιος μέσος όρος (T_α). Οπότε, η εξίσωση γίνεται:

$$ET_0 = AT_a^{\max} R_g + BR_g + C\,. \quad (4.55)$$

Η ανάπτυξη ενός μοντέλου (Caselles et al., 1992b) για τον υπολογισμό της μέγιστης εξατμισοδιαπνοής σε τοπική κλίμακα, ET_m, από δεδομένα του δορυφόρου NOAA-AVHRR, που δίνεται από την εξίσωση:

$$ET_m = K_c (AT_a^{\max} R_g + BR_g + C)\,, \quad (4.56)$$

όπου Kc είναι ο φυτικός συντελεστής καλλιέργειας, που απεικονίζεται σε χάρτη με τη χρήση δορυφορικής εικόνας, με βάση το δείκτη βλάστησης NDVI. Οι συντελεστές A, B και C είναι εμπειρικοί συντελεστές, που υπολογίζονται για κάθε ζώνη.

- Σε αντίστοιχη μέθοδο (Tarpley, 1992), η ανάπτυξη ενός απλού μοντέλου επιφανειακού ενεργειακού ισοζυγίου, με δορυφορικά και συμβατικά δεδομένα, για τον υπολογισμό της μέσης μηνιαίας εξατμισοδιαπνοής. Με δορυφορικά δεδομένα, η ET μπορεί να υπολογιστεί απευθείας, οπότε δεν χρειάζονται ούτε η δυναμική ET, ούτε και κάποιο βοηθητικό μοντέλο εδαφικής υγρασίας. Η μέθοδος μπορεί να προσαρμοστεί για χρήση μόνο δορυφορικών δεδομένων σε αγρούς με αριθμητικά μοντέλα πρόγνωσης καιρού.
- Ανάλογη μέθοδος στην οποία συνυπολογίζεται η διαφορά ($T_s - T_a$) στις 12,00 UT όταν το T_s παίρνει τη μέγιστη τιμή του. Για λειτουργικούς σκοπούς, καθώς τα δορυφορικά δεδομένα του NOAA-AVHRR λαμβάνονται στις 14,00 UT και μόνο η μέγιστη ατμοσφαιρική θερμοκρασία, $T_{a\,max}$, είναι προς το παρόν διαθέσιμη από τα μετεωρολογικά δίκτυα, έχει χρησιμοποιηθεί η εξής σχέση (Lagouarde, 1991):

$$ET_d - RN_d = A - B(T_{s14} - T_{a\max})\,, \quad (4.57)$$

όπου οι συντελεστές A και B υπολογίζονται στατιστικά και το RN_d είναι η καθαρή ημερήσια ακτινοβολία.

- Υπολογισμός της Καθαρής Ακτινοβολίας (Net Radiation) και της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής. Ως ολική καθαρή πυκνότητα ροής ακτινοβολίας (Net Radiation/R_n) που δέχεται μια επιφάνεια στη μονάδα του χρόνου ορίζεται η διαφορά της ολικής προσπίπτουσας ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος και της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος από την επιφάνεια προς την ατμόσφαιρα, στη μονάδα του χρόνου. Η R_n μπορεί να μετρηθεί, με κάποια σχετικά καλή ακρίβεια, με τα ακτινόμετρα ή πυρανόμετρα.

Παρουσιάζεται μια μέθοδος υπολογισμού της R_n, με τη χρήση τηλεπισκόπησης. Αρχικά, υπολογίζεται η θερμοκρασία επιφάνειας της ξηράς (Land Surface Temperature/LST):

$$LST = \frac{1-e}{e} A + \frac{B}{e} T_4 + \frac{C}{e} T_5, \text{ (4.58)}$$

όπου Α είναι η σταθερά γυμνού εδάφους 36,36 (πλήρης κάλυψη βλάστησης 9,80), Β η σταθερά γυμνού εδάφους 3,02 (πλήρης κάλυψη βλάστησης –2,83) και C η σταθερά γυμνού εδάφους –2,25 (πλήρης κάλυψη βλάστησης –2,02).
Επίσης:

$e = e_o \cos(\Theta/2)$, (4.59)

όπου, για το έδαφος, το $e_o = 0,90$ (→ $LST_{,BS}$), για τη βλάστηση, το $e_o = 0,98$ (→ $LST_{,FC}$) και Θ είναι η κατακόρυφη γωνία θέασης (zenith view angle).
Σε σχέση με τον NDVI, το e γράφεται:

$e = 1,0094 + 0,0471$ (NDVI) (4.60)

και το LST γίνεται:

$$LST = \frac{e - 0.90}{0,08} LST_{FC} + \frac{0,98 - e}{0,08} LST_{BS} \text{ . (4.61)}$$

Στη συνέχεια, υπολογίζεται η μέση καθαρή ακτινοβολία ως εξής:

$l_n = (l-\alpha) I_g + L_d - Lu$, (4.62)

όπου

$$T_{0,ave} = T_{0,x} \frac{T_{a,ave}}{T_{a,x}}$$

η μέση ημερήσια θερμοκρασία, $T_{o,\chi}$ το LST, που αποτελεί και συνάρτηση του NDVI.
Επίσης:

$$L_u = e\sigma T_0^4 \text{ (Wm}^{-2}\text{) (4.63)}$$

$L_d = 5,31 * 10^{-13} T^6_a + 60 N - 20$ (Wm^{-2}), (4.64)

με N το ποσοστό νεφοκάλυψης και T_a τη θερμοκρασία του αέρα στα 2 m (K).
Επίσης:

$I_g = l353 \sin\gamma (0,59 + 0.1 \sin\gamma) (1 - e N^2)$ (Wm^{-2}), (4.65)

με γ το ύψος του ήλιου.

Στη συνέχεια, υπολογίζεται η πραγματική εξατμισοδιαπνοή. Το ισοζύγιο ενέργειας μιας επιφάνειας δίνεται από την εξίσωση:

$LE + I_n + G + H = O$. (4.66)

Αν η πυκνότητα ροής θερμότητας του εδάφους είναι πολύ μικρή σε ποσότητα, τότε παραλείπεται, και η εξίσωση γίνεται:

$LE = I_n - H$. (4.67)

Η ροή αισθητής θερμότητας (sensible heat flux) υπολογίζεται ως εξής:

$$H_{,x} = \frac{P_a C_p}{r_a}(T_{0,x} - T_{a,x}) \ (\mathrm{Wm^{-2}}), \quad (4.68)$$

όπου $r_a = \frac{4{,}72(\ln(z/z_0)^2}{1 + 0{,}54U_{,x}}$ ($\mathrm{sm^{-1}}$) (4.69)

$z_0 = \exp\ (-1{,}46 + 3{,}17\ \mathrm{NDVI})$ (4.70)

και U_X είναι η ταχύτητα του ανέμου στα 2 m κατά την ώρα χ και Z είναι το υψόμετρο αναφοράς (z = 2 m). Επίσης:

$\Gamma = T_{0,\chi}\ (0{,}32 + 0{,}62\ \alpha)\ (1 - 0{,}98\ \mathrm{NDVI}^4)\ 10^{-2}$, (4.71)

όπου a είναι η λευκαύγεια (albedo) και $P_a\ C_p$ η σταθερά (1,205 $\mathrm{Wm^{-3}sK^{-1}}$) .

4.5.3.2. Εκτίμηση του φυτικού συντελεστής K_c

Ο φυτικός συντελεστής K_c συγκεντρώνεται στην επίπτωση των χαρακτηριστικών που διακρίνουν ένα τυπικό αγρό από το χορτοτάπητα αναφοράς, ο οποίος παρουσιάζει ομοιογενή απεικόνιση, με πλήρη κάλυψη του εδάφους. Οι τιμές του K_c επηρεάζονται από τον τύπο της καλλιέργειας, τα κλιματικά χαρακτηριστικά της περιοχής, την εξάτμιση του εδάφους, καθώς και το φαινολογικό στάδιο ανάπτυξης (Allen et al., 1998). Ο K_c παρουσιάζει υψηλή συσχέτιση με το δείκτη βλάστησης NDVI και, κατά συνέπεια, οι δορυφορικές μέθοδοι εκτίμησής του βασίζονται σε μοντέλα παλινδρόμησης των δύο μεταβλητών (Dalezios et al., 2011), όπου ο δείκτης NDVI υπολογίζεται μόνο από δορυφορικά δεδομένα στη διακριτική ικανότητα του κάθε δορυφόρου.
Από το ορατό τμήμα του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας είναι δυνατόν να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με το ρυθμό φωτοσύνθεσης, ενώ από το κοντινό υπέρυθρο συμπεράσματα σχετικά με την πυκνότητα της χλωροφύλλης και με το ποσό του φυλλώματος στη φυτική μάζα, καθώς και με το περιεχόμενο νερό στα φύλλα, που συνδέεται άμεσα με το ρυθμό διαπνοής και, κατ' επέκταση, με την επίδρασή του στη φυσιολογική διεργασία της φωτοσύνθεσης. Τελικά, τόσο από τη διεθνή βιβλιογραφία, όσο και από την προσαρμογή της στην Ελλάδα, χρησιμοποιούνται οι εξής σχέσεις (Dalezios et al., 2011):

$K_c = 1{,}25\ \mathrm{NDVI} + 0{,}2$ (διεθνώς) (4.72)

$K_c = 1{,}15\ \mathrm{NDVI} + 0{,}17$ (για Ελλάδα). (4.73)

Επισημαίνεται ότι ο υπολογισμός του δείκτη βλάστησης NDVI από δορυφορικές εικόνες διευκολύνει τη διαδικασία ταξινόμησης, χωρικής μεταβλητότητας και χαρτογράφησης της βλάστησης, παρέχοντας σημαντικές πληροφορίες για τη δομή και τη σύνθεση της φυτοκάλυψης. Η διαφορετική ανακλαστικότητα της πράσινης βλάστησης σε τμήματα του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (ορατό και κοντινό υπέρυθρο) παρέχει μια καινοτομική μέθοδο παρακολούθησης της επίγειας βλάστησης από το διάστημα. Ειδικότερα, η φασματική συμπεριφορά της φυτικής κάλυψης στο ορατό (0,4-0,7μm) και στο κοντινό υπέρυθρο (0,74-1,1μm, 1,3-2,5 μm) επιτρέπει την παρακολούθηση από το διάστημα των μεταβολών στα διάφορα στάδια καλλιεργούμενων και μη φυτών λαμβάνοντας, όμως και την αντίστοιχη συμπεριφορά του γύρω εδάφους και του μικροπεριβάλλοντος.

Βιβλιογραφικές αναφορές

Adler, R.F. & Negri, A. (1988). A satellite infrared technique to estimate tropical convective and stratiform rainfall. *Journal of Applied Meteorology*. 27: 30-51.

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration, guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrig. and Drain. Paper 56, Rome, Italy: FAO.

Arkin, P.A. & Meisner, B.N. (1987). The relationship between large-scale convective rainfall and cold cloud over the Western Hemisphere during 1982-84. *Monthly Weather Review*. 115:51-74.

Barrett, E.C. & Martin, D.W. (1981). *The Use of Satellite Data in Rainfall Monitoring*. Academic Press. NY

Battan, L.J. (1973). *Radar Observations of the Atmosphere*. University of Chicago Press. Chicago, USA

Brandes, E.A. (1975). Optimizing rainfall estimates with the aid of radar. *Journal of Applied Meteorology*. 14, 1339-1345.

Bringi, V.N. & Chandrasekar V. (2004). *Polarimetric Doppler Weather Radar*. Cambridge University Press, 2nd Edition, UK.

Bauer, P., Schanz, L., Bennartz, R. and Schlüssel, P. (1998). Outlook for combined TMI-VIRS algorithms for TRMM: lessons learned from the PIP and AIP projects. *Journal of Atmospheric Science*, 55:1714-1729.

Blaney, H.F. & Criddle, W. D. (1950). *Determining water requirement in irrigated areas from climatological and irrigation data*. U.S. Dept. Agriculture, Soil Conserv. Service, Tech. Paper 96.

Becker, F., Hechinger, E. and Raffy, M. (1982) Comparison between the accuracies of a new discretization method and an improved Fourier method το evaluate heat transfer between soil and atmosphere. *Journal of Geophysical Research*. 87:7325-7339

Carlson, T.N., Dodd, J.K., Benjamin, S.G. and Cooper, J.N. (1981). Satellite estimation of the surface energy balance, moisture availability and thermal inertia. *Journal of Applied Meteorology*. 20:67-87.

Caselles, Y., Delegiclo, J., Huriado, E. and Sobrino, J.A. (1992a). Evaluation of the maximum evapotranspiration over La Mancha region, Spane, by use of NOAA/ AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*. 13:939-946.

Caselles, C., Huriado, E. and Solírino, J.A. (1992b). Maximum evapotranspiration Herough NOAA Satellite images. Application to La Mancha region, Spain, *Atmospheric Research*. 28:365-374.

Dalezios, N.R. (2012). *Storms*. *Lecture notes*. Volos: University of Thessaly Press.

Dalezios, N.R. (2011). *Remote Sensing in Water Resources*. Lecture notes. 2nd edition.

Dalezios, N.R., Mplanta, A. and Domenikiotis, C. (2011). Remotely Sensed Cotton Evapotranspiration for irrigation Water Management in Vulnerable Agriculture of Central Greece. JITAG. *Journal of Information Technology Agriculture*. 4(1):1-14.

Dalezios, N.R., Loukas, A. and Bampzelis, D. (2002). Spatial Variability of Reference Evapotranspiration in Greece. *Physics and Chem. of the Earth*, 27(23-24):1031-1038.

Dalezios, N.R. (1988). Objective Rainfall Evaluation in Radar Hydrology. *Journal of Water Resources Planning and Management (JWRMDS), ASCE*, 114(5):531-546.

Dalton, J. (1802) Experiments and observations to determine whether the quantity of rain and dew is equal to the quantity of water carried off by the rivers and raised by evaporation; with an enquiry into the origin of springs. *Memoirs of the Literary Philosophical Society of Manchester*, V(II):346-372.

Domenikiotis, C., Spiliotopoulos, M., Galakou, E. and Dalezios, N.R. (2005). Assessment of Cold Cloud Duration (CCD) Methodology for Rainfall Estimation in Central Greece. In the Dalezios, N. R. & Dobesch (Eds.). *Proceedings of Intern. Symp. On "GIS and Remote Sensing: Environmental Applications"*. EC and Univ. of Thessaly., 7-9 Nov. 2003, Volos, Greece, 185-194.

Follansbee, W.A. (1973). *Estimation of Average Daily Rainfall from Satellite Cloud Photographs*. Washington D.C.: NOAA Tech. Memo NESS 44.

Doorenbos, J. & Pruitt, W.O. (1977). *Crop water requirements*. *FAO Irrigation and Drainage Paper* No. 24. Rome: Food and Agric. Organiz. of the U.N.

Griffith, C.G., Woodley W.L., Grube, P. G., Martin, D.W., Stout, J. and Sikdar, D.N. (1978). Rain estimation from geosynchronous satellite imagery - Visible and infrared studies. *Monthly Weather Review*. 106:1153-1171.

Grody, N.C., Weng, F. and Ferraro, R.R. (1999). Application of AMSU for obtaining hydrological parameters. In Pampaloni P. and Paloscia S. (Ed) *Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment*, Utrecht (The Netherlands): VSP Int. Sci. Publisher, 339-351.

Haddad, Z., Smith, E.A., Kummerow, C.D., Iguchi, T., Farrar, M., Darden, S., Alves, M. and Olson, W. (1997). The TRMM 'Day-1' radar/radiometer combined rain-profile algorithm. *Journal of Meteorology Society of Japan*, 75:799-808.

Hargreaves, G.H. (1974). Estimation of potential and crop evapotranspiration. *Transactions of the ASAE* 17(4):701-704.

Idso, S.B., Jackson, R.D. and Reginato, R.J. (1977). An equation for potential evaporation from soíl, water and crop surfaces adaptable to use by remote sensing. *Geophysical Research Letters*. 4:187-188.

Jensen, M.E., Burman, R.D. and Allen, R.G. (1990). Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements. *ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 70*, New York: American Society of Civil Engineers.

Kidder, S.Q. & Vonder Haar, T. H. (1995). *Satellite Meteorology: An Introduction*. Academic Press. NY

Lagouarde, J.-P. (1991). Use of NOAA/AVHRR data combined with an agrometeorological model for evaporation mapping. *International Journal of Remote Sensing*. 12:1853-1864.

Levizzani, V., Amorati R. and Meneguzzo, F. (2002). *A Review of Satellite-based Rainfall Estimation Methods*. EC Research Project MUSIC. Tech. Report.

Levizzani, V., Schmetz J., Lutz, H.J.J. Kerkmann, P., Alberoni, P. and Cervino, M. (2001). Precipitation estimations from geostationary orbit and prospects for METEOSAT Second Generation. *Meteorological Applications,* 8:23-41.

Lovejoy, S. & Austin, G.L. (1979). The delineation of rain areas from visible and IR satellite data from GATE and mid-latitudes. *Atmosphere-Ocean*, 17:77-92.

Lutgens, F. K. & Tarbuck, E.J. (1979). *The Atmosphere: Introduction to Meteorology*. Prentice Hall, NY

Μακρογιάννης, Τ.Ι. και Σαχσαμάνογλου, Χ.Σ. (1993). *Μαθήματα Γενικής Μετεωρολογίας*. Θεσσαλονίκη: Χάρις.

Marshall, J.S. & Palmer W.Mc.K. (1948). The distribution of raindrops with size. *J. Meteor.,* 5:165-166.

Monteith, J.L. (1975). *Principles of Environmental*. London: Physics. Edward Arnold.

Negri, A.J., Adler, R. F. and Wetzel, P.J. (1984). Rain estimation from satellite: An examination of the Griffith-Woodley technique. *Journal of Climate and Applied Meteorology*. 23:102-116.

Παπαζαφειρίου, Ζ.Γ. (1999). *Οι ανάγκες σε νερό των καλλιεργειών*. Θεσσαλονίκη: Ζήτη.

Price, J.C. (1977) Thermal mapping: A new νίew of the earth. *Journal of Geophysical Research*. 20:311-316.

Richards, M.A., Scheer, J.A. and Holm W.A. (Eds.). (2010). *Principles of Modern Radar*. Scitech Publ.

Scofield, R.A. & Oliver, (1977). *A scheme for estimating convective rainfall from satellite imagery*. Washington, D.C.: NOAA Tech. Memo. NESS, 86.

Seguin, B. and Iter, B. (1983). Using rnidday surface temperature to estimate daily evaporation from satellite thermal I.R. data. *International Journal of Remote Sensing*. 4:371-383.

Shaw, E.M. and Lynn P.P. (1972). Area rainfall evaluation using two surface fitting techniques. *Bulletin of IASH*. XXVII(4):419-433.

Stout, J.E., Martin, D.W. and Sikdar, D.N. (1979). Estimating GATE Rainfall with Geosynchronous Satellite Images. *Monthly Weather Review*. 107:585-598.

Taconet, D. Bemard, R. and Vidal-Mad-ar, D. (1986). Evapotranspiration over agricultural region using α surface flux / temperature model based on NOAA-A VHRR data. *Journal of Climate and Applied Meteorology*.25:284-307.

Tarpley, J.D. (1992) Monthly evapotranspiration from satellite and conventional Meteorological Observations, *Journal of Climate*. 7:704-713.

Thiessen, A.H. (1911). Precipitation for large areas. *Monthly Weather Review*. 39:1082-1084.

Thornthwaite, C.W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*. 38:55-94.

Todd, M.C., Barrett, E.C., Beaumont, M.J. and Bellerby, T.J. (1999). Estimation of daily rainfall over the upper Nile river basin using a continuously calibrated satellite infrared technique. *Meteorological Applications*. 6:201-210.

Turk, L. (1954). Le bilad'eau des sols: relation entre les precipitation l'evaporation et l'ecoulement. *Annales Agronomiques*, N4, 491-595.

Vicente, G.A., Scofield, R.A. and Menzel, W.P. (1998). The operational GOES infrared rainfall estimation technique. *Bulletin of American Meteorology Society*. 79:1883-1898.

Xu, L., Gao, X., Sorooshian, S. Arkin, P.A. and Imam, B. (1999). A microwave infrared threshold technique to improve the GOES precipitation index. *JAM*, 38:569-579.

Ψύχα, Α. (2010). *Σημειώσεις Ναυτικής Μετεωρολογίας*. Ελληνική Ιστιοπλοϊκή Ομοσπονδία, Αθήνα.
Watson, K. (1975): Geologic applications of thermal infrared imagery. *Proceedings of IEEE*. 63:128-137.
Wetzel, P.J. & Atlas, D. (1983). Inference of soil moisture from geosynchronous satellite infrared observations, *Proceedings Sixth Conference Biometeorology and Aerobiology, American Meteorology Society*. April 25, 1983.
WMO (1965). *Guide to Hydrometeorological Practices*. WMO - No 168, TP82, A5.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΓΕΩΡΓΙΚΗ ΒΙΟΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑ

Σύνοψη
Στο κεφάλαιο αυτό μελετώνται θέματα βιομετεωρολογίας, δηλαδή οι σχέσεις του καιρού και του κλίματος με ζώντες οργανισμούς, όπως τα φυτά και τα ζώα, καθώς και οι επιπτώσεις τους σε αυτά. Αρχικά, επιχειρείται μια ανάλυση της βιομετεωρολογίας και της βιοκλιματολογίας, μέσα από την παρουσίαση των μεθόδων και των δεδομένων τους, καθώς και της πληροφορίας γεωργικής βιομετεωρολογίας. Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά στους βιολογικούς κινδύνους και παρουσιάζονται επιγραμματικά η επιδημιολογία κινδύνων, οι κίνδυνοι από έντομα, καθώς και η διασύνδεση κλιματικής αλλαγής και υγείας. Επίσης, εξετάζονται ορισμένοι βιομετεωρολογικοί δείκτες και θίγονται θέματα αεροβιολογίας. Ειδικότερα, στο τμήμα αυτό καλύπτονται οι πρακτικές πτυχές της αεροβιολογίας που σχετίζονται με τη γεωργική μετεωρολογία και παρουσιάζεται μια διεπιστημονική προσέγγιση των ιδιοτήτων και της εναέριας κίνησης των ζώντων οργανισμών, που είναι σημαντικές για τα φυτά, τα ζώα, τα παράσιτα και τις ασθένειες.

Προαπαιτούμενη γνώση
Ο αναγνώστης απαιτείται να έχει βασικές γνώσεις φυσικής και μαθηματικών.

5.1. Αντικείμενο βιομετεωρολογίας και βιοκλιματολογίας

Η βιομετεωρολογία και η βιοκλιματολογία συνίστανται στη μελέτη των σχέσεων μεταξύ καιρού και κλίματος και ζώντων οργανισμών, αποτελεί δε ένα τεράστιο επιστημονικό πεδίο, που φέρνει κοντά επιστήμονες από διαφορετικά γνωστικά υπόβαθρα και αντικείμενα. Ως γνωστόν, η βιομετεωρολογία διακρίνεται σε ανθρώπινη, φυτική (δηλαδή, γεωργία και δάση) και ζωική. Αντικείμενο του παρόντος κεφαλαίου είναι η γεωργική βιομετεωρολογία, ενώ το βιβλίο, ως εγχειρίδιο αγρομετεωρολογίας, δεν περιλαμβάνει την ανθρώπινη βιομετεωρολογία, όπως έχει εξηγηθεί στο Κεφάλαιο 1. Άλλη ταξινόμηση περιλαμβάνει την αεροβιολογία, δηλαδή τη συμπεριφορά των ζώντων οργανισμών και ουσιών στον αέρα, τη φαινολογία, την αστική βιομετεωρολογία, τη βιομετεωρολογία της αέριας ρύπανσης, τη βιομετεωρολογία τουρισμού και αναψυχής, την ορεινή βιομετεωρολογία, την ηλεκτρομαγνητική βιομετεωρολογία, τη βιομετεωρολογία ιονισμού και τους βιομετεωρολογικούς ρυθμούς. Ωστόσο, δεν υπάρχει μέχρι σήμερα ενιαίο σύστημα ταξινόμησης διεθνώς. Το χρονικό εύρος των μελετών κυμαίνεται από τον ημερήσιο κύκλο μέχρι τους γεωλογικούς χρόνους. Η βιομετεωρολογία και η βιοκλιματολογία αποτελούν ένα ενδιαφέρον ερευνητικό πεδίο, με πολλές σημαντικές πρακτικές εφαρμογές, όπως ευεξία ή δυσφορία ζώντων οργανισμών, γεωργική παραγωγή, σχεδίαση περιοχικών χρήσεων γης, διαχείριση δασών και πολλά άλλα. Στη βιομετεωρολογία γίνεται συχνά αναφορά στην περιβαλλοντική καταπόνηση που προκαλεί μια βιολογική ανταπόκριση. Είναι σαφές ότι η βιομετεωρολογία και η βιοκλιματολογία αναμένεται να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο διεθνώς τις επόμενες δεκαετίες στα παραπάνω και σε άλλα θέματα, αλλά κυρίως στο θέμα της πλανητικής κλιματικής αλλαγής και των επιπτώσεων και της αντιμετώπισης, αλλά περισσότερο της απαραίτητης προσαρμογής.

5.1.1. Βιομετεωρολογικές και βιοκλιματικές μέθοδοι

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στη βιομετεωρολογική έρευνα διακρίνονται στους εξής κύριους τύπους, γνωστούς και από άλλα γνωστικά πεδία:

- **Στατιστικές μέθοδοι**. Πολυμεταβλητές παλινδρομήσεις ή άλλες στατιστικές μέθοδοι, στις οποίες η χαρακτηριστική ανταπόκριση συσχετίζεται με ένα πεδίο δυνητικών ενδείξεων και δεικτών καταπόνησης. Επισημαίνεται ότι ένα τεστ σημαντικότητας μπορεί να δείξει μια σύνδεση, καθώς αυτό δεν συνεπάγεται την ύπαρξη σχέσης αίτιου-αιτιατού.
- **Πειραματικές μέθοδοι**. Ελεγχόμενες μελέτες εργαστηρίου με τη χρήση θερμοκηπίου, φυτοτρονίων ή βιοτρονίων, αν πρόκειται για ολόκληρα οικοσυστήματα, φυτά ή ζώα, αντίστοιχα. Οι μελέτες πεδίου για τις σχέσεις καταπόνησης και ανταπόκρισης πραγματοποιούνται κατά προτίμηση κάτω από δεδομένο πλαίσιο συνθηκών, π.χ. χρησιμοποιούνται στοιχεία μόνο όταν ο ουρανός είναι ανέφελος ή όταν η βαθμίδα του ανέμου είναι πολύ μικρή.

- **Μοντέλα**. Μαθηματικές παρουσιάσεις που συνθέτουν την τρέχουσα κατανόηση των σχέσεων καταπόνησης και ανταπόκρισης. Για μεγάλα συστήματα, όπως εκείνα που χρησιμοποιούνται στην ολοκληρωμένη διαχείριση φυτοπροστασίας, μοντέλα μπορούν να διασυνδέσουν διάφορα είδη πληροφορίας. Μοντέλα μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο της χρησιμότητας διαφόρων προτεινόμενων στρατηγικών διαχείρισης.

5.1.2. Ανάλυση δεδομένων βιομετεωρολογίας

Τα βιολογικά δεδομένα που χρησιμοποιούνται στη βιομετεωρολογία διακρίνονται στις εξής κύριες κατηγορίες:

- Γενικά βιολογικά δεδομένα που είναι διαθέσιμα, όπως πληροφορίες απογραφής, γεωργική παραγωγή, ή πληθυσμοί εντόμων.
- Στοιχεία που σχετίζονται με βιολογικούς δείκτες, όπου παρουσιάζονται συνθήκες ακραίας περιβαλλοντικής καταπόνησης, όπως μελέτες οργανισμών που βρίσκονται σε υψηλές στάθμες, μελέτες για τις επιπτώσεις υγείας από κύματα καύσωνες ή ψύχους ή επεισόδια ατμοσφαιρικής ρύπανσης.
- Στοιχεία που συνδέονται με κύκλους, όπως ημερήσιους, ετήσιους ή κύκλους ζωής.
- Στοιχεία εξαρτώμενα από μοντέλα.

Επισημαίνεται ότι στα αρχικά στάδια ερευνών, π.χ. σχετικά με ηλεκτρομαγνητικές επιπτώσεις, ο μηχανισμός καταπόνησης και ανταπόκρισης είναι ασαφής και μόνο η ανάλυση χρονοσειρών είναι δυνατή.
Επιδημιολογικές στατιστικές παλινδρομήσεις για μεγάλους πληθυσμούς μπορεί να χρειάζονται εργαστηριακές ή μελέτες πεδίου, καθώς και έλεγχο μοντέλων.
Υπάρχει αντικειμενική δυσκολία στη σχεδίαση ερευνών για βιομετεωρολογικούς και βιοκλιματικούς σκοπούς για τους εξής λόγους:

- **Έλλειψη αναπαραγωγικότητας**. Ακόμα και σε ελεγχόμενες εργαστηριακές συνθήκες, η ανταπόκριση ενός ζώντος οργανισμού σε περιβαλλοντική καταπόνηση μπορεί να διαφέρει σημαντικά με το χρόνο. Η ανταπόκριση εξαρτάται από την ώρα της ημέρας και από τη συχνότητα με την οποία η ανταπόκριση επιβάλλεται. Για παράδειγμα, μερικές φορές μπορεί να συμβεί βραχείας διάρκειας φυσιολογική ρύθμιση, που μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλης διάρκειας προσαρμογή.
- **Διαφορές στην ανταπόκριση του πληθυσμού**. Η ανταπόκριση των πληθυσμών σε μια περιβαλλοντική καταπόνηση μπορεί να διαφέρει σημαντικά. Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (ΠΟΥ) προχωρά σε μια διάκριση μεταξύ μιας επίπτωσης, δηλαδή της βιολογικής αντίδρασης, και μιας ανταπόκρισης, δηλαδή του ποσοστού ενός εκτεθειμένου οργανισμού, που αντιδρά με μια ιδιαίτερη επίπτωση.
- **Ύπαρξη χρονικών υστερήσεων**. Μια περιβαλλοντική καταπόνηση μπορεί να προκαλέσει μια σχεδόν άμεση ανταπόκριση ή μπορεί να προκαλέσει υστέρηση της ανταπόκρισης για μέρες, εβδομάδες, μήνες, χρόνια ή δεκαετίες (π.χ. η UV-B ακτινοβολία να προκαλέσει καρκίνο του δέρματος). Στο διάστημα αυτό ο πληθυσμός μπορεί να έχει αλλάξει τρόπο ζωής, που καθιστά αδύνατη την εκτίμηση των σχέσεων καταπόνησης και ανταπόκρισης.
- **Πολλαπλές καταπονήσεις**. Ζώντες οργανισμοί συχνά υπόκεινται σε διάφορες καταπονήσεις συγχρόνως. Για παράδειγμα, στη διάρκεια ενός καύσωνα, η ποιότητα του αέρα καθίσταται «φτωχή», ωστόσο δεν είναι δυνατόν να υπολογιστεί αν οι προκαλούμενες επιπτώσεις στην υγεία οφείλονται στις υψηλές θερμοκρασίες ή στη «φτωχή» ποιότητα αέρα.
- **Εκτίμηση της έκθεσης**. Πολλοί ζώντες οργανισμοί κινούνται και δεν είναι εύκολο να υπολογιστεί η έκθεσή τους. Για παράδειγμα, το εσωτερικό με το εξωτερικό περιβάλλον παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές στον υπολογισμό της αέριας ρύπανσης.
- **Αποτυχία των τυπικών στατιστικών μεθόδων**. Πολλές ανταποκρίσεις είναι μη γραμμικές, καθιστώντας ακατάλληλες τις τυπικές στατιστικές μεθόδους. Επιπλέον, τα δεδομένα περιέχουν χρονικές συσχετίσεις και δεν αποτελούν τυχαία δείγματα.

5.1.3. Γεωργική βιοκλιματική πληροφορία

Ο άνθρωπος διαχειρίζεται τις ανανεώσιμες πηγές για πολλούς αιώνες. Ο στόχος είναι να αυξηθεί η γεωργική και δασική παραγωγή χωρίς να προκληθεί μακράς διάρκειας υποβάθμιση των εδαφών και των δασών. Το κλίμα έχει άμεση επίπτωση στα φυτά, καθόσον παρέχει τη βασική πηγή ενέργειας, ελέγχει τη θερμοκρασία των οργάνων του φυτού, αλλά και την απώλεια νερού από τη διαπνοή. Οι κύριες κλιματολογικές καταπονήσεις που

επηρεάζουν αρνητικά τη βλάστηση είναι η ξηρασία, η πλημμύρα, το χαλάζι, οι ισχυροί άνεμοι και ο παγετός. Ωστόσο, οι ατμοσφαιρικές διαδικασίες είναι έμμεσα σημαντικές στη διασπορά της σποράς, στα έντομα, στις συγκεντρώσεις αέριας ρύπανσης, που περιλαμβάνουν και όξινη βροχή, στη διάβρωση εδαφών και στην υγρασία του εδάφους. Επειδή πολλές καλλιέργειες αναπτύσσονται έξω από κανονικές κλιματολογικές συνθήκες, πρέπει να αρδευτούν και να προστατευθούν από παγετό και ισχυρούς ανέμους. Η βιοκλιματολογία συμβάλλει είτε με τροποποίηση του ανάγλυφου (π.χ. καταφύγια) ή με βελτίωση της τοποκλιματολογίας.
Για κάθε καλλιέργεια, πρέπει να υπάρχει βιοκλιματολογική ανάλυση. Αρχικά, εξετάζεται ο κύκλος ζωής του φυτού. Σε κάθε στάδιο εξετάζονται οι πιθανές καταπονήσεις. Οι κύριες καταπονήσεις είναι η ξηρασία, οι απρόσμενοι ελαφροί χειμώνες, ο εαρινός παγετός, τα υγρά και ψυχρά καλοκαίρια, και οι μετεωρολογικά ευαίσθητοι εχθροί των καλλιεργειών. Οι διάφορες αυτές καταπονήσεις έχουν επίπτωση τόσο στην ποσότητα, όσο και στην ποιότητα της συγκομιδής. Έχουν αναπτυχθεί εμπειρικές σχέσεις μεταξύ της παραγωγής ξηρής ύλης και της ποσότητας και ποιότητας κάθε φυτού.
Η γεωργική βιοκλιματολογία αποκτά συνεχώς αυξανόμενη σπουδαιότητα, λόγω της κλιματικής αλλαγής. Τα γεωργικά εδάφη κατακρατούν μεγάλες ποσότητες άνθρακα. Κατά συνέπεια, απαιτούνται βελτιωμένες πρακτικές διαχείρισης, ώστε να εξισορροπήσουν μερικώς τα αυξανόμενα επίπεδα διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Η κλιματική αλλαγή μπορεί επίσης να επιδράσει στα πρότυπα παραγωγής τροφίμων, είτε προς το καλύτερο σε κάποιες περιοχές είτε προς το χειρότερο σε άλλες. Συμπερασματικά, η φυτική κλιματολογία αναμένεται να παίζει σημαντικό ρόλο στην κατανόηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής, καθώς και στη διαμόρφωση μέτρων καταπολέμησης και προσαρμογής. Τέλος, οι φαινολογικές αναλύσεις και έρευνες συμβάλλουν στην κατανόηση του ρόλου των κλιματικών μεταβλητών στη δυναμική του κύκλου φυτών και ζώων. Οι σχέσεις μεταξύ κλιματικών μεταβλητών και χρόνου εμφάνισης των φαινολογικών σταδίων παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες σε αγρότες (π.χ. τελευταίος παγετός την άνοιξη, πρώτος παγετός το φθινόπωρο, καθώς και ημερομηνίες σποράς και συγκομιδής). Επισημαίνεται ότι οι φαινολογικές μελέτες γίνονται συνεχώς πολύτιμες, καθόσον οι τάσεις στη φαινολογία μπορεί να αξιοποιηθούν ως φυσικοί δείκτες της πλανητικής κλιματικής αλλαγής.

5.2. Βιολογικοί κίνδυνοι

Βιολογικοί κίνδυνοι, γνωστοί επίσης και ως βιοκίνδυνοι (biohazards), αναφέρονται σε βιολογικούς οργανισμούς ή προϊόντα οργανισμών που αποτελούν απειλή για την υγεία των ζώντων οργανισμών, κυρίως των ανθρώπων. Οι βιολογικοί κίνδυνοι μπορεί να περιλαμβάνουν ιατρικά απόβλητα, δείγματα μικροοργανισμών ή τοξίνες, που μπορεί να επηρεάσουν την υγεία ζώντων οργανισμών. Οι πηγές των κινδύνων μπορεί να περιλαμβάνουν βακτήρια, ιώσεις, έντομα, φυτά, πουλιά, ζώα και ανθρώπους. Οι πηγές αυτές μπορεί να προκαλούν διάφορες επιπτώσεις στην υγεία, που κυμαίνονται από ερεθισμό και αλλεργίες μέχρι μολύνσεις, όπως φυματίωση, AIDS ή καρκίνο.
Υπάρχουν διάφοροι τρόποι ταξινόμησης και κατηγοριοποίησης των βιολογικών κινδύνων. Μια ταξινόμηση μπορεί να περιλαμβάνει βακτήρια, ιώσεις και μύκητες. Επίσης, οι αιτίες και οι πηγές των βιολογικών κινδύνων μπορεί να είναι φυσικές, χημικές, κοινωνικές και οικονομικές, μεταξύ των άλλων. Ειδικότερα, οι φυσικές αιτίες είναι κυρίως οργανισμοί ή δραστηριότητες που απειλούν τη φυσική ασφάλεια των ζώντων οργανισμών και περιλαμβάνουν ανασφαλείς συνθήκες, οι οποίες μπορεί να προκαλέσουν τραυματισμούς, ασθένειες ή ακόμα και θάνατο. Πιο συγκεκριμένα, τόσο οι πολύ υψηλές όσο και οι πολύ χαμηλές θερμοκρασίες μπορεί να είναι επικίνδυνες για την υγεία. Πλεονάζουσα έκθεση σε ζέστη αναφέρεται ως θερμική καταπόνηση, ενώ πλεονάζουσα έκθεση στο κρύο αναφέρεται ως ψυχρή καταπόνηση.
Στη συνέχεια παρουσιάζονται επιγραμματικά ενότητες όπως επιδημιολογία ασθενειών σε φυσικές κατά-στροφές, κίνδυνοι εντόμων, κλίμα και βιολογικοί κίνδυνοι, καθώς και η διασύνδεση κλιματικής αλλαγής και υγείας, που συνθέτουν ένα εννοιολογικό πλαίσιο για τους βιολογικούς κινδύνους.

5.2.1. Επιδημιολογία ασθενειών σε φυσικές καταστροφές

Η επιδημιολογία ασθενειών σε φυσικές καταστροφές περιλαμβάνει τόσο επιδημικές όσο και ενδημικές ασθένειες. Ειδικότερα, οι επιδημικές ασθένειες ορίζονται ως μια ομάδα ασθενειών παρόμοιας φύσης, πέρα από τις αναμενόμενες συνθήκες υγείας, που έχουν κοινή προέλευση. Αντίστοιχα, οι ενδημικές ασθένειες συνήθως υπάρχουν ή είναι κοινές σ' έναν πληθυσμό (Gordis, 2004). Ενώ οι επιδημικές ασθένειες είναι συνήθως μεταδιδόμενες ασθένειες, ωστόσο επιδημίες μη μεταδιδόμενων ασθενειών μπορεί να εμφανιστούν με μια καταστροφή. Επίσης, ενδημικές συνθήκες μπορεί να μεταβληθούν σε επιδημικές έπειτα από μια καταστροφή,

άμεσα συνδεόμενες με το συμβάν ή έμμεσα προερχόμενες από την κατάρρευση των υπηρεσιών υγείας και άλλων υποστηρικτικών υπηρεσιών. Οι επιδημίες μεταδιδόμενων ασθενειών θεωρούνται λιγότερο στοιχείο των φυσικών καταστροφών και περισσότερο θέμα σύνθετης ανθρωπιστικής βοήθειας, για τις οποίες απαιτείται να γίνει μετατόπιση πληθυσμών, υπάρχει επισφαλής διαθέσιμη τροφή και περιορισμένη πρόσβαση σε υπηρεσίες υγείας. Συνήθως, μεταδιδόμενες ασθένειες και φυσικές καταστροφές συμβαδίζουν. Παρότι σπάνιο, συνθήκες χολέρας, μηνιγγίτιδας ή δυσεντερίας, όταν εμφανίζονται έπειτα από φυσικές καταστροφές, μπορεί να υπερισχύσουν των υπηρεσιών υγείας δημιουργώντας διάχυτο φόβο.

5.2.1.1. Παράγοντες ασθενειών

Υπάρχουν πολλοί παράγοντες που συνεισφέρουν στην αυξημένη μετάδοση ασθενειών έπειτα από φυσικές καταστροφές. Ο καθένας από αυτούς εξετάζεται ξεχωριστά, για να εκτιμηθεί η δυνητική διακινδύνευση (ρίσκο) του πληγέντα πληθυσμού, ώστε περιορισμένοι πόροι να εστιάζονται σε μια δυνητική ανταπόκριση στα πιο πιθανά συμβάντα. Οι μεταδιδόμενες ασθένειες είναι περισσότερο στοιχείο χωρών σε επιδημιολογική μετάβαση, όπου οι σημαντικότερες αιτίες ασθενειών και θανάτων είναι μολυσματικές, που προϋπάρχουν μιας καταστροφής. Στις περισσότερο αναπτυγμένες, στις οποίες οι πληθυσμοί ζουν περισσότερο, υπάρχουν συνήθως επιπλοκές σε χρόνιες παθήσεις, που μπορεί να αυξάνονται με τις καταστροφές. Βέβαια, δεν προκαλούν όλες οι καταστροφές τον ίδιο τύπο ή το ίδιο επίπεδο ρίσκου. Για παράδειγμα, ενώ οι σεισμοί μπορεί να δημιουργήσουν μεγάλη ανάγκη για φροντίδα τραυμάτων, ωστόσο προκαλούν μικρή άμεση αύξηση της μετάδοσης ασθενειών. Αντίθετα, πλημμύρες ή άλλες καταστροφές, που επιδρούν στο νερό και την υγιεινή, συνήθως συνδυάζονται με αύξηση της μετάδοσης ασθενειών (Ahern et al., 2005). Επίσης, γεωτρήσεις ή δεξαμενές νερού μπορεί να μολυνθούν από ένα σεισμό. Ακόμα, δραστική μείωση του διαθέσιμου νερού μπορεί να επιδράσει στην ατομική υγιεινή και τη μετάδοση μολύνσεων.

5.2.1.2. Ενδημικά πρότυπα ασθενειών

Τα πρότυπα ασθενειών έπειτα από μια καταστροφή αποτελούν συνήθως εναλλαγές των προτύπων πριν από την καταστροφή. Για παράδειγμα, σε περιοχές στις οποίες χολέρα και μηνιγγίτιδα είναι ενδημικές, τέτοιες συνθήκες μπορεί να εμφανιστούν με τη μετατόπιση πληθυσμών ή την κατάρρευση των υπηρεσιών υγείας. Όπου υπάρχει διάχυτος υποσιτισμός, ασθένειες και θάνατοι από συνήθεις συνθήκες γενικά αυξάνουν, αν η ισορροπία μεταξύ της κατάστασης του πληθυσμού και του περιβάλλοντος χειροτερεύει. Σε χώρες με χαμηλή κάλυψη εμβολιασμού, οι καταστροφές μπορεί να αυξήσουν το ρίσκο ασθενειών στα παιδιά. Για παράδειγμα, η έκρηξη του όρους Pinatubo (1991) προκάλεσε 18.000 περιπτώσεις ιλαρά στο μετακινηθέντα πληθυσμό (Surmieda et al., 1992), ενώ το σχετικά πρόσφατο τσουνάμι στην Ινδονησία προκάλεσε εκτεταμένο τέτανο (Jeremijenko et al., 2007). Επίσης, πληθυσμοί με υψηλό ποσοστό εξάρτησης παρουσιάζουν αυξημένο ρίσκο ασθενειών, όπως κυρίως ηλικιωμένοι σε πλούσιες χώρες ή νεαρά παιδιά σε εύφορες χώρες. Όπως είναι φυσικό, περισσότερο επηρεάζονται από μια καταστροφή οι πυκνοκατοικημένες περιοχές ή οι μετακινούμενοι πληθυσμοί. Ακόμα, η επιδημιολογία ασθενειών και συνθηκών, που ακολουθούν μια φυσική καταστροφή, επηρεάζεται σημαντικά από τις δυνατότητες των υπηρεσιών υγείας. Ειδικότερα, ενώ σε μια καταστροφή αυξάνονται οι ανάγκες υγείας, συγχρόνως μειώνονται δραματικά οι δυνατότητες των υπηρεσιών υγείας.

5.2.1.3. Πρόληψη και έλεγχος

Η διαχείριση ασθενειών σε καταστροφές βασίζεται στις θεμελιώδεις αρχές πρόληψης της δημόσιας υγείας, που ξεκινούν με προσπάθειες για την πρόληψη ασθενειών και τον περιορισμό της εξάπλωσης ή της επιδείνωσης μιας ασθένειας όταν εμφανιστεί.

Πρωταρχική πρόληψη είναι η πρόληψη της έκθεσης ενός πληθυσμού σε δυνητικά παθογενή, όπως υγιεινή νερού ή κάλυψη εμβολιασμών για αποφυγή μολύνσεων. Οι περισσότερες δράσεις της κατηγορίας αυτής αποτελούν μέρος των σχεδίων προετοιμασίας.

Δευτερεύουσα πρόληψη είναι η γρήγορη επεξεργασία ή η γρήγορη δράση για πρόληψη των σοβαρών συνεπειών μιας ασθένειας, με στόχο τον περιορισμό της εξάπλωσης.

Τριτεύουσα πρόληψη είναι η μακρόχρονη επεξεργασία των επιπλοκών που πηγάζουν από καταστροφές. Τέλος, αποτελεσματικά συστήματα επιτήρησης αποτελούν κεντρικό άξονα για την κατανόηση της εξελισσόμενης επιδημιολογίας ασθενειών σε μια κοινότητα που επηρεάζεται από μια καταστροφή.

5.2.2. Κίνδυνοι από έντομα

Τα έντομα αποτελούν κίνδυνο για τους ανθρώπους, όπως η συγκομιδή μελιού από μέλισσες, που θεωρούνται το πιο θανατηφόρο έντομο στον αναπτυγμένο κόσμο. Η σχέση μεταξύ ζώντων οργανισμών και εντόμων είναι πολύπλοκη. Τα έντομα εξετάζονται ως κίνδυνοι που προκαλούν καταστροφές σε ανθρώπους, ζώα, καλλιέργειες ή ιδιοκτησίες (Dent, 1993).

5.2.2.1. Αλλεργίες και ασθένειες

Τα υμενόπτερα, όπως οι μέλισσες, θεωρούνται ο μεγαλύτερος κίνδυνος για τον άνθρωπο από όλα τα έντομα, καθόσον το κεντρί τους είναι δηλητηριώδες και αλλεργιογόνο, με κίνδυνο πρόκλησης πόνου και σοκ αναφυλαξίας, αντίστοιχα, που μπορεί να οδηγήσει και σε θάνατο. Αρκετά έντομα προκαλούν αναπνευστικές αλλεργίες σε ανθρώπους και ζώα. Σε χώρους εργασίας, ιδιαίτερες κατηγορίες εντόμων μπορεί να προκαλέσουν απρόσμενες αλλεργικές αντιδράσεις, από ερεθισμό δέρματος μέχρι αναφυλαξία. Γενικά, η πλειονότητα των καταστάσεων νοσηρότητας και θνησιμότητας προέρχεται από αλλεργικές αντιδράσεις. Επίσης, θεωρούνται σημαντικές οι ασθένειες, που μπορεί να προκληθούν από δαγκώματα εντόμων σε ανθρώπους και ζώα και αποτελούν θέμα δημόσιας υγείας. Για παράδειγμα, περισσότεροι άνθρωποι πεθαίνουν κάθε χρόνο από ασθένειες κουνουπιών, παρά από οποιαδήποτε άλλη ασθένεια. Ειδικότερα, σε υδάτινα ενότητες ή βαλτώδη μέρη, σμήνη κουνουπιών μπορεί να προκαλέσουν μεγάλες ζημιές. Αξίζει να σημειωθεί ότι κάθε χρόνο σχεδόν 300 εκατομμύρια άνθρωποι, κυρίως παιδιά, πεθαίνουν από ελονοσία λόγω τσιμπήματος κουνουπιών (WHO, 2009). Γενικά, το ρίσκο μπορεί να περιοριστεί δραστικά με μέτρα προστασίας.

5.2.2.2. Φυσικές επιπτώσεις

Ένα ξέσπασμα εντόμων γενικά μπορεί να θεωρηθεί μια κατάσταση στην οποία σμήνη εντόμων φθάνουν σε μη αποδεκτά επίπεδα, με βάση ιατρικά, οικονομικά ή αισθητικά κριτήρια, που προκαλούνται από αβιοτικούς και βιοτικούς μηχανισμούς. Η αλληλεπίδραση κλίματος και ακρίδων παρέχει ένα κλασικό παράδειγμα αβιοτικού κινδύνου εντόμων. Όπως σε όλα τα έντομα, ο ρυθμός ανάπτυξης των ακρίδων εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Επίσης, οι ακρίδες εξαρτώνται σε πολλές περιπτώσεις και από την υγρασία και από τη βροχόπτωση, ενώ οι θηλυκές ακρίδες χρειάζονται μαλακό υγρό έδαφος, για την απόθεση των αυγών τους στο υπέδαφος. Αν ικανοποιούνται αυτές οι συνθήκες, τότε οι νύμφες αυξάνονται με τέτοιους ρυθμούς, ώστε αναπτύσσονται σμήνη εκατομμυρίων ακρίδων έτοιμα για μετανάστευση. Έχουν παρατηρηθεί σμήνη ακρίδων μήκους δεκάδων χιλιομέτρων, που διανύουν πάνω από 100 km κάθε μέρα και καταστρέφουν όλη τη βλάστηση όταν κατέρχονται για τροφή. Σήμερα το πρόβλημα έχει μετριαστεί, έπειτα από παρακολούθηση και έλεγχο.

Πολλοί βιοτικοί μηχανισμοί είναι ανθρωπογενείς. Με την αλλαγή χρήσης της γης, είναι αναπόφευκτο φυσικά αρπακτικά εντόμων να απομακρύνονται. Αυτό έχει αποτέλεσμα την εξάλειψη των νυχτερινών ελέγχων κουνουπιών, με συνέπεια την αύξηση του ρίσκου μετάδοσης ασθενειών, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Άλλα κοινά παραδείγματα περιλαμβάνουν ψεκασμούς γεωργικών εντομοκτόνων, όπου δημιουργείται έμμεσος κίνδυνος για την ασφάλεια τροφίμων ή για τη βιομηχανία παραγωγής ξύλου. Επισημαίνεται ότι σε ανθρωπογενή οικοσυστήματα υπάρχει γενικά έλλειψη βιοποικιλότητας, με συνέπεια οι εχθροί-έντομα να μην υφίστανται βιολογικό έλεγχο. Αβιοτικές ή κλιματικές μεταβλητές συχνά ενισχύουν τις επιπτώσεις τέτοιων βιολογικών μηχανισμών, καθόσον οι εχθροί προσαρμόζονται γενικά στο περιβάλλον, με τελική συνέπεια την ενδεχόμενη αύξηση του αριθμού και της έκτασης των κινδύνων, λόγω πλανητικής κλιματικής αλλαγής.

5.2.3. Κλίμα και βιολογικοί κίνδυνοι

Όπως επισημάνθηκε, οι βιολογικοί κίνδυνοι περιλαμβάνουν βιολογικούς οργανισμούς που αποτελούν απειλή για την υγεία των ζώντων οργανισμών, κυρίως των ανθρώπων, αλλά και των ζώων και των φυτών. Η επίπτωση του κλίματος στην υγεία παρουσιάζει αυξανόμενο ενδιαφέρον, σε συνδυασμό με την πιθανότητα πλανητικής κλιματικής αλλαγής. Υπάρχει φυσιολογική απόκριση προσαρμογής των ζώντων οργανισμών, κυρίως ανθρώπων, που καθορίζεται από κλιματικούς παράγοντες. Αντίστοιχα, το κλίμα δρα έμμεσα στην υγεία ζώντων οργανισμών, μέσω των επιπτώσεων στα οικοσυστήματα, στον υδρολογικό κύκλο, στην τροφή και στους φορείς ασθενειών. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται επιμέρους ενότητες, που συνθέτουν το θέμα του κλίματος και των βιολογικών κινδύνων.

5.2.3.1. Κλιματικές τιμές κατωφλίου

Μέσα σ' ένα αποδεκτό εύρος ανοχής, η βιολογία ζώντων οργανισμών μπορεί να χειριστεί τις περισσότερες διακυμάνσεις του κλίματος, είτε σχετίζονται με το ρυθμό είτε με το βαθμό αλλαγής. Ωστόσο, μικρής διάρκειας μεταβολές στον καιρό μπορεί να προκαλέσουν ακραίες αρνητικές επιπτώσεις, όπως αύξηση του ρυθμού των θανάτων, αύξηση των περιθάλψεων, καθώς και αύξηση των κρουσμάτων κατάθλιψης σε ανθρώπους (WHO/WMO/UNEP, 1996).Τα παραπάνω έχουν οδηγήσει στην καθιέρωση της «θερμοκρασίας κατωφλίου», που αντιπροσωπεύει τη θερμοκρασία πέραν της οποίας η ανθρώπινη υγεία χειροτερεύει δραστικά. Επισημαίνεται ότι οι θερμοκρασίες κατωφλίου είναι σχετικές και όχι απόλυτες, καθόσον μεταβάλλονται ανάλογα με τις τοπικές συνθήκες, εξαρτώμενες και από τη συχνότητά τους. Για παράδειγμα, στο St. Luis των ΗΠΑ η θερμοκρασία κατωφλίου είναι 36^{o} C, ενώ στο Detroit των ΗΠΑ είναι 32^{o} C (Mills, 2004). Αυτό οδηγεί σε περιοχική εκτίμηση καύσωνα και στις σχέσεις έντασης-διάρκειας-συχνότητας καύσωνα, που αναπτύσσονται στο αντίστοιχο Κεφάλαιο 14 του παρόντος βιβλίου. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η θνησιμότητα λόγω καύσωνα ή ψύχους, που εμφανίζει περιοχικές διακυμάνσεις μεταξύ τροπικών και εύκρατων ζωνών. Μια πιθανή εξήγηση της διαφοροποίησης αυτής μπορεί να είναι η στατιστική διακύμανση που εμφανίζουν οι θερινές θερμοκρασίες σε όλες τις περιοχές. Αντίστοιχα αποτελέσματα εμφανίζονται και στη θνησιμότητα και νοσηρότητα λόγω ψύχους. Ειδικότερα, υπάρχουν ενδείξεις ότι οι επιπτώσεις του καιρού στην ανθρώπινη υγεία είναι προφανείς, καθώς και ότι η μεταβλητότητα του καιρού το χειμώνα παίζει μεγάλο ρόλο στην εμφάνιση προβλημάτων υγείας λόγω καιρού.

5.2.3.2. Άμεσες επιπτώσεις στην υγεία λόγω καιρού

Οι πιο άμεσες επιπτώσεις περιλαμβάνουν τις αλλαγές στην έκθεση σε πολύ ψυχρές και θερμές ακραίες καιρικές καταστάσεις, λόγω της αναμενόμενης αύξησης των ακραίων καιρικών φαινομένων, όπως πλημμύρες, τροπικοί κυκλώνες, παράκτιες παλίρροιες και ξηρασίες. Επίσης, η άμεση έκθεση σε καιρικά φαινόμενα, όπως κεραυνοί και τυφώνες, μπορεί να προκαλέσουν το θάνατο μεγάλου αριθμού ατόμων σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα. Ωστόσο, η κυριότερη αιτία άμεσων θανάτων λόγω καιρού είναι η ακραία θέρμανση και ψύξη. Επίσης, ο συνδυασμός θερμοκρασίας, ανέμου και υγρασίας δημιουργεί την «αισθητή θερμοκρασία», που δέχεται το ανθρώπινο σώμα.

Έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι για τον προσδιορισμό των μετεωρολογικών συνθηκών υπέρβασης του κατωφλίου, όπως η προσέγγιση της συνοπτικής κλιματολογίας. Ειδικότερα, η συνοπτική προσέγγιση προσδιορίζει «αέριες μάζες», οι οποίες συνιστούν τη συνολική ομπρέλα, που επηρεάζει άτομα. Με τον τρόπο αυτό, οι αλληλεπιδράσεις διαφόρων μετεωρολογικών παραγόντων αξιολογούνται συγχρόνως και μπορεί να εκτιμηθεί η επίπτωση στην ανθρώπινη υγεία μέσω του ρυθμού θνησιμότητας. Η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για την υπερβολική θέρμανση, όσο και για το ψύχος. Επίσης, υπάρχουν στρατηγικές και μέτρα αντιμετώπισης για μείωση των επιπτώσεων του καιρού στην τρέχουσα και μελλοντική θνησιμότητα λόγω καιρού. Για παράδειγμα, βελτίωση μόνωσης, επέκταση ρύθμισης συνθηκών αέρα (air condition), καθώς και επιλογές μείωσης της θερινής θερμοκρασίας και του κόστους ενέργειας, όπως επίχρισμα επιφανειών και τοίχων με υλικά ανάκλασης θερμότητας και πράσινες ταράτσες. Επιπλέον, υπάρχει ανάγκη ευαισθητοποίησης του πληθυσμού σε θέματα υγείας με συστήματα επιτήρησης.

5.2.3.3. Έμμεσες επιπτώσεις στην υγεία

Οι έμμεσες επιπτώσεις υγείας αναφέρονται κυρίως σε αλλαγές στα πρότυπα μετάδοσης μολυσματικών ασθενειών και σε περιοχικά συστήματα παραγωγής τροφής. Οι επιπτώσεις αυτές είναι στην ουσία αποτέλεσμα οικολογικών μηχανισμών. Μακροπρόθεσμα, είναι πιθανόν να έχουν μεγαλύτερη βαρύτητα στην υγεία απ' ό,τι οι άμεσες επιπτώσεις. Με τη βελτίωση των συνθηκών υγιεινής και θρέψης, μολυσματικές ασθένειες, όπως η γρίπη, δεν αποτελούν πλέον τις κυρίαρχες αιτίες θανάτου στον αναπτυγμένο κόσμο. Ωστόσο, εμφανίζονται άλλες μολυσματικές ασθένειες σε πολλές περιοχές του πλανήτη. Επισημαίνεται ότι υπάρχουν πολλοί έμμεσοι παράγοντες ασθενειών, όπως η απότομη αύξηση και πυκνότητα του πληθυσμού, η μεγαλύτερη γεωγραφική κινητικότητα, η υπερβολική χρήση αντιβιοτικών, καθώς και οι περιοχικές κλιματικές διαταραχές (WHO/WMO/UNEP, 1996). Επίσης, πολλοί βιολογικοί οργανισμοί που συνδέονται με τη διάθεση των μολύνσεων επηρεάζονται από τις διακυμάνσεις του κλίματος, δηλαδή τις μεταβλητές θερμότητας και υγρασίας. Πράγματι, η πλειονότητα των διακυμάνσεων αποτελεί μέρος της συνήθους κλιματικής μεταβλητότητας, όπως διαπιστώνεται από την εποχικότητα των ασθενειών. Υπάρχουν τουλάχιστον τρεις μολυσματικές ασθένειες που συνδέονται με το κλίμα, όπως η ελονοσία (malaria), η τρυπανοψωρίαση (tripanosoriasis), κυρίως στην Αφρική, και ο δάγκειος πυρετός (Dangue fever). Επισημαίνεται ακόμα η συνέργεια μεταξύ καιρού, ρύπανσης και ανθρώπινης υγείας, όπως η μείωση του στρώματος του στρατοσφαιρικού όζοντος, η ανύψωση της στάθμης της

θάλασσας, η απώλεια βιοποικιλότητας, η υποβάθμιση της γης, μεταξύ πολλών άλλων. Τέλος, επισημαίνεται η δυνητική επίπτωση στην ανθρώπινη υγεία από τη μείωση της διαθέσιμης τροφής.

5.2.3.4. Κλιματική αλλαγή και υγεία

Η πλανητική κλιματική αλλαγή αναμένεται να επηρεάσει τη δομή και τη λειτουργία πολλών οικοσυστημάτων και τη βιολογική υγεία πολλών φυτών και οργανισμών. Ήδη υπάρχουν διαφοροποιήσεις σε βιολογικά συστήματα τις τελευταίες δεκαετίες, που αποδίδονται στην κλιματική αλλαγή, όπως παγετώνες, πάγος θάλασσας, πρόωρες γεννήσεις πουλιών, μεταναστεύσεις εντόμων, καθώς και επιπτώσεις στην υγεία. Επίσης, η κλιματική αλλαγή αναμένεται να αυξήσει τους ρυπαντές, όπως το τροποσφαιρικό όζον και διάφορα αλλεργιογόνα αιωρούμενα σωματίδια. Επιπλέον, εκτιμάται ότι θα επιφέρει αύξηση της άμεσης θερινής θνησιμότητας λόγω καιρού, καθόσον αναμένεται αύξηση του αριθμού των ημερών πάνω από τις συνθήκες κατωφλίου, αλλά και αδυναμία του πληθυσμού να προσαρμοστεί στην αυξημένη θερμότητα. Ωστόσο, αν η κλιματική αλλαγή συνοδεύεται από μείωση της μεταβλητότητας της θερινής θερμοκρασίας, είναι πιθανόν η θνησιμότητα λόγω καιρού να μην αυξηθεί σημαντικά ακόμα και σε θερμότερο πλανήτη.

5.3. Βιομετεωρολογικοί και βιοκλιματικοί δείκτες

Στη βιομετεωρολογία, όταν μελετώνται οι επιπτώσεις των ακραίων καιρικών φαινομένων και ο τρόπος με τον οποίο αντιδρά ή «αισθάνεται» είτε ο άνθρωπος είτε ένας ζωντανός οργανισμός μέσα σε αυτές, εξετάζονται μια σειρά δεικτών, που έχουν αναπτυχθεί και ονομάζονται βιοκλιματικοί δείκτες. Οι δείκτες αυτοί περιλαμβάνουν κυρίως τη θερμοκρασία, την υγρασία, τον άνεμο και την ηλιακή ακτινοβολία, ως τους κυριότερους μετεωρολογικούς παράγοντες που επιδρούν στο πόσο άνετα «αισθάνεται» ο άνθρωπος ή ένας ζωντανός οργανισμός μέσα στο περιβάλλον. Επιπλέον, για τον άνθρωπο, άλλοι παράγοντες μπορεί να είναι το είδος των ρούχων που φορά, η δραστηριότητα που αναπτύσσει, καθώς και ο τύπος του δέρματος που διαθέτει, οι οποίοι δεν έχουν άμεση σχέση με το περιβάλλον. Οι περισσότεροι και πιο αξιόπιστοι βιοκλιματικοί δείκτες που έχουν αναπτυχθεί συνδυάζουν τη θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία της ατμόσφαιρας. Το αποτέλεσμα είναι ο ορισμός της λεγόμενης «φαινόμενης» ή «αισθητής» θερμοκρασίας. Η θερμοκρασία αυτή διαφέρει από την περιβαλλοντική θερμοκρασία και ορίζεται ως η θερμοκρασία την οποία «αισθάνεται» ένας άνθρωπος ή ένας ζωντανός οργανισμός, ως αποτέλεσμα του συνδυασμού της θερμοκρασίας ξηρού θερμομέτρου και της σχετικής υγρασίας της ατμόσφαιρας.

5.3.1. Εξέλιξη και κατηγοριοποίηση

Από τις αρχές του προηγούμενου αιώνα επιχειρήθηκε να ποσοτικοποιηθεί και να εκφραστεί μέσω δεικτών το ευχάριστο, ουδέτερο ή δυσάρεστο συναίσθημα που βιώνει ο άνθρωπος σε διαφορετικά περιβάλλοντα. Ορισμένοι δείκτες υπολογίζονται από το συνδυασμό βασικών μικρομετεωρολογικών παραμέτρων, όπως είναι η θερμοκρασία, η υγρασία, η ταχύτητα του ανέμου, η ηλιακή ακτινοβολία και άλλοι, λαμβάνοντας επιπλέον υπόψη τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά του χώρου και τα δεδομένα που αναφέρονται στα άτομα, τα οποία υφίστανται την επίδραση των περιβαλλοντικών αυτών παραμέτρων. Οι συγκεκριμένοι δείκτες χαρακτηρίζονται βιομετεωρολογικοί και βιοκλιματικοί. Μετά το 1905, όταν έγινε η πρώτη παρατήρηση για την καταλληλόλητα της θερμοκρασίας του υγρού θερμομέτρου, ως παράγοντα έκφρασης της θερμικής καταπόνησης, έχει προταθεί ένας μεγάλος αριθμός δεικτών, που εφαρμόστηκε ή εφαρμόζεται (Πίνακας 5.1) σε παγκόσμιο επίπεδο. Τα πρώτα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν ως δείκτες θερμικού περιβάλλοντος ήταν εμπειρικά και βασίζονταν σε μεμονωμένες μετεωρολογικές παραμέτρους ή σε συνδυασμό αυτών. Αργότερα, έγινε η προσομοίωση του ανθρώπινου θερμικού ισοζυγίου και στη δεκαετία του 1970 αναπτύχθηκαν οι σχετικοί με την ανθρώπινη φυσιολογία δείκτες (Knez & Thorsson, 2006).

Έτος	Δείκτες	Συγγραφείς
1905	Wet bulb temperature (T_w)	Haldane
1916	Katathermometer	Hill et al.
1923	Effective Temperature (ET)	Houghton and Yaglou
1929	Equivalent temperature (T_{eq})	Dufton
1932	Corrected Effective Temperature (CET)	Vernon and Warner
1937	Operative Temperature (OpT)	Winslow et al.

1945	Thermal Acceptance Ratio (TAR)	Ionides et al.
1945	Index of physiological effect (E_p)	Robinson et al.
1946	Corrected Effective Temperature (CET)	Bedford
1947	Predicted 4-h Sweat Rate (P4SR)	Mc Ardel et al.
1948	Resultant Temperature (RT)	Missenard et al.
1950	Craig index (I)	Craig
1955	Heat stress index (HIS)	Belding and Hatch
1957	Wet-Bulb Globe Temperature (WBGT)	Yaglou and Minard
1957	Oxford index (WD)	Lind and Hellon
1957	Discomfort Index (DI)	Thom
1958	Thermal Strain Index (TSI)	Lee and Henschel
1959	Discomfort Index (DI)	Tennenbaum et al.
1960	Cummulative Discomfort Index (CumDI)	Tennenbaum et al.
1960	Index of physiological strain (I_s)	Hall and Polte
1962	Index of Thermal Stress (ITS)	Givoni
1966	Heat strain index (corrected) (HIS)	Mc Karns and Brief
1966	Prediction of heart rate (HR)	Fuller and Brouha
1967	Effective Radiant Field (ERF)	Gagge et al.
1970	Predicted Mean Vote (PMV)	Fänger
1970	Prescriptive zone	Lind
1971	New effective temperature (ET*)	Gagge et al.
1971	Wet Globe Temperature (WGT)	Botsford
1971	Humid operative temperature	Nishi and Gagge
1972	Predicted body core temperature	Givoni and Goldman
1972	Skin wittedness	Kerslake
1973	Standard Effective Temperature (SET)	Gagge et al.
1973	Predicted heart rate	Givoni and Goldman
1978	Skin wittedness	Gonzales et al.
1979	Fighter Index of Thermal Stress (FITS)	Nunneley and Stribley
1981	Effective Heart Strain Index (EHSI)	Kamon and Ryan
1982	Predicted sweat loss (m_{sw})	Shapiro et al.
1985	Requires sweating (SW_{req})	ISO 7933
1986	Predicted Mean Vote (modified) (PMV*)	Gagge et al.
1996	Cummulative Heart Strain Index (CHSI)	Frank et al.
1998	Physiological Strain Index (PSI)	Moran et al.
1999	Modified Discomfort Index (MDI)	Moran et al.
1999	Physiological Equivalent Temperature (PET)	Höppe
2000	Standard Effective Temperature (modified) (SET*)	Pickup and De Dear
2001	Environmental Stress Index (ESI)	Moran et al.
2005	Wet-Bulb Dry Temperature (WBDT)	Wallace et al.
2005	Relative Humidity Dry Temperature (RHDT)	Wallace et al.
2009	Universal Thermal Climate Index (UTCI)	Bröde et al.

Πίνακας 5.1. *Βιομετεωρολογικοί και βιοκλιματικοί δείκτες.*

Μια πρώτη κατηγοριοποίηση των βιοκλιματικών δεικτών μπορεί να γίνει με βάση τις θερμοκρασιακές συνθήκες που επικρατούν στο περιβάλλον. Διακρίνονται, λοιπόν, σε δείκτες που αναφέρονται σε ψυχρό περιβάλλον, όπου συνδυάζεται η θερμοκρασία του αέρα και η ταχύτητα του ανέμου, όπως οι δείκτες απόψυξης, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την περιγραφή της στροβιλώδους μεταφοράς αισθητής θερμότητας. Δεύτερη

κατηγορία είναι δείκτες που αναφέρονται σε θερμό περιβάλλον, όπου συνδυάζεται η θερμοκρασία του αέρα με διάφορους δείκτες υγρασίας, για τη μελέτη της εξάτμισης που προκαλείται από το ανθρώπινο σώμα. Σε ένα γενικότερο πλαίσιο, οι βιοκλιματικοί δείκτες μπορούν να ταξινομηθούν σε δυο κατηγορίες, τους βιομετεωρολογικούς και τους θερμοφυσιολογικούς δείκτες.

Οι **βιομετεωρολογικοί** δείκτες, όπως οι Heat Index, PET και UTCI, αξιοποιούν μετεωρολογικά δεδομένα, για την περιγραφή της επίδρασης των κλιματικών συνθηκών στον άνθρωπο. Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία, η ηλιακή ακτινοβολία και η ταχύτητα ανέμου. Η απλότητα που χαρακτηρίζει τους δείκτες αυτής της κατηγορίας αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημά τους. Οι δείκτες αυτοί λαμβάνουν υπόψη και το ανθρώπινο θερμικό ισοζύγιο, ορίζουν ένα «τυπικό άνθρωπο» με συγκεκριμένο ύψος, βάρος, μεταβολισμό, ένδυση κτλ., και τον εισάγουν στο μοντέλο, μαζί με τα μετεωρολογικά δεδομένα. Στους **θερμοφυσιολογικούς** δείκτες, η εκτίμηση επίδρασης του κλίματος στον ανθρώπινο οργανισμό γίνεται με τη συγκριτική θεώρηση του συνόλου των θερμικών παραγόντων. Με τη χρήση τους γίνεται μοντελοποίηση του ανθρώπινου ισοζυγίου θερμότητας. Θερμοφυσιολογικοί θεωρούνται εκείνοι οι δείκτες που ως δεδομένα εισόδου απαιτούν και χαρακτηριστικά της ανθρώπινης φυσιολογίας, δηλαδή την ηλικία, το φύλο, την ένταση εργασίας κτλ. Σε αυτούς τους δείκτες, τα μετεωρολογικά δεδομένα κρατούνται σταθερά και μεταβάλλονται τα δεδομένα της φυσιολογίας του ανθρώπου.

Προβληματισμός έχει αναπτυχθεί σχετικά με τη χρήση των βιομετεωρολογικών και βιοκλιματικών δεικτών στο εξωτερικό περιβάλλον, δηλαδή αν οι δείκτες έχουν τη δυνατότητα να αποδώσουν με ακρίβεια τη θερμική αίσθηση του ανθρώπου, αφού είχαν αρχικά σχεδιαστεί και αναπτυχθεί για εσωτερικούς χώρους. Η απόκλιση των εκτιμήσεων της θερμικής αίσθησης από τις αντίστοιχες, που προκύπτουν από τους δείκτες ή τα μοντέλα, μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι οι συνθήκες του εξωτερικού περιβάλλοντος, η μεγαλύτερη δραστηριότητα του ατόμου ή, γενικά, των ζώντων οργανισμών σε αυτές, ο χρόνος παραμονής και η προηγούμενη θερμική κατάσταση μπορεί να διαφοροποιήσουν τα όρια της θερμικής αίσθησης και να καταστήσουν το άτομο περισσότερο ή λιγότερο ανεκτικό σε θερμικά δυσμενείς συνθήκες. Για την εκτίμηση της θερμικής αίσθησης στους ελεύθερους κοινόχρηστους χώρους, έχει ιδιαίτερη σημασία η σωστή επιλογή του δείκτη, ώστε να επιτευχθεί η μεγαλύτερη προσέγγιση της πραγματικής θερμικής αίσθησης των ζώντων οργανισμών στους χώρους αυτούς. Από τη χωρική κατανομή της βιομετεωρολογικής αυτής παραμέτρου είναι δυνατόν να επισημανθούν θέσεις με ευνοϊκές ή δυσμενείς συνθήκες θερμικής αίσθησης, να συσχετισθούν με τη διαμόρφωση του χώρου και στη συνέχεια να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα, για πιθανές παρεμβάσεις, βελτιώνοντας έτσι τις βιομετεωρολογικές συνθήκες.

5.3.2. Βιομετεωρολογικοί Δείκτες

Περιγράφονται οι πιο γνωστοί δείκτες από τη λίστα του Πίνακα 5.1. Οι δείκτες αυτοί είναι: οι κοινοί δείκτες κατανομής (δείκτες ξηρασίας), ο δείκτης θερμικής καταπόνησης (WBGT), η φυσιολογικά ισοδύναμη θερμοκρασία (PET), ο καθολικός θερμικός κλιματικός δείκτης (UTCI), ο δείκτης θερμότητας (HI), ο δείκτης ψύχρανσης ανέμου (WCT), ο δείκτης δυσφορίας (humidex), ο δείκτης αποτελεσματικής θερμοκρασίας (T_{ef}), ο δείκτης ύγρανσης (T_{h}) και ο δείκτης θερμικής άνεσης (SSI).

1.Κοινοί δείκτες κατανομής (δείκτες ξηρασίας). Οι τέσσερις συνδυασμένοι κλιματικοί δείκτες, που έχουν βάση τη θερμοκρασία του αέρα και τη βροχόπτωση, είναι ο λόγος ψυχρών προς ξηρές ημέρες (CD), ο λόγος ψυχρών προς υγρές ημέρες (CW), ο λόγος θερμών προς ξηρές ημέρες (WD) και ο λόγος θερμών προς υγρές ημέρες (WW). Οι δείκτες αυτοί καθορίζονται από τις υπερβάσεις των κοινών τεταρτημόριων της θερμοκρασίας και της βροχόπτωσης, χρησιμοποιώντας το 25ο και 75ο εκατοστημόριο, προκειμένου να περιλαμβάνουν ένα αριθμό συμβάντων (Beniston, 2009). Ειδικότερα:

- Ο **δείκτης CD** είναι ο αριθμός των ημερών με μέση ημερήσια θερμοκρασία αέρα (T) κάτω από το 25ο εκατοστημόριο της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας (T25) και ταυτόχρονα η ημερήσια βροχόπτωση (P) κάτω από το 25ο εκατοστημόριο της ημερήσιας βροχόπτωσης (P25), έτσι ώστε T < T25 και P < P25).
- Ο **δείκτης CW** είναι ο αριθμός των ημερών με μέση ημερήσια θερμοκρασία αέρα (T) κάτω από το 25ο εκατοστημόριο της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας (T25) και ταυτόχρονα η ημερήσια βροχόπτωση (P) πάνω από το 75ο εκατοστημόριο της ημερήσιας βροχόπτωσης (P75), έτσι ώστε T < T25 και P > P75.
- Ο **δείκτης WD** είναι ο αριθμός των ημερών με μέση ημερήσια θερμοκρασία αέρα (T) πάνω από το 75ο εκατοστημόριο της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας (T75) και ταυτόχρονα η ημερήσια βροχόπτωση (P) κάτω από το 25ο εκατοστημόριο της ημερήσιας βροχόπτωσης (P25), έτσι ώστε T > T75 και P < P25.

- Ο **δείκτης WW** είναι ο αριθμός των ημερών με μέση ημερήσια θερμοκρασία αέρα (T) πάνω από το 75ο εκατοστημόριο της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας (T75) και ταυτόχρονα η ημερήσια βροχόπτωση (P) πάνω από το 75ο εκατοστημόριο της ημερήσιας βροχόπτωσης (P75), έτσι ώστε T > T75 και P > P75.

2. Δείκτης θερμικής καταπόνησης (WBGT). Είναι ένα μέτρο της θερμικής καταπόνησης σε άμεσο ηλιακό φως, το οποίο λαμβάνει υπόψη τη θερμοκρασία, την υγρασία, την ταχύτητα του ανέμου, τη γωνία του ηλιακού ζενίθ και τη νεφοκάλυψη, δηλαδή έμμεσα την ηλιακή ακτινοβολία. Διαφέρει από το δείκτη θερμότητας, ο οποίος λαμβάνει υπόψη τη θερμοκρασία και την υγρασία και υπολογίζεται για τις σκιερές περιοχές. Ο κίνδυνος διαταραχών λόγω θερμότητας εξαρτάται από τον WBGT και όχι από τη θερμοκρασία ξηρού θερμομέτρου. Ο WBGT ορίζεται από τη θερμοκρασία ξηρού θερμομέτρου, τη θερμοκρασία υγρού θερμομέτρου και τη θερμοκρασία μαύρης σφαίρας και είναι ένας από τους ευρέως χρησιμοποιούμενους δείκτες (Gaspar & Quintela, 2009·Yaglou & Minard, 1957), που δίνεται από τη σχέση:

WBGT = 0,7 Tnw + 0,2 Tg + 0,1 Ta (5.1)

όπου Tnw είναι η θερμοκρασία υγρού θερμομέτρου, Tg η πλανητική θερμοκρασία και Ta η θερμοκρασία του αέρα.

3. Φυσιολογικά ισοδύναμη θερμοκρασία (PET). Ορίζεται ως η φυσιολογικά ισοδύναμη θερμοκρασία σε μια δεδομένη θέση (σε εξωτερικό ή εσωτερικό χώρο). Είναι ισοδύναμη με τη θερμοκρασία του αέρα σε ένα τυπικό εσωτερικό χώρο, δηλαδή χωρίς την επίδραση του ανέμου και της ηλιακής ακτινοβολίας, όπου το ισοζύγιο θερμότητας του ανθρώπινου σώματος διατηρείται και η θερμοκρασία του δέρματος και του σώματος είναι ίσες με εκείνες των υπό εξέταση συνθηκών (Mayer & Höppe, 1987· Höppe, 1999). Οι παραδοχές που ακολουθούν αφορούν τις κλιματικές συνθήκες αναφοράς σε εσωτερικό χώρο: η μέση ακτινοβολούμενη θερμοκρασία ισούται με τη θερμοκρασία του αέρα (Tmrt = Ta). Η ταχύτητα του αέρα διαμορφώνεται σε 0,1 m/s. Η πίεση των υδρατμών διαμορφώνεται σε 12 hPa, δηλαδή περίπου ισοδύναμη με σχετική υγρασία 50% σε Ta = 20,0° C. Σύμφωνα με τον Höppe (1999), η υιοθέτηση σταθερών τιμών για τα είδη ένδυσης και τη δραστηριότητα στον υπολογισμό της PET έγινε προκειμένου να καθοριστεί ένας δείκτης ανεξάρτητος από την ατομική συμπεριφορά.

4. Καθολικός θερμικός κλιματικός δείκτης (UTCI). Ορίζεται ως η ισοδύναμη θερμοκρασία περιβάλλοντος (° C) ενός περιβάλλοντος αναφοράς, που προκαλεί την ίδια φυσιολογική απόκριση ενός προσώπου αναφοράς με το πραγματικό περιβάλλον (Weihs et al., 2012). Ο υπολογισμός της φυσιολογικής αντίδρασης στις μετεωρολογικές συνθήκες βασίζεται σε ένα μοντέλο πολλαπλών κόμβων της ανθρώπινης θερμορύθμισης (Fiala et al., 2001), που συνδέεται με ένα μοντέλο ένδυσης. Η στατική μόνωση λόγω ένδυσης ρυθμίζεται στη θερμοκρασία περιβάλλοντος, λαμβάνοντας υπόψη τις εποχικές ενδυματολογικές συνήθειες των Ευρωπαίων, η οποία επηρεάζει σημαντικά την ανθρώπινη αντίληψη του κλίματος σε εξωτερικό χώρο (Havenith et al. 2012). Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθεί ότι, ενώ η κλίμακα PET εκφράζει τη θερμική αντίληψη συγκεκριμένου πληθυσμού του θερμικού περιβάλλοντος, η κλίμακα UTCI εκφράζει την καταπόνηση από τη ζέστη ή το κρύο, ανεξάρτητα από τον τύπο του πληθυσμού.

5. Δείκτης θερμότητας (HI). Η υψηλή υγρασία στον αέρα όταν η θερμοκρασία είναι υψηλή ενισχύει τη δυσφορία των ζώντων οργανισμών. Πολλοί δείκτες έχουν αναπτυχθεί όλα αυτά τα χρόνια για να προσεγγίσουν την αίσθηση της ζέστης, όταν η θερμοκρασία και η υγρασία είναι υψηλές (Quayle & Doehring, 1981). Για παράδειγμα, όταν η θερμοκρασία είναι 35° C και το σημείο δρόσου είναι 25° C, η αίσθηση του αέρα είναι έντονα ζεστή, ενώ αν το σημείο δρόσου είναι μόνο 5° C, μια θερμοκρασία ακόμα και 35° C μπορεί να φαίνεται σχεδόν ανεκτή. Ο δείκτης που χρησιμοποιείται στις ΗΠΑ είναι ο δείκτης θερμότητας Steadman ή, απλώς, δείκτης θερμότητας.
Ο Steadman (1979a, b) διερεύνησε την αίσθηση της θερμότητας υπό ποικίλες καιρικές συνθήκες, χάρη στα εκτεταμένα στοιχεία για την ανθρώπινη φυσιολογία. Οι πίνακες Steadman δίνουν τη φαινόμενη θερμοκρασία ως συνάρτηση της θερμοκρασίας του αέρα και της σχετικής υγρασίας ή, ισοδύναμα, της θερμοκρασίας του αέρα και του σημείου δρόσου. Η αμερικανική Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (NOAA) αναφέρει το δείκτη θερμότητας κάθε καλοκαίρι. Οι υπολογισμοί Steadman θεωρούν σταθερή τη βαρομετρική πίεση στη στάθμη της θάλασσας (101,3 kPa, όπου kPa είναι kilopascal, δεδομένου ότι 1 Pascal είναι μια δύναμη ίση με 1 Newton,

που εφαρμόζεται σε μια περιοχή ίση με 1 m^2), τάση ατμών 1,6 kPa, που ισοδυναμεί με σημείο δρόσου ίσο με 14° C στο επίπεδο της θάλασσας, ταχύτητα του ανέμου ίση με 2,5 ms^{-1}, και χωρίς άμεση ηλιακή ακτινοβολία. Το άτομο που βιώνει τη θερμότητα υποτίθεται ότι περπατά. Στον πίνακα, σημειώστε ότι αν το σημείο δρόσου είναι μικρότερο από 14° C, η φαινόμενη θερμοκρασία θα είναι μικρότερη από την πραγματική θερμοκρασία του αέρα. Αυτό συμβαίνει γιατί η εξάτμιση του ιδρώτα προκαλεί ψύξη στην επιφάνεια του δέρματος και δίνει την αίσθηση ότι ο αέρας έχει θερμοκρασία κάπως χαμηλότερη από την πραγματική. Αν το σημείο δρόσου είναι μεγαλύτερο από 14° C, ο ιδρώτας εξατμίζεται λιγότερο εύκολα, συγκεντρώνεται στο δέρμα και η θερμοκρασία γίνεται ακόμα πιο άβολη. Ο Steadman (1979b) σημειώνει ότι ταχύτητα του ανέμου μεγαλύτερη από 2,5 ms^{-1} μειώνει τη φαινομενική θερμοκρασία, λόγω της αυξημένης εξάτμισης του ιδρώτα. Μια εξαίρεση εμφανίζεται, ωστόσο, όταν η θερμοκρασία του αέρα προσεγγίζει ή υπερβαίνει τη θερμοκρασία του σώματος (37° C) και η υγρασία είναι χαμηλή. Ένας ζεστός, ξηρός άνεμος 15 ms^{-1} μπορεί να αυξήσει τη φαινομενική θερμοκρασία από 1-4° C. Τέλος, η έκθεση στο άμεσο ηλιακό φως μπορεί να αυξήσει τη φαινομενική θερμοκρασία έως και 7° C. Ο υπολογισμός του δείκτη θερμότητας γίνεται μέσω των Πινάκων 5.2 και 5.3.

Θερμοκρασία αέρα (° C)	Σημείο δρόσου (°C)															
	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
20	18	18	18	19	19	19	20	20	21	21	21	–	–	–	–	–
22	20	20	21	21	21	22	22	22	22	23	23	24	–	–	–	–
24	22	23	23	23	23	24	24	24	24	25	25	26	26	–	–	–
26	24	25	25	25	25	25	26	26	26	27	27	28	29	30	–	–
28	26	27	27	27	27	27	28	28	29	29	30	31	32	33	36	–
30	28	28	28	29	29	29	30	30	31	31	32	33	35	36	38	45
32	30	30	30	31	31	31	31	32	33	33	34	36	37	39	41	50
34	32	32	32	33	33	33	33	34	35	36	37	38	40	42	45	–
36	33	33	34	34	34	35	35	36	37	38	39	41	43	45	48	–
38	35	35	35	36	36	37	37	38	39	41	42	44	46	49	52	–
40	36	37	37	38	38	39	39	40	41	43	45	47	49	52	–	–
42	38	38	39	39	40	40	41	42	43	45	47	49	52	–	–	–
44	40	40	41	41	42	42	43	44	45	47	49	52	–	–	–	–
46	42	42	42	43	44	44	45	46	47	49	51	–	–	–	–	–
48	43	44	44	45	45	45	46	48	49	51	–	–	–	–	–	–
50	45	45	46	46	47	47	48	50	52	–	–	–	–	–	–	–

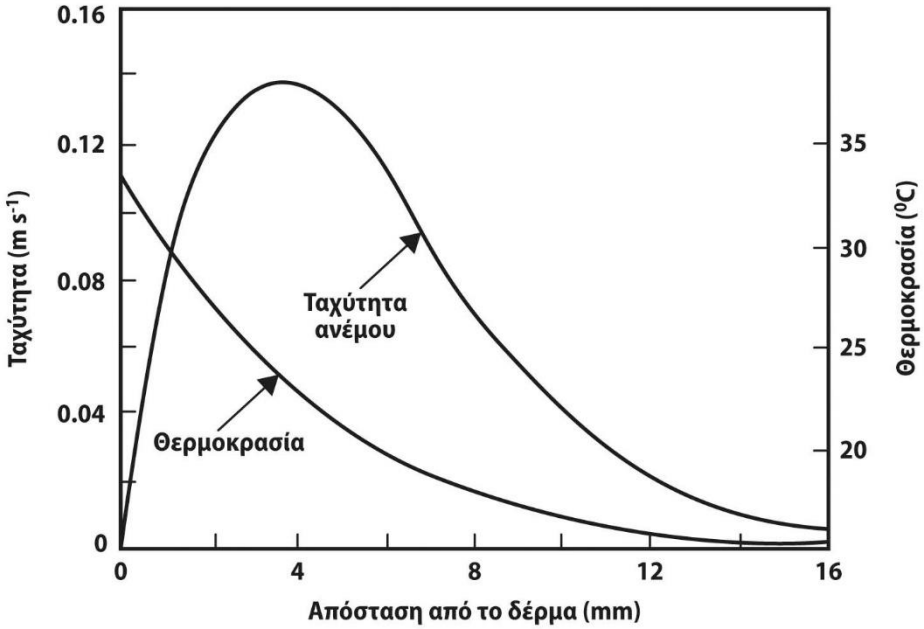
Πίνακας 5.2. *Στοιχεία από Steadman (1979a), που δίνουν το δείκτη θερμότητας υπό τη μορφή μιας φαινόμενης θερμοκρασίας, ως συνάρτηση της πραγματικής θερμοκρασίας και του σημείου δρόσου.*

6. Δείκτης ψύχρανσης ανέμου (WCT). Ο όρος «ψύχρανση ανέμου» επινοήθηκε από τον εξερευνητή Paul A. Siple στη διατριβή του *Προσαρμογή του εξερευνητή στο κλίμα της Ανταρκτικής*, που υποβλήθηκε το 1939. Στη διάρκεια της παραμονής τους στην Ανταρκτική, ο Siple και ο συνάδελφός του Charles F. Passel, διεξήγαγαν πειράματα σχετικά με το χρόνο ο οποίος απαιτείται για να παγώσουν 250 γραμμάρια νερού σε ένα πλαστικό κύλινδρο που τοποθετείται έξω, στον άνεμο, συμπεριλαμβανομένου ενός μαθηματικού τύπου, που αφορά το ρυθμό της απώλειας ενέργειας του κυλίνδρου λόγω της θερμοκρασίας του αέρα και της ταχύτητας του ανέμου. Ο τύπος αυτός αργότερα χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της παραμέτρου της ισοδύναμης θερμοκρασίας ψύχρανσης του ανέμου (wind chill equivalent temperature). Αυτή η παράμετρος έπρεπε να λάβει υπόψη την υπερβολική αίσθηση του κρύου που αισθάνεται κάποιος όταν φυσάει ο άνεμος σε χαμηλές θερμοκρασίες.

Θερμοκρασία αέρα (°C)	Σχετική υγρασία (%)										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
20	16	17	17	18	19	19	20	20	21	21	21
21	18	18	19	19	20	20	21	21	22	22	23
22	19	19	20	20	21	21	22	22	23	23	24
23	20	20	21	22	22	23	23	24	24	24	25
24	21	22	22	23	23	24	24	25	25	26	26
25	22	23	24	24	24	25	25	26	27	27	28
26	24	24	25	25	26	26	27	27	28	29	30
27	25	25	26	26	27	27	28	29	30	31	33
28	26	26	27	27	28	29	29	31	32	34	36
29	26	27	27	28	29	30	31	33	35	37	40
30	27	28	28	29	30	31	33	35	37	40	45
31	28	29	29	30	31	33	35	37	40	45	
32	29	29	30	31	33	35	37	40	44	51	
33	29	30	31	33	34	36	39	43	49		
34	30	31	32	34	36	38	42	47			
35	31	32	33	35	37	40	45	51			
36	32	33	35	37	39	43	49				
37	32	34	36	38	41	46					
38	33	35	37	40	44	49					
39	34	36	38	41	46						
40	35	37	40	43	49						
41	35	38	41	45							
42	36	39	42	47							
43	37	40	44	49							
44	38	41	45	52							
45	38	42	47								
46	39	43	49								
47	40	44	51								
48	41	45	53								
49	42	47									
50	42	48									

Πίνακας 5.3. *Στοιχεία από Steadman (1979a), τα οποία δίνουν το δείκτη θερμότητας, ως συνάρτηση της θερμοκρασίας του αέρα και της σχετικής υγρασίας.*

Για παράδειγμα, σύμφωνα με τον τύπο, ένας κατάλληλα ντυμένος άνθρωπος, που εκτίθεται σε θερμοκρασία –15° C και άνεμο 12 m s^{-1}, θα αισθάνεται τόσο κρύο όσο αν περπατούσε σε αέρα με θερμοκρασία –39° C (Πίνακας 5.4). Η NOAA εξέδωσε τον τύπο της ψύχρανσης ανέμου το 1973 και τον χρησιμοποίησε μέχρι την 1η Νοεμβρίου του 2001, όταν αντικαταστάθηκε. Ατέλειες στον τύπο για τον υπολογισμό της ισοδύναμης θερμοκρασίας εντοπίστηκαν από την αρχή. Το νερό δεν έχει εσωτερική πηγή θερμότητας, όπως το ανθρώπινο σώμα. Έτσι, το νερό σε ένα πλαστικό μπουκάλι δεν μοιάζει με το ανθρώπινο δέρμα. Άρα, ο τύπος αγνοεί τη θερμική αντίσταση του δέρματος και η παραδοχή για τη θερμοκρασία του δέρματος είναι εξωπραγματικά υψηλή. Στο Σχήμα 5.1 παρουσιάζεται χαρακτηριστικά η σχέση ταχύτητας ανέμου και απόστασης σε χιλιοστά από την επιφάνεια του δέρματος, με βάση τη φαινόμενη ή την αισθητή θερμοκρασία. Επιπλέον, υπολογίζονται η φαινόμενη ή η αισθητή θερμοκρασία, με βάση την ταχύτητα του ανέμου, καθώς και η διαφορά της από την πραγματική θερμοκρασία.



Σχήμα 5.1. *Σχέση ταχύτητας ανέμου και απόστασης από το δέρμα στη φαινόμενη θερμοκρασία.*

Πραγματική θερμοκρασία (^{0}C)	**Αντίστοιχη θερμοκρασία ψυχρού ανέμου**			
	Πραγματική ταχύτητα ανέμου (ms^{-1})			
	Νηνεμία	**5**	**10**	**15**
0	1	–2	–7	–11
–5	–4	–9	–13	–16
–10	–9	–13	–19	–25
–15	–13	–19	–26	–33
–20	–18	–26	–34	–42
–30	–28	–37	–50	–
–40	–37	–50	–	–

Πίνακας 5.4. *Διαφορές στη φαινόμενη θερμοκρασία ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου.*

Η ταχύτητα του ανέμου, που συνήθως μετριέται σε ύψος 10 m, είναι μεγαλύτερη από αυτήν που σημειώνεται στο επίπεδο του προσώπου. Τέλος, οι άνθρωποι που ήταν συνηθισμένοι στο χειμωνιάτικο κρύο παραπονέθηκαν ότι η ισοδύναμη θερμοκρασία ψύχρανσης ανέμου υπερεκτιμά την επίδραση του ανέμου. Το φθινόπωρο του 2000, ως συνέπεια της εμφανούς ανεπάρκειας του τύπου για την ισοδύναμη θερμοκρασία ψύχρανσης ανέμου, η NOAA αξιολόγησε τις ελλείψεις των υφιστάμενων τύπων για τον υπολογισμό της παραμέτρου ψύχρανσης ανέμου και πρότεινε έναν νέο τύπο. Η ομάδα JAG/TI μαζί με την ομάδα DCIEM (Τορόντο, Οντάριο, Καναδάς) πρότεινε τελικά έναν νέο τύπο, ο οποίος βασίζεται εν μέρει στην έρευνά τους σχετικά με τον ψυχρό αέρα και εν μέρει στις νέες δοκιμές με ανθρώπους (Πίνακας 5.5).

Το DCIEM πραγματοποίησε κλινικές δοκιμές σε μια αεροδυναμική σήραγγα υπό ελεγχόμενες συνθήκες θερμοκρασίας και ροής αέρα. Οι άνθρωποι που συμμετείχαν είχαν αισθητήρες σε διάφορα μέρη του προσώπου τους και βαθμονομήθηκε ο νέος τύπος για τη θερμοκρασία ψύχρανσης ανέμου κατά τις δοκιμές με ανθρώπους. Αφού η ομάδα JAG/TI υιοθέτησε τον τύπο, η Μετεωρολογική Υπηρεσία του Καναδά άρχισε να τον χρησιμοποιεί από την 1η Οκτωβρίου 2001 και ακολούθησε η NOAA την 1η Νοεμβρίου 2001.

Η νέα θερμοκρασία ψύχρανσης ανέμου έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Διορθώνει την παρατηρούμενη ταχύτητα του ανέμου, που μετριέται συνήθως σε ύψος 10 m, στο μέσο ύψος του ανθρώπινου προσώπου, περίπου στο 1,5 m.
- Βασίζεται σε ένα μοντέλο του ανθρώπινου προσώπου που ενσωματώνει τη σύγχρονη θεωρία μεταφοράς θερμότητας.

T_{air} / V_{10}	5	0	–5	–10	–15	–20	–25	–30	–35	–40	–45	–50
5	4	–2	–7	–13	–19	–24	–30	–36	–41	–47	–53	–58
10	3	–3	–9	–15	–21	–27	–33	–39	–45	–51	–57	–63
15	2	–4	–11	–17	–23	–29	–35	–41	–48	–54	–60	–66
20	1	–5	–12	–18	–24	–30	–37	–43	–49	–56	–62	–68
25	1	–6	–12	–19	–25	–32	–38	–44	–51	–57	–64	–70
30	0	–6	–13	–20	–26	–33	–39	–46	–52	–59	–65	–72
35	0	–7	–14	–20	–27	–33	–40	–47	–53	–60	–66	–73
40	–1	–7	–14	–21	–27	–34	–41	–48	–54	–61	–68	–74
45	–1	–8	–15	–21	–28	–35	–42	–48	–55	–62	–69	–75
50	–1	–8	–15	–22	–29	–35	–42	–49	–56	–63	–69	–76
55	–2	–8	–15	–22	–29	–36	–43	–50	–57	–63	–70	–77
60	–2	–9	–16	–23	–30	–36	–43	–50	–57	–64	–71	–78
65	–2	–9	–16	–23	–30	–37	–44	–51	–58	–65	–72	–79
70	–2	–9	–16	–23	–30	–37	–44	–51	–58	–65	–72	–80
75	–3	–10	–17	–24	–31	–38	–45	–52	–59	–66	–73	–80
80	–3	–10	–17	–24	–31	–38	–45	–52	–60	–67	–74	–81
Χαμηλός κίνδυνος κρυοπαγημάτων για τους περισσότερους ανθρώπους.												
Αυξανόμενος κίνδυνος κρυοπαγημάτων για τους περισσότερους ανθρώπους σε 10-30 λεπτά έκθεσης.												
Υψηλός κίνδυνος για τους περισσότερους ανθρώπους σε 5-10 λεπτά έκθεσης.												
Υψηλός κίνδυνος για τους περισσότερους ανθρώπους σε 2-5 λεπτά έκθεσης.												
Υψηλός κίνδυνος για τους περισσότερους ανθρώπους σε 2 λεπτά έκθεσης ή λιγότερο.												

Πίνακας 5.5. *Διάγραμμα υπολογισμού ψύχρανσης ανέμου.*

- Βασίζεται σε ένα περιθώριο ασφαλείας όσον αφορά τα πρόσωπα των οποίων το δέρμα έχει ασυνήθιστα υψηλή θερμική αντίσταση. Για αυτούς τους ανθρώπους, η θερμότητα από το εσωτερικό του σώματος δεν περνά τόσο εύκολα στην επιφάνεια του δέρματος, όπως στη μεγάλη πλειονότητα του πληθυσμού.
- Χρησιμοποιεί ένα όριο χαμηλής ταχύτητας ανέμου ίσο με 4,8 km/h έναντι του 6,4 km/h, που χρησιμοποιείται στον τύπο των Siple-Passel. Οι πεζοί σε πολυσύχναστους δρόμους είναι πιο πιθανό να περπατήσουν σε 4,8 km/h αντί για 6,4 km/h.
- Προϋποθέτει στη διάρκεια της νύχτας συνθήκες με καθαρό ουρανό (καμία εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία και ελάχιστη υπέρυθρη ακτινοβολία από τον ουρανό).
- Δίνει τιμές υψηλότερες από εκείνες που δημιουργούνται από την παλαιά φόρμουλα Siple-Passel.
- Σε μετρικές μονάδες, η εξίσωση για τη θερμοκρασία ψύχρανσης ανέμου (^{o}C) είναι:

$$WCT = 13{,}12 + 0{,}6215T - 11{,}37V^{0{,}16} + 0{,}3965TV^{0{,}16} \quad (5.2)$$

όπου T είναι η θερμοκρασία του αέρα σε ^{o}C και V η ταχύτητα του ανέμου σε km/h, μετρούμενη σε ύψος 10m, που αποτελεί συνήθη πρακτική.
Η ομάδα JAG/TI συμφώνησε να καθυστερήσει την ενσωμάτωση της επίδρασης της ηλιακής ακτινοβολίας στον τύπο, μέχρι οι ερευνητές να καθορίσουν τις σωστές ρυθμίσεις για την ηλιακή γωνία ζενίθ και της νέφωσης.

7. Δείκτης δυσφορίας (humidex) Αν και οι όροι «άνεση» και «δυσφορία» είναι υποκειμενικοί, έχει επιτευχθεί κάποια συναίνεση σχετικά με τη σημασία τους, μέσω μελετών της φυσιολογίας εθελοντών οι οποίοι

περπατούσαν σε διάδρομο υπό ελεγχόμενες συνθήκες. Στη διάρκεια του πειράματος, έχουν ληφθεί μετρήσεις της θερμοκρασίας του δέρματος, του ρυθμού εφίδρωσης και του σωματικού βάρους, και έχουν καταγραφεί οι απαντήσεις των εθελοντών για το βαθμό δυσφορίας που έχουν νιώσει. Σε άλλα είδη μελετών, η αποτελεσματικότητα των εργαζομένων σε γραφεία ή οι ρυθμοί μάθησης των μαθητών συσχετίστηκαν με τη θερμοκρασία και την υγρασία του δωματίου. Τα αποτελέσματα αυτών των μελετών συνοψίζονται στους Πίνακες 5.6 και 5.7. Οι τιμές του δείκτη δυσφορίας προέρχονται από τη θερμοκρασία του αέρα και την υγρασία. Ο δείκτης δυσφορίας χρησιμοποιείται από τη Μετεωρολογική Υπηρεσία του Καναδά και άλλων χωρών, και φαίνεται στον Πίνακα 5.6.

Θερμοκρασία (°C)	Σχετική υγρασία (%)																
	100	95	90	85	80	75	70	65	60	55	50	45	40	35	30	25	20
43													56	54	51	49	47
42												56	54	52	50	48	46
41											56	54	52	50	48	46	44
40										57	54	52	51	49	47	44	43
39									56	54	53	51	49	47	45	43	41
38							57	56	54	52	51	49	47	46	43	42	40
37					58	57	55	53	51	50	49	47	45	43	42	40	
36			58	57	56	54	53	51	50	48	47	45	43	42	40	38	
35		58	57	56	54	52	51	49	48	47	45	43	42	41	38	37	
34	58	57	55	53	52	51	49	48	47	45	43	42	41	39	37	36	
33	55	54	52	51	50	48	47	46	44	43	42	40	38	37	36	34	
32	52	51	50	49	47	46	45	43	42	41	39	38	37	36	34	33	
31	50	49	48	46	45	44	43	41	40	39	38	36	35	34	33	31	
30	48	47	46	44	43	42	41	40	38	37	36	35	34	33	31	31	
29	46	45	44	43	42	41	39	38	37	36	34	33	32	31	30		
28	43	42	41	41	39	38	37	36	35	34	33	32	31	29	28		
27	41	40	39	38	37	36	35	34	33	32	31	30	29	28	28		
26	39	38	37	36	35	34	33	32	31	31	29	28	28	27			
25	37	36	35	34	33	33	32	31	30	29	28	27	27	26			
24	35	34	33	33	32	31	30	29	28	28	27	26	26	25			
23	33	32	32	31	30	29	28	27	27	26	25	24	23				
22	31	29	29	28	28	27	26	26	24	24	23	23					
21	29	29	28	27	27	26	26	26	24	23	23	22					

Πίνακας 5.6. *Οι τιμές του δείκτη δυσφορίας βάσει της θερμοκρασίας ξηρού θερμομέτρου και τις αναγνώσεις της σχετικής υγρασίας.*

Ο δείκτης δυσφορίας (DI) εκφράζει την ικανοποίηση ή μη του ανθρώπου από το περιβάλλον και τις επικρατούσες συνθήκες. Προτάθηκε από τον Thom (1959), προκειμένου να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των αναγκών ενός κτιρίου σε κλιματισμό. Δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$DI = 0{,}4(T + T_w) + 4{,}8 \quad (5.3)$$

όπου T είναι η θερμοκρασία ξηρού θερμομέτρου (°C) και T_w η θερμοκρασία υγρού θερμομέτρου (°C).
Για τον υπολογισμό του δείκτη δυσφορίας, χρησιμοποιείται και η σχέση (Giles et al., 1990):

$$DI = T_d - 0{,}55(1 - 0{,}01RH)(T_d - 14{,}5) \quad (5.4)$$

όπου T_d είναι η θερμοκρασία ξηρού θερμομέτρου (°C) και RH η σχετική υγρασία (%).

Επίπεδα δυσφορίας	DI (° C)
Καμία δυσφορία	< 21
Λιγότερο από το 50% του πληθυσμού αισθάνεται δυσφορία	21-24
Περισσότερο από το 50% του πληθυσμού αισθάνεται δυσφορία	24-27
Το μεγαλύτερο μέρος του πληθυσμού αισθάνεται δυσφορία	27-29
Το σύνολο του πληθυσμού αισθάνεται δυσφορία	29-32
Κατάσταση αυξημένης ετοιμότητας στα νοσοκομεία	> 32

Πίνακας 5.7. *Οι οριακές τιμές που χαρακτηρίζουν τα διάφορα επίπεδα δυσφορίας.*

8. Δείκτης αποτελεσματικής θερμοκρασίας (T_{ef}). Αναπτύχθηκε με στόχο να παράσχει μια μέθοδο για τον προσδιορισμό της σχετικής επίδρασης της θερμοκρασίας και της υγρασίας του αέρα σε συνθήκες ηρεμίας (Houghton & Yaglou, 1923). Η αποτελεσματική θερμοκρασία (ET) ορίζεται ως η θερμοκρασία μιας κορεσμένης ατμόσφαιρας σε ηρεμία, η οποία, απουσία ακτινοβολίας, θα παρήγαγε το ίδιο αποτέλεσμα με την υπό εξέταση ατμόσφαιρα. Ο δείκτης αυτός δείχνει τη συνδυασμένη επίδραση της σχετικής υγρασίας, της ταχύτητας του αέρα, της θερμοκρασίας του αέρα και της ένδυσης. Ο δείκτης αποτελεσματικής θερμοκρασίας (effective temperature) υπολογίζεται από το παρακάτω νομόγραμμα (Σχήμα 5.2), ως συνάρτηση της ταχύτητας ανέμου και της θερμοκρασίας ξηρού και υγρού θερμομέτρου.

9. Δείκτης ύγρανσης (T_h). Ο δείκτης ύγρανσης, T_h, δίνεται από τη σχέση:

$T_h = T_a + (T_d - 18)$, για $T_\alpha \geq 30^o$ C (5.5)

όπου T_a είναι η θερμοκρασία αέρα και T_d η θερμοκρασία του σημείου δρόσου.
Το νομόγραμμα του Σχήματος 5.3 χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του δείκτη.

10. Δείκτης Θερμικής Άνεσης (SSI)). Μοιάζει με τον DI, αλλά μόνο το 10% της υγρασίας λαμβάνεται υπόψη, για να αναδείξει πόσο ζεστά αισθάνεται κάποιος σε ένα ξηρό κλίμα. Προτάθηκε από το Ινστιτούτο Μηχανικών Θερμότητας και Ψύξης των ΗΠΑ (ASHRAE) και υπολογίζει την πραγματική αισθητή θερμοκρασία, δίνοντας μια ένδειξη των κινδύνων που μπορεί να ελλοχεύουν από την έκθεση στη ζέστη. Ο δείκτης SSI υπολογίζεται από τη σχέση:

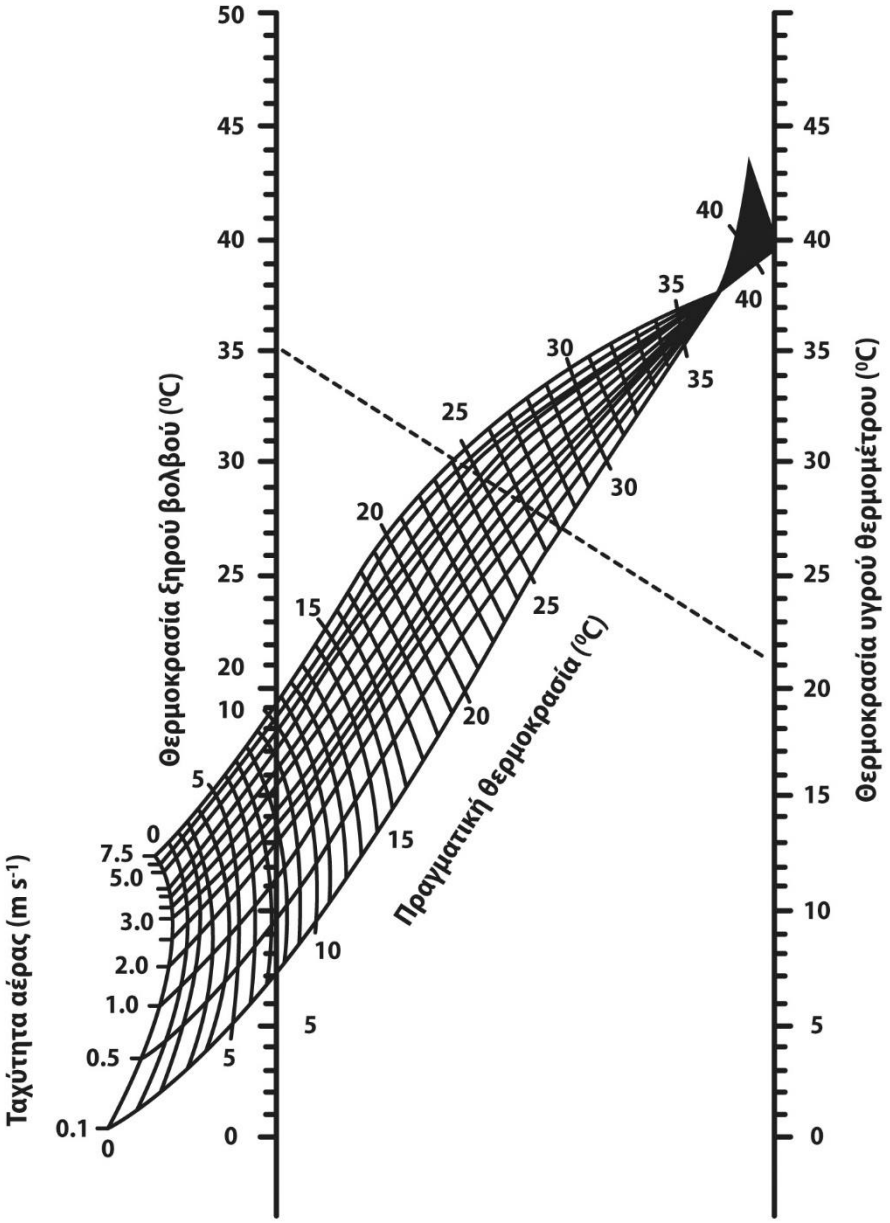
$$SSI = 1{,}98\big[T(F) - \big(0{,}55 - 0{,}0055(RH)\big)(T(F) - 58)\big] - 56{,}83 \quad (5.6)$$

όπου T(F) είναι η θερμοκρασία του αέρα σε F^o και RH (%) η σχετική υγρασία.

Στον Πίνακα 5.8 περιγράφεται η θερμική άνεση ανάλογα με το εύρος τιμών του SSI.

Τιμές SSI (F^o)	Θερμική αντίληψη
70-77	Τα άτομα αισθάνονται ελαφρώς άνετα, αλλά ελαφρώς δροσερά.
77-83	Τα άτομα αισθάνονται αρκετά άνετα.
83-91	Τα άτομα αισθάνονται ελαφρώς άνετα, αλλά ελαφρώς ζεστά.
91-100	Αυξάνεται η δυσφορία την οποία τα άτομα αισθάνονται ως ζέστη.
100-112	Κίνδυνος ηλίασης και θερμικής καταπόνησης από παρατεταμένη έκθεση και δραστηριότητα στον ήλιο.
112-125	Εγκυμονεί κινδύνους θερμοπληξίας και μεγάλη δυσφορία στα άτομα.
125-150	Μεγάλος κίνδυνος θερμοπληξίας, ειδικά για άτομα αδύναμα ή ηλικιωμένα ή για μικρά παιδιά.

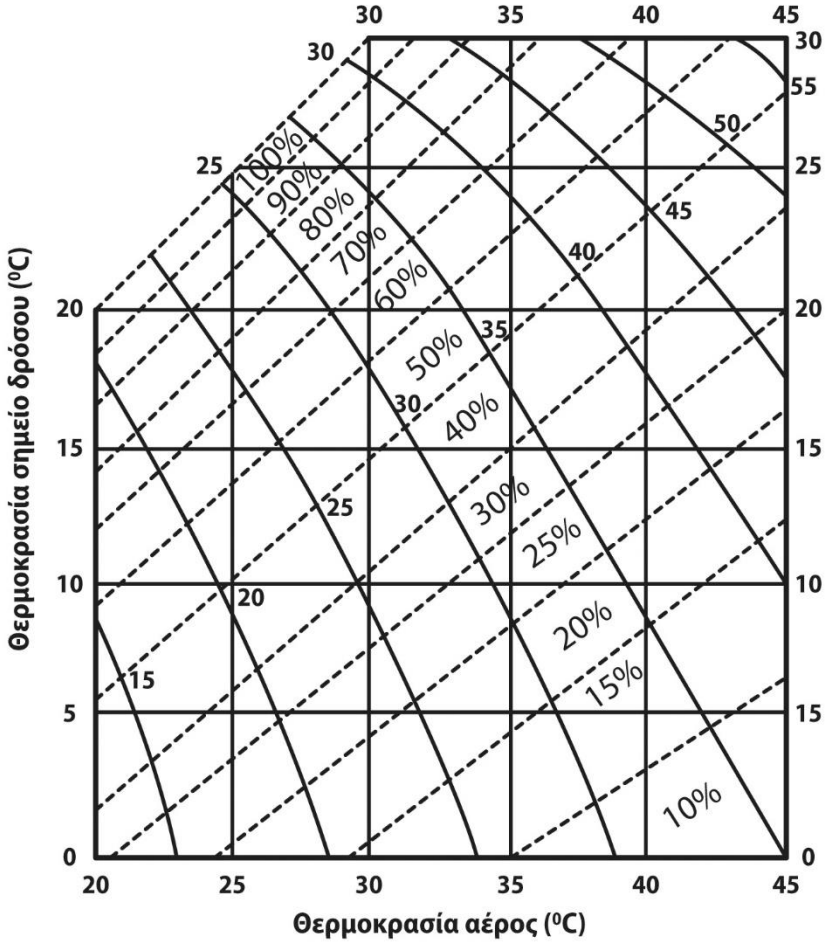
Πίνακας 5.8. *Τιμές SSI*.



Σχήμα 5.2. *Γραφική απεικόνιση του δείκτη T_{ef}, συναρτήσει της ταχύτητας αέρα και της θερμοκρασίας ξηρού και υγρού θερμομέτρου.*

5.4. Αεροβιολογία

Σε αυτήν την ενότητα εξετάζονται οι πρακτικές πτυχές της αεροβιολογίας, που παρουσιάζει μια διεπιστημονική προσέγγιση των ιδιοτήτων και της εναέριας κίνησης των ζώντων οργανισμών που είναι σημαντικές για τα φυτά, τα ζώα, τα παράσιτα και τις ασθένειες. Η αεροβιολογία είναι ο επιστημονικός κλάδος που ασχολείται με τη μεταφορά των οργανισμών και άλλων βιολογικά σημαντικών υλικών μέσα από την ατμόσφαιρα (Isard & Gage, 2001). Η αεροβιολογία περιλαμβάνει επίσης την παραγωγή, την πρόσληψη, τη μετατόπιση, τη διασπορά, τη βιωσιμότητα, την απόθεση και τη μόλυνση/προσβολή από σπόρους, ιούς, μύκητες, βακτήρια και άλλους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων των εντόμων, όπως οι αφίδες και τα κουνούπια, τα οποία δρουν ως φορείς του ιού. Τέλος, η αεροβιολογία ασχολείται με σημαντικά αγροτικά έντομα, όπως είναι οι ακρίδες, τα διάφορα είδη μύγας και σκουληκιού.



Σχήμα 5.3. *Σχέση μεταξύ της απόλυτης (-) και σχετικής υγρασίας (- -), συναρτήσει της θερμοκρασίας και του σημείου δρόσου.*

Οποιαδήποτε κίνηση ζώντων οργανισμών, σωματιδίων ή αερίων στην ατμόσφαιρα που μπορεί να έχει αρνητικές επιπτώσεις στη χλωρίδα ή της πανίδα θα πρέπει να απασχολεί την αγρομετεωρολογία. Σωματίδια μικρότερα από 0,1 μm σε μέγεθος, τα οποία περιλαμβάνουν και τους ιούς, αιωρούνται μόνιμα στην ατμόσφαιρα και υπόκεινται στην κίνηση Brown. Το μέγεθος των σημαντικότερων νοσογόνων οργανισμών που επηρεάζουν τη γεωργία κυμαίνεται από 0,1 έως 100 μm. Αυτά τα αερομεταφερόμενα σωματίδια είναι σε μεταβατική κατάσταση, το καθένα με μια συγκεκριμένη ταχύτητα πτώσης. Σωματίδια άνω των 100 μm δεν μπορούν να διατηρηθούν στην ατμόσφαιρα για σημαντικό χρονικό διάστημα, λόγω των ισχυρών ανέμων, εκτός και αν πρόκειται για έντομα, πουλιά και νυχτερίδες. Στην αεροβιολογία υπάρχει ανησυχία και ενδιαφέρον για τις αλλεργίες και μπορεί να γίνει πρόδρομη εκτίμηση και προειδοποίηση για επεισόδια γύρης, που ενδέχεται να προκαλέσουν αλλεργίες, επιτρέποντας έτσι την έγκαιρη πρόληψη μέσω φαρμακευτικής αγωγής. Μια κοινή διαδικασία, που υιοθετήθηκε από την αγρομετεωρολογική κοινότητα, είναι η χρήση εποχικών μετεωρολογικών δεικτών για το τελευταίο στάδιο, δηλαδή το στάδιο της λοίμωξης, αντί να προχωρήσει από την πρώτη φάση, δηλαδή την παραγωγή.

Ένας δείκτης, όπως οι βαθμοημέρες ή οι μονάδες θερμότητας, χρησιμοποιείται μερικές φορές για να δηλωθεί η φάση κατά την οποία θα μπορούσε να προκληθεί μόλυνση, εξαιτίας της παρουσίας ενός κατάλληλου παθογόνου. Σε ειδικές περιπτώσεις, χρησιμοποιείται ένας δείκτης που αποτελεί προϊόν της θερμοκρασίας και της υγρασιακής διάρκειας, για να δηλώσει μια πιθανή περίοδο μόλυνσης (Mills & Laplante, 1951). Τιμές του δείκτη ίσες με 140, 200 και 300, αντίστοιχα, δηλαδή ώρες βαθμοϋγρασίας, αντιστοιχούν περίπου σε ελαφρά, μέτρια και βαριά προσβολή από ψώρα, σε μήλα ή αχλάδια, με τη βέλτιστη θερμοκρασία να κυμαίνεται από 18° C έως 24° C. Η προσέγγιση αυτή μπορεί επίσης να εφαρμοστεί στην καστανή σήψη της ροδακινιάς και στη λοίμωξη του γρασιδιού από μύκητες, που προκαλεί έκζεμα σε πρόβατα. Για άλλες νόσους, χρησιμοποιούνται διάφοροι συνδυασμοί μετεωρολογικών στοιχείων.

Αεροβιολογικές τεχνικές έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε ορισμένες περιοχές. Αυτές περιλαμβάνουν πρακτικές όπως η παρακολούθηση της εξάπλωσης του αφθώδους πυρετού (Moutou & Durand, 1994), των ακρίδων και των μυγών. Η διεπιστημονική προσέγγιση της αεροβιολογίας ενσωματώνει τις ρουτίνες δειγματοληψίας και τις παρατηρήσεις με επιστημονικά όργανα των εντομολόγων, των φυτοπαθολόγων και βιολόγων, σε συνδυασμό με στοιχεία για τον καιρό σε πραγματικό χρόνο ή μετεωρολογικά κλιματικά δεδομένα, για χρήση σε μοντέλα που έχουν σχεδιαστεί ειδικά για την προσομοίωση ορισμένων λοιμώξεων, ασθενειών ή εντόμων. Επιπλέον, οι αεροβιολογικές τεχνικές μπορεί να περιλαμβάνουν την παρακολούθηση και μοντελοποίηση της κίνησης ευεργετικών αερομεταφερόμενων ζώντων οργανισμών και τις επιπτώσεις της κίνησης αυτής στους πληθυσμούς των επιβλαβών οργανισμών.

5.4.1 Δεδομένα και μοντέλα διαθέσιμα για αεροβιολογική χρήση

Τα κλιματικά δεδομένα είναι χρήσιμα στην ανάπτυξη υπολογιστικών μοντέλων για την προσομοίωση εστιών παρασίτων και ασθενειών λοίμωξης. Η εισαγωγή μιας νέας καλλιέργειας και η ευαισθησία της σε ασθένειες ή προσβολές από επιβλαβείς οργανισμούς μπορεί να ελεγχθεί με μοντέλα προσομοίωσης (Waggoner & Horsfall, 1969). Τα δελτία καιρού σε πραγματικό χρόνο είναι ζωτικής σημασίας στη διάρκεια μιας επιχειρησιακής έρευνας. Στοιχεία ανέμου σε όλα τα ύψη είναι αρκετά σημαντικά. Απότομες μεταβολές και ριπές του ανέμου στην επιφάνεια των φυτών μπορεί να ενισχύσουν την απελευθέρωση των σπορίων, την πρόσληψη, τη διασπορά και την απόθεση. Ο Tromp (1980) ανέφερε μεταφορά σπορίων κίτρινης σκωρίασης από τον άνεμο σε μεγάλες αποστάσεις, πάνω από 1.000 km. Η χρονική κατανομή της διεύθυνσης του ανέμου σε συγκεκριμένες θέσεις μπορεί να παρέχει πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση της ατμόσφαιρας. Αν R είναι το εύρος των ακραίων τιμών διεύθυνσης του ανέμου σε μια δεδομένη περίοδο, τότε R/6 είναι μια καλή προσέγγιση της τυπικής απόκλισης της διεύθυνσης του ανέμου. Τιμές της τυπικής απόκλισης της διεύθυνσης του ανέμου ίσες με 2,5 , 10 και 25 μοίρες αντιπροσωπεύουν πολύ σταθερές, ουδέτερες και ασταθείς ατμοσφαιρικές συνθήκες, αντίστοιχα. Ένα εναλλακτικό σύστημα για την εκτίμηση της κατάστασης της ατμόσφαιρας παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.9.

Ταχύτητα επιφανειακού ανέμου στα 10 m (ms^{-1})	Ημέρα			Νύχτα	
	Εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία			Αραιή συννεφιά	
	Έντονη	Μέση	Μικρή	> = 4/8 χαμηλά σύννεφα	< 3/8 συννεφιά
<2	A	A-B	B		
2-3	A-B		C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

Σημείωση: A, B, C, D είναι δείκτες ευστάθειας. Η ουδέτερη κατηγορία, D, θα πρέπει να υιοθετείται για συνθήκες ολικής νέφωσης την ημέρα ή τη νύχτα.

Πίνακας 5.9. *Κατηγορίες ατμοσφαιρικής ευστάθειας.*

Οι αναλύσεις του αέρα με τη χρήση σταθερού υψομέτρου, ισοθερμικών, ισεντροπικών ή ισοβαρικών επιφανειών ή το τρισδιάστατο μοντέλο sigma μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την απόκτηση τροχιών στα υψηλότερα γεωγραφικά πλάτη, ενώ στις αναλύσεις τροπικών γραμμών ροής προτιμώνται οι ισοϋψείς πίεσης-ύψους. Η θερμοκρασία είναι ένα πολύ σημαντικό στοιχείο για τη γεωργία. Οι δείκτες βαθμοημέρας μπορούν να χρησιμοποιηθούν προκειμένου να αναδείξουν τις κρίσιμες φάσεις για τα παράσιτα και τις ασθένειες, επιτρέποντας έτσι την έγκαιρη εφαρμογή καλλιεργητικών ή χημικών επεμβάσεων. Ο ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας υποδεικνύει την κατάσταση της ατμόσφαιρας, αλλά χρησιμοποιείται επίσης για να εκτιμηθεί το ύψος ανάμειξης ή το ύψος στο οποίο όλα τα σωματίδια και τα αέρια διασπείρονται στη διάρκεια της ημέρας. Οι υψηλές θερμοκρασίες της επιφάνειας μπορεί να προκαλέσουν την απελευθέρωση των σπορίων και των σπόρων, ενώ μπορεί να περιορίσουν τη δραστηριότητα των μυκήτων.

Το νερό της βροχής, συμπεριλαμβανομένης της δρόσου, της πάχνης και της ομίχλης, είναι ένας σημαντικός παράγοντας για την εξάπλωση των ασθενειών. Συνεπώς, οι μικροκλιματικές συνθήκες υγρασίας πρέπει να

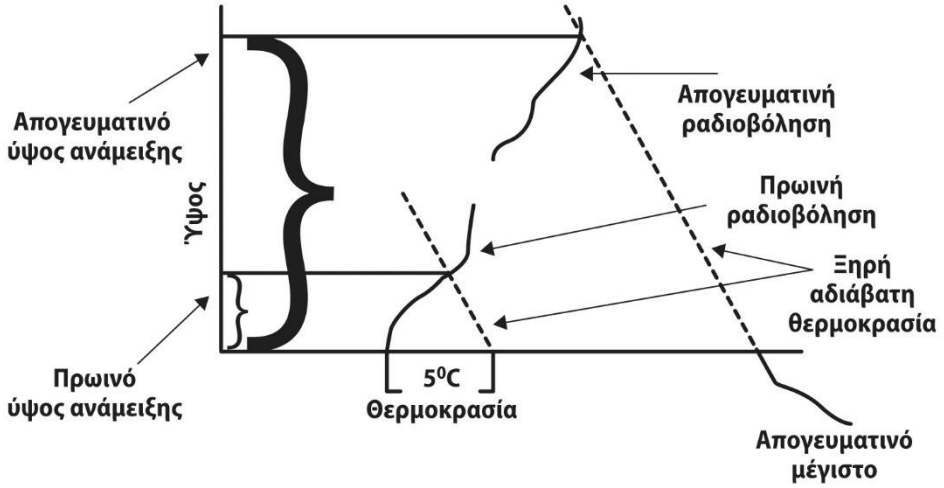
παρακολουθούνται συστηματικά. Η βροχόπτωση προκαλεί τη διαβροχή της βλάστησης, καθώς και την απελευθέρωση των σπόρων από τα φυτά. Στη διάρκεια βροχόπτωσης, τα αερομεταφερόμενα σωματίδια μπορούν να εκπλυθούν σχεδόν όλα. Τα σπόρια που παρασύρονται από τη βροχή μπορεί να είναι ένας σημαντικός παράγοντας για την έναρξη μιας ασθένειας (Rowell & Romig, 1966).
Η ακτινοβολία, τόσο η ορατή (380-780 nm), όσο και η υπεριώδης (UV) (190-380 nm), μπορεί να έχει επιδημιολογική σημασία. Ενώ οι μικρές δόσεις υπεριώδους ακτινοβολίας ενισχύουν τη βλαστικότητα, οι μεγάλες δόσεις ελαχιστοποιούν τη μολυσματικότητα. Σύμφωνα με τον Aylor (1986), τα συνδυασμένα αποτελέσματα της θερμοκρασίας, της σχετικής υγρασίας και της υπεριώδους ακτινοβολίας που βρίσκεται στο επάνω μέρος του στρώματος ανάμειξης μπορούν να είναι ιδιαίτερα θανατηφόρα για τα σπόρια. Η υπεριώδης ακτινοβολία σε μήκη κύματος άνω των 290 nm φτάνει στο έδαφος με επαρκή ένταση τις ηλιόλουστες μέρες του καλοκαιριού, για να σκοτώσει τα ευαίσθητα σπόρια σε λίγες μόνο ώρες (Bashi & Aylor, 1983). Η ευαισθησία των σπορίων στην υπεριώδη ακτινοβολία ενισχύεται όταν τα σπόρια είναι υγρά (Rotem et al., 1985) ή όταν διατηρούνται σε υψηλή σχετική υγρασία. Αυτό το αποτέλεσμα μπορεί να είναι εντονότερο στις χαμηλότερες θερμοκρασίες κοντά στην κορυφή του στρώματος ανάμειξης, λόγω της λιγότερο αποτελεσματικής διόρθωσης του DNA τους, με φωτοεπανενεργοποίηση (Maddison & Manners, 1973).

5.4.1.1. Δεδομένα τηλεπισκόπησης

Τα radar μπορούν να καταγράψουν τις βροχοπτώσεις, την έκπλυση των ζώντων οργανισμών από βροχοπτώσεις, καθώς και την εναέρια κυκλοφορία πολλών παρασίτων και ωφέλιμων οργανισμών. Επιπλέον, τα radar Doppler μπορούν να μετρήσουν την ταχύτητα και την κατεύθυνση μετατόπισης της ροής του αέρα και, κατά συνέπεια, την κίνηση των αερομεταφερόμενων ζώντων οργανισμών (Westbrook & Eyster, 2003). Οι δορυφορικές εικόνες μπορούν να παρέχουν πεδία και πρότυπα νεφών και βροχοπτώσεων, μαζί με κάθετη τομή της θερμοκρασίας και της υγρασίας, τα οποία είναι χρήσιμα στην ανάλυση των διαγραμμάτων και τη δημιουργία των τροχιών. Οι θερμοκρασίες στην κορυφή των νεφών συσχετίζονται με την πιθανότητα βροχόπτωσης. Οι δείκτες βλάστησης που παράγονται με τη χρήση δορυφορικών εικόνων, όπως ο Δείκτης Βλάστησης Κανονικοποιημένης Διαφοράς (NDVI: Normalized Difference Vegetation Index), μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό της βλάστησης, που θα μπορούσε να φιλοξενήσει παράσιτα και ασθένειες, επιτρέποντας έτσι την εφαρμογή προληπτικών δράσεων, όπως ψεκασμούς ή καλλιεργητικές πρακτικές, μετά από επιτόπιο έλεγχο. Επιπλέον, υπάρχει έντονη επιστημονική δραστηριότητα για τη χρήση αεροφωτογραφιών βλάστησης, ώστε να δημιουργηθούν χάρτες για την ακρίβεια εφαρμογής των φυτοφαρμάκων.

5.4.1.2. Κατακόρυφη ανάμειξη και μοντέλα διασποράς

Πολλά προβλήματα της διασποράς εξαρτώνται από το ύψος ανάμειξης, δηλαδή το ατμοσφαιρικό στρώμα στο οποίο το μεγαλύτερο μέρος του υλικού διανέμεται. Εάν το ύψος ανάμειξης είναι χαμηλό, τότε τα υλικά συγκεντρώνονται σε έναν σχετικά μικρό όγκο, και το αντίστροφο. Μια αερολογική ραδιοβόληση (aerological sounding) μπορεί να αναλυθεί, για να καθορίσει το επίπεδο ανάμειξης. Η ξηρή αδιαβατική θερμοβαθμίδα (–9,8° C km^{-1}) ακολουθείται από την επιφανειακή θερμοκρασία και πίεση, έως ότου διασταυρωθεί με την περιβαλλοντική θερμοβαθμίδα, και το σημείο τομής καθορίζει το ύψος ανάμειξης. Αν υπάρχει ένα αγροτικό ίχνος σε κατοικημένη περιοχή, προστίθενται 5° C στην πρωινή θερμοκρασία, ώστε να επιτραπεί η επίδραση της θερμικής νησίδας (heat island) (Σχήμα 5.4). Το προϊόν του ύψους ανάμειξης και της μέσης ταχύτητας του ανέμου είναι ένα μέτρο του ρυθμού αερισμού.
Με τη χρήση εξισώσεων κανονικής κατανομής (Gaussian), μπορούν να ληφθούν προκαθορισμένα αποτελέσματα, για δεδομένη ταχύτητα ανέμου και ατμοσφαιρική αστάθεια σε ένα σημείο, γραμμή ή περιοχή μιας πηγής από το επίπεδο του εδάφους ή από ένα συγκεκριμένο ύψος. Υπολογιστικά μοντέλα που περιλαμβάνουν διάφορες μορφές εξισώσεων κανονικής κατανομής είναι διαθέσιμα, όπως των Slade (1968), Turner (1967), Pasquill (1962) και Sutton (1953). Τα πρόσθετα στοιχεία που απαιτούνται για τη χρήση αυτών των εξισώσεων είναι οι τυπικές αποκλίσεις S_y και S_z, δηλαδή οι οριζόντιοι και κάθετοι συντελεστές διασποράς, αντίστοιχα. Το ύψος ανάμειξης φτάνει συνήθως σε ένα μέγιστο στη διάρκεια του απογεύματος και ένα ελάχιστο στις πρώτες πρωινές ώρες.



Σχήμα 5.4. *Προσδιορισμός του ύψους ανάμειξης από ραδιοβόλιση.*

Το διαδικτυακό σύστημα Real-time Environmental Applications and Display sYstem (READY) επιτρέπει στους χρήστες να έχουν πρόσβαση σε μετεωρολογικά δεδομένα και ατμοσφαιρικές τροχιές και μοντέλα διασποράς (http://www.arl.noaa.gov/ready.php). Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μοντελοποίηση της μεταφοράς του αιωρούμενου υλικού, συμπεριλαμβανομένων των σπορίων, των εντόμων και των ατμοσφαιρικών ρύπων. Επιτρέπει στους χρήστες να έχουν πρόσβαση σε αρχειοθετημένα μετεωρολογικά δεδομένα και να εκτελούν το μοντέλο Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT), για τη δημιουργία εξατομικευμένων γεωαναφερμένων χαρτών των ατμοσφαιρικών τροχιών και των συγκεντρώσεων διασποράς. Η χρήση του READY ή παρόμοιων συστημάτων, που ενσωματώνουν πρόσβαση σε βάσεις δεδομένων και λογισμικό προσομοίωσης, θα ενισχύσει τις δυνατότητες της αεροβιολογίας, καθώς θα μειώσει δραστικά το φόρτο από την επεξεργασία των δεδομένων, ενώ θα παράσχει αποτελεσματικά και ακριβή αναλυτικά αποτελέσματα. Υπάρχει επιτακτική ανάγκη για περισσότερα μοντέλα προσομοίωσης όσον αφορά τις σημαντικές ασθένειες και τα παράσιτα, που προκαλούν επιδημίες. Μοντέλα όπως τα SIRATAC (Hearn και Brook, 1983· Ives et al., 1984) και BLITECAST (Krause et al., 1975) και το σύστημα EPIPRE (Djurle & Jonsson, 1985) είναι καλά πρότυπα.

5.4.2 Κλίμακες των αεροβιολογικών προβλημάτων

Οι επιστήμονες πρέπει να καθορίσουν τις χρονικές και χωρικές κλίμακες που έχουν σχέση με τα αεροβιολογικά προβλήματα. Για παράδειγμα, ο Gage και άλλοι (1999) ασχολήθηκαν με θέματα οικολογικής κλίμακας, που είναι σημαντική για τη βλαστική ανάπτυξη και τις αεροβιολογικές διαδικασίες σε μια περιοχή. Τα πρότυπα ανάπτυξης των φυτών διαχρονικά, αλλά και ετησίως αποτελούν το θεμέλιο για την ατμοσφαιρική μεταφορά της γύρης, των σπορίων και άλλων οργανισμών, που σχετίζονται με την υγεία των φυτών. Η κατάλληλη μετεωρολογική κλίμακα για συγκεκριμένα αεροβιολογικά συστήματα συνοψίζεται από τους Westbrook και Isard (1999). Ωστόσο, η αεροβιολογική διασπορά παραμένει ελλιπώς ενσωματωμένη σε ολοκληρωμένα συστήματα διαχείρισης επιβλαβών οργανισμών (Jeger, 1999).

5.4.2.1. Μεταφορά στη μικροκλίμακα

Μια συστημική προσέγγιση, που ενσωματώνει βιολογικές, χημικές και καλλιεργητικές πρακτικές, όσον αφορά το οικοσύστημα που περιέχει τον ξενιστή, την καλλιέργεια, τα παράσιτα και τις ασθένειες, είναι κατάλληλη για αυτό το είδος της μεταφοράς. Οι Getz και Gutierrez (1982) έχουν κάνει μια ανασκόπηση των μοντέλων-παρασίτων σε αυτή την κλίμακα και τα έχουν ταξινομήσει μέσω προσομοίωσης, ως προσεγγίσεις τόσο αναλυτικές, όσο και επιχειρησιακής έρευνας. Σε μια μελέτη μοντελοποίησης των κρουσμάτων επιβλαβών οργανισμών (WMO, 1989) επισημαίνεται ότι μπορεί να μην υπάρχει σημαντική μετεωρολογική συνιστώσα όταν η δυναμική των παρασίτων εξαρτάται από συγκεκριμένες συνθήκες πεδίου, όπως η καλλιέργεια ρυζιού. Ένα παράδειγμα συστήματος διαχείρισης επιβλαβών οργανισμών που δεν χρησιμοποιεί τις καιρικές συνθήκες

είναι το SIRATAC (Hearn & Brook, 1983· Ives et al., 1984), το οποίο χρησιμοποιείται για τον έλεγχο του σκώληκα του καπνού (tobacco cluster grub). Αυτό το παράσιτο σχεδόν αφάνισε τις αρδευόμενες καλλιέργειες βαμβακιού στις θερμές περιοχές της Αυστραλίας.
Μπορούν να βρεθούν αρκετά παραδείγματα στα οποία η αεροβιολογία είναι χρήσιμη σε αυτή την κλίμακα. Μια ομάδα που ασχολείται με τις ανθρώπινες ασθένειες και τις αλλεργίες (Edmonds & Benninghoff, 1973) διερεύνησε τη διασπορά των φυκιών στην υπήνεμη πλευρά μιας ευτροφικής λίμνης. Αυτές οι τιμές χρησιμοποιήθηκαν σε μια εξίσωση κανονικής κατανομής (Turner, 1967), για να ληφθούν οι προβλεπόμενες ισοπληθείς συγκεντρώσεις φυκιών 1 m πάνω από την επιφάνεια, κατάντη από την πηγή, σε ένα πλέγμα 1.000 m x 400 m. Ένα άλλο πρόβλημα που αντιμετωπίζεται με παρόμοιο τρόπο είναι αυτό της εναέριας διασποράς των προνυμφών ενός πολυφάγου των οπωροφόρων (Porthetria dispar L.), που προκαλεί σοβαρή φυλλόπτωση στις συκιές και τα οπωροφόρα δέντρα στις βορειοανατολικές Ηνωμένες Πολιτείες. Ένα πρότυπο διασποράς για ύψος πηγής απελευθέρωσης στα 20 m και ύψος δειγματοληψίας στο 1 m πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, όπου, αν και οι συγκεντρώσεις είναι εξαιρετικά μικρές, το πρότυπο χρησιμοποιήθηκε για να εκτιμηθεί το δυναμικό αποφύλλωσης. Χρησιμοποιώντας παρόμοιες τεχνικές, η συγκέντρωση ψεκασμού από ένα αεροσκάφος ή από το έδαφος μπορεί να εκτιμηθεί με τη χρήση των κατάλληλων τιμών ευστάθειας και ταχύτητας πτώσης των σταγόνων. Η λύση που χρησιμοποιήθηκε για το Porthetria dispar L. θα μπορούσε επίσης να εφαρμοστεί για την αντιμετώπιση του βακτηριακού καψίματος, ασθένειας που επηρεάζει τα αχλάδια και μήλα.

5.4.2.2. Μεταφορές μεσοκλίμακας

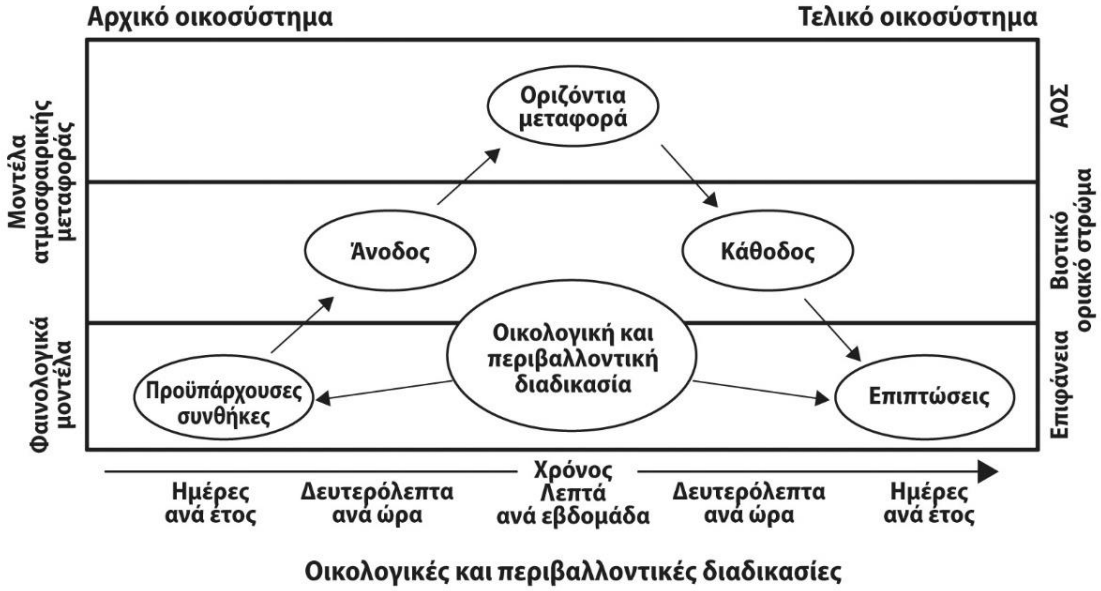
Ένα πλαίσιο για τη διερεύνηση της διαπεριφερειακής μεταφοράς των σπορίων έχει προταθεί από τον Aylor (1986), ο οποίος προσπάθησε να μετρήσει την επίδραση σε μια υποθετική καλλιέργεια καπνού της Νέας Αγγλίας (Ηνωμένες Πολιτείες) μιας πηγής 500 εκταρίων καπνού που μολύνθηκε με περονόσπορο.

5.4.2.3. Μεταφορές μακροκλίμακας

Για πολύ μεγάλης ή πλανητικής κλίμακας μεταφορές σε μεγάλο υψόμετρο, έστω στα 6-12 km, όπου η ροή του αέρα τείνει προς απλά δαιδαλώδη πρότυπα, τα μήκη κύματος είναι της τάξης της ηπειρωτικής κλίμακας και οι ταχύτητες ανέμου μπορεί να ποικίλουν από 150 km/hr σε πάνω από 200 km/hr. Οι ροές ανέμου σε αυτά τα ανώτερα επίπεδα έχουν μελετηθεί χρησιμοποιώντας το Global Horizontal Sounding Technique (GHOST) πρόγραμμα με μπαλόνια υπερπίεσης (Lally & Lichfield, 1969). Οι μεταφορές μακροκλίμακας μπορεί να είναι πολύ σημαντικές. Τα μπαλόνια υπερπίεσης είναι σχεδιασμένα ώστε να ανεβαίνουν σε ένα επιλεγμένο ισεντροπικό επίπεδο και να παραμένουν σε αυτό. Ένα μπαλόνι στο ισοβαρικό επίπεδο των 20 kPa διέγραψε τροχιές ανά τον κόσμο για 102 ημέρες, ενώ διέγραψε δέκα κυκλικές περιφορές. Όσον αφορά τη μέση διάρκεια ζωής των εν λόγω μπαλονιών, ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι είναι παρόμοια με εκείνα των μικρών σωματιδίων, παρά την πολύ μεγάλη διαφορά στο μέγεθος. Ο κύκλος ζωής στα 50 kPa (περίπου 5,48 km) είναι περίπου 7 έως 10 ημέρες, ενώ στα 10 kPa (16,76 km), η διάρκεια ζωής κυμαίνεται από 1 έως 1,5 μήνα. Η ηφαιστειακή σκόνη εμφανίζεται ψηλά στην ατμόσφαιρα και διασπείρεται σε όλο τον κόσμο, με έναν τρόπο παρόμοιο με εκείνο του μπαλονιού υπερπίεσης. Ένα ακραίο μέγεθος της ηφαιστειακής σκόνης, έστω πέντε ή έξι μεγάλες εκρήξεις ανά έτος για δύο ή τρία χρόνια, αναμένεται να σχηματίσει ένα πέπλο σκόνης πάνω από τον κόσμο, που θα φιλτράρει την παγκόσμια ακτινοβολία σε τέτοιο βαθμό ώστε θα μπορούσε να προκαλέσει σημαντική ψύξη.

5.4.3 Παραδείγματα αεροβιολογικών μοντέλων για τη μεταφορά σπορίων

Ο Isard και άλλοι (2005) υιοθέτησαν το γενικό μοντέλο αεροβιολογικών διαδικασιών (Σχήμα 5.5), που προσδιορίστηκε από τον Edmonds (1979) και συνέλαβε ένα συγκεκριμένο μοντέλο αεροβιολογικών διαδικασιών για τη σκωρίαση της σόγιας (Phakopsora pachyrhizi). Το σύστημα Soybean Rust Aerobiology Prediction System (SRAPS) είναι ένα αεροβιολογικό μοντέλο για τη σκωρίαση της σόγιας, που αναπτύχθηκε με τη χρήση του Integrated Aerobiology Modeling System (IAMS). Το μοντέλο IAMS ενσωματώνει διεπιστημονικές πηγές δεδομένων, βιολογικών και ατμοσφαιρικών μοντέλων και υπολογιστική ανάλυση, προκειμένου να προετοιμάσει συμβουλές διαχείρισης επιβλαβών οργανισμών για τους επιστήμονες και άλλους χρήστες σε ηπειρωτική και διηπειρωτική κλίμακα. Οι πέντε αεροβιολογικές συνιστώσες που χρησιμοποιούνται από τον Aylor (1986) σε ένα μοντέλο μεταφοράς σπορίων περιγράφονται παρακάτω.



Σχήμα 5.5. *Γενικό διάγραμμα της αεροβιολογικής διαδικασίας*.

5.4.3.1. Παραγωγή (P) σπορίων

Για ένα δεδομένο επίπεδο ασθένειας, η παραγωγή σπορίων, P, ανά εκτάριο πηγής δίνει το αποτέλεσμα: σπόρια/ανά αλλοίωση/ανά ημέρα = 2 x 10^4, οι αλλοιώσεις ανά cm^{-2} του δείκτη φυλλικής επιφάνειας = 2,8 και, τέλος, ένας συντελεστής μετατροπής σε εκτάρια ίσος με 10^8. Για 500 εκτάρια, η συνολική παραγωγή σπορίων είναι P = 6,44 x 10^{13} σπόρια/ανά ημέρα. Εκτιμήσεις όπως αυτές μπορούν να ληφθούν από την άμεση έρευνα ή από την προσομοίωση της νόσου (Waggoner & Horsfall, 1969·Waggoner et al., 1972).

5.4.3.2. Διαφυγή (E) των σπορίων από την κώμη

Ο συντελεστής διαφυγής E εξαρτάται σημαντικά από την κώμη και την κατακόρυφη κατανομή της απελευθέρωσης των σπορίων στην κώμη. Εξαρτάται, επίσης, σε ένα σημαντικό, αλλά μικρότερο, βαθμό από την ακριβή λειτουργική μορφή που χρησιμοποιείται για να περιγράψει την ταχύτητα του ανέμου και την τυρβώδη διάχυση στη φυτική κώμη. Αν και η θεωρία της τυρβώδους διάχυσης δίνει εκτιμήσεις που φαίνονται λογικές, ωστόσο δεν ισχύουν όταν ριπές του ανέμου εισχωρούν από πάνω προς τα κάτω στην κώμη, όπου τοπικές πηγές προκαλούν τη γρήγορη μεταβολή της εναέριας συγκέντρωσης σπορίων με το ύψος. Υπάρχει μια ημερήσια διακύμανση στην αποδέσμευση των σπορίων, που οφείλεται εν μέρει στην ωριμότητα των σπορίων και εν μέρει στην ημερήσια διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας, της ταχύτητας του ανέμου, των αναταράξεων και της σχετικής υγρασίας. Ο χρόνος της μέγιστης απελευθέρωσης των σπορίων συσχετίζεται με το χρόνο στον οποίο η σχετική υγρασία του περιβάλλοντος πέφτει κάτω από περίπου 70%.

5.4.3.3. Η τυρβώδης μεταφορά (T) και η αραίωση

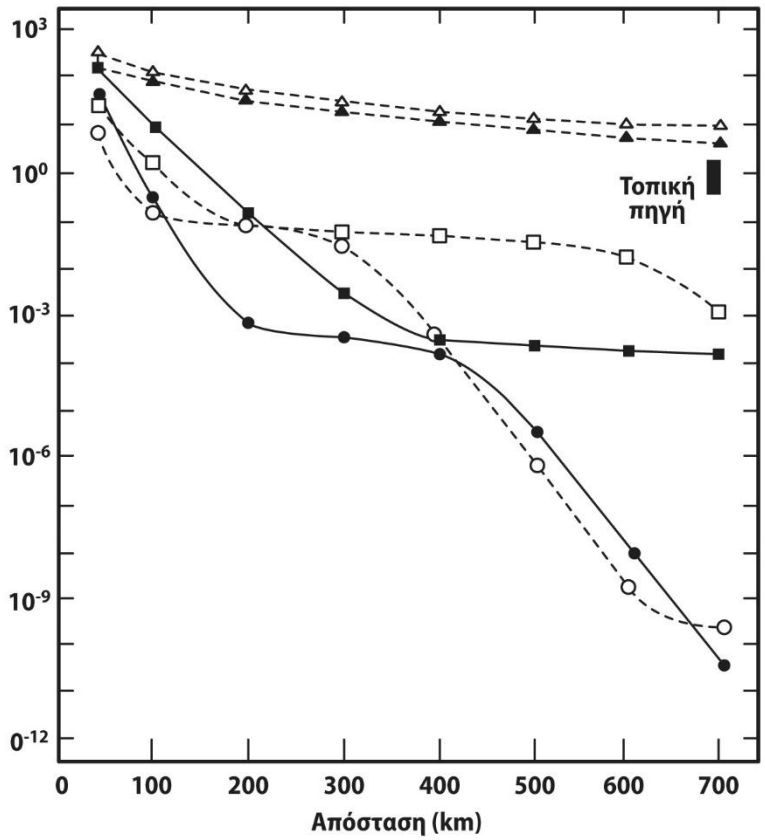
Η μεθοδολογία του Aylor (1986) προορίζεται να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της πιθανότητας επιτυχούς μεταφοράς σπορίων και όχι κατ' ανάγκη να αποδείξει ότι μια συγκεκριμένη μεταφορά ήταν υπεύθυνη για την έναρξη μιας επιδημίας. Ένας συνδυασμός του μοντέλου σπορίων μεταφοράς με μια τροχιά αέριων μαζών μεταξύ πηγής και δέκτη υποστηρίχθηκε ότι αναπτύσσει μια κλιματολογία εξάπλωσης της νόσου. Η έκταση του κατακόρυφου συντελεστή διασποράς, S_z, περιορίζεται από το ύψος ανάμειξης, H, το οποίο με τη σειρά του συχνά περιορίζεται από μια αναστροφή της θερμοκρασίας. Στη συνέχεια, η συγκέντρωση γίνεται περίπου ομοιόμορφη με το ύψος και η επακόλουθη εξάπλωση είναι, σε μεγάλο βαθμό, δύο διαστάσεων. Η αραίωση των σπορίων στον αέρα από τη διάτμηση του ανέμου, η τυρβώδης διάχυση, η εναπόθεση στο έδαφος και η απώλεια της βιωσιμότητας των σπορίων αυξάνονται με το χρόνο ταξιδιού μεταξύ πηγής και δέκτη.

Ο Turner (1967) και ο Heffter (1980) θεωρούν ίσες τις τυπικές αποκλίσεις S_x και S_Y στις δύο οριζόντιες διαστάσεις. Η αραίωση του νέφους σπορίων που έχει αναπτυχθεί περιορίζεται από το ύψος ανάμειξης και είναι ανάλογη με $1/(S_Y^2 H)$ και στο μέσο S_Y = 0,5 t, κατά τον Heffter (1965), όπου το S_Y δίνεται σε μέτρα και ο

χρόνος ταξιδιού, t, σε δευτερόλεπτα. Ένας αριθμός σπορίων που απελευθερώνεται στιγμιαία από μια πηγή θα πρέπει να αραιωθεί σε έναν όγκο περίπου ίσο με HS_Y^2. Έτσι, για H = 3000 m και χρόνο t = 30 h, ο αριθμός σπορίων πρέπει να αραιωθεί κατά έναν παράγοντα περίπου ίσο με 10^{13}. Αυτή η αραίωση είναι συγκρίσιμη με την παραγωγή σπορίων, P. Ως εκ τούτου, η επιβίωση των σπορίων γίνεται ιδιαίτερα σημαντική για τον καθορισμό της πιθανότητας επιτυχίας της μεταφοράς σε μεγάλη απόσταση. Στην περίπτωση της ξηρής εναπόθεσης, ο αριθμός των σπορίων που απομένουν αερομεταφερόμενα είναι περίπου το ένα δέκατο του αρχικού αριθμού και, συνεπώς, η ξηρή εναπόθεση είναι ασήμαντη σε σύγκριση με τον παράγοντα αραίωσης 10^{13}. Η μεταφορά πρέπει να είναι συνάρτηση του χρόνου της ημέρας και να περιγραφεί από ένα ευληριανό (Eulerian) πλαίσιο, σύμφωνα με τον Eliassen (1980), το οποίο επιτρέπει την αντιμετώπιση με μεγαλύτερη ακρίβεια μιας αλλαγής στο ύψος ανάμειξης από ό,τι το επιλεγμένο Lagrangian πλαίσιο αναφοράς.

5.4.3.4. Επιβίωση (S) των σπορίων

Μαζί με τη θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία, η UV συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία είναι η πιο θανατηφόρα, ελέγχει την επιβίωση των σπορίων στην ατμόσφαιρα. Τα περισσότερα σπόρια, τα οποία θα μεταφέρονταν μέσω της ατμόσφαιρας και με εναπόθεση μέσα σε μερικές εκατοντάδες χιλιόμετρα από την πηγή, παραμένουν με το μεικτό στρώμα της ατμόσφαιρας (Clarke et al., 1983) και φθάνουν σε υψόμετρα από 1 έως 3 km. Αν και αυτά τα σπόρια δεν αντιμετωπίζουν συνήθως θερμοκρασίες ή σχετικές υγρασίες που μπορεί να είναι θανατηφόρες, ο συνδυασμός της θερμοκρασίας, της σχετικής υγρασίας και της υπεριώδους ακτινοβολίας, που εμφανίζεται στην κορυφή του στρώματος ανάμειξης, μπορεί να αποβεί μοιραίος για τα σπόρια αυτά.



Σχήμα 5.6. *Υπολογιζόμενη μεταφορά σποριαγγείων.*

Στο Σχήμα 5.6 απεικονίζεται η μεταφορά, DT (σπόρια m^{-2}), των σποραγγείων στο έδαφος ως προς την απόσταση (km) από 500 εκτάρια προσβεβλημένου καπνού X = 0,1. Επίσης, φαίνεται (συνεχής γραμμή στα 700 km) το DT. Οι δύο ανώτερες καμπύλες (τρίγωνα) είναι για τα σπόρια που απελευθερώνονται από την πηγή στις 10:00 π.μ. και ταξιδεύουν με ταχύτητα U (μαύρα τρίγωνα, 20 kmh^{-1}, άσπρα τρίγωνα, 40 kmh^{-1}), υπό συνθήκες συννεφιάς. Οι δύο συμπαγείς γραμμές, που σημειώνονται με συμπαγείς κύκλους και συμπαγή τετράγωνα, είναι για σπόρια που απελευθερώνονται από την πηγή στις 10:00 π.μ. και ταξιδεύουν με ταχύτητα U (κύκλος, 20 kmh^{-1}, τετράγωνο, 40 kmh^{-1}), στη διάρκεια καθαρού ουρανού. Οι δύο διακεκομμένες γραμμές, που

σημειώνονται με ανοιχτούς κύκλους και ανοιχτά τετράγωνα, είναι για σπόρια που απελευθερώνονται από την πηγή στις 3:00 μ.μ. και ταξιδεύουν με ταχύτητα U (κύκλος, 20 kmh^{-1}, τετράγωνα, 40 kmh^{-1}), στη διάρκεια καθαρού ουρανού (Aylor, 1986).

5.4.3.5. Εναπόθεση (D) των σπόρων στα φυτά

Οι μηχανισμοί απόθεσης μπορεί είτε να περιλαμβάνουν είτε να μην περιλαμβάνουν την εμφάνισης υγρασίας. Το μεγαλύτερο μέρος της υγρής εναπόθεσης εμφανίζεται ως αποτέλεσμα της έκπλυσης από τη βροχή. Η αποτελεσματικότητα των σταγόνων της βροχής να συλλάβουν τα σπόρια εξαρτάται από το μέγεθος των σπορίων και των σταγόνων της βροχής, την ένταση και τη διάρκεια της βροχόπτωσης, καθώς και το βάθος των στρωμάτων βροχόπτωσης και σπορίων. Ο αριθμός των υγρών αποθέσεων είναι πιο κοντά στις ξηρές αποθέσεις από όσο είχε προταθεί με βάση τους σχετικούς ρυθμούς εναπόθεσής τους, επειδή υπάρχουν περισσότερες ξηρές ώρες από ό,τι υγρές ώρες. Τα σπόρια που εναποτίθενται στη διάρκεια βροχόπτωσης είναι πιο πιθανό να ξεκινήσουν μια ασθένεια, γιατί τα φύλλα είναι βρεγμένα και η μόλυνση μπορεί να αρχίσει αμέσως. Η αβεβαιότητα για την εκτίμηση του ρυθμού υγρής εναπόθεσης είναι μεγάλη και είναι δύσκολο να αποδοθεί σε αυτόν το μηχανισμό ένας αντιπροσωπευτικός ρόλος (Smith, 1981). Οι υπολογισμοί με τη χρήση αυτού του μοντέλου έχουν διεξαχθεί με την εξέταση μόνο της ξηρής εναπόθεσης. Μια λύση στο πρόβλημα του συνολικού αριθμού των σπορίων που εναποτίθενται στη διάρκεια ολόκληρου του γεγονότος της μεταφοράς φαίνεται στο Σχήμα 5.6. Το πρόβλημα έχει λυθεί για δύο ταχύτητες ανέμου, 20 kmh^{-1} και 40 kmh^{-1}, και για δύο συνθήκες ουρανού, με ηλιόλουστο ουρανό και με συννεφιά. Τα συνοπτικά μοντέλα μπορούν να σχετίζονται με συγκεκριμένες τροχιές. Έχει αναπτυχθεί ένα συνοπτικό μοντέλο που απαιτεί το πίσω άκρο του ενός αντικυκλώνα να παραμείνει σχεδόν στάσιμο πάνω από την περιοχή για αρκετές ημέρες. Ένα τέτοιο μοντέλο θα πρέπει να υποθέσει τη διαθεσιμότητα μιας μάζας σωματιδίων να μεταφερθεί κάτω από μια αναστροφή καθίζησης και μπορεί να δημιουργήσει μόνο ένα δυνητικό μέσο μεταφοράς.

5.4.3.6. Ιδιαίτερα προβλήματα για ιπτάμενους οργανισμούς

Βιοφυσικοί παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων της κάθετης κατανομής των αερομεταφερόμενων εντόμων, της ταχύτητας πτήσης, της κατεύθυνσης της πτήσης, της πλευρικής απόστασης μεταξύ των οργανισμών στη διάρκεια της πτήσης, θα πρέπει επίσης να ληφθούν υπόψη κατά τη διερεύνηση της κυκλοφορίας των επιβλαβών εντόμων.

Βιβλιογραφικές αναφορές

Ahern, M., Kovats, R.S., Wilkinson, P., Few, R. and Matthies, F. (2005). Global health impact of floods: epidemiological evidence. *Epidemiological Reviews*. 27:36-46.

Aylor, D.E. (1986) A framework for examining interregional aerial transport of fungal spores. *Agric*. *For*. *Meteorol*., 38(4):263-288.

Bashi, E. & Aylor, D.E. (1983). Survival of detached sporangia of *Peronospora destructor* and *Peronospora tabacina*. *Phytopathology*, 73:1135-1139.

Beniston, M. (2009). Trends in joint quantiles of temperature and precipitation in Europe since 1901 and projected for 2100. *Geophysical Research Letters*. 36, L07707.

Clarke, J.F., Clark, T.L., Ching, J.K.S., Haagenson, P.L., Husar, R.B. and Patterson, D.E. (1983). Assessment of model simulation of long-distance transport. *Atmospheric Environment*. 17:2449-2462.

Δαλέζιος, Ν.Ρ., (2010). *Μικρομετεωρολογία-Βιομετεωρολογία*. *Πανεπιστημιακές Παραδόσεις*. Βόλος: Εκδόσεις Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

Djurle, A. & Jonsson, U. (1985). EPIPRE – a computerized pest and disease management system for winter wheat in Sweden. *Vaxtskyddsrapporter Jordbruk*. 32:179-189.

Dent, D. (1993). *Insect Pest Management*. Wallingford, UK: CAB International.

Edmonds, R.L. (Ed.). (1979). *Aerobiology: The Ecological Systems Approach*. Stroudsberg, Dowden, Hutchinson and Ross.

Edmonds, R.L. & Benninghoff, W.S. (Eds.). (1973). Ecological systems approaches to aerobiology. III. Further model development. In *Proceedings of Workshop/Conference III US/IBP*. Aerobiology Program Handbook No. 4. Ann Arbor, University of Michigan.

Eliassen, A. (1980). A review of long-range transport modeling. *Journal of Applied Meteorology*. 19:231-240.

Epstein, Y. & Moran, D.S. (2006). Thermal Comfort and the Heat Stress Indices. *Ind*. *Health*, 44(3), 388-398.

Fiala, D., Lomas, K.J. and Stohrer, M. (2001). Computer prediction of human thermoregulatory and temperature responses to a wide range of environmental conditions. *International Journal of Biometeorology*. 45:143-159.

Gage, S.H., Isard, S.A. and Colunga-Garcia, M. (1999). Ecological scaling of aerobiological dispersal processes. *Agricultural and Forest Meteorology*. 97:249-261.

Gaspar, A. & Quintela, D. (2009). Physical modeling of globe and natural wet bulb temperatures to predict WBGT heat stress index in indoor environments. *International Journal of Biometeorology*, 53:221-230.

Getz, W.M. & Gutierrez, A.P. (1982). A perspective on systems analysis in crop production and insect pest management. *Annual Review of Entomology*. 27:447-466.

Giles, B.D. & Balafoutis, C.J. (1990). The Greek heatwaves of 1987 and 1988. *International Journal of Climatology* 34(2):98-104.

Gordis, L. (2004). *Epidemiology*. 3rd ed. Philadelphia: Elsevier Saunders, 18.

Havenith, G., Fiala, D., Błazejczyk, K., Richards, M., Bröde, P., Holmér, I., Rintamaki, H., Benshabat, Y. and Jendritzky, G. (2012). The UTCI-clothing model. *International Journal of Biometeorology*. 56:461-470.

Hearn, A.B. & Brook, K.D. (1983). SIRATAC: A case study in pest management in cotton. In Blythe, D.E., Foale, M.A., Mungomery, V.E. and Wallis, E.S. (Eds.), *Refresher Training Course Notes on New Technology in Field Crop Production* Brisbane, Queensland Branch: Australian Institute of Agricultural Science.

Heffter, J.L. (1965). The variation of horizontal diffusion parameters with time for travel periods of one hour or longer. *Journal of Applied Meteorology*. 4:153-156.

Houghton, F.C. & Yaglou, C.P. (1923). Determining equal comfort lines. *Journal of the American Society of Heating and Ventilating Engineers*. 29:165-76.

Höppe, P. (1999). The Physiological equivalent temperature in a universal index for the bio-meteorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology*. 43:71-75.

Isard, S.A. & Gage, S.H. (2001) *Flow of Life in the Atmosphere: An Airscape Approach to Understanding Invasive Organisms*. East Lansing, Michigan: State University Press.

Isard, S.A., S.H. Gage, Comtois P. and Russo, J.M. (2005) Principles of the atmospheric pathway for invasive species applied to soybean rust. *BioScience*, 55:851-861.

Ives, P.M., Wilson, L.T., Gull, P.O., Palmer, W.A. and Haywood, C. (1984). Field use of SIRATAC: an Australian computer-based pest management system for cotton. *Protection and Ecology*. 6:1-21.

Jeger, M.J. (1999). Improved understanding of dispersal in crop pest and disease management: current status and future directions. *Agricultural and Forest Meteorology*. 97:331-349.

Jeremijenko, A., McLaws, M. L. and Kosasih, H. (2007). A tsunami related tetanus epidemic in Aceh, Indonesia. *Asia-Pacific Journal of Public Health*, 19:40-44.

Knez, I. & Thorsson, S. (2006). Influences of culture and environmental attitude on thermal, emotional and perceptual evaluations of a public square. *International Journal of Biometeorology*. 50(5):258-268

Krause, R.A., Massie, L.B. and Hyre, R.A. (1975) BLITECAST: a computerized forecast of late potato blight. *Plant Disease Report*. 59:95-98.

Lally, V.E. & Lichfield, E.W. (1969). Summary of status and plans for the GHOST balloon project. *Bulletin of American Meteorology Society*. 50:867-874.

Maddison, A.C. & Manners, J.G. (1973). Lethal effects of artificial ultraviolet radiation on cereal rust uredospores. *Transactions of British Mycological Society*. 60:471-494.

Mayer, H. & Höppe, P. (1987). Thermal comfort of man in different urban environments. *Theoretical and Applied Climatology*. 38:3-49.

Mills, W.D. & Laplante, A.A. (1951). Diseases and insects in the orchard. *NY Agricultural Experiment Station Extension Bulletin*. 53:423-435.

Mills, D.M. (2004). *Final Report for US EPA on Impacts of Climate Change Upon Human Health*. Boulder Co: Stratus Consulting.

Moutou, F. & Durand, B. (1994). Modelling the spread of foot-and-mouth disease virus. *Veterinary Research*, 25:279-285.

Oke, T.R. (1988). *Boundary Layer Climates*. 2nd Edition. New York: Routledge.

Παπαδοπούλου, Γ., Γεωργίου, Ε., Μαμάσης, Ν. και Μιμίκου, Μ. (2010). Εκτίμηση Χωρικής Κατανομής Κλιματικών και Βιοκλιματικών Δεικτών στην Περιοχή της Αττικής με Χρήση Δεδομένων του Δικτύου METEONET. *Τεχνικά Χρονικά.* Επιστημονική Έκδοση ΤΕΕ, τχ. 1.

Pasquill, F. (1962). *Atmospheric Diffusion*. London: D. van Nostrand.
Quayle, R. & Doehring, F. (1981). Heat stress: a comparison of indices. *Weatherwise*, 34(3):120-124.
Rotem, J., Wooding, B. and Aylor, D.E. (1985) The role of solar radiation, especially ultraviolet, in the mortality of fungal spores. *Phytopathol*., 75:510-514.
Rowell, J.B. & Romig, R.W. (1966). Detection of uredospores of wheat rusts in spring rains. *Phytopathology*. 56:807-811.
Slade, D.H. (Ed.). (1968) *Meteorology and Atomic Energy*. TID-24190. Washington, DC: United States Atomic Energy Commission, Division of Technical Information.
Smith, F.B. (1981). Probability prediction of the wet deposition of airborne pollution. In De Wispelaere, C. (Ed.). *Air Pollution Modelling and Its Application*. New York: Plenum Press.
Steadman, R.G. (1979a). The assessment of sultriness, Part I: A temperature-humidity index based on human physiology and clothing science. *Journal of Applied Meteorology*, 18:861-873.
Steadman, R.G. (1979b). The assessment of sultriness, Part II: Effects of wind, extra radiation and barometric pressure on apparent temperature. *Journal of Applied Meteorology*, 18:874-885.
Stolwijk, J.A.J. & Hardy, J.D. (1977). Control of body temperature**.** *In Handbook of Physiology, Section 9, Reactions to environmental agents*. Edited by Douglas HK. Bethesda, MD: Am Physiol Soc., 45-69.
Surmieda, M. R., Lopez, J. M., Abad-Viola, G., Miranda, M. E., Abdllanosa, I. P. and Sadang, R. A. (1992). *Surveillance in evacuation camps after the eruption of Mt Pinatubo, Philippines*. MMWR, 41.
Sutton, O.G. (1953) *Micrometeorology*. New York: McGraw-Hill.
Thom E.C. (1959). The discomfort index. *Weatherwise*. 12:59-60.
Tromp, S.W. (1980). *Biometeorology*. London: Heyden.
Turner, D.B. (1967) *Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates*. Cincinnati: Public Health Service Publication No. 999-AP–26. Robert Taft Sanitary Eng. Center.
Waggoner, P.E. & Horsfall, J.G. (1969) EPIDEM: a simulator of plant disease written for a computer. *Bulletin of Connecticut Agricultural Experiment Station* (New Haven), No. 698.
Waggoner, P.E., Horsfall, J.G. and Lukens, R.J. (1972). EPIMAY: A simulation of southern corn leaf blight. *Bulletin of Connecticut Agricultural Experiment Station* (New Haven), No. 729.
Weihs, P., Staiger, H., Tinz, B., Batchvarova, E., Rieder, H., Vuilleumier, L., Maturilli, G. and Jendritzky, G. (2012). The uncertainty of UTCI due to uncertainties in the determination of radiation fluxes derived from measured and observed meteorological data. *International Journal of Biometeorology*. 56:537-555.
Westbrook, J.K. & Isard, S.A. (1999). Atmospheric scale of motion for dispersing biota. *Agricultural and Forest Meteorology*. 97:263-274.
WHO/WMO/UNEP (1996). *Climate change and human health*. McMichael, A.J., Haines, A., Slooff, R. and Kovats, S. (Eds.). Geneva.
WHO (2009). *Malaria*. Fact Sheet No. 94, Accessed on Jan 2009 from http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs094/en/index.html.
World Meteorological Organization (WHO) (1989). Modelling of pest outbreaks (J.F. Angus). In Krishnamurthy, V. and Mathys, G. (Eds.). *Lectures Presented at the Workshop on Agrometeorological Information for Planning and Operation in Agriculture (with Particular Reference to Plant Protection)*, Calcutta, 22-26 August 1989.
Yaglou, C.P. & Minard, D. (1957). Control of heat casualties at military training centers. *American Medical Association Archives of Industrial Health*. 16:302-316.

ΜΕΡΟΣ 3: ΑΓΡΟΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑ ΓΙΑ ΤΗ ΓΕΩΡΓΙΑ

Κεφάλαιο 6: Αγρομετεωρολογία για τη φυτική παραγωγή
Κεφάλαιο7:Αγρομετεωρολογία για τη χερσαία και υδρόβια ζωική παραγωγή
Κεφάλαιο 8: Αγρομετεωρολογία για εχθρούς και ασθένειες ζώντων οργανισμών

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6
ΑΓΡΟΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑ ΓΙΑ ΤΗ ΦΥΤΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ

Σύνοψη
Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζονται ο ρόλος της αγρομετεωρολογίας στη φυτική παραγωγή και η σχέση διαφόρων παραμέτρων της αγρομετεωρολογίας με τις συνιστώσες και τα χαρακτηριστικά της φυτικής παραγωγής. Αρχικά, παρουσιάζονται οι βασικοί αβιοτικοί παράγοντες, όπως η ηλιακή ακτινοβολία-φως, η θερμοκρασία και το νερό, και τονίζεται η σημασία τους στην ανάπτυξη των καλλιεργειών. Κατόπιν, περιγράφεται η φυσιολογία φυτών και αναλύονται η φαινολογία σε σχέση με την αγρομετεωρολογία και ο ρόλος της στη γεωργική παραγωγή. Ειδικότερα, επεξηγούνται οι φάσεις και ο κύκλος ζωής των φυτών, καθώς και η χρονική ακρίβεια των φάσεων. Ακόμα, επισημαίνονται ο ρόλος και η σημασία των αγρομετεωρολογικών και φαινολογικών παρατηρήσεων στην ανάπτυξη των καλλιεργειών και στη γεωργική παραγωγή. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται τα στοιχεία των αγρομετεωρολογικών παρατηρήσεων και η ταξινόμηση των φαινολογικών παρατηρήσεων, και κατηγοριοποιούνται οι αγρομετεωρολογικές παρατηρήσεις για τη φαινολογία. Τέλος, μελετώνται το πλαίσιο των μετεωρολογικών προγνώσεων για τη γεωργία, όπως επίσης το εύρος και το είδος των αγρομετεωρολογικών προγνώσεων.

Προαπαιτούμενη γνώση
Ο αναγνώστης απαιτείται να έχει βασικές γνώσεις φυσικής και μαθηματικών.

6.1. Αβιοτικοί συντελεστές ανάπτυξης των φυτών

Συντελεστής ανάπτυξης καλείται οποιοσδήποτε φυσικός, χημικός ή βιολογικός συντελεστής που επιδρά με οποιονδήποτε τρόπο στην ανάπτυξη του φυτικού οργανισμού (Δαλέζιος, 2010· Stigter, 2010· Mavi & Tupper, 2004· Monteith, 2000· Oke, 1988). Η επίδραση αυτή μπορεί να αποδειχτεί ωφέλιμη ή όχι στην ανάπτυξη του φυτού. Για την ευδοκίμηση και την ανάπτυξη του φυτού, είναι απαραίτητοι ορισμένοι συντελεστές ανάπτυξης, όπως το φως ή η ηλιακή ακτινοβολία, ο αέρας, η θερμοκρασία, το νερό και τα θρεπτικά συστατικά. Ειδικότερα:

6.1.1. Ηλιακή ακτινοβολία και φως

Γνωρίζουμε ότι η ηλιακή ακτινοβολία είναι πηγή ενέργειας, η οποία διατηρεί την οργανική ζωή στη Γη. Αντίστοιχα, η γεωργική παραγωγή επηρεάζεται σημαντικά από την ηλιακή ακτινοβολία. Τρεις περιοχές φάσματος της ηλιακής ενέργειας είναι σημαντικές για τη ζωή των φυτών: η υπεριώδης, η υπέρυθρη και η ορατή ή φως. Η υπεριώδης βρίσκεται σε μήκος κύματος μικρότερο του ορατού στο ηλιακό φάσμα (Σχήμα 3.2) και είναι χημικά πολύ δραστήρια. Ωστόσο, όταν τα φυτά υπερεκτίθενται σε αυτήν, οι επιπτώσεις είναι αμελητέες, καθόσον η ατμόσφαιρα λειτουργεί ως ρυθμιστής και δεν επιτρέπει την κοσμική, τη γάμα και τις ακτίνες Χ να φτάσουν στη Γη (Evans, 1973). Μόνο ένα πολύ μικρό μέρος της υπεριώδους ακτινοβολίας φτάνει στη Γη, το οποίο είναι ανεκτό από τα φυτά. Η υπέρυθρη βρίσκεται σε μήκος κύματος μεγαλύτερο του ορατού και έχει θερμικές επιπτώσεις στα φυτά. Ειδικότερα, με την παρουσία υδρατμών, η ακτινοβολία δεν είναι επιβλαβής στα φυτά, αλλά συμπληρώνει την απαραίτητη θερμική ενέργεια στο περιβάλλον του φυτού. Η τρίτη βρίσκεται μεταξύ υπεριώδους και υπέρυθρης και είναι το ορατό τμήμα της ηλιακής ακτινοβολίας, που αναφέρεται και ως φως. Παίζει σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη και ανάπτυξη του φυτού, μέσω της φωτοσύνθεσης και της σύνθεσης της χλωροφύλλης, καθώς και φωτοευαίσθητων μηχανισμών ρύθμισης, όπως είναι ο φωτοτροπισμός και η φωτοπεριοδική δραστηριότητα. Στην ουσία, όλα τα μέρη του φυτού επηρεάζονται άμεσα ή έμμεσα από την ακτινοβολία αυτή. Η διάρκεια της ημέρας ή η διάρκεια της φωτοπεριόδου καθορίζει την άνθηση του φυτού. Εάν δεν υπάρχουν άλλοι περιοριστικοί περιβαλλοντικοί παράμετροι, τότε η φωτοσύνθεση αυξάνεται, όσο αυξάνεται η φωτοπερίοδος (Salisbury, 1981).
Η ανάκλαση και η μεταφορά ηλιακής ακτινοβολίας από τα φύλλα παρουσιάζουν παρόμοιες φασματικές κατανομές, δηλαδή τα μέγιστα και των δύο είναι στο πράσινο φως και στην υπέρυθρη περιοχή. Η ισχυρή υπέρυθρη ανάκλαση από τα φυτά αποτελεί σημαντική φυσική προστασία της ζωής των φυτών ενάντια σε ζημιές λόγω υπερθέρμανσης. Κατά μέσον όρο, το φύλλωμα απορροφά περίπου το 75% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, ενώ το 15% ανακλάται και το 10% μεταφέρεται. Η απορρόφηση της χλωροφύλλης από τα φύλλα είναι μέγιστη στις περιοχές του μπλε (0,45 μm) και του κόκκινου (0,65μm), πολύ ασθενής στο κοντινό

υπέρυθρο και ισχυρή στο μακρινό υπέρυθρο. Η πράσινη ουσία του φυτού, δηλαδή η χλωροφύλλη, μετατρέπει, με τη βοήθεια της ηλιακής ακτινοβολίας, την ανόργανη ύλη σε οργανική.
Τρεις παράμετροι της ηλιακής ακτινοβολίας είναι βιολογικά σημαντικές: α)η έντασή της, δηλαδή το ποσό της ενέργειας ακτινοβολίας που πέφτει σε μια μοναδιαία επιφάνεια στη μονάδα του χρόνου, η φασματική κατανομή της και η κατανομής της στο χρόνο, β) η φασματική κατανομή της, που καθορίζει τη φωτοχημική διαδικασία της φωτοσύνθεσης, και γ) η κατανομή της στο χρόνο, που είναι σημαντική για φωτοπεριοδικά φαινόμενα. Στην ουσία, η ένταση και η φασματική κατανομή της ακτινοβολίας μέσα στο φύλλωμα των καλλιεργειών ελέγχουν τη φωτοσυνθετική διαδικασία και το μικροκλίμα του φυτού. Ο ρυθμός φωτοσύνθεσης εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα της φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας (Photosynthetically Active Radiation/PAR), που συγκρατείται από τα φύλλα. Επίσης, ο ρυθμός διαπνοής από το φύλλωμα του φυτού ελέγχεται σε μεγάλο βαθμό από την ενέργεια της ακτινοβολίας. Επιπλέον, η παραγωγή ξηρής ουσίας εξαρτάται από το ποσοστό και την αποτελεσματικότητα της προσπίπτουσας PAR που συγκρατείται. Ειδικότερα, η ποσότητα της ακτινοβολίας που συγκρατείται εξαρτάται από το ποσό το οποίο λαμβάνει το φύλλωμα, το μέγεθος του φυλλώματος, τη διάρκεια και το ποσοστό συγκράτησης. Η εποχική διακύμανση εξαρτάται από την αρχιτεκτονική του φυλλώματος και τη φαινολογία της βλάστησης. Τέλος, η κατανομή της ακτινοβολίας στο φύλλωμα ενός φυτού προσδιορίζεται από διάφορους παράγοντες, όπως είναι η διαπερατότητα του φύλλου, η διάταξη και κλίση του φύλλου, η πυκνότητα και το ύψος του φυτού, καθώς και η γωνία του ήλιου (Courbaud et al., 2003).

6.1.2. Αέρας

Ο ξηρός αέρας περιέχει περίπου 78% άζωτο, 21% οξυγόνο και 0,03% κατ' όγκο διοξείδιο του άνθρακα (CO_2). Το διοξείδιο του άνθρακα είναι η βασική ουσία για την παραγωγή οργανικής μάζας. Η κυριότερη δε πηγή παραγωγής οργανικού οξέος για την αφομοίωση είναι ο ατμοσφαιρικός αέρας. Το μεγαλύτερο ποσό διοξειδίου του άνθρακα αποδίδει το έδαφος, μέσα στο οποίο αποσυντίθενται οργανικές ενώσεις. Έχει αποδειχθεί πειραματικά ότι υπάρχει αύξηση της παραγωγής με την αύξηση της ποσότητας του διοξειδίου του άνθρακα. Το οξυγόνο είναι απαραίτητο για την αναπνοή του φυτού, όχι μόνο αυτό που βρίσκεται πάνω από την επιφάνεια, αλλά και κάτω από αυτήν. Τέλος, το άζωτο του αέρα δε χρησιμοποιείται απευθείας από το φυτό, αλλά μόνο από τις ενώσεις του (αμμωνιακές, νιτρικές), που αποτελούν πολύτιμη τροφή για την ανάπτυξη του φυτικού οργανισμού.

6.1.3. Θερμοκρασία

Για την ανάπτυξη του φυτού, υπάρχει μια ελάχιστη και μια μέγιστη θερμοκρασία, μεταξύ δε αυτών βρίσκεται η βέλτιστη θερμοκρασία, όπου το φυτό παρουσιάζει τη μέγιστη ανάπτυξη. Στον Πίνακα 6.1 δίνονται οι τρεις προαναφερθείσες τιμές θερμοκρασίας για διάφορα φυτά. Η θερμοκρασία θανάτου (ξήρανσης) του αναπτυσσόμενου φυτού κυμαίνεται συνήθως μόνο μερικούς βαθμούς πάνω από τη μέγιστη θερμοκρασίας, μπορεί όμως να είναι και πολύ χαμηλότερη της ελάχιστης θερμοκρασίας ανάπτυξης. Τέλος, η θερμοκρασία έχει μεγάλη επίδραση στην ένταση της αφομοίωσης του διοξειδίου του άνθρακα, αλλά, κατά συνέπεια, και του ποσού της σχηματιζόμενης οργανικής ουσίας, καθώς και της ποιότητας του παραγόμενου προϊόντος.

Φυτό	Ελάχιστη θερμοκρασία	Μέγιστη θερμοκρασία	Βέλτιστη θερμοκρασία
Σιτάρι	3-4,5	30-32	25
Αραβόσιτος	8-10	40-44	32-35
Καπνός	13-14	35	28
Αγγούρι	12	40	35

Πίνακας 6.1. *Θερμοκρασίες ανάπτυξης μερικών φυτών.*

Γνωρίζουμε ότι η ανάπτυξη των φυτών χωρίζεται σε φάσεις, καθεμία από τις οποίες έχει τις απαιτήσεις της. Η ανάπτυξη ενός φυτού είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας. Υπάρχουν θερμοκρασίες για καλύτερη ανάπτυξη και θερμοκρασίες μη ευνοϊκές. Γενικά, είναι αποδεκτό ότι κάτω των 0° C και πάνω των 37° C δεν παρατηρείται ανάπτυξη. Οι άριστες συνθήκες ανάπτυξης είναι μεταξύ 22° και 37° C. Όσον αφορά την αναπνοή του φυτού, αυτή υφίσταται και στους 0° C, αυξάνεται με τη θερμοκρασία, έχει το άριστό της μεταξύ 25° και 30° C, ενώ συνεχίζεται στις υψηλές θερμοκρασίες μέχρι τους 50° C, οπότε καθίσταται μηδέν και το φυτό πεθαίνει. Επομένως, παρατηρούμε ότι και οι δύο λειτουργίες εξαρτώνται από τη θερμοκρασία. Συνεπώς, είναι αυτονόητο

ότι η ημερήσια μεταβολή της θερμοκρασίας έχει σημαντική επίδραση στην ανάπτυξη του φυτού, κυρίως οι ακραίες ημερήσιες τιμές της (μέγιστα, ελάχιστα).
Η αύξηση του φυτού και οι υπόλοιπες λειτουργίες του συμπεριφέρονται ανάλογα με τα μετεωρολογικά στοιχεία, π.χ. θερμοκρασία, και μάλιστα με τα ακραία όριά τους (μέγιστα-ελάχιστα), καθώς και τη μεταξύ τους βέλτιστη τιμή. Φυσικά, τα όρια αυτά ποικίλλουν στα διάφορα φυτά και εξαρτώνται από το τοποκλίμα και το στάδιο ανάπτυξης. Οι σπουδαιότερες φάσεις ανάπτυξης είναι δύο, η φυτική και η αναπαραγωγική. Στην πρώτη φάση έχουμε την ανάπτυξη του φυτού, μέχρι την περίοδο κατά την οποία παρουσιάζονται τα όργανα αναπαραγωγής του (άνθιση). Στη δεύτερη φάση, έχουμε την ανάπτυξη των οργάνων αναπαραγωγής του (άνθη, καρπός, σπέρματα). Σε κάθε στάδιο, το φυτό παρουσιάζει τις βέλτιστες τιμές θερμοκρασίας, υγρασίας και φωτός για την ανάπτυξή του, δηλαδή βρίσκεται σε οικολογικό βέλτιστο. Στους ψυχρούς τόπους, ενδέχεται ένα φυτό να αναπτύσσεται, αλλά να μην παράγει ή να μην ωριμάζει καρπούς, γιατί στην αναπαραγωγική του φάση είναι πολύ απαιτητικό σε θερμότητα και φως.
Η καλύτερη μέθοδος για τη μελέτη των σχέσεων μεταξύ ανάπτυξης του φυτού και θερμοκρασίας είναι η συσσώρευση των ημερήσιων μέσων θερμοκρασιών πάνω από μια βασική τιμή. Για παράδειγμα, χρησιμοποιώντας ως βασική τιμή τους 18° C, για την ανάπτυξη ορισμένου τύπου βλάστησης, προστίθενται οι βαθμοί στους οποίους η μέση ημερήσια θερμοκρασία είναι ανώτερη των 18° C. Φυσικά, η βασική θερμοκρασία είναι διαφορετική για κάθε είδος φυτού. Έστω, για παράδειγμα, ότι η ημερήσια μέση θερμοκρασία είναι 21° C. Αυτή δίνει 21 – 18 = 3 ημερήσιους βαθμούς ανάπτυξης (growing degree days), με βάση τη θερμοκρασία των 18° C. Για αρνητικές διαφορές, δηλαδή για ημερήσιες μέσες θερμοκρασίες μικρότερες των 18° C, υπάρχουν 0 ημερήσιοι βαθμοί ανάπτυξης. Με βάση τη θερμοκρασία των 18°C, Degree days = $[(T_{max} + T_{min})/2] – 18°$ C, λαμβάνονται μόνο οι θετικές διαφορές. Η μέθοδος αυτή υποθέτει ότι μια μέση ημερήσια θερμοκρασία, π.χ. των 24° C ή 24 – 18 = 6 ημερήσιων βαθμών ανάπτυξης, έχει την ίδια επίδραση στην ανάπτυξη του φυτού με εκείνη που έχει η ημερήσια μέση θερμοκρασία των 21° C, λαμβανομένη δύο φορές, ή αυτή των 20° C, λαμβανομένη τρεις φορές κ.ο.κ. Σε αυτή την υπόθεση υπάρχει ένα σημαντικό σφάλμα: η συσχέτιση της ανάπτυξης και της θερμοκρασίας θεωρείται γραμμική για τιμές θερμοκρασίας μεγαλύτερες της βασικής. Το παραπάνω σφάλμα θεωρείται μικρό μόνο όταν το φυτό βρίσκεται στο οικολογικό του άριστο.
Στο Σχήμα 6.1 δίνεται η καμπύλη του ρυθμού ανάπτυξης σε σχέση με τη θερμοκρασία. Το σημείο Α δίνει την αρχή της σημαντικής ανάπτυξης και το σημείο Β το άριστο. Φυσικά, η καμπύλη ανάπτυξης είναι συνάρτηση πολλών παραγόντων, όπως ποικιλιών, κλίματος και άλλων. Κάθε ποικιλία έχει ανάγκη ορισμένου αριθμού ημερών βαθμών ανάπτυξης έως τη συγκομιδή της. Για παράδειγμα, έστω ότι οι βαθμοί ανάπτυξης για τον αραβόσιτο είναι 2.500. Οπότε, αθροίζοντας τους ημεροβαθμούς, βρίσκεται προσεγγιστικά ο κατάλληλος χρόνος για συγκομιδή.
Μια άλλη μέθοδος για τη μελέτη των σχέσεων μεταξύ ανάπτυξης του φυτού και θερμοκρασίας είναι οι μονάδες αποτελεσματικής θερμότητας (Effective Heat Unit/EHU), που διορθώνει τα περισσότερα από τα υπάρχοντα σφάλματα στα διάφορα τμήματα της καμπύλης ανάπτυξης. Δίνεται από τον τύπο:

$$EHU = (T_{max} + T_1 + \Delta T_1)/2 – T_2 – DT_2 \qquad (6.1)$$

όπου T_1 είναι η θερμοκρασία κάτω του ορίου σημαντικής ευνοϊκής ανάπτυξης (10° C), $\Delta T_1 = T_{min} – T_1$, μόνο για θετικές τιμές, T_2 η θερμοκρασία με τα άριστα αποτελέσματα (30° C), δηλαδή μέγιστης ανάπτυξης, και $\Delta T_2 = T_{max} – T_2$, μόνο για θετικές τιμές.
Ο τύπος αυτός βασίζεται στην υπόθεση ότι δεν λαμβάνει χώρα αισθητή ανάπτυξη του υπό μελέτη φυτού σε θερμοκρασίες κάτω της βασικής των 10° C.
Μια ακόμα μέθοδος για τη μελέτη των σχέσεων μεταξύ ανάπτυξης του φυτού και θερμοκρασίας είναι τα αποτελέσματα της ακτινοβολίας. Τέλος, υπάρχει και η φωτοθερμική μέθοδος, που είναι συνδυασμός των επιδράσεων του φωτός και της θερμοκρασίας.



Σχήμα 6.1. *Καμπύλη ρυθμού ανάπτυξης.*

6.1.4. Νερό

Το νερό έχει ιδιαίτερη σημασία για τη διατροφή και τη ζωή του φυτού. Το πρωτόπλασμα των κυττάρων μόνο πάνω από ορισμένο βαθμό διόγκωσης είναι ικανό να διεξάγει τις διάφορες φυσιολογικές λειτουργίες. Ειδικότερα, για την πλήρη φυσιολογική δράση του φυτικού οργανισμού, είναι απαραίτητη η ύπαρξη ορισμένης ισορροπίας μεταξύ της πυκνότητας του κυτταρικού χυμού, του νερού του πρωτοπλάσματος και του βαθμού διόγκωσης του κυττάρου. Εάν μειώνονται το ποσό του νερού στο φυτό και, κατά συνέπεια, ο βαθμός διόγκωσης του πρωτοπλάσματος κάτω από ένα ορισμένο όριο, τότε παρατηρείται περιορισμός των φυσιολογικών αντιδράσεων και έναρξη της μάρανσης του φυτού. Γενικά, η φυσιολογική σημασία του νερού είναι πολλαπλή. Είναι ένα από τα βασικά στοιχεία για το σχηματισμό οργανικής ουσίας κατά την αφομοίωση και το μεταφορικό μέσο των προϊόντων της αφομοίωσης στα διάφορα μέρη του φυτού. Μέσα από το νερό μεταφέρονται τα θρεπτικά συστατικά του εδάφους στον φυτικό οργανισμό, ενώ με τη βοήθειά του ως διαλυτικού μέσου γίνονται όλες οι φυσιολογικές αντιδράσεις. Κατά τη διαδικασία της πρόσληψης του νερού από το έδαφος, παρατηρείται ανταγωνισμός μεταξύ του εδάφους και των ριζών του φυτού. Το μεν έδαφος προσπαθεί να συγκρατήσει το νερό μέσα του, το δε φυτό τείνει, με τη βοήθεια του ριζικού του συστήματος, να το απορροφήσει από το έδαφος. Η μέγιστη δυνατή δύναμη που αναπτύσσει κάθε φυτό για την αφαίρεση του νερού από το έδαφος ονομάζεται αναρροφητική δύναμη ή ωσμωτική πίεση των ριζών. Η αναρροφητική δύναμη των διαφόρων φυτών είναι διαφορετική. Γενικά, τα φυτά των ξηρών και αλατούχων περιοχών δείχνουν μεγάλη αναρροφητική δύναμη. Τα φυτά των ερημικών περιοχών έχουν αναρροφητική δύναμη 17 έως 100 ατμόσφαιρες, ενώ των βορείων περιοχών μόλις 9 ατμόσφαιρες.

6.2. Φυσιολογία των φυτών

Η φυσιολογία των φυτών έχει, μεταξύ άλλων, τα εξής γνωρίσματα και χαρακτηριστικά:

6.2.1. Ετήσιοι δακτύλιοι

Ετήσιοι δακτύλιοι είναι οι ομόκεντροι κύκλοι που παρατηρούνται κατά την εγκάρσια τομή του κορμού ενός δέντρου. Η συμβολή τους είναι σημαντική στην έρευνα της παλαιομετεωρολογίας. Ο κορμός αυξάνει κατά πάχος από τον μερισμό των κυττάρων του κάμβιου, ενός ιστού που βρίσκεται μεταξύ του ξύλου και του φλοιού. Το κάμβιο δίνει προς τα μέσα ξυλώδη αγγεία, που έχουν προορισμό να μεταφέρουν νερό από τις ρίζες προς τα πάνω, ενώ προς τα έξω ηθμώδη στοιχεία, μέσω των οποίων μεταφέρονται προς τα κάτω οι παρασκευαζόμενες στα φύλλα οργανικές ουσίες από την αφομοίωση. Έντονος μερισμός των κυττάρων του κάμβιου συντελείται την άνοιξη, διότι παράγονται μεγάλα αγγεία, για την ικανοποίηση των αναγκών του φυτού σε νερό και άλατα. Το καλοκαίρι τα αγγεία καθίστανται στενότερα και το φθινόπωρο δημιουργούνται τα τελευταία στοιχεία του ξύλου, που προορίζονται μάλλον ως στερεωτικά στοιχεία. Αντίθετα, τα στοιχεία της άνοιξης έχουν περισσότερο σημασία ως αγωγοί. Στη διάρκεια του χειμώνα ούτε δημιουργούνται κύτταρα, ούτε αυξάνεται το πάχος του

κορμού. Έτσι, σε μια εγκάρσια τομή κορμού δημιουργούνται ετήσιοι δακτύλιοι, που απεικονίζουν τη δράση της βλάστησης από τις αρχές του έτους.
Οι ετήσιοι δακτύλιοι παρέχουν λοιπόν την ηλικία του δέντρου, αλλά και τη δυνατότητα να καθοριστεί σε ποιο έτος ανήκει ο κάθε δακτύλιος. Τα περισσότερα από τα τροπικά φυτά δεν εμφανίζουν ετήσιο δακτύλιο. Η κατ' έτος εμφάνιση των δακτυλίων εξαρτάται, κυρίως, από τη διαθέσιμη υγρασία. Κατά τα έτη χωρίς βροχοπτώσεις σχηματίζονται στενοί δακτύλιοι, ενώ, αντίθετα, κατά τα έτη με πολλές βροχοπτώσεις σχηματίζονται πλατιοί δακτύλιοι. Συνεπώς, οι ετήσιοι δακτύλιοι αιωνόβιων δέντρων αποτελούν ένα από τα καλύτερα μέσα για τη μελέτη των κλιματικών και των καιρικών συνθηκών παρελθόντων ετών σε διάφορες περιοχές και σε περιόδους κατά τις οποίες δεν υπάρχουν παρατηρήσεις. Στην Αμερική, από τη μελέτη των ετήσιων δακτυλίων αιωνόβιων δέντρων έχει διαπιστωθεί η ύπαρξη περιοδικών κυμάνσεων, περιόδου 11 ή 35 ετών. Οι αρχικές έρευνες έχουν μετεξελιχθεί σήμερα σε ευρεία επιστήμη, την επονομαζόμενη δενδροκλιματολογία και δενδροχρονολογία. Και στην Ελλάδα, από τη μελέτη των εμπολίων των κιόνων του Παρθενώνα, έχει διαπιστωθεί η ίδια περιοδικότητα των βροχών (11ετής, 35ετής). Από την παρατήρηση των ετήσιων δακτυλίων των δέντρων έχει διαπιστωθεί ότι:
(α) η μεταβολή από έτος σε έτος του εύρους των ετήσιων δακτυλίων των δέντρων είναι η ίδια για όλα τα δέντρα εκτεταμένων περιοχών, γεγονός που φανερώνει ότι οι διακυμάνσεις του εύρους των ετήσιων δακτυλίων δεν είναι τυχαίες και οφείλονται σε ένα κοινό αίτιο,
(β) υπάρχει έντονη συσχέτιση μεταξύ του εύρους των δακτυλίων και του ποσού υετού, όπως και του μεγέθους της απορροής των ποταμών της περιοχής.

6.2.2. Πρόσληψη ύδατος και διαπνοή του φυτού

Τα άκρα των ριζών λειτουργούν ως ημιπερατές μεμβράνες και προσλαμβάνουν από το έδαφος νερό με διαλυμένα άλατα, αναγκαία για τη θρέψη του φυτού. Η ανύψωση γίνεται με την ωσμωτική πίεση αφενός και με τα τριχοειδή φαινόμενα αφετέρου. Ο μηχανισμός της ανύψωσης των ακατέργαστων χυμών από το έδαφος σχετίζεται με το φαινόμενο της συνεχούς εξάτμισης νερού από τα φύλλα, δηλαδή με τη διαπνοή του φυτού. Το φύλλο φέρει στην επιφάνειά του μικροσκοπικούς πόρους, τα στομάτια, με τους οποίους πραγματοποιείται η διαπνοή του φυτού. Η άνοδος των εδαφικών διαλυμάτων είναι αναπόσπαστα συνδεδεμένη με το φαινόμενο της διαπνοής. Αναστολή της διαπνοής σημαίνει και αναστολή της ανόδου του νερού. Μεταξύ του ανερχόμενου και του διαπνεόμενου νερού υπάρχει, επομένως, ένα ισοζύγιο. Εάν όμως για διάφορους λόγους οι απώλειες της διαπνοής είναι μεγαλύτερες, το φυτό έχει τρόπο άμυνας. Τα στομάτια λειτουργούν ως βαλβίδες και κλείνουν. Τα μετεωρολογικά στοιχεία που επηρεάζουν την εξάτμιση επηρεάζουν και τη διαπνοή. Επομένως, η διαπνοή ενισχύεται με την αύξηση της θερμοκρασίας και της ταχύτητας του ανέμου, καθώς και με την ελάττωση της σχετικής υγρασίας, ανάλογα με τη διαφορά (F – f), όπου F είναι η μέγιστη τάση ατμών στη θερμοκρασία των φύλλων και f η τάση ατμών στην ατμόσφαιρα.

6.2.3. Αφομοίωση και θρέψη του φυτού

Εάν εξετάσουμε ένα μέρος του φυτού, παρατηρήσουμε ότι περιέχει μια σημαντική ποσότητα νερού. Με την καύσ του φυτού καταστρέφεται η οργανική του ουσία, αποτελούμενη κυρίως από άνθρακα, υδρογόνο, οξυγόνο, άζωτο και θείο. Η υπολειπόμενη μετά την καύση τέφρα αποτελεί το ανόργανο μέρος του φυτού, αποτελούμενη από άλατα των περισσότερων μετάλλων (K, Na κτλ.). Τα άλατα αυτά προσλαμβάνονται από το φυτό με το εδαφικό νερό. Ωστόσο, το φυτό δεν μπορεί να προσλάβει άνθρακα από το έδαφος. Η προέλευση του άνθρακα των πράσινων φυτών είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) της ατμόσφαιρας. Το φυτό χρειάζεται να προσλάβει από την ατμόσφαιρα ένα ποσό άνθρακα για τη λειτουργία της αφομοίωσης. Κατά τη λειτουργία αυτή, προσλαμβάνει CO_2 από τα πράσινα μέρη του φυτού, κρατά τον άνθρακα και αποβάλλει το οξυγόνο. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται μόνο παρουσία του ηλιακού φωτός και της πράσινης ουσίας των φυτών, της χλωροφύλλης.

6.2.4. Λειτουργία της αναπνοής του φυτού

Η λειτουργία της αναπνοής του φυτού, δηλαδή της πρόσληψης οξυγόνου και της αποβολής διοξειδίου του άνθρακα, καλύπτεται από την αφομοίωση. Όλα τα μέρη του φυτού, πράσινα και μη, αναπνέουν στο φως και στο σκοτάδι. Ακόμα και τα σπέρματα και οι ρίζες του φυτού αναπνέουν. Φυτά εντός της ατμόσφαιρας χωρίς οξυγόνο πεθαίνουν, όπως και τα ζώα, είτε λόγω σχηματισμού δηλητηριωδών ουσιών στα κύτταρα είτε λόγω έλλειψης της ενέργειας εκείνης που παράγεται από το οξυγόνο. Το φως έχει επίδραση στην αναπνοή αντίθετη από εκείνη που έχει στην αφομοίωση.

Ειδικότερα:
(α) Στο σκοτάδι, η αφομοίωση είναι μηδέν, ενώ η αναπνοή είναι μέγιστη.
(β) Με ασθενές φως (λυκαυγές-λυκόφως), η αναπνοή είναι κοντά στο μέγιστο, ενώ η αφομοίωση είναι ασθενής. Υπερισχύει η αναπνοή και αποβάλλεται CO_2.
(γ) Σε ισχυρό φως, η αναπνοή είναι στο ελάχιστο, ενώ η αφομοίωση στο μέγιστο. Ωστόσο, η διακύμανση του φαινομένου της αναπνοής έχει μικρό εύρος.
Η αφομοίωση είναι διαδικασία που συνθέτει οργανική ύλη, ενώ η αναπνοή καταναλώνει ουσίες που δημιουργούνται από την αφομοίωση. Επειδή όμως κατά την ημέρα η αφομοίωση έχει ένταση πολλαπλάσια της αναπνοής, το συνολικό αποτέλεσμα των δύο λειτουργιών είναι η συσσώρευση συντιθέμενων ουσιών στο φυτό, με αποτέλεσμα την ανάπτυξή του.

6.3. Φαινολογία

Η φαινολογία είναι ο κλάδος της αγρομετεωρολογικής επιστήμης που ασχολείται με τη σχέση μεταξύ καιρού ή κλίματος και περιοδικών βιολογικών φαινομένων, όπως οι φάσεις ανάπτυξης των φυτών ή ο κύκλος ανάπτυξης των ζώων ή η μετανάστευση των πτηνών. Η ανάπτυξη των φυτών επηρεάζεται από διάφορους μετεωρολογικούς παράγοντες, εκ των οποίων οι πιο σημαντικοί είναι η θερμοκρασία του αέρα και του εδάφους και η φωτοπερίοδος, δηλαδή η διάρκεια της ημέρας. Όμως και η αποθήκευση της εδαφικής υγρασίας ασκεί κάποια επίδραση, κυρίως στις τροπικές και τις εύκρατες περιοχές. Γενικά, φαινολογία είναι η επιστήμη που συσχετίζει το κλίμα με περιοδικά γεγονότα στον κύκλο ζωής των φυτών και των ζώων. Ειδικότερα, φαινολογία είναι η μελέτη επανεμφανιζόμενων φαινομένων του κύκλου ζωής των φυτών και των ζώων και των σχέσεών τους με τον καιρό και το κλίμα. Ένα περιοδικό γεγονός αναφέρεται σ' ένα μετρήσιμο ή μη μετρήσιμο (λανθάνον) πρότυπο του κύκλου ζωής, μοναδικό σε κάθε φυτό ή ζώο. Μετρήσιμα γεγονότα θεωρούνται εκείνα που μπορεί να παρατηρηθούν με το μάτι ή να μετρηθούν με όργανα, χωρίς την πρόκληση τραυμάτων σε μεμονωμένα όργανα. Τέτοια γεγονότα, για παράδειγμα, είναι η έκπτυξη (budding), το φύλλωμα, η άνθιση, η καρπόδεση (setting) και η συγκομιδή των φρούτων, καθώς και το χρώμα και η πτώση των φύλλων στα δένδρα. Επίσης, γεγονότα όπως η γενετική βελτίωση, η βόσκηση, η μετανάστευση, η χειμερία νάρκη (hibernation) και η γαλακτική (lactation) είναι μετρήσιμα στον κύκλο ζωής των ζώων. Για τα έντομα, τέτοια φαινόμενα είναι η πρώτη λάρβα, η πρώτη εμφάνιση, η πρώτη επίθεση και η χειμερία νάρκη. Λανθάνοντα γεγονότα είναι εκείνα που δεν μπορούν ούτε να παρατηρηθούν με γυμνό μάτι, ούτε να μετρηθούν άμεσα με όργανα, αλλά ούτε να υπολογιστούν με ανατομικούς και βιοχημικούς τρόπους.
Συμπερασματικά, η φαινολογία, γνωστή ως η επιστήμη της εμφάνισης, ασχολείται με την αλληλουχία σημαντικών εποχικών γεγονότων στη βιόσφαιρα και στην ατμόσφαιρα. Παρατηρώντας αυτά τα γεγονότα, δίνεται έμφαση στην ημερομηνία εμφάνισης, όπως είναι η ημερομηνία άφιξης των πουλιών, η πρωιμότητα άνθισης και ο χρόνος ωρίμανσης των καλλιεργειών. Όταν η φαινολογία εφαρμόζεται στη μελέτη των πουλιών, ονομάζεται αβιφαινολογία, στα έντομα φαινολογία εντόμων, στα ζώα ζωοφαινολογία, στα φυτά φυτοφαινολογία, στα τροπικά φυτά τροπική φαινολογία, στην κλιματολογία περιοχική ή κλιματολογική φαινολογία και στη μελέτη ανθοφορίας φυτών ανθοφαινολογία. Όσον αφορά τη γεωργία, ονομάζεται αγροφαινολογία, η οποία μελετάται σε αυτό το κεφάλαιο.

6.3.1. Εννοιολογικό πλαίσιο φαινολογίας

Η φαινολογία, δηλαδή η περιγραφή των σταδίων ανάπτυξης των αυτοφυών φυτών, των φρούτων και των γεωργικών καλλιεργειών, όπως και άλλων οργανισμών (εντόμων), έχει αρκετές σαφώς καθορισμένες εφαρμογές, εκτός από τη χρήση της σε μοντέλα προσομοίωσης. Ορισμένες γεωργικές δραστηριότητες απαιτούν συχνά προηγμένες πληροφορίες σχετικά με τις ημερομηνίες συγκεκριμένων σταδίων ανάπτυξης των καλλιεργειών. Ένα από τα πρώτα θέματα είναι η πρόγνωση των ημερομηνιών ωρίμανσης πολλών καλλιεργειών, που έχει σημαντικά οικονομικά πλεονεκτήματα. Αυτό συμβάλλει στην καλύτερη διαχείριση μέσα στον διαθέσιμο χρόνο της οργάνωσης τέτοιων πράξεων, όπως είναι η συγκομιδή, η συσκευασία και η μεταφορά των προϊόντων, καθώς και τον καλύτερο προγραμματισμό του χρόνου της συγκομιδής, για να συμβαδίζει με τις απαιτήσεις της αγοράς (Lomas et al., 1970). Σε πειραματικές εργασίες και εγκαταστάσεις εκτροφής είναι απαραίτητο να υπάρχει μια καλή κατανόηση της επίδρασης των περιβαλλοντικών παραγόντων στην ανάπτυξη των καλλιεργειών (Brown, 1978). Πληροφορίες σχετικά με τον ρυθμό ανάπτυξης και τις ημερομηνίες των διαφόρων φαινολογικών σταδίων είναι χρήσιμες ως εισαγόμενα στοιχεία σε μοντέλα που χρησιμοποιούνται σε συστήματα παρακολούθησης των καλλιεργειών και των καιρικών συνθηκών, καθώς και

σε αναλύσεις στην αγροτική οικονομία. Λόγω της σημασίας της σε διάφορους τομείς γεωργικής δραστηριότητας, είναι απαραίτητη η κατανόηση της φυσιολογικής διαδικασίας ανάπτυξης και του τρόπου με τον οποίο ο ρυθμός ανάπτυξης επηρεάζεται από ορισμένους περιβαλλοντικούς παράγοντες.
Η φαινολογία μπορεί να μοντελοποιηθεί με βάση την εαρινοποίηση, τη φωτοπερίοδο ή τη θερμική απόκριση και τις εγγενείς πρωιμότητες (Cao και Moss, 1997), από τις οποίες οι περισσότερες αποτελούν φυτικά χαρακτηριστικά. Η εγγενής πρωιμότητα εξαρτάται από τα γενετικά χαρακτηριστικά του φυτού και αποτελεί τον κύριο στόχο για τους κτηνοτρόφους. Είναι ένας από τους μηχανισμούς για να αποφευχθούν πολλές δυσκολίες που συνδέονται με δυσμενείς παράγοντες, όπως η ξηρασία ή ο παγετός νωρίς το φθινόπωρο. Η φωτοπερίοδος και η εαρινοποίηση είναι ποιοτικά χαρακτηριστικά των σπόρων ή των νεαρών φυτών, που απαιτούν την έκθεση σε μια ψυχρή περίοδο για ορισμένο διάστημα και την ένταση, προκειμένου να επιτευχθεί βέλτιστη ανάπτυξη (Gommes, 1998). Η θερμοκρασία έχει άμεσα παρατηρήσιμη επίδραση στον ρυθμό ανάπτυξης των φυτών και στους ψυχρόαιμους οργανισμούς. Σχετικά με τις καλλιέργειες, οι επιπτώσεις είναι σημαντικές όχι μόνο σε χώρες με εύκρατο κλίμα, αλλά και σε τροπικές χώρες (Mahmood, 1997).
Για να προσδιοριστεί η επίδραση της θερμοκρασίας, υιοθετείται συνήθως η μέθοδος της αθροιστικής θερμοκρασίας, γνωστή και ως άθροισμα του βαθμού-ημερών (Sum of Degree-Days/SDD) ή θερμική μονάδα (Chang, 1974). Η μέθοδος θεωρεί ότι η ποσότητα θερμότητας, μετρούμενη από τη θερμοκρασία που χρειάζεται ένα φυτό για να αναπτυχθεί, από τη σπορά μέχρι το στάδιο S, είναι μια σταθερά. Ξεκινώντας από τη σπορά, οι ημερόβαθμοι ή βαθμοημέρες από την ημέρα σποράς μέχρι το στάδιο S δίνονται από τη σχέση:

$$SSD = \sum(T - T_b) \quad (6.2)$$

όπου $(T - T_b)$ λαμβάνεται ως 0, όταν T < Tb, T λαμβάνεται ως Tu, όταν T > Tu, T είναι η μέση ημερήσια θερμοκρασία, Tb η θερμοκρασία κατωφλίου κάτω από το οποίο δεν λαμβάνει χώρα ανάπτυξη και Tu ένα άνω όριο θερμοκρασίας πάνω από την οποία θεωρείται ότι οι θερμοκρασίες παύουν να έχουν επίδραση στην ανάπτυξη.
Για παράδειγμα, το άθροισμα των θερμοκρασιών από τη σπορά θα μπορούσε να είναι 100° C. Αυτό σημαίνει ότι με μια θερμοκρασία βάσης των 10° C, η μονάδα θα προκύψει ύστερα από 10 ημέρες, με μια μέση θερμοκρασία των 20° C. Η έννοια των αυξανόμενων βαθμοημερών έχει, δικαίως, επικριθεί ως υπεραπλούστευση, ωστόσο παραμένει σε ευρεία χρήση, ενώ έχουν προταθεί ορισμένες τροποποιήσεις, για να προσαρμόσουν το δείκτη σε ειδικές καλλιέργειες, καθώς και σε περιφερειακές και άλλες συνθήκες. Για παράδειγμα, προκειμένου να υπολογίσει τις πρωινές θερμοκρασίες T_{DD} (μέση θερμοκρασία από την ανατολή μέχρι τη δύση του ηλίου), ως συμβολή στις φαινολογικές εκτιμήσεις για τις πατάτες στην Αίγυπτο, έχει χρησιμοποιηθεί η εξίσωση (Dawod, 1996):

$$T_{DD} = T_A + (T_X - T_N)/6{,}1 \quad (6.3)$$

όπου T_A είναι η μέση θερμοκρασία του 24ώρου, T_X η μέγιστη θερμοκρασία και T_N η ελάχιστη θερμοκρασία.
Είναι απαραίτητο να γίνει διάκριση μεταξύ των όρων μεγέθυνση ή αύξηση (growth) και εξέλιξη ή ανάπτυξη (development). Η μεγέθυνση ή αύξηση αναφέρεται στην αύξηση του βάρους ή του όγκου συγκεκριμένου οργάνου ενός φυτού ή του φυτού στο σύνολό του στη διάρκεια μιας συγκεκριμένης φάσης ή όλης της βλαστικής περιόδου (βιολογικού κύκλου). Αντίστοιχα, ανάπτυξη είναι η εμφάνιση μιας φάσης ή μιας σειράς φάσεων στη διάρκεια της βλαστικής περιόδου. Για παράδειγμα, η άνθιση ενός φυτού είναι «ανάπτυξη», ενώ η επιμήκυνση του κλώνου (stem) είναι «αύξηση». Θεωρείται ότι η αύξηση είναι μια συνεχής συνάρτηση, ενώ η ανάπτυξη είναι ασυνεχής. Σχετικά με τις μεταβολές στη χημική και φυσική σύσταση του φυτού, η αύξηση παρέχει ποσοτικές μεταβολές, αλλά όχι προφανείς ποιοτικές μεταβολές. Αντίθετα, η ανάπτυξη απεικονίζει την πρόοδο μιας σειράς ποιοτικών μεταβολών (με ή χωρίς εξωτερικές μεταβολές) σε όλα τα διάφορα στάδια (φάσεις) μέχρι το θάνατο. Συνεπώς, η αύξηση ενός φυτού μπορεί να μετρηθεί με την επιμήκυνση του βλαστού, την αύξηση του ξηρού και νωπού βάρους, και με άλλα συναφή. Η ανάπτυξη, εξάλλου, παρατηρείται από την ημερομηνία φυτρώματος (ή εκβλάστωσης) (germination), την ημερομηνία έναρξης της άνθισης κ.ά. Δηλαδή, η μελέτη της ανάπτυξης ενός φυτού είναι περισσότερο μορφολογική και φαινολογική προσέγγιση, ενώ η αύξηση ακολουθεί γενικά την προσέγγιση της φυσιολογίας και οικολογίας. Στην αγρομετεωρολογία, ο καλύτερος ορισμός της αύξησης είναι: η αύξηση του βάρους ή των διαστάσεων ενός οργάνου που είναι πολύ ευαίσθητο σε περιβαλλοντολογικές μεταβολές.

Ως παράδειγμα αναφέρεται (Wang, 1958, 1960) η μορφολογική εξέλιξη των εντός του εδάφους αυτιών του καλαμποκιού κατά το πρώιμο βλαστικό στάδιο σε σχέση με την ημερομηνία ωρίμανσης. Στο παράδειγμα αυτό σχεδιάστηκαν πειράματα σε δέκα διαφορετικές ποικιλίες καλαμποκιού για περίοδο 13 ετών. Βρέθηκε ότι:

- οι πρώτες 12 ημέρες μετά τη σπορά αποτελούν σημαντική περίοδο,
- η θερμοκρασία του εδάφους είναι ένα από τα πιο σημαντικά στοιχεία,
- μια οικογένεια καμπυλών της μέσης θερμοκρασίας εδάφους κατά τη σημαντική περίοδο και του αριθμού ημερών ανάπτυξης για κάθε χρόνο και κάθε ποικιλία λειτουργεί ως προγνώστης.

Συμπερασματικά, με τη μέθοδο αυτή επιχειρείται η πρόγνωση της ημερομηνίας ωρίμανσης του καλαμποκιού περίπου δύο μήνες μπροστά ή περισσότερο, χρησιμοποιώντας την έννοια της φυσιολογικής εκτίμησης με τη διαδικασία ανάπτυξης. Μια σύγκριση της μεθόδου αυτής και της μεθόδου της θερμικής μονάδας έχει δείξει την ανωτερότητα της πρώτης, λόγω της ακρίβειας, της πρωιμότητας και της απλότητάς της.
Όσον αφορά στη φαινολογία, είναι απαραίτητο να διαχωριστεί η φαινολογία των φυτών από τη φαινολογία των ζώων. Η φαινολογία των φυτών αντιπροσωπεύει την επιστήμη των αναπτυξιακών συμβάντων ή σταδίων στα φυτά. Αντίστοιχα, το ίδιο ισχύει για τα ζώα. Επειδή οι φυτοφαινολογικές παρατηρήσεις γίνονται σε πολλές περιοχές, οι ζωοφαινολογικές είναι σπάνια διαθέσιμες. Επίσης, επειδή στην αγροκλιματολογία αποδίδεται ιδιαίτερη σημασία στη φυτοφαινολογία, εδώ θα αναφερθούμε μόνο στη φαινολογία των φυτών, χρησιμοποιώντας τον όρο «φαινολογία».

6.3.2. Σημασία φαινολογικών παρατηρήσεων

Αναφορικά με τις παρατηρήσεις φαινολογίας, διακρίνονται τρεις κατηγορίες φυτών: τα άγρια είδη (δέντρα, θάμνοι, διάφορα ποώδη φυτά), τα καλλιεργούμενα είδη και τα οπωροφόρα. Ποια από τα φυτά θα επιλεγούν τελικά για παρατήρηση σε διάφορες περιοχές εξαρτάται από τις κλιματικές συνθήκες των περιοχών. Τα φυτά στην τροπική ζώνη είναι διαφορετικά από αυτά στη μεσογειακή. Είναι προτιμότερο όμως να χρησιμοποιούνται φυτά που υπάρχουν σε όσο το δυνατόν περισσότερες κλιματικές ζώνες, ώστε να μπορεί να γίνει σύγκριση της ανάπτυξης αυτών των φυτών σε μεγάλες εκτάσεις. Για παράδειγμα, αυτό βρίσκει εφαρμογή στο σιτάρι. Έχει εγκατασταθεί ένα δίκτυο παρατηρήσεων με τον όρο «Διεθνείς Φαινολογικοί Κήποι», που εκτείνονται από 41 έως 63 γεωγραφικό πλάτος και 0 δυτικά έως 27 ανατολικά γεωγραφικό μήκος, όπου οι παρατηρήσεις περιορίζονται σε δέντρα που προέρχονται από τα ίδια αρχικά φυτά.
Οι περισσότερες ευρωπαϊκές χώρες διατηρούν δίκτυα που συλλέγουν δεδομένα φαινολογικά. Για παράδειγμα, η γερμανική μετεωρολογική υπηρεσία (Deutscher Wetterdienst/DWD) λειτουργεί σήμερα φαινολογικό δίκτυο που περιλαμβάνει το πρόγραμμα παρατήρησης της DWD και έχει 167 στάδια ανάπτυξης. Επιλεκτικά, σε ορισμένα δέντρα και ορισμένους θάμνους παρατηρούνται, για παράδειγμα, το ξεδίπλωμα των φύλλων, η ανθοφορία, η ωρίμανση των φρούτων και ο χρωματισμός των φύλλων. Στην περίπτωση των γεωργικών καλλιεργειών, παρατηρούνται η άροση και η συγκομιδή, καθώς και δεδομένα που συλλέγονται σε επιλεγμένα φαινολογικά στάδια. Τα παρατηρούμενα δεδομένα του βασικού φαινολογικού δικτύου συλλέγονται και αρχειοθετούνται στο τέλος κάθε βλαστικής περιόδου, σε ένα αρχείο που χρονολογείται από το 1951 μέχρι σήμερα.
Ως γνωστόν, τις τελευταίες δεκαετίες η φαινολογία έχει καταστεί σημαντικό εργαλείο σε έρευνες και μελέτες επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής. Τα αποτελέσματα σχετικά πρόσφατων φαινολογικών ερευνών (IPCC, 2001), ιδιαίτερα για την Ευρώπη, παίζουν κύριο ρόλο στην εκτίμηση αλλαγών που παρατηρούνται σε φυσικά και διαχειριζόμενα συστήματα. Ειδικότερα, μπορούν να παρατηρηθούν εύκολα οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής σε φυτά. Αυτό αποτελεί πρόσθετο λόγο τόσο για τη μεγάλη δημοσιότητα της φαινολογίας όσο και για την ανάγκη παραπέρα ανάπτυξης και εξέλιξής της. Καθώς η φαινολογία αποτελεί την πιο απλή διαδικασία ιχνηλάτησης αλλαγών στην οικολογία των οργανισμών σε σχέση με την κλιματική αλλαγή, το πεδίο κερδίζει συνεχώς αυξανόμενο επιστημονικό και δημόσιο ενδιαφέρον.
Το 2004 ξεκίνησε ένα πενταετές ευρωπαϊκό πρόγραμμα, το COST725 (Koch, 2009), με κύριο στόχο τη δημιουργία μιας ευρωπαϊκής βάσης δεδομένων αναφοράς φαινολογικών παρατηρήσεων, που μπορεί να χρησιμοποιηθούν σε πολλές εφαρμογές, όπως κλιματολογικές αναλύσεις και έρευνες. Τα επιστημονικά πεδία ενδιαφέροντος του COST725 περιλαμβάνουν τον ποιοτικό έλεγχο δεδομένων, τη χαρτογράφηση φαινολογικών σταδίων, τις συσχετίσεις φαινολογικών και κλιματικών στοιχείων, τις αναλύσεις τάσεων περιλαμβανομένης της αβεβαιότητας, τα φαινολογικά μοντέλα, τις μικροκλιματικές επιπτώσεις και τις εφαρμογές τηλεπισκόπησης (Dalezios & Tziortzios, 2006·Tsiros et al., 2009). Καθώς η φαινολογία αποτελεί την πιο απλή διαδικασία για

να ιχνηλατηθούν αλλαγές στην οικολογία των οργανισμών σε σχέση με την κλιματική αλλαγή, το πεδίο κερδίζει συνεχώς αυξανόμενο επιστημονικό και δημόσιο ενδιαφέρον. Στο πρόγραμμα πραγματοποιήθηκε, μεταξύ των άλλων, μεταανάλυση σε ένα πολύ μεγάλο φαινολογικό δίκτυο πάνω από 125.000 σειρών παρατηρήσεων διαφόρων φάσεων, σε 542 είδη φυτών και 19 είδη ζώων, σε 21 χώρες, για την περίοδο 1971-2000. Γενικά, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η φαινολογία ανταποκρίνεται στη θερμοκρασία του προηγούμενου μήνα, ότι οι φάσεις άνοιξης/καλοκαιριού προηγούνται κατά μέσον όρο 2,5 μέρες/ ^{o}C και ότι η σχέση μεταξύ χρώματος του φύλλου και πτώσης καθυστερεί περίπου 1 μέρα/^{o}C (Menzel et al., 2006). Συμπερασματικά, διαπιστώθηκε ότι οι ποσοτικές φαινολογικές ενδείξεις αντανακλούν στην περιοχική κλιματική θέρμανση.

Στην επιλογή των φυτών για φαινολογική παρατήρηση θα πρέπει να συλλέγονται εκείνα στα οποία τα διάφορα στάδια ανάπτυξης μπορούν εύκολα να παρατηρηθούν, ώστε και η διάρκεια μεταξύ της κάθε φάσης να μπορεί να καθοριστεί. Στην περίπτωση των σιτηρών, τα στάδια είναι σπόρος-φύτρωμα-έκπτυξη φύλλων-ξεστάχιασμα-άνθιση-στάδιο γάλακτος-ώριμος σπόρος. Τέτοιοι διαχωρισμοί είναι πολύ χρήσιμοι για «ημερολογιακές» οριοθετήσεις σε διάφορα μετεωρολογικά θέματα. Ακόμα και η γνώση της διάρκειας του βλαστικού και αναπαραγωγικού σταδίου, που πρόκειται να καθοριστούν κατ' αυτόν τον τρόπο, έχει μεγάλη σημασία. Όμως, η διάρκεια των περιόδων ανάμεσα στα στάδια ανάπτυξης δύο διαφορετικών φυτών μπορεί επίσης να αξιοποιηθεί για συγκεκριμένους σκοπούς, όπως είναι η περίοδος μεταξύ της ανθοφορίας της μηλιάς και της ανθοφορίας του ρυζιού.

Έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι φαινολογικών παρατηρήσεων και μέθοδοι αξιολόγησης αυτών των παρατηρήσεων. Η αξιολόγηση των φαινολογικών παρατηρήσεων μπορεί να γίνει με τους εξής τρόπους:

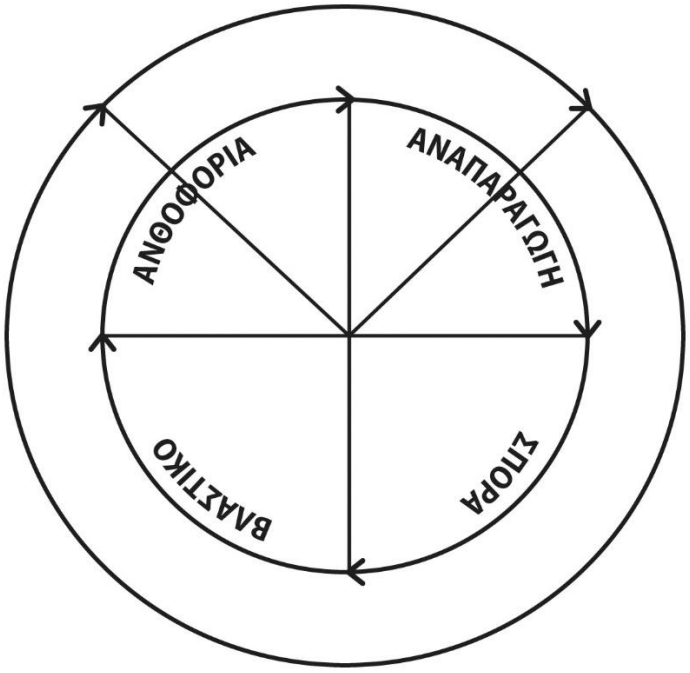
- Σύγκριση σταδίων ανάπτυξης του ίδιου φυτού στην ίδια περιοχή από χρόνο σε χρόνο.
- Σύγκριση όμοιων φαινολογικών συμβάντων σε ένα και στο ίδιο φυτό σε διάφορες τοποθεσίες (γεωγραφική κατανομή).
- Διάρκεια περιόδου μεταξύ της έναρξης διαφόρων σταδίων στον ίδιο τόπο, όπως αριθμός ημερών από το φύτρωμα έως την άνθηση ενός φυτού σιτηρών και από την άνθιση μέχρι το κιτρίνισμα του σπόρου για ένα χρόνο σε σύγκριση με άλλα χρόνια.
- Σύγκριση διάρκειας περιόδων μεταξύ φαινολογικών σταδίων για ένα χρόνο σε διάφορες τοποθεσίες (περιφερειακή κατανομή).
- Το απολύτως πρώιμο και όψιμο, καθώς επίσης και το πιο συχνό ξεκίνημα συγκεκριμένου φαινολογικού σταδίου από σειρές παρατηρήσεων πολλών ετών.

Η παρουσίαση πληροφοριών σε χάρτη χρησιμοποιείται γενικά για περιοχικές συγκρίσεις, υπό τη μορφή γραμμών, γνωστών ως ισοφανών καμπυλών, που ενώνουν το όμοιο ξεκίνημα ενός σταδίου ή την όμοια διάρκεια. Αυτές οι περιοχές απεικονίζονται στο χάρτη υπό τη μορφή ορεογραφήματος, στο οποίο ένα συγκεκριμένο στάδιο ανάπτυξης εμφανίζεται σε μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Αυτή η χρονική απεικόνιση παίρνει συνήθως μέρος σε διάστημα 10 ημερών. Είναι σύνηθες στην φαινολογία να μη δίνεται η ημερομηνία έναρξης ενός σταδίου σύμφωνα με το ημερολόγιο, αλλά περισσότερο να εκφράζεται αυτή η μέρα ως αριθμός ημερών από το ξεκίνημα του χρόνου.

Η περιοχική διαφοροποίηση όσον αφορά το ξεκίνημα συγκεκριμένου αναπτυξιακού σταδίου των φυτών καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από το γεωγραφικό πλάτος και το υψόμετρο. Για παράδειγμα, στη Γερμανία η μέση διάρκεια ανθοφορίας της μηλιάς στο 54^{o} γεωγραφικό πλάτος είναι περίπου 30 ημέρες αργότερα από ό,τι στο 48^{o} γεωγραφικό πλάτος. Μια τέτοια καθυστέρηση από το νότο προς το βορρά μπορεί στη Γαλλία να καθοριστεί ως μέσος όρος 3,2 ημέρες για κάθε 100 km. Βασιζόμενοι σε δεκαετείς παρατηρήσεις διαφόρων δέντρων, έχει υπολογιστεί μια καθυστέρηση της ανθοφορίας στην Γαλλία των 3,9-4,3 ημερών ανά 100 m υψομετρικής διαφοράς. Επίσης, έχει καθοριστεί ένας μέσος όρος 4,4 ημερών για την περιοχή Dolomites και 3-3,6 ημέρες για τα Αππένινα όρη ανά 100 m. Στα κεντρικά βουνά της Γερμανίας μια καθυστέρηση στην ανθοφορία της μηλιάς έχει διαπιστωθεί μέχρι 5 ημέρες ανά 100 m. Η διαφοροποίηση των δεδομένων για τα στάδια ανάπτυξης στην ίδια περιοχή καθορίζεται αποκλειστικά από χρόνο σε χρόνο και από την ποικιλία των καιρικών συνθηκών. Μια καθυστέρηση στην έναρξη ζέστης της άνοιξης, για παράδειγμα, φέρει μια καθυστέρηση στην έναρξη ανθοφορίας των οπωροφόρων περίπου 20 ημερών σε αντίθεση με χρονιές με πρώιμη άνοιξη. Είναι κατανοητό ότι περιοχικές διαφορές (γεωγραφικό πλάτος-υψόμετρο) μπορεί να διογκωθούν ακόμα περισσότερο από τις καιρικές συνθήκες, εάν λάβουμε υπόψη μας ότι η «συμπεριφορά» του καιρού, ακόμα και σε τοπική βάση, είναι πολύ διαφορετική.

6.3.3. Φάσεις και κύκλος ζωής φυτού

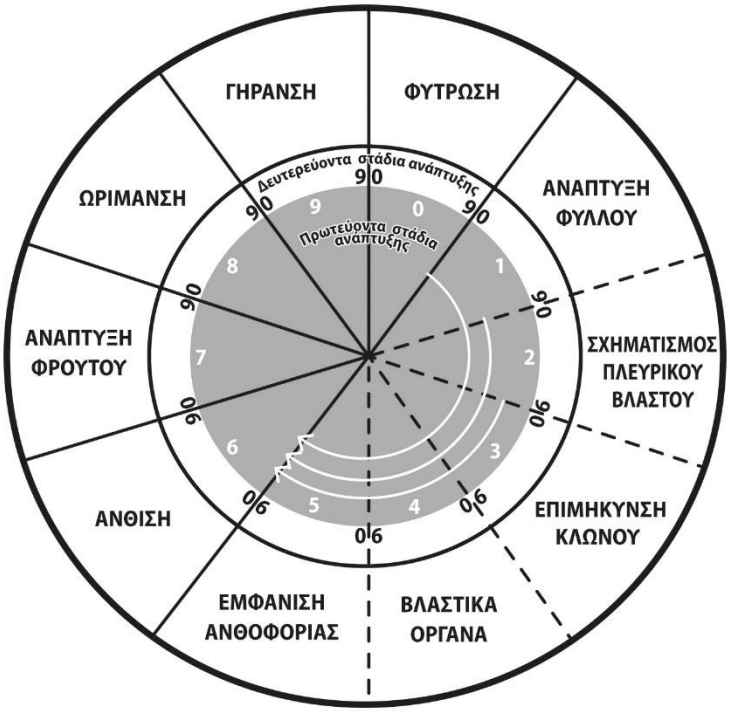
Ο κύκλος ζωής ενός ετήσιου φυτού μπορεί να διαιρεθεί σε τέσσερα στάδια. Σχηματικά, αυτό μπορεί να απεικονιστεί με τέσσερα τεταρτημόρια, που δείχνουν απλώς την αλληλουχία του κύκλου ζωής ενός ετήσιου φυτού και δεν αντιπροσωπεύουν τη διάρκεια κάθε σταδίου. Χρησιμοποιούνται όροι σε διάφορα στάδια, όπως σπορά, βλαστικό, ανθοφορία και αναπαραγωγή, που είναι παρόμοιοι για όλα τα ετήσια φυτά (Σχήμα 6.2). Βέβαια, τόσο η ταξινόμηση σε φάσεις, όσο και η ανταπόκριση σε περιβαλλοντικές επιδράσεις είναι πολύ διαφορετικές από φυτό σε φυτό. Επίσης, υπάρχουν αντιφάσεις όσον αφορά τις ανταποκρίσεις των θερμικών φάσεων και των φαινοφάσεων, που σχετίζονται με τις διάφορες ηλικίες του φυτού. Στον Πίνακα 6.2 παρουσιάζεται στο σύστημα BBCH (Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt and Chemical Industry) (Meier, 1997), για την ταξινόμηση των βασικών φαινολογικών σταδίων, που έχει υιοθετηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση. Επίσης, στο Σχήμα 6.3 απεικονίζεται γραφικά το σύστημα BBCH.



Σχήμα 6.2. *Ο κύκλος ζωής ενός ετήσιου φυτού.*

Βασικά στάδια ανάπτυξης	**Περιγραφή**
0	Βλάστηση ανάπτυξη βολβού
1	Δημιουργία φύλου (κύριος βλαστός)
2	Δημιουργία παράπλευρων βλαστών / αδέλφωμα
3	Βλαστική επιμήκυνση ή ανάπτυξη ροζέτας / ανάπτυξη βλαστών (κύριο σκέλος))
4	Δημιουργία τμημάτων θέρου ή αγενής πολλαπλασιασμών οργάνων / έναρξη (κύριο σκέλος)
5	Εμφάνιση ταξιανθίας (κύριο σκέλος) / Δημιουργία κεφαλής
6	Άνθιση (κύριο σκέλος)
7	Παραγωγή καρπού
8	Ωρίμανση ή γίνωμα καρπού και σπόρων
9	Γήρανση αρχή της φάσης λήθαργου

Πίνακας 6.2. *Σύστημα BBCH ταξινόμησης βασικών φαινολογικών σταδίων*



Σχήμα 6.3. *Απεικόνιση του συστήματος BBCH*.

Στη συνέχεια γίνονται βασικές επισημάνσεις, για την κατανόηση της διαίρεσης σε φάσεις ενός φυτού.
Υπάρχει η θεωρία ανάπτυξης των φάσεων ενός φυτού, σύμφωνα με την οποία:

- αύξηση και ανάπτυξη δεν είναι ίδια φαινόμενα,
- η όλη διαδικασία της ανάπτυξης ενός ετήσιου φυτού συνίσταται από μεμονωμένα στάδια ή μεμονωμένες φάσεις,
- τα στάδια αυτά εμφανίζονται πάντα σε αυστηρή χρονική ακολουθία, έτσι ώστε ένα από αυτά να μην μπορεί να αρχίσει αν δεν έχει ολοκληρωθεί το προηγούμενο,
- διαφορετικά στάδια ανάπτυξης του ίδιου φυτού απαιτούν διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες για την ολοκλήρωσή τους.

Υπάρχει ακόμα η θεωρία του φυσιολογικού προκαθορισμού των φυτών, σύμφωνα με την οποία οι περιβαλλοντικές επιδράσεις στο στάδιο της σποράς και στο στάδιο του σπορόφυτου καθορίζουν την αύξηση και την ανάπτυξη του βλαστικού και του αναπαραγωγικού σταδίου. Αξιόλογα αποτελέσματα της θεωρίας αυτής σε μοντέρνες αγροτικές πρακτικές είναι ο εξαερισμός (vernalization), το χειμερινό ψύχος και διάφορες επεξεργασίες σπόρου.
Διάφορα πειράματα πεδίου και θερμοκηπίου έχουν δείξει ότι η ταξινόμηση σε φάσεις είναι απαραίτητη για τη μελέτη της ανταπόκρισης των φυτών. Για παράδειγμα, η υγρασία είναι παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην αύξηση του καλαμποκιού στο στάδιο της αναπαραγωγής, αλλά και ακριβώς πριν από αυτό, ενώ δεν παίζει κανένα ρόλο σε άλλα στάδια. Αντίθετα, όταν εφαρμόζεται υπερβολική υγρασία στα πρώιμα στάδια, μπορεί να έχει αρνητικές επιπτώσεις.

Φάσεις καλλιέργειας		**Περιβαλλοντικοί παράγοντες**		
Τύπος φυτού	Στάδιο	Σημαντική περίοδος	Επίπτωση	Σημαντικά στοιχεία
Γήινα λαχανικά	i: Σπορά	I	G	Me, Md, Sd
	ii: Εκβλάστωση	II	G	Me, Md, Td, Ld
	iii: Έναρξη υπόγειου μέρους	III	G, G, Q	Me, Md, Te, Td, Le, Ld, De, Dd, We
	iv: Άνθιση			
	v: Ωρίμανση	IV	Y, Q	Me, Md, Ld, De, Dd
Ανθοκομικά	i: Όργωμα	I	G	Me, Md, Sd
	ii: Εκβλάστωση	II	G	Me, Md, Td, Ld
	iii – Στάδιο ταχείας ανάπτυξης	III	G, G, Q	Me, Md, Ld, De, Dd, We
	iv: Άνθιση			
	v – Παραγωγή καρπού	IV	Y, Q	Me, Md, Ld, De, Dd
Φρούτα	i: Όργωμα	I	G	
	ii: Εκβλάστωση			Me, Md, Sd
	iii – Μάτισμα	II	G	Md, Ld, Td
	iv: Εκχύμωσης	III	Q, F	Md, Le, Ld, De, Dd, We, Td
	v – Αρχικό στάδιο ωρίμανσης			Me, Td, Le, Ld, We
	vi – Πλήρης ωρίμανση	IV	Y, Q	

Πίνακας 6.3. *Σχηματική αναπαράσταση της ταξινόμησης των φάσεων των λαχανικών.*

Ο Πίνακας 6.3. χρησιμοποιείται για να δείξει την ανταπόκριση των οπωροκηπευτικών καλλιεργειών σε μετεωρολογικούς παράγοντες στις διάφορες φάσεις. Οι καλλιέργειες ταξινομούνται σύμφωνα με την οικονομική σημασία και τις χρήσεις των βλαστήσιμων τμημάτων: γήινα λαχανικά (ρίζες και υπόγειοι κλώνοι), ανθοκομικά (λουλούδια κτλ.) και φρούτα (φρούτα και σπόροι). Η ανταπόκριση των καλλιεργειών σε μετεωρολογικούς παράγοντες καταγράφεται σύμφωνα με την ταξινόμηση σε σημαντικές περιόδους, σημαντικά στοιχεία και τύπους επιπτώσεων.

Η σημαντική περίοδος αναφέρεται σε συγκεκριμένη περίοδο του κύκλου ζωής ενός φυτού, κατά την οποία οι επιπτώσεις των μετεωρολογικών παραγόντων είναι ιδιαίτερα κρίσιμες σε φαινολογικά γεγονότα, όπως είναι η συγκομιδή, η ποιότητα, η άνθιση και η αύξηση. Τα σημαντικά στοιχεία αναφέρονται σε συγκεκριμένους μετεωρολογικούς παράγοντες, που επικρατούν στην εξεταζόμενη περίοδο. Με M συμβολίζεται η υγρασία, με T η θερμοκρασία του αέρα, με S η θερμοκρασία του εδάφους, με L το φως, με W ο άνεμος και με D η διάρκεια της ημέρας. Οι δείκτες e και d_σημαίνουν πλεόνασμα (excess) και έλλειμμα (deficiency), αντίστοιχα. Συνεπώς, το M_e σημαίνει πλεόνασμα υγρασίας, ενώ το T_d έλλειμμα θερμοκρασίας. Οι σημαντικές επιπτώσεις αφορούν τις συνολικές επιπτώσεις των πλεονεκτικών και μη πλεονεκτικών μετεωρολογικών συνθηκών στην αύξηση και την ανάπτυξη των φυτών. Τα σύμβολα Y, Q, G και F σημαίνουν συγκομιδή, ποιότητα, ανάπτυξη και άνθιση, αντίστοιχα. Δεν είναι δυνατόν να δοθούν ποσοτικές τιμές στα παραπάνω σύμβολα, ούτε τα σύμβολα καλύπτουν όλες τις περιβαλλοντικές απαιτήσεις, δεδομένου ότι αποτελούν αντικείμενο μεταβολών ανάλογα με το είδος, την ποικιλία και τις σχέσεις μεταξύ των μετεωρολογικών παραγόντων. Συμπερασματικά, ο Πίνακας 6.2 δείχνει μόνο τη σχετική σημασία των μετεωρολογικών απαιτήσεων στις διάφορες φάσεις με έναν γενικευμένο τρόπο. Όσον αφορά τις εφαρμογές, θεωρούνται απαραίτητες οι εξειδικεύσεις στην ταξινόμηση των φάσεων των φυτών.

6.3.4. Χρονική ακρίβεια φάσεων (sharpness)

Η επιλογή των κατάλληλων μεθόδων για τον υπολογισμό της εξέλιξης των φάσεων χρειάζεται παραπέρα διερεύνηση. Για παράδειγμα, η μέτρηση της ωρίμανσης των ροδάκινων μέσω αλκοολούχων σωληνοειδών προϊόντων (Alcoholic Misolube/AIS) είναι πολύ πιο ακριβής από την ανάγνωση ενός σκληρόμετρου (Tenderometer/TR). Ωστόσο, η μέθοδος AIS δεν είναι πρακτική, διότι είναι χρονοβόρα. Συνεπώς, η παρατήρηση πρέπει να αναφέρεται σε ποσοστό της εμφάνισης συγκεκριμένης φάσης στο πεδίο. Για να αποκτηθεί το ακριβές ποσοστό, χωρίς να θυσιάζεται η χρονική ακρίβεια της φάσης, τα αποτελέσματα των παρατηρήσεων πεδίου πρέπει να απεικονίζονται σε σχέση με το χρόνο. Επίσης, το τμήμα της καμπύλης με τη

μεγαλύτερη κλίση είναι συνήθως η περιοχή που αντιστοιχεί στο ακριβές ποσοστό. Έτσι, απεικονίζεται η αθροιστική ποσοστιαία συχνότητα εμφάνισης συγκεκριμένης φάσης, δηλαδή η τεταγμένη (άνθιση), ενώ η τετμημένη είναι η ημερολογιακή μέρα σε συγκεκριμένο χρόνο από την έναρξη και λήξη μιας φάσης. Αυτό συμβαίνει διότι η μεταβολή του ποσοστού με το χρόνο αυξάνεται απότομα. Δυστυχώς, οι μετρήσιμες μεταβολές τόσο των ορατών όσο και των αόρατων φάσεων υπολογίζονται συνήθως με μάλλον πρωτόγονους και υποκειμενικούς τρόπους. Για παράδειγμα, η ωρίμανση της πράσινης πιπεριάς μπορεί να διαπιστωθεί με την πίεση των δακτύλων, ενώ η ωρίμανση των περισσότερων μικρών δημητριακών μπορεί να διαπιστωθεί είτε με πίεση μεταξύ των δακτύλων είτε με δάγκωμα. Βέβαια, οι μετρήσεις αυτές δεν θεωρούνται ακριβείς. Τα κριτήρια της (χρονικής) ακρίβειας των φάσεων ορίζουν ότι:

- Οι υπολογισμοί πρέπει να είναι αντικειμενικοί.
- Οι υπολογισμοί πρέπει να είναι ακριβείς.
- Η έναρξη και η λήξη μιας φάσης για την ίδια ποικιλία και στο ίδιο πεδίο πρέπει να εμφανίζονται μέσα σε μικρό χρονικό διάστημα, όχι μεγαλύτερο από μία ή δύο μέρες.
- Η μέθοδος για τον υπολογισμό της φάσης πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο απλή.

Συμπερασματικά, πρέπει να αναπτυχθούν διάφορες τεχνικές και μέθοδοι για τον υπολογισμό της (χρονικής) ακρίβειας φάσεων και υποφάσεων με πιστότητα σχετικά με τους περιβαλλοντικούς και μετεωρολογικούς παράγοντες. Συμπεράσματα για τον υπολογισμό ενός συγκεκριμένου οργάνου μπορεί να αποκτηθούν από χημικές, φυσικές, φυσιολογικές και μορφολογικές μεθόδους. Για παράδειγμα, οι φυσικές μέθοδοι περιλαμβάνουν μηχανικές μετρήσεις της συμπιεστικής και διατμητικής τάσης συγκεκριμένων τμημάτων ενός φυτού. Για παράδειγμα, η ανάγνωση του σκληρόμετρου για ροδάκινα είναι αποτέλεσμα ενός τεστ στη διατμητική τάση των σπόρων. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν και άλλες φυσικές ιδιότητες, όπως η θερμοχωρητικότητα και η ηλεκτρική αγωγιμότητα, η οπτική πολικότητα και η φασματική ανάλυση κ.ά. Μια κλίμακα χρωματικότητας θα αποτελούσε κατάλληλο δείκτη για το βαθμό ωρίμανσης των περισσότερων φρούτων, δηλαδή για τις οπτικές ιδιότητες στη φασματική ανάλυση. Φυσιολογικές και μορφολογικές μέθοδοι μπορεί επίσης να είναι πολύ χρήσιμες.
Όπως αναφέρθηκε στην αρχή αυτού του κεφαλαίου, η ανάπτυξη μορφολογικών μεθόδων για τη μελέτη της σχέσης μεταξύ των εντός του εδάφους μερών του φυτού και του λειτουργικού μέρους του είναι σημαντική για την πρόγνωση της ωρίμανσης του καλαμποκιού. Τελικά, κλασικοί δείκτες για τον υπολογισμό της ακρίβειας των φάσεων είναι μερικές φορές πολύ καλοί, ώστε να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις των παραπάνω κριτηρίων. Για παράδειγμα, στο κουνουπίδι κλασικό κριτήριο είναι όταν οι κεφαλές αποκτούν το κατάλληλο μέγεθος και προτού γίνουν άχρωμες. Προκειμένου να δειχθούν όλα τα φαινολογικά γεγονότα, και όχι μόνο η ωρίμανση και η ποιότητα, χρειάζεται ένας βελτιωμένος δείκτης για κάθε φάση και κάθε είδος καλλιέργειας.

6.4. Αγρομετεωρολογικές και φαινολογικές παρατηρήσεις

Μετεωρολογικά και κλιματολογικά δεδομένα χρησιμοποιούνται σήμερα στη σχεδίαση διαφόρων ανθρώπινων δραστηριοτήτων, εκ των οποίων από τις πιο σπουδαίες είναι η γεωργία. Επί πολλά χρόνια, τα μόνα δεδομένα που χρησιμοποιούνταν για γεωργικούς σκοπούς ήταν η βροχόπτωση και η θερμοκρασία, αλλά, σε μερικά πεδία, άρχισαν να καθίστανται απαραίτητα και άλλα μετεωρολογικά στοιχεία. Με την πρόοδο στις φυσικές επιστήμες, νέες μετεωρολογικές παρατηρήσεις άρχισαν να υιοθετούνται σταδιακά, όπως η υγρασία του αέρα, ο άνεμος, η ακτινοβολία, η θερμοκρασία του εδάφους, η διάρκεια της ηλιοφάνειας, η νέφωση, η εξάτμιση και η εξατμισοδιαπνοή, η ατμοσφαιρική πίεση κ.ά. Τα δεδομένα από όλα αυτά τα μετεωρολογικά στοιχεία ήταν, και θα εξακολουθήσουν να είναι, πολύ σημαντικά για τη γεωργία.
Στη συνέχεια, έχει καταστεί προφανές ότι δεδομένα μόνο από μετεωρολογικά στοιχεία έχουν περιορισμένη εφαρμογή και δεν θεωρούνται επαρκή, ώστε να ικανοποιήσουν τις αυξανόμενες ανάγκες στη γεωργία. Ένας μικρός αριθμός αγρομετεωρολογικών προβλημάτων μπορεί να λυθεί χρησιμοποιώντας μόνο μετεωρολογικά δεδομένα. Ωστόσο, η επίδραση του καιρού στη γεωργία δεν μπορεί να υπολογισθεί παρατηρώντας μόνο τον καιρό. Συνεπώς, μαζί με τα μετεωρολογικά δεδομένα, στην αγρομετεωρολογία παρατηρούνται τα φυτά, τα κατοικίδια ζώα, η εμφάνιση εχθρών και ασθενειών κ.ά. Οι παρατηρήσεις αυτές λαμβάνουν χώρα στον ίδιο τόπο και χρόνο, όπως οι μετεωρολογικές παρατηρήσεις. Συγκρίνοντας τα γεωργικά με τα μετεωρολογικά δεδομένα είναι δυνατόν να εκτιμηθεί η επίδραση του καιρού και του κλίματος, για παράδειγμα, στη συμπεριφορά συγκεκριμένης καλλιέργειας, στην ποσότητα και την ποιότητα της συγκομιδής κτλ. Παραδείγματα των

δυνατοτήτων που παρέχει η χρήση μόνο μετεωρολογικών, αλλά και μετεωρολογικών και γεωργικών στοιχείων μπορούν να καταγραφούν για καθεμία μετεωρολογική παράμετρο.

Χρήση μόνο μετεωρολογικών στοιχείων

Το θερμοκρασιακό καθεστώς μιας περιοχής μπορεί να περιγραφεί χρησιμοποιώντας μόνο στοιχεία θερμοκρασίας του αέρα. Ειδικότερα, μια πλήρης περιγραφή περιλαμβάνει τις ακόλουθες παραμέτρους:

- τη μέση θερμοκρασία,
- τις ακραίες θερμοκρασίες του αέρα,
- τον αριθμό των ημερών με συγκεκριμένες μέσες ή ακραίες θερμοκρασίες,
- την έναρξη, τη λήξη και τη διάρκεια των περιόδων που έχουν πάνω από συγκεκριμένη θερμοκρασία και αθροιστικές θερμοκρασίες (ημερόβαθμοι), συσσωρευμένες στη διάρκεια των περιόδων αυτών,
- τις μέσες και τις ακραίες ημερομηνίες του τελευταίου παγετού την άνοιξη και του πρώτου παγετού το φθινόπωρο, και τη διάρκεια της ελεύθερης περιόδου του παγετού,
- την ηπειρωτικότητα.

Χρήση μετεωρολογικών και γεωργικών στοιχείων

Η συνδυαστική χρήση μετεωρολογικών και γεωργικών στοιχείων αναφέρεται στην επίδραση της θερμοκρασίας στα ζώα, τα φυτά, τα εδάφη, την εμφάνιση εχθρών, ασθενειών και άλλα συναφή. Ειδικότερα, η έρευνα των παραπάνω μπορεί να αφορά στην επίδραση:

- των θερμοκρασιών στις οποίες εμφανίζονται η εκβλάστηση και το φύτρωμα των φυτών,
- των θερμοκρασιών στις οποίες αρχίζει ο νέος κύκλος ανάπτυξης για εποχικά (perennial) φυτά,
- των κρίσιμων θερμοκρασιών (ελάχιστων, βέλτιστων, μέγιστων) για διαφορετικές φάσεις ανάπτυξης των φυτών,
- των δυσμενών θερμοκρασιών (χαμηλών και υψηλών) για διάφορες φάσεις ανάπτυξης των φυτών,
- των αθροιστικών θερμοκρασιών (ημερόβαθμων) για κάθε περίοδο μεταξύ των φάσεων κατά την ανάπτυξη των φυτών, καθώς και σε όλη την περίοδο αύξησης,
- της θερμοκρασίας στη διάρκεια των περιόδων μεταξύ των φάσεων, καθώς και σε όλη την περίοδο αύξησης,
- της θερμοκρασίας στην ποιότητα της συγκομιδής,
- της θερμοκρασίας στην ποσότητα της συγκομιδής,
- της θερμοκρασίας στην εμφάνιση εχθρών,
- της θερμοκρασίας στην εμφάνιση ασθενειών,
- της θερμοκρασίας στην υγεία των οικιακών ζώων,
- της θερμοκρασίας στην παραγωγικότητα των οικιακών ζώων,
- της θερμοκρασίας στη δίαιτα της υγρασίας του εδάφους,
- της θερμοκρασίας στο ρυθμό της εξατμισοδιαπνοής,
- της θερμοκρασίας στην αποθήκευση των αγροτικών προϊόντων,
- της θερμοκρασίας στον αριθμό των ευνοϊκών ημερών για εργασίες πεδίου.

Η σύγχρονη αγρομετεωρολογία χρειάζεται και χρησιμοποιεί μετεωρολογικά και αγρονομικά ή γεωργικά δεδομένα από παρατηρήσεις ή δειγματοληψίες. Οι παρατηρήσεις καλλιεργειών, εδαφών και άλλων μεταβλητών έχουν διαφορετικά ονόματα στις διάφορες χώρες. Μερικές φορές ονομάζονται «βιολογικές» και άλλες φορές «γεωργικές» παρατηρήσεις. Και οι δύο ονομασίες είναι ορθές, διότι οι παρατηρήσεις πραγματοποιούνται σε γεωργικά θέματα. Ωστόσο, με την πάροδο του χρόνου οι παρατηρήσεις ονομάζονται πλέον «αγρομετεωρολογικές», καταδεικνύοντας έτσι ότι γίνονται σε διάφορα γεωργικά στοιχεία, για έναν μετεωρολογικό σκοπό. Συνεπώς, ένας αγρομετεωρολογικός σταθμός διεξάγει δύο ειδών παρατηρήσεις: μετεωρολογικές και γεωργικές.

6.4.1. Στοιχεία αγρομετεωρολογικών παρατηρήσεων

Οι αγρομετεωρολογικές παρατηρήσεις χαρακτηρίζονται από μετεωρολογική πληρότητα. Ωστόσο, πρέπει να ληφθεί υπόψη μας ότι όλα σχεδόν τα στοιχεία της αγροτικής παραγωγής εξαρτώνται από τον καιρό και το κλίμα, ή σχετίζονται κάπως με αυτά. Οι πιο χρήσιμες αγρομετεωρολογικές παρατηρήσεις αφορούν:

- την ανάπτυξη του φυτού (φαινολογία),
- την κατάσταση του φυτού,
- την απόδοση του φυτού,
- το ύψος του φυτού,
- την πυκνότητα της περιοχής της σποράς,
- τη διάμετρο του κλώνου, του ξύλου, του φρούτου κτλ.,
- τον αριθμό των φύλλων, των ανθών, των βλαστών, των σπόρων, των φρούτων κτλ.,
- την ολική φυλλική επιφάνεια,
- τη συσσώρευση της πράσινης μάζας των καλλιεργειών και του γρασιδιού,
- το μήκος και τη διάμετρο των ινών,
- τη χημική σύνθεση της καλλιέργειας,
- το περιεχόμενο σε λάδι και σάκχαρο,
- τις ζημιές από δυσμενή μετεωρολογικά φαινόμενα,
- την έκταση των ζιζανίων,
- την υγρασία του εδάφους σε πεδία καλλιεργειών,
- την υγρασία του εδάφους σε πεδία,
- την κατάσταση της επιφάνειας του εδάφους,
- την παραγωγικότητα των γεωργικών μηχανών,
- την ποιότητα των εργασιών πεδίου,
- την υγεία των οικιακών ζώων,
- την παραγωγικότητα των οικιακών ζώων (την ποσότητα και την ποιότητα),
- την εμφάνιση εχθρών,
- την εμφάνιση ασθενειών,
- τους τύπους (βοτανικούς) φυτών σε γρασίδια κτλ.

Σύμφωνα με τις εφαρμογές και τις χρήσεις, αυτές οι αγρομετεωρολογικές παρατηρήσεις μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κύριες ομάδες: σε παρατηρήσεις για συγκεκριμένα ερευνητικά προγράμματα και σε παρατηρήσεις ρουτίνας σε αγρομετεωρολογικά δίκτυα.
Συγκεκριμένα:

6.4.1.1. Παρατηρήσεις για συγκεκριμένα ερευνητικά προγράμματα

Περιλαμβάνουν παρατηρήσεις σχετικά με τη χημική σύνθεση της παραγωγής των φυτών, την υγεία και την παραγωγικότητα των οικιακών ζώων, το έργο των γεωργικών μηχανών και άλλα συναφή. Οι μέθοδοι για τις παρατηρήσεις αυτές σχεδιάζονται από τους επιστήμονες που σχεδιάζουν και υλοποιούν ερευνητικά προγράμματα. Ειδικά ερευνητικά προγράμματα απαιτούν ειδικές οδηγίες, οι οποίες με τη σειρά τους εξαρτώνται από τους σκοπούς κάθε πειράματος. Συνεπώς, δεν μπορεί να δοθούν γενικές οδηγίες, ενώ ο υπολογισμός της χημικής σύνθεσης πραγματοποιείται συνήθως με αναφορές σε ειδικές εργασίες χημικής ανάλυσης, παρά σε αγρομετεωρολογικές δημοσιεύσεις.

6.4.1.2. Παρατηρήσεις ρουτίνας σε αγρομετεωρολογικά δίκτυα

Οι περισσότερες παρατηρήσεις που καταγράψαμε ήδη ανήκουν σε αυτή την κατηγορία. Βέβαια, μερικές από αυτές, όπως οι φαινολογικές ή οι παρατηρήσεις εδαφικής υγρασίας, χρησιμοποιούνται πιο συχνά από άλλες. Ο αριθμός και ο τύπος των παρατηρήσεων που πραγματοποιούνται σε συγκεκριμένο σταθμό εξαρτώνται από τον αριθμό και τον τύπο των καλλιεργειών που αναπτύσσονται στην περιοχή, από το κλίμα της περιοχής, από τους στόχους του φορέα που εκτελεί τις παρατηρήσεις, από τους διαθέσιμους προϋπολογισμούς και άλλα συναφή. Συνεπώς, υπάρχουν αγρομετεωρολογικοί σταθμοί που εκτελούν μόνο μία ή δύο από αυτές τις παρατηρήσεις, ενώ άλλοι σταθμοί μπορούν να εκτελούν δέκα ή περισσότερες.

6.4.2. Φαινολογικές παρατηρήσεις

Στη διαδικασία της ανάπτυξης, από το φύτρωμα των σπόρων έως το σχηματισμό νέων σπόρων, τα φυτά παρουσιάζουν διάφορες ορατές εξωτερικές μεταβολές, που είναι αποτέλεσμα των περιβαλλοντικών συνθηκών. Αυτές οι εξωτερικές μεταβολές καλούνται φαινολογικές φάσεις (ή στάδια) της ανάπτυξης του φυτού και οι αντίστοιχες παρατηρήσεις ονομάζονται φαινολογικές παρατηρήσεις. Παρόμοιες με τις φαινολογικές παρατηρήσεις είναι οι παρατηρήσεις που πραγματοποιούνται από βοτανολόγους και μορφολόγους φυτών, για να μελετηθούν τα εσωτερικά χαρακτηριστικά της ανάπτυξης των φυτών, για τις οποίες απαιτείται συνήθως κατάτμηση (dissection) των φυτών. Αν και στην αγρομετεωρολογία χρησιμοποιούνται μερικές φορές, ή ακόμα εκτελούνται, στοιχεία από τέτοιες παρατηρήσεις, ωστόσο δεν πρέπει να γίνεται σύγχυση με τις φαινολογικές παρατηρήσεις, που αφορούν τις εξωτερικές μεταβολές.

Σε δεδομένο τόπο, οι μετεωρολογικοί παράγοντες μεταβάλλονται από χρόνο σε χρόνο και, συνεπώς, οι ημερομηνίες έναρξης και λήξης των φαινολογικών φάσεων μιας συγκεκριμένης καλλιέργειας μεταβάλλονται ανάλογα. Για παράδειγμα, σε μια εικοσιπενταετή περίοδο, στον αγρομετεωρολογικό σταθμό Ruse της βόρειας Βουλγαρίας, η ημερομηνία στην οποία παρατηρήθηκε η πιο πρώιμη ωρίμανση χειμερινού σιταριού, ποικιλίας No 14, ήταν η 17η Ιουνίου, ενώ η ημερομηνία στην οποία παρατηρήθηκε η πιο όψιμη ωρίμανσή του ήταν η 16η Ιουλίου. Ομοίως, σε μια εικοσιπενταετή περίοδο, στο Thirpan της νότιας Βουλγαρίας η ημερομηνία πρώιμης ωρίμανσης βαμβακιού, ποικιλίας No 38, ήταν η 11η Αυγούστου, ενώ η ημερομηνία όψιμης ωρίμανσής του ήταν η 19η Οκτωβρίου. Τέλος, στο Καρανλούκ της κεντρικής Βουλγαρίας, κέντρο της παγκόσμιας παραγωγής ροδέλαιου, η ημερομηνία πρώιμης εαρινής αναβλάστησης στην ανάπτυξη των ρόδων ήταν στο τέλος Ιανουαρίου, ενώ η ημερομηνία όψιμης αναβλάστησης ήταν στις αρχές Απριλίου, επίσης για μια εικοσιπενταετή περίοδο.

Η έναρξη και η λήξη των φάσεων αποτελούν το μέσο για να εκτιμηθούν οι ρυθμοί ανάπτυξης αυτών των φυτών. Με βάση τα στοιχεία αναλυτικών φαινολογικών παρατηρήσεων που έχουν συλλεγεί για πολλά χρόνια, καθίσταται δυνατόν να προσδιοριστούν οι κανονικότητες στην ανάπτυξη ενός φυτού σε σχέση με το περιβάλλον του, καθώς και οι απαιτήσεις σε μετεωρολογικούς παράγοντες. Φαινολογικά δεδομένα χρησιμοποιούνται όχι μόνο για ερευνητικές δραστηριότητες, αλλά και για επιχειρησιακή αγρομετεωρολογική πρόγνωση, όπως μοντέλα καλλιεργειών-καιρού, που περιλαμβάνουν και αναμενόμενη συγκομιδή. Οι μέσες ημερομηνίες εμφάνισης των φαινολογικών φάσεων σε μια περιοχή συνιστούν τα αποκαλούμενα «ημερολόγια καλλιεργειών».

Στα ημερολόγια αυτά περιλαμβάνονται:

1. Επιλογή αγρών και ο χρόνος φαινολογικών παρατηρήσεων. Για να είναι συγκρίσιμα τα φαινολογικά στοιχεία στα διάφορα χρόνια, πρέπει τα πεδία να έχουν παρόμοιες ιδιότητες, όπως τύποι εδάφους, κάλυψη εδάφους και ανάγλυφου. Τότε μόνο είναι δυνατόν να βεβαιωθεί ότι η ανάπτυξη των φυτών επηρεάζεται μόνο από μετεωρολογικούς παράγοντες και όχι από διάφορους εδαφικούς παράγοντες. Τα πεδία που επιλέγονται για παρατηρήσεις πρέπει να έχουν έκταση περίπου 100 στρεμμάτων (ή 1 εκταρίου = 10.000 m^2). Αν δεν βρίσκονται πεδία ικανοποιητικού μεγέθους στην περιοχή ενός αγρομετεωρολογικού σταθμού, τότε οι παρατηρήσεις εκτελούνται σε μικρότερα πεδία. Ωστόσο, δεν συνίστανται γενικά φαινολογικές παρατηρήσεις σε πεδίο μικρότερα των 20 στρεμμάτων. Οι φαινολογικές παρατηρήσεις πρέπει να εκτελούνται τρεις φορές την εβδομάδα. Επειδή μερικές φαινολογικές φάσεις, όπως η άνθιση κάποιων καλλιεργειών, διαρκούν λίγο, για να μη χαθούν οι παρατηρήσεις, πρέπει να εκτελούνται κάθε μέρα, κατά την εβδομάδα πριν από την αναμενόμενη εμφάνιση της φάσης. Οι επισκέψεις στο πεδίο για παρατηρήσεις πρέπει να γίνονται περίπου την ίδια ώρα της ημέρας, κατά προτίμηση το πρωί, πριν από τις 10:00 π.μ., και με τον ίδιο τρόπο. Τέλος, πρέπει να καταβάλλεται προσπάθεια για τη μη απώλεια της εμφάνισης μιας φαινολογικής φάσης.

2. Μέθοδοι φαινολογικών παρατηρήσεων. Η μέθοδος φαινολογικών παρατηρήσεων εξαρτάται από τον τρόπο καλλιέργειας ενός φυτού. Για το λόγο αυτό, όλες οι καλλιέργειες μπορούν να ταξινομηθούν στις ακόλουθες τρεις ομάδες:

- **Καλλιέργειες αναπτυσσόμενες σε σειρά:** Πρόκειται για ετήσιες καλλιέργειες, που σπέρνονται σε σειρές διαφορετικού πλάτους, όπως είναι, μεταξύ άλλων, το καλαμπόκι, το βαμβάκι, ο καπνός και ο ηλιόσπορος. Οι φαινολογικές παρατηρήσεις των καλλιεργειών αυτών πραγματοποιούνται σε σαράντα καθορισμένα φυτά, στη διάρκεια όλης της περιόδου ανάπτυξης. Για το λόγο αυτό, μετά το φύτρωμα των φυτών, σε τέσσερις θέσεις στο πεδίο, καταμετρούνται και σημειώνονται συνήθως δέκα αναπτυγμένα φυτά, αντιπροσωπευτικά της περιοχής σποράς, από δύο γειτονικές σειρές.

- **Καλλιέργειες με συνεχή επιφάνεια:** Πρόκειται για ετήσιες και εφήμερες καλλιέργειες, των οποίων η κόμη σχηματίζει συνεχή επιφάνεια. Αν και οι περισσότερες από αυτές σπέρνονται σε σειρές, η απόσταση μεταξύ δύο σειρών είναι πολύ μικρή και, αμέσως μετά το φύτρωμα, οι σειρές δύσκολα αναγνωρίζονται, ενώ η κόμη μοιάζει με συνεχή επιφάνεια. Τέτοιες καλλιέργειες είναι το σιτάρι, η βρώμη, το ρύζι και το κριθάρι, Οι φαινολογικές παρατηρήσεις πραγματοποιούνται ξανά σε σαράντα φυτά, εκ των οποίων τα δέκα παρατηρούνται σε τέσσερις θέσεις στο πεδίο. Επειδή είναι δύσκολο να σημειωθούν φυτά σε καλλιέργειες με συνεχή επιφάνεια, αυτά δεν είναι σταθερά κατά την περίοδο ανάπτυξης. Κάθε παρατήρηση πραγματοποιείται σε διαφορετικά φυτά, αλλά πρέπει πάντα να αναπτύσσονται κανονικά και να είναι αντιπροσωπευτικά της περιοχής σποράς. Μετά το φύτρωμα των φυτών, πρέπει να σημειωθούν με ράβδους τέσσερις θέσεις στο πεδίο. Σε όλη την περίοδο ανάπτυξης, δέκα φυτά πρέπει να παρατηρούνται γύρω από κάθε ράβδο. Σ τη διάρκεια δύο διαδοχικών παρατηρήσεων μπορεί τα περισσότερα παρατηρηθέντα φυτά να είναι τα ίδια ή τελείως διαφορετικά και καθεμιά από τις περιπτώσεις αυτές να είναι αποδεκτή. Φαινολογικές παρατηρήσεις σε αρδευόμενο ρύζι πραγματοποιούνται σε σαράντα μη σημειωμένα φυτά, παρότι μερικές φορές τα φυτά αναπτύσσονται σε σειρές. Τα πεδία παραμένουν κάτω από το νερό κατά το μεγαλύτερο μέρος της περιόδου ανάπτυξης. Επίσης, πρέπει να σημειώνονται με ράβδους τέσσερις θέσεις στο πεδίο κοντά στις άκρες, έτσι ώστε να μπορούν παρατηρηθούν τα φυτά. Οι φαινολογικές παρατηρήσεις για όλες τις καλλιέργειες με συνεχή επιφάνεια πρέπει να εκτελούνται πολύ προσεκτικά, έτσι ώστε να μην επηρεάζονται γειτονικά φυτά.
- **Πολυετή δένδρα και θάμνοι.:** Πρόκειται για οπωροφόρα δένδρα, όπως είναι, μεταξύ άλλων, ο καφές, τα μούρα και τα ρόδα. Τα πολυετή φυτά παρουσιάζουν μια περισσότερο ομοιόμορφη ανταπόκριση σε περιβαλλοντικούς παράγοντες, με συνέπεια οι φαινολογικές παρατηρήσεις να μπορούν να πραγματοποιηθούν σε μερικά φυτά. Σε κάθε καλλιέργεια, οι παρατηρήσεις πραγματοποιούνται μόνο σε δέκα καθορισμένα φυτά της ίδιας ποικιλίας και περίπου της ίδιας ηλικίας, με κανονική ανάπτυξη, αντιπροσωπευτικά όλων των καλλιεργειών. Μερικές φορές υπάρχουν λιγότερα από δέκα φυτά της ίδιας ποικιλίας στην περιοχή ενός αγρομετεωρολογικού σταθμού. Σε αυτές τις περιπτώσεις, οι φαινολογικές παρατηρήσεις μπορεί να πραγματοποιηθούν σε μικρότερο αριθμό φυτών, όχι όμως σε λιγότερα από πέντε.

Στη διάρκεια της περιόδου ανάπτυξης των καλλιεργειών, μερικά από τα καθορισμένα φυτά, όπως ετήσια πολυετή, που έχουν επιλεγεί για παρατήρηση μπορεί να πεθάνουν ή να καταστραφούν. Στην περίπτωση αυτή, ένα νέο φυτό (ή νέα φυτά) πρέπει αμέσως να επιλεγεί για παρατήρηση. Το νέο φυτό πρέπει να είναι στην ίδια φάση εξέλιξης με το προηγούμενο και να βρίσκεται στην ίδια κατάσταση και στο ίδιο ύψος, ή σε αρκετά παρόμοια (για τα ετήσια). Αν δεν διατίθεται νέο φυτό, τότε οι παρατηρήσεις μπορεί να συνεχιστούν στον υπόλοιπο αριθμό, αλλά να σημειώνεται καθαρά σε κάθε φαινολογική έκθεση ο ακριβής αριθμός παρατηρηθέντων φυτών. Βέβαια, αν πεθάνει ή καταστραφεί μεγάλος αριθμός καθορισμένων φυτών, τότε πρέπει να εξετάζεται η συνέχιση των παρατηρήσεων ή η ακύρωσή τους για τον συγκεκριμένο χρόνο.

3. Καταγραφή της φαινολογικής πληροφορίας. Τα φαινολογικά στοιχεία πρέπει να καταγράφονται σε ειδικά έντυπα κάθε μήνα, τις μηνιαίες φαινολογικές εκθέσεις. Οι εκθέσεις αυτές αφορούν ετήσιες καλλιέργειες, πολυετείς καλλιέργειες με εποχική μορφή και πολυετείς καλλιέργειες χωρίς εποχική μορφή.
Συγκεκριμένα:

- **Μηνιαίες φαινολογικές εκθέσεις για ετήσιες καλλιέργειες.** Όλες οι ετήσιες καλλιέργειες, τόσο οι αναπτυσσόμενες σε σειρά (π.χ. καλαμπόκι και βαμβάκι), όσο και εκείνες με συνεχή επιφάνεια (π.χ. σιτάρι), χρησιμοποιούν το ίδιο έντυπο έκθεσης. Ο Πίνακας 6.4 είναι ένα τυπικό παράδειγμα τέτοιας έκθεσης ετήσιου φυτού. Η πρώτη φάση στις περισσότερες ετήσιες καλλιέργειες είναι το «φύτρωμα». Στη φάση αυτή δεν καταμετρούνται τα φυτά και δεν υπολογίζεται το ποσοστό. Σε μια συγκεκριμένη παρατήρηση, μπορεί μερικά από τα σαράντα παρατηρηθέντα φυτά να βρίσκονται σε μια φάση, ενώ άλλα να έχουν ήδη εξελιχθεί στην επόμενη φάση. Στις περιπτώσεις αυτές, κάθε φάση καταγράφεται ξεχωριστά, μέχρις ότου όλα τα παρατηρηθέντα φυτά να φτάσουν σε αυτήν.

Ημερομηνία παρατήρησης	Φαινολογική φάση	Αριθμός φυτών με τα χαρακτηριστικά της δεδομένης φάσης					Αριθμός φυτών με τα χαρακτηριστικά της δεδομένης φάσης σε ποσοστό % επί του συνόλου των φυτών
		ΕΠΑΝΑΛΗΨΕΙΣ					
		1	2	3	4	ΣΥΝΟΛΟ	
2	Καμία	-	-	-	-	-	-
4	Καμία	-	-	-	-	-	-
6	Καμία	-	-	-	-	-	-
9	Όργωμα	0	1	0	1	2	5
11	Μάτισμα	1	2	0	2	5	12
13	Μάτισμα	4	8	5	7	24	60
13	Άνθιση	0	1	0	0	1	2
16	Μάτισμα	10	10	10	10	40	100
16	Άνθιση	3	6	3	6	18	45
18	Άνθιση	6	9	5	8	28	70
20	Άνθιση	9	10	8	10	37	93
23	Άνθιση	10	10	10	10	40	100
25	Καμία	-	-	-	-	-	-
27	Καμία	-	-	-	-	-	-
30	Καμία	-	-	-	-	-	-

Πίνακας 6.4. *Μηνιαία φαινολογική έκθεση ενός ετήσιου φυτού.*

- **Μηνιαίες φαινολογικές εκθέσεις για πολυετείς καλλιέργειες με εποχική μορφή.** Πολυετή φυτά (κυρίως δένδρα και θάμνοι) με εποχική μορφή είναι εκείνα των οποίων οι φαινολογικές φάσεις εμφανίζονται συγχρόνως σε όλα τα φυτά, καθώς και σε όλα τα κλαδιά ενός συγκεκριμένου φυτού. Με τον τρόπο αυτό αναπτύσσονται τα πολυετή φυτά σε περιοχές εύκρατες και υψηλού γεωγραφικού πλάτους ανά τον κόσμο. Μετά την ύπνωση κατά τη χειμερινή περίοδο, οι φαινολογικές φάσεις εμφανίζονται περίπου συγχρόνως. Η εξέλιξη των φυτών σ' αυτά τα μέρη του κόσμου υπολογίζεται από τις συνθήκες της θερμοκρασίας. Στα χαμηλά γεωγραφικά πλάτη, μπορεί να παρατηρηθεί μια εποχική μορφή στην εξέλιξη των φυτών, αλλά μόνο σε περιοχές υψηλού υψομέτρου, όπου επίσης οι συνθήκες θερμοκρασίας αποτελούν αποφασιστικό μετεωρολογικό παράγοντα.
  Πολυετή φυτά με εποχική μορφή είναι τα περισσότερα οπωροφόρα, όπως οι αμυγδαλιές, οι μηλιές, οι βερικοκιές, οι βυσσινιές, οι συκές, οι λεμονιές, οι ροδακινιές, και ορισμένα θαμνώδη (shrubs), όπως τα βατόμουρα, τα κράνα κ.ά. Καθένα από τα δέκα πολυετή φυτά που έχουν επιλεγεί και ορισθεί για φαινολογικές παρατηρήσεις πρέπει να παρατηρηθεί ως σύνολο. Δύο βαθμοί κάθε φάσης παρατηρούνται και καταγράφονται, η έναρξη και η μαζική εμφάνιση (Πίνακας 6.5). Η έναρξη μιας φάσης πρέπει να καταγράφεται όταν τα χαρακτηριστικά της εμφανίζονται σε λιγότερο από το 25% ενός συγκεκριμένου φυτού. Η μαζική εμφάνιση μιας φάσης πρέπει να καταγράφεται όταν τα χαρακτηριστικά της εμφανίζονται σε περισσότερο από 25% του φυτού. Ο βαθμός των φάσεων, δηλαδή αν είναι λιγότερο ή περισσότερο από το 25%, εκτιμάται οπτικά. Κρίνεται σκόπιμο να τονιστεί ότι η έναρξη και η μαζική εμφάνιση μιας φάσης αναφέρονται αυστηρά σε συγκεκριμένο φυτό. Συχνά, στη διάρκεια μιας παρατήρησης μερικά από τα καθορισμένα φυτά βρίσκονται στην έναρξη μιας φάσης, ενώ άλλα παρουσιάζουν μαζική εμφάνιση της ίδιας φάσης. Σε τέτοιες περιπτώσεις, κάθε βαθμός καταγράφεται χωριστά (Πίνακας 6.5).
- **Μηνιαίες φαινολογικές εκθέσεις για πολυετή φυτά χωρίς εποχική μορφή.** Στη ζώνη του ισημερινού οι συνθήκες θερμοκρασίας δεν μεταβάλλονται σημαντικά από μήνα σε μήνα. Στη διάρκεια όλου του έτους κυμαίνονται εντός του βέλτιστου εύρους για την εξέλιξη των φυτών, με αποτέλεσμα ο αποφασιστικός παράγοντας για την εξέλιξη ενός νέου κύκλου πολυετών να είναι η δίαιτα της βροχόπτωσης. Με την έναρξη της περιόδου των βροχών, πολλά πολυετή αρχίζουν έναν νέο κύκλο εξέλιξης. Στην παγκόσμια ζώνη του ισημερινού, τα περισσότερα πολυετή φυτά παρουσιάζουν επίσης συγκεκριμένες εποχικές μορφές ή πρότυπα, αλλά συνήθως όχι τόσο προφανείς όσο στις περιοχές με υψηλότερο πλάτος. Συνεπώς, μερικά φυτά, όπως ο καφές, το μάγκο ή τα λεμόνια, αποτελεί κοινό φαινόμενο να εμφανίζουν μια δεδομένη στιγμή διάφορες φαινολογικές φάσεις. Μια τέτοια εξέλιξη θεωρείται ότι δεν έχει εποχική μορφή. Είναι πολύ δύσκολο και ίσως παρακινδυνευμένο να δίνονται ακριβείς οδηγίες για τη μορφή εξέλιξης των καλλιεργειών σε διάφορες ζώνες του ισημερινού.

Ορισμένες καλλιέργειες (π.χ. πορτοκάλια) μπορεί να μην έχουν εποχική μορφή σε μια περιοχή, ενώ σε άλλη μπορεί να έχουν. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η καλλιέργεια μπορεί να καταγραφεί χωρίς εποχική μορφή στην πρώτη περιοχή και με εποχική μορφή στη δεύτερη περιοχή.

Ημερομηνία παρατήρησης	Φαινολογική φάση	Στάδιο ανάπτυξης της φάσης	Αριθμός φυτών με τα χαρακτηριστικά της φάσης
1	Καμία	-	-
4	Καμία	-	-
6	Καμία	-	-
8	Φούσκωμα οφθαλμών	Αρχή	6
11	Φούσκωμα οφθαλμών	Αρχή	2
11	Φούσκωμα οφθαλμών	Εμφάνιση μάζας	8
13	Φούσκωμα οφθαλμών	Εμφάνιση μάζας	10
15	Καμία	-	-
18	Άνοιγμα οφθαλμών	Αρχή	4
18	Άνοιγμα οφθαλμών	Εμφάνιση μάζας	6
20	Άνοιγμα οφθαλμών	Εμφάνιση μάζας	10
22	Καμία	-	-
25	Καμία	-	-
27	Άνθιση	Αρχή	3
29	Άνθιση	Αρχή	1
29	Άνθιση	Εμφάνιση μάζας	9

Πίνακας 6.5. *Μηνιαία φαινολογική έκθεση πολυετούς φυτού με εποχικό πρότυπο.*

Σε αντίθεση με τις παρατηρήσεις για τα ομάδα με εποχική μορφή, οι φαινολογικές παρατηρήσεις σε πολυετή φυτά χωρίς εποχική μορφή πρέπει να πραγματοποιούνται όχι σε ολόκληρο το φυτό, αλλά σε έναν μικρό κλώνο ή σε μια ομάδα βολβών (buds) ή ακόμα και σε έναν ξεχωριστό βολβό (bud). Στα περισσότερα πολυετή, η πρώτη φάση σχετίζεται με την εξέλιξη των βολβών. Μερικές φορές είναι πολύ δύσκολο να πραγματοποιηθούν φαινολογικές παρατηρήσεις σε πολυετή φυτά χωρίς εποχική μορφή, κυρίως σε περιοχές όπου υπάρχει μαζική πτώση ανθών και μικρά φρούτα. Τέτοιες περιπτώσεις εμφανίζονται κυρίως όταν η καλλιέργεια (λεμόνια, μάγκο κ.ά.) αναπτύσσεται σε περιοχές στις οποίες οι αγροκλιματικές συνθήκες δεν ευνοούν κάτι τέτοιο. Όταν ένας νέος κύκλος ανάπτυξης αρχίζει, κάθε δένδρο καλύπτεται από πολυάριθμα άνθη, αλλά αμέσως μετά τα περισσότερα από αυτά πέφτουν είτε ως άνθη είτε ως μικρά φρούτα. Αυτή η μορφή ανάπτυξης προκαλεί σύγχυση στις κανονικές παρατηρήσεις. Ένας τρόπος να ξεπεραστεί το πρόβλημα, αν όχι πλήρως, τουλάχιστον μερικώς, είναι η επιλογή και η καταγραφή αρχικά ενός μεγάλου αριθμού βολβών (περίπου 40-50) σε κάθε δένδρο. Έτσι, θα αυξηθούν οι πιθανότητες να υπάρχουν κάποια φρούτα για παρατήρηση μέχρι την ωρίμανση. Στον Πίνακα 6.6 παρουσιάζεται ένα δείγμα μηνιαίας φαινολογικής έκθεσης πολυετούς φυτού χωρίς εποχική μορφή.

6.4.3. Κατηγορίες αγρομετεωρολογικών παρατηρήσεων για φαινολογία

Οι μετεωρολογικοί παράγοντες επηρεάζουν όχι μόνο την ανάπτυξη των καλλιεργειών, αλλά και την κατάστασή τους. Ανεξάρτητα από την ταχύτητα ανάπτυξης, τα φυτά μπορεί να βρίσκονται σε διαφορετικές καταστάσεις, λόγω ευνοϊκών ή μη ευνοϊκών μετεωρολογικών συνθηκών. Οι αγρομετεωρολογικές παρατηρήσεις που συνδέονται με την κατάσταση των καλλιεργειών διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

- γενική εκτίμηση της κατάστασης των καλλιεργειών,
- πυκνότητα της περιοχής σποράς (sowing),
- ύψος των φυτών,
- ζημιά από δυσμενή μετεωρολογικά φαινόμενα,
- ζημιά από εχθρούς και ασθένειες,
- έκταση των ζιζανίων,
- σοδειά.

Ημερομηνία παρατήρησης	ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΦΑΙΝΟΛΟΓΙΚΗΣ ΦΑΣΗΣ ΠΑΡΑΤΗΡΟΥΜΕΝΗ ΓΙΑ:									
	Φυτό Νο 1	**Φυτό Νο 2**	**Φυτό Νο 3**	**Φυτό Νο 4**	**Φυτό Νο 5**	**Φυτό Νο 6**	**Φυτό Νο 7**	**Φυτό Νο 8**	**Φυτό Νο 9**	**Φυτό Νο 10**
1	Αρχικό στάδιο	Αρχικό στάδιο	Αρχικό στάδιο	Αρχικό στάδιο	Αρχικό στάδιο	Αρχικό στάδιο	Αρχικό στάδιο	Αρχικό στάδιο	Αρχικό στάδιο	Αρχικό στάδιο
4	Καμία	Καμία	Καμία	Καμία	Καμία	Καμία	Καμία	Καμία	Καμία	Καμία
6	Καμία	Καμία	Καμία	Καμία	Καμία	Καμία	Καμία	Καμία	Καμία	Καμία
8	Καμία	Καμία	Καμία	Καμία	Καμία	Καμία	Καμία	Καμία	Καμία	Καμία
11	Καμία	Άνθιση	Άνθιση	Καμία	Άνθιση	Καμία	Καμία	Καμία	Άνθιση	Καμία
13	Άνθιση	Άνθιση	Άνθιση	Άνθιση	Άνθιση	Άνθιση	Καμία	Άνθιση	Άνθιση	Άνθιση
15	Άνθιση	Καμία	Καμία	Άνθιση	Καμία	Άνθιση	Άνθιση	Άνθιση	Καμία	Άνθιση
18	Καμία	Καμία	Καμία	Καμία	Καμία	Καμία	Άνθιση	Καμία	Καμία	Καμία
20	Καμία	Καμία	Καμία	Καμία	Καμία	Καμία	Καμία	Καμία	Καμία	Καμία
22	Καμία	Καμία	Καμία	Καμία	Καμία	Καμία	Καμία	Καμία	Καμία	Καμία
25	Καμία	Κεφαλή	Κεφαλή	Καμία	Κεφαλή	Καμία	Καμία	Καμία	Κεφαλή	Καμία
27	Κεφαλή	Καμία	Καμία	Κεφαλή	Καμία	Κεφαλή	Καμία	Κεφαλή	Καμία	Κεφαλή
29	Καμία	Καμία	Καμία	Καμία	Καμία	Καμία	Κεφαλή	Καμία	Καμία	Καμία

Πίνακας 6.6. *Μηνιαία φαινολογική έκθεση πολυετούς φυτού χωρίς εποχική μορφή.*

Οι παρατηρήσεις αυτές πρέπει να εκτελούνται σε όλες τις καλλιέργειες που επιλέγονται για φαινολογικές παρατηρήσεις. Τα στοιχεία από τις παρατηρήσεις καταχωρούνται στις «Δεκαήμερες Αγρομετεωρολογικές Εκθέσεις για την κατάσταση των καλλιεργειών», τη 10η, 20ή και 30ή ημέρα κάθε μήνα. Μερικές από τις παραπάνω κατηγορίες εκτελούνται κάθε δέκα ημέρες, ενώ άλλες μία ή δύο φορές στη διάρκεια της βλαστικής περιόδου. Στον Πίνακα 6.7 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα δεκαήμερης αγρομετεωρολογικής έκθεσης, που αναφέρεται σε στάδια ανάπτυξης και παραγωγής ενός φυτού.
Συγκεκριμένα:

6.4.3.1. Γενική εκτίμηση της κατάστασης των καλλιεργειών

Η εκτίμηση πραγματοποιείται για όλα τα φυτά στο πεδίο. Η κατάσταση μιας καλλιέργειας εκτιμάται σε σύγκριση με την κατάσταση της ίδιας καλλιέργειας σε χρονιές με κανονικές μετεωρολογικές συνθήκες και με ένα κανονικό επίπεδο γεωργικής τεχνολογίας και πρακτικής για την αύξησή της. Η εκτίμηση των φυτών γίνεται αφού ληφθούν υπόψη πολλοί παράγοντες: η υγεία των φυτών, η ομοιομορφία και η πυκνότητα της περιοχής σποράς, ο αριθμός των ζιζανίων στο πεδίο, οι ζημιές από δυσμενή μετεωρολογικά φαινόμενα, οι εχθροί και οι ασθένειες κτλ. Ακόμα, κατά το βλαστικό στάδιο θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη το ύψος των φυτών, ενώ κατά το αναπαραγωγικό στάδιο πρέπει να συνυπολογίζονται ο αριθμός και η κατάσταση των αναπαραγωγικών μερών των φυτών (άνθη, σιτηρά, φρούτα κτλ.). Υπάρχουν οι εξής πέντε βαθμοί εκτίμησης:

Βαθμός 5: Εξαίρετη κατάσταση. Τα φυτά είναι δυνατά, υγιή, έχουν καλές ρίζες και καλή ανάπτυξη. Η πυκνότητα είναι βέλτιστη για τις τοπικές συνθήκες και δεν λείπουν φυτά. Όλα τα μέρη των φυτών, κυρίως τα αναπαραγωγικά, βρίσκονται σε εξαίρετη κατάσταση. Δεν υπάρχουν ζιζάνια. Η κατάσταση αυτή είναι τυπική για χρονιές με πολύ καλές μετεωρολογικές συνθήκες. Αναμένεται πολύ μεγαλύτερη σοδειά από εκείνη των κανονικών χρονών.
Βαθμός 4: Πολύ καλή κατάσταση. Μόνο μερικά φυτά δεν είναι πολύ υγιή, ορισμένα άλλα λείπουν, ενώ υπάρχουν λίγα ζιζάνια και παρατηρείται ελαφρά ζημιά από δυσμενή μετεωρολογικά φαινόμενα, εχθρούς ή ασθένειες. Αναμένεται σοδειά πάνω από τον μέσο όρο.
Βαθμός 3: Κανονική κατάσταση. Το ύψος και η κατάσταση των φυτών, η πυκνότητα, τα ζιζάνια, η ζημιά από δυσμενή μετεωρολογικά φαινόμενα, εχθρούς ή ασθένειες είναι ως συνήθως. Αναμένεται κανονική σοδειά.
Βαθμός 2: Μη ικανοποιητική κατάσταση. Η πυκνότητα των φυτών δεν είναι επαρκής και ορισμένα από αυτά λείπουν. Λόγω μη ευνοϊκών μετεωρολογικών συνθηκών ή άλλων δυσμενών παραγόντων, το ύψος και η κατάσταση των φυτών είναι κάτω του κανονικού. Υπάρχει μεγάλος αριθμός ζιζανίων. Αναμένεται σοδειά κάτω του μέσου.
Βαθμός 1: Κακή κατάσταση. Τα φυτά είναι μικρά, ασθενή και σε κακή κατάσταση. Λείπουν φυτά σε πολλά μέρη του αγρού. Τα φυτά υποφέρουν είτε από μη ευνοϊκές μετεωρολογικές συνθήκες ή έχουν υποστεί ζημιές από δυσμενή μετεωρολογικά φαινόμενα, εχθρούς ή ασθένειες. Αναμένεται πολύ μικρή σοδειά.

6.4.3.2. Πυκνότητα της περιοχής σποράς

- **Χρόνοι παρατηρήσεων**

Οι φαινολογικές παρατηρήσεις αφορούν την πυκνότητα της περιοχής σποράς για όλες τις επιλεγμένες καλλιέργειες. Ο αριθμός των παρατηρήσεων εξαρτάται επίσης από τις κλιματολογικές συνθήκες της περιοχής. Η πυκνότητα για κάθε ετήσια καλλιέργεια πρέπει να υπολογίζεται τουλάχιστον τρεις φορές, δηλαδή στην αρχή, στο μέσο και στο τέλος της βλαστικής περιόδου. Η πυκνότητα των πολυετών καλλιεργειών πρέπει να υπολογίζεται όσον αφορά:

- μεγάλα δέντρα, όπως μηλιές, ροδακινιές, κιτροειδή κ.ά.,
- μικρά δέντρα ή θάμνοι, όπως καφές, αμπέλια κ.ά.,
- μικρές πολυετείς καλλιέργειες, όπως φράουλας κ.ά.

Είδος παρατήρησης	Φαινολογική φάση κατά την παρατήρηση	Κατάσταση	Πυκνότητα περιοχής		Ύψος φυτού	Ζημιές από καιρικά φαινόμενα				Ζημιές από παράσιτα και αρρώστιες			Ζιζάνια	Σοδειά	Σοδειά
			Αριθμός φυτών /m^2	Αριθμ. Στελεχών /m^2		Όνομα	Διάρκεια	Ζημιά	% ζημιάς	Διάρκεια	Είδος ζημιάς	% ζημιάς		Ημ/νία συγκομιδής	
ΚΡΙΘΑΡΙ	Πλήρης ωριμότητα	3	492	975	74	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-
ΦΑΣΟΛΙΑ		4	286	-	4	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-
ΚΑΛΑΜΠΟΚΙ	Αμέσως μετά την ωριμότητα	5	-	-	236	-	-	-	-	-	-	-	5	15/4	4.500 kg/hectare
ΒΑΜΒΑΚΙ	Άνοιγμα οφθαλμών	4	-	-	75	-	-	-	-	10-20/4	Φάγωμα φύλλων	10	4	3ο χέρι 19/4	310 kg/hectare
ΖΑΧΑΡΟΚΑΛΑΜΟ	Μετά το όργωμα	3	-	-	40	-	-	-	-	13-16/4	-	25	3	-	-
ΜΑΓΚΟ	Άνθιση	3	-	-		Χαλάζι	14/4 14:40-14:45	Σχίσιμο φύλλων	100	-	-	-	3	-	-
ΠΟΡΤΟΚΑΛΙ	Μεταξύ άνθισης και ωριμότητας	2	-	-		Χαλάζι	14/4 14:40-14:45	Σχίσιμο φύλλων και ρίψη καρπών	75	-	-	-	3	-	-
ΛΕΜΟΝΙ	Μεταξύ άνθισης και ωριμότητας	2	-	-		Χαλάζι	14/4 14:40-14:45	Σχίσιμο φύλλων και ρίψη καρπών	75	-	-	-	3	-	-
ΜΠΑΝΑΝΑ	Μεταξύ 1ης και 2ης φάσης	3	-	-		Χαλάζι	14/4 14:40-14:45	Σχίσιμο φύλλων	75	-	-	-	4	-	-
ΤΟΜΑΤΑ	Ωριμότητα	5	-	-	93	-	-	-	-	-		-	5	1ο χέρι 14/4	850 kg/hectare

Πίνακας 6.7. *Αγρομετεωρολογική έκθεση 10 ημερών των σταδίων ανάπτυξης και παραγωγής φυτών.*

- **Μέθοδοι παρατήρησης**

Υπάρχουν διαφορετικοί τρόποι υπολογισμού του συνολικού αριθμού ανά μοναδιαία περιοχή. Ανάλογα με τον τρόπο φύτευσης, υπάρχουν οι εξής τρεις κύριες μέθοδοι υπολογισμού της πυκνότητας της περιοχής σποράς:

- *Καλλιέργειες σε σειρά:* Περιλαμβάνονται όλες οι ετήσιες καλλιέργειες που αυξάνονται σε σειρές και μερικές πολυετείς καλλιέργειες, κυρίως μικρές, όπως είναι το καλαμπόκι, ο ηλιόσπορος, τα φασόλια, το βαμβάκι, το σουσάμι, ο καπνός, οι φράουλες, η τομάτα, η πιπεριά κ.ά. Για παράδειγμα, σε πεδίο με καλαμπόκι, ο αριθμός των φυτών σε 10 γραμμικά μέτρα στην πρώτη θέση είναι 28, στη δεύτερη 31, στην τρίτη 29, στην τέταρτη 32. Η απόσταση μεταξύ γειτονικών σειρών είναι 90 εκατοστά. Το άθροισμα των φυτών από τις τέσσερις θέσεις πολλαπλασιάζεται επί 25.000 και διαιρείται με την απόσταση μεταξύ των σειρών σε εκατοστά:

$$\frac{(28+31+29+32)25.000}{90} = \frac{120x25.000}{90} = \frac{3.000.000}{90} = 33.330 \quad (6.4)$$

δηλαδή ο αριθμός των φυτών ανά εκτάριο.

- *Καλλιέργειες με συνεχή επιφάνεια:* Περιλαμβάνονται ετήσιες και πολυετείς καλλιέργειες, όπως το σιτάρι, το καλαμπόκι κ.ά. Η πυκνότητα εκφράζεται με τον αριθμό των φυτών ανά m^2.
- *Καλλιέργειες που δεν ανήκουν σε καμιά από τις παραπάνω ομάδες.*

6.4.3.3. Ύψος των φυτών

Σε δέντρα και θάμνους δεν είναι συνήθως εύκολο να μετρηθεί το ύψος, ενώ σε ορισμένες άλλες περιπτώσεις μπορεί να θεωρηθεί μικρής αγρομετεωρολογικής σημασίας. Η μέτρηση του ύψους των φυτών πραγματοποιείται κάθε δέκα μέρες σε όλη τη διάρκεια της βλαστικής περιόδου. Ανάλογα με τις μεθόδους μέτρησης του ύψους, τα φυτά ταξινομούνται στις εξής δύο κύριες ομάδες:

- Για το καλαμπόκι, την οξειά, το ρύζι, τον ηλιόσπορο και το σιτάρι, το ύψος μετριέται μέχρι τη φάση των αυτιών, δηλαδή από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι την κορυφή του αυτιού.
- Στα υπόλοιπα φυτά, σε όλη τη διάρκεια της βλαστικής περιόδου, το ύψος μετριέται από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι την κορυφή του ευθυτενισμένου φυτού.

6.4.3.4. Ζημιά από δυσμενή μετεωρολογικά φαινόμενα

Υπάρχουν διάφορα μετεωρολογικά φαινόμενα που μπορεί να προκαλέσουν ζημιά σε καλλιέργειες:

- **Ξηρασία.** Στη διάρκεια μακρόχρονης ξηρασίας, οι καλλιέργειες υποφέρουν από έλλειψη εδαφικής υγρασίας. Οι περίοδοι υγρασίας είναι δυσμενείς όταν συγχρόνως η θερμοκρασία είναι υψηλή και η υγρασία χαμηλή. Η επίδραση της ξηρασίας στα φυτά εκφράζεται ως εξής: τα φύλλα μαραίνονται στη διάρκεια της ημέρας, ενώ τη νύχτα επανακτούν την υγρασία τους. Τα φύλλα γέρνουν, τα χαμηλότερα από αυτά γίνονται κίτρινα ή σκούρα και μερικά ξεραίνονται ενώ είναι ακόμη πράσινα. Άνθη, βλαστοί και άλλα πέφτουν.
- **Χαλάζι και καταιγίδες.** Η ζημιά περιλαμβάνει σπάσιμο φύλλων, σπάσιμο κλαδιών και κλώνων, πτώση ανθών ή φρούτων, απομάκρυνση του εδάφους κ.ά.
- **Παγετός και δυσμενείς θερμοκρασίες.** Φυτά που υφίστανται ζημιά από παγετό μοιάζουν συνήθως μαραμένα αν και παραμένουν πράσινα. Μερικά φύλλα και άλλα μέρη του φυτού μπορεί να σκουρύνουν, ενώ βλαστοί ή άνθη μπορεί να πέσουν. Εκτός του παγετού, θερμοκρασίες πάνω από το σημείο παγοποίησης μπορεί να έχουν δυσμενείς επιπτώσεις εάν εμφανίζονται σε κάποια βλαστικά στάδια ευαίσθητα σε ορισμένη θερμοκρασία. Πολύ υψηλές θερμοκρασίες προκαλούν επίσης ζημιά, κυρίως όταν εμφανίζονται στην άνθιση και τη συγκομιδή.
- Γενικά, είναι δυνατόν τα φυτά να υφίστανται ζημιά εξαιτίας πολλών φαινομένων συγχρόνως, όπως ξηρασία και αμμοθύελλα ή χαλάζι και έντονη καταιγίδα. Τα δυσμενή μετεωρολογικά φαινόμενα πρέπει να καταγράφονται αμέσως στις φαινολογικές παρατηρήσεις.

6.4.3.5. Ζημιά από εχθρούς και ασθένειες

Τα φυτά υφίστανται ζημιά συνήθως από διάφορα είδη εχθρών και ασθενειών. Οι περισσότερες ζημιές είναι ορατές. Οι αγρομετεωρολόγοι παρατηρούν την εμφάνιση εχθρών και ασθενειών. Σε πολλές περιπτώσεις η εμφάνιση εχθρών και ασθενειών σχετίζεται με τις επικρατούσες μετεωρολογικές συνθήκες. Γενικά, η ζημιά από εχθρούς και ασθένειες επιδρά αρνητικά στην κατάσταση των φυτών και, αν δεν παρατηρηθεί και καταγραφεί, η αιτία μπορεί να αποδοθεί εσφαλμένα στις καιρικές συνθήκες. Όπως και στη ζημιά από δυσμενή μετεωρολογικά φαινόμενα, η ζημιά από εχθρούς και ασθένειες πρέπει να υπολογίζεται και να καταγράφεται το συντομότερο δυνατό για όλες τις καλλιέργειες, που επιλέγονται για φαινολογικές παρατηρήσεις.

6.4.3.6. Έκταση των ζιζανίων

Το μέγεθος των ζιζανίων αποτελεί αντικείμενο παρατηρήσεων διότι επηρεάζει την κατάσταση και τη συγκομιδή των φυτών, ενώ η εξάπλωσή τους σχετίζεται με τις επικρατούσες μετεωρολογικές συνθήκες. Η παρατήρηση πραγματοποιείται ανά δεκαήμερο, σε όλα τα πεδία, με επιλεγμένες καλλιέργειες για φαινολογικές παρατηρήσεις, σε όλη τη διάρκεια της βλαστικής περιόδου. Η έκταση των ζιζανίων εκτιμάται οπτικά και εκφράζεται με τους εξής βαθμούς:

Βαθμός 5: Δεν υπάρχουν ζιζάνια.
Βαθμός 4: Τα ζιζάνια είναι ορατά, αλλά πολύ λίγα.
Βαθμός 3: Δεν υπάρχουν πολλά ζιζάνια, αλλά περισσότερα από το βαθμό 4.
Βαθμός 2: Υπάρχει σημαντικός αριθμός ζιζανίων, αλλά δεν «πνίγουν» πολύ τα φυτά.
Βαθμός 1: Υπάρχουν άφθονα ζιζάνια, τα οποία και πνίγουν τα φυτά σημαντικά.

6.4.3.7. Σοδειά καλλιεργειών

Μία από τις σπουδαιότερες αγρομετεωρολογικές παρατηρήσεις αφορά τη σοδειά των καλλιεργειών. Προς αποφυγή ελλιπούς ή εσφαλμένης πληροφορίας, παρατίθενται οι εξής οδηγίες:

- Αναφέρεται μόνο η σοδειά από πεδία στα οποία εκτελούνται αγρομετεωρολογικές παρατηρήσεις. Η σοδειά πρέπει να είναι από όλα τα φυτά στο πεδίο και όχι μόνο από εκείνα που έχουν επιλεγεί για φαινολογικές παρατηρήσεις.
- Τα στοιχεία σοδειάς παρουσιάζουν από δύο συνιστώσες: μέγεθος (βάρος) και προερχόμενη περιοχή. Το βάρος της σοδειάς εκφράζεται σε κιλά, τόνους κ.ά., ενώ η περιοχή σε εκτάρια, στρέμματα ή άλλη μονάδα, αλλά και τα δύο σε μονάδες που χρησιμοποιούν οι τοπικοί αγρότες. Οι δύο μονάδες αναφέρονται πάντα μαζί, όπως κιλά ανά στρέμμα.
- Όταν οι παρατηρήσεις πραγματοποιούνται σε πεδίο μεγαλύτερο ή μικρότερο του ενός εκταρίου, τότε η σοδειά πρέπει να ανάγεται στο ένα εκτάριο.
- Μερικές φορές αγρομετεωρολογικές παρατηρήσεις πραγματοποιούνται σε μεμονωμένα δέντρα φρούτων, που δεν αυξάνονται σε συστάδες. Στις περιπτώσεις αυτές, όχι μόνο το βάρος, αλλά και ο αριθμός των φρούτων πρέπει να αναφέρονται.
- Εκτός από το βάρος ανά μονάδα επιφάνειας, πρέπει επίσης να αναφέρεται η ημερομηνία συγκομιδής.
- Άλλη πληροφορία που παρέχεται είναι η περιεχόμενη υγρασία σε μερικά γεωργικά προϊόντα, όπως είναι τα σιτηρά. Είναι σημαντικό να γνωρίζουμε αν η σοδειά προέρχεται από νεοσυλλεγέντα σιτηρά ή από σιτηρά που έχουν ξηρανθεί για μερικές εβδομάδες μετά τη συλλογή.
- Παράλληλα με την περιεχόμενη υγρασία, για μερικά προϊόντα υπάρχουν πολλές άλλες πληροφορίες που καθιστούν τα στοιχεία περισσότερο χρήσιμα.

6.5. Μετεωρολογικές και αγρομετεωρολογικές προγνώσεις

Ο καιρός διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη γεωργική παραγωγή, καθόσον έχει μια προφανή επίδραση στην ανάπτυξη και την εξέλιξη των καλλιεργειών, τη συγκομιδή, την εμφάνιση εχθρών και ασθενειών, καθώς και τις ανάγκες σε νερό και λίπανση. Κατά συνέπεια, δεν υπάρχει τομέας της γεωργικής πρακτικής που να είναι απαλλαγμένος από την επίπτωση του καιρού. Για βέλτιστη παραγωγικότητα σε μια περιοχή, οι καλλιέργειες και οι

καλλιεργητικές πρακτικές πρέπει να είναι τέτοιες ώστε οι απαιτούμενες μετεωρολογικές συνθήκες να συμβαδίζουν με τη χρονική εξέλιξη του καιρού, για να αποφεύγονται τόσο ενδημικές περίοδοι ασθενειών, όσο και δυσμενή καιρικά φαινόμενα. Σε τέτοιες συνθήκες στρατηγικής σχεδίασης καλλιεργειών και καλλιεργητικών πρακτικών, μικρής εμβέλειας κλιματικά δεδομένα, τόσο ρουτίνας όσο και αποτελέσματα επεξεργασιών, διεκδικούν πρωταρχικό ρόλο. Ωστόσο, παρά την προσεκτική αγρονομική σχεδίαση στη μικροκλίμακα των καλλιεργειών, εμφανίζονται διάφορα καιρικά φαινόμενα σε ετήσια ή περιοδική βάση. Επισημαίνεται ότι είναι δυνατή μια προσαρμογή στις επιπτώσεις δυσμενών καιρικών συνθηκών, εφόσον υπάρχει έγκαιρη πρόγνωση του αναμενόμενου καιρού, καθόσον αγρονομικές στρατηγικές σε μεταβαλλόμενο καιρό είναι διαθέσιμες. Με την έναρξη της βλαστικής περιόδου, απαιτούνται μέσης κλίμακας προγνώσεις καιρού, που επιτρέπουν στους αγρότες να οργανώσουν και να προσαρμόσουν τις καλλιεργητικές πρακτικές.

6.5.1 Μετεωρολογικές προγνώσεις βραχείας και μέσης διάρκειας

Οι βραχυπρόθεσμες και μέσης διάρκειας προγνώσεις περιγράφουν τη συμπεριφορά μετεωρολογικών μεταβλητών, όπως είναι η βροχόπτωση, η νεφοκάλυψη, η θερμοκρασία του αέρα, η ηλιακή ακτινοβολία, η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου, καθώς και ορισμένα καιρικά φαινόμενα, όπως τα μετωπικά συστήματα, οι αντικυκλώνες, οι τροπικοί κυκλώνες, οι ριπαίοι άνεμοι και άλλα συναφή. Το τυπικό εύρος είναι πέραν των 12 ωρών και έως 72 ώρες για τις προγνώσεις μικρής εμβέλειας (Short-Range Forecast/SRF) και μετά 3 ημέρες και μέχρι 10 ημέρες για τις προγνώσεις μεσαίου βεληνεκούς (Medium-Range Forecast/MRF).

6.5.1.1. Χρησιμότητα για τη γεωργία

Οι SRF και οι MRF είναι σημαντικές για τους γεωργούς στο σχεδιασμό έργων, όπως είναι:

- οι προπαρασκευαστικές δραστηριότητες, συμπεριλαμβανομένης της προετοιμασίας εδάφους και της προετοιμασίας του φυτικού υλικού,
- η φύτευση ή η σπορά,
- η διαχείριση των καλλιεργειών, οπωροφόρων δέντρων και αμπελιών, η εφαρμογή λιπασμάτων, η άρδευση, η αραίωση, το κορφολόγημα, το βοτάνισμα, η αντιμετώπιση παρασίτων και ασθενειών,
- η διαχείριση των συστημάτων βόσκησης,
- η συγκομιδή, η επεξεργασία μετά τη συγκομιδή και η μεταφορά των προϊόντων,
- οι δραστηριότητες ζωικής παραγωγής, όπως για επιχειρήσεις γαλακτοκομικών προϊόντων, τα συστήματα εκτροφής αγελάδων, αρνιών και άλλα συστήματα κτηνοτροφίας.

Επιπλέον, οι ποσοτικές προβλέψεις αποτελούν μια σημαντική πηγή δεδομένων για τα μοντέλα προσομοίωσης που παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες στους γεωργούς, όπως προσομοίωση της φαινολογίας των καλλιεργειών, κύκλος του νερού και των θρεπτικών συστατικών, εκτίμηση φυτικής παραγωγής, ζιζάνια, ασθένειες και κύκλος παρασίτων.

6.5.1.2. Τεχνολογία επικαιροποιημένης πρόγνωσης

Η τεχνολογία προγνώσεων εξελίσσεται συνεχώς, λόγω της επέκτασης της επιστημονικής γνώσης σχετικά με τα ατμοσφαιρικά συστήματα και της τεχνολογικής προόδου σε συστήματα παρακολούθησης, που χρησιμοποιούν δορυφόρους, σε δίκτυα αυτόματων μετεωρολογικών σταθμών, radar, συστήματα ανίχνευσης αστραπών και κεραυνών και άλλα συναφή. Εξελισσόμενες τεχνολογίες περιλαμβάνουν εργαλεία πρόγνωσης, όπως τεχνικές αριθμητικής πρόγνωσης καιρού (NWP: Numerical Weather Prediction), στατιστικές μεθόδους, εμπειρικά μοντέλα και μεθόδους που βασίζονται σε εμπειρία προγνώσεων. Η άμεση και μικρής εμβέλειας πρόγνωση καιρού βασίζεται στην ανάλυση και την προέκταση των τροχιών, που αναφέρονται σε ένα σχετικά μεγάλο εύρος πληροφοριών, όπως εικόνες radar, δορυφορικές εικόνες, μοντέλα αριθμητικής πρόγνωσης καιρού (NWP), καθώς και τοπικές και περιφερειακές παρατηρήσεις. Σε μικρού και μεσαίου βεληνεκούς προγνώσεις, η εξέλιξη των ατμοσφαιρικών μεταβλητών προέρχεται κυρίως από αριθμητικές μεθόδους (NWP). Η εμπειρία του μετεωρολόγου είναι σημαντική, για να αξιολογηθεί η περιοχική ακρίβεια των εξαγομένων ενός ή περισσότερων προγνωστικών μοντέλων.
Το έργο των προγνώσεων έχει εξελιχθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια και απεικονίζει τα πλεονεκτήματα των επιστημονικών και τεχνολογικών βελτιώσεων. Η ικανότητα των αριθμητικών μοντέλων έχει βελτιωθεί τόσο πολύ,

ώστε κάποια κέντρα έχουν χρησιμοποιήσει αυτοματοποιημένα πρότυπα πρόγνωσης, επιτρέποντας έτσι στους μετεωρολόγους να επικεντρωθούν στις καιρικές συνθήκες, που αναμένεται να έχουν σημαντική επίπτωση, ή σε περιοχές με σημαντικό μετεωρολογικό ενδιαφέρον.
Επισημαίνεται ότι δεν είναι εύκολο να προσδιοριστεί μια πρότυπη μεθοδολογία για τη δημιουργία μετεωρολογικών προγνώσεων, δεδομένου ότι οι χρησιμοποιούμενες μέθοδοι εξαρτώνται από διάφορους παράγοντες (Coiffier, 2004), όπως είναι:

- το εύρος της πρόγνωσης,
- το μέγεθος της περιοχής που πρέπει να καλυφθεί, δηλαδή ένα μεγάλο μέρος του πλανήτη, μια περιφέρεια, μια μικρή χώρα ή μια πόλη,
- το γεωγραφικό πλαίσιο και τη σχετική κλιματολογία, όπως μεσαία γεωγραφικά πλάτη, τροπικές ή περιοχές στον ισημερινό, ή απομονωμένα νησιά,
- ο δυνητικός κίνδυνος των αναμενόμενων δυσμενών καιρικών συνθηκών σε διάφορες περιοχές,
- η οργάνωση των υπηρεσιών πρόγνωσης, όπως πολλαπλών χρήσεων ή εξειδικευμένες για τη γεωργία,
- το διαθέσιμο τεχνικό περιβάλλον, όπως ίδια ανάπτυξη NWP ή χρήση εξωτερικών NWP, επιτόπιες παρατηρήσεις, δορυφορικές εικόνες, εικόνες radar και δίκτυο ανίχνευσης αστραπών, απαραίτητες υποδομές για τις ανάγκες της πρόγνωσης και πρόσβαση στο διαδίκτυο,
- τεχνογνωσία προγνώσεων, δηλαδή επαγγελματική και επιχειρησιακή εμπειρία σχετικά με την επιλεγμένη περιοχή,
- ο τελικός χρήστης αναφοράς των προγνώσεων, δηλαδή υπηρεσίες γενικού σκοπού ή εξειδικευμένες σε τομείς όπως η γεωργία, η πολιτική προστασία, η αεροπορία, οι θαλάσσιες μεταφορές, οι υδρολογικές υπηρεσίες και η διαχείριση των υδάτων και των εθνικών δρόμων,
- η αξιοπιστία της τρέχουσας κατάστασης των μετεωρολογικών μεταβλητών.

6.5.1.3. Προγνώσεις και NWP

Η αριθμητική πρόγνωση καιρού παρέχει χρήσιμες πληροφορίες για περίπου 6-12 ημέρες (120-240 ώρες) στο μέλλον. Βασίζεται στην επίλυση ενός πολύπλοκου συνόλου υδροδυναμικών εξισώσεων, που περιγράφουν την εξέλιξη της ατμόσφαιρας με βάση τις αρχικές συνθήκες στην ατμόσφαιρα και στην επιφάνεια της Γης. Δεδομένου ότι οι αρχικές συνθήκες δεν είναι ακριβώς γνωστές, όλες οι προγνώσεις αρχίζουν με εκτιμήσεις. Δυστυχώς, το σύστημα είναι πολύ ευαίσθητο σε μικρές αλλαγές στις αρχικές συνθήκες, δηλαδή είναι ένα χαοτικό σύστημα, που περιορίζει την ικανότητα ασφαλούς καιρικής πρόγνωσης πέραν των 6-12 ημερών. Οι MRF έχουν προκύψει από τη χρήση των αποτελεσμάτων ενός ή περισσότερων παγκόσμιων μοντέλων NWP. Επιπλέον, η πρόγνωση SRF βασίζεται στα τοπικά μοντέλα για μια περιοχή (LAMS). Επισημαίνεται ότι η τρέχουσα διαθεσιμότητα του LAMS μέχρι 2-3 ημέρες μετά την έκδοσή του μπορεί να θεωρηθεί το όριο μεταξύ SRF και MRF. Είναι σημαντικό να διαχωριστούν οι δύο αυτές προγνώσεις και να προσδιοριστούν τα κύρια εισαγόμενα, όπως NWP, καθώς και τα εξαγόμενα. Για παράδειγμα, οι στατιστικές εξαγόμενων μοντέλων (Model Output Statistics/MOS) εφαρμόζονται σε NWP, προκειμένου να βελτιωθεί η πρόγνωση δεξιοτήτων για φαινόμενα τοπικά ή μικροκλίμακας που δεν έχουν διαμορφωθεί σωστά με μηχανιστικό τρόπο, όπως παγετός, μέγιστη θερμοκρασία, ύψος βροχής ή πιθανότητα.

6.5.1.4. Προσέγγιση πιθανοτήτων σε SRF και MRF

Μια σημαντική εξέλιξη στις SRF και MRF αποτελεί η εισαγωγή της πιθανολογικής προσέγγισης των μελλοντικών καιρικών καταστάσεων. Η ίδια η ορολογία που υιοθετείται στη μετεωρολογία εκφράζει μερικές φορές αυτή την αβεβαιότητα. Για παράδειγμα, μια υποκειμενική πιθανολογική πρόγνωση εφαρμόζεται σε μια αμπελουργική περιοχή της Ιταλίας. Η πιθανότητα υετού είναι αναγκαία για τους αγρότες, προκειμένου να εφαρμόσουν ψεκασμούς με φυτοφάρμακα στη διάρκεια της βλαστικής περιόδου. Οι καθολικές προγνώσεις είναι μια μαθηματική μέθοδος, με την οποία συνυπολογίζεται η εγγενής αβεβαιότητα των MRF και SRF. Οι παραδοσιακές προγνώσεις καιρού βασίζονται σε εξαγόμενα πολύ καλών μοντέλων, που διατίθενται και χρησιμοποιούνται μέχρι να χάσουν την ικανότητά τους, λόγω της ανάπτυξης μικρών σφαλμάτων στις αρχικές συνθήκες. Στις προγνώσεις μεσαίου βεληνεκούς, το μοντέλο δεξιοτήτων χάνεται συνήθως έπειτα από έξι ημέρες περίπου, ανάλογα με την εποχή. Μια εναλλακτική μέθοδος, που παράγει προγνώσεις με αξιοπιστία μέχρι και για 15 ημέρες μετά την αρχική πρόγνωση, χρησιμοποιεί αυτό που ονομάζεται μέθοδο «καθολικής πρόγνωσης», το οποίο έχει εισαχθεί για την παραγωγή

βελτιωμένων μεσοπρόθεσμων (3-15 ημέρες) μετεωρολογικών προγνώσεων. Δεν χρησιμοποιεί μόνο ένα «τρέξιμο» μοντέλου, αλλά πολλά, με ελαφρώς διαφορετικές αρχικές συνθήκες. Κατά μέσο όρο, δημιουργείται ο «καθολικός μέσος» των διαφόρων προγνώσεων. Αυτό το σύνολο των μέσων τιμών πιθανώς είναι καλύτερο, επειδή χρησιμοποιεί τον μέσο όρο από πολλές πιθανές αρχικές καταστάσεις και ομαλοποιεί, ουσιαστικά, τη χαοτική φύση του κλίματος. Επιπλέον, τώρα μπορεί να γίνει πρόγνωση των πιθανοτήτων των διαφορετικών συνθηκών, λόγω του μεγάλου συνόλου των διαθέσιμων προγνώσεων.

6.5.2. Μετεωρολογικές προγνώσεις για τη γεωργία

6.5.2.1. Απαιτήσεις και χαρακτηριστικά μετεωρολογικών προγνώσεων

Προγνώσεις σχετικές με ενδεχόμενη καθυστέρηση στην έναρξη της βλαστικής περιόδου έχουν επίπτωση στις συνήθεις αγρονομικές πρακτικές σε επίπεδο αγρού. Επίσης, προγνώσεις για τη γεωργία πρέπει να ισχύουν για περιόδους τουλάχιστον 10 ημερών και όχι λιγότερο των 7 ημερών. Επιπλέον, η διάδοση και η διασπορά των μετεωρολογικών προγνώσεων σε γεωργικούς χρήστες πρέπει να είναι σχεδόν άμεσες. Κατά συνέπεια, οι μετεωρολογικές προγνώσεις πρέπει όχι μόνο να είναι έγκαιρες, αλλά και πολύ ακριβείς. Οι μετεωρολογικές προγνώσεις για τη γεωργία εκδίδονται για μικρές περιοχές.

Κάποια χαρακτηριστικά μετεωρολογικών προγνώσεων για τη γεωργία είναι πολύ διακριτά από τις συνοπτικές προγνώσεις καιρού. Για παράδειγμα, οι βροχοπτώσεις που δεν συνεισφέρουν στην υγρασία του εδάφους στο ριζόστρωμα των καλλιεργειών θεωρούνται αναποτελεσματικές. Οι γεωργικά σημαντικές βροχές (Agriculturally Significant Rains/ASR) σηματοδοτούν την έναρξη της καλλιεργητικής περιόδου και συνεισφέρουν στις ανάγκες που έχουν οι καλλιέργειες σε νερό. Για γεωργικούς σκοπούς, η έναρξη και η λήξη των ASR θεωρούνται σημαντικές. Επίσης, η χρήση της ονομαζόμενης εξαρτώμενης βροχόπτωσης (Dependable Precipitation/DP) για διάφορα επίπεδα ποσοστών πιθανότητας, καθώς και η δυνητική εξατμισοδιαπνοή (Potential Evapotranspiration/PET) έχουν προταθεί (WMO, 2010) να εκδίδονται για την αρχή και το τέλος της βλαστικής περιόδου. Σημαντικές θεωρούνται και εποχικές προγνώσεις για την περίοδο των βροχοπτώσεων. Ακόμα, παγετός σε εύκρατες περιοχές μπορεί να αποτελέσει σοβαρή απειλή για τη γεωργική παραγωγή.

Η μετεωρολογική πρόγνωση για τη γεωργία πρέπει να αναφέρεται σε όλα τα στοιχεία του καιρού που άμεσα επηρεάζουν τη σχεδίαση ή τις λειτουργίες του αγροκτήματος. Τα στοιχεία αυτά διαφέρουν από τόπο σε τόπο και από εποχή σε εποχή. Οι συνήθεις παράμετροι, που περιλαμβάνουν οι μετεωρολογικές προγνώσεις, είναι:

- το ποσό και ο τύπος της νεφοκάλυψης,
- η βροχόπτωση και το χιόνι,
- η μέγιστη θερμοκρασία, η ελάχιστη θερμοκρασία και η θερμοκρασία του σημείου δρόσου,
- η σχετική υγρασία,
- η διεύθυνση και η ταχύτητα του ανέμου,
- τα ακραία φαινόμενα, όπως καύσωνες, ομίχλη, παγετός, χαλάζι, καταιγίδες, ριπαίοι άνεμοι, λαίλαπες, βαρομετρικά χαμηλά, κυκλώνες και ανεμοστρόβιλοι.

Επιπλέον, μια γεωργική πρόγνωση καιρού πρέπει να περιέχει πληροφορίες για:

- τις ώρες της ηλιοφάνειας,
- την ηλιακή ακτινοβολία,
- το σημείο δρόσου,
- την ύγρανση των φύλλων,
- την εξάτμιση της λεκάνης,
- τις συνθήκες καταπόνησης του εδάφους από την υγρασία και τη συμπληρωματική άρδευση για βροχοδίαιτες καλλιέργειες,
- ειδική πληροφορία σχετικά με την εξέλιξη των μετεωρολογικών μεταβλητών στο φύλλωμα για κάποιες ειδικές περιπτώσεις,
- το μικροκλίμα εντός των καλλιεργειών σε ειδικές περιπτώσεις.

6.5.2.2. Προγνώσεις για γεωργικούς σκοπούς

Για να φτάσουν οι προγνώσεις σε γεωργικούς χρήστες, είναι απαραίτητες η προσαρμογή και η επεξεργασία των αρχικών προγνώσεων. Ακολουθεί μια ειδική περιγραφή της επεξεργασίας των προγνώσεων σε μεμονωμένες μετεωρολογικές μεταβλητές για γεωργικούς σκοπούς:

- **Νεφοκάλυψη.** Συνήθως σε προγνώσεις νεφοκάλυψης χρησιμοποιείται ποσοστιαία ταξινόμηση του ουρανού σε νέφη. επίσης, είναι σημαντικό να αναφέρονται τα χαρακτηριστικά των επικρατούντων νεφών.
- **Φωτεινή ηλιοφάνεια (bright sunshine).** Δίνεται το τμήμα της ολικής πλανητικής ηλιακής ακτινοβολίας. Ακόμα, σε προγνώσεις νεφοκάλυψης πρέπει να προσδιορίζεται το τμήμα του νέφους που καλύπτει τον ήλιο, μαζί με τη συνολική νεφοκάλυψη.
- **Ηλιακή ακτινοβολία.** Οι κύριες παράμετροι, η ακτινοβολία από τον ήλιο και οι δυνητικές ώρες ηλιοφάνειας, που απαιτούνται για να προσδιορίσουν την ηλιακή ακτινοβολία από τις ώρες φωτεινής ηλιοφάνειας είναι διαθέσιμες σε εβδομαδιαία βάση για κάθε τοποθεσία και περίοδο.
- **Υετός.** Το χιόνι και η βροχόπτωση είναι από τις πιο δύσκολες προγνωστικές μεταβλητές. Προγνώσεις βροχής μπορεί να προσδιοριστούν υιοθετώντας κάποιες σταθερές κατηγορίες, που βασίζονται στο κλίμα και το γεωργικό ενδιαφέρον της κάθε περιοχής. Μια πιθανολογική προσέγγιση σε ημερήσια βάση είναι πολύ σημαντική, για να μεγιστοποιήσει τη χρησιμότητα της πρόγνωσης αυτής. Ακόμα, η ομίχλη μπορεί να συνεισφέρει σημαντικά στις ανάγκες σε νερό των καλλιεργειών και μπορεί να μετρηθεί από τα βροχόμετρα.
- **Θερμοκρασία.** Η πρόγνωση της θερμοκρασίας του αέρα είναι πολύ σημαντική για αρκετές αγρομετεωρολογικές εφαρμογές. Οι προγνώσεις της θερμοκρασίας του εδάφους, του νερού, του φυλλώματος ή ειδικών οργάνων του φυτού είναι επίσης σημαντικές σε κάποιες ειδικές περιπτώσεις.
- **Υγρασία**. Για την ημέρα συνολικά, η θερμοκρασία του σημείου δρόσου είναι μια συντηρητική παράμετρος. Ευκολότερη είναι η πρόγνωση, καθόσον μεταβολές σε αυτή συνδυάζονται με τη διέλευση νέων συστημάτων καιρού. Επίσης, από μέγιστες θερμοκρασίες, ελάχιστες θερμοκρασίες και θερμοκρασίες σημείου δρόσου μπορούν να εξαχθούν μέγιστες, ελάχιστες και μέσες τιμές υγρασίας.
- **Άνεμος**. Η πρόγνωση της ταχύτητας του ανέμου είναι σημαντική για πολλές διαφορετικές γεωργικές δραστηριότητες. Επίσης, μπορεί να προσδιοριστεί η διεύθυνση του ανέμου. Ακόμα, θεωρείται σημαντική η αναμενόμενη μεταβλητότητα της ταχύτητας και της διεύθυνσής του. Το μηνιαίο ροδόγραμμα ενός σταθμού αποτελεί κλιματολογική παρουσίαση της συχνότητας εμφάνισης του ανέμου. Για γεωργικούς σκοπούς, η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου απαιτούνται σε ύψος 2 m.
- **Ύγρανση των φύλλων.** Η ύγρανση των φύλλων προκύπτει από τη βροχόπτωση, τη δρόσο ή την ομίχλη. Η διάρκεια του φαινομένου μπορεί να είναι σημαντική για τη σχεδίαση διαφόρων δραστηριοτήτων, όπως είναι τα εντομοκτόνα ή η συγκομιδή. Συνεπώς, ο αριθμός των ωρών κατά τις οποίες η θερμοκρασία του σημείου δρόσου είναι πάνω από την προσαρμοσμένη θερμοκρασία του αέρα δίνει πληροφορία για τη διάρκεια της ύγρανσης των φύλλων.
- **Εξατμισοδιαπνοή.** Η πρόγνωση εξατμισοδιαπνοής μπορεί να είναι σημαντική για τη βελτίωση της γνώσης της κατάστασης του νερού των καλλιεργειών. Αυτού του είδους η πρόγνωση βασίζεται σε ακριβή πρόγνωση της ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας, της σχετικής υγρασίας και της ταχύτητας του ανέμου. Σε πραγματικές συνθήκες, η πρόγνωση εξατμισοδιαπνοής πρέπει να βασίζεται σε πρόγνωση της εξάτμισης της λεκάνης.
- **Υδατικό ισοζύγιο.** Η ποσοτική πρόγνωση της πιθανότητας πλεονάσματος ή ελλείμματος νερού για βροχοδίαιτες καλλιέργειες, καθώς και ο χρόνος επέμβασης και το ποσό της άρδευσης, θεωρούνται πολύ χρήσιμα.
- **Ακραία φαινόμενα.** Το χαμηλό επίπεδο προγνωστικότητας ακραίων φαινομένων στη μεσοκλίμακα και στη μικροκλίμακα, όπως παγετός, καταιγίδες, χαλάζι, ανεμοστρόβιλοι και άλλα συναφή, θεωρείται σημαντικός περιορισμός της χρησιμότητας των προγνώσεων για τη γεωργία.

6.5.2.3. Ειδικές γεωργικές προγνώσεις καιρού

Οι ειδικές γεωργικές προγνώσεις καιρού παρέχουν την απαραίτητη μετεωρολογική πληροφορία, που βοηθά του αγρότες σε ορισμένες αποφάσεις τους κατά τη λειτουργία του αγροκτήματος σχετικά με καλλιέργειες και μείωση του κόστους. Ενδεικτικά, αναφέρονται οι εξής ειδικές περιπτώσεις:

- **Σπορά.** Η σπορά εξαρτάται από το κατάλληλο φως και την υγρασία, καθώς και τη θερμοκρασία του εδάφους. Συνεπώς, οι ημερήσιες μεταβολές της θερμοκρασίας του εδάφους στη ζώνη σποράς θεωρούνται χρήσιμες. Επίσης, προγνώσεις για τη θερμοκρασία του εδάφους εκδίδονται συνήθως μία φορά κάθε μέρα, πριν από και στη διάρκεια της κανονικής βλαστικής περιόδου.
- **Εφαρμογή αγροχημικών.** Η χρήση αγροχημικών είναι αναπόφευκτη στη γεωργική παραγωγή. Οι κρίσιμες μετεωρολογικές παράμετροι που συμβάλλουν σε αποτελεσματική χρήση είναι η θερμοκρασία του αέρα, ο υετός, το ποσό της υγρασίας του εδάφους κατά το προηγούμενο και κατά το επόμενο 24ωρο, καθώς και η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου.
- **Απώλειες εξάτμισης για άρδευση.** Το αρδευτικό νερό είναι σήμερα δαπανηρό για τους αγρότες στα περισσότερα αγροσυστήματα. Εκτιμήσεις ημερήσιας κατανάλωσης μπορεί να σχετίζονται με την απώλεια ελεύθερου νερού από την εξάτμιση της λεκάνης τύπου Α. Ο ρυθμός καταναλωτικής χρήσης μπορεί να εκτιμηθεί όχι μόνο από απώλειες της εξάτμισης της λεκάνης, αλλά επίσης έμμεσα, από τις μετρήσεις της θερμοκρασίας και από τον υπολογισμό του ισοζυγίου ενέργειας (βλέπε Κεφάλαιο 4).
- **Συγκομιδή.** Η συγκομιδή της γεωργικής παραγωγής και η άμεση διαδικασία πριν από την αποθήκευση θεωρούνται θεμελιώδους σημασίας, περισσότερο μάλιστα από κάθε άλλη λειτουργία πεδίου. Οι μετά τη συγκομιδή λειτουργίες, όπως το μάζεμα και η αποθήκευση, απαιτούν ειδικές προγνώσεις συγκεκριμένων στοιχείων. Οι κύριες μετεωρολογικές παράμετροι για τη συγκομιδή καλλιεργειών είναι η βροχόπτωση και η θερμοκρασία του αέρα, ενώ για τις λειτουργίες μετά τη συγκομιδή, μαζί με τις παραπάνω, θεωρούνται σημαντικές η ηλιοφάνεια, ο άνεμος, η σχετική υγρασία και η θερμοκρασία του σημείου δρόσου.

6.5.3. Αγρομετεωρολογική πρόγνωση

Η αγρομετεωρολογική πρόγνωση καλύπτει όλα τα θέματα προγνώσεων στην αγρομετεωρολογία. Στην ουσία, ο σκοπός της αγρομετεωρολογικής πρόγνωσης συμπίπτει με το σκοπό της ίδιας της αγρομετεωρολογίας. Επιπλέον, ολόκληρη η αγρομετεωρολογική σχεδίαση σε επίπεδο αγρού και περιοχικά περιέχει, τουλάχιστον εννοιολογικά, κάποια μορφή των επιπτώσεων της πρόγνωσης, έτσι ώστε εργαλεία υποστήριξης αποφάσεων και πρόγνωσης να επικαλύπτονται σε μεγάλο βαθμό. Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι επιχειρησιακή πρόγνωση πραγματοποιείται σε διάφορες χωρικές κλίμακες. Στο επίπεδο της μικροκλίμακας, υπάρχει το πεδίο ή το αγρόκτημα, για την υποστήριξη των αποφάσεων από αγρότες, τη διαχείριση του αρδευτικού νερού και άλλα συναφή. Η μακροκλίμακα αποτελεί την περιοχική κλίμακα όπου οι περιοχικές προγνώσεις αναφέρονται σε γεωργικές στατιστικές και απευθύνονται σε διάφορες κατηγορίες χρηστών, όπως διαχειριστές ασφάλειας τροφίμων, διαχειριστές εμπορίας τροφίμων κ.ά. Θεωρείται απαραίτητη η διάκριση μεταξύ πρόγνωσης και παρακολούθησης (monitoring). Παραδοσιακά, η παρακολούθηση υλοποιείται μέσω της άμεσης παρατήρησης του σταδίου και της κατάστασης των οργανισμών που παρακολουθούνται ή της παρατήρησης των περιβαλλοντικών συνθηκών που συμβάλλουν σε αυτές.

6.5.3.1. Εφαρμογές σε επίπεδο αγρού

Η παραδοσιακή χρήση του καιρού στη διαχείριση αγροκτήματος και πεδίου θεωρείται σημαντική, αλλά δεν είναι η μόνη χρήση της μετεωρολογικής πληροφορίας στο αγρόκτημα. Εκτός από τις πολύ γνωστές άμεσες επιπτώσεις του καιρού στη γεωργική παραγωγή, κατά τη διαχείριση ενός αγροκτήματος πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και οι έμμεσες επιπτώσεις του καιρού. Για παράδειγμα, η θερμοκρασία καθορίζει το ρυθμό ανάπτυξης και εξέλιξης των εντόμων, οι συνδυασμοί θερμοκρασίας και υγρασίας επηρεάζουν το ρυθμό των μολύνσεων, οι ρυθμοί εξατμισοδιαπνοής υπολογίζουν τους ρυθμούς χρήσης του νερού και διαχείρισης των αρδεύσεων, ενώ η ακτινοβολία και η διαθεσιμότητα υγρασίας είναι σημαντικές για το ρυθμό λίπανσης των καλλιεργειών. Αυτές οι επιπτώσεις του καιρού στην παραγωγή δεν είναι άμεσα ορατές, αλλά παρουσιάζουν σημαντική οικονομική δυναμική όταν

ενσωματώνονται στη διαδικασία διαχείρισης αγροκτήματος. Συμπερασματικά, σχετικά με τη σπουδαιότητα της πρόγνωσης καιρού στη διαχείριση του αγροκτήματος και του πεδίου, θεωρούνται κρίσιμα τα εξής θέματα:

- Η τρέχουσα μετεωρολογική πληροφορία (π.χ. πρόγνωση) πρέπει να παρέχεται σε επίπεδο ρουτίνας από εξωτερικό φορέα, για τη λήψη αποφάσεων. Είναι αυτονόητο ότι οι αγρότες δεν μπορούν να παρατηρούν ή να αναπτύσσουν όλη την απαραίτητη πληροφορία.
- Οι διαχειριστές πρέπει να ενσωματώνουν, όχι απαραίτητα τέλεια, τη μετεωρολογική πληροφορία στη διαδικασία της λήψης αποφάσεων.
- Οι αγρότες μπορούν να αναπτύσσουν και να αξιολογούν τις διαδικασίες αποφάσεων για άμεσες επιπτώσεις του καιρού, αλλά πρέπει να στηρίζονται σε εξωτερικούς ειδικούς, για την υποστήριξη αποφάσεων σχετικά με τις έμμεσες επιπτώσεις του καιρού.

Η «ανταπόκριση του αγροκτήματος» είναι μια μεθοδολογία που έχει αναπτυχθεί και βασίζεται στην ιδέα ότι οι αγρότες μπορεί να βελτιώσουν την απόδοση και τα έσοδά τους μέσω στενής παρακολούθησης του καιρού σε επίπεδο αγροκτήματος και αξιοποιώντας την πληροφορία αυτή στις καθημερινές διαχειριστικές αποφάσεις.

6.5.3.2. Συστήματα προειδοποιήσεων

Πολλά συστήματα προειδοποιήσεων στοχεύουν τόσο σε μεμονωμένους χρήστες όσο και σε φορείς. Ωστόσο, οι κυβερνήσεις είναι συνήθως ο κύριος στόχος για προειδοποιήσεις ασφάλειας τροφίμων. Το σημερινό πλαίσιο επιτήρησης τροφίμων και συστημάτων παρακολούθησης λειτουργεί σε πάνω από εκατό χώρες διεθνώς, με επιμέρους ιδιαιτερότητες ανά χώρα. Τα συστήματα αυτά είναι γνωστά ως Συστήματα Έγκαιρων Προειδοποιήσεων (τροφίμων) (Early Warning System/EWS). Η συνεισφορά των EWSs συνίσταται:

- στην παροχή έγκαιρης ειδοποίησης, για τη λήψη αποφάσεων σε εθνικό επίπεδο σχετικά με επικείμενα ελλείμματα ή πλεονάσματα στην παραγωγή τροφίμων,
- στη βελτίωση της σχεδίασης της εμπορίας, προώθησης και διανομής τροφίμων,
- στη μείωση της διακινδύνευσης (ρίσκου) και της δεινοπάθησης του πληθυσμού σχετικά με τη φτώχεια.

Βιβλιογραφικές αναφορές

Brown, D.M. (1978). *Heat Units for Corn in Southern Ontario*. Factsheet No. 78-063. Guelph: Ontario Ministry of Agriculture and Food.

Cao, W. & Moss, D.N. (1997). Modelling phasic development in wheat: a conceptual integration of physiological components. *Journal of Agricultural Science*, 129(2):163-172.

Chang, J.H. (1974). *Climate and Agriculture: An Ecological Survey*. Chicago: Aldine Publishing Co.

Coiffier, J. (2004). Weather forecasting technique considered as a sequence of standard processes from the forecaster's point of view. *Presented at WMO Workshop on Severe and Extreme Events Forecasting*, Toulouse, 26-29 October 2004.

Courbaud, B., Coligny, F. and Cordonnier, T. (2003). Simulating radiation distribution in a heterogeneous Norway spruce forest on a slope. *Agricultural and Forest Meteorology*. 116:1-18.

Dalezios, N.R. & Tziortzios, S. (Eds). (2006). *Phenology-Agroclimatology*. In Proceedings of Intern. Conference Univ. of Thessaly, Volos, Greece. 3rd Vol. of HAICTA, sponsored by HAICTA and EC, 785-1061.

Δαλέζιος, Ν.Ρ. (2010). *Μικρομετεωρολογία-Βιομετεωρολογία. Πανεπιστημιακές Παραδόσεις*. Βόλος: Εκδόσεις Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

Δαλέζιος, Ν.Ρ. (2005). *Αγρομετεωρολογία. Πανεπιστημιακές Παραδόσεις*. 5η έκδοση, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

Dawod, M.A.A. (1996). *Climatological Rules in Assessing Crop Production Potential in Egypt*. (MSc Thesis). Cairo University.

Evans, L.T. (1973). The effect of light on plant growth, development and yield. In Slatyer, R.O. (Ed.). *Plant Response to Climate Factors, Proceedings of the Uppsala Symposium* (pp. 21-31), Paris: UNESCO.

Gommes, R. (1998). Agrometeorological crop yield forecasting methods. In Holland, T. and Van den Broecke, M.P.R. (Eds.). Proceedings of the International Conference on Agricultural Statistics, 18-20 March 1998, Washington: DC Voorburg, International Statistical Institute.

Koch, E. (2009). *Establishing a European Phenological Data Platform*. Final Report for COST725 program, European Union/COST Actions.

Lomas, J., Gat, Z. and Shifrin, N. (1970). Methods of forecasting the ripening rates of citrus fruit in various regions. *Agricultural Meteorology*. 7:321-327.

Mahmood, R. (1997). Impacts of air temperature variations on the boro rice phenology in Bangladesh: implications for irrigation requirements. *Agricultural and Forest Meteorology*. 84(3-4):233-247.

Mavi, H.S. & Tupper, G.J. (2004). *Agrometeorology: Principles and Applications of Climate Studies in Agriculture*. Food Products Press.

Meier, U. (Ed.). (1997). *Growth Stages of Mono- and Dicotyledonous Plants*. BBCH Monograph, Blackwell Wien: Wissenschafts-Verlag Berlin.

Menzel, A., Sparks, T. H., Estrella, N., Koch, E., Aasa, A., Ahas, R., Alm-Kübler, K., Bissolli, P., Braslavská, O., Briede, A., Chmielewski, F. M., Crepinsek, Z., Curnel, Y., Dahl, Å., Defila, C., Donnelly, A., Filella, Y., Jatczak, K., Måge, F., Mestre, A., Nordli, Ø., Peñuelas, J., Pirinen, P., Remisová, V., Scheifinger, H., Striz, M., Susnik, A., Wielgolaski, F.-E., v. Vliet, A., Zach, S. and Zust, A. (2006) European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Global Change Biology*. 12:1-8.

Monteith, J.L. (2000). Agricultural Meteorology: Evolution and application. *Agricultural and Forest Meteorology*, 103:5-9.

Oke, T.R. (1988). *Boundary Layer Climates*. 2nd Edition. New York: Routledge.

Salisbury, F.B. (1981) Responses to photoperiod. In Lange, O.L. (Ed.). *Physiological Plant Ecology*. *I*. *Responses to Physical Environment* (pp. 135-168). Berlin: Springer.

Stigter, K. (Ed.). (2010) *Applied Agrometeorology*. Springer, NY.

Tsiros E., Domenikiotis, C. and Dalezios, N.R. (2009) Assessment of cotton phenological stages using agroclimatic indices: An innovative approach. *Italian Journal of Agrometeorology*. 14(1):50-55.

Wang, J.Y. (1958). *An evaluation of some techniques in Agrometeorology: Methods relating to problems in cultivated plants*. (Ph.D. Thesis). University of Wisconsin, Madison.

Wang, J.Y. (1960). A critique of the heat unit approach to plant response studies. *Ecology*. 41:785-791.

WMO (2010). *Guide to Agricultural Meteorological Practices*. WMO - No134.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7
ΑΓΡΟΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑ ΓΙΑ ΤΗ ΧΕΡΣΑΙΑ ΚΑΙ ΥΔΡΟΒΙΑ ΖΩΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ

Σύνοψη
Στο κεφάλαιο αυτό μελετάται αρχικά η βιομετεωρολογία για τη χερσαία ζωική παραγωγή, δηλαδή έχει διερευνηθεί η εφαρμογή πληροφοριών σχετικά με τον καιρό και το κλίμα, για να διατηρήσει ή να βελτιώσει τις επιδόσεις των ζώων στο αγρόκτημα, όπως την επιβίωση, την ανάπτυξη, την αναπαραγωγή και την παραγωγή γάλακτος και μαλλιού. Η κατανόηση των επιπτώσεων του τοποκλίματος και του μεσοκλίματος στη διαχείριση της χερσαίας ζωικής παραγωγής είναι αυτονόητη, όπως και η ανάγκη για έγκαιρες προβλέψεις, προκειμένου να αξιοποιηθεί η προσδοκία για ολοκληρωμένη διαχείριση.
Τα υπάρχοντα μετεωρολογικά και κλιματολογικά δεδομένα πρέπει να χρησιμοποιούνται περισσότερο στην αλιεία και τις υδατοκαλλιέργειες. Οι υδατοκαλλιεργητές θα πρέπει να είναι ενήμεροι για τις τοπικές καιρικές συνθήκες, την κατανομή των θερμοκρασιών, την ηλιακή ακτινοβολία, τη νεφοκάλυψη, την εξάτμιση και την ταχύτητα του ανέμου. Επωφελής θα ήταν επίσης η γνώση της συχνότητας των ακραίων βροχοπτώσεων και των πλημμυρών, των επεισοδίων ξηρασίας, των αποκλίσεων της θερμοκρασίας από το κανονικό και των καταστροφικών καταιγίδων. Οπλισμένοι με αυτές τις πληροφορίες, οι υδατοκαλλιεργητές θα μπορούν να σχεδιάζουν και να οργανώνουν τις δράσεις τους ανάλογα με τις τοπικές κλιματικές συνθήκες. Επίσης, θα μπορούν να χρησιμοποιούν τις τοπικές καιρικές προβλέψεις, ώστε να προετοιμάζονται για τα δυσμενή καιρικά φαινόμενα, περιορίζοντας έτσι την πιθανότητα εμφάνισης απωλειών εξαιτίας των καιρικών συνθηκών.
Αξιολόγηση του μικροκλίματος και των δυσμενών καιρικών συνθηκών είναι απαραίτητη. Εξετάζεται η διαθεσιμότητατου νερού και οι εγκαταστάσεις, οι οποίες θα πρέπει να σχεδιαστούν έτσι ώστε το έργο να προστατεύεται από την ξηρασία, τις πλημμύρες και τον άνεμο, αλλά και από τη διάβρωση που προκαλούν το νερό και οι καταιγίδες. Η διατήρηση των γλυκών υδάτων συνιστά διεθνώς ένα σημαντικό ζήτημα. Πρέπει να σχεδιάζονται οι εγκαταστάσεις υδατοκαλλιέργειας έτσι ώστε το νερό να χρησιμοποιείται αποτελεσματικά (Boyd, 2005). Σε περιοχές σημαντικές για τις υδατοκαλλιέργειες, θα πρέπει να παρέχονται δεδομένα βροχοπτώσεων που να περιλαμβάνουν στοιχεία συχνότητας, έντασης και διάρκειας, καθώς και εξάτμισης, για το σχεδιασμό των εγκαταστάσεων.

Προαπαιτούμενη γνώση
Ο αναγνώστης απαιτείται να έχει βασικές γνώσεις φυσικής και μαθηματικών.

7.1. Αγρομετεωρολογία για τη χερσαία ζωική παραγωγή

Το κεφάλαιο αυτό είναι προσανατολισμένο στη βιομετεωρολογία για τη χερσαία ζωική παραγωγή αρχικά. Ειδικότερα, σε αυτό μελετάται η εφαρμογή πληροφοριών σχετικών με τον καιρό και το κλίμα, με στόχο τη διατήρηση ή τη βελτίωση των επιδόσεων των ζώων στο αγρόκτημα, όπως είναι η επιβίωση, η ανάπτυξη, η αναπαραγωγή και η παραγωγή γάλακτος και μαλλιού. Οι διαχειριστικές παρεμβάσεις είναι απαραίτητες, όχι μόνο για να βελτιωθεί το γενετικό δυναμικό των ζώων, αλλά και για να ξεπεραστούν οι περιορισμοί στην παραγωγή λόγω του κλίματος, του φυσικού περιβάλλοντος και των κινδύνων για την υγεία σε μια περιοχή. Οι αποφάσεις σε ένα αγρόκτημα αφορούν συνήθως την επιλογή, το σχεδιασμό και τη διαχείριση των εγκαταστάσεων παραγωγής, ενώ οι συλλογικές επιπτώσεις μπορεί να καθορίσουν την περιφερειακή ή εθνική πολιτική, τις απαντήσεις σε πιθανές αλλαγές μεγάλης κλίμακας ή να επηρεάσουν άλλες αποφάσεις. Η κατανόηση των επιπτώσεων του τοποκλίματος και του μεσοκλίματος που επηρεάζουν αυτές τις αποφάσεις είναι αυτονόητη, όπως και η ανάγκη για έγκαιρες προβλέψεις, προκειμένου να αξιοποιηθεί η προσδοκία για ολοκληρωμένη διαχείριση και η ανταπόκριση σε αντίξοες συνθήκες.
Τα θέματα της ζωικής παραγωγής που συνδέονται με τις καιρικές συνθήκες και το κλίμα ξεπερνούν την κατανόηση των διαδικασιών και των διακυμάνσεων του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος, καθώς και τον ρόλο που διαδραματίζει η τοπική εδαφοκάλυψη και τοπογραφία σε αυτές τις διακυμάνσεις. Η γνώση για τον τρόπο με τον οποίο πιθανοί περιβαλλοντικοί παράγοντες καταπόνησης, όπως η θερμοκρασία, η υγρασία, η θερμική ακτινοβολία

και η ταχύτητα του ανέμου, μπορεί να επηρεάσουν άμεσα και αρνητικά την απόδοση των ζώων, την υγεία και την ευημερία τους, όταν τα ζώα υπερβούν τις δυνατότητες αντιμετώπισής τους, είναι απαραίτητη. Πρέπει επίσης να αναγνωρίζονται οι έμμεσες συνέπειες των καιρικών φαινομένων, όπως οι επιπτώσεις τους στην ποιότητα των ζωοτροφών, καθώς και η διαθεσιμότητά τους.
Παράγοντες προς εξέταση στη ζωική παραγωγή περιλαμβάνουν:

- Θερμοουδέτερες σειρές των περιβαλλοντικών μεταβλητών για σημαντικές κατηγορίες ζώων, με βάση τις καιρικές συνθήκες και τις εποχικές διακυμάνσεις που μπορεί να επικρατήσουν.
- Αξιολόγηση των λεπτομερών ενεργειακών ισοζυγίων για μεμονωμένα ζώα και ομάδες ζώων, που μπορεί να δείξει τις ανισορροπίες μεταξύ παραγωγής, μεταβολικής θερμότητας και απωλειών θερμότητας προς το περιβάλλον, υπό διάφορους πιθανούς συνδυασμούς καιρικών συνθηκών.
- Κατανόηση, κατά προτίμηση ποσοτική, του τρόπου με τον οποίο οι περιβαλλοντικές μεταβλητές επηρεάζουν το θερμικό ισοζύγιο των ζώων, το οποίο βασίζεται σε ανταλλαγές θερμότητας, που εξαρτώνται από τους παράγοντες του Πίνακα 7.1.
- Δυνατότητα στέγασης ζώων προσφέρει βελτιωμένη ζωική και οικονομική απόδοση.
- Εξάρτηση των νόσων και των παρασίτων από τις καιρικές συνθήκες και, ειδικά, από το χρόνο και το μέγεθος του προβλήματος.

7.1.1. Βιομετεωρολογική διαχείριση χερσαίας ζωικής παραγωγής

7.1.1.1. Προσδιορισμός του βιολογικού περιβάλλοντος

Το ζωικό περιβάλλον είναι πολύπλοκο. Ωστόσο, καταβάλλονται προσπάθειες για τον προσδιορισμό του βιολογικού περιβάλλοντος και τη δυνατότητα μετρήσεων με τη χρήση μόνο μιας παραμέτρου ή μιας μικρής ομάδας παραμέτρων που θεωρούνται πρωταρχικής σημασίας. Χρησιμοποιούνται όργανα και διαδικασίες μετρήσεων που βασίζονται σε διεθνείς προδιαγραφές (WMO, 1970·1972). Ωστόσο, προκειμένου να υπάρχει κατανόηση και διερεύνηση των σχέσεων μεταξύ των οργανισμών και του περιβάλλοντός τους, είναι απαραίτητο οι βιολογικές μέθοδοι και εφαρμογές να εξοικειωθούν με τις αρχές των περιβαλλοντικών επιστημών. Στη διεθνή βιβλιογραφία περιγράφεται το φυσικό μικροπεριβάλλον, στο οποίο ζουν τα ζώα, ενώ παρουσιάζονται και απλουστευμένες αναλύσεις των μοντέλων μεταφοράς θερμότητας και των εφαρμογών για την ανταλλαγή των διαδικασιών μεταξύ των ζώων και του περιβάλλοντός τους (Monteith & Unsworth, 1990· Campbell & Norman, 1998).
Μεταξύ των διαφόρων μετρήσεων για το βιολογικό περιβάλλον, η θερμοκρασία ξηρού θερμομέτρου θεωρείται γενικά το κύριο θερμικό μέτρο. Ωστόσο, υψηλή υγρασία ή η ηλιακή ακτινοβολία επιδεινώνει τις επιπτώσεις της υψηλής θερμοκρασίας. Η υψηλή υγρασία μειώνει τη δυνατότητα δερμικής και αναπνευστικής εξάτμιση από το ζώο, ενώ η ηλιακή ακτινοβολία αυξάνει τη θερμότητα που πρέπει να διαχέεται από τη μεταβολική διαδικασία, ώστε να διατηρηθεί η θερμοκρασία του σώματος. Ισχυροί άνεμοι ή ρεύματα, ιδιαίτερα σε συνδυασμό με βροχοπτώσεις, ενισχύουν τις αρνητικές επιπτώσεις των χαμηλών θερμοκρασιών. Αντίθετα, η θερμική ακτινοβολία από ένα θερμότερο περιβάλλον μπορεί να αντισταθμίσει, σε κάποιο βαθμό, τις επιπτώσεις της χαμηλής θερμοκρασίας. Ολοκληρωμένα μέτρα έχουν αναπτυχθεί για την εκτίμηση του μικροκλίματος των ζώων σε θερμές περιόδους, όπως το θερμόμετρο της μαύρης σφαίρας, που συνδυάζει την επίδραση της θερμοκρασίας του αέρα, της κίνησής του και της ακτινοβολίας (Vernon, 1932· Bedford & Warner, 1934· Bond & Kelly, 1955). Το θερμόμετρο της μαύρης σφαίρας δεν πρέπει να ληφθεί ως ένα γενικό μοντέλο για τα ζώα, όσον αφορά την ανταλλαγή θερμικής ενέργειας με το περιβάλλον. Ένα επαρκές ολοκληρωμένο όργανο μέτρησης του θερμικού περιβάλλοντος, είτε σε θερμές είτε σε ψυχρές συνθήκες, πρέπει να βασίζεται στη γνώση των μηχανισμών θερμικής ανταλλαγής ενός συγκεκριμένου ζωικού τύπου.
Επίσης, έχουν αναπτυχθεί διάφοροι δείκτες που προέρχονται από πρωτογενή μετεωρολογικά στοιχεία: δείκτης αίσθησης ψύχρας (Siple & Passel, 1945), δείκτης θερμοκρασίας-υγρασίας (Thom, 1959), θερμόμετρο της μαύρης σφαίρας/δείκτης υγρασίας (Buffington et al., 1981), αποτελεσματική θερμοκρασία για τις αγελάδες γαλακτο-παραγωγής (Yamamoto, 1983), ισοδύναμος δείκτης θερμοκρασίας για τις αγελάδες γαλακτοπαραγωγής (Baeta et al., 1987), δείκτης θερμικής άνεσης για πρόβατα (Da Silva & Barbosa, 1993), δείκτης δυσφορίας για τα βοοειδή

(Gaughan et al., 2002) και περιβαλλοντικός δείκτης καταπόνησης (Moran et al., 2001).[3] Οι δείκτες πρέπει να ελέγχονται κατάλληλα για κάθε περιβάλλον και για κάθε ζωικό είδος. Δείκτες όπως αυτοί που προαναφέρθηκαν είναι πολύ χρήσιμοι για να αξιολογήσουμε το γενικό κλίμα μιας περιοχής, αλλά απαιτούν τοπικές μετεωρολογικές μετρήσεις θερμοκρασίας και υγρασίας, ταχύτητας ανέμου και ηλιακής ακτινοβολίας. Μετεωρολογικές τιμές για σχεδιαστικούς σκοπούς σπάνια συνυπολογίζουν τις ακραίες μετεωρολογικές τιμές που εμφανίζονται σε μια τοποθεσία, αλλά χρησιμοποιούνται για να επιτρέψουν την υιοθέτηση ενός αποδεκτού επίπεδου κινδύνου κατά το σχεδιασμό.

Τρόπος μεταφοράς θερμότητας				
	Ακτινοβολία	**Μεταγωγή**	**Αγωγιμότητα**	**Εξάτμιση**
Επιφάνεια ζώου	X[a]	X	X[b]	X[c]
Θερμοκρασία επιφάνειας ζώου	X	X	X	X[d]
Θερμοκρασία περιβάλλοντος χώρου		X	X[e]	
Ταχύτητα ανέμου		X	X	
Τάση ατμών αέρα		X	X	X
Σχηματικός παράγοντας ακτινοβολίας	X			
Εκπομπή από επιφάνεια ζώων	X			
Αγωγιμότητα περιβάλλοντος χώρου			X	
Εκπομπές περιβάλλοντος χώρου	X			

[a] Περιοχή του ζώου άμεσα εκτεθειμένη στην πηγή ακτινοβολίας
[b] Για στατικά ζώα, η μεταφορά θερμότητας μέσω αγωγιμότητας είναι αμελητέα, ενώ για τα ζώα, που το εμβαδόν της επιφάνειάς τους έρχεται σε επαφή με τη δομή στήριξης, η μεταφορά θερμότητας είναι σημαντική.
[c] Η βρεγμένη περιοχή της επιφάνειας των ζώων, συμπεριλαμβανομένων των αναπνευστικών διόδων.
[d] Η θερμοκρασία της επιφάνειας των ζώων συνιστά έναν έμμεσο παράγοντα, καθώς η πίεση ατμών είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας.
[e] Μόνο εκείνο το τμήμα του περιβάλλοντος χώρου που βρίσκεται σε επαφή με το ζώο.

Πίνακας 7.1. *Φυσικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη μεταφορά ενέργειας από την επιφάνεια του ζώου.*

7.1.1.2. Χαρακτηριστικά της απόδοσης των ζώων

Η κλιμάκωση της παραγωγής και της απώλειας θερμότητας σε ένα ευρύ φάσμα των θερμικών περιβαλλόντων απεικονίζεται στο Σχήμα 7.1. Τα ζώα λειτουργούν πιο αποτελεσματικά μέσα στη θερμοουδέτερη ζώνη, ενώ, πάνω από την ανώτερη και κάτω από την κατώτερη κρίσιμη θερμοκρασία, το ζώο καταπονείται και το περιβάλλον περιορίζει την παραγωγική διαδικασία. Οι κρίσιμες θερμοκρασίες δεν είναι σταθερά χαρακτηριστικά για κάθε είδος ζώου, αλλά μπορεί να μεταβάλλονται με την ηλικία και τις φυσιολογικές συνθήκες. Η φυσική και η τεχνητή επιλογή σε ακραία περιβάλλοντα μπορεί να βελτιώσουν την προσαρμοστικότητα στις συνθήκες αυτές, αλλάζοντας τα προσαρμοσμένα μορφολογικά και φυσιολογικά χαρακτηριστικά των ζώων, μερικές φορές σε κάποιες γενιές.

[3] Μια συνολική αξιολόγηση των θερμικών δεικτών για το ζωικό κεφάλαιο παρουσιάστηκε από τον Hahn και τους συνεργάτες του (2003).

Συγκεκριμένες αντιδράσεις ενός μεμονωμένου ζώου επηρεάζονται από πολλούς παράγοντες, τόσο εσωτερικούς, όσο και εξωτερικούς. Η ανάπτυξη, η αναπαραγωγή, η πρόσληψη τροφής και η μετατροπή της, η θνησιμότητα, η παραγωγή γάλακτος, αυγού και μαλλιού αποτελούν παραδοσιακές μετρήσεις ολοκληρωμένης απόδοσης της απόκρισης των ζώων σε περιβαλλοντικούς παράγοντες. Θερμορυθμιστικά μέτρα, όπως ο ρυθμός θερμοκρασίας του σώματος, έχουν χρησιμοποιηθεί πρόσφατα για τον καθορισμό των κατώτατων ορίων σχετικά με τις διαταραχές στη διατροφή κατά τη θερμή περίοδο, που επηρεάζει, τελικά, την απόδοση (Hahn et al., 1991). Μέτρα συμπεριφοράς, δηλαδή στάση, προσανατολισμός, καταφύγιο που αναζητούν, διασπορά, σχετίζονται με τις θερμορυθμιστικές αντιδράσεις των ζώων στο περιβάλλον τους (Hafez, 1962· Ansell, 1981· Blackshaw & Blackshaw,1994· Kadzere et al., 2002).

Δεδομένου ότι τα τελευταία μέτρα έχουν επίσης οικονομική σημασία για τον παραγωγό, η απόδοση ή η αντίδρασή της, ως απάντηση σε περιβαλλοντικούς παράγοντες, παραμένει η βάση για την αξιολόγηση των συνεπειών των περιβαλλοντικών συνθηκών όσον αφορά τα ζώα εκτροφής (Σχήμα 7.2). Κατά την εκτίμηση των συνεπειών, είναι σημαντικό να εξετάζεται η ανθεκτικότητα των ζώων, εντός ορίων, ώστε να διατηρούνται οι φυσιολογικές λειτουργίες μέσω προσαρμοστικών και αντισταθμιστικών δυνατοτήτων (Hahn, 1982). Έτσι, η χαμηλή παραγωγική ικανότητα των ιθαγενών κτηνοτροφικών πληθυσμών δεν είναι ένα στοιχείο κατωτερότητας, αλλά μαρτυρά την τέλεια προσαρμογή στο περιβάλλον τους. Από την άλλη πλευρά, η υψηλή παραγωγική απόδοση των ευρωπαϊκών φυλών των ζώων είναι μόνο η συνέπεια εκατοντάδων χρόνων τεχνητής επιλογής για δεδομένο σκοπό.

7.1.1.3. Ρόλος του καιρού και του κλίματος στους ζώντες οργανισμούς: Βιολογικές επιπτώσεις

Ως γνωστόν, η βιομετεωρολογία καλύπτει τη μελέτη των βιολογικών επιπτώσεων του καιρού και του κλίματος σε ζώντες οργανισμούς, όπως είναι τα φυτά, τα ζώα, ο άνθρωπος, αλλά και στο άμεσο φυσικοχημικό περιβάλλον (Δαλέζιος, 2010). Υπάρχουν ομοιότητες και διαφορές στον τρόπο με τον οποίον τόσο οι άνθρωποι και τα ζώα, όσο και τα φυτά ανταποκρίνονται στο περιβάλλον. Αν και υπάρχουν, βέβαια, παρόμοιες φυσικές αρχές, ωστόσο η κινητικότητα ανθρώπων και ζώων αποφεύγει δυσμενείς περιβαλλοντικές καταστάσεις. Η αλληλεπίδραση ατμόσφαιρας και ζώντων οργανισμών είναι πολύπλοκη. Επισημαίνεται ότι η κατανόηση των αλληλεπιδράσεων απαιτεί γνώση του υπάρχοντος ισοζυγίου ενέργειας, όπως είναι η τροφική αλυσίδα, ο άμεσος ηλιασμός (insolation), η θερμότητα. Στη συνέχεια, δίνεται το ενεργειακό και το υδατικό ισοζύγιο για ζώντες οργανισμούς, που συμβάλλουν στην κατανόηση της θερμορύθμισης.

Το ενεργειακό ισοζύγιο ζώων δίνεται από τη σχέση:

$$Q^{*} + Q_{\mathrm{M}} = Q_{\mathrm{H}} + Q_{\mathrm{E}} + Q_{G} + \Delta Q_{S}, \quad (7.1)$$

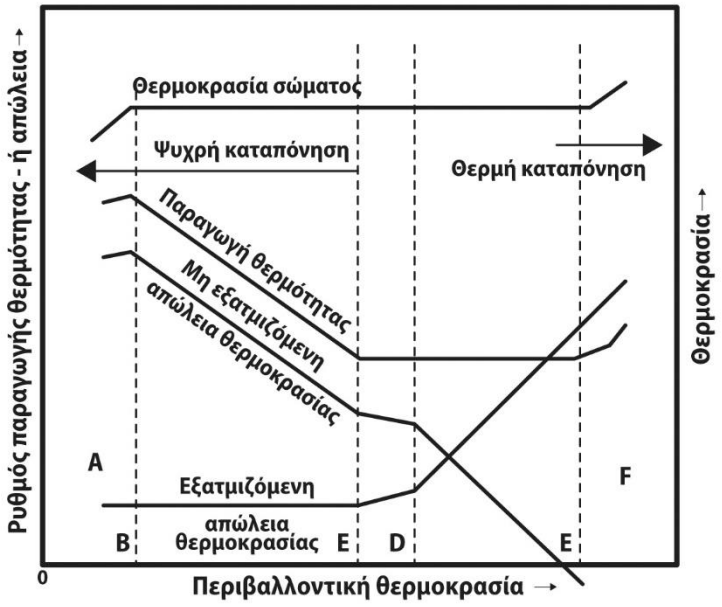
όπου Q_M είναι ο ρυθμός παραγωγής θερμότητας με τις διαδικασίες μεταβολισμού, ΔQ_s η καθαρή αλλαγή αποθήκευσης θερμότητας σώματος, Q_H η αισθητή θερμότητα, Q_E η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης, Q_G η θερμότητα αγωγιμότητας και Q^* το έργο που παράγεται από τον οργανισμό. Καθαρή αποθήκευση θερμότητας μπορεί να μην είναι όφελος ή απώλεια, καθόσον για ζώα είναι περίπου στο μηδέν.

Η εξίσωση (7.1) αποτελεί τρισδιάστατο (3-D) ισοζύγιο όγκου σώματος ζώων, όπου οι όροι είναι ροές και χωρικοί μέσοι όροι. Υπάρχει ευελιξία για διαφορετικά περιβάλλοντα ακτινοβολίας, όπως ο παράγοντας σχήματος (π.χ. κύλινδρος για ζώα ή σφαίρα για πουλιά).

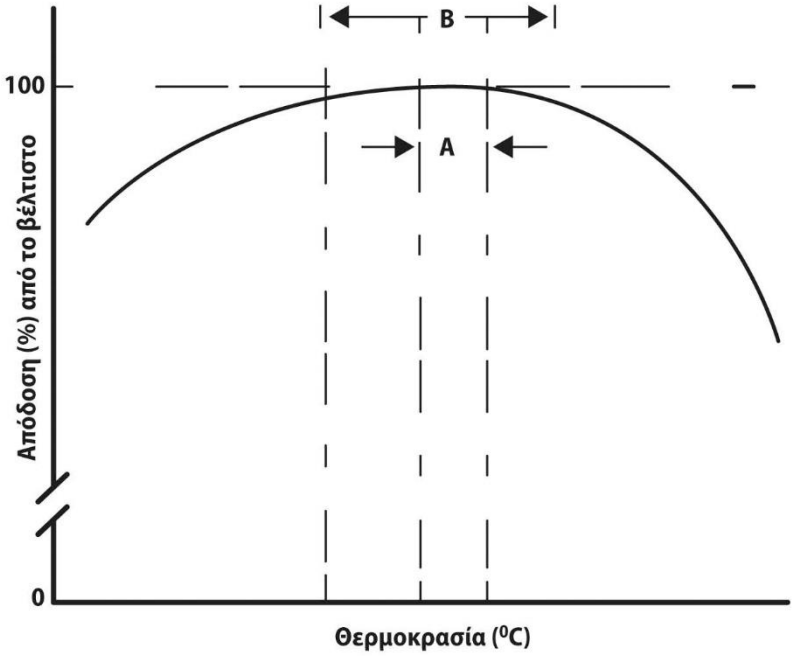
Το κατ' όγκο υδατικό ισοζύγιο του ζώου είναι:

$$B = U + E + \Delta S, \quad (7.2)$$

όπου B είναι η καθαρή εισροή νερού (φαγητό, πόσιμο), E η απώλεια εξάτμισης, U η απώλεια νερού (ούρηση) και ΔS η καθαρή αλλαγή αποθηκευμένου σωματικού νερού.



Σχήμα 7.1. *Απεικόνιση των συνιστωσών του ενεργειακού ισοζυγίου των ομόθερμων.*



Σχήμα 7.2. *Τυπική αντίδραση της απόδοσης σε σχέση με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.*

7.1.1.4. Θερμορύθμιση

Υπάρχουν δύο τύποι οργανισμών, τα ποικιλόθερμα και τα ομοιόθερμα:

- **Ποικιλόθερμο** ή **εξώθερμο** ή **ετερόθερμο** χαρακτηρίζεται κάθε ζώο του οποίου η θερμοκρασία του σώματος ακολουθεί τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος όπου βρίσκεται. Γενικά, τα ποικιλόθερμα περιγράφονται και ως ψυχρόαιμα. Ειδικότερα, τα υδρόβια ποικιλόθερμα ακολουθούν με μεγαλύτερη σχέση

τη θερμοκρασία του περιβάλλοντός τους, ενώ, αντίθετα, οι χερσαίες μορφές ποικιλόθερμων μπορεί να ζεσταίνονται από την ηλιακή ακτινοβολία ή να δροσίζονται με την εξάτμιση. Στα ποικιλόθερμα, η θερμοκρασία ρυθμίζεται από το περιβάλλον (π.χ. φυτά, ερπετά, έντομα, ψάρια). Επίσης, σε αυτά δεν απαιτείται ενέργεια για θερμορύθμιση, ενώ η κίνηση αποτελεί πλεονέκτημα, καθόσον ισχύει η εξίσωση (7.1) του ισοζυγίου ενέργειας.

- **Ομοιόθερμο** χαρακτηρίζεται κάθε ζώο του οποίου η θερμοκρασία του σώματος δεν ακολουθεί εκείνη του περιβάλλοντος όπου βρίσκεται. Γενικά, τα ομοιόθερμα ζώα, δηλαδή τα θηλαστικά και τα πτηνά, περιγράφονται και ως θερμόαιμα. Ένα θερμόαιμο ζώο διατηρεί τη θερμοκρασία του σώματός του σε περιορισμένα στενά όρια μέσω φυσιολογικών μηχανισμών και συνήθως πάνω από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντός του, παρά τις μεγάλες διαφοροποιήσεις που μπορεί να παρουσιάζει. Στα ομοιόθερμα, η θερμορύθμιση επιτυγχάνεται με ομοιόσταση.

Έχει ήδη επισημανθεί ότι η τροφή (pasture) αποτελεί σημαντική παράμετρο για τη θερμορύθμιση, διότι συνδυάζεται με τον έλεγχο μεγέθους και τη φύση της επιφάνειας στην ανταλλαγή ενέργειας με κατάλληλο προσανατολισμό, ώστε να επιτευχθεί μείωση της απώλειας θερμότητας. Υπάρχουν, βέβαια, και εισροές (ingestion), όπως τα θερμά ή ψυχρά υγρά (π.χ. νερό), που επηρεάζουν τη θερμοκρασία του σώματος. Όπως ήδη αναφέρθηκε, στο Σχήμα 7.1 απεικονίζονται οι συνιστώσες του ενεργειακού ισοζυγίου των ομοιόθερμων (Monteith & Mount, 1974), όπου υπάρχει η ζώνη υποθερμίας (A), η θερμοκρασία μεταβολισμού (B), η κατώτερη κρίσιμη θερμοκρασία (C), η θερμοκρασία που συνδέεται με σημαντική αύξηση των απωλειών λόγω εξάτμισης (D), η ζώνη ελάχιστης θερμορυθμιστικής προσπάθειας (CD), η ανώτερη κρίσιμη θερμοκρασία (E), η ζώνη υπερθερμίας (F) και η ζώνη ελάχιστου μεταβολισμού, δηλαδή η θερμοουδέτερη ζώνη (CE). Αντίστοιχα, στο Σχήμα 7.2 απεικονίζεται η τυπική αντίδραση της απόδοσης ως συνάρτηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος. Αν και μια βέλτιστη θερμοκρασία μπορεί να υπάρχει για ένα ζώο σε μια δεδομένη χρονική στιγμή και υπό συγκεκριμένες διαχειριστικές πρακτικές, οι βέλτιστες συνθήκες για μια ομάδα ζώων περιλαμβάνουν μια ελαφρώς ευρεία ζώνη θερμοκρασίας (A). Επιπλέον, οι καμπύλες απόδοσης εμφανίζουν συνήθως ελάχιστη μόνο μείωση, της τάξης συνήθως του 1-2% από το βέλτιστο, σε ένα κάπως ευρύτερο εύρος θερμοκρασιών (ζώνη B).

7.1.1.5. Μεταβολισμός ζώων

Μεταβολισμός είναι η διαδικασία κατά την οποία ουσίες μεταφέρονται με απελευθέρωση ενέργειας και αποβλήτων (π.χ. φωτοσύνθεση στα φυτά, ή τροφή στον άνθρωπο και στα ζώα). Το ισοζύγιο ενέργειας του μεταβολισμού διαμορφώνεται ως εξής:

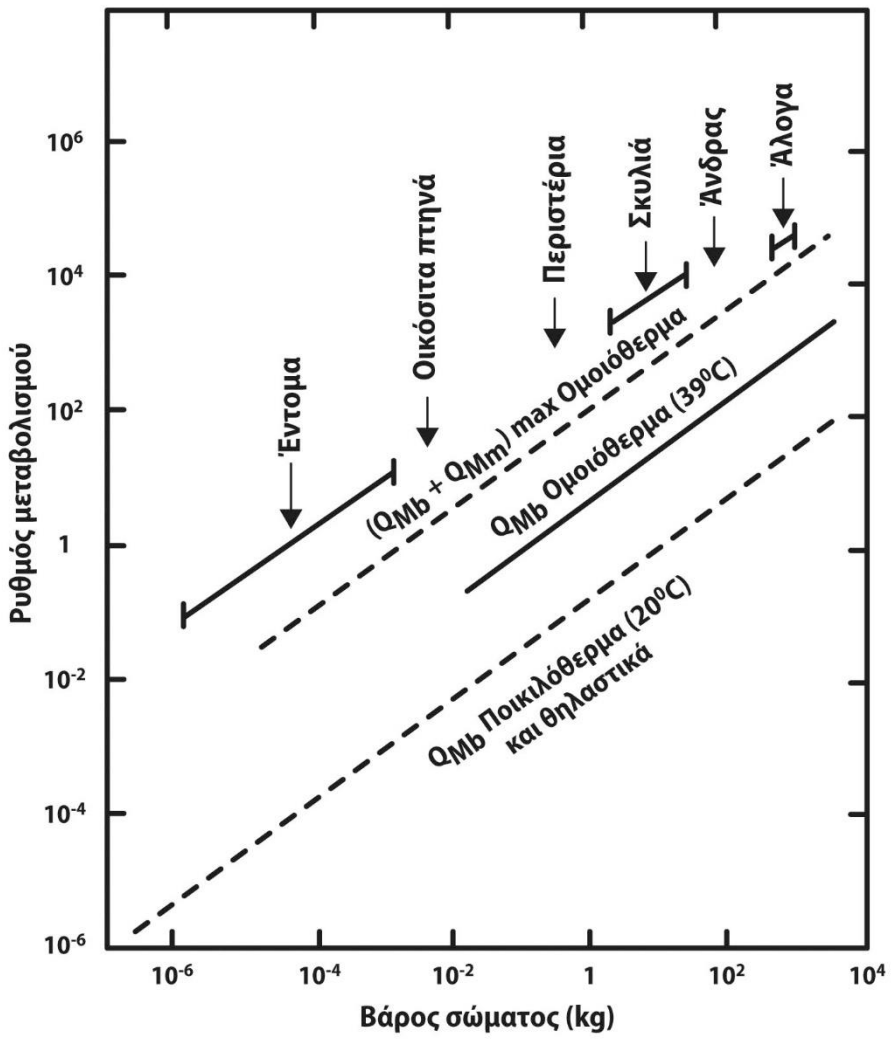
$$Q_M = Q_{Mb} + Q_{Mm}, \quad (7.3)$$

όπου Q_M είναι η συνολική παραγωγή θερμότητας μεταβολισμού, Q_{Mb} ο βασικός μεταβολικός ρυθμός (μέγεθος, ηλικία) και Q_{Mm} η απελευθέρωση θερμότητας από δραστηριότητα.

Υπάρχουν ειδικά χαρακτηριστικά των ζώων για τη θερμορύθμιση, όπως το βάρος ή η μάζα, δηλαδή ένα μεγάλο ζώο χρειάζεται λίγη ενέργεια για τη διατήρηση της θερμοκρασίας του, ενώ, αντίθετα, ένα μικρό ζώο χρειάζεται μεγάλη ενέργεια για τη διατήρηση της θερμοκρασίας. Επίσης, η τροφή του ζώου επηρεάζει το ενεργειακό και το υδατικό ισοζύγιο, με επίπτωση στην εξάτμιση. Στο Σχήμα 7.3 απεικονίζεται, χαρακτηριστικά, η σχέση μεταξύ ρυθμού μεταβολισμού και σωματικού βάρους, τόσο για ποικιλόθερμα, όσο και για ομοιόθερμα, με βάση το ισοζύγιο ενέργειας.

Στην περίπτωση των ποικιλόθερμων, όπως τα ψάρια, το ισοζύγιο ενέργειας διαμορφώνεται ως $Q_M = Q_G$ κοντά στην επιφάνεια Q*, λόγω της μικρού μήκους κύματος προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Στα ποικιλόθερμα, με τη μέθοδο της αναπνοής, διατηρείται η θερμοκρασία περιβάλλοντος. Κατά συνέπεια, η θερμοκρασία σώματος μεταβάλλεται μόνο 0,1-0,3^o C, μάλιστα σε ένα εύρος από 0^o C έως 40^o C, ενώ διαφορές μεγαλύτερες των 10^o C καθίστανται θανατηφόρες. Οπότε, τέτοιες μεταβολές θερμοκρασίας προκαλούν μετανάστευση εποχική ή ακόμα και ημερήσια. Ενδεικτικό είναι το Σχήμα 7.4, όπου απεικονίζεται η εσωτερική κατανομή θερμοκρασίας σώματος σε μεγάλα θαλάσσια θηλαστικά.

Στα **αμφίβια**, όπως είναι τα βατράχια ή οι σαλαμάνδρες, η θερμική συμπεριφορά είναι παρόμοια με τα ψάρια στο νερό, ενώ στην ξηρά τα αμφίβια επιβιώνουν λόγω υδατικού ισοζυγίου. Ουσιαστικά, στην ξηρά τα αμφίβια ζητούν σκιερό, δροσερό, υγρό και ήρεμο περιβάλλον, παρουσιάζουν δε μικρό μεταβολισμό, με εύρος θερμοκρασίας σώματος μεταξύ 5° C και 25° C. Αντίθετα, τα **ερπετά** παρουσιάζουν μικρό μεταβολισμό. Τα **ομοιόθερμα**, όπως έχει ήδη επισημανθεί, δεν ακολουθούν τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Έτσι, ο μεταβολισμός μπορεί να πραγματοποιείται τόσο σε ψυχρό ή όσο και σε θερμό περιβάλλον, όπως συμβαίνει στα πουλιά, στα θηλαστικά ή στον άνθρωπο.



Σχήμα7.3. *Μεταβολικός ρυθμός παραγωγής ενέργειας ποικιλόθερμων και ομοιόθερμων οργανισμών συναρτήσει του βάρους τους.*

7.1.1.6. Λήψη αποφάσεων

Οι στρατηγικές αποφάσεις αφορούν την εκτίμηση της ανάγκης από τον αγρότη (ή τους εκπροσώπους του) να αλλάξει το φυσικά μεταβαλλόμενο περιβάλλον. Το βασικό στοιχείο για τη διαδικασία αυτή είναι η αντίδραση των ζώων, που καθορίζει την τροποποιημένη απόδοση και την υγεία, όταν σημειώνεται υπέρβαση των ορίων. Ορισμένες στρατηγικές αποφάσεις αφορούν εκείνες που προσανατολίζονται στον τεχνικό σχεδιασμό και την

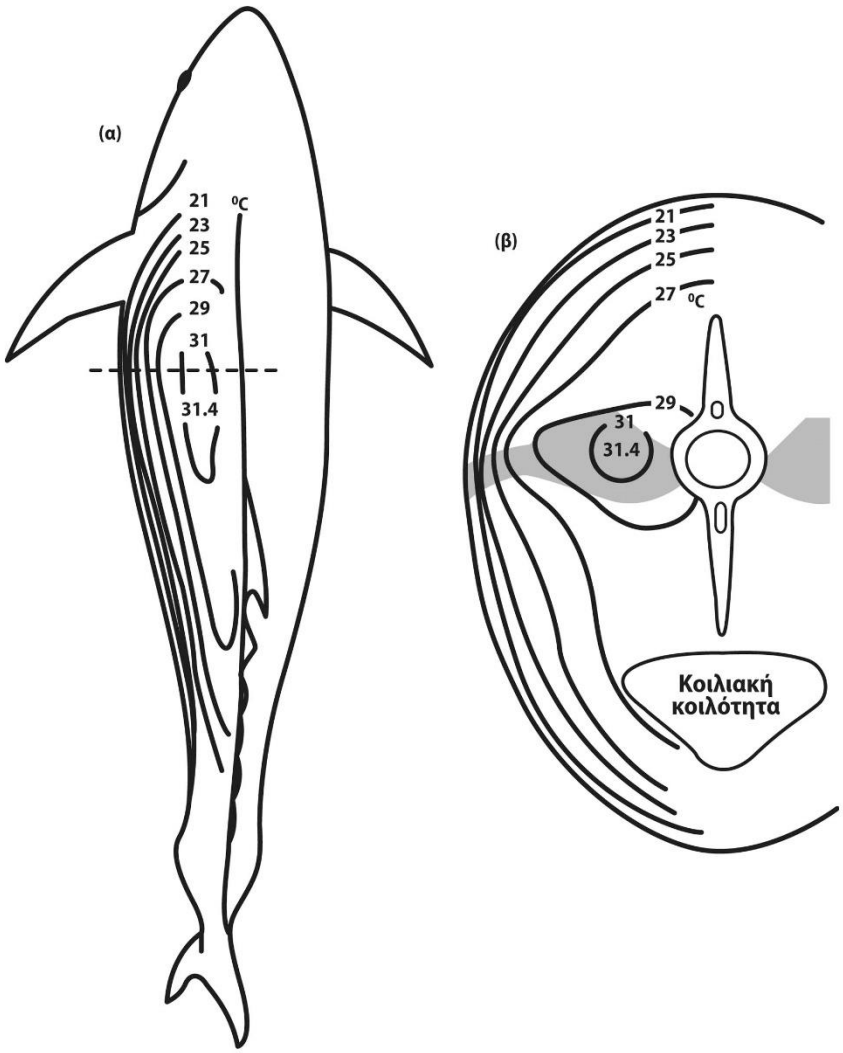
περιφερειακή ή εθνική πολιτική, όπως την αντίδραση στο ενδεχόμενο κλιματικής αλλαγής. Άλλες σημαντικές εκτιμήσεις αφορούν τη διαθεσιμότητα και τους περιορισμούς των βιομετεωρολογικών πληροφοριών να υποστηρίξουν τις διαδικασίες ορθολογικών αποφάσεων.

7.2. Εφαρμογές χερσαίας ζωικής παραγωγής για τους αγρότες

7.2.1. Ιδιαιτερότητες-διακρίσεις και φυσιολογικές αντιδράσεις των ζώων

7.2.1.1. Ιδιαιτερότητες-διακρίσεις

Τα χαρακτηριστικά της εξωτερικής επιφάνειας του σώματος ενός ζώου έχουν μεγάλη σημασία στη σχέση μεταξύ ζώου, θερμοκρασίας και περιβάλλοντος. Τα ζώα που ζουν σε ερήμους και εξαιρετικά ξηρό περιβάλλον πρέπει να έχουν μια αποτελεσματική προστασία έναντι των απωλειών των υδρατμών και της έντονης ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ εκείνα που ζουν σε ψυχρές ζώνες πρέπει να προστατεύονται από την απώλεια της θερμότητας του σώματος. Όσα ζώα ζουν σε τροπικές περιοχές πρέπει να είναι σε θέση να διώξουν την περίσσεια θερμότητας μέσω του δέρματος, καθώς και των αναπνευστικών επιφανειών, και την ίδια στιγμή πρέπει να αποφύγουν την εισερχόμενη θερμική ενέργεια από το περιβάλλον.



Σχήμα 7.4. *Κατανομή θερμοκρασίας σε μεγάλα θαλάσσια θηλαστικά.*

7.2.1.2. Απόκριση στην καταπόνηση

Η φυσιολογική συμπεριφορά των ζώων κατά την έκθεσή τους σε περιβαλλοντικό στρες έχει μετρηθεί από τις μεταβολές του αναπνευστικού τους ρυθμού, της θερμοκρασίας του σώματος τους και του καρδιακού ρυθμού του. Η εφίδρωση έχει, επίσης, χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση της αντίδρασης στη θερμική καταπόνηση κάποιων ειδών θηλαστικών, όπως τα βοοειδή, τα πρόβατα και τα άλογα. Ένα παράδειγμα είναι η υπέρυθρη (IR) θερμομετρία, η οποία επιτρέπει την αξιολόγηση της θερμοκρασίας του δέρματος των ζώων, ακόμα και από κάποια απόσταση; Η ραδιοτηλεμετρία και ο καταγραφέας δεδομένων είναι, επίσης, πολύ χρήσιμα μέσα αξιολόγησης των ζώων στον τομέα. Αισθητήρες θερμοκρασίας, υγρασίας ή κίνησης μικρού μεγέθους μπορούν να εμφυτεύονται σε ένα ή περισσότερα σημεία στο σώμα κάποιου ζώου και να συνδέονται με ένα ραδιοπομπό, που θα στέλνει τα δεδομένα σε έναν απομακρυσμένο δέκτη. Πιο πρόσφατα, υπέρυθρες ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές έχουν χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση της μεταβολής της θερμοκρασίας σε μεγάλες επιφάνειες. Η θερμική απεικόνιση είναι ένα μέσο για απομακρυσμένη διάγνωση της υγείας και της γονιμότητας των αγελάδων και άλλων ζώων, καθώς και για την παρακολούθηση των θερμοκρασιακών διακυμάνσεων στα ζώα που ζουν ελεύθερα.

7.2.2. Μείωση των επιπτώσεων του κλίματος στη ζωική παραγωγή

Προκειμένου ένα ζώο να διατηρήσει την ομοιοθερμία ,δηλαδή να μην παρουσιάσει καμία αλλαγή στη θερμοκρασία του σώματός του, εκτός από τους φυσιολογικούς κιρκαδικούς ρυθμούς, το ατμοσφαιρικό περιβάλλον και το ζώο πρέπει να ανταλλάσσουν θερμότητα με τέτοιο ρυθμό ώστε να επιτρέπεται η εξισορρόπηση της παραγωγής μεταβολικής θερμότητας και της απώλειας παραγωγής ενέργειας από τους τέσσερις τρόπους μεταφοράς που σημειώνονται στον Πίνακα 7.1. Σε θερμό περιβάλλον, κυριαρχούν οι ανταλλαγές ενέργειας μέσω ακτινοβολίας, ενώ σε ψυχρό περιβάλλον, τείνουν να κυριαρχούν οι ανταλλαγές λόγω μεταγωγής. Για να αλλάξει αποτελεσματικά το μικροκλίμα ενός ζώου με ενσταβλισμό ή περιβαλλοντική τροποποίηση, θα πρέπει να γίνει τροποποίηση ορισμένων παραγόντων, όπως είναι η θερμοκρασία ή/και ο ρυθμός εκπομπής στον περιβάλλοντα χώρο, η θερμοκρασία του αέρα, η ταχύτητα του ανέμου, η πίεση των ατμών του ανέμου, οι παράγοντες ακτινοβολίας ή σκίασης, η αγωγιμότητα των επιφανειών με τις οποίες έρχονται σε επαφή τα ζώα.

7.2.2.1. Επιλογή τοποθεσίας

Η επιλογή μιας τοποθεσίας για ενσταβλισμό ή άλλο σύστημα εντατικοποιημένης παραγωγής είναι θεμελιώδης, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι επιπτώσεις των τοπικών καιρικών συνθηκών. Οι παρατηρήσεις του μικροκλίματος σε μια ευρύτερη περιοχή θα αποκαλύψουν πολλές παραλλαγές των θερμικών συνθηκών λόγω του εδαφικού ανάγλυφου, της διαφορετικής έκθεσης, των υδροβιότοπων, των ποταμιών, του τύπου και του ύψους της βλάστησης, της ανθρώπινης δραστηριότητας και άλλων παραγόντων. Η σωστή επιλογή μιας τοποθεσίας, ώστε να ενισχύσει παράγοντες διασποράς της θερμότητας (ελάχιστη ακτινοβολία, θερμοκρασία και υγρασία, μέγιστη ταχύτητα αέρα), θα έχουν μακροπρόθεσμα οφέλη.

7.2.2.2. Ανεμοφράχτες

Κατασκευές ή δέντρα μπορεί να μειώσουν σημαντικά την ταχύτητα του ανέμου και να λειτουργήσουν ευεργετικά στην επιβίωση των εκτιθέμενων ζώων (ιδίως των νεογνών). Αρχικά, υψηλές θερμοκρασίες που συνοδεύονται από ξηρούς ανέμους μπορεί να βλάψουν τα ποώδη φυτά. Επίσης, ενώ εξαρτώνται και από τη διαθέσιμη εδαφική υγρασία, τις βλαβερές συνέπειες των υψηλών θερμοκρασιών, των υψηλών ελλειμμάτων πίεσης ατμών, και οι μέτριοι έως ισχυροί άνεμοι μπορεί να αυξήσουν την απώλεια νερού μέσω της εξατμισοδιαπνοής (WMO, 1992). Η αιολική διάβρωση είναι, στην πραγματικότητα, μία από τις σημαντικότερες αιτίες της απερήμωσης (Onyewotu et al., 2003β· Zheng et al., 2005). Ένας ανεμοφράχτης ενεργεί ως εμπόδιο, που μειώνει την ταχύτητα του ανέμου κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, εκτρέποντας και διασπώντας το ρεύμα του.

7.2.2.3. Σκίαση

Η σκίαση και άλλα ελάχιστα μέτρα θα πρέπει να θεωρηθούν μια μορφή ασφάλισης για την προστασία των εκτρεφόμενα ζώων σε ζεστά κλίματα. Το ακτινοβόλο περιβάλλον σε μια σκιασμένη περιοχή έχει τέσσερα συστατικά μέρη: το κρύο έδαφος στη σκιά, το ζεστό έδαφος έξω από τη σκιά, τη χαμηλότερη (εσωτερική) επιφάνεια της στέγης και τον ουρανό. Η ακτινοβολούμενη θερμοκρασία του καθαρού ουρανού είναι γενικά πολύ χαμηλότερη από εκείνη του ανέμου. Ακόμα και σε ένα τροπικό περιβάλλον, αυτή η διαφορά μπορεί να είναι ίση με 25° C ή

περισσότερο. Η πιο αποτελεσματική σκίαση επιτυγχάνεται με τα δέντρα, δεδομένου ότι παρέχουν προστασία από την ηλιακή ακτινοβολία, σε συνδυασμό με την ευεργετική ψύξη, καθώς η υγρασία εξατμίζεται από τα φύλλα.

7.2.2.4. Μερικώς ή πλήρως κλειστά καταλύματα

Τα κλειστά καταλύματα δεν συνιστώνται για τροπικά κλίματα, λόγω των μειωμένων ρευμάτων αέρα και των συνθηκών υγιεινής. Στις εύκρατες περιοχές, τα μερικώς κλειστά καταλύματα μπορεί να μειώσουν τη θερμική ακτινοβολία που λαμβάνουν τα ζώα όταν έχει ζεστό καιρό. Για εγκαταστάσεις στις εύκρατες περιοχές, οι οποίες υπόκεινται τόσο σε θερμές, όσο και ψυχρές συνθήκες, μια αποδεκτή λύση είναι κατασκευές με μετωπικά ανοίγματα στο νότο (βόρειο ημισφαίριο) ή στο βορρά (νότιο ημισφαίριο), με μεγάλες πόρτες ή πάνελ στον βόρειο ή νότιο τοίχο, αντίστοιχα.

7.2.2.5. Γενετική βελτίωση για προσαρμογή

Ο εγκλιματισμός και η προσαρμογή είναι δύο διαφορετικές διαδικασίες. Τα ζώα θεωρούνται ότι έχουν εγκλιματισθεί σε μια δεδομένη θερμοκρασία όταν η θερμοκρασία του σώματός τους επιστρέψει στα επίπεδα που ήταν πριν από το στρες (Nienaber et al., 1999). Η προσαρμογή, από την άλλη πλευρά, απαιτεί τροποποιήσεις της γενετικής δομής και είναι μια διαδικασία που περιλαμβάνει πληθυσμούς και όχι άτομα. Η γενετική βελτίωση είναι μια εξελικτική δράση. Η εξέλιξη θα πρέπει να οριστεί ως μια συνεχής διαδικασία προσαρμογής των πληθυσμών στις συνεχώς μεταβαλλόμενες γεωλογικές, βιολογικές και κλιματολογικές συνθήκες (Dobzhansky, 1970). Ως εκ τούτου, κάθε πληθυσμός σε ένα συγκεκριμένο περιβάλλον αποτελείται, ω επί το πλείστον, από τα καλά προσαρμοσμένα άτομα και από ελάχιστα άτομα που παρουσιάζουν γονότυπους οι οποίοι δεν είναι καλά προσαρμοσμένοι στο συγκεκριμένο περιβάλλον, αλλά είναι σε διαφορετικές συνθήκες. Αυτή είναι η βάση για τη γενετική βελτίωση του ζωικού κεφαλαίου.

Ωστόσο, μικρή προσοχή έχει δοθεί στις γενετικές πτυχές της προσαρμογής των ζώων στο περιβάλλον τους. Γενικά, θεωρείται πιο γρήγορο και πιο εύκολο η βελτίωση της παραγωγής να γίνει μέσω τροποποιήσεων του περιβάλλοντος και οι περισσότερες από τις ερευνητικές προσπάθειες να επικεντρωθούν στην τροποποίησή του. Στα υφιστάμενα προγράμματα γενετικής βελτίωσης των ζώων σε τροπικές χώρες θα πρέπει να συνυπολογίζονται όχι μόνο τα χαρακτηριστικά παραγωγής (απόδοση σε γάλα, αύξηση βάρους, παραγωγή αυγών ή μαλλιού), αλλά και τα χαρακτηριστικά που αφορούν την αλληλεπίδρασή τους με τους περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως είναι η ηλιακή ακτινοβολία, ο άνεμος, η θερμοκρασία του ανέμου και η υγρασία.

7.2.3. Περιβαλλοντική τροποποίηση

Υπάρχουν πολλές μορφές περιβαλλοντικής τροποποίησης. Σε περίοδο ζέστης, το νερό μπορεί να χρησιμεύσει ως ένας αποτελεσματικός παράγοντας δροσιάς για τα ζώα εκτροφής, ειδικά για τα είδη που διατηρούν ομοιοθερμία κατά κύριο λόγο από τη ρύθμιση της παραγωγής θερμότητας, όπως είναι οι χοίροι. Η άμεση διαβροχή των ζώων χρησιμοποιείται συχνά ως ένα έκτακτο μέτρο και μπορεί να είναι πολύ αποτελεσματικό σύστημα προστασίας. Η ψύξη του αέρα με τη χρήση εξατμιστικών δοχείων ψύξης, σχεδιασμένων για να μειώσουν τη θερμοκρασία σε καταλύματα ζώων, μπορεί να είναι αρκετά αποτελεσματική.

Επειδή η μεγάλη ζήτηση νερού και η απορροή λυμάτων είναι παράγοντες που προκαλούν ανησυχία στις γαλακτοβιομηχανίες, ωστόσο μια μείωση στη χρήση νερού για ψέκασμα και συστημάτων ψυκτικών ανεμιστήρων είναι επιθυμητή. Επαρκής ψύξη μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας το χαμηλότερο ποσοστό εφαρμογής νερού, 313,4 L/h ανά ακροφύσιο ή 215,9 L μέση καθημερινή χρήση νερού ανά αγελάδα (Means et al., 1992). Σε συνθήκες θερμού περιβάλλοντος, οι επιλογές μπορεί να καλύπτουν μέχρι τον πλήρη μηχανικό κλιματισμό του αέρα. Ενώ ο κλιματισμός είναι τεχνικά εφικτός, το υψηλό κόστος για την αρχική εγκατάσταση και λειτουργία του αποκλείει τη χρήση του σε σχεδόν όλους τους χώρους και τις εγκαταστάσεις. Ψύξη των στεγών ή άλλων γειτονικών επιφανειών από την εξάτμιση του νερού (χρησιμοποιώντας σύστημα ποτίσματος στην οροφή, για παράδειγμα) μπορεί να μειώσει αποτελεσματικά τις απώλειες θερμότητας μέσω της ακτινοβολίας στα ζώα. Τα ελεγχόμενα συστήματα εξαερισμού σε κλειστό περιβάλλον μπορεί να χρησιμοποιήσουν την ελάχιστη αισθητή θερμότητα, για να μειώσουν τις ακραίες τιμές ψύχους και να επιτύχουν βελτίωση της αποτελεσματικότητας, ενώ η προσθήκη τεχνητής θερμότητας είναι απαραίτητη για την επιβίωση ή οικονομικά επωφελής.

Οι Hahn και McQuigg (1970) έχουν χρησιμοποιήσει θεωρίες πιθανοτήτων, για τον προσδιορισμό του οικονομικού οφέλους που θα προέκυπτε από την περιβαλλοντική τροποποίηση για τις αγελάδες γαλακτοπα-ραγωγής σε περίοδο

ζέστης. Το έργο βασίστηκε στο δείκτη θερμοκρασίας-υγρασίας (THI: Temperature Humidity Index), με τιμές που προέρχονται από ωριαίες θερμοκρασίες ξηρού βολβού και σημείου δρόσου. Η κατανομή του THI επιτρέπει τον υπολογισμό της πιθανότητας μιας δεδομένης γραμμής για το καλοκαίρι, σε συνδυασμό με τη συσχετιζόμενη μείωση παραγωγής γάλακτος σε φυσικά μεταβαλλόμενες συνθήκες, με βάση μια συνάρτηση επικύρωσης. Η τεχνική που χρησιμοποιείται, ισχύει για κάθε είδος, περίοδο και θέση, για τις οποίες υπάρχει μια συνάρτηση αντίδρασης και μια βάση κλιματικών δεδομένων, και παρέχει έναν ορθολογικό τρόπο για την εκτίμηση των πλεονεκτημάτων των εναλλακτικών λύσεων περιβαλλοντικής τροποποίησης.

7.2.4. Ζωοτροφές και βοσκότοποι

Οι αλλαγές στα πρότυπα καιρού και κλίματος σε βοσκοτόπους και ημιάνυδρες εκτάσεις, οι οποίες καταλαμβάνουν σχεδόν 50.000.000 km^2 ή περίπου 30% της επιφάνειας του πλανήτη (WMO, 2000), μπορούν να έχουν σημαντικές επιπτώσεις για το ζωικό κεφάλαιο. Επειδή η κτηνοτροφία διαδραματίζει πρωταρχικό ρόλο στην οικονομική δομή πολλών αναπτυσσόμενων περιοχών και οι συχνές ξηρασίες προκαλούν σημαντικές απώλειες ζώων, λόγω των περιορισμένων χορτονομών, είναι ζωτικής σημασίας να συμπληρωθεί η βελτίωση των βοσκοτόπων με χορτονομή από δέντρα και θάμνους, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες (WMO, 2004α). Τα δέντρα και οι θάμνοι όχι θα παρέχουν μόνο τροφή για τα ζώα, αλλά επίσης θα χρησιμεύσουν ως καταφύγιο από την ηλιακή ακτινοβολία και θα δημιουργήσουν ευνοϊκότερες συνθήκες για αναβλάστηση του χόρτου που έχει καταστραφεί από τις ξηρές συνθήκες (βλ., για παράδειγμα, Onyewotu et al., 2003β).

7.3. Αγρομετεωρολογία για την αλιεία και τις υδατοκαλλιέργειες

Η αλιεία θεωρείται διεθνώς ότι αποτελεί μια εκμετάλλευση έως ή και πέρα από το βιώσιμο όριο. Δεδομένου ότι ο πληθυσμός του πλανήτη αναμένεται να συνεχίσει να αυξάνεται, η ζήτηση για προϊόντα από την αλιεία θα αυξηθεί αναλόγως. Οι υδατοκαλλιέργειας πρέπει να παρέμβουν, ώστε να καλύψουν την αυξανόμενη ζήτηση, δεδομένου ότι ο αριθμός των αλιευμάτων δεν μπορεί, προφανώς, να αυξηθεί. Η μετεωρολογία διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στον τομέα της αλιείας, καθόσον η ηλιακή ακτινοβολία και η ατμοσφαιρική θερμοκρασία επηρεάζουν τη θερμοκρασία του νερού, η οποία επηρεάζει, με τη σειρά της, τη φυσική παραγωγικότητα των χερσαίων και θαλάσσιων υδάτων και την ανάπτυξη των αλιευτικών ειδών (Kapetsky, 2000). Οι καιρικές συνθήκες, επίσης, έχουν τεράστιες συνέπειες, τόσο στην ικανότητα των αλιέων να αλιεύουν ψάρια και άλλους υδρόβιους οργανισμούς, όσο και στην ασφάλεια των αλιέων. Ωστόσο, η αλιεία, όπως και το κυνήγι άλλωστε, αφορά, κυρίως, την εκμετάλλευση των έμβιων πόρων από φυσικούς πληθυσμούς. Η διαχείριση των πόρων αυτών καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τους διεθνείς και εθνικούς κανονισμούς σχετικά με τις αλιευτικές πρακτικές.

Επίσης, οι υδατοκαλλιέργειες αναμένεται να αποτελέσουν σύντομα την κύρια πηγή πρωτεΐνης από υδρόβιους οργανισμούς και θα ξεπεράσουν την αλιεία, όπως ακριβώς η γεωργία ξεπέρασε το κυνήγι ως πηγή κρέατος και τη συλλογή σιτηρών και άλλων τροφίμων. Η αγρομετεωρολογία αποτελεί πλέον ένα σημαντικό εργαλείο στον τομέα της γεωργίας και μπορεί να είναι εξίσου χρήσιμη στον τομέα των υδατοκαλλιεργειών. Μετεωρολογικά δεδομένα χρησιμοποιούνται ήδη στις υδατοκαλλιέργειες (Szumiec, 1983· Boyd & Tucker, 1998· Kapetsky, 2000). Ωστόσο, υπάρχουν μέχρι σήμερα ελάχιστες περιπτώσεις στις οποίες η απόκτηση και η εφαρμογή των μετεωρολογικών δεδομένων να μπορούν να θεωρηθούν εργαλεία της εφαρμοσμένης υδατοκαλλιέργεια και να αποτελέσουν σημαντικό μέρος της κατάρτισης των επιστημόνων που ασχολούνται με τις υδατοκαλλιέργειες.

7.3.1. Αλιεία

Τα περισσότερα από τα εμπορικά αλιευτικά προϊόντα είναι θαλάσσιας προέλευσης. Το 2004, 87,2 εκατομμύρια τόνοι αλιεύτηκαν από τους ωκεανούς, σε σύγκριση με 8,7 εκατομμύρια τόνους που αλιεύτηκαν από εσωτερικά ύδατα. Η παραγωγή των άγριων ψαριών εξαρτάται από τη βέλτιστη θερμοκρασία και άλλες ευνοϊκές καιρικές συνθήκες. Τα μετεωρολογικά δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μια προσπάθεια να εξηγηθούν οι παρατηρούμενες αλλαγές στην αλιευτική παραγωγή. Προβλέψεις των βραχυπρόθεσμων ή μακροπρόθεσμων κλιματικών αλλαγών μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προβλεφθούν αλλαγές στους αλιευτικούς πληθυσμούς που θα επηρεάσουν τη μελλοντική αλιεία. Οι περισσότερες αλιευτικές μέθοδοι απαιτούν τη χρήση σκαφών σε μεγάλους υδάτινους όγκους και είναι εγγενώς επικίνδυνες δραστηριότητες, εξαιτίας των καταιγίδων. Οι

βραχυπρόθεσμες καιρικές προβλέψεις μπορεί να είναι εξαιρετικά χρήσιμες για το σχεδιασμό των αλιευτικών δραστηριοτήτων. Επιπλέον, πληροφορίες σχετικά με την ένταση και την κίνηση των καταιγίδων είναι κρίσιμης σημασίας, για την ασφάλεια των αλιέων.

7.3.2. Υδατοκαλλιέργεια

Η συνολική παγκόσμια παραγωγή από τις υδατοκαλλιέργειες ήταν 59,4 εκατομμύρια τόνοι το 2004. Εξ αυτών, οι 32,2 εκατομμύρια τόνοι προέρχονταν από τις υδατοκαλλιέργειες γλυκών υδάτων και οι 27,2 εκατομμύρια τόνοι από τις θαλάσσιες υδατοκαλλιέργειες. Αν και η υδατοκαλλιέργεια είναι ζωτικής σημασίας για τον εσωτερικό επισιτισμό πολλών εθνών, τα προϊόντα από υδατοκαλλιέργειες είναι επίσης σημαντικά διεθνή εμπορεύματα.

7.3.2.1. Ιχθυοκαλλιέργεια σε δεξαμενές

Τα υδρόβια ζώα διατηρούνται σε δεξαμενές και εφοδιάζονται με λίπασμα και ζωοτροφές, προκειμένου να αναπτυχθούν με ταχείς ρυθμούς. Τα ανεπιθύμητα είδη μπορούν να αποκλειστούν, ώστε η ποιότητα να διατηρείται σε ένα επιθυμητό επίπεδο. Η παραγωγή ανά μονάδα επιφανείας διατηρείται σε μεγαλύτερα επίπεδα από αυτή των φυσικών υδάτων και τα αλιεύματα μπορούν να αλιευτούν εύκολα. Οι τρεις βασικοί τύποι δεξαμενών που χρησιμοποιούνται στις υδατοκαλλιέργειες είναι: λεκάνες απορροής, δεξαμενές σε ανάχωμα και ανασκαμμένες δεξαμενές. Το υδρολογικό ισοζύγιο για τις δεξαμενές μπορεί να εκφραστεί από την υδρολογική εξίσωση συνεχείας:

Εισροές - εκροές = ΔΗ. (7.4)

Η υδρολογική εξίσωση για τις δεξαμενές μπορεί να διευρυνθεί ως εξής:

$$(P + R + S_{in} + A) - (E + S_o + O + C + Q) = \Delta H, \quad (7.5)$$

όπου P είναι η βροχόπτωση, R η απορροή, S_{in} η βραδεία εισροή, A ο εμπλουτισμός από τα πηγάδια, τα ρεύματα, τις λίμνες ή άλλες πηγές, E η εξάτμιση, S_o η βραδεία εκροή, O η υπερχείλιση, C η συνολική υδατοκατανάλωση, για οικιακή χρήση, άρδευση, πότισμα ζώων ή άλλους σκοπούς, Q η εκούσια διοχέτευση του νερού, για ανανέωση του νερού ή συγκομιδή, και ΔΗ η αλλαγή στην αποθήκευση.

Οι λεκάνες απορροής προκύπτουν με τη δημιουργία ενός φράγματος σε μια κοίτη, το οποίο παρακρατεί την επιφανειακής απορροής. Ποικίλλουν σημαντικά ως προς την έκτασή τους, αλλά οι περισσότερες είναι μεγαλύτερες από 0,5 ha και μικρότερες από 10 εκτάρια. Καλούνται επίσης δεξαμενές σε αναβαθμίδες (terrace ponds) και συχνά κατασκευάζονται σε σειρά, έτσι ώστε η υπερχείλιση από τη μία να συγκρατηθεί από μια άλλη, σε χαμηλότερο υψόμετρο. Η ελάχιστη αναλογία της επιφάνειας της λεκάνης απορροής προς τον αναγκαίο όγκο της δεξαμενής, για να διατηρηθεί η λεκάνη απορροής, ποικίλλει από περίπου 0,3 ha/1000 m^3, σε ορεινές, υγρές περιοχές, έως πάνω από 40 ha/1000 m^3, σε ξηρές, πεδινές περιοχές (United States Soil Conservation Service, 1979). Η διακύμανση της στάθμης των υδάτων στις λεκάνες απορροής κυμαίνεται από μερικά εκατοστά σε περισσότερο από ένα μέτρο, με τις μεγαλύτερες διακυμάνσεις να παρατηρούνται σε άνυδρα κλίματα, κατά τις περιόδους ξηρασίας, καθώς και στις δεξαμενές, όπου γίνεται υπερβολική διήθηση (Yoo & Boyd, 1994).

Οι δεξαμενές σε ανάχωμα προκύπτουν από την εκσκαφή μιας λεκάνης στην οποία αποθηκεύεται το νερό. Η πλήρωση των δεξαμενών μπορεί να γίνει μέσω της βροχόπτωσης, της απορροής και της διείσδυσης υπόγειων υδάτων. Τέτοιου είδους υδατοσυλλογές δεν μπορούν να αποστραγγίζονται, αλλά μερικές φορές το νερό μπορεί να αφαιρεθεί με μια αντλία. Μικρές δεξαμενές σε ανάχωμα, με μέγεθος λίγων εκατοντάδων μέτρων, χρησιμοποιούνται ευρέως στις υδατοκαλλιέργειες.

Οι λεκάνες απορροής και οι δεξαμενές σε ανάχωμα γίνονται σπάνια δέκτες εισροών από πηγάδια, ρεύματα ή άλλους εξωτερικούς υδάτινους όγκους. Η αλιευτική παραγωγή σε τέτοιου είδους υδατοσυλλογές συχνά αναφέρεται ως «βροχοδίαιτη» (rainfed) υδατοκαλλιέργεια. Οι βροχοπτώσεις, η επιφανειακή ροή, η εξάτμιση και η διήθηση είναι κρίσιμοι παράγοντες, που ρυθμίζουν τη διαθέσιμη ποσότητα νερού για τη βροχοδίαιτη υδατοκαλλιέργεια. Μικρές, βροχοδίαιτες δεξαμενές είναι τα πιο κοινά συστήματα υδατοκαλλιέργειας που χρησιμοποιούνται από φτωχούς, αγροτικούς πληθυσμούς σε τροπικές χώρες.

Οι ανασκαμμένες δεξαμενές σχηματίζονται με την οικοδόμηση ενός αναχώματος γύρω από μια περιοχή, για την αποθήκευση νερού. Η επιφάνεια αυτών των δεξαμενών είναι συνήθως από 0,2 έως 2 εκτάρια και σπάνια πάνω από

10 εκτάρια. Οι ανασκαμμένες δεξαμενές στις εσωτερικές περιοχές τροφοδοτούνται με νερό από πηγάδια, ρεύματα ή δεξαμενές. Στις παράκτιες περιοχές, οι ανασκαμμένες δεξαμενές γεμίζουν με υφάλμυρο νερό από τις εκβολές ποταμών ή με θαλασσινό νερό. Τα συστήματα αποστράγγισης αποτελούνται από σωλήνες με βαλβίδες ή πύλες με φράγμα. Οι ανασκαμμένες δεξαμενές είναι δημοφιλείς για την εμπορική υδατοκαλλιέργεια, επειδή μπορεί η στάθμη των υδάτων να ελέγχεται και οι λίμνες να αποστραγγίζονται εύκολα, ώστε να διευκολύνεται η συγκομιδή.

7.3.2.2. Συστήματα συνεχούς ροής

Τα συστήματα συνεχούς ροής για την υδατοκαλλιέργεια περιλαμβάνουν επιμήκεις διώρυγες, δεξαμενές και άλλες μονάδες καλλιέργειας, από τις οποίες το νερό ρέει συνεχώς. Τα αλιευτικά είδη διατηρούνται σε πολύ μεγαλύτερες πυκνότητες από αυτές των δεξαμενών. Η ροή του ύδατος είναι συνήθως δύο ή τρεις φορές ο όγκος των ωριαίων μονάδων εκτροφής. Πηγές τροφοδοσίας νερού είναι πηγές, ρέματα και άλλοι επιφανειακοί υδάτινοι όγκοι. Το εισερχόμενο νερό είναι η κύρια πηγή διαλυμένου οξυγόνου για τα ψάρια και τα απόβλητα ξεπλένονται από την υδατοκαλλιέργεια, μέσω του νερού που ρέει. Για τα συστήματα συνεχούς ροής, είναι απαραίτητος ο σταθερός ανεφοδιασμός του νερού. Αυτά τα συστήματα είναι ιδιαίτερα δημοφιλή για την καλλιέργεια πέστροφας σε γλυκό νερό.

7.3.2.3. Μέθοδοι καλλιέργειας σε ανοιχτά ύδατα

Οι υδρόβιοι οργανισμοί καλλιεργούνται επίσης σε ωκεανούς, εκβολές ποταμών, λίμνες και ρεύματα, διατηρώντας τους περιφραγμένους σε υψηλές πυκνότητες ή τοποθετώντας οργανισμούς με σταθερή πρόσφυση στο κάτω μέρος των χώρων που διατηρούνται ή προσαρτώντας τους σε ένα δομικό πλαίσιο. Κλωβοί και απόχες (net pens) κατασκευάζονται με την προσάρτηση ενός διχτυού σε ένα πλαίσιο στήριξης. Οι κλωβοί ποικίλλουν σε μέγεθος, από 1 m^3 έως πάνω από 2.000 m^3, και επιπλέουν πάνω ή κοντά στην επιφάνεια του νερού.

7.3.2.4. Συστήματα επαναχρησιμοποίησης νερού

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι συστημάτων ανακυκλοφορίας νερού. Ο ένας τύπος είναι κατασκευασμένος εξωτερικά και αποτελείται από μονάδες καλλιέργειας, μέσω των οποίων το νερό περνά από μια δεξαμενή καθίζησης και, στη συνέχεια, από μια μεγαλύτερη, χωμάτινη δεξαμενή, προκειμένου να επεξεργαστεί, μέσω φυσικών βιολογικών διεργασιών, πριν επιστρέψουν στις μονάδες εκτροφής, για επαναχρησιμοποίηση. Μερικές φορές εφαρμόζεται μηχανικός αερισμός στις δεξαμενές, για να ενισχυθεί η συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου και να προωθηθεί η μικροβιακή δραστηριότητα. Ο άλλος τύπος συστήματος ανακυκλοφορίας νερού τοποθετείται, συνήθως, σε ένα θερμοκήπιο ή σε μια άλλη κατασκευή: το νερό από τις μονάδες εκτροφής περνά, μέσω μηχανικών και βιολογικών φίλτρων, και αερίζεται πριν να επαναχρησιμοποιηθεί στις μονάδες εκτροφής.

7.3.3. Κλίμα-καιρός και ποσότητα νερού

Οι υδατοκαλλιέργειες εξαρτώνται από έναν σταθερό ανεφοδιασμό νερού, του οποίου ο συνολικός όγκος είναι μεγάλος σε σύγκριση με τις παραδοσιακές γεωργικές καλλιέργειες. Η συνολική κατανάλωση νερού στις υδατοκαλλιέργειες είναι πολύ μικρότερη από τη συνολικά χρησιμοποιούμενη και αποτελείται τόσο από το νερό που αφαιρείται όταν αλιεύονται τα ζώα, περίπου 0,75 m^3 ανά τόνο παραγωγής, όσο και από το νερό που χάνεται λόγω διήθησης και εξάτμισης. Εντούτοις, οι εγκαταστάσεις υδατοκαλλιέργειας πρέπει να σχεδιαστούν έτσι ώστε να κάνουν αποτελεσματική χρήση του νερού και οι υδατοκαλλιεργητές πρέπει να είναι γνώστες των τοπικών υδρολογικών συνθηκών.

7.3.3.1. Υετός

Όλες οι πηγές νερού αλιείας εσωτερικών υδάτων και υδατοκαλλιέργειας προέρχονται από το νερό της βροχής, ενώ το ετήσιο ύψος και η κατανομή του υετού είναι κρίσιμοι παράγοντες (Kapetsky, 2000). Στην αλιεία και τις υδατοκαλλιέργειες, το πλεόνασμα ή το έλλειμμα της βροχόπτωσης είναι σημαντικότερη μεταβλητή από τις ίδιες τις βροχοπτώσεις (Boyd, 1986· Yoo & Boyd, 1994). Αυτή η μεταβλητή είναι η διαφορά μεταξύ βροχόπτωσης και εξάτμισης από τη δεξαμενή, μετρούμενη σε μηνιαίο ή ετήσιο βήμα. Σε ελάχιστες περιοχές του πλανήτη η άμεση βροχόπτωση μπορεί να διατηρήσει μια λίμνη. Συνήθως πρέπει να υπάρχει μία ή περισσότερες εξωτερικές πηγές νερού, όπως η απορροή από μια λεκάνη απορροής, η εισροή από τη διήθηση, ο εμπλουτισμός από πηγάδια ή άλλους υδάτινους όγκους. Η ξηρασία μπορεί να είναι ιδιαίτερα καταστροφική στις λεκάνες απορροής (watershed ponds).

Εάν τα υπόγεια ύδατα δεν επαρκούν για την επαναπλήρωση των δεξαμενών, η υδατική στάθμη μειώνεται δραστικά, προκαλώντας συνωστισμό των ψαριών.

7.3.3.2. Εξάτμιση

Η εξάτμιση από μια λίμνη υπολογίζεται συχνά από τον πολλαπλασιασμό με 0,7 της Class A λεκάνης εξατμισίμετρου. Διάφορες τεχνικές έχουν χρησιμοποιηθεί για την προσαρμογή του συντελεστή αναγωγής εξατμισιμετρικής λεκάνης στις τοπικές συνθήκες (WMO, 1973). Η μηνιαία μέση θερμοκρασία και η μέση μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία συσχετίστηκαν επίσης με την εξάτμιση της δεξαμενής (Boyd, 1985). Οι εξισώσεις παλινδρόμησης δίνονται από τις σχέσεις:

$E_p = –2,15 + 0,268\ Rad,\ R^2 = 0,642,\ (7.6)$

$E_p = –4,406 + 5,753\ T,\ R^2 = 0,862,\ (7.7)$

όπου το E_p αντιπροσωπεύει τη μηνιαία εξάτμιση από τη δεξαμενή (mm month^{-1}), ενώ Rad είναι η μέση μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία (g·cal cm^{-2} day^{-1}) και T η θερμοκρασία του αέρα (° C).
Ο κλασικός τρόπος για τη μείωση των απωλειών λόγω εξάτμισης του νερού που αποθηκεύεται στις δεξαμενές, για άρδευση και άλλες χρήσεις, είναι να γίνουν βαθύτερες. Η εξατμισοδιαπνοή δεν είναι, συνήθως, ένας σημαντικός παράγοντας στις δεξαμενές υδατοκαλλιέργειας, επειδή τα αγγειώδη υδρόβια φυτά αποθαρρύνονται από την εμβάθυνση των άκρων των δεξαμενών, της θόλωσης που προκύπτει από το πλαγκτόν και την εφαρμογή τεχνικών ελέγχου υδρόβιων φυκών (Boyd & Tucker, 1998). Ωστόσο, στην υδρολογική αξιολόγηση των έργων ιχθυοκαλλιέργειας, η εξάτμιση των λεκανών απορροής είναι ένα ζήτημα. Οι Yoo και Boyd (1994) συνιστούν τη μέθοδο Thornthwaite, για την εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής σχετικά με τους σκοπούς της υδατοκαλλιέργειας και της αλιείας, επειδή απαιτεί μόνο τη μηνιαία θερμοκρασία αέρα.

7.3.3.3. Επιφανειακή απορροή

Το ποσό της επιφανειακής ροής που εισέρχεται στις δεξαμενές εξαρτάται από τη λεκάνη απορροής, το ποσό της βροχής, τη διήθηση, την εξατμισοδιαπνοή και τα χαρακτηριστικά απορροής των λεκανών. Η εκτίμηση της επιφανειακής ροής μπορεί να γίνει με τη μέθοδο του αριθμού καμπύλης απορροής (United States Soil Conservation Service, 1972). Η εκτίμηση της παροχής αιχμής είναι σημαντική στο σχεδιασμό και την κατασκευή μιας δεξαμενής, για την αποτροπή βλάβης ή καταστροφής των φραγμάτων, εξαιτίας της διάβρωσης που προκαλείται από το νερό που υπερχειλίζει στη διάρκεια έντονων καταιγίδων. Η εξίσωση της ορθολογικής μεθόδου είναι:

$Q = C\ i\ A,\ (7.8)$

όπου Q είναι η παροχή αιχμής απορροής, C ο συντελεστής απορροής, i η μέγιστη ένταση βροχόπτωσης, για την περίοδο συγκέντρωσης της λεκάνης και την επιλεγμένη περίοδο επιστροφής, και A η επιφάνεια της λεκάνης απορροής.
Η απορροή αποτελείται από την επίγεια ροή και την υπόγεια ροή, πηγές που συνθέτουν τη ροή των ρευμάτων. Έτσι, ο υδρομετρικός σταθμός παρέχει τις πιο αξιόπιστες εκτιμήσεις της απορροής. Το ύψος των υδάτων σε δεξαμενές υδατοκαλλιέργειας πρέπει να διατηρείται 10 έως 15 εκατοστά κάτω από το ύψος υπερχείλισης, έτσι ώστε να μπορεί να συγκρατείται το μεγαλύτερο μέρος των βροχοπτώσεων και της απορροής. Οι βροχοδίαιτες δεξαμενές υδατοκαλλιέργειας στραγγίζονται, συνήθως, κατά διαστήματα ενός ή/και περισσότερων ετών για συγκομιδή. Στις περισσότερες εγκαταστάσεις, το έτος μπορεί να διαιρεθεί σε περιόδους, με βάση το ποσό της κατακρήμνισης. Οι δεξαμενές σε ανάχωμα κατασκευάζονται συχνά σε πλημμυρικές κοίτες. Αν ένα μεγάλο μέρος της πλημμυρικής κοίτης καταλαμβάνεται από δεξαμενές, τότε το εμβαδόν της διατομής για τη ροή της πλημμύρας θα μειωθεί και θα αυξήσει τα επίπεδα πλημμυρών.

7.3.3.4. Υδροκλίμα

Η μελέτη του υδροκλίματος περιλαμβάνει τις επιρροές του κλίματος στην υδατική διαθεσιμότητα (Langbein, 1967). Ένας κοινός τρόπος περιγραφής του υδροκλίματος ενός χώρου είναι η αποτύπωση της μηνιαίας

βροχόπτωσης και της μηνιαίας δυνητικής εξατμισοδιαπνοής στη διάρκεια ενός έτους. Καθαρό κέρδος στην εδαφική υγρασία εμφανίζεται για κάθε μήνα κατά τον οποίο η βροχόπτωση υπερβαίνει τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή. Όταν το έδαφος βρίσκεται στην υδατοϊκανότητα, ένα μέρος του νερού της βροχής διεισδύει βαθύτερα και γίνεται υπόγειο νερό, ενώ το υπόλοιπο γίνεται απορροή.

7.3.3.5. Υδατικό ισοζύγιο

Οι υδρολογικές εκτιμήσεις και τα τοπικά κλιματικά δεδομένα μπορεί να είναι πολύτιμα για το σχεδιασμό υδρολογικά αξιόπιστων έργων υδατοκαλλιέργειας. Το μέγεθος ενός έργου υδατοκαλλιέργειας δεν πρέπει να υπερβαίνει τη διαθεσιμότητα του νερού, γιατί, εάν προκύψει έλλειψη νερού, οι υδατοκαλλιέργειας μπορεί να καταστραφούν ή να χαθούν (Boyd & Gross, 2000). Το υδατικό ισοζύγιο θα πρέπει να εκτιμάται για τον προγραμματισμό και το σχεδιασμό νέων έργων.

Ας υποθέσουμε ότι ένα ιχθυοτροφείο, με 20 δεξαμενές σε ανάχωμα, η καθεμιά εκ των οποίων με μια επιφάνεια νερού 5 ha και μέσο βάθος 1,5 m, πρόκειται να κατασκευαστεί σε αργιλοπηλώδες έδαφος, όπου η ετήσια βροχόπτωση και η Class A εξάτμιση εξατμισιμετρικής λεκάνης είναι 120 cm και 100 cm, αντίστοιχα. Εικάζεται ότι η διήθηση θα είναι 0,25 cm day^{-1} (Yoo & Boyd, 1994), επειδή, σε σωστά κατασκευασμένες δεξαμενές σε αργιλοπηλώδη εδάφη, η διήθηση είναι μικρή. Η εξάτμιση από τη δεξαμενή θα θεωρηθεί 0,8 φορές την εξάτμιση της εξατμισομετρικής λεκάνης. Θα πρέπει οι δεξαμενές να αποστραγγίζονται ετησίως, για τη συγκομιδή, δεν θα πρέπει να γίνεται αλλαγή του νερού και θα πρέπει ο όγκος αποθήκευσης να επαρκεί, για την αποφυγή υπερχείλισης ύστερα από τις βροχές. Η απορροή από τα αναχώματα μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα. Η αλλαγή στην αποθήκευση θα είναι 1,5 m, επειδή οι δεξαμενές θα γεμίζουν και θα στραγγίζονται μία φορά κάθε χρόνο. Πηγή νερού θα είναι τα υπόγεια ύδατα από πηγάδια. Το συνολικό απαιτούμενου νερό από πηγάδια σε ένα μέσο έτος μπορεί να υπολογιστεί ως:

Εισροές - Εκροές = ΔΗ (7.9)

$(A + P) – (E + S_o) = \Delta H$ (7.10)

$A = (\Delta H + E + S_o) – P$ (7.11)

A = 150 cm + (100 cm x 0,8) + (0,25 cm day^{-1} x 365 days) – 120 cm = 201,25 cm.

Για ένα αγρόκτημα 100 εκταρίων, πρέπει να παρέχονται από το πηγάδι 2.012.500 m^3 νερού. Ας υποθέσουμε ότι για το έργο απαιτείται επίσης η ικανότητα πλήρωσης όλων των δεξαμενών εντός 60 ημερών. Οι δεξαμενές έχουν βάθος 1,5 m, και θα απαιτούνταν 1.500.000 m^3, προκειμένου να πληρωθούν 100 εκτάρια δεξαμενών πάνω από 60 ημέρες. Αυτό είναι μια συνεχής άντλησης με ρυθμό 17,4 m^{-3} $minute^{-1}$ από τα πηγάδια.

7.3.4. Κλίμα-καιρός και ποιότητα νερού

Η ηλιακή ακτινοβολία είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη των υδρόβιων φυτών και συνιστά έναν σημαντικό παράγοντα ρύθμισης της θερμοκρασίας του νερού. Η ανάμειξη του αέρα έχει μια ισχυρή επίδραση στη θερμική και χημική δυναμική των υδάτινων σωμάτων. Τέλος, ακραία καιρικά φαινόμενα, όπως πλημμύρες, ξηρασίες, τυφώνες και μη αναμενόμενες για την εποχή θερμοκρασίες, μπορεί να επηρεάσουν αρνητικά την ποιότητα του νερού και να έχουν αρνητικές επιπτώσεις στην αλιεία και την υδατοκαλλιέργεια.

7.3.4.1. Ηλιακή ακτινοβολία

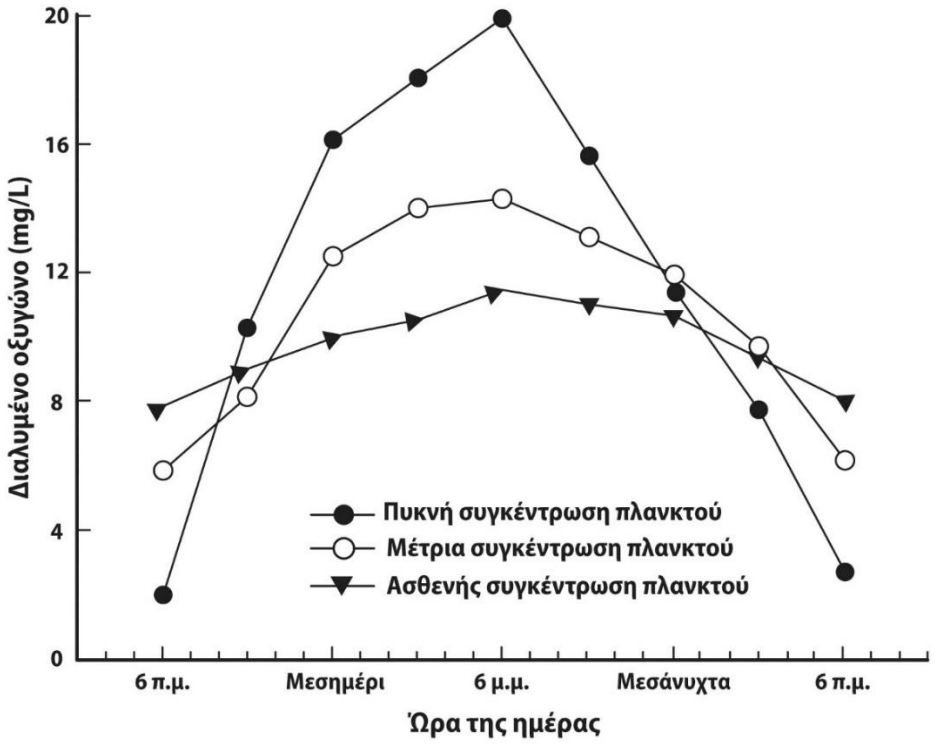
Το φυτοπλαγκτόν είναι η βάση της τροφικής αλυσίδας, που κορυφώνεται με την παραγωγή αλιευτικών ειδών στα φυσικά συστήματα. Τα πλαγκτονικά άλγη απαιτούν ηλιακή ακτινοβολία, νερό και ανόργανα θρεπτικά συστατικά, για τη φωτοσύνθεση, μια διαδικασία με την οποία χρησιμοποιούν χλωροφύλλη και άλλες χρωστικές ουσίες, για να συλλάβουν τα φωτόνια του φωτός και να μετατρέψουν την ενέργεια σε οργανική ουσία.

Οι οργανισμοί χρησιμοποιούν οξυγόνο κατά την αναπνοή, προκειμένου να οξειδώσουν τις οργανικές θρεπτικές ουσίες και να απελευθερώσουν βιολογικά χρήσιμη ενέργεια. Από οικολογική άποψη, η αναπνοή είναι το αντίθετο της φωτοσύνθεσης. Στη διάρκεια της ημέρας, η φωτοσύνθεση παράγει, συνήθως, οξυγόνο γρηγορότερα απ' ότι το οξυγόνο καταναλώνεται κατά την αναπνοή, ενώ η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου αυξάνεται από το πρωί

προς το απόγευμα (Σχήμα 7.5). Η φωτοσύνθεση σταματά τη νύχτα, αλλά η αναπνοή συνεχίζει να προκαλεί μείωση της συγκέντρωσης διαλυμένου οξυγόνου (Σχήμα 7.5). Οι διαφορές στη συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου μεταξύ ημέρας και νύχτας γίνονται πιο ακραίες καθώς αυξάνεται η παρουσία φυτοπλαγκτού (Σχήμα 7.6). Οι δεξαμενές υδατοκαλλιέργειας έχουν, συνήθως, πυκνό πλαγκτόν και ευρείες ημερήσιες διακυμάνσεις σε συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου.

Αν και είναι γνωστές οι βραχυπρόθεσμες διακυμάνσεις του ποσοστού της φωτοσύνθεσης που προκύπτουν από την επίδραση της νεφοκάλυψης στην εισερχόμενη ακτινοβολία, ωστόσο δεν έχει αποδειχθεί ότι ο ρυθμός ανάπτυξης των υδρόβιων ζώων επηρεάζεται από τη διακύμανση αυτή. Για τα περισσότερα αλιευτικά είδη, υπάρχει μια χρονική υστέρηση μεταξύ της πρωτογενούς παραγωγής και της χρήσης της στην παραγωγή ψαριών (McConnell, 1963). Οι βραχυπρόθεσμες διακυμάνσεις της ηλιακής ακτινοβολίας δεν αντιστοιχούν σε διακυμάνσεις στην ανάπτυξη των ψαριών, των γαρίδων και άλλων αλιευτικών ειδών. Η αλιευτική παραγωγή ενσωματώνει βραχυπρόθεσμες διακυμάνσεις της ηλιακής ακτινοβολίας και της φωτοσύνθεσης, αλλά οι διαφορές μπορεί να είναι προφανείς σε ετήσια βάση. Πολλά είδη υδατοκαλλιέργειας βασίζονται σε εισροές ζωοτροφών. Η παραγωγή γατόψαρου σε δεξαμενές με διατροφή δεν συσχετίστηκε με την ηλιακή ακτινοβολία.

Είναι γνωστό ότι η παρατεταμένη νεφοκάλυψη μειώνει το ποσοστό φωτοσύνθεσης και την παραγωγή διαλυμένου οξυγόνου. Αρκετές ημέρες με συννεφιασμένο ουρανό μπορεί να οδηγήσουν σε εξάντληση του διαλυμένου οξυγόνου στις δεξαμενές. Ο μηχανικός αερισμός χρησιμοποιείται, συχνά, για να ενισχυθεί ο ανεφοδιασμός με διαλυμένο οξυγόνο και να προληφθεί το στρες της έλλειψης διαλυμένου οξυγόνου στα εκτρεφόμενα είδη. Ιστορικά δεδομένα για την ηλιακή ακτινοβολία, τη συχνότητα νεφοκάλυψης ή τη διάρκεια της ημερήσιας ηλιοφάνειας σε μια τοποθεσία μπορεί να δώσουν ενδείξεις για την πιθανότητα η συννεφιά να αποτελέσει ένα κοινό πρόβλημα σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Προβλέψεις των περιόδων με βαριές συννεφιές θα μπορούσε να είναι χρήσιμες για την προειδοποίηση των υδατοκαλλιεργητών σχετικά με το ενδεχόμενο ελάττωσης του διαλυμένου οξυγόνου και την ανάγκη να προετοιμαστούν κατάλληλα γι' αυτό.



Σχήμα 7.5. *Σχέση του χρόνου της ημέρας και της πυκνότητας του φυτοπλαγκτού για διάφορα επίπεδα συγκεντρώσεων διαλυμένου οξυγόνο στην επιφάνεια του νερού.*

Ο Boyd και οι συνεργάτες του (1978β) έχουν προτείνει μια εξίσωση για τον υπολογισμό της μείωσης της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου σε δεξαμενές τη νύχτα. Οι Romaire και Boyd (1979) έχουν αναπτύξει μια εξίσωση για την πρόβλεψη της ημερήσιας αύξησης διαλυμένου οξυγόνου στις δεξαμενές, η οποία βασίζεται στην ηλιακή ακτινοβολία και τη συγκέντρωση της χλωροφύλλης-α. Επίσης, το ποσό του φωτός μπορεί να επηρεάσει ψάρια και γαρίδες με άλλους τρόπους. Γαρίδες από δεξαμενές με καθαρό νερό είναι συχνά πιο ανοιχτόχρωμες από εκείνες από θολά νερά. Η έκθεση αυγών και νυμφών σε υπερβολική υπεριώδη ακτινοβολία μπορεί να οδηγήσει σε άμεση βλάβη του DNA, προκαλώντας έτσι θνησιμότητα. Υπερβολική ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να προκαλέσει επίσης έμμεσα οξειδωτική καταπόνηση, φωτοτοξικότητα και φωτοδερματίτιδες (Zagarese & Williamson, 2001).

7.3.4.2. Θερμοκρασία του νερού

Τα ψάρια, οι γαρίδες και τα άλλα υδρόβια ζώα είναι ποικιλόθερμα. Η θερμοκρασία του σώματός τους αυξάνεται και μειώνεται ανάλογα με τις αλλαγές στη θερμοκρασία του νερού. Είδη των θερμών υδάτων αυξάνονται καλύτερα σε θερμοκρασία 20° C, ή περισσότερο, ενώ είδη των ψυχρών υδάτων, ευδοκιμούν σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Κάθε είδος έχει ένα χαρακτηριστικό εύρος ανοχής στη θερμοκρασία και θα πεθάνει εάν εκτεθεί σε θερμοκρασίες εκτός αυτού του εύρους. Η αναπνοή και η ανάπτυξη υδρόβιων οργανισμών είναι χημικές αντιδράσεις, οι οποίες, εντός του ανεκτού θερμοκρασιακού για ένα είδος, διπλασιάζονται σε ρυθμό, με μια αύξηση της θερμοκρασίας κατά 10° C, σύμφωνα με το νόμο του Van't Hoff. Το φυτοπλαγκτόν, τα βακτηρία και άλλοι μικροοργανισμοί των υδατοκαλλιεργειών αντιδρούν στη ζεστασιά, αυξάνοντας τη μεταβολική τους δραστηριότητα. Η φωτοσύνθεση, η αναπνοή, η νιτροποίηση, η απονίτρωση και άλλες βιολογικές διεργασίες επιταχύνονται από την αύξηση της θερμοκρασίας. Τα ποσοστά των χημικών αντιδράσεων μεταξύ αβιοτικών ουσιών διπλασιάζονται επίσης, με μια αύξηση κατά 10° C της θερμοκρασίας. Ωστόσο, η δυνατότητα του νερού να συγκρατεί το διαλυμένο οξυγόνο μειώνεται με τη θερμοκρασία (Πίνακας 7.2).

Θερμοκρασία ύδατος (°C)	**Διαλυμένο οξυγόνο *(mgl^{-1})***	**Θερμοκρασία ύδατος (°C)**	**Διαλυμένο οξυγόνο *(mgl^{-1})***
0	14,60	22	8,73
2	13,81	24	8,40
4	13,09	26	8,09
6	12,44	28	7,81
8	11,83	30	7,54
10	11,28	32	7,29
12	10,77	34	7,05
14	10,29	36	6,82
16	9,86	38	6,61
18	9,45	40	6,41
20	9,08		

Πίνακας 7.2. *Η διαλυτότητα του διαλυμένου οξυγόνου σε γλυκό νερό σε διαφορετικές θερμοκρασίες.*

Η πιθανότητα εμφάνισης επικίνδυνα χαμηλών συγκεντρώσεων διαλυμένου οξυγόνου σε δεξαμενές υδατοκαλλιέργειας ή σε φυσικά οικοσυστήματα αυξάνει σημαντικά στη διάρκεια περιόδων με μη φυσιολογικές, υψηλές θερμοκρασίες νερού. Τα υδρόβια ζώα, που εκτίθενται σε θερμοκρασίες κοντά στα ανεκτά όρια, καταπονούνται και είναι πιο ευαίσθητα στις ασθένειες και τις μολύνσεις από παράσιτα. Δαπανούν περισσότερη ενέργεια, για τη διατήρηση της ομοιόστασής τους, και μπορούν να χρησιμοποιήσουν λιγότερη ενέργεια, για την ανάπτυξη και την αναπαραγωγή τους. Ασυνήθιστα χαμηλές ή υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να επηρεάσουν αρνητικά την αναπαραγωγή, την επιβίωση και την ανάπτυξη των ψαριών και άλλων υδρόβιων ζώων, τόσο των φυσικών οικοσυστημάτων, όσο και των εγκαταστάσεων υδατοκαλλιέργειας. Είναι σημαντικό να επιλέγονται είδη που να μπορούν να ανέχονται τις θερμοκρασίες του χώρου όπου θα καλλιεργηθούν. Ο Bolte και οι συνεργάτες του (1995) έχουν αναπτύξει ένα βιοενεργητικό μοντέλο, σύμφωνα με το οποίο γίνεται χρήση της μέσης θερμοκρασίας, της φωτοπεριόδου και της ταχύτητας του ανέμου, προκειμένου να προβλεφθεί ο αριθμός των δυνατών ετήσιων καλλιεργειών για διάφορα σημαντικά υδατοκαλλιεργούμενα είδη του γλυκού νερού σε όλο τον κόσμο.

Η θερμοκρασία του νερού στις δεξαμενές υδατοκαλλιέργειας ακολουθεί στενά τις θερμοκρασίες του αέρα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.6, με δεδομένα από το Πέμπερτον της Δυτικής Αυστραλίας (Morrissy, 1976). Οι μηνιαίες θερμοκρασίες αέρα είναι περίπου 0,5° C έως 2,0° C υψηλότερες από τις μηνιαίες θερμοκρασίες του νερού, αλλά οι ετήσιες τάσεις, αυξανόμενες ή μειούμενες, είναι πανομοιότυπες. Γίνεται ευρέως αποδεκτό ότι οι μεγάλες εποχικές αλλαγές στη θερμοκρασία του αέρα στις εύκρατες περιοχές επηρεάζουν σημαντικά τη θερμοκρασία του νερού και την ανάπτυξη των υδρόβιων ζώων. Ωστόσο, σχετικά μικρές αλλαγές στη θερμοκρασία του νερού μεταξύ διαφορετικών περιόδων του έτους στις τροπικές περιοχές επηρεάζουν επίσης τη θερμοκρασία του νερού και την ανάπτυξη.
Η θερμοκρασία του αέρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της θερμοκρασίας του νερού των δεξαμενών (Klemetson & Rogers, 1985· Wax & Pote, 1990). Οι εξισώσεις που αναπτύχθηκαν από τους Wax & Pote (1990), για την εκτίμηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας των υδάτων (°C) σε δεξαμενές την αυγή και τις απογευματινές ώρες, είναι οι εξής:

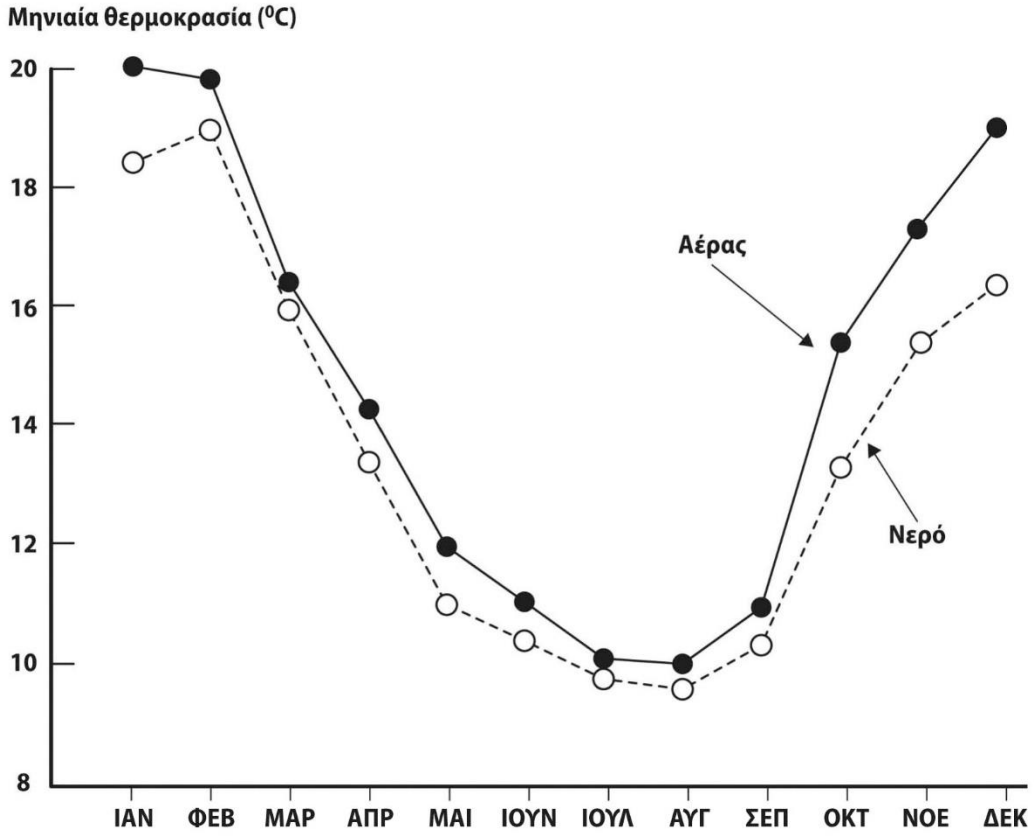
$$T_{dawn} = 2{,}218 + 0{,}062(A_{max}) + 0{,}285(A_{min}) + 0{,}561(P_{aft}), \quad (7.12)$$

όπου T_{dawn} είναι η θερμοκρασία του νερού την αυγή, A_{max} η μέγιστη θερμοκρασία την προηγούμενη ημέρα, A_{min} η ελάχιστη θερμοκρασία την προηγούμενη ημέρα και P_{aft} η θερμοκρασία του νερού της δεξαμενής το προηγούμενο απόγευμα.
Έτσι:

$$Taft = 2{,}071 - 0{,}068(amin) + 0{,}373(amax) + 0{,}651(Pdawn), \quad (7.13)$$

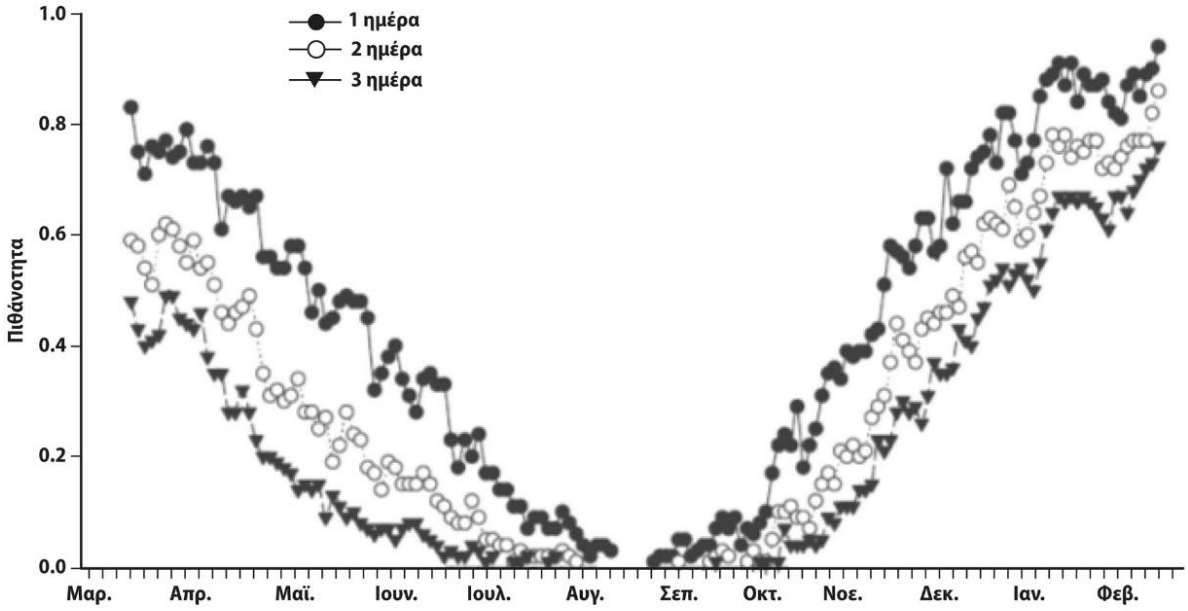
όπου T_{aft} είναι η θερμοκρασία του νερού το απόγευμα, *amin* η ελάχιστη θερμοκρασία του αέρα κατά την ίδια ημέρα, *amax* η μέγιστη θερμοκρασία του αέρα κατά την ίδια ημέρα και P_{dawn} η θερμοκρασία του νερού της δεξαμενής τα ξημερώματα της ίδιας ημέρας.
Εξισώσεις όπως οι παραπάνω δύο, (7.12) και (7.13), θα μπορούσαν να χρησιμεύσουν για την πρόβλεψη της θερμοκρασίας του νερού των δεξαμενών. Το θερμοκρασιακό καθεστώς σε μια δεξαμενή, που υπολογίζεται με βάση αυτές τις εξισώσεις, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να προβλέψει το μήκος των καλλιεργητικών περιόδων, την καταλληλότητα των χώρων για τα διάφορα αλιευτικά είδη και την ανοχή τους σε ασυνήθιστα υψηλές ή χαμηλές θερμοκρασίες.
Η φυσιολογική δραστηριότητα ειδών των θερμών υδάτων σε εύκρατα κλίματα μειώνεται όταν μειώνεται η θερμοκρασία του νερού το χειμώνα. Πολλά τροπικά είδη είναι διαφορετικά από τα είδη των θερμών υδάτων σε εύκρατα κλίματα, δεδομένου ότι δεν μπορούν να ανεχτούν τη χαμηλή θερμοκρασία. Τόσο τα είδη των ψυχρών υδάτων, όσο και τα είδη των θερμών υδάτων καταπονούνται από ασυνήθιστα υψηλές θερμοκρασίες. Παρατεταμένη έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες θα οδηγήσει σε μειωμένη λήψη τροφής και ανάπτυξη, θα αυξήσει την ευαισθησία σε νοσήματα και μπορεί να οδηγήσει σε θνησιμότητα. Σε υψηλές θερμοκρασίες, ο ρυθμός της αναπνοής των καλλιεργούμενων ειδών αυξάνεται με την υψηλή θερμοκρασία, με αποτέλεσμα να απαιτείται περισσότερο οξυγόνο (Neill & Bryan, 1991).
Ξαφνικά επεισόδια δροσερού καιρού μπορεί να προκαλέσουν πτώση της θερμοκρασίας του νερού κάτω από τις μέσες μηνιαίες τιμές και να επηρεάσουν αρνητικά την επιβίωση και την ανάπτυξη των ειδών ιχθυοκαλλιέργειας. Ψυχρά μέτωπα μπορεί να έρθουν σε μια περιοχή μετά την εγκατάσταση των γαρίδων, προκαλώντας μείωση της θερμοκρασίας του νερού, με αποτέλεσμα την καταπόνηση των γαρίδων ή/και το θάνατό τους. Η πρώιμη εγκατάστασή τους είναι ουσιαστικής σημασίας, λόγω της σχετικά σύντομης καλλιεργητικής περιόδου της τροπικής γαρίδας. Ωστόσο, εάν η εγκατάσταση γίνει πολύ νωρίς, τότε ένα κρύο ρεύμα μπορεί να σκοτώσει τις προνύμφες. Οι γαρίδες πρέπει να συγκομιστούν το φθινόπωρο, πριν από την έναρξη των μοιραίων χαμηλών θερμοκρασιών νερού.
Οι Green και Popham (2008) εκτίμησαν τις πιθανότητες μια ελάχιστη θερμοκρασία αέρα μικρότερη ή ίση από 14° C να διαρκέσει για μία, τρεις ή πέντε ημέρες στη διάρκεια της εκτροφής και συγκομιδής για γαρίδες εσωτερικών υδάτων στις Ηνωμένες Πολιτείες. Οι πιθανότητες για ένα από αυτά τα μέρη, στο Γκρήνσμπορο της Αλαμπάμα, παρουσιάζονται στο Σχήμα 7.7. Σε αυτή την τοποθεσία, η πιθανότητα μιας ημερήσιας περιόδου με θερμοκρασία νερού χαμηλότερη από 14° C κυμαίνεται κάτω από το 10%, μόνο από τα μέσα Μαΐου μέχρι τα μέσα Σεπτεμβρίου.

Έτσι, η ασφαλέστερη καλλιεργητική περίοδος για την καλλιέργεια θαλάσσιας γαρίδας στο Γκρήνσμπορο είναι μόνο περίπου 120 ημέρες. Οι πιθανότητες αυτές μπορούν να βοηθήσουν τους καλλιεργητές εσωτερικής γαρίδες να διαχειριστούν τον κίνδυνο και να βελτιώσουν τις διαχειριστικές αποφάσεις τους στην αρχή και στο τέλος της καλλιεργητικής περιόδου.



Σχήμα 7.6. *Μέση μηνιαία θερμοκρασία ατμόσφαιρας και υδάτων στο Πέμπερτον της Δυτικής Αυστραλίας. Οι τιμές αφορούν το μέσο όρο ελάχιστης και μέγιστης θερμοκρασίας.*

Η θερμοκρασία του νερού διαδραματίζει σημαντικό, έμμεσο ρόλο στην υγεία των υδρόβιων ζώων, επειδή επηρεάζει έντονα την εμφάνιση και τις συνέπειες των μολυσματικών ασθενειών. Η θερμοκρασία του νερού είναι επίσης ένας βασικός παράγοντας στη διαχείριση των εκκολαπτηρίων και στην παραγωγή υδρόβιων προνυμφών. Η παραγωγή των προνυμφών για καλλιεργητικούς σκοπούς περιλαμβάνει συχνά την έναρξη της ωορρηξίας και τη διέγερση του σπερματοφόρου σάκου, με τη χρήση εξωγενών ορμονών. Ενώ άλλοι περιβαλλοντικοί παράγοντες, όπως η φωτοπερίοδος και η ταχύτητα ροής, διαδραματίζουν κάποιο ρόλο, η θερμοκρασία είναι ο κρίσιμος παράγοντας, που καθορίζει το ποσοστό της ωορρηξίας και της παραγωγής σπέρματος υπό φυσικές και μη συνθήκες.



Σχήμα 7.7. *Πιθανότητες για μια ελάχιστη θερμοκρασία αέρα 14 ° C ή λιγότερο σε 1 ημέρα και σε 3 ή 5 διαδοχικές ημέρες στη διάρκεια της άνοιξης και του φθινοπώρου στο Γκρήνσμπορο της Αλαμπάμα.*

7.3.4.3. Χειμερινές απώλειες

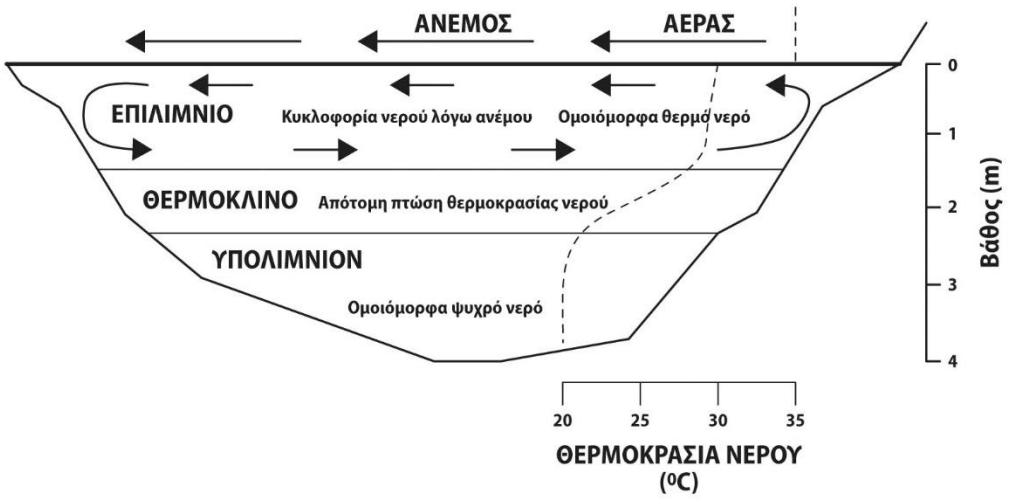
Οι θάνατοι ψαριών σε υδάτινους όγκους που καλύπτονται από πάγο είναι γνωστοί ως χειμωνιάτικες απώλειες (winterkill). Όταν μικροί υδάτινοι όγκοι καλύπτονται από πάγο ή χιόνι, το φως δεν μπορεί να περάσει. Έτσι, δεν παράγεται οξυγόνο από τη φωτοσύνθεση, ενώ η αναπνοή των οργανισμών μειώνει τις συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου. Οι δεξαμενές υδατοκαλλιέργειας σε κρύες περιοχές είναι πιθανό να παρουσιάσουν χειμωνιάτικες απώλειες επειδή λαμβάνουν μεγάλες ποσότητες θρεπτικών συστατικών και οργανικής ύλης, και τείνουν να είναι ρηχές. Η αφαίρεση του χιονιού από τον πάγο αποτελεί έναν τρόπο να μειωθεί η πιθανότητα εμφάνισης χειμωνιάτικων απωλειών. Μια άλλη μέθοδος είναι ο αερισμός της δεξαμενής, ώστε να κυκλοφορήσει το νερό και να παρεμποδιστεί η ολοσχερής κάλυψη της επιφάνειας της δεξαμενής με πάγο (Boyd, 1990). Σε πιο εύκρατα κλίματα, μια σύντομη περίοδος ασυνήθιστα ψυχρού καιρού, λόγω του οποίου προκαλείται χιονόστρωση, δεν οδηγεί συνήθως σε χειμωνιάτικες απώλειες.

7.3.4.4. Θερμική στρωμάτωση

Σε δεξαμενές και λίμνες εμφανίζεται το φαινόμενο της θερμικής στρωμάτωσης, επειδή η θερμότητα απορροφάται πιο γρήγορα κοντά στην επιφάνεια και τα επιφανειακά θερμά στρώματα ύδατος είναι λιγότερο πυκνά από τα ψυχρά κατώτερα στρώματα (Πίνακας 7.3). Το φαινόμενο της στρωμάτωσης εμφανίζεται όταν διαφορές στην πυκνότητα των ανώτερων και κατώτερων στρωμάτων νερού γίνουν τόσο μεγάλες ώστε τα δύο στρώματα να μην μπορούν να αναμειχθούν από τον άνεμο. Η κλασική προσέγγιση σχηματισμού θερμικής στρωμάτωσης σε λίμνες στις εύκρατες ζώνες περιγράφεται από τον Wetzel (2001). Η διαφορά στην πυκνότητα μεταξύ του ανώτερου και του κατώτερου στρώματος νερού γίνεται τόσο μεγάλη ώστε ο άνεμος δεν είναι πλέον αρκετά ισχυρός για να αναμείξει τα δύο στρώματα. Το ανώτερο στρώμα ονομάζεται επιλίμνιο (epilimnion) και το κατώτερο στρώμα ονομάζεται υπολίμνιο (hypolimnion). Το ενδιάμεσο στρώμα, μεταξύ του επιλιμνίου και του υπολιμνίου, καλείται μεταλίμνιο ή θερμοκλινές (Σχήμα 7.8).

°C	g cm^{-3}	°C	g cm^{-3}	°C	g cm^{-3}
0	0,9998679	11	0,9996328	22	0,9977993
1	0,9999267	12	0,9995247	23	0,9975674
2	0,9999679	13	0,999404 0	24	0,.9973256
3	0,9999922	14	0,9992712	25	0,9970739
4	1,0000000	15	0,9991265	26	0,9968128
5	0,9999919	16	0,9989701	27	0,9965421
6	0,9999681	17	0,9988022	28	0,9962623
7	0,9999295	18	0,9986232	29	0,9959735
8	0,9998762	19	0,9984331	30	0,9956756
9	0,9998088	20	0,9982323		
10	0,9997277	21	0,9980210		

Πίνακας 7.3. *Πυκνότητα γλυκού νερού σε διαφορετικές θερμοκρασίες.*



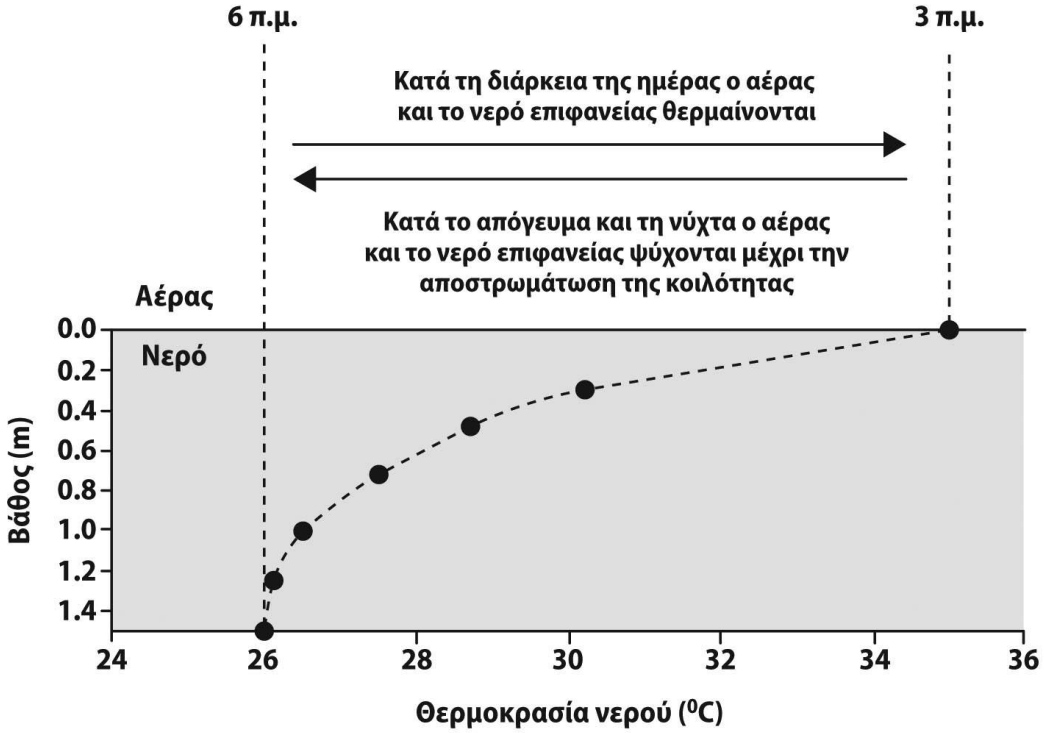
Σχήμα 7.8. *Θερμική στρωμάτωση σε σχετικά βαθιά λίμνη.*

Στις τροπικές λίμνες γίνεται επίσης στρωμάτωση. Υπάρχουν δύο ετήσια μέγιστα της ηλιακής ακτινοβολίας, αλλά η μεταβολή στη ροή της ακτινοβολίας είναι μικρή, και άλλοι παράγοντες, εκτός από την ηλιακή ακτινοβολία, μπορεί να είναι μείζονος σημασίας στη ρύθμιση της θερμικής στρωμάτωσης (Hutchinson, 1975·Wetzel, 2001). Στις περισσότερες τροπικές λίμνες γίνει στρωμάτωση, αλλά η αποστρωμάτωση παρουσιάζεται μία ή περισσότερες φορές ετησίως, ως συνέπεια του ανέμου, της βροχής ή αλλαγών στη θερμοκρασία του αέρα.

Σε σύγκριση με τις λίμνες, οι δεξαμενές είναι πιο ρηχές, πιο θολές, προστατεύονται καλύτερα από τον άνεμο και έχουν μικρότερη επιφάνεια. Σε μια μέση δεξαμενή ψαριών θερμών υδάτων, το μέσο βάθος σπάνια ξεπερνά τα 2 m, το μέγιστο βάθος τα 4 ή 5 m και το εμβαδόν της δεν είναι πάνω από λίγα εκτάρια. Ωστόσο, θερμική στρωμάτωση μπορεί να αναπτυχθεί ακόμα και σε ρηχές δεξαμενές, διότι οι θολές συνθήκες μπορεί να οδηγήσουν σε ταχεία θέρμανση των επιφανειακών υδάτων στη διάρκεια σχετικά ήρεμων και ηλιόλουστων ημερών.

Η σταθερότητα της στρωμάτωσης καθορίζεται από το ποσό της ενέργειας που απαιτείται για να αναμειχθεί ολόκληρος ο όγκος του υδάτινου σώματος έως μια ομοιόμορφη θερμοκρασία. Όσο μεγαλύτερη ενέργεια απαιτείται, τόσο σταθερότερη είναι η στρωμάτωση. Οι δεξαμενές υδατοκαλλιέργειας είναι σχετικά μικρές και ρηχές, και έτσι η στρωμάτωση δεν είναι τόσο σταθερή όσο είναι σε λίμνες και μεγαλύτερες δεξαμενές (Σχήμα 7.9).

Βροχόπτωση και ποιότητα νερού. Το νερό της βροχής είναι, κατά κανόνα, όξινο, γιατί είναι εμποτισμένο με διοξείδιο του άνθρακα. Το καθαρό νερό, όταν είναι κορεσμένο με διοξείδιο του άνθρακα, έχει pH ίσο με 5,6 (Boyd & Tucker, 1998). Η καύση των καυσίμων αυξάνει τη συγκέντρωση του αζώτου και των θειούχων ενώσεων στην ατμόσφαιρα και προκαλεί έντονη μείωση στο pH της βροχής. Σε περιοχές που επλήγησαν από βαριά ατμοσφαιρική ρύπανση, το pH του νερού της βροχής μπορεί να είναι μικρότερο από 4. Οι επιπτώσεις της όξινης βροχής στους πληθυσμούς των ψαριών εκφράστηκαν κυρίως σε περιοχές όπου η συνολική αλκαλικότητα των επιφανειακών υδάτων είναι μικρότερη από 10 έως 20 mg l^{-1} (Boyd & Tucker, 1998). Σε δεξαμενές υδατοκαλλιέργειας στις οποίες το νερό έχει χαμηλή αλκαλικότητα εφαρμόζεται γεωργικός ασβεστόλιθος (Boyd & Tucker, 1998), που εξουδετερώνει την οξύτητα της όξινης βροχή.

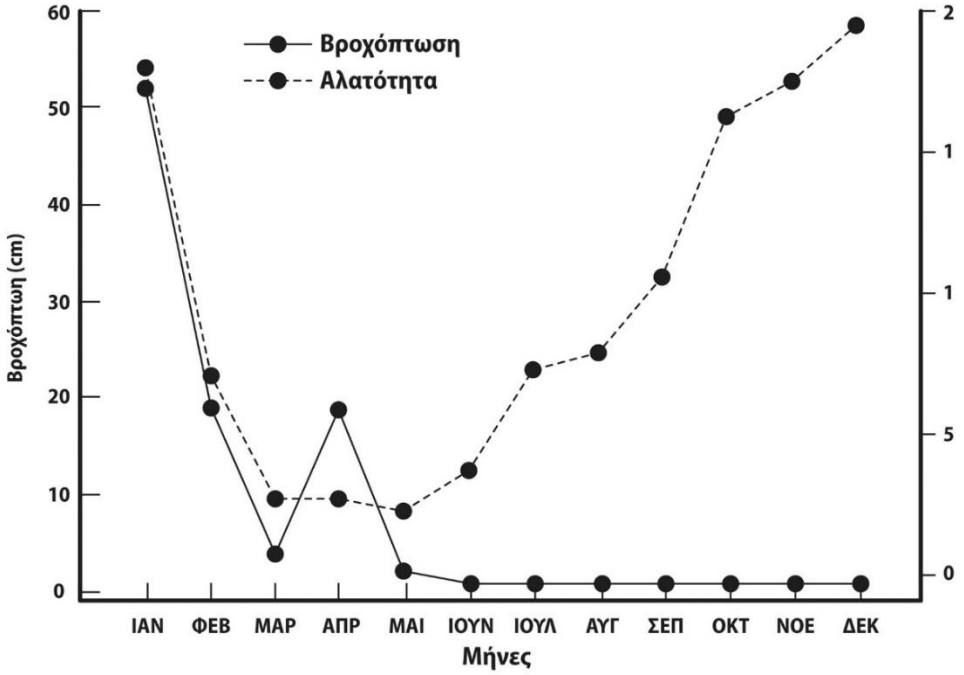


Σχήμα 7.9. *Ημερήσια στρωμάτωση και κατακόρυφη ανάμειξη της υδατοκαλλιέργειας σε μια ρηχή λίμνη*.

Η βροχή που πέφτει απευθείας στις δεξαμενές οδηγεί στην εκτόξευση σταγονιδίων από το νερό στον αέρα, με αποτέλεσμα την αύξηση της επιφάνειας για μεταφορά αερίων. Οι νυχτερινές βροχοπτώσεις είναι πιο πιθανό να αυξήσουν τη συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου, σε σύγκριση με τις βροχοπτώσεις στη διάρκεια της ημέρας. Η διάβρωση στις λεκάνες υδατοκαλλιέργειας στη διάρκεια καταιγίδων μπορεί να οδηγήσει σε απορροή θολού νερού, που εισάγεται σε ρεύματα, λίμνες και άλλα υδατικά συστήματα. Παρατεταμένη διάρκεια του φαινομένου της θολούρας μειώνει τη διείσδυση του φωτός, την πρωτογενή παραγωγικότητα και, τελικά, την παραγωγή ψαριών (Buck, 1956). Η συγκέντρωση ιζημάτων στις δεξαμενές μειώνει επίσης το βάθος και την αποθηκευτική ικανότητα. Οι δεξαμενές υδατοκαλλιεργειών βρίσκονται, συχνά, κατά μήκος των εκβολών ποταμών και κοντά σε υφάλμυρα νερά, τα οποία διοχετεύονται συχνά στις δεξαμενές. Η αλατότητα μειώνεται, ως αποτέλεσμα της αυξανόμενης εισροής γλυκού νερού. Σε τροπικές περιοχές, με διακριτές υγρές και ξηρές εποχές, η αλατότητα στις παράκτιες δεξαμενές υδατοκαλλιέργειας διαφέρει σημαντικά μεταξύ των εποχών (Σχήμα 7.10).

Ασυνήθιστα έντονες βροχοπτώσεις μπορεί να προκαλέσουν εξαιρετικά χαμηλή αλατότητα, που καταπονεί τους πληθυσμούς και οδηγεί στην εκδήλωση νόσων ή/και σε άμεση θνησιμότητα. Μερικές φορές, οι έντονες

βροχοπτώσεις και η συνεπαγόμενη απορροή μπορεί να προκαλέσουν την αλλαγή της πορείας των ποταμών, επηρεάζοντας έτσι ολόκληρο το έργο της υδατοκαλλιέργειας. Τα γεγονότα του Ελ Νίνιο προκύπτουν εξαιτίας της αύξησης της θερμοκρασίας του ωκεανού από 1° C ή 2° C πάνω από το φυσιολογικό. Γεγονότα Ελ Νίνιο είναι κοινά στον δυτικό Ειρηνικό Ωκεανό, κατά μήκος των ακτών της Βόρειας και της Νότιας Αμερικής. Μεταξύ 1950 και 2004 παρατηρήθηκαν 13 γεγονότα ή, κατά μέσο όρο, περίπου ένα γεγονός κάθε τέσσερα χρόνια. Οι έντονες βροχοπτώσεις στη διάρκεια γεγονότων Ελ Νίνιο αποτελούν την αιτία για χαμηλή αλατότητα, που μπορεί να καταπονήσει ή να σκοτώσει τις γαρίδες, αλλά έχει και οφέλη. Η ελαφρώς υψηλότερη θερμοκρασία των υδάτων του ωκεανού μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερη παραγωγή τους αυτόχθονες πληθυσμούς και τις υδατοκαλλιέργειες.



Σχήμα 7.10. *Σχέση μεταξύ βροχόπτωσης και αλατότητας σε λίμνες με γαρίδες κοντά στο Γκουαγιακίλ του Ισημερινού.*

7.3.4.5. Άνεμος

Ο άνεμος προκαλεί κυματισμούς στην επιφάνεια του νερού, αυξάνοντας έτσι την επιφάνεια από την οποία μπορεί να γίνει ανταλλαγή αερίων. Ο άνεμος επίσης ανακατεύει το νερό καθ' ύψος, προκαλώντας έτσι την κίνηση των διαλυμένων αερίων στην υδάτινη μάζα. Στη διάρκεια της νύχτας και σε άλλες στιγμές, όταν η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου μπορεί να είναι χαμηλή, ο εκ νέου αερισμός μέσω του ανέμου είναι μια σημαντική πηγή διαλυμένου οξυγόνου σε δεξαμενές. Η ταχύτητα του ανέμου, η θερμοκρασία και η συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου παρακολουθήθηκαν με ένα σύστημα καταγραφής δεδομένων την περίοδο του εκ νέου αερισμού, τεσσάρων ημερών. Ο συντελεστής εκ νέου αερισμού ανέμου υπολογίστηκε κατά διαστήματα και οι συντελεστές αυξήθηκαν γραμμικά (R^2 = 0,88), με την ταχύτητα ανέμου να κυμαίνεται μεταξύ 1 και 4,5 m s^{-1}. Η εξίσωση παλινδρόμησης ήταν:

$$W = 0{,}153X - 0{,}127, \quad (7.14)$$

όπου W είναι ο πρότυπος συντελεστής εκ νέου αερισμού ανέμου για 20° C και 0,0 mg l^{-1} διαλυμένου οξυγόνου (g O_2 m^{-2} h^{-1}), X η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 3 m (m s^{-1}).

Για τον υπολογισμό του ποσοστού εκ νέου αερισμού του ανέμου σε μια συγκεκριμένη δεξαμενή, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η εξίσωση:

$$K_w = W\left[\frac{C_s - C_p}{9.07}\right] 1{,}024T^{-20}, \text{ (7.15)}$$

όπου K_w είναι ο ρυθμός του εκ νέου αερισμού του ανέμου (g O_2 m^{-2} hr^{-1}), C_s η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου στο νερό της δεξαμενής σε κορεσμό (g m^{-3}), C_p η μετρούμενη συγκέντρωση διαλύεται οξυγόνου στη δεξαμενή (g m^{-3}) και T η θερμοκρασία του νερού (° C).
Αλλά, και ο άνεμος δημιουργεί ρεύματα στις δεξαμενές, που είναι ευεργετικά, διότι ανακατεύουν κατακόρυφα το νερό, παρέχοντας έτσι περισσότερο ομοιόμορφες συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου σε μεγαλύτερα βάθη. Ρεύματα που προκαλούνται από τον αέρα μπορεί να ανακατέψουν τα ιζήματα της δεξαμενής, να δημιουργήσουν υπερβολική θολούρα και να προκαλέσουν διάβρωση των αναχωμάτων. Ισχυροί άνεμοι ή συνδυασμός ισχυρών ανέμων και βροχοπτώσεων μπορεί επίσης να προκαλέσουν θερμική αποστρωμάτωση των δεξαμενών και των λιμνών, στη διάρκεια του καλοκαιριού. Το υπολίμνιο σε δεξαμενές και λίμνες με ευτροφισμό είναι εξαντλημένο από διαλυμένο οξυγόνο και έχει υψηλές συγκεντρώσεις διαλυμένης ή στερεής οργανικής ύλης, ανηγμένου σιδήρου και μαγγανίου, και άλλες ανόργανες και οργανικές ουσίες. Κρύα βορειοδυτικά μέτωπα περνούν μερικές φορές στις νοτιοανατολικές Ηνωμένες Πολιτείες το καλοκαίρι. Αυτά τα μέτωπα ταξιδεύουν γρήγορα και μπορεί να οδηγήσουν σε ισχυρούς ανέμους και ψυχρή βροχή. Δεξαμενές και λίμνες στην περιοχή είναι συνήθως στρωματοποιημένες το καλοκαίρι και η συνδυασμένη επίδραση του ανέμου και της βροχής προκαλεί συχνά αποστρωμάτωση (FAO, 1968). Δεξαμενές με καλλιέργειες γαρίδας και άλλα είδη παράκτιας υδατοκαλλιέργειας είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες σε ζημιές από θύελλες. Έχουν υπάρξει πολυάριθμες περιπτώσεις στις οποίες δεξαμενές έχουν υπερχειλίσει εξαιτίας κυμάτων θυελλωδών ανέμων. Σε περιοχές όπου οι τυφώνες είναι συχνοί, τα έργα υδατοκαλλιέργειας θα πρέπει να σχεδιάζονται έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται οι ζημιές, λαμβάνοντας υπόψη το μέγεθος των θυελλωδών ανέμων και τις πιθανές ταχύτητές τους.

7.3.4.6. Βαρομετρική πίεση

Η συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου είναι, πιθανώς, η σημαντικότερη μεταβλητή σε μια υδατοκαλλιέργεια. Αυτή η παράμετρος μετριέται συχνά στις δεξαμενές για την ερευνητική και την εμπορική υδατοκαλλιέργεια. Προκειμένου να ρυθμιστεί σωστά ένας μετρητής διαλυμένου οξυγόνου ή να εκτιμηθεί η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου σε κορεσμό ενός υδάτινο όγκου, πρέπει να είναι γνωστή η βαρομετρική πίεση. Η βαρομετρική πίεση είναι απαραίτητη για τη βαθμονόμηση του μετρητή διαλυμένου οξυγόνου ή για την εκτίμηση της συγκέντρωσης οξυγόνου στον κορεσμό. Ο Boyd (1990) παρέχει οδηγίες και έναν πίνακα των δεδομένων που απαιτούνται για την αντιστοίχηση των τιμών βαρομετρικής πίεσης στο επίπεδο της θάλασσας με τις τιμές της βαρομετρικής πίεσης στο σταθμό της μέτρησης. Τα δεδομένα για τη συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου σε κορεσμό (Πίνακας 7.5) αφορούν το επίπεδο της θάλασσας. Οι τιμές αυτές μπορούν να αντιστοιχηθούν στη βαρομετρική πίεση στον τόπο του σταθμού με την εξίσωση:

$$DO_{SS} = DO_{SSL} x\ \frac{760}{BP}, \text{ (7.16)}$$

όπου DO_{SS} είναι το διαλυμένο οξυγόνο κορεσμού στο σταθμό (mg l^{-1}), DO_{SSl} το διαλυμένο οξυγόνο κορεσμού στο επίπεδο της θάλασσας (mg l^{-1}) και BP η βαρομετρική πίεση στο σταθμό μέτρησης (mm hg).
Εάν δεν μπορεί να μετρηθεί η βαρομετρική πίεση, αλλά είναι γνωστό το υψόμετρο του σταθμού, τότε η βαρομετρική πίεση μπορεί να εκτιμηθεί από την εξίσωση (Colt, 1984):

$$log10BP = 2{,}880814 - \frac{Υψόμετρο\ σταθμού\ (m)}{19748{,}2}. \text{ (7.17)}$$

7.3.5. Ερευνητικές και εκπαιδευτικές ανάγκες

7.3.5.1. Ερευνητικές ανάγκες

Πρέπει να υπάρξει μια πιο οργανωμένη προσπάθεια να οριστούν οι σχέσεις μεταξύ αγρομετεωρολογικών δεδομένων και αλιείας και υδατοκαλλιεργειών. Στον τομέα της αλιείας, προτεραιότητα θα πρέπει να δοθεί στην πρόβλεψη των επιδράσεων της παγκόσμιας κλιματικής αλλαγής στην παραγωγή. Φυσικά, η καλύτερη κατανόηση της επίδρασης των μετεωρολογικών μεταβλητών στη δομή και τη λειτουργία των φυσικών υδάτινων οικοσυστημάτων πρέπει επίσης να είναι μακροπρόθεσμος στόχος. Καλύτερες μέθοδοι για την πρόβλεψη των δυνάμεων, των μονοπατιών και των συνθηκών μιας καταιγίδας, καθώς και βελτιωμένα συστήματα προειδοποίησης των αλιέων για επικείμενους κινδύνους θα μπορούσε να σώσει πολλές ζωές.

Στις υδατοκαλλιέργειες, θα πρέπει να δοθεί έμφαση στη βελτίωση των γνώσεων που έχουμε για τις σχέσεις μεταξύ των αγρομετεωρολογικών μεταβλητών, της ποιότητας του νερού και της παραγωγής. Άλλα ιδιαίτερα σημαντικά θέματα είναι:

- οι συνέπειες της ανακυκλοφορίας του αέρα, λόγω του ανέμου στην ποιότητα των υδάτων, το φυτοπλαγκτόν και την ανεπιθύμητη γεύση στις δεξαμενές,
- η ενσωμάτωση πληροφοριών στα μοντέλα διαλυμένου οξυγόνου σχετικά με την πρόγνωση του καιρού και νεότερων τεχνολογιών για τη μέτρηση της βιομάζας του φυτοπλαγκτού, όπως είναι οι δορυφορικές εικόνες και τα φασματικά ανακλασιόμετρα χειρός,
- τα προγνωστικά μοντέλα εκτροφής, βασισμένα σε δεδομένα για τον καιρό και την ποιότητα των υδάτων,
- οι επιπτώσεις των εβδομαδιαίων ή μικρότερων διακυμάνσεων της θερμοκρασίας του νερού στην πληθυσμιακή ανάπτυξη των αλιευμάτων.

Μεγάλο μέρος της εσωτερικής υδατοκαλλιέργειας στις αναπτυσσόμενες χώρες γίνεται σε δεξαμενές, χωρίς να υπάρχει η επιλογή για μηχανικό αερισμό. Ευνοούνται τοποθεσίες με καλή έκθεση στον αέρα, ενώ οι περίοδοι ηρεμίας, με ζεστό καιρό, είναι δυνητικά επικίνδυνες για τους αλιευτικούς πληθυσμούς. Σε σύγκριση με τα φυσικά οικοσυστήματα, μεγάλες ποσότητες θρεπτικών ουσιών εφαρμόζονται σε αυτές τις δεξαμενές, ενώ η οργανική ουσία συσσωρεύεται στους πυθμένες τους (Boyd & Tucker, 1998). Η αποσύνθεση των οργανικών υλικών στα ιζήματα των δεξαμενών υδατοκαλλιέργειας παράγει διοξείδιο του άνθρακα και μεθανίου, που εισέρχονται στην ατμόσφαιρα. Θα ήταν ενδιαφέρον να καθοριστεί η συμβολή της παγκόσμιας υδατοκαλλιέργειας στα αέρια του θερμοκηπίου. Η υπερθέρμανση του πλανήτη θα επηρεάσει την παραγωγή των υδατοκαλλιεργειών. Επειδή οι υδατοκαλλιέργειες θα αποτελέσουν τελικά την κύρια πηγή των αλιευτικών προϊόντων, είναι επιβεβλημένο να αξιολογηθούν οι πιθανές αρνητικές συνέπειες των σημαντικότερων τύπων υδατοκαλλιέργειας στην υπερθέρμανση του πλανήτη.

7.3.5.2. Εκπαιδευτικές ανάγκες

Το βασικό εμπόδιο για τη χρήση αγρομετεωρολογικών δεδομένων στον τομέα της αλιείας και των υδατοκαλλιεργειών είναι η έλλειψη εξοικείωσης με το θέμα από εκείνους που εργάζονται στον τομέα. Η εκπαίδευση των ειδικών επιστημόνων υδατοκαλλιεργειών στην Ελλάδα δεν περιλαμβάνει συνήθως μαθήματα σε αυτό τον τομέα. Η σημασία της θερμοκρασίας του νερού περιλαμβάνεται σε μαθήματα σχετικά με την παραγωγή των υδατοκαλλιεργειών, αλλά η σχέση της θερμοκρασίας του νερού με άλλα αγρομετεωρολογικά δεδομένα δεν τονίζεται συνήθως. Ακόμα λιγότερη προσοχή δίνεται στη βροχόπτωση, την εξάτμιση, τον άνεμο και σε άλλες μετεωρολογικές μεταβλητές κατά την εκπαίδευση των ειδικών επιστημόνων υδατοκαλλιεργειών. Ένα πρότυπο εκπαιδευτικό πρόγραμμα θα πρέπει να περιλαμβάνει πληροφορίες για τη μετεωρολογία, την υδρολογία και την ποιότητα των υδάτων, δίνοντας έμφαση στο πώς αυτά τα θέματα θα πρέπει να συνδέονται με την αλιεία και τις υδατοκαλλιέργειες.

Αυτοί οι αναπτυξιακοί οργανισμοί θα πρέπει συνειδητοποιήσουν τη σημασία των αγρομετεωρολογικών δεδομένων στην αλιεία και τις υδατοκαλλιέργειες, έτσι ώστε να πάρουν πρωτοβουλίες για την έναρξη εκπαιδευτικών προσπαθειών ή να παρέχουν δεδομένα στους παραγωγούς. Για την προώθηση της χρήσης αγρομετεωρολογικών

δεδομένων στον τομέα της υδατοκαλλιέργειας, πρέπει να πειστεί η μελλοντική γενιά της αλιείας και των επιστημόνων υδατοκαλλιέργειας ότι τα στοιχεία αυτά είναι χρήσιμα και να εκπαιδευτεί να τα χρησιμοποιεί.

Βιβλιογραφικές αναφορές

Ansell, R.H. (1981). Extreme heat stress in dairy cattle and its alleviation: A case report. In *Environmental Aspects of Housing for Animal Production* (J.A. Clark, ed.). London: Butterworths.

Baeta, F.C., Meador, N.F., Shanklin, M.D. and Johnson, H.D. (1987). Equivalent temperature index at temperatures above the thermoneutral for lactating cows. In Paper No. 87-4015. *Summer Meeting of the American Society of Agricultural Engineers*, Baltimore, Maryland, 28 June–1 July 1987. St Joseph, ASAE.

Bedford, T. & Warner, C. (1934). The globe thermometer in studies of heating and ventilation. *Journal of Hygiene*, 34:458-473.

Blackshaw, J.K. & A.W. Blackshaw, A.W. (1994). Heat stress in cattle and the effect of shade on production and behaviour: a review. *Australian Journal of Experiment Agricultural*. 34:285-295.

Bolte, J.P., Nath, S.S. and Ernst, D.H. (1995). POND: A decision support system for pond aquaculture. In *Twelfth Annual Administrative Report*. Corvallis, Pond Dynamics/Aquaculture Collaborative Research Support Program, Oregon State University.

Bond, T.E. & Kelly, C.F. (1955). The globe thermometer in agricultural research. *Agricultural Engineering*. 36:251-255, 260.

Boyd, C.E. & Gross, A. (2000). Water use and conservation for inland aquaculture ponds. *Fisheries Management and Ecology*. 7:55-63.

Boyd, C.E. & Tucker, C.S. (1998). *Pond Aquaculture Water Quality Management*. Boston: Kluwer Academic Publishers.

Boyd, C.E. (1985). Pond evaporation. *Transactions of the American Fisheries Society*. 114:299-303.

Boyd, C.E. (1986). Influence of evaporation excess on water requirements for fish farming, In *Proceedings of the Conference on Climate and Water Management – A Critical Era*. Boston: American Meteorological Society.

Boyd, C.E. (1990). *Water Quality in Ponds for Aquaculture*. Auburn: Alabama Agricultural Experiment Station, Auburn University.

Boyd, C.E. (2005). Water use in aquaculture. *World Aquaculture*, 36(3):12-15, 70.

Boyd, C.E., Romaire, R.P. and Johnston, E. (1978). Predicting early morning dissolved oxygen concentrations in channel catfish ponds. *Transactions of the American Fisheries Society*. 107:484-492.

Buck, D.H. (1956). Effects of turbidity on fish and fishing. *Transactions of the North American Wildlife Conference*. 21:249-261.

Buffington, D.E., Collazo-Arocho, A., Canton, G.H., Pitt, D., Thatcher, W.W. and Collier, R.J. (1981) Black Globe-Humidity Index (BGHI) as a comfort equation for dairy cows. *Trans*. *ASAE*, 24:711–714.

Campbell, G.S. & Norman, J.M. (1998). *An Introduction to Environmental Biophysics*. Second edition. New York: Springer.

Colt, J. (1984). *Computation of Dissolved Gas Concentrations in Water as Functions of Temperature, Salinity, and Pressure*. Special Publication No. 14. Bethesda: American Fisheries Society.

Δαλέζιος, Ν.Ρ. (2010). *Μικρομετεωρολογία-Βιομετεωρολογία. Πανεπιστημιακές Παραδόσεις*. Βόλος: Εκδόσεις Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

Da Silva, R.G. & Barbosa, O.R. (1993). Thermal comfort index for sheep. In *Proceedings of the 13th International Congress of Biometeorology,* Calgary, Alberta, 12-18 September 1993. International Society of Biometeorology.

Dobzhansky, T. (1970). *Genetics of the Evolutionary Process*. New York: Columbia Univ. Press.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (1968). Fish kills caused by phytoplankton blooms and their prevention. In H.S. Swingle (Ed.). *Proceedings of the World Symposium on Warm- Water Pond Fish Culture* (Fisheries Report No. 44, Vol. 5. Rome: FAO.

Gaughan, J.G., Goopy, J. and Spark, J. (2002). Excessive heat load index for feedlot cattle. In *Meat and Livestock Australia Project Report*. FLOT.316. Sydney: MLA Ltd.

Green, B.W. & Popham, T.W. (2008). Probabilities of low nighttime temperatures during stocking and harvest seasons for inland shrimp culture. *Journal of the World Aquaculture Society*. 39:91-103.

Hafez, E.S.E. (1962). *The Behavior of Domestic Animals*. Philadelphia: Lea & Febiger.

Hahn, G.L. & McQuigg, J.D. (1970). Evaluation of climatological records for rational planning of livestock shelters. *Agricultural Meteorology*. 7:131-141.

Hahn, G.L. (1976). Rational environmental planning for efficient livestock production. *International Journal of Biometeorology*. 20(Supp. 1):106-114.

Hahn, G.L. (1982). Compensatory performance in livestock: influences on environmental criteria. In *Proceedings of the Second International Livestock Environment Symposium*. St Joseph: ASAE.

Hahn, G.L., Mader, T.I. and Eigenberg, R.A. (2003). Perspective on development of thermal indices for animal studies and management. In *Interactions between Climate and Animal Production*. EAAP Technical Series No. 7. Wageningen: Wageningen Academic Publishers.

Hahn, G.L., Chen, Y.R., Nienaber, R.A. and Parkhurst, A.M. (1991). Characterizing animal stress through fractal analysis of thermoregulatory responses. *Journal of Thermal Biology*. 17(2):115-120.

Hutchinson, G.W. (1975). *A Treatise on Limnology*. Vol. III. *Limnological Botany*. New York: John Wiley and Sons.

Kadzere, C.T., Murphy, M.R., Silanikove, N. and Maltz, E. (2002). Heat stress in lactating cows: a review. *Livestock Production Science*. 77:59-91.

Kapetsky, J.M. (2000). Present applications and future needs of meteorological and climatological data in inland fisheries and aquaculture. *Agriculture and Forest Meteorology*. 103:109-117.

Klemetson, S.L. & Rogers, G.L. (1985). Aquaculture pond temperature modeling. *Aquaculture Engineering*. 4:191-208.

Langbein, W.B. (1967). Hydroclimate. In R.W. Fairbridge (Ed.), *The Encyclopedia of Atmospheric Sciences and Astrogeology*. New York: Reinhold Publishing.

McConnell, W.J. (1963). Primary productivity and fish harvest in a small desert impoundment. *Transactions of the American Fisheries Society*. 92:1-12.

Means, S.L., Bucklin, R.A., Nordstedt, R.A., Beede, D.K., Bray, D.R., Wilcox, C.J. and Sanchez, W.K. (1992). Water application rates for a sprinkler and fan dairy cooling system in hot, humid climates. *Applied Engineering in Agriculture*. 8(3):375-379.

Monteith, J.L. & Mount L. E. (1974). *Heat loss from animals and man reference*. England: Butterworths.

Monteith, J.L. & Unsworth, M.H. (1990). *Principles of Environmental Physics*. Second edition. London: Edward Arnold.

Moran, D.S., Pandolf, K.B., Shapiro, Y., Heled, Y., Shani, Y., Matthew, W.T. and Gonzalez, R.R. (2001). An environmental stress index (ESI) as a substitute for the wet bulb globe temperature (WBGT). *Journal of Thermal Biology*. 26:427-431.

Morrissy, N.M. (1976). Aquaculture of marron, *Cherax tenuimanus* (Smith). Part 1. Site selection and the potential of marron for aquaculture. *Fisheries Research Bulletin of Western Australian*. 17:1-27.

Neill, W.H. & Bryan, J.D. (1991). Responses of fish to temperature and oxygen, and response integration through metabolic scope. In D.E. Brune and Tomasso, J.R. (Eds.). *Advances in World Aquaculture*. Vol. 3. *Aquaculture and Water Quality*. Baton Rouge, World Aquaculture Society.

Nienaber, J.A., Hahn, G.L. and Eigenberg, R.A. (1999). Quantifying livestock responses for heat stress management: a review. *International Journal of Biometeorology*. 42:183-188.

Oke, T.R. (1988). *Boundary Layer Climates*. 2nd Edition. New York: Routledge.

Onyewotu, L.O.Z., Stigter, C.J., Abdullahi, A.M., Ariyo, J.A., Oladipo, E.O. and Owonubi, J.J. (2003). Reclamation of desertified farmlands and consequences for its farmers in semiarid northern Nigeria: a case study of Yambawa rehabilitation scheme. *Arid Land Research Management*. 17:85-101.

Romaire, R.P. & Boyd, C.E. (1979). Effects of solar radiation on the dynamics of dissolved oxygen in channel catfish ponds. *Transactions of the American Fisheries Society*. 108:473-478.

Siple, P.A. & Passel, C.F. (1945). Measurement of dry atmospheric cooling in subfreezing temperatures. *Proceedings of American Philosophical Society*. 38:177-199.

Szumiec, M.A. (1983). Meteorology in the service of limnology and aquaculture, *Polskie Archiwum Hydrobiologii (Polskie Archiwum Hydrobiologii)*, 30(1):5-13.
Thom, E.C. (1959). The discomfort index. *Weatherwise*, 12:57-59.
United States Soil Conservation Service (USSCS). (1972). Hydrology. In: *SCS National Engineering Handbook*. Washington, DC: USSCS, United States Government Printing Office.
United States Soil Conservation Service (USSCS). (1979). Ponds and Reservoirs. In *SCS Engineering Field Manual*. Washington, DC: USSCS, United States Government Printing Office.
Vernon, H. (1932). The measurement of radiant heat in relation to human comfort. *Journal of Industrial Hygiene*. 14:95-111.
Wax, C.L. & Pote, J.A. (1990). A derived climatology of water temperatures for the Mississippi catfish industry. *Journal of World Aquaculture Society*. 21:25-34.
Wetzel, R.G. (2001). *Limnology*. Third edition. San Diego: Academic Press.
World Meteorological Organization. (1970). *Meteorological Observations in Animal Experiments* (C.V. Smith). Geneva: Technical Note No. 107 (WMO - No. 253).
World Meteorological Organization. (1972). *Some Environmental Problems of Livestock Housing* (C.V. Smith). Geneva: Technical Note No. 122 (WMO - No. 325).
World Meteorological Organization. (1973). *Comparisons between Pan and Lake Evaporation* (C.E. Hounam) Geneva: (WMO - No. 354).
World Meteorological Organization. (1992). *Monitoring, Assessment and Combat of Drought and Desertification*. Geneva: CAgM Report No. 47 (WMO/TD - No. 505).
World Meteorological Organization. (2000). *Weather and Climate Related to Pasture and Livestock Production in Arid and Semi-arid Regions* (D. Dagvadorj). Geneva: CAgM Report No. 79 (WMO/TD-No. 989).
World Meteorological Organization. (2004). Adaptation strategies required to reduce vulnerability in agriculture and forestry to climate change, climate variation and climate extremes (H.P. Das). In: *Management Strategies in Agriculture and Forestry for Mitigation of Greenhouse Gas Emissions and Adaptation to Climate Variability and Climate Change*. Geneva: Technical Note No. 202 (WMO - No. 969).
WMO. (2010). *Guide to Agricultural Meteorological Practices*. Geneva: WMO - No134.
Yamamoto, S. (1983). The assessment of therma environment for farm animals. In *Proceedings of the Fifth World Congress on Animal Production*. Tokyo, Japanese Society of Zootechnical Science.
Yoo, K.H. & Boyd, C.E. (1994). *Hydrology and Water Supply for Aquaculture*. New York: Chapman and Hall.
Zagarese, H. & Williamson, C.E. (2001). The implications of solar UV radiation exposure for fish and fisheries. *Fish and Fisheries*, 2:250-260.
Zheng, D., Zhao, J., Tuo, D. and Stigter, C.J. (2005). Reversing land degradation from wind erosion in Inner Mongolia: the choice between grass and bush restoration or conservation tillage of contour strip plantings depends on hill slopes and rainfall. *Journal of Agriculture Meteorology* (Japan), 60:337-341.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8
ΑΓΡΟΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑ ΓΙΑ ΕΧΘΡΟΥΣ ΚΑΙ ΑΣΘΕΝΕΙΕΣ ΖΩΝΤΩΝ ΟΡΓΑΝΙΣΜΩΝ

Σύνοψη

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η σχέση μεταξύ αγρομετεωρολογίας και εχθρών και ασθενειών των ζώντων οργανισμών, δηλαδή φυτών και ζώων. Μετά την ταξινόμηση των εχθρών, εξετάζεται η επίδραση διαφόρων μετεωρολογικών παραμέτρων και ακολουθεί η παρουσίαση της σχέσης της αγρομετεωρολογίας και των ασθενειών των φυτών. Επίσης, μελετώνται το θέμα των ζιζανίων στο οικοσύστημα και οι μέθοδοι αντιμετώπισής του. Τέλος, εξετάζονται αγρομετεωρολογικές μεθοδολογίες και μοντέλα και παρουσιάζονται εφαρμογές τους στο καλαμπόκι, το αμπέλι και το βαμβάκι, καθώς και στην αποθήκευση αγροτικών προϊόντων.

Εξετάζονται σημαντικοί μετεωρολογικοί παράγοντες του μικροκλίματος για τους εχθρούς και τις ασθένειες των καλλιεργειών, όπως η θερμοκρασία του αέρα και του εδάφους, η υγρασία του αέρα και του εδάφους, η βροχόπτωση, η ακτινοβολία και ο άνεμος. Επίσης, αναλύεται ο ρόλος της αγρομετεωρολογίας, που συνίσταται στην εξέταση της επίδρασης του καιρού και του κλίματος στους ζώντες οργανισμούς, στους παθογενείς φορείς και στους πληθυσμούς, καθώς και η συμβολή σε ολοκληρωμένες μεθοδολογίες πρόγνωσης και αντιμετώπισης των εχθρών και των ασθενειών των ζώντων οργανισμών.

Τα παραδείγματα, που δίνονται εμφανίζουν σαφώς την ύπαρξη στενής σχέσης μεταξύ των καιρικών συνθηκών και της υγείας των αποθηκευμένων προϊόντων. Εντούτοις, πρέπει να αναφερθεί ότι οι μαθηματικές σχέσεις αποτελούν μια ατελή αντιπροσώπευση του πραγματικού κόσμου και οποιαδήποτε θεωρία της πορείας των γεγονότων στη φύση πρέπει απαραιτήτως να βασίζεται σε σχετικά απλοποιημένη διαδικασία.

Στην πραγματικότητα, πρέπει να ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι οι βιολογικές διαδικασίες, που εξετάζονται, οφείλονται σε μεγάλο αριθμό παραγόντων, δηλαδή κάθε περίπτωση έχει συγκεκριμένες ιδιαιτερότητες. Η υπάρχουσα καθιερωμένη γνώση μας υπόκειται σε συνεχή αναθεώρηση, καθώς τα προβλήματα μελετώνται με μεγαλύτερη πληρότητα και σε μεγαλύτερο βάθος. Εντούτοις, η παρούσα γνώση μας σε αυτό το θέμα, παρ' όλους τους περιορισμούς, μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τους γεωργικούς συμβούλους, για να παράσχει μια χρήσιμη υπηρεσία στους καλλιεργητές, στη μάχη τους ενάντια στους εχθρούς και τις ασθένειες των προϊόντων τους. Τέτοιες πληροφορίες, βασισμένες στα μετεωρολογικά στοιχεία, σε συνδυασμό με τα φαινολογικά και βιολογικά δεδομένα, μπορούν να οδηγήσουν τον καλλιεργητή στην πιο ενδεδειγμένη μέθοδο αντιμετώπισης.

Δεδομένου ότι η διεπιστημονική αυτή γνώση εμπλουτίζεται και αυξάνεται συνεχώς, θα είναι δυνατόν να δημιουργηθούν πληρέστερα μοντέλα, που θα επιτρέψουν την προσομοίωση της ανάπτυξης των παθογόνων σαν συνάρτηση των μετεωρολογικών παραμέτρων. Αυτό θα επιτρέψει, επίσης, να γίνονται προγνώσεις με βάση τη δυνατότητα ορισμένων μετεωρολογικών παραγόντων. Τελικά, πρέπει επίσης να αναμένεται ότι όλες οι διαδικασίες προστασίας αποθηκευμένων προϊόντων θα μπορούν προγραμματιστούν σε λογική βάση, χρησιμοποιώντας όλο το διαθέσιμο φάσμα των μετεωρολογικών πληροφοριών. Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα στα θέματα αυτά θα πρέπει να στοχεύουν:

- *στη βελτίωση της γνώσης γύρω από τα υπάρχοντα δεδομένα στα βασικά έντομα-εχθρούς και ασθένειες και την επίδρασή τους στο περιβάλλον, μέσα από μελέτες που θα καθορίζουν τη σχέση με μεγαλύτερη ακρίβεια, αλλά και στην απόκτηση νέας γνώσης για άλλα λιγότερο μελετημένα έντομα και ασθένειες σε συνδυασμό και με εργαστηριακή έρευνα,*
- *στην προσαρμογή των σχέσεων, που προτείνονται και των γραφημάτων, προκειμένου να προσαρμόζονται στις ιδιαίτερες συνθήκες κάθε περιοχής,*
- *στην ενθάρρυνση της χρήσης και της υιοθέτησης σύγχρονων τεχνολογιών, όπως είναι οι απομακρυσμένοι ανιχνευτές, τα ραντάρ, τα κομπιούτερ, προκειμένου να αξιοποιούνται τα μετεωρολογικά δεδομένα για γεωργική χρήση,*
- *στη δημιουργία μοντέλων ακριβείας, που, εάν συνδυαστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια με τα μετεωρολογικά δεδομένα, το αποτέλεσμα θα αποτελέσει σημαντικό βήμα για την αποφυγή και καταπολέμηση των εχθρών στις καλλιέργειες.*

Προαπαιτούμενη γνώση
Ο αναγνώστης απαιτείται να έχει βασικές γνώσεις φυσικής και μαθηματικών.

8.1 Αγρομετεωρολογία για εχθρούς των καλλιεργειών

Είναι γνωστό ότι όλοι οι ζώντες οργανισμοί, όπως τα φυτά και τα ζώα, επηρεάζονται από μετεωρολογικούς παράγοντες στη διάρκεια της ανάπτυξής τους. Ωστόσο, όχι μόνο οι ζώντες οργανισμοί, αλλά επίσης οι εχθροί και οι ασθένειές τους υφίστανται την άμεση επίδραση των διαφόρων μετεωρολογικών παραμέτρων και συνθηκών. Σημαντικοί μετεωρολογικοί παράγοντες του μικροκλίματος για τους εχθρούς και τις ασθένειες των καλλιεργειών θεωρούνται κυρίως η θερμοκρασία του αέρα και του εδάφους, η υγρασία του αέρα και του εδάφους, η βροχόπτωση, η ακτινοβολία και ο άνεμος. Η δε διασπορά κάθε επιφυτικής ασθένειας πρέπει να εξετάζεται κατά περίπτωση, εξαρτώμενη όχι μόνο από τον τύπο του παθογενούς φορέα, αλλά, ίσως περισσότερο, και από τον τύπο του ξενιστή. Ο ρόλος της αγρομετεωρολογίας συνίσταται στην εξέταση της επίδρασης του καιρού και του κλίματος στους ζώντες οργανισμούς, στους παθογενείς φορείς και στους πληθυσμούς, καθώς και η συμβολή σε ολοκληρωμένες μεθοδολογίες πρόγνωσης και αντιμετώπισης των εχθρών και των ασθενειών των ζώντων οργανισμών.
Το ενδιαφέρον εντοπίζεται στην ανάπτυξη των σχέσεων που συνδέουν, από τη μια, τους μετεωρολογικούς και τους κλιματικούς παράγοντες, και, από την άλλη, τους εχθρούς των καλλιεργειών. Οι σχέσεις αυτές είναι καθοριστικές για την καταπολέμηση των εχθρών των καλλιεργειών, που προκαλούν πολλές καταστροφές στη γεωργική παραγωγή και, γενικά, στην οικονομία. Η τρέχουσα επιστημονική τάση σχετικά με την αντιμετώπιση των εχθρών των καλλιεργειών αφορά κυρίως τη χρησιμοποίηση φυσικών μέσων καταπολέμησης, δηλαδή περιβαλλοντικών παραγόντων, που απαλλάσσουν τις καλλιέργειες από τους κινδύνους αυτούς, ακολουθώντας τις αρχές της μετεωρολογικής και οικολογικής επιστήμης (WMO,1981).
Στον Πίνακα 8.1 παρουσιάζονται οι μετεωρολογικές παράμετροι και συνθήκες για την εφαρμογή εντομοκτόνων. Πριν από την παρουσίαση των εχθρών των φυτών και των ζώων, κρίνεται σκόπιμο να γίνει σύντομη αναφορά στους βασικούς μετεωρολογικούς παράγοντες, όπως είναι η θερμοκρασία, η ωσμωτική πίεση και το φως ή η ηλιακή ακτινοβολία.
Κατά τη μελέτη των εχθρών σε σχέση με τους μετεωρολογικούς και κλιματικούς παράγοντες το ενδιαφέρον εστιάζεται κυρίως στη θερμότητα και τη **θερμοκρασία**. Σε σύγκριση με το ατμοσφαιρικό περιβάλλον, οι ιστοί του φυτού και το έδαφος έχουν μια σχετικά υψηλή και σταθερή κατάσταση υγρασίας, ενώ οι επιδράσεις του νερού του υποστρώματος στην ανάπτυξη της ασθένειας είναι λιγότερο εμφανείς από ό,τι είναι τα αποτελέσματα των συνθηκών του περιβάλλοντος. Ωστόσο, οι επιδράσεις της **υγρασίας** μπορεί να είναι πολύ μεγαλύτερες στην ανάπτυξη της ασθένειας από ό,τι στην ανάπτυξη και την παραγωγή των φυτών. Πολλοί παθογόνοι μύκητες είναι πιο ανεκτικοί σε χαμηλά επίπεδα υγρασίας από ό,τι οι ξενιστές τους. Είναι επίσης γνωστό ότι στην επιβίωση των διαφόρων οργανισμών ασκεί σημαντικό ρόλο η **ωσμωτική πίεση** του σώματός τους, αφού επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη διατάραξη ή όχι των διαλυτών ουσιών. Αν η ωσμωτική πίεση υπερβεί ορισμένα όρια, τότε ο οργανισμός μπορεί να οδηγηθεί στο θάνατο. Στη διαδικασία της εξέλιξης, έχουν αναπτυχθεί διάφοροι μηχανισμοί φυσιολογίας και συμπεριφοράς στα διάφορα είδη εντόμων, ακόμα δε και στα διάφορα στάδια ανάπτυξης ενός είδους, μέσω των οποίων περιορίζεται σημαντικά η απώλεια νερού από το σώμα τους ή γίνεται εκμετάλλευση της υπάρχουσας υγρασίας του περιβάλλοντος σε μεγάλο βαθμό.
Το **φως** ή, έμμεσα, η **ηλιακή ακτινοβολία** είναι ο τρίτος μετεωρολογικός παράγοντας που επιδρά στους εχθρούς των καλλιεργειών. Είναι γεγονός ότι οι οργανισμοί εκδηλώνουν επαναλαμβανόμενα στοιχεία/ερεθίσματα στην προσπάθειά τους να συγχρονιστούν με το περιβάλλον, η πλειονότητα των οποίων έχει ημερήσια περίοδο. Χαρακτηριστικό των περισσότερων αυτών ρυθμών είναι ότι, μετά το συγχρονισμό τους, διατηρούν συνήθως για μεγάλο χρονικό διάστημα τη ρυθμικότητά τους υπό συνθήκες έλλειψης των περιοδικών ερεθισμάτων του περιβάλλοντος, εμφανίζοντας περίοδο 24 περίπου ωρών. Οι ρυθμοί αυτοί ονομάζονται ενδογενείς ημερήσιοι και, όταν συνεχίζονται υπό συνεχείς σταθερές συνθήκες, λέγεται ότι τρέχουν ελεύθερα, με τη χαρακτηριστική για κάθε άτομο περίοδο (τ) των 24 περίπου ωρών. Ο έλεγχος των ενδογενών ρυθμών γίνεται από συστήματα αυτοδιατηρούμενων ταλαντωτών χαρακτηριστικής συχνότητας, με ανατομική βάση (ρολόι), που κατέχουν οι οργανισμοί. Για το συγχρονισμό των ταλαντωτών, οι οργανισμοί χρησιμοποιούν ερεθίσματα του περιβάλλοντος. Σημαντικά ερεθίσματα συγχρονισμού αποτελούν οι κύκλοι φωτός-σκότους και η θερμοκρασία. Οι ρυθμοί, που δεν

ελέγχονται ενδογενώς, αλλά μόνο από τις εξωτερικές συνθήκες, ονομάζονται εξωγενείς ημερήσιοι ρυθμοί. Ο πειραματισμός στους ενδογενείς ρυθμούς έχει πραγματοποιηθεί κυρίως με κύκλους φωτός ως συγχρονισμού (βηματοδότη, χρονοδότη). Επισημαίνεται η σημασία του φωτός στους ενδογενείς ρυθμούς, που έχει σημαντική επίδραση στην συμπεριφορά των οργανισμών και κυρίως των ζώων.

Μετεωρολογικός Παράγοντας	**Ψεκασμοί**		**Κονιορτός**	
	Έδαφος	**Αέρας**	**Έδαφος**	**Αέρας**
Άνεμος (ms^{-1})	0-8	1-4	0-4	1-3
Ψεκάδος	ανεπιθύμητοι	ανεπιθύμητοι	ανεπιθύμητος	ανεπιθύμητος
Βροχή	ανεπιθύμητοι	ανεπιθύμητοι	ανεπιθύμητος	ανεπιθύμητος
Καταιγίδα	καθόλου έως ελάχιστοι	ελάχιστοι	καθόλου έως ελάχιστος	ελάχιστος
Αναστροφή	επιθυμητοί	όχι πολύ επιθυμητοί	χωρίς περιορισμό	ανεπιθύμητος
Σχετική Υγρασία (ΣΥ)	όχι σημαντικοί	όχι σημαντικοί	βέλτιστο 90% ή περισσότερο	βέλτιστο 90% ή περισσότερο
Κατώτερο όριο θερμοκρασίας	περίπου 2° C	περίπου 2° C	όχι σημαντικό	όχι σημαντικό
Ανώτερο όριο θερμοκρασίας	περίπου 32° C με χαμηλή ΣΥ	περίπου 32° C με χαμηλή ΣΥ	αμελητέο	αμελητέο
Ορατότητα	μικρή σημασία	επαρκής για χαμηλή πτήση	μικρή σημασία	επαρκής για χαμηλή πτήση

Πίνακας 8.1. *Μετεωρολογικές συνθήκες κατάλληλες για εφαρμογή εντομοκτόνων.*

Πριν αναλυθούν οι επιδράσεις των μετεωρολογικών και κλιματικών παραγόντων στους εχθρούς των καλλιεργειών, είναι χρήσιμο να ταξινομηθούν οι εχθροί αυτοί στις κατηγορίες:

Κατηγορία 1: Ακάρεα, νηματώδεις, μύκητες, βακτήρια, ιοί.
Κατηγορία 2: Αρπακτικά.
Κατηγορία 3: Παράσιτα, ζιζάνια.
Κατηγορία 4: Έντομα.

Κρίνεται σκόπιμο να επισημανθεί ότι, ανάλογα με τις κατηγορίες, οι επιδράσεις παρουσιάζουν διαφορές, αλλά και αρκετές ομοιότητες, ενώ στους εχθρούς που ανήκουν στους ζωντανούς οργανισμούς γίνεται αναφορά κυρίως στη γονιμότητα και την ανάπτυξη των πληθυσμών τους μέσω παραδειγμάτων. Η επίδραση του καιρού και του κλίματος εξετάζεται στα έντομα, τους μύκητες, τα βακτήρια και τους βακίλους, τις ιώσεις, καθώς και σε άλλους παθογενείς φορείς. Η πρόγνωση διακρίνεται, εξάλλου, σε ποιοτική, που αφορά τη χρονική εμφάνιση του παρασίτου, ώστε να είναι δυνατή ειδική θεραπεία, καθώς και σε ποσοτική, που αναφέρεται στο μέγεθος του πληθυσμού του παρασίτου. Ωστόσο, η ποιοτική πρόγνωση, καθώς και η ποσοτική πρόγνωση είναι βασικές για την ολοκληρωμένη αντιμετώπιση των εχθρών των φυτών.

8.1.1. Ακάρεα

Τα ακάρεα επηρεάζονται πολύ από βιοτικούς και αβιοτικούς παράγοντες. Από τους βιοτικούς παράγοντες, μεγάλη σημασία έχουν το είδος και η κατάσταση των ξενιστών, και οι φυσικοί εχθροί. Από τους αβιοτικούς παράγοντες, σημαντικό ρόλο παίζουν η θερμοκρασία, η υγρασία, η βροχή, το φως και ο άνεμος. Ο αριθμός των γενεών και η εποχική δραστηριότητα αυτών είναι συσχετισμένα με τη θερμοκρασία, τις συνθήκες διατροφής και την κατάσταση των ξενιστών τους. Η εκκόλαψη των χειμερινών αυγών και η επαναδραστηριοποίηση ακμαίων την άνοιξη συγχρονίζονται με την εξέλιξη του φυλλώματος των ξενιστών, αλλά και τα δύο αυτά επηρεάζονται από τις θερμοκρασίες που επικρατούν την άνοιξη. Η σχετική υγρασία είναι σημαντικός παράγοντας στη ζωή των ακάρεων, μόνη της ή σε συνδυασμό με τη θερμοκρασία. Σε συνθήκες μεγάλης υγρασίας, παρατηρείται μείωση της ωοτοκίας και αύξηση της θνησιμότητας των νέων προνυμφών, ενώ το αντίθετο συμβαίνει σε συνθήκες χαμηλών υγρασιών.

Οπωσδήποτε, ζεστός και ξηρός καιρός είναι ευνοϊκοί παράγοντες για τους τετράνυχους. Φαίνεται ότι ορισμένα είδη έχουν διαφορετικές απαιτήσεις σε θερμοκρασία και σχετική υγρασία από τα άλλα. Ραγδαίες βροχές ξεπλένουν από τα φύλλα τους τετράνυχους και ιδιαίτερα αυτούς που δεν έχουν σχηματίσει ιστούς, ενώ ισχυροί άνεμοι τους απομακρύνουν, αλλά ταυτόχρονα συντελούν και στη διασπορά τους. Οι κυριότεροι παράγοντες που συντελούν στη διάπαυση των ακάρεων είναι η φωτοπερίοδος, η θερμοκρασία και η διατροφή. Επίσης, ο χρόνος προσβολής του φυτού εξαρτάται πολύ από τις καιρικές συνθήκες.

8.1.2. Νηματώδεις

Οι νηματώδεις έχουν ανάγκη από οξυγόνο και υγρασία, για να κινηθούν. Για να δραστηριοποιηθούν, χρειάζονται θερμοκρασία εδάφους 10-30° Α. Συνήθως κάτω από τους 200° Α σταματά η εξέλιξη και η αναπαραγωγή. Οι συνθήκες του περιβάλλοντος διαδραματίζουν βασικό ρόλο στη δραστηριότητά τους. Συνεπώς, σε αντίξοες συνθήκες, όπως χαμηλή ή υψηλή θερμοκρασία, ελάχιστη ή υπερβολική υγρασία, έλλειψη οξυγόνου, αμμώδες ή αργιλώδες έδαφος, ανυπαρξία κατάλληλου ξενιστή, η δραστηριότητά τους αναστέλλεται, ενώ, αντίθετα, αυξάνεται με ευνοϊκές συνθήκες.

8.1.3. Μύκητες

Μία σημαντική κατηγορία εχθρών των καλλιεργειών σχηματίζεται από μύκητες. Η θερμοκρασία, σε αντίθεση με τα έντομα, δεν είναι ο μόνος παράγοντας στην ανάπτυξη των μυκήτων. Το νερό, που βρίσκεται στα όργανα του φυτού, καθώς και η υγρασία του αέρα έχουν κυρίαρχο ρόλο. Για την παρακολούθηση της ανάπτυξης και διασποράς μιας ασθένειας μύκητα σε φυτά, είναι απαραίτητο, μαζί με τη θερμοκρασία, να εξεταστεί και η παρουσία νερού στα φυτά, καθώς και η υγρασία του αέρα. Συνεπώς, οι θερμοκρασίες προστίθενται από μια τιμή κατωφλίου και πάνω, αλλά μόνο εφόσον μια δεύτερη συνθήκη ικανοποιείται: η υγρασία του αέρα υπερβαίνει κάποια συγκεκριμένη τιμή, καθώς και τα ευαίσθητα όργανα καλύπτονται από ένα στρώμα νερού. Δεδομένου ότι οι απαιτήσεις σε υγρασία ικανοποιούνται γενικά τη νύχτα, οι μετεωρολογικές παρατηρήσεις στη διάρκεια της ημέρας είναι πολύ περιορισμένης χρησιμότητας. Απαιτούνται παρατηρήσεις μεγαλύτερης συχνότητας ή αυτόματα συστήματα καταγραφής. Κι εδώ ο χρόνος θεραπείας εξαρτάται κυρίως από τις μετεωρολογικές συνθήκες, που ευνοούν την ανάπτυξη του παρασίτου.

Στην αύξηση των μυκήτων επιδρούν διάφοροι παράγοντες, όπως είναι η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία, το οξυγόνο, το φως και η οξύτητα του θρεπτικού μέσου (pH). Η άριστη θερμοκρασία ανάπτυξης των περισσότερων μυκήτων κυμαίνεται από 20 έως 30° Α, η ελάχιστη από 0 έως 5° Α και η μέγιστη από 27 έως 45° Α. Τα σπόρια των περισσότερων μυκήτων νεκρώνονται μετά τους 40-60° Α. Αντίθετα, η αντοχή τους σε χαμηλές θερμοκρασίες είναι μεγάλη. Βασικός παράγοντας στην ανάπτυξή τους είναι η υγρασία τους περιβάλλοντος, απαραίτητη για τη βλάστηση των σπορίων, αλλά και για τη διευκόλυνση της ώσμωσης. Η ωσμωτική πίεση των μυκήτων είναι μεγαλύτερη από αυτή των κυττάρων του ξενιστή και επιτρέπει έτσι τον παρασιτισμό αυτών. Το οξυγόνο είναι απαραίτητο για τους μύκητες, γιατί είναι αερόβιοι. Η αντίδρασή τους στο φως διαφέρει. Γενικά, το διάχυτο φως δεν επηρεάζει την αύξησή τους, αντίθετα, το άμεσο ηλιακό φως την εμποδίζει ή τη σταματά εντελώς.

8.1.4. Βακτήρια και βάκιλοι

Μερικές ασθένειες προκαλούνται από βακτήρια ή βακίλους, που αναπτύσσονται μέσα στον οργανισμό του ξενιστή. Οι παθογενείς φορείς, μόλις εγκαταλείψουν τον οργανισμό του ξενιστή, αποκτούν μια μορφή που τους επιτρέπει να επιβιώνουν σε εξωτερικές συνθήκες, όπου οι μετεωρολογικές παράμετροι ενδέχεται να έχουν αρνητική επίπτωση. Γενικά, αυτό συμβαίνει σε συνθήκες ακραίων μετεωρολογικών φαινομένων, όπως η ξηρασία, ο καύσωνας ή το ψύχος. Στις περιπτώσεις βακτηριακών ασθενειών των φυτών, οι παθογενείς οργανισμοί μεταφέρονται από τον ένα ξενιστή στον άλλο με τα έντομα και, συνεπώς, επηρεάζονται λίγο από τις μετεωρολογικές συνθήκες κατά το χρόνο δράσης τους στα φυτά. Συνήθως, προετοιμάζονται και εκδίδονται προγνώσεις ανάπτυξης, που βασικά αξιολογούν τις απώλειες του πληθυσμού, και έμμεσα εκτιμάται το ποσοστό των ατόμων που έχουν καταστραφεί. Τα βακτήρια είναι πολύ ανθεκτικά στην έλλειψη υγρασίας και μπορεί να ζήσουν για μεγάλα χρονικά διαστήματα στους ιστούς που έχουν προσβληθεί. Η διάδοση του παθογόνου, εκτός από τον μολυσμένο σπόρο, γίνεται με το νερό της βροχής, φυσικής ή τεχνητής, ή με τον αέρα, που παρασύρει θρυμματισμένα φυτικά υπολείμματα ή σκόνη χώματος μολυσμένου από το βακτήριο. Η εξέλιξη της ασθένειας επηρεάζεται πολύ από τη θερμοκρασία και την υγρασία. Στα μεγάλα φυτά, υψηλή θερμοκρασία γύρω στους 30° Α

και υψηλή σχετική υγρασία ευνοούν την εξέλιξη της ασθένειας. Στα μικρά φυτά, οι απαιτήσεις σε θερμοκρασία για την εξέλιξη της βακτηρίωσης είναι διαφορετικές. Έχει βρεθεί ότι θερμοκρασία εδάφους γύρω στους 20° Α και εδαφική υγρασία στο σημείο του κορεσμού ευνοούν την εξέλιξη της ασθένειας.

8.1.5. Ιοί

Όπως και με τα βακτήρια, ο ιός παραμένει σε λανθάνουσα κατάσταση εκτός του ξενιστή. Μπορεί να καταστραφεί υπό ειδικές μετεωρολογικές συνθήκες, όπως υπεριώδεις ακτίνες. Η ασθένεια μπορεί να μεταφερθεί είτε με τα έντομα, κυρίως στα φυτά, είτε με τον άνεμο, κυρίως στα ζώα. Ένα φυτό είναι ευάλωτο σε ιούς όταν προσβάλλεται από σμήνη εντόμων. Η διασπορά των ιών, που γίνεται σε διαδοχικά κύματα, μπορεί να επηρεαστεί από ειδικές μετεωρολογικές συνθήκες, όπως είναι η κατάσταση της ατμόσφαιρας, οι διακυμάνσεις της πίεσης, του ανέμου και άλλα συναφή. Συνεπώς, στις μετεωρολογικές προγνώσεις για τη διασπορά των ιών συνυπολογίζονται ο άνεμος, η πίεση, η κατάσταση της ατμόσφαιρας, καθώς και η νεφοκάλυψη. Η προσβολή των ιών εξαρτάται από τις συνθήκες του περιβάλλοντος. Η θερμοκρασία επηρεάζεται από το φως, το οποίο και καθορίζει την διαφοροποίηση των συμπτωμάτων.

8.1.6. Αρπακτικά

Τα αρπακτικά, επειδή ανήκουν σε διαφορετικές οικογένειες ή τάξεις, αντιδρούν διαφορετικά στους μετεωρολογικούς και κλιματικούς παράγοντες, σύμφωνα με την τάξη και την οικογένεια στην οποία ανήκουν, όπως τα αρπακτικά ακάρεα, στα οποία γίνεται αναφορά στα ακάρεα.

8.1.7. Παράσιτα

Οι καιρικές συνθήκες επηρεάζουν τη διάρκεια της νύμφωσης. Μια συνδυασμένη και ολοκληρωμένη καταπολέμηση των παρασίτων πρέπει να στοχεύει όχι στην εξάλειψη των επιβλαβών παρασίτων, αλλά στη διατήρησή τους σε οικονομικά καταστρέψιμο επίπεδο. Η σύγχρονη τάση τείνει να δείχνει μεγαλύτερο σεβασμό στη δυναμική των οικοσυστημάτων κατά τη μάχη εναντίον των παρασίτων. Η βασική αυτή ιδέα οδηγεί στην ολοκληρωμένη αντιμετώπιση, που συνίσταται στη χρήση φυσικών προϊόντων ή όντων, για τη διατήρηση των πληθυσμών των παρασίτων σε ένα οικονομικά καταστρέψιμο επίπεδο. Διακρίνονται οι μέθοδοι που χρησιμοποιούν έντομα εναντίον εντόμων, βακτήρια των βακίλων εναντίον εντόμων, καθώς και ιούς εναντίον εντόμων.

8.1.8. Ζιζάνια

Τα ζιζάνια έχουν εξαιρετικές ιδιότητες αντοχής σε αντίξοες συνθήκες και πολλαπλασιασμού τους, ενώ παράλληλα συναγωνίζονται τα καλλιεργούμενα φυτά σε θρεπτικά στοιχεία, υγρασία και φως. Έτσι, οι κλιματολογικές συνθήκες επιδρούν στα ζιζάνια όπως επιδρούν και στα καλλιεργούμενα φυτά.

Η βιομετεωρολογία διαδραματίζει πάντα σοβαρό ρόλο στη φυτοπαθολογία, αφού το κλίμα καθορίζει τη συμπεριφορά κάθε φυτικής ασθένειας. Το μικροπεριβάλλον γύρω από τα μέρη του φυτού που βρίσκονται έξω από τη γη κάνει, συνήθως, κύκλους μεταξύ υψηλά ανεκτών και πολύ περιοριστικών συνθηκών, για τη μόλυνση από πολλά παθογόνα μικρόβια. Οι αρκετά υγρές ή ξηρές περίοδοι είναι από τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται για να προβλεφθεί η πιθανότητα εμφάνισης αρκετών σοβαρών ασθενειών. Βέβαια, η εξασθένιση ενός ατόμου που καθίσταται ευάλωτο σε παθογενή φορέα, όπως είναι τα βακτήρια ή οι ιοί, μπορεί να προκληθεί υπό ειδικές μετεωρολογικές συνθήκες. Αν οι περιβαλλοντικές και μετεωρολογικές συνθήκες δεν είναι βέλτιστες για την ανάπτυξή τους, τότε ο μεταβολισμός τους επηρεάζεται και η φυσική τους τάση προς παθογενείς φορείς καθίσταται πιο δύσκολη. Συνεπώς, οι ειδικές μετεωρολογικές προγνώσεις εναντίον επιφυτικών ασθενειών δεν πρέπει να περιορίζονται μόνο στους παθογενείς φορείς, όπως είναι τα έντομα, τα βακτήρια, οι βάκιλοι, οι ιοί και άλλα συναφή, αλλά να υπολογίζουν και τον ξενιστή, δηλαδή το ίδιο το φυτό.

8.1.9. Έντομα

Ο μετεωρολογικός παράγοντας που επηρεάζει την ανάπτυξη των εντόμων είναι μόνο η θερμοκρασία. Βασικά, κάθε έντομο απαιτεί μια σταθερή τιμή θερμοκρασίας, πάνω από μια δεδομένη τιμή κατωφλίου, για να μεταβεί από ένα φαινολογικό στάδιο στο επόμενο. Για τον υπολογισμό των απαραίτητων «βιομετεωρολογικών δεικτών», απαιτείται είτε έρευνα πεδίου, που συνεπάγεται πολλά χρόνια μελέτης, είτε εργαστηριακή έρευνα, που είναι και η επικρατέστερη. Η καταπολέμηση ενός αρπακτικού περιορίζεται χρονικά, διότι το παράσιτο αντιδρά μόνο στα

χημικά προϊόντα ενός σαφώς καθορισμένου σταδίου ανάπτυξης. Η θερμοκρασία δεν μπορεί να ελεγχθεί εύκολα στον αγρό. Όταν όμως είναι στο θερμοκήπιο, η διαφορετική επίδραση στον ξενιστή και στους φυσικούς εχθρούς μπορεί να είναι πολύ καίρια και πρέπει να ελεγχθεί προσεκτικά, εφόσον οι συνθήκες μπορούν να μεταβληθούν δραστικά από εργασίες, όπως το θέρισμα. Ως παράδειγμα αναφέρεται ότι η Trialourodes vaporariorum, δηλαδή η αλευρώδης του θερμοκηπίου, δεν μπορεί να ελεγχθεί κάτω από τους 24° Α, με τη βοήθεια του παρασιτοειδούς Encarisa formosa Gahan. Επίσης, η θερμοκρασία είναι, προφανώς, κρίσιμη στη χρήση του Encarisa, για τον έλεγχο της λευκόμυγας του θερμοκηπίου. Ακόμα, έχει πραγματοποιηθεί μεγάλος αριθμός πειραμάτων, για να κατανοηθεί ο τρόπος με τον οποίο η θερμοκρασία επιδρά στο έντομο webworm. Τα ευρήματα συνοψίζονται στην επίδραση της θερμοκρασίας στην ανάπτυξη του webworm, δίνοντας αρκετή ποσότητα θερμότητας πάνω από το αναπτυξιακό όριο των 51° F.

Με τον όρο «εγκλιματισμός του εντόμου στη θερμοκρασία» εννοείται η ικανότητα προσαρμογής των οργανισμών, ώστε να μπορούν να ανταπεξέλθουν στις μη ευνοϊκές συνθήκες του φυσικού ή χημικού περιβάλλοντος. Μέσα στα όρια της θερμομετρικής ζώνης επιβίωσης, οι βιολογικές λειτουργίες έχουν συντελεστή θερμοκρασίας Q μεταξύ 2 και 3. Ο Q είναι ο λόγος των ταχυτήτων μιας βιολογικής δραστηριότητας σε δύο διαφορετικές θερμοκρασίες, που διαφέρουν μεταξύ τους κατά 10° C. Τα έντομα επηρεάζονται δραστικά από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Ακόμα, επισημαίνεται η επίδραση της θερμοκρασίας στο μεταβολισμό και την αύξηση των εντόμων, καθώς και το φαινόμενο του εγκλιματισμού του μεταβολισμού τους. Στα έντομα, η επίδραση της θερμοκρασίας εκδηλώνεται βασικά σε όλες τις παραμέτρους της φυσιολογίας ή συμπεριφοράς τους. Εξαίρεση αποτελούν οι ημερήσιοι ενδογενείς ρυθμοί, που είναι σχεδόν ανεξάρτητοι από τη θερμοκρασία (circadian).

Η θερμοκρασία είναι γνωστό επίσης ότι έχει επίδραση στη γενετική ουσία των οργανισμών, το είδος της οποίας παίζει σημαντικό ρόλο στην εξέλιξή τους. Αυξημένη συχνότητα μεταλλαγών συσχετίζεται με αυξημένες θερμοκρασίες. Οι φυσιολογικές λειτουργίες των εντόμων επηρεάζονται από τη θερμοκρασία και αποτελούν τη σύνθεση ενός πολύπλοκου συστήματος βιοχημικών αντιδράσεων, των οποίων η ταχύτητα εξαρτάται άμεσα από τη θερμοκρασία. Η ταχύτητα ανάπτυξης, η αύξηση, η μακροζωία, η παραγωγή απογόνων και ο εγκλιματισμός αποτελούν μερικές από τις σπουδαιότερες βιολογικές παραμέτρους που διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην επιτυχία του είδους σε ορισμένο οικολογικό περιβάλλον. Η ενδελεχής μελέτη των παραπάνω παραμέτρων αφενός συνεισφέρει βασικές γνώσεις στην επιστήμη και αφετέρου, αν πρόκειται για επιβλαβή έντομα, κάνει δυνατή την ανάπτυξη στρατηγικής για την αντιμετώπιση των προβλημάτων που προκαλούνται από αυτά.

8.2. Αγρομετεωρολογία για ασθένειες φυτών

Η τριγωνική έννοια της ασθένειας είναι η βάση για τις περισσότερες από τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την ολοκληρωμένη καταπολέμηση των παθογόνων. Έτσι, το μοντέλο της τριγωνικής ασθένειας υπονοεί ότι η ασθένεια λαμβάνει χώρα όταν και τα τρία σημεία του τριγώνου είναι ευνοϊκά για το παθογόνο. Πρέπει, δηλαδή, να υπάρχει ευαίσθητη καλλιέργεια σε μεγάλο πληθυσμό, τοξικό, παθογόνο, και ευνοϊκές μετεωρολογικές συνθήκες. Το περιβαλλοντικό τμήμα του μοντέλου είναι το άθροισμα όλων των εξωτερικών βιολογικών, χημικών, φυσιολογικών καταστάσεων που επηρεάζουν το παθογόνο και την καλλιέργεια. Στους μετεωρολογικούς και περιβαλλοντικούς παράγοντες περιλαμβάνονται η θερμοκρασία του αέρα και του εδάφους, η ατμοσφαιρική υγρασία, ο δρόσος, το ποσοστό των βροχοπτώσεων, το pH, η γονιμότητα του εδάφους και οι ξενιστές παθογόνων. Ο χρόνος πραγματοποίησης της επέμβασης με μυκητοκτόνα είναι πολύ σημαντικός για την ικανοποιητική προστασία της καλλιέργειας. Συνήθως, οι ψεκασμοί πραγματοποιούνται στο χρονικό διάστημα κατά το οποίο δραστηριοποιείται το παθογόνο. Η σημασία της πρόβλεψης των ασθενειών εντοπίζεται στον προσδιορισμό του κατάλληλου χρόνου, για την εφαρμογή των χημικών ουσιών, και αποσκοπεί στη μείωση του αριθμού των επεμβάσεων που γίνονταν στο παρελθόν. Τα μυκητοκτόνα εφαρμόζονται κυρίως στους βλαστούς, τα φύλλα και τους καρπούς. Εξαιτίας της συνεχούς αύξησης των οργάνων αυτών, θα πρέπει να γίνεται ψεκασμός συνεχώς, ώστε να προστατεύεται ο νέος ιστός. Ο σχεδιασμός των εφαρμοζόμενων ψεκασμών βασίζεται στην ανάλυση του μικροκλίματος, παρ' όλο που η ουσιώδης μείωση των παθογόνων απαιτεί την εφαρμογή χημικών ουσιών.

Η ανάπτυξη και η εφαρμογή των συστημάτων διαχείρισης των ασθενειών αξιοποιούν, συχνά, μοντέλα σχετικά με το μικροκλίμα και το παθογόνο, ενώ σπανίως σχετίζονται με την καλλιέργεια και τον πληθυσμό των φυτών. Σήμερα, οι σχεδιασμοί της διαχείρισης των παθογόνων αντλούν τις πληροφορίες τους από επιστημονικά

συστήματα και από μαθηματικές έννοιες. Οι ανεξάρτητες μεταβλητές στα ποσοτικά μοντέλα αποτελούνται από βιολογικά δεδομένα, καθώς και από παραμέτρους του μικροκλίματος. Τα μοντέλα «καιρού-ασθένειας» εκφράζουν το στάδιο στο οποίο το παθογόνο ανταποκρίνεται ως ενέργεια στις παρούσες και παρελθούσες καιρικές συνθήκες. Μοντέλα ελέγχου των ασθενειών αναφέρονται ήδη από το τέλος του 19ου αιώνα και αφορούν το σχεδιασμό τεχνικών για τη διαχείριση των παθογόνων. Τα μοντέλα αυτά εξακολουθούν να βασίζονται σε μετεωρολογικά δεδομένα, ενώ πολύ λίγα συστήματα στηρίζονται και σε βιολογικές πληροφορίες.

Το σύστημα Blitecast έχει χρησιμοποιηθεί στις νότιες πολιτείες των ΗΠΑ, για την πρόβλεψη της αργής σήψης της πατάτας, με βάση τα καιρικά φαινόμενα. Η ασθένεια προκαλείται από το μύκητα Phytophthora infenstans και αποτελεί την πιο σημαντική ασθένεια για τις πατατοκαλλιέργειες. Αυτή η ειδική ασθένεια παρατηρείται σε όλες τις περιοχές του κόσμου στις οποίες καλλιεργούνται πατάτες και έχει προκαλέσει την καταστροφή της πατατοκαλλιέργειας στην Ιρλανδία, με συνέπεια το μεγάλο λιμό του 1846. Ο ίδιος μύκητας προκαλεί σημαντική ζημιά και στις καλλιέργειες τομάτας. Ο έλεγχος της αργής σήψης καταπολεμάται με την εφαρμογή μυκητοκτόνων, που σκοτώνουν ή εμποδίζουν τη βλάστηση των σπορίων των μυκήτων. Συστήματα βασισμένα στην ανάλυση των καιρικών δεδομένων δεν αποτελούν νέες μεθοδολογίες στη διαχείριση των παθογόνων. Υπάρχουν ήδη διαθέσιμα αρκετά τέτοια συστήματα, για τον έλεγχο της αργής σήψης. Το πρώτο τέτοιο σύστημα χρονολογείται από το 1926, γνωστό ως Dutch Rules, στο οποίο οι μετεωρολογικές μεταβλητές που χρησιμοποιούνται στην επιδημία της αργής σήψης είναι η θερμοκρασία, η βροχόπτωση, η περίοδος διαβροχής των φύλλων και η νεφοκάλυψη.

Συστήματα που αναπτύσσονται στις ΗΠΑ και σχεδιάζουν με ακρίβεια ψεκασμούς, για τον έλεγχο της αργής σήψης, περιλαμβάνουν μεθόδους οι οποίες βασίζονται είτε στη θερμοκρασία του αέρα και τη σχετική υγρασία είτε στη θερμοκρασία και τη βροχόπτωση. Αυτές οι μέθοδοι έχουν ολοκληρωθεί και ενσωματωθεί στο Blitecast, μετατρέποντάς το πλέον σε σύστημα προειδοποιήσεων και στήριξης αποφάσεων, το οποίο, με βάση τις αναλύσεις της θερμοκρασίας, της βροχόπτωσης και της σχετικής υγρασίας, συμβουλεύει για την εφαρμογή ψεκασμών όταν κρίνεται αναγκαίο. Το αυτόματο σύστημα για την προειδοποίηση της αργής σήψης που εφαρμόζεται στον αγρό για κάθε παραγωγό δείχνει την επικρατούσα θερμοκρασία, τη σχετική υγρασία και τη βροχόπτωση των τελευταίων 12 ωρών, και κωδικοποιεί μηνύματα για ψεκασμούς ή όχι για ένα χρονικό διάστημα 5-7 ημερών.

Το σύστημα για τον έλεγχο της ψώρας των μήλων, εξαιτίας του Venturia ineaqualis, αποτελεί παράδειγμα για ένα σύστημα διαχείρισης που χρησιμοποιείται πολλά χρόνια σε μηλοοπωρώνες. Προβλέπει τις περιόδους προσβολής των μήλων από τη ψώρα και βασίζεται στον αριθμό των ωρών ύπαρξης υγρασίας κατάλληλης για μόλυνση, σε συνδυασμό με τις αντίστοιχες επικρατούσες θερμοκρασίες. Με βάση τις παραπάνω σχέσεις και τις πληροφορίες για τη θερμοκρασία και την έναρξη της βροχής, οι καλλιεργητές πληροφορούνται το χρόνο πιθανής εκδήλωσης μόλυνσης και την ενδεχόμενη ανάγκη εφαρμογής προστατευτικού ή δραστικού μυκητοκτόνου. Το σύστημα αυτό έχει τροποποιηθεί, για να περιληφθεί η σχετική υγρασία και η επίδρασή της στη μόλυνση. Έχει ενσωματωθεί σε ηλεκτρονική συσκευή μιας φορητής μονάδας και εγκαθίσταται μέσα στους οπωρώνες των μήλων, όπου υπάρχουν αισθητήρες θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας, διαβροχής, και πληροφορεί για τις περιόδους εκδήλωσης της ψώρας των μήλων.

Ένα άλλο παράδειγμα συστήματος προειδοποιήσεων αναφέρεται στη σήψη της τομάτας, που προκαλείται από το μύκητα Alternaria solani. Στην περίπτωση αυτή, τα μυκητοκτόνα αποτελούν την πιο ενδεδειγμένη λύση για τον έλεγχο της ασθένειας και εφαρμόζονται ανά διαστήματα 7-10 ημερών, εξαρτώνται δε από τις μετεωρολογικές συνθήκες. Ωστόσο, υπάρχουν «κρίσιμες περίοδοι», στις οποίες οι καιρικές συνθήκες είναι ευνοϊκές για το παθογόνο, όπως διαπιστώνεται από την ανάλυση της θερμοκρασίας, της σχετικής υγρασίας, της βροχόπτωσης, και της περιόδου υγρασίας. Η πιθανότητα εμφάνισης της ασθένειας είναι μεγαλύτερη όταν η θερμοκρασία και η υγρασία είναι ευνοϊκές για τη δημιουργία σπορίων, που προκαλούν και τη μόλυνση στις καλλιέργειες τομάτας. Το παραπάνω σύστημα σήψης της τομάτας λέγεται FAST και είναι όμοιο με το Blitecast, καθώς παρέχει ένα αποτελεσματικό πρόγραμμα ψεκασμών. Χρησιμοποιεί δύο εμπειρικά μοντέλα, που βασίζονται στα δεδομένα για τη θερμοκρασία και την υγρασία. Το ένα μοντέλο χρησιμοποιεί μετρήσεις για τη θερμοκρασία και την υγρασία των φύλλων, ενώ το άλλο μοντέλο εκφράζει τη σπουδαιότητα της ασθένειας, ως αποτέλεσμα της συνδυασμένης επίδρασης θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας και βροχόπτωσης. Η επεξεργασία των μετεωρολογικών δεδομένων πραγματοποιείται μέσω ενός απλού και εύχρηστου ηλεκτρονικού συστήματος. Τα δεδομένα της θερμοκρασίας και της υγρασίας καταγράφονται από έναν βαθμονομημένο θερμοϋγρογράφο σε κλωβό, τοποθετημένο 30-40 εκατοστά πάνω από το έδαφος και ανάμεσα στις γραμμές της τομάτας. Τα δεδομένα της υγρασίας των φύλλων υπολογίζονται

με το υγρόμετρο Taylor και, για τη μέτρηση της βροχής, χρησιμοποιείται ένα απλό βροχόμετρο. Η πρώτη εφαρμογή του συστήματος FAST στο πεδίο χρονολογείται από το 1976.
Από τα παραπάνω παραδείγματα συστημάτων προειδοποιήσεων, συνάγεται ότι η συσχέτιση των μετεωρολογικών δεδομένων αποτελεί χρήσιμο εργαλείο για τη διαχείριση των παθογόνων των φυτών. Η επιτυχής μείωση των εφαρμοζόμενων ψεκασμών, που προκύπτει από τα συστήματα προειδοποιήσεων, οφείλεται στο γεγονός ότι γίνονται γνωστές οι κρίσιμες περίοδοι κατά τις οποίες τα παθογόνα μπορούν να αναπτύξουν δραστηριότητα. Συνεπώς, η ακρίβεια του χρόνου επέμβασης αποτελεί το ουσιώδες τμήμα του σχεδιασμού της διαχείρισης των παθογόνων.

8.3. Ζιζάνια και οικοσύστημα

Ο έλεγχος των ζιζανίων έχει αναγνωρισθεί ως απαραίτητη συνιστώσα της προστασίας των καλλιεργειών από τότε που ο άνθρωπος άρχισε να καλλιεργεί συστηματικά τη γη. Στις αναπτυγμένες χώρες έχουν δημιουργηθεί πολλές μηχανικές και χημικές τεχνικές, ενώ στις αναπτυσσόμενες χώρες υπάρχει σημαντική ενασχόληση με την καταστροφή των ζιζανίων. Η απομάκρυνση των ζιζανίων θεωρείται απαραίτητη, καθόσον η ύπαρξή τους στις καλλιέργειες μειώνει την απόδοση των φυτών, καθώς και την παραγωγή, ειδικά στις ετήσιες καλλιέργειες.
Αρχικά, η καταπολέμηση των ζιζανίων γινόταν με το χέρι, με αποτέλεσμα ο άνθρωπος να θεωρείται η κύρια πηγή ενέργειας για τη ζιζανιοκτονία. Αργότερα, στο τέλος του 16ου αιώνα, εφαρμόστηκε η καλλιέργεια σε σειρές, οπότε αναπτύχθηκε η καταπολέμηση ανάμεσα σε γραμμές. Τα διάφορα εργαλεία που κατασκευάσθηκαν άρχισαν να αντικαθιστούν την ενέργεια του ανθρώπου με εκείνη των ζώων. Στις πρώτες δεκαετίες του 20ού αιώνα, κατασκευάστηκαν καλλιεργητικά μηχανήματα, που αντικατέστησαν την ενέργεια των ζώων με εκείνη των καυσίμων. Η παραγωγή των χημικών για τον έλεγχο των ζιζάνιων άρχισε το 1930, βελτιώνοντας τη ζιζανιοκτονία σε ορισμένες καλλιέργειες, αλλά στη μέση της δεκαετίας του 1940 εμφανίστηκαν τα φαινοξικά ζιζανιοκτόνα και διεύρυναν τη χρήση των ζιζανιοκτόνων σε ευρεία κλίμακα.
Γενικά, ο έλεγχος των ζιζανίων απομακρύνει, αναπόφευκτα, κάποια είδη φυτών και επιτρέπει την ύπαρξη άλλων, συμβάλλοντας έτσι στη μεταβολή του οικοσυστήματος. Οι αλλαγές στη βλάστηση έχουν συνέπεια τη μείωση του ανταγωνισμού μεταξύ των φυτών των καλλιεργειών. Επίσης, η αλλαγή στη βλάστηση μπορεί να μεταβάλει τον πληθυσμό των εντόμων, των παθογόνων, των νηματωδών, καθώς και τη χλωρίδα του εδάφους. Αυτή η αλλαγή μπορεί να αποδειχθεί ωφέλιμη, αλλά μπορεί να είναι και επιβλαβής. Θεωρείται ωφέλιμη, εφόσον καταστρέφει τα ζιζάνια, και μη ωφέλιμη, όταν επιδρά καταστροφικά σε οργανισμούς μη στόχους (ωφέλιμα, υπερπαράσιτα), αλλά και τροποποιεί τη φυσιολογία των φυτών, καθιστώντας τα ευάλωτα σε έντομα και ασθένειες. Συνεπώς, γίνεται κατανοητό ότι η παρουσία των ζιζανίων μεταβάλλει το μικροκλίμα και αποτελεί καταφύγιο είτε για τους εχθρούς των καλλιεργειών είτε για τους ωφέλιμους οργανισμούς. Επειδή, λοιπόν, τα ζιζάνια αλληλοεπιδρούν με τους άλλους μικροοργανισμούς, η καταπολέμηση που απαιτείται πρέπει να γίνεται έπειτα από ενδελεχή σχεδίαση και έλεγχο όλων των περιπτώσεων στις οποίες η εφαρμογή της θα είχε ανεπιθύμητες επιπτώσεις.
Τα φυτά, γενικά, τροποποιούν το περιβάλλον στο οποίο αναπτύσσονται, απορροφούν και εκμεταλλεύονται την ηλιακή ακτινοβολία, λαμβάνουν νερό από το έδαφος και το επιστρέφουν στην ατμόσφαιρα, με τη διαδικασία της διαπνοής, απορροφούν θρεπτικά συστατικά από το έδαφος και τα επιστρέφουν με τη διαδικασία της αποσύνθεσης. Υπάρχουν προφανείς επιδράσεις του μικροκλίματος στους μικροοργανισμούς που αποτελούν το οικοσύστημα. Αυτό σημαίνει ότι ίσως ορισμένοι οργανισμοί να μην μπορούν να επιβιώσουν χωρίς την επίδραση από την παρουσία των φυτών. Συνεπώς, τα ζιζάνια, που είναι φυτά, επηρεάζουν το περιβάλλον, τόσο με την παρουσία τους, όσο και με την απομάκρυνσή τους.
Στη συνέχεια, παρουσιάζονται μεθοδολογίες ανάπτυξης και τεχνικές αντιμετώπισης ζιζανίων, καθώς και ολοκληρωμένης καταπολέμησής τους.

8.3.1. Μοντέλα ανάπτυξης ζιζανίων υπό ελεγχόμενες συνθήκες

Τα ζιζάνια αναπτύσσονται σε ελεγχόμενο περιβάλλον ή σε θαλάμους ανάπτυξης, για να παρατηρηθούν μορφολογικές και φυσιολογικές αλλαγές στο φυτό. Όταν τα δεδομένα αυτά αναλυθούν, κατασκευάζονται μοντέλα προσομοίωσης της πληθυσμιακής ανάπτυξης του ζιζανίου σε συνθήκες αγρού. Εφόσον είναι δυνατόν, δοκιμάζονται στον αγρό και επαναπροσαρμόζονται πριν χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη του πληθυσμού. Έχει μελετηθεί η

ανάπτυξη του ζιζανίου Rottboellia exaltata L. f., κάτω από διαφορετικές ημερήσιες και νυχτερινές θερμοκρασίες, και πρόβλεψε ότι το ζιζάνιο μπορεί να φτάσει το 75-100% του δυναμικού ανάπτυξής του στις πολιτείες των ανατολικών ΗΠΑ. Άλλες μελέτες, στις οποίες το ζιζάνιο τέθηκε κάτω από χαμηλές θερμοκρασίες για 3 ημέρες, συνθήκες που παρατηρούνται στη διάρκεια των πρώτων σταδίων ανάπτυξης του καλαμποκιού και της σόγιας, έδειξαν ότι είναι πιο ευαίσθητο από ό,τι οι καλλιέργειες. Έτσι, προβλέφθηκε ότι το ζιζάνιο ήταν απίθανο να γίνει σημαντικός ανταγωνιστής για το καλαμπόκι και τη σόγια σε περιοχές εκτός Νότου, εξαιτίας του ψύχους. Σε μια συλλογική μελέτη, τα ζιζάνια Aubtilon theophrastic Medic. και Anoda cristatu (L.) Schlet. έδειξαν να αναρρώνουν γρηγορότερα υπό την επίδραση χαμηλών θερμοκρασιών για 3 ημέρες από ό,τι το βαμβάκι. Τα αποτελέσματα βοήθησαν να εξηγηθεί ο λόγος για τον οποίο αυτά τα ζιζάνια είναι ιδιαιτέρως ανταγωνιστικά με το βαμβάκι.
Επίσης, έχει αποδειχθεί η επίδραση της σκιάς στην ανάπτυξη του ζιζανίου και στις φωτοσυνθετικές λειτουργίες του. Ειδικότερα, η μαθηματική ανάλυση υποδεικνύει ότι η σκιά, 60%, 25% ή 2% φως, μειώνει την παραγωγή βιομάζας. Ωστόσο, παρότι η παραγωγή ξηρής ουσίας μειώνεται σημαντικά από τη σκιά, το ζιζάνιο διατηρεί την ικανότητα για υψηλή φωτοσυνθετική δραστηριότητα και υψηλές κλίμακες ανάπτυξης, όταν εκτεθεί σε υψηλή ακτινοβολία. Αυτά τα χαρακτηριστικά χρησιμοποιούνται για να εξηγήσουν την ανταγωνιστικότητά του με τις καλλιέργειες. Ίσως, για αυτό κατατάσσεται ως το 18ο χειρότερο ζιζάνιο παγκοσμίως. Αντίστοιχα, αναπτύσσεται ένα μοντέλο προσομοίωσης για το Setaria viridus var. robusta-alba Schreiber και το S. viridus var. robusta-purpurea Schreiber. Το μοντέλο αυτό καλείται SETSIM και χρησιμοποιεί μια προσέγγιση για να παρουσιάσει την έκκληση του άνθρακα μέσα στον πληθυσμό του ζιζανίου. Μπορεί να προβλέψει την πιο δραστήρια περίοδο της ανάπτυξης του ζιζανίου και του χρόνου της μεγαλύτερης αντοχής του σε ζιζανιοκτόνο.
Μοντέλα προσομοίωσης βασισμένα στη φωτοσύνθεση δίνουν, συχνά, μια ευρεία επιστημονική έννοια της ανάπτυξης πληθυσμών και της αύξησης. Ωστόσο, είναι αρκετά εξειδικευμένα. Επίσης, επειδή τα στοιχεία δεν είναι συνήθως διαθέσιμα, παρά μόνο στους επιστήμονες, τα μοντέλα έχουν, συχνά, περιορισμένη χρήση.
Έχουν μελετηθεί τα φυσικά μοντέλα σε αντίθεση με τα στατιστικά ή φυσιολογικά μοντέλα, που έχουν αναφερθεί προηγουμένως, με στόχο να χρησιμοποιηθούν οι διαθέσιμες καιρικές πληροφορίες ως δεδομένα. Με στόχο την ανάπτυξη ενός τέτοιου μοντέλου, δηλαδή τον υπολογισμό του ανταγωνισμού ετήσιων ζιζανίων με τις τομάτες, έχει αναπτυχθεί μια σειρά από φαινολογικά μοντέλα για την τομάτα και για τέσσερα ετήσια ζιζάνια συνηθισμένα στην τομάτα.
Γενικά, πολλές προσπάθειες έχουν πραγματοποιηθεί για να μοντελοποιηθούν είδη ζιζανίων. Τα ζιζάνια είναι πιο δύσκολο να μοντελοποιηθούν από ό,τι τα είδη των καλλιεργειών, εξαιτίας της ευρείας γενετικής και φαινοτυπικής διακύμανσης που εμφανίζεται στους φυσικούς πληθυσμούς. Η μοντελοποίηση ξεχωριστών ζιζανίων, που αναπτύσσονται κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες, έχει οδηγήσει σε μερικές βιολογικές πληροφορίες για τα είδη, που δεν είναι, ωστόσο, πολύ χρήσιμες στη γεωργία, εκτός αν μπορούν να προβλέψουν την έκταση των πληθυσμών ή την ανταγωνιστικότητα με την καλλιέργεια. Μοντέλα τα οποία προβλέπουν τη φαινολογική αύξηση ζιζανίων που είναι ξενιστές εντόμων ή άλλων εχθρών χρησιμοποιούνται στην ολοκληρωμένη καταπολέμηση.

8.3.2. Τεχνικές αντιμετώπισης των παθογόνων

Η επίπτωση μιας ασθένειας που, πέρα από κάποιο όριο, προκαλεί σημαντική οικονομική απώλεια είναι ένα πολύπλοκο πρόβλημα. Η ποικιλία και η διαφορετικότητα ανάμεσα στα παθογόνα δεν επιτρέπουν την χρησιμοποίηση μιας κοινής τεχνικής για τον έλεγχο του πληθυσμού τους. Για παράδειγμα, κάποιοι από τους μύκητες έχουν σπόρια και διασκορπίζονται με τις κινήσεις του αέρα, άλλοι διασκορπίζονται με το νερό, και άλλοι διαχέονται στο έδαφος, ενώ ιοί και μυκοπλάσματα μπορούν να μεταφερθούν εκατοντάδες χιλιόμετρα μακριά από τα έντομα-φορείς τους, αλλά και ο άνθρωπος μπορεί να μεταφέρει παθογόνα με τα εργαλεία, το πολλαπλασιαστικό υλικό και τη διασπορά χώματος. Επίσης, τα αυγά ορισμένων νηματωδών σκωλήκων επιβιώνουν για μακρό χρονικό διάστημα μέσα στο έδαφος και οι σπόροι των σπερματόφυτων μπορούν να παραμείνουν βιώσιμοι πάνω από 13 χρόνια, ώσπου να βρουν κατάλληλο ξενιστή. Παρ' όλο, λοιπόν, που η αντιμετώπιση ενός μόνο παθογόνου σε κάποια συγκεκριμένη στιγμή ίσως να είναι εύκολη, η πολυπλοκότητα με τα άλλα παθογόνα απαιτεί τη χρήση περισσοτέρων της μιας μεθόδου, για τον πιο επιτυχή και ικανοποιητικό έλεγχο. Χημικές, βιολογικές, μηχανικές και φυσικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται για το χειρισμό των παθογόνων των φυτών, όπως αμειψισπορά, τροποποίηση του pH, τροποποίηση της ατμόσφαιρας στα θερμοκήπια, εφαρμογή φυτοπροστατευτικών, καταστροφή υπολειμμάτων, ανθεκτικές ποικιλίες και άλλα συναφή.

8.3.3. Ολοκληρωμένη καταπολέμηση

Ολοκληρωμένη καταπολέμηση ορίζεται από την ομάδα εμπειρογνωμόνων του FAO το «σύστημα χειρισμού των εχθρών (της φυτικής παραγωγής), που, στο πλαίσιο του σχετικού περιβάλλοντος και της δυναμικής των πληθυσμών τους, χρησιμοποιεί όλες τις κατάλληλες τεχνικές, με όσο το δυνατόν πιο συμβιβάσιμο τρόπο, και διατηρεί τους πληθυσμούς των εχθρών σε επίπεδα κάτω από εκείνα που προκαλούν οικονομική ζημιά. Στη στενή της έννοια, αφορά το χειρισμό ενός εχθρού (όχι ομάδων εχθρών) σε ορισμένες καλλιέργειες (φυτά) ή σε ορισμένες τοποθεσίες. Στην ευρεία της έννοια, αφορά το συντονισμένο χειρισμό όλων των πληθυσμών των εχθρών στο γεωργικό ή το δασικό περιβάλλον. Δεν είναι απλώς μια παράθεση (παράλληλη εφαρμογή) δύο τεχνικών καταπολέμησης (όπως της χημικής και της βιολογικής), αλλά η σύνδεση (ενοποίηση, συνδυασμός) όλων των κατάλληλων μεθόδων χειρισμού, με τα φυσικά ρυθμιστικά και περιοριστικά στοιχεία του περιβάλλοντος».

Σκοπός της ολοκληρωμένης καταπολέμησης είναι η μείωση των δυσμενών επιδράσεων άλλων μεθόδων καταπολέμησης, και ιδιαίτερα της χημικής, καθώς και η παραγωγή προϊόντων χωρίς ανεπίτρεπτα τοξικά υπολείμματα και με την ελάχιστη δυνατή βλάβη των χρήσιμων συνιστωσών, βιοτικών και μη, του αγροοικοσυστήματος. Με άλλα λόγια, η ολοκληρωμένη καταπολέμηση προσπαθεί να είναι εκλεκτική και οικολογικά αποδεκτή, όσο αυτό είναι δυνατόν. Επίσης, αντιμετωπίζει την έννοια του εχθρού, όχι ανθρωποκεντρικά, αλλά οικολογικά, ως συστατικό του οικοσυστήματος, που αλληλοεπιδρά με τους άλλους παράγοντες του αγροοικοσυστήματος. Για την επίτευξη του σκοπού της, η ολοκληρωμένη καταπολέμηση συνδυάζει, συνήθως, δύο ή περισσότερες μεθόδους ή μέτρα καταπολέμησης. Η ολοκληρωμένη καταπολέμηση δεν διαφέρει από τις βιολογικές μεθόδους ως προς το σεβασμό των ωφέλιμων οργανισμών. Μπορεί όμως να εφαρμοστεί σε πολύ μεγαλύτερο αριθμό βλαβερών ειδών και, συνεπώς, να έχει καλύτερες προοπτικές.

Ο προγραμματισμός της ολοκληρωμένης καταπολέμησης απαιτεί επαρκή γνώση της βιολογίας, της ηθολογίας, της δυναμικής των πληθυσμών και των παραγόντων φυσικού περιορισμού των κύριων και ορισμένων δυνητικών εχθρών μιας καλλιέργειας, καθώς και των καλλιεργητικών εργασιών που ταιριάζουν στο συγκεκριμένο φυτό. Συνεπώς, αποτελεί σήμερα την πιο ενδεδειγμένη μέθοδο καταπολέμησης των εχθρών της φυτικής παραγωγής. Από χρόνια, διεθνείς οργανισμοί όπως οι FAO, CEC, IOBC, IAEA χρηματοδοτούν ή/και συντονίζουν ερευνητικά προγράμματα που στοχεύουν στην ολοκληρωμένη καταπολέμηση. Η ολοκληρωμένη καταπολέμηση άρχισε να εφαρμόζεται σε ορισμένες χώρες από το 1965. Ήδη είναι αρκετά διαδεδομένη σε πολλές γεωργικές χώρες, όπως στις ΗΠΑ, τον Καναδά, την Αυστραλία, την Ελβετία, την Ολλανδία (Κατσόγιαννος και Κωβαίος, 1993), αλλά και σε λιγότερο προηγμένες, όπως το Περού.

Η ταχύτητα ανάπτυξης των εντόμων εξαρτάται από τη θερμοκρασία και την τροφή. Υπάρχει ένα κατώτερο και ένα ανώτερο όριο θερμοκρασιών, στο πλαίσιο του οποίου είναι δυνατή η ανάπτυξη των εντόμων. Το κάτω όριο ονομάζεται «κάτω ουδός ανάπτυξης» και βρίσκεται μεταξύ 0^{o} και 15^{o} C, για τα περισσότερα έντομα, και το άνω όριο ονομάζεται «άνω ουδός ανάπτυξης» και βρίσκεται μεταξύ 30^{o} και 40^{o} C. Η ταχύτητα ανάπτυξης είναι ανάλογη της θερμοκρασίας ως ένα μέγιστο, ενώ, πλησιάζοντας στο άνω όριο, μειώνεται. Ανάμεσα σε αυτές τις δύο τιμές βρίσκεται η βέλτιστη θερμοκρασία (T-optimum). Κάτω από σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας, η διάρκεια ανάπτυξης εκφράζεται με καμπύλη μορφής υπερβολής, ενώ η ταχύτητα ανάπτυξης, που είναι το αντίστροφο της διάρκειας ανάπτυξης, εκφράζεται με ευθεία γραμμή, η οποία είναι στα άκρα της καμπύλη (Σχήμα 8.4). Από αυτό το ευθύγραμμο τμήμα μπορεί να προσδιοριστεί η ζώνη θερμοκρασίας ανάπτυξης των εντόμων και να υπολογιστούν οι ημεροβαθμοί ή βαθμοί-ημέρες (degree-days) του κάθε εντόμου, για τη συμπλήρωση ορισμένου σταδίου ή σταδίων ανάπτυξης. Το σύνολο των απαιτούμενων ημεροβαθμών ονομάζεται θερμική σταθερά (K) και υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$K = y (t – a), \quad (8.1)$$

όπου y είναι ο αριθμός των αναγκαίων ημερών για τη συμπλήρωση ορισμένου σταδίου του βιολογικού κύκλου, t η επικρατούσα θερμοκρασία και a η κάτω ουδός ανάπτυξης. Οι τιμές αυτές χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του χρόνου που απαιτείται για την ανάπτυξη ενός εντόμου στο ύπαιθρο, δηλαδή καθορίζεται ο χρόνος εμφάνισης ορισμένων σταδίων του βιολογικού του κύκλου. Έτσι, προσδιορίζεται ο χρόνος επέμβασης με εντομοκτόνα, αφού είναι γνωστό το βλαβερό στάδιο ή το στάδιο εκείνο που είναι το κατάλληλο για την καταπολέμηση. Παράδειγμα: Rhagoletis cerasi. Με άθροισμα ημεροβαθμών εδάφους στην Ελβετία, είναι δυνατή η πρόβλεψη εξόδου των τελείων, για την έγκαιρη επέμβαση με εντομοκτόνα. Αθροίζονται ημερήσιες θερμοκρασίες > +5 σε 5 εκατοστά

βάθος από το χειμώνα και η έναρξη των τελείων παρατηρείται με 430 ημεροβαθμούς. Τα τέλεια ελκύονται σε υδρολυμένες πρωτεΐνες, διαλύματα αμμωνιακών αλάτων σε παγίδες McPhail.

8.4. Αγρομετεωρολογικά μοντέλα εχθρών και ασθενειών

Η χρήση της τεχνολογικής προόδου στην αγρομετεωρολογική προσομοίωση μιας ασθένειας μπορεί να παράγει χρήσιμα εργαλεία, για τη βελτίωση των τεχνικών φυτοπροστασίας (Rosa et al., 1995). Η χρήση αγρομετεωρολογικών μοντέλων επιτρέπει σε γεωργούς και γεωπόνους να αναπαραστήσουν την πραγματικότητα του συστήματος και να την αναλύσουν, για να βελτιώσουν τις γνώσεις τους σε ορισμένες φυτικές ασθένειες.

8.4.1. Εννοιολογικό πλαίσιο μοντέλων εχθρών και ασθενειών

Επισημαίνεται ο ρόλος της αγρομετεωρολογικής πρόγνωσης ως εργαλείου για τη μείωση του κόστους των εργασιών ελέγχου παρασίτων και ασθενειών, με τη μείωση της συχνότητας και του αριθμού των ψεκασμών μόνο όταν ο κίνδυνος και η ευπάθεια είναι σε υψηλά επίπεδα. Στο πλαίσιο αυτό, εξετάζεται η πρόγνωση της παρουσίας παραγόντων (παθογενών) των εχθρών (παρασίτων) και ασθενειών, ως συνάρτηση περιβαλλοντικών μεταβλητών. Παρουσία μπορεί να προκύψει από την ανάπτυξη του παθογόνου τοπικά ή από τη μεταφορά του με φορείς που σχετίζονται ή όχι με τις καιρικές συνθήκες. Η παρουσία μετρά την έκθεση των ευπαθών οργανισμών στον κίνδυνο προσβολής από εχθρούς και ασθένειες. Η ενδεχόμενη οικονομική απώλεια εξαρτάται από την ευπάθεια του συστήματος που εκτίθεται στο παθογόνο. Η εκτίμηση της ευπάθειας είναι ένα θέμα που πρέπει επίσης να καλύπτεται από την πρόγνωση δυνητικών επιπτώσεων. Μερικές καταστάσεις μπορεί να περιλαμβάνουν διάφορα παθογόνα και μια αλυσίδα ενδιάμεσων ξενιστών, γεγονός που καθιστά ιδιαίτερα δύσκολη την πρόγνωση (Malone et al., 1998), επειδή εμπλέκονται πολλά είδη των οργανισμών και απαιτούνται διαφορετικά μοντέλα. Αυτό επηρεάζει τις απαιτήσεις δεδομένων, σε σχέση με απλούστερες καταστάσεις.

8.4.1.1. Φυτικά παράσιτα και βιοτικές ασθένειες

Σύμφωνα με την ανάπτυξη του πληθυσμού, παράσιτα και ασθένειες μπορεί να ταξινομηθούν σε μονοκυκλικά ή πολυκυκλικά, αντίστοιχα, εφόσον ολοκληρώσουν ένα μόνο κύκλο ή πολλαπλούς κύκλους κατά την καλλιεργητική περίοδο. Η αναμενόμενη ζημιά για μονοκυκλικά παράσιτα και ασθένειες εξαρτάται κυρίως από το αρχικό επίπεδο της επίθεσης. Από την άλλη πλευρά, το επίπεδο ζημιάς για τα πολυκυκλικά παράσιτα και ασθένειες δεν εξαρτάται μόνο από το αρχικό επίπεδο της μόλυνσης, αλλά επίσης από την ικανότητα του αιτιώδους παράγοντα για ανάπτυξη μέσω επαναληπτικών κύκλων ζωής, σε ένα επίπεδο που επηρεάζει την παραγωγή των καλλιεργειών (Rijsdijk, 1986). Άλλο κριτήριο ταξινόμησης εχθρών και ασθενειών είναι ο τρόπος αλληλεπίδρασης με τον ξενιστή.

Η γνώση των μετεωρολογικών μεταβλητών είναι ζωτικής σημασίας για τον καθορισμό του περιβάλλοντος των εχθρών και των ασθενειών. Το γεγονός αυτό ήταν ποιοτικά αρκετά γνωστό εδώ και πολύ καιρό, αλλά ποσοτικές ενδείξεις υπάρχουν μετά την εφαρμογή μαθηματικών μοντέλων προσομοίωσης στο συγκρότημα ξενιστής-παθογόνο-περιβάλλον, για εχθρούς και ασθένειες των φυτών (Magarey et al., 2005). Η έναρξη και η λήξη μιας επίθεσης παρασίτων-ασθένειας καθορίζονται από την αφθονία του εμβολίου ασθένειας ή του πληθυσμού του παρασίτου, την κατάσταση του ξενιστή και τις περιβαλλοντικές σχέσεις που επηρεάζουν το σύμπλεγμα παράσιτα-ασθένειες φυτών. Η έννοια των περιβαλλοντικών σχέσεων είναι πολύ ευρεία και περιλαμβάνει μικρομετεωρολογικές μεταβλητές, φυσικές ιδιότητες του εδάφους, μικροβιολογικές συνθήκες του εδάφους και αγροοικοσυστημικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των διαφόρων οργανισμών, συμπεριλαμβανομένων των αλληλεπιδράσεων μεταξύ παρασίτων και αρπακτικών ή αλληλεπιδράσεις μεταξύ ασθενειών και παρασίτων. Ένα παράδειγμα περιβαλλοντικών σχέσεων μπορεί να είναι η ενίσχυση της επίδρασης των ασθενειών-παρασίτων που παράγονται από προηγούμενες επιθέσεις άλλης ασθένειας ή παρασίτων. Επιπλέον, ορισμένα έντομα, όπως αφίδες, δρουν ως φορείς για ιούς. Επίσης, είναι γνωστό ότι τα φυτά, που υποβάλλονται σε έλλειψη νερού, έλλειψη θρεπτικών συστατικών ή άλλες συνθήκες καταπόνησης, είναι πιο επιρρεπή σε παράσιτα (έντομα, ακάρεα ή νηματώδη) ή ασθένειες (μύκητες, βακτήρια ή ιούς).

8.4.1.2. Μαθηματικά μοντέλα για παράσιτα-ασθένειες

Η προσέγγιση για επιδημίες ασθενειών και έλεγχο των φυτών με μαθηματικά μοντέλα έχει σχετικά μακρά ιστορία (Kranz, 1974) και προς το παρόν αποτελεί αναπόσπαστο μέρος της τρέχουσας έρευνας στην επιδημιολογία των ασθενειών των φυτών. Στο πλαίσιο αυτό, είναι δυνατόν να εντοπιστούν δύο κύριες κλίμακες μοντέλων, δηλαδή τα μοντέλα πεδίου στη μικροκλίμακα (στρώμα κώμης) και τα χωρικά μοντέλα στη μέση κλίμακα. Ενώ η εμπειρική προσέγγιση είναι συνήθως χαρακτηριστικό των χωρικών μοντέλων, τα μοντέλα πεδίου βασίζονται συχνά σε ημιεμπειρικές ή μηχανιστικές προσεγγίσεις. Τα μοντέλα εχθρών-ασθενειών μπορεί να αποτελούν συνιστώσες των μοντέλων γεωργικής παραγωγής, καθόσον μια ποσοτική αξιολόγηση των απωλειών της παραγωγής λόγω παρασίτων και ασθενειών είναι αναγκαία, προκειμένου να εκτιμηθεί η τελική παραγωγή των καλλιεργειών. Τελικοί αποδέκτες και χρήστες των μοντέλων παρασίτων-ασθενειών είναι οι γεωργοί, οι υπεύθυνες υπηρεσίες για την παροχή συμβουλών σχετικά με τον έλεγχο παρασίτων και ασθενειών, οι αγροτικές αρχές αρμόδιες για την αγροτική πολιτική, η αγορά τροφίμων και η επισιτιστική ασφάλεια, καθώς και οι αρμόδιες περιβαλλοντικές αρχές για την προστασία του περιβάλλοντος. Για κάθε τύπο τελικού χρήστη, μπορεί να ορίζεται ένα μοντέλο αναφοράς. Στο πλαίσιο αυτό, η αγρομετεωρολογία παίζει συγκεκριμένους ρόλους, όπως είναι η υποστήριξη για την υλοποίηση, βαθμονόμηση και πιστοποίηση των μοντέλων, η παραγωγή μετεωρολογικών δεδομένων για τα μοντέλα, η παραγωγή βιολογικών παρατηρήσεων, η υποστήριξη της ενοποίησης δεδομένων από διαφορετικές πηγές, όπως φυσικά και τα βιολογικά δεδομένα, τα δεδομένα τηλεπισκόπησης και τα μοντέλα αριθμητικής πρόγνωσης καιρού (NWP).

Για τους τελικούς χρήστες των μοντέλων παρασίτων-ασθενειών, τίθενται ερωτήματα σχετικά με το πότε και το πώς θα αναπτυχθεί μια επιδημία και με ποια δριμύτητα. Απαντήσεις σε αυτά τα ερωτήματα μπορεί να ληφθούν μέσω ειδικών μοντέλων προσομοίωσης, που παράγουν προγνώσεις για την έναρξη και την ανάπτυξη των εχθρών-ασθενειών. Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι ο όρος «πρόγνωση» αφορά την περιγραφή της ανάπτυξης σε πραγματικό χρόνο μιας μόλυνσης με βάση μετεωρολογικές μεταβλητές (Magarey et al., 2005). Επισημαίνεται ότι η υιοθέτηση προγνωστικών μετεωρολογικών δεδομένων για τα μοντέλα προσομοίωσης εχθρών-ασθενειών περιορίζεται ουσιαστικά τόσο από την ανεπαρκή ποιότητα των αιτιοκρατικών ή ντετερμινιστικών προγνώσεων, όσο και από το υφιστάμενο χάσμα μεταξύ της μικρομετεωρολογικής κλίμακας ανάπτυξης των εχθρών-ασθενειών και τις κλίμακες αναφοράς των μοντέλων NWP.

Το πρόβλημα της ποιότητας των ντετερμινιστικών προγνώσεων μπορεί να προσεγγιστεί με μεθόδους πιθανοτήτων. Αυτές είναι χρήσιμες στον καθορισμό σεναρίων ανάπτυξης των παρασίτων και των ασθενειών σε σχέση με ένα επίπεδο πιθανοτήτων. Το υφιστάμενο χάσμα μεταξύ της κλίμακας ανάπτυξης των εχθρών και ασθενειών και της κλίμακας NWP μπορεί να ξεπεραστεί με τη βελτίωση των επιτόπιων μετρήσεων, δηλαδή με την αύξηση της πυκνότητας σταθμών, καθώς και με τη χρήση δύο κύριων τεχνικών υποκλιμάκωσης. Ειδικότερα, υπάρχουν οι τεχνικές φυσικής υποκλιμάκωσης, που βασίζονται σε μικρομετεωρολογικά μοντέλα, και οι τεχνικές στατιστικής υποκλιμάκωσης, που βασίζονται στην ανάλυση της σχέσης μεταξύ των δεδομένων NWP και των δεδομένων μικροκλίμακας, τεχνικές οι οποίος είναι γνωστές στη μετεωρολογία ως στατιστικές εξαγόμενων μοντέλου (Model Output Statistics/MOS). Μικρομετεωρολογικά μοντέλα μπορεί να αντιπροσωπεύουν μηχανιστικά τη χωροχρονική συμπεριφορά των μετεωρολογικών μεταβλητών στο στρώμα κόμης, με βάση τα δεδομένα που παράγονται από τα μοντέλα NWP ή μετεωρολογικούς σταθμούς έξω από την κόμη. Οι τεχνικές MOS βασίζονται σε αλγόριθμους, που μπορούν να προσαρμοστούν σε συγκεκριμένους τύπους καιρού, χαρακτηριστικά κόμης και τοπογραφία. Το θέμα της υποκλιμάκωσης καλύπτεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 10.

8.4.1.3. Μεταφορά εχθρών και ασθενειών σε μεγάλες αποστάσεις

Οι μετεωρολογικές προγνώσεις και, ειδικότερα, η μελέτη των τροχιών των αέριων μαζών μπορεί να είναι χρήσιμες για την αξιολόγηση του κινδύνου της μεταφοράς των εχθρών και των ασθενειών σε μεγάλες αποστάσεις. Μια αξιοσημείωτη περίπτωση μετανάστευσης είναι το νυχτόβιο λεπιδόπτερο Agrotis ipsilon, που ταξιδεύει από τις τροπικές περιοχές προς τα μέσα γεωγραφικά πλάτη. Μια πρόγνωση άφιξης ενήλικα Agrotis στη βόρεια Ιταλία μπορεί να βασίζεται στην παρουσία δενδρυλλίων καλλιεργειών (π.χ. καλαμπόκι ή σόγια) σε υγρή επιφάνεια εδάφους και σε ένα πρότυπο κυκλοφορίας με οριζόντια μεταφορά αερίων μαζών από τη Βόρεια Αφρική. Κανονικά, ένας αυλώνας στη δυτική Μεσόγειο, με άξονα Βορρά-Νότου, αντιπροσωπεύει αυτές τις συνθήκες. Μετά την άφιξή τους, οι ενήλικες καταθέτουν τα αυγά και μια νέα γενιά κάμπιες θα βλάψει τελικά τα σπορόφυτα.

8.4.2. Αγρομετεωρολογικά μοντέλα εχθρών-ασθενειών

Στην ενότητα αυτά παρουσιάζονται επιγραμματικά δύο αγρομετεωρολογικά μοντέλα ασθενειών στο αμπέλι, το PLASMO και το PERO.

8.4.2.1. Αγρομετεωρολογικό μοντέλο PLASMO

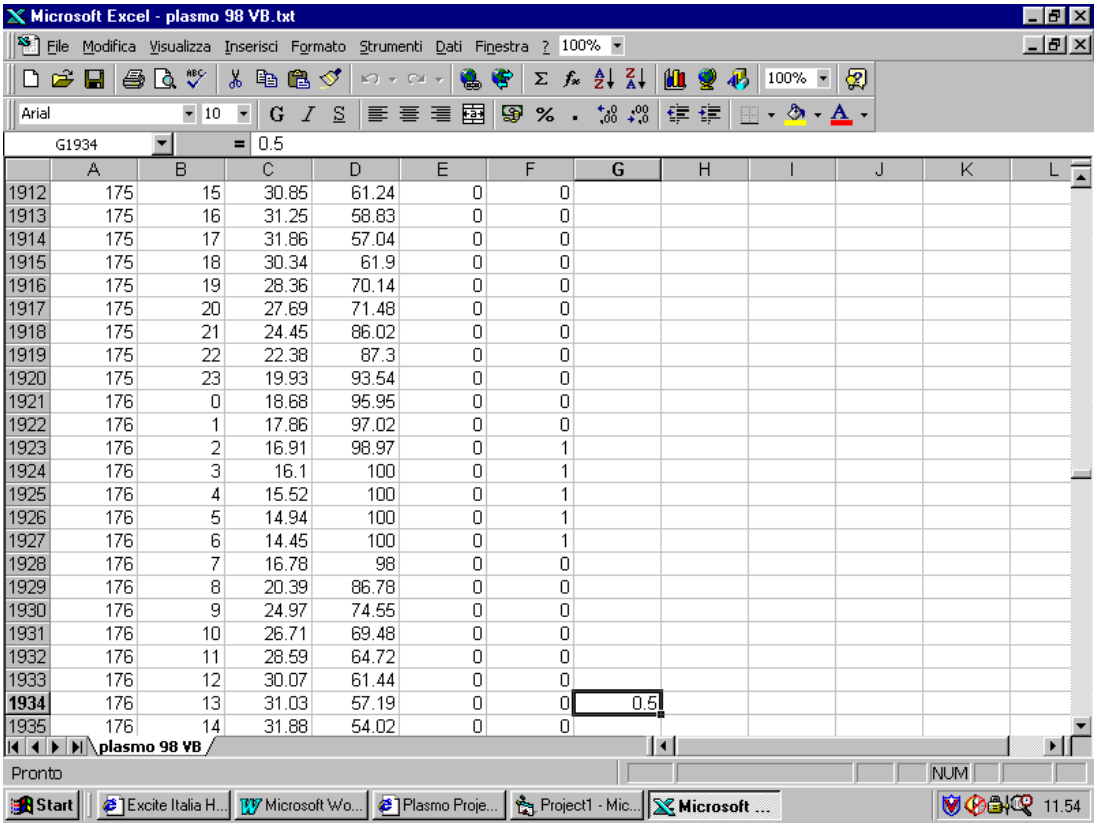
Το Plasmopora Simulation Model (PLASMO) προσομοιώνει το βιολογικό κύκλο του μύκητα (downy mildew) στο αμπέλι, με βάση αγρομετεωρολογικές παραμέτρους, επιτρέποντας το βέλτιστο χρόνο μυκητοκτόνου θεραπείας. Η αξιοπιστία του μοντέλου έχει αξιολογηθεί διαχρονικά μέσω έρευνας, στην οποία συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα συμβατικών και παραδοσιακών μεθόδων διαχείρισης καλλιεργειών με τα αποτελέσματα από την προσομοίωση του μοντέλου. Το PLASMO είναι αποτέλεσμα της συνεργασίας διαφόρων ινστιτούτων της Φλωρεντίας στην Ιταλία, όπως IATA, CNR, DISAT και CeSIA (Prof. S. Orlandini, προσωπικές επαφές).

Το μοντέλο προσομοιώνει τον κύκλο ανάπτυξης της μόλυνσης και την πληγείσα περιοχή του φύλλου. Το στάδιο αυτό αποτελεί σημαντικό βήμα, καθόσον συνδέεται με το οικονομικό όριο της μυκητοκτόνου εφαρμογής. Τα αγρομετεωρολογικά δεδομένα που απαιτούνται για την προσομοίωση είναι ωριαίες τιμές θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας, βροχόπτωσης και ύγρανσης φύλλου, συνήθως διαθέσιμα σε κάθε τυπικό αγρομετεωρολογικό σταθμό. Με τον τρόπο αυτό, η αποκτούμενη πληροφορία σχετίζεται με την πραγματική παθογενή ανάπτυξη και επιτρέπει τον προσδιορισμό των πλέον κατάλληλων τεχνικών προστασίας. Η αρχική κατάσταση του συστήματος προσδιορίζεται από την ημερομηνία σπασίματος των βλαστών. Αυτό μπορεί εύκολα να παρατηρηθεί στο πεδίο, όταν περισσότεροι από 50% των βλαστών έχουν σπάσει, διαθέτοντας λίγα φύλλα. Ως ημερομηνία ολοκλήρωσης του σπασίματος των βλαστών μπορεί να εισαχθεί η επιφάνεια φύλλου και η ένταση της ασθένειας που παρατηρείται στο πεδίο οποιαδήποτε στιγμή στη διάρκεια της βλαστικής περιόδου. Το μοντέλο προσομοιώνει τις πιο σημαντικές φάσεις του βιολογικού κύκλου του παθογενούς και υπολογίζει το χρόνο και την ένταση κάθε μόλυνσης. Τα αποτελέσματα εκφράζονται σε ποσοστιαία μορφή, δείχνοντας την επιφάνεια του φύλλου που καλύπτεται από την ασθένεια και καλείται «ελαιοκηλίδα» (oil spot). Παρατίθενται, ενδεικτικά, ένα παράδειγμα αρχείου εισόδου (Σχήμα 8.1) και ένα παράδειγμα αρχείου εξόδου, δηλαδή αποτελεσμάτων (Σχήμα 8.2) (Orlandini, 2005).

Έγινε προσπάθεια εφαρμογής του μοντέλου PLASMO, χρησιμοποιώντας δεδομένα από τον ελληνικό χώρο. Χρησιμοποιήθηκαν τιμές θερμοκρασίας αέρα, σχετικής υγρασίας και βροχόπτωσης από το σταθμό του Παλαμά το 1998. Οι τιμές της ύγρανσης των φύλλων συμπληρώθηκαν με κλιματικά δεδομένα αναφοράς, αφού δεν υπήρχαν σχετικά δεδομένα, θεωρώντας πως υπήρχε υγρότητα φύλλου (= 1) τις ημέρες κατά τις οποίες είχε βροχόπτωση και κατά τις ημέρες και ώρες στις οποίες η σχετική υγρασία ήταν πάνω από 90%. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 8.2. Δεν υπάρχει συμφωνία μεταξύ προσομοιωμένων και παρατηρούμενων τιμών. Το γεγονός αυτό, ενδεχομένως, να οφείλεται στο ότι οι συνθήκες που επικρατούσαν την άνοιξη και το καλοκαίρι του 1998 στην περιοχή του Παλαμά, δηλαδή το πολύ μικρό ποσοστό βροχοπτώσεων, απαραίτητων για την εξέλιξη της προσβολής των πρέμνων από τον *Plasmopara viticola*, δεν ευνοούσαν καθόλου την ανάπτυξη της ασθένειας. Οι τιμές που εμφανίζονται στη δεύτερη και τρίτη στήλη δηλώνουν το ποσοστό της επιφάνειας του φύλλου που έχει προσβληθεί από το παθογόνο, προς τη συνολική φυλλική επιφάνεια, δηλαδή μέσοι όροι σε δείγμα τουλάχιστον 100 φύλλων της μελετούμενης έκτασης του αμπελώνα.

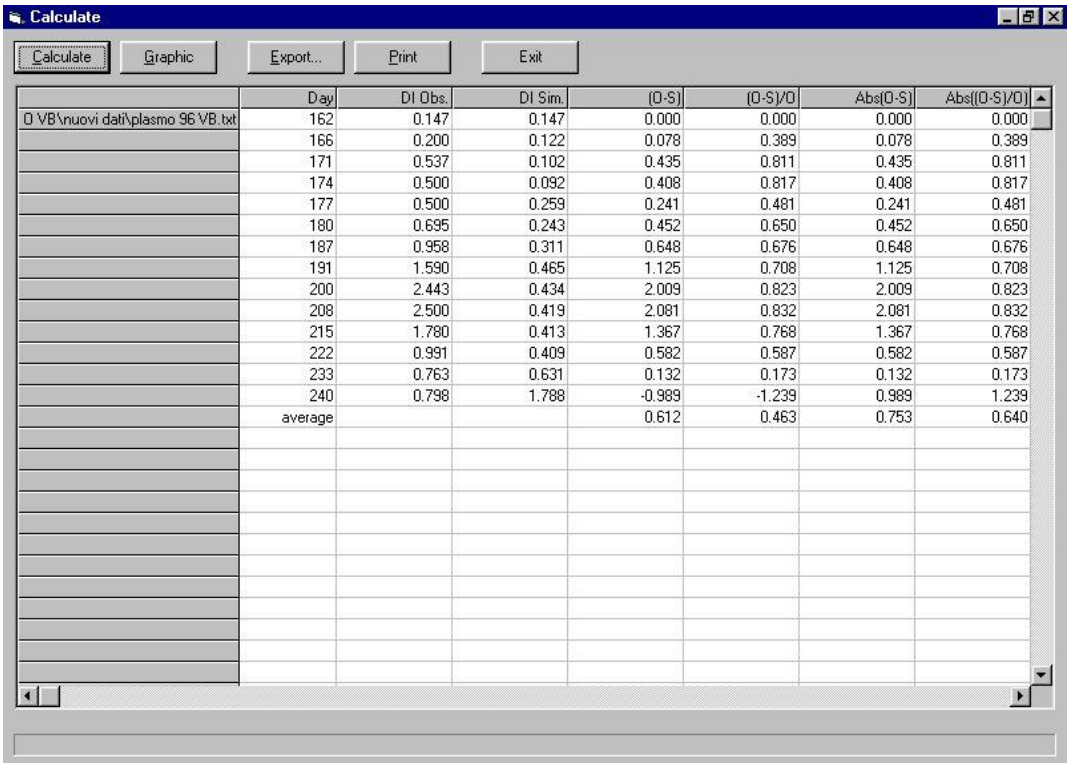
8.4.2.2. Αγρομετεωρολογικό μοντέλο PERO.

Το μοντέλο PERO υπολογίζει την έναρξη της μόλυνσης του περονόσπορου (Peronospora) και την παραπέρα ανάπτυξη σε αμπέλια, με βάση τον υπολογισμό της ύγρανσης των φύλλων σε ωριαία βάση. Το μοντέλο έχει αναπτυχθεί από τη Γερμανική Μετεωρολογική Υπηρεσία (Dalezios et al., 2005) και αξιολογείται κάθε χρόνο με στοιχεία πεδίου. Το μοντέλο PERO χρησιμοποιεί ως δεδομένα εισόδου ωριαίες αγρομετεωρολογικές παρατηρήσεις θερμοκρασίας, βροχόπτωσης, σχετικής υγρασίας, ταχύτητας ανέμου, ολικής ακτινοβολίας και μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολίας ή νεφοκάλυψης. Ειδικότερα, αν δεν διατίθεται η μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία, τότε το πρόγραμμα υπολογίζει την ακτινοβολία από ωριαία στοιχεία νεφοκάλυψης. Το αρχείο εξόδου περιλαμβάνει τον αριθμό των «κηλίδων λαδιού» (oil spots) ανά εκτάριο. Το πρόγραμμα λειτουργεί κατά τέτοιον τρόπο ώστε η μικρότερη καταγραφόμενη μόλυνση να δημιουργεί 50 κηλίδες ανά εκτάριο. Το πρώτο κατώφλι προειδοποίησης βρίσκεται στις 1.000 παρατηρήσεις κηλίδων και το κατώφλι ψεκασμού βρίσκεται στις 50.000 παρατηρήσεις κηλίδων. Θεωρείται ότι περίπου 1% μολυσμένα φύλλα αντιστοιχούν σε 3.500 φυτά ανά εκτάριο. Παρακάτω, παρατίθεται ενδεικτικά αρχείο εισόδου.



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1912	175	15	30.85	61.24	0	0						
1913	175	16	31.25	58.83	0	0						
1914	175	17	31.86	57.04	0	0						
1915	175	18	30.34	61.9	0	0						
1916	175	19	28.36	70.14	0	0						
1917	175	20	27.69	71.48	0	0						
1918	175	21	24.45	86.02	0	0						
1919	175	22	22.38	87.3	0	0						
1920	175	23	19.93	93.54	0	0						
1921	176	0	18.68	95.95	0	0						
1922	176	1	17.86	97.02	0	0						
1923	176	2	16.91	98.97	0	1						
1924	176	3	16.1	100	0	1						
1925	176	4	15.52	100	0	1						
1926	176	5	14.94	100	0	1						
1927	176	6	14.45	100	0	1						
1928	176	7	16.78	98	0	0						
1929	176	8	20.39	86.78	0	0						
1930	176	9	24.97	74.55	0	0						
1931	176	10	26.71	69.48	0	0						
1932	176	11	28.59	64.72	0	0						
1933	176	12	30.07	61.44	0	0						
1934	176	13	31.03	57.19	0	0	0.5					
1935	176	14	31.88	54.02	0	0						

Σχήμα 8.1. *Παράδειγμα αρχείου εισαγωγής δεδομένων μοντέλου PLASMO.*



	Day	DI Obs.	DI Sim.	(O-S)	(O-S)/O	Abs(O-S)	Abs((O-S)/O)
0 VB\nuovi dati\plasmo 96 VB.txt	162	0.147	0.147	0.000	0.000	0.000	0.000
	166	0.200	0.122	0.078	0.389	0.078	0.389
	171	0.537	0.102	0.435	0.811	0.435	0.811
	174	0.500	0.092	0.408	0.817	0.408	0.817
	177	0.500	0.259	0.241	0.481	0.241	0.481
	180	0.695	0.243	0.452	0.650	0.452	0.650
	187	0.958	0.311	0.648	0.676	0.648	0.676
	191	1.590	0.465	1.125	0.708	1.125	0.708
	200	2.443	0.434	2.009	0.823	2.009	0.823
	208	2.500	0.419	2.081	0.832	2.081	0.832
	215	1.780	0.413	1.367	0.768	1.367	0.768
	222	0.991	0.409	0.582	0.587	0.582	0.587
	233	0.763	0.631	0.132	0.173	0.132	0.173
	240	0.798	1.788	-0.989	-1.239	0.989	1.239
	average			0.612	0.463	0.753	0.640

Σχήμα 8.2. *Παράδειγμα αρχείου αποτελεσμάτων μοντέλου PLASMO.*

Ημέρα	Παρατηρούμενη ένταση ασθένειας	Προσομοιωμένη ένταση ασθένειας	Παρατηρούμενη – Προσομοιωμένη	Παρατηρούμενη – Προσομοιωμένη/Παρατηρούμενη	Απόλυτο σφάλμα παρατηρούμενης-προσομοιωμένης	Απόλυτο σφάλμα παρατηρούμενης-προσομοιωμένης/παρατηρούμενης
95	0,3	0,3	0	0	0	0
99	0,25	0,242	0,008	0,034	0,008	0,034
104	0,4	0,188	0,212	0,529	0,212	0,529
110	0,3	0,145	0,155	0,517	0,155	0,517
115	0,5	0,102	0,398	0,796	0,396	0,796
125	0,4	0,055	0,345	0,862	0,345	0,864
135	0,6	0,057	0,543	0,905	0,543	0,905
146	0,6	0,04	0,56	0,934	0,56	0,934
153	0,23	0,043	0,187	0,813	0,187	0,813
172	0,23	0,032	0,198	0,861	0,198	0,816
179	0,012	0,049	-0,037	-3,106	0,037	3,106
192	0,14	0,057	0,083	0,595	0,083	0,595
234	0,15	0,051	0,099	0,658	0,09	0,658
			0,212	0,338	0,217	0,816
Μ.Ο.						

Πίνακας 8.2. *Τιμές της ύγρανσης των φύλλων με κλιματικά δεδομένα αναφοράς.*

Το μοντέλο PERO προσομοιώνει την ανάπτυξη του κύκλου μόλυνσης σύμφωνα με τις αγρομετεωρολογικές συνθήκες, επιτρέποντας τον εντοπισμό της καλύτερης χρονικής στιγμής για θεραπεία με μυκητοκτόνα. Το μοντέλο προσομοιώνει την αρχή και το τέλος της ασθένειας, τη διάρκεια της ανάπτυξής της και την έντασή της. Με αυτόν τον τρόπο, κάθε μολυσματικός κύκλος μπορεί να προσομοιωθεί και να προσδιοριστούν τα χρονικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά του. Αυτό επιτρέπει τη δημιουργία ενός χρονοδιαγράμματος για ψεκασμούς με μυκητοκτόνα κατά της ασθένειας Plasmopara viticola. Εάν οι ψεκασμοί εφαρμοστούν λίγο πριν από τη λήξη του χρόνου επώασης του μύκητα, τότε οι αγρότες θα ελαχιστοποιήσουν της απώλειες της παραγωγής τους. Το μοντέλο αυτό εφαρμόστηκε για δύο περιοχές στην κεντρική Ελλάδα, οι οποίες επελέγησαν μια και το αμπέλι καλλιεργείται εντατικά και στις δύο περιοχές. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης περιλαμβάνουν τον αριθμού των ελαιοκηλίδων για όλες τις κατηγορίες (νέες, λανθάνουσες, ορατές, ολικές), μεταξύ 29/4/2001 και 31/8/2001, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.3.

8.5. Εφαρμογές

8.5.1 Εχθροί καλαμποκιού

Το καλαμπόκι καλλιεργείται σε όλες τις ηπείρους, σε διαφορετικά υψόμετρα, σε περιοχές με διαφορετικά βροχομετρικά ύψη και σε περιοχές με διαφορετική διάρκεια θέρους. Συνεπώς, η δράση των επιβλαβών εντόμων-εχθρών ποικίλλει από περιοχή σε περιοχή, λόγω των τεράστιων διαφορών στις συνθήκες ανάπτυξης της καλλιέργειας. Δεν υπάρχουν συγκεκριμένα δεδομένα για απώλειες που έχουν προκληθεί από τα επιβλαβή έντομα-εχθρούς στο καλαμπόκι σε παγκόσμιο επίπεδο. Ωστόσο, εκτός από τα έντομα τα οποία απειλούν το καλαμπόκι στο χωράφι, υπάρχει και ένας μεγάλος αριθμός εντόμων που μπορούν να απειλήσουν και το σπόρο κατά τη μεταφορά και την αποθήκευση. Αυτά μπορεί να κυριαρχούν σε περιοχές όπως οι αναπτυσσόμενες χώρες, όπου οι αποθηκευτικοί χώροι δεν είναι οι ενδεδειγμένοι. Σε αυτές τις περιπτώσεις, οι απώλειες μετά τη συγκομιδή μπορεί να είναι υψηλότερες από αυτές που καταγράφονται στο χωράφι. Ακόμα, είναι απαραίτητο να συνεκτιμηθούν, σε ορισμένες περιπτώσεις και άλλοι παράγοντες, που μπορεί δράσουν αθροιστικά στην καταστροφική επίδραση των εντόμων-εχθρών. Αυτοί αφορούν την πιθανότητα κατοίκησης σε εναλλακτικούς ξενιστές, την ταυτόχρονη εμφάνιση ειδών και την πιθανότητα ασθενειών που μεταφέρονται, όπως οι αφίδες, οι οποίες μεταφέρουν ιούς.

DROPBEN input files:
DROPBEN.STA (starting data)

parameters:	*1st line:*	*ISTEU(I2)*	=0 (dummy)
	2nd line	*KINP(A40)*	(path to input directory)
	3rd line	*KINP(A40)*	(output path same as input path)
	4th line	*IYEAR(I4)*	
	5th line	*STATIONB, ISTART, IEND, STATIONW, RADMODE*	
	6th line	*STATIONB, ISTART, IEND, STATIONW, RADMODE*	
	7th line	further stations	

format: *(5th line)* format free (STATIONB, STATIONW and RADMODE as character variables, e.g. ´628´ or ´abc´)

meaning of parameters:

5th line: STATIONB = number/name of selected basic station (max. A3)
ISTART = day of beginning calculations
IEND = day of ending calculations
STATIONW = number/name of wetness station
RADMODE = mode of radiation data use: ´LG´ = use of hourly longwave radiation ´NG ´= use of hourly cloudiness

further input files for DROPBEN:

RF_year.stationb (hourly rel. humidity (%))
RG_year.stationb (hourly global radiation (W/m²))
RR_year.stationb (hourly precipitation (mm))
TL_year.stationb (hourly temperatures (°C))
VV_year.stationb (hourly wind speed in 10m (m/s))

optional: **LG_year.stationb** (hourly longwave radiation (W/m²)) **but one of them is essential**
NG_year.stationb (hourly cloudiness (octas))
dropben.par droplet physical data (same directory as dropben.exe)

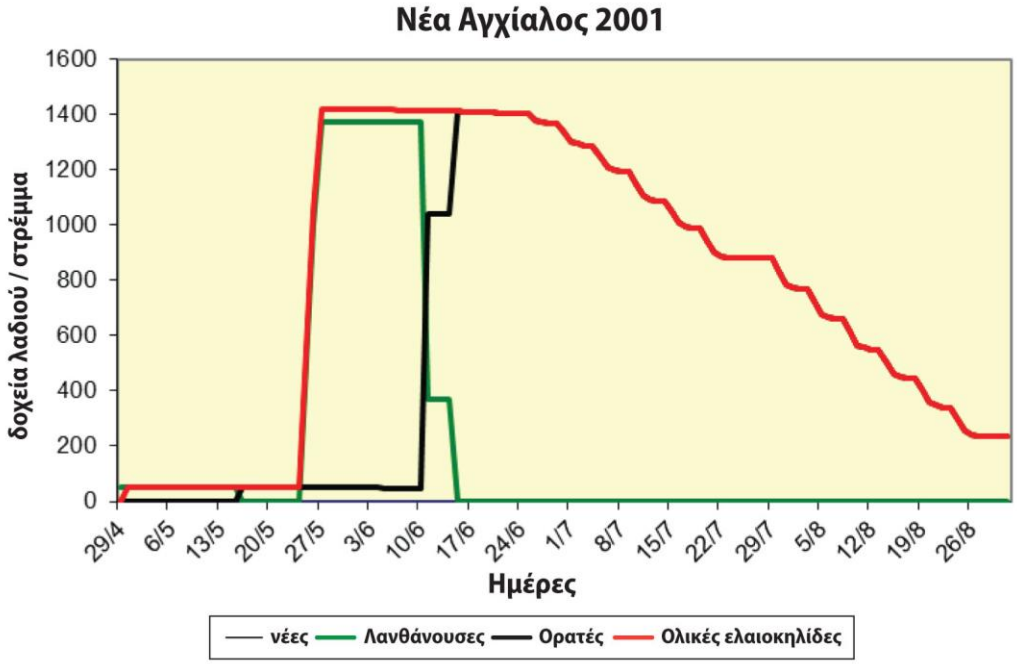
DROPBEN output file:

BE_year.stationw (hourly vine leaf wetness)

parameters: JD, WET(0), ..., WET(23) time h=0 to 23 UTC
format: I4, 24(I5)

Αρχείο εισαγωγής δεδομένων και αποτελεσμάτων μοντέλου PERO.

Μεγάλος αριθμός εντόμων είναι δυνατόν να επηρεάσουν το καλαμπόκι, αλλά μόνο ορισμένα είδη καθιερώνονται ως εχθροί και πρέπει να ελέγχονται. Τα περισσότερα προκαλούν ανεπαίσθητες ζημιές ή δεν προκαλούν καμία ζημιά και εμφανίζονται σποραδικά. Τα είδη που εμφανίζονται συχνά και προκαλούν ζημιές όταν δεν λαμβάνονται μέτρα ονομάζονται **βασικοί εχθροί**. Η στρατηγική της εφαρμογής προστασίας κατευθύνεται συνήθως προς αυτά τα είδα. Οι **δευτερεύοντες εχθροί**, που ονομάζονται και περιστασιακοί, αγγίζουν μόνο κατά περίπτωση ο όριο της οικονομικής καταστροφής. Οπότε, ακόμα και σε αυτή την περίπτωση απαιτείται επέμβαση για την καταπολέμηση μόνο όταν οι συνθήκες ευνοούν την περαιτέρω αύξηση του πληθυσμού τους.



Σχήμα 8.3. *Αποτελέσματα μοντέλου PERO: νέες, λανθάνουσες, ορατές, ολικές ελαιοκηλίδες.*

Ο βασικός εχθρός που έχει επιλεγεί για αυτήν τη μελέτη είναι η προνύμφη του Ostrinia nubilalis Hbn. Η συγκεκριμένη επιλογή έγινε γιατί αυτή η προνύμφη αποτελεί βασικό εχθρό στις περισσότερες περιοχές του κόσμου, όπου καλλιεργείται το καλαμπόκι, σε όλες τις ηπείρους, προκαλώντας μεγάλη ζημιά και απαιτώντας τις περισσότερες φορές δράσεις για τη λήψη μέτρων περιορισμού των επιπτώσεων, και γιατί τα αποτελέσματα των κλιματικών παραγόντων στο έντομο έχουν μελετηθεί με λεπτομέρεια. Η βιβλιογραφία είναι πλούσια και, εκτός των κλιματολογικών παραμέτρων, τα θέματα που αφορούν την ανάπτυξη του εντόμου καλύπτονται πλήρως. Όσα ακολουθούν προέρχονται κυρίως από τις εργασίες του Balachowsky (1966), που ενισχύθηκαν από πιο πρόσφατες εργασίες.

Οι κλιματικοί παράγοντες διαδραματίζουν βασικό ρόλο στον καθορισμό του εντόμου ως εχθρού, επηρεάζοντας, για παράδειγμα, τα επίπεδα του πληθυσμού του. Αυτοί οι παράγοντες έρχονται στο προσκήνιο όταν τα επίπεδα του πληθυσμού είναι αρκετά υψηλά και έχουν άμεση επίδραση στις βιολογικές δυνατότητες του εντόμου και τους περιοριστικούς βιοτικούς παράγοντες. Επισημαίνεται ότι οι κλιματικοί παράγοντες παίζουν καθοριστικό ρόλο στον αριθμό των ετήσιων γενεών. Ωστόσο, σημειώνεται ότι, επιπρόσθετα με το περιβάλλον, είναι βασικό να λαμβάνεται υπόψη και η επίδραση της κληρονομικότητας. Ακολουθούν οι κυριότεροι κλιματικοί παράγοντες (Chiang & Hodson, 1959· Dittrick & Chiang, 1982).

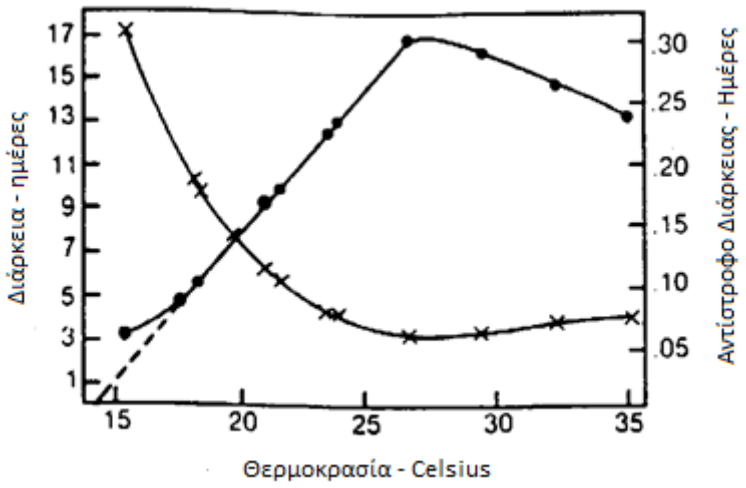
8.5.1.1. Η επίδραση της θερμοκρασίας

Η δράση της θερμοκρασίας στην ανάπτυξη του *O. nubilalis* έχει μελετηθεί εκτενώς και θεωρείται πλούσια. Όπως σε όλα τα έντομα, υπάρχουν κρίσιμες θερμοκρασίες, δηλαδή υψηλές και χαμηλές, όπως και κρίσιμα σημεία ανάπτυξης, που διαφέρουν ανάλογα με το στάδιο του εντόμου. Επίσης, ο βαθμός ανάπτυξης του εντόμου εξαρτάται από τη θερμοκρασία και αυξάνεται με την άνοδο της θερμοκρασίας. Η θερμοκρασία είναι ένας βασικός παράγοντας για την ανάπτυξη των εντόμων, δεδομένου ότι καθορίζει, αφενός, τη διάρκεια και, αφετέρου, την πυκνότητα του πληθυσμού. Ως τέτοιος παράγοντας, είναι σημαντικός και για τη θνησιμότητα ή την επιβίωση, ακόμα και για τον καθορισμό της ύπαρξης του εντόμου σε ορισμένες χώρες. Έχει, έτσι, σημαντική επίδραση, τόσο ποιοτική, όσο και φαινολογική, όπως απεικονίζεται στα Σχήματα 8.4, 8.5, 8.6 και 8.7. Προφανώς, τα αποτέλεσμα από εργαστηριακά

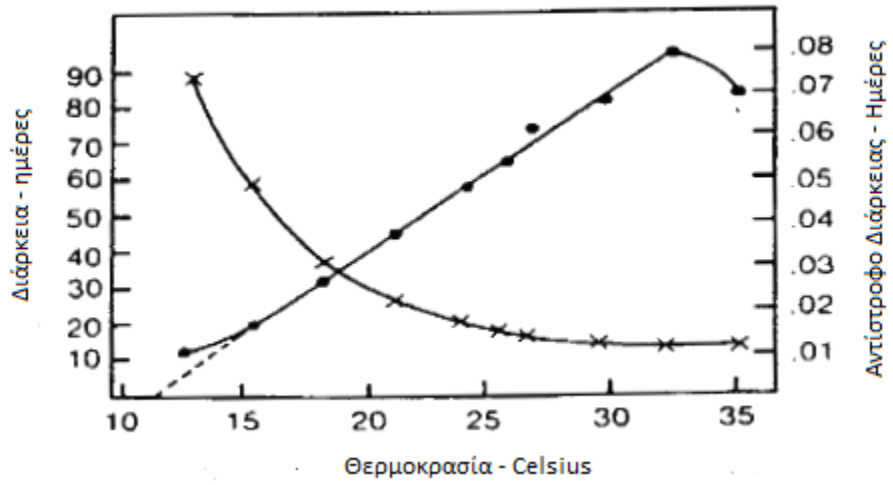
πειράματα, που έχουν πραγματοποιηθεί σε σταθερές θερμοκρασίες, διαφέρουν από τις συνθήκες στον αγρό, με ημερήσιες διακυμάνσεις. Έτσι, είναι δυνατόν να υπάρχουν σφάλματα στα δεδομένα. Έχει βρεθεί ότι το άθροισμα των θερμοκρασιών που χρησιμοποιούνται στα εργαστήρια και οι μέσοι όροι των μετρήσεων δεν διαφέρουν πολύ από τους πραγματικούς. Άρα, ο όρος του αθροίσματος των θερμοκρασιών που χρησιμοποιείται διεθνώς έχει και πρακτική αξία στην πρόβλεψη της εμφάνισης διαφόρων φάσεων του εντόμου και μπορεί να καθορίσει τη στιγμή κατά την οποία πρέπει να γίνουν δράσεις για την προστασία από αυτά τα έντομα.

8.5.1.2. Η επίδραση της σχετικής υγρασίας

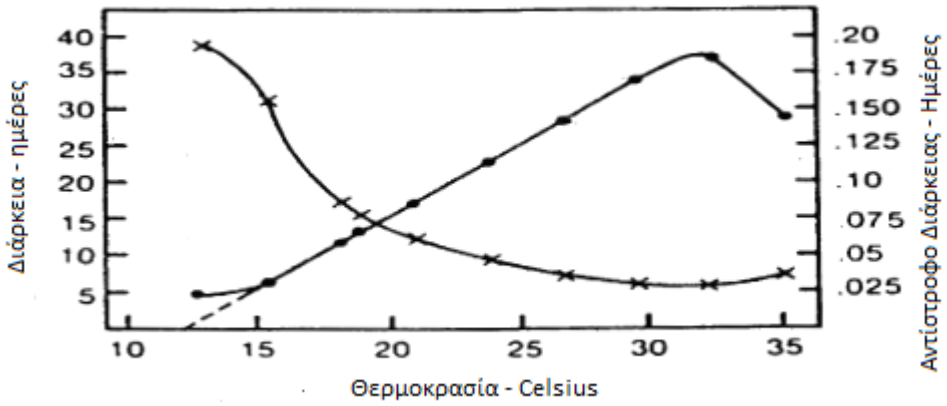
Η σχετική υγρασία επηρεάζει το *O. nubilalis* με διάφορους τρόπους. Αρχικά, επιδρά στο πέταγμα των ενηλίκων ατόμων και στην απόθεση των αυγών τους. Η σχετική υγρασία είναι ακόμα ένας παράγοντας που καθορίζει τη θνησιμότητα των αυγών, η οποία είναι, γενικά, υψηλή σε φυσικές συνθήκες (Guennelon & Audemard, 1960). Σε συνθήκες εργαστηρίου, για την επίδραση της υγρασίας σε συνδυασμό με τη θερμοκρασία στην εμβρυακή θνησιμότητα, οι μελέτες έχουν δείξει ότι τα αυγά του *O. nubililis* απαιτούν υγρό περιβάλλον. Με 100% σχετική υγρασία, τα αυγά εκκολάπτονται μεταξύ 17,5 και 30° C. Έχει, επίσης, αναφερθεί ότι η υγρασία επηρεάζει τη χειμερία νάρκη. Η υγρασία επηρεάζει επίσης την επιβίωση ή το βαθμό θνησιμότητας της πούπας του *O. nubilalis*. Έτσι, η πούπα είναι ικανή να αναπτυχθεί σε σχετική υγρασία, μεταξύ 25% και 100%, με το άριστο σημείο να είναι στους 100%, όπου ο βαθμός θνησιμότητας είναι στο ελάχιστο, δηλαδή 20%. Η πούπα που βρίσκεται σε υψηλά επίπεδα υγρασίας δίνει θηλυκά πιο γόνιμα από τον μέσο όρο.



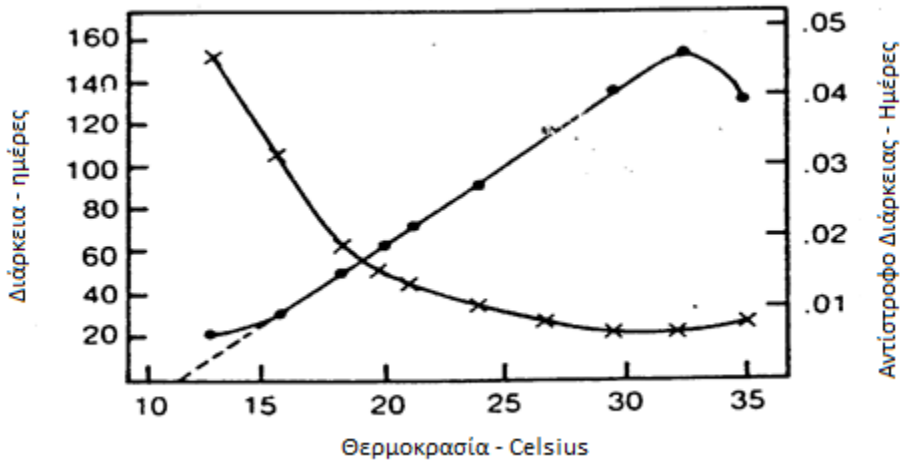
Σχήμα 8.4. *Διάρκεια σε ημέρες της επώασης αυγών του O. nubilalis, σε διαφορετικές ελεγχόμενες θερμοκρασίες.*



Σχήμα 8.5. *Διάρκεια σε ημέρες της προνυμφικής ανάπτυξης του O. nubilalis.*



Σχήμα 8.6. *Διάρκεια νύμφωσης του O. nubilalis.*



Σχήμα 8.7. *Διάρκεια σε ημέρες όλων των ανήλικων σταδίων του O. nubilalis, σε διαφορετικές ελεγχόμενες συνθήκες.*

8.5.1.3. Η επίδραση της βροχής

Η βροχή εμποδίζει το πέταγμα των ενηλίκων, αν είναι αρκετά έντονη. Έχει αναφερθεί στις ΗΠΑ ότι η βροχή που υπερβαίνει τα 3,5 mm την ώρα εμποδίζει το πέταγμα των ενηλίκων. Μελέτες στη Γαλλία έδειξαν ότι η άφθονη βροχή εμποδίζει το πέταγμα (Guennelon & Audemard, 1960). Πρόσφατα έχει αναφερθεί ότι ο ενήλικος πληθυσμός του *O*. *nubilalis* δεν μειώνεται μόνο από τις έντονες βροχοπτώσεις, αλλά μπορεί να μειωθεί όταν συνοδεύεται και από ισχυρό άνεμο.

8.5.1.4. Η επίδραση στο φυτό

Η ανάπτυξη του καλαμποκιού σε συγκεκριμένο χρόνο και συγκεκριμένη περιοχή εξαρτάται από κλιματικούς παράγοντες, στο βαθμό που τα μοντέλα πρόβλεψης της ανάπτυξης στο χωράφι έχουν σχεδιαστεί κυρίως με βάση μετεωρολογικές παραμέτρους, όπως το μοντέλο CORNF. Είναι φανερό ότι η επίδραση στον κύκλο ζωής του *O*. *nubilalis* της ανάπτυξης του φυτού είναι αποδεκτή, δεδομένου ότι το φυτό αποτελεί την τροφή και την υποστήριξη για το έντομο. Επισημαίνεται ότι μια διαδικασία διόρθωσης και προσαρμογής πρέπει να περιληφθεί στα μοντέλα συγκομιδών, υπολογίζοντας την αναμενόμενη ζημία από τα *O*. *nubilalis*. Στη συνέχεια, παρατίθενται διάφορες περιπτώσεις:

I. Η κατάσταση της ανάπτυξης του αραβόσιτου διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στον καθορισμό της τοποθέτησης αυγών εντόμων, δεδομένου ότι το ύψος των φυτών είναι ένας ουσιαστικός παράγοντας. Διάφοροι συγγραφείς αναφέρουν ότι το έντομο βάζει τα αυγά μόνο στον αραβόσιτο που έχει υπερβεί ένα ελάχιστο μέγεθος, μεταξύ 35 και 45 cm (Balachowsky, 1966· Bodenheimer,1926).

II. Ένας μη περιοριστικός ανεφοδιασμός του νερού διατηρεί την ανάπτυξη και τη ρώμη των φυτών, αυξάνοντας έτσι τη θρεπτική αξία τους για τις προνύμφες και, ως εκ τούτου, διευκολύνοντας την ανάπτυξή τους, έχοντας έμμεσα επιπτώσεις και στη γονιμότητα του *O*. *nubilalis*.

III. Η εναλλαγή των θερμών ημερών και των ψυχρών νυχτών μπορεί να προκαλέσει την εναλλαγή μεταξύ κάποιου βαθμού βλάστησης των φύλλων και της ρώμης των τελευταίων, εναλλαγή η οποία μπορεί να αποτελεί τη μηχανική αιτία των αυγών που πέφτουν και πεθαίνουν.

IV. Ο βιολογικός κύκλος του *O*. *nubilalis* μπορεί να διαταραχθεί με την εναλλαγή των κλιματολογικών παραμέτρων της ανάπτυξης του καλαμποκιού, όπως με την αλλαγή της ημερομηνίας της σποράς και του ελέγχου της εδαφολογικής υγρασίας μέσω της άρδευσης.

8.5.1.5. Η γενική δράση του κλίματος: Μοντελοποίηση

Η επίδραση των κλιματολογικών παραγόντων στα *O. nubilalis* είναι σημαντική και από ποσοτική άποψη, δηλαδή όσον αφορά τα επίπεδα πληθυσμών, και από ποιοτική ή φαινολογική άποψη, δηλαδή όσον αφορά την εξέλιξη του βιολογικού κύκλου. Η γνώση των αριθμητικών σχέσεων που συνδέουν τις κλιματολογικές με τις βιολογικές παραμέτρους επιτρέπει τη δημιουργία των μοντέλων ανάπτυξης του εχθρού. Ωστόσο, στην πλειονότητά τους, τα μοντέλα αυτά είναι φαινολογικά, αλλά σε μερικές περιπτώσεις μπορεί να είναι και ποσοτικά, καθώς μπορεί να αποδειχτούν πολύ χρήσιμα σε προβλέψεις και λήψη αποφάσεων για ενέργειες που πρέπει να ληφθούν προκειμένου να ελεγχθούν οι εχθροί.

Στην περίπτωση του *O. nubilalis,* μερικά από αυτά τα μοντέλα αναφέρονται μόνο σε μερικές πτυχές της βιολογίας του, όπως είναι η πτήση την άνοιξη ή η μετάβαση στη διάπαυση, αλλά, σε άλλες περιπτώσεις, ισχύουν για όλο τον ετήσιο βιολογικό κύκλο. Το κλασικό μοντέλο αυτού του τελευταίου τύπου χρησιμοποιεί ως βασική παράμετρο του, για να προβλέψει την εξέλιξη του εντόμου, τους ημεροβαθμούς, δηλαδή το ποσό της μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας πάνω από 10^{o} C από την αρχή του έτους. Είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί αυτό το μοντέλο για αρκετά ακριβείς προβλέψεις των χρόνων εμφάνισης των διαφορετικών σταδίων και, συνεπώς, να καθορισθεί η πιο κατάλληλη στιγμή για την πραγματοποίηση της καταπολέμησης. Παρέχει, επίσης, πληροφορίες για τον κατάλληλο χρόνο ελέγχου της συγκομιδής, προκειμένου να αξιολογηθεί το μέγεθος της προσβολής από το *O. nubilalis* και να αποφασιστεί η καταπολέμηση ή όχι, ανάλογα με τα κρίσιμα σημεία από οικονομική άποψη. Υπάρχουν αρκετές έρευνες που τροποποιούν ή προσαρμόζουν το γενικό αυτό μοντέλο. Για παράδειγμα, στην Ισπανία, η καταγραφή των ημεροβαθμών θεωρείται ότι πρέπει να αρχίσει από τις 15 Μαρτίου αντί της 1ης Ιανουαρίου. Αυτό επιτρέπει την καλύτερη πρόβλεψη της προόδου ή της καθυστέρησης των χωριστών σταδίων ανάπτυξης σε κάθε έτος και, ειδικότερα, μια πρόβλεψη στην αρχή του Αυγούστου, για τη σπουδαιότητα της δεύτερης παραγωγής πούπας.

8.5.2. Εχθροί και ασθένειες αμπέλου

Το αμπέλι είναι πολυετές φυτό, με ετήσιο βιολογικό κύκλο. Η ποιότητα των σταφυλιών εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, ορισμένοι εκ των οποίων μπορεί να επηρεαστούν από τον άνθρωπο και ορισμένοι άλλοι όχι. Τα γενικά κλιματικά χαρακτηριστικά, οι εποχικές διαφορές στις βροχοπτώσεις, τον καύσωνα, τις περιόδους ψύχους και ομίχλης διαφοροποιούνται ανά καλλιέργεια. Έχει αναφερθεί ότι οι «καλύτεροι» αμπελώνες στον κόσμο βρίσκονται κοντά σε μεγάλες μάζες νερού (θάλασσα ή ποταμούς), δίπλα σε ορεινούς όγκους και δάση, προστατευμένες από τους ανέμους. Αυτά τα ειδικά στοιχεία «μεσοκλίματος» έχουν ένα διορθωτικό ρόλο, αποτρέποντας τις ακραίες θερμοκρασίες. Είναι προφανές ότι το κλίμα και το έδαφος καθορίζουν τις περιοχές στις οποίες μπορούν να καλλιεργηθούν οι ποικιλίες της αμπέλου. Ο συνδυασμός αυτών των παραγόντων αποτελεί το οικοσύστημα της κάθε περιοχής, η οποία, προκειμένου να δίνει το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα, πρέπει να συμπληρώνεται αρμονικά από τον ανθρώπινο παράγοντα, που επεμβαίνει στη ζωή του αμπελιού με τεχνικές καλλιέργειας και φροντίδα. Οι κλιματολογικές συνθήκες επιδρούν όχι μόνο στην παραγωγή και την ανάπτυξη των αμπελώνων, αλλά και στην υγεία των φυτών. Για παράδειγμα, η θερμοκρασία και η υγρασία μπορεί να δημιουργήσουν συνθήκες κατάλληλες για την ανάπτυξη ασθενειών. Επίσης, ο άνεμος και οι βροχοπτώσεις μπορεί να βοηθήσουν στην εξάπλωση των ασθενειών. Η φυτοπροστασία αποκτά ολοένα και μεγαλύτερη σημασία στην προοπτική της μείωσης του κόστους παραγωγής και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Rosa et al., 1995). Η ολοκληρωμένη διαχείριση επιβλαβών οργανισμών αναγνωρίζεται ως μία από τις κύριες στρατηγικές, κατάλληλη για το μακροπρόθεσμο έλεγχο των γεωργικών και δασικών παρασίτων. (Paschall et al., 1992).

Στη συνέχεια περιγράφονται μερικές βασικές ασθένειες και εχθροί της αμπέλου.

1. Hadromycosis- Bertisillioseis/Verticillium dahliae, Verticillium albo-atrum: Θεωρούνται οι πιο σοβαρές μυκητολογικές ασθένειες των πυρηνοκάρπων της αμπέλου και οφείλονται σε είδη μυκήτων. Οι αδρομυκώσεις αναπτύσσονται αργά και προκαλούν βλάβη στα αγγεία των δέντρων, που οδηγούν σε μαρασμό και ξήρανση των κλαδιών. Στα πυρηνόκαρπα, τα συμπτώματα εκφράζονται μονομερώς, σε μια πλευρά των κατεστραμμένων οργάνων (ημιπληγία). Αργότερα, προχωρά επίσης στην άλλη πλευρά. Η ζημιά παρουσιάζεται με μαρασμό των κλάδων και των βραχιόνων, και χλώρωση των φύλλων, αρχικά στα κατώτερα και στη συνέχεια στα ανώτερα φύλλα. Στη συνέχεια, τα φύλλα πέφτουν και ακολουθεί αποξήρανση του κλαδιού. Χαρακτηριστικό σύμπτωμα αποτελεί ο καφέ μεταχρωματισμός που παρατηρείται στα αγγεία του ξύλου των κατεστραμμένων κλαδιών. Στο αμπέλι, η νόσος εκδηλώνεται με απότομο μαρασμό (αποπληξία) και αποξήρανση του φυλλώματος ορισμένων ή όλων των κληματίδων. Επιπλέον, σε κατά μήκος τομή παρατηρείται ο χαρακτηριστικός καφέ μεταχρωματισμός του αγγείου του ξύλου των κληματίδων ή των βλαστών της αμπέλου. Οι βερτισιλλιώσεις είναι επίσημα ασθένειες του εδάφους. Προληπτικά συνιστάται η εγκατάσταση των δέντρων μακριά από χωράφια, όπου καλλιεργούνται ετήσια φυτά ευαίσθητα στην αδρομύκωση και σε εδάφη καθαρά από το μόλυσμα (π.χ. με ηλιοαπολύμανση). Επίσης, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί υγιές πολλαπλασιαστικό υλικό και ανθεκτικές ποικιλίες. Είναι σημαντικό να αποφεύγεται η καλλιέργεια με ευπαθή ετήσια φυτά (π.χ. βαμβάκι). Η άρδευση δεν θα πρέπει να γίνεται με ανοιχτούς αγωγούς, διότι το μόλυσμα μεταφέρεται με το νερό σε υγιή δέντρα. Συνιστάται προσεκτική χρήση φυτοφαρμάκων, έτσι ώστε να αποφεύγονται τραύματα στο ριζικό σύστημα των δέντρων. Ως κατασταλτικά μέτρα συνίστανται το ξερίζωμα των κατεστραμμένων δέντρων, το κάψιμο και η απολύμανση του χώρου.

2. Bacillar necrosis/Xylophilus ampelinus: Η παρουσία της νόσου είναι πολύ διαδεδομένη στην Ελλάδα, αλλά και σε πολλές περιοχές του κόσμου. Θεωρείται παλιά νόσος και είναι γνωστή με την ονομασία «tsilik marazi». Είναι μια χρόνια adrobaktiriosi, της οποίας το βακτήριο είναι εγκατεστημένο στο αγγειακό του ξύλου και από εκεί επεκτείνεται και βλάπτει τον νεαρό βλάστηση, προκαλώντας προοδευτική αποστράγγιση. Πιο ευαίσθητες θεωρούνται οι ποικιλίες Soyltanina και Razaki. Το διαγνωστικό σύμπτωμα της νόσου είναι ο καφέ μεταχρωματισμός των αγγείων του ξύλου. Οι κορυφές στις αρχές της άνοιξης παρουσιάζουν διογκώσεις, λόγω υπερπλασίας των ιστών. Οι διογκωμένοι ιστοί συγκροτούν το φούσκωμα και αργότερα αφυδατώνονται και συρρικνώνονται, και γι' αυτό, μπορεί να δημιουργηθεί κοιλότητα κάτω από το δέρμα (σύμπτωμα «τυρί»). Οι οφθαλμοί νεκρώνονται. Ολόκληροι οι βραχίονες μπορεί να μαραθούν. Στα φύλλα μπορεί να παρουσιαστούν νεκρωτικές κηλίδες ή αποστράγγιση σε περιοχές του ελάσματος, κυρίως με υγρή και βροχερή άνοιξη. Συνίστανται η αφαίρεση και το κάψιμο των προσβεβλημένων αμπελιών. Επίσης, το κλάδεμα πρέπει να γίνεται με ξηρό καιρό και τα εργαλεία του κλαδέματος πρέπει να απολυμαίνονται συνεχώς. Όταν ο καιρός είναι βροχερός, συστήνεται προληπτικός ψεκασμός, με κατάλληλα σκευάσματα, για την προστασία των τρυφερών φύλλων.

3. Botrytis (ash decay) vine/Botryotinia fuckeliana Botrytis: Έχει παγκόσμια εξάπλωση και προκαλεί ζημιές σχεδόν σε όλα τα καλλιεργούμενα είδη. Αποτελεί πραγματική απειλή για την εμπορική παραγωγή, γιατί, εκτός από τις ποσοτικές απώλειες, υποβαθμίζει και την ποιότητα των προϊόντων. Στο αμπέλι, η ζημιά που προκαλεί έχει αρνητικές επιπτώσεις στην οινοποίηση και στην ποιότητα του κρασιού, επειδή επηρεάζει τη ζύμωση. Επιπλέον, προκαλεί απώλειες στην παραγωγή κατά τη συλλογή, τη μεταφορά και την αποθήκευση των σταφυλιών. Προσβάλλει όλα τα υπέργεια πράσινα μέρη της αμπέλου, τις ταξιανθίες (μαραίνονται) και ιδίως τα σταφύλια, πριν από ή ακόμα και μετά τη συγκομιδή. Στα σταφύλια παρουσιάζεται αρχικά σκοτεινή κηλίδα, η οποία επεκτείνεται, και τελικά προκαλείται σαπίλα. Τέλος, οι προσβεβλημένοι ιστοί γίνονται καφέ, συρρικνώνονται και γίνονται συχνά «μούμια». Για την αντιμετώπιση της ασθένειας, συνιστάται η εφαρμογή προγράμματος προληπτικών παρεμβάσεων, ανάλογα με τις κλιματικές συνθήκες. Σε περιοχές όπου υπάρχει πρόβλημα «πρώιμου» botryti, συνιστάται οι ψεκασμοί να ξεκινήσουν από την άνθηση. Ένα σύνηθες πρόγραμμα παρεμβάσεων περιλαμβάνει ψεκασμούς μετά το «δέσιμο», πριν «κλείσει το σύμπλεγμα», στο «γυάλισμα» και, για αποφυγή της ύστερης προσβολής στις επιτραπέζιες ποικιλίες, έως και πριν από τη συγκομιδή. Επιπλέον, πρέπει να ληφθούν μέτρα για την αποφυγή των τραυματισμών κατά την εφαρμογή των καλλιεργητικών φροντίδων και να εφαρμοστεί η κατάλληλη αφαίρεση των φύλλων, για τον καλύτερο αερισμό των σταφυλιών.

4. Esca or Polisporiash/Phellinus igniarius, Stereum hirsutum: Είναι ευρέως διαδεδομένη ασθένεια του ξύλου, που βλάπτει κυρίως αμπέλια ηλικίας 10 ετών και άνω. Αναπτύσσεται συνήθως αργά και προκαλεί προοδευτική αφυδάτωση των αμπελιών ή, πιο σπάνια, απότομη αφυδάτωση (αποπληξία). Τα πρώτα συμπτώματα εμφανίζονται στα φύλλα, συνήθως αργά το καλοκαίρι (Αύγουστος). Αυτά εμφανίζουν χαρακτηριστικές χλωρώσεις σε περιφερειακό επίπεδο και μεταξύ των νεύρων, που τελικά μετατρέπονται σε νεκρώσεις. Οι προσβεβλημένοι βραχίονες και οι κορυφές παρουσιάζουν φουσκώματα, λόγω υπερπλασίας των ιστών. Σε προσβεβλημένους αμπελώνες, η αντιμετώπιση αποτελείται από ψεκασμό με κατάλληλα σκευάσματα. Αυτός ο ψεκασμός θα πρέπει να γίνει πριν από το «φούσκωμα» των ματιών και όταν τα αμπέλια είναι σε πλήρη λήθαργο. Παράλληλα με τη χημική αντιμετώπιση, θα πρέπει να ληφθούν διάφορα μέτρα υγιεινής, για τον περιορισμό της μόλυνσης, όπως η εκρίζωση και το κάψιμο των προσβεβλημένων αμπελιών, η καταστροφή της καρποφορίας του μύκητα που σχηματίζεται σε γειτονικά οπωροφόρα ή δασικά δέντρα ή σε πασσάλους. Επιπλέον, το πολλαπλασιαστικό υλικό (εμβόλια, μοσχεύματα, καταβολάδες) πρέπει να προέρχονται από απόλυτα υγιείς αμπελώνες. Προληπτικά, θα πρέπει να γίνει απολύμανση των μεγάλων τομών από το κλάδεμα.

5. Νέκρωση των βραχιόνων/Eutypa lata: Είναι πολύ διαδεδομένη στην Ελλάδα και προκαλεί πολύ σοβαρές ζημιές στα πυρηνόκαρπα, ιδιαίτερα στο βερίκοκο, το αμπέλι, τα εσπεριδοειδή (κυρίως την λεμονιά) και τη φιστικιά. Στο αμπέλι, η μόλυνση ξεκινά από τις τομές του κλαδέματος, από όπου εισέρχεται ο μύκητας (παράσιτο πληγών). Οι κατεστραμμένοι ιστοί πάσχουν από νέκρωση και παρατηρείται σε τομή καφέ μεταχρωματισμός του ξύλου, που παραμένει, ωστόσο, σκληρό όπως και στα υγιή. Από τους κατεστραμμένους βραχίονες, προκύπτει αδύναμη και παραμορφωμένη βλάστηση (νάνοι βλαστοί, βραχυγονάτωση, παραμορφωμένα και χλωρωτικά φύλλα). Μεταξύ των ποικιλιών, πιο ευαίσθητες είναι τα σαββατιανό, η σουλτανίνα, η καρντινάλ, το ραζάκι, το ξινόμαυρο και το ασύρτικο. Για την αντιμετώπιση της ασθένειας, συνιστάται, προληπτικά, η καταστροφή των προσβεβλημένων τμημάτων, η αποφυγή των μεγάλων τομών στο κλάδεμα, η απολύμανση των εργαλείων πριν από τη χρήση τους και η απολύμανση των τομών κλαδέματος με τα κατάλληλα μέσα. Στις ευαίσθητες ποικιλίες, σκόπιμο είναι επίσης το κλάδεμα να γίνεται όσο το δυνατόν αργότερα.

6. Ωίδιο της αμπέλου (περονόσπορος)/Plasmopara viticola: Αποτελεί το σημαντικότερο πρόβλημα της αμπελοκαλλιέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο, διότι μπορεί να προκαλέσει ολική καταστροφή της παραγωγής. Καταστρέφει όλα τα νεαρά, πράσινα τμήματα των φυτών: βλαστούς, φύλλα, κορυφογραμμές και σταφύλια. Στα φύλλα, παρουσιάζονται χαρακτηριστικές ανοιχτόχρωμες πράσινες κηλίδες, οι λεγόμενες «κηλίδες πετρελαίου», που αργότερα υφίστανται νέκρωση, ενώ τα φύλλα είναι σχισμένα και η φυλλόπτωση έντονη. Σε συνθήκες υψηλής υγρασίας, στην κάτω επιφάνεια των φύλλων, παρατηρείται λευκό εξάνθημα. Στα ώριμα, παλιά φύλλα, η μορφή των κηλίδων είναι πολυγωνική. Στα άνθη, η μόλυνση μπορεί να γίνει άμεσα, με διάτρηση, ή έμμεσα, από το μίσχο. Με υγρό καιρό, παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές λευκές εξανθήσεις των παθογόνων. Ευνοϊκές για μολύνσεις είναι οι συνθήκες στις οποίες επικρατούν θερμοκρασίες 15-27° C, σχετική υγρασία> 85% και ακολουθεί βροχή. Κρίσιμη περίοδος για την ανάπτυξη της νόσου θεωρείται ο μήνας Μάιος, επειδή η θερμοκρασία ανεβαίνει και ο μύκητας συμπληρώνει τον βιολογικό κύκλο του πιο σύντομα, προκαλώντας πολλές νέες προσβολές. Επιπλέον, την ίδια περίοδο η βλαστική ανάπτυξη της αμπέλου είναι ταχεία, με αποτέλεσμα να φτιάχνει συνεχώς νέους ιστούς, οι

οποίοι είναι ευπαθείς στις μολύνσεις. Για την αντιμετώπιση του περονόσπορου, συνιστώνται εφαρμογές με κατάλληλα μυκητοκτόνα, σύμφωνα με το πρόγραμμα γεωργικών προειδοποιήσεων, ή, προληπτικά, στο στάδιο των 3-4 φύλλων, στο στάδιο «berry», πριν από την άνθηση, μετά το «δέσιμο», έπειτα από 15- 20 ημέρες, ανάλογα με τις μετεωρολογικές συνθήκες και την πίεση των ζημιών. Επιπλέον, συνιστάται η υιοθέτηση καλλιεργητικών τεχνικών (δεξί κλάδεμα, αποφύλλωση, ορθή αζωτούχως λίπανση), για την αποφυγή της δημιουργίας ευνοϊκών συνθηκών για τα παθογόνα.

7. Σήψη των φρούτων από penikilla/Prnicillium digitatum, Penicillium italicum, Penicillium expansum. Είναι μετασυλλεκτικές σήψεις, που προκαλούν πολύ σοβαρές ζημιές (μέχρι 100%) στα εσπεριδοειδή, το αμπέλι και τα λαχανικά. Πρόσθετη ζημιά προκαλείται επίσης από το αιθυλένιο που παράγουν τα παθογόνα του μύκητα, το οποίο, επειδή αυξάνει την αναπνοή των καρπών, μειώνει τη διάρκεια της ζωής των υγιών καρπών που βρίσκονται στην ίδια θέση με το κατεστραμμένο. Η μετασυλλεκτική σήψη λαμβάνει μεγάλες διαστάσεις όταν η συγκομιδή γίνεται με υγρό και βροχερό καιρό. Στην επιφάνεια των κατεστραμμένων φρούτων παρατηρείται αρχικά μια ελαφρώς βαθιά σχισμή, που μοιάζει βρεγμένη και επεκτείνεται πολύ γρήγορα σε ολόκληρο τον καρπό. Στη συνέχεια, αναπτύσσεται ένα χαρακτηριστικό μπλε ή πράσινο εξάνθημα, το οποίο καλύπτει σιγά σιγά ολόκληρο το φρούτο. Για την προστασία των φρούτων, συνιστώνται η αποφυγή της δημιουργίας των πληγών κατά τη συγκομιδή και η απολύμανσή τους με το κατάλληλο μέσο στο δέντρο ή πριν από τη συσκευασία. Επιπλέον, η αποθήκευση θα πρέπει να γίνει το ταχύτερο δυνατό και υπό κανονικές συνθήκες αερισμού και σχετικής υγρασίας.

8. Fomopsi or exkoriosi of vine/Phomopsis viticola: Ενεργοποιείται με τη βροχή και μολύνει τη βλάστηση στην αρχή της. Τα πρώτα αναπαραγωγικά στάδια προσβάλλονται περισσότερο και πρέπει να προστατεύονται. Οι ποικιλίες σουλτανίνα και ραζάκι είναι ευαίσθητες σε αυτό. Η ασθένεια είναι ευρέως διαδεδομένη σχεδόν σε όλες τις αμπελουργικές περιοχές στην Ελλάδα. Προσβάλλει τους βλαστούς, τις κληματίδες και τους βραχίονες, αλλά και τα φύλλα, τους μίσχους και τα σταφύλια. Οι σαπισμένες κεφαλές έχουν λευκό ή «ασημένιο» χρώμα και φέρουν μικροσκοπικές μαύρες κηλίδες. Στα φύλλα, η ζημιά παρουσιάζεται με τη μορφή μικρών κηλίδων ανοιχτού πράσινου χρώματος, που αργότερα γίνεται καφέ-μαύρο. Το παθογόνο μπορεί να προσβάλει επίσης τα σταφύλια, τα οποία συρρικνώνονται και μαραίνονται. Η πιο πιθανή περίοδος της προσβολής είναι από την έκπτυξη των οφθαλμών την άνοιξη μέχρι οι βλαστοί να αποκτήσουν μήκος 15 εκατοστών. Δροσερός και υγρός καιρός ενθαρρύνει τις μολύνσεις, που μπορεί να συνεχιστούν μέχρι την περίοδο «polish». Περιοριστικός παράγοντας για την εξάπλωση της νόσου είναι οι υψηλές θερμοκρασίες του καλοκαιριού. Αντιμετωπίζεται με προληπτικούς χειμερινούς ψεκασμούς (στο στάδιο της «δακρύρροιας»), στο «φούσκωμα» των οφθαλμών, με την εμφάνιση των πρώτων φύλλων και έπειτα από 5 ημέρες. Επιπλέον, θα πρέπει να καταστρέφονται οι προσβεβλημένοι βραχίονες και οι κληματίδες. Προκειμένου να αποφευχθεί η μετάδοση της νόσου, συνιστάται η απολύμανση των αγροτικών εργαλείων, ενώ το πολλαπλασιαστικό υλικό θα πρέπει να είναι απόλυτα υγιές. Επιπλέον, θα πρέπει να ληφθούν όλα τα απαραίτητα καλλιεργητικά μέτρα, ώστε να ενθαρρύνεται η καλή κυκλοφορία του αέρα στο αμπέλι.

9. Ωίδιο της αμπέλου/Uncinula necator. Είναι μία από τις πιο σοβαρές ασθένειες του αμπελιού, ιδιαίτερα διαδεδομένη σε όλες τις αμπελουργικές περιοχές του κόσμου. Για πρώτη φορά περιγράφηκε στη Βόρεια Αμερική, ενώ στην Ευρώπη παρουσιάστηκε το 1845. Στην Ελλάδα, είναι γνωστή με πολλές κοινές ονομασίες, όπως στάχτωμα, θειαφασθένεια, χολέρα, μπάστρα, μπασαράς, αλευράς, λόμπα, σιναπίδι. Προσβάλλει όλα τα υπέργεια μέρη του φυτού (βλαστούς, φύλλα, βότρυς, και κληματίδες). Αρχικά, παρουσιάζονται στα φύλλα θαμπές χλωρωτικές κηλίδες, οι οποίες στη συνέχεια καλύπτονται από λευκό εξάνθημα. Επιπλέον, λόγω της ανάπτυξης του παθογόνου, παρατηρείται κυματοειδής παραμόρφωση της περιοχής ανάπτυξης στα φύλλων. Παρόμοια συμπτώματα και αλλοιώσεις παρατηρούνται σε προσβεβλημένους βλαστούς και βότρυς. Επιπλέον, αν η ζημιά γίνεται πριν από την άνθηση, παρατηρείται ανθόρροια. Τα σταφύλια καλύπτονται επίσης από τις εξανθήσεις των παθογόνων στα σημεία της προσβολής. Εάν τα σταφύλια προσβληθούν όταν είναι μικρά, μαραίνονται και πέφτουν. Επιπλέον, η ζημιά προκαλεί σχάση των σταφυλιών, εξαιτίας της οποίας ακολουθεί, συνήθως, δευτεροβάθμια προσβολή από άλλα παθογόνα (π.χ. βοτρύτης).

Σε γενικές γραμμές, η ασθένεια ενθαρρύνεται από τον ζεστό καιρό, όχι όμως και από θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 35° C. Επισημαίνεται ότι ο μύκητας αναπτύσσεται καλύτερα στις σκιερές περιοχές των φυτών, επειδή ο ήλιος περιορίζει την ανάπτυξή τους. Για τη βλάστηση των σπόρων, δεν είναι ουσιαστική η ύπαρξη του νερού στην επιφάνεια του φυτού. Αυτό σημαίνει ότι, ακόμα και σε συνθήκες ξηρασίας, είναι δυνατόν να αρχίσει η μόλυνση. Σε γενικές γραμμές, η καλύτερη μέθοδος για να αντιμετωπιστεί το ωίδιο είναι η πρόληψη. Η μη έγκαιρη επέμβαση μπορεί να προκαλέσει σημαντική μείωση της παραγωγής και υποβάθμιση της ποιότητας του προϊόντος. Για την

επιτυχή αντιμετώπιση του ωιδίου, συνιστώνται εφαρμογές σύμφωνα με το πρόγραμμα γεωργικών προειδοποιήσεων ή στο στάδιο των 2-3 φύλλων, λίγο πριν από την άνθηση και μετά το δέσιμο, με επαναλήψεις ανάλογα με τα επίπεδα προσβολής. Επιπλέον, συνιστάται η υιοθέτηση καλλιεργητικών τεχνικών (δεξί κλάδεμα, αποφύλλωση, ορθή αζωτούχως λίπανση), για την αποφυγή της δημιουργίας ευνοϊκών συνθηκών για τα παθογόνα.

8.5.3. Μέτρα προστασίας αμπέλου

Στην Ελλάδα, οι πιο σημαντικές ζημιές σε αμπέλια προκαλούνται από το ωίδιο και όχι από τις καιρικές συνθήκες. Αρκετά μέτρα για την προστασία της καλλιέργειας θεωρούνται ζωτικής σημασίας, όπως:

- **Φροντίδα και γονιμότητα εδάφους:** Η σύσταση, το βάθος, η γονιμότητα, η πανίδα και η μικροχλωρίδα του εδάφους πρέπει να προστατευτούν. Τα θρεπτικά στοιχεία, όπως και η οργανική ύλη πρέπει να ανανεώνονται, εάν αυτό είναι δυνατόν. Θα πρέπει να γίνονται σε περιορισμένη έκταση οι απαιτούμενες λιπάνσεις, για την υψηλή ποιότητα των σταφυλιών, την υγεία των φυτών και την υποκατάσταση των θρεπτικών στοιχείων και της οργανικής ύλης στο έδαφος. Οι λιπάνσεις θα πρέπει να παρέχονται μόνο εάν αυτό κριθεί απαραίτητο, ύστερα από εδαφολογική ανάλυση. Η ρύπανση των υπογείων υδάτων λόγω νιτρορύπανσης θα πρέπει να αποφεύγεται.
- **Διάδρομοι και περιοχές απαλλαγμένες από την κυκλοφορία παρασίτων:** Σκοπός της διατήρησης της φυτοκάλυψης των διαδρόμων στον αμπελώνα, χωρίς αρνητικές επιπτώσεις στην ποσότητα και την ποιότητα της παραγωγής, είναι η αποφυγή της διάβρωσης και της συμπίεσης του εδάφους, η διατήρηση και ο εμπλουτισμός της ποικιλίας των φυτικών ειδών, με την αύξηση της οικολογικής σταθερότητας στον αμπελώνα, καθώς και η μείωση της χρήσης των φυτοφαρμάκων. Η συνολική κάλυψη των αμπελώνα με βλάστηση στη διάρκεια του χειμώνα είναι υποχρεωτική. Εάν η υγρασία του εδάφους κατά την αναπαραγωγική περίοδο είναι επαρκής, τότε δεν επιτρέπεται η διατήρηση ολόκληρης της επιφάνειας του αμπελώνα χωρίς βλάστηση. Αυτό δεν επιτρέπεται στην περίπτωση των νέων αμπελώνων (μέχρι 3 χρόνια).
- **Περιποίηση του φυλλώματος:** Το σύστημα διαμόρφωσης και το κλάδεμα των αμπελώνων θα πρέπει να γίνονται με τέτοιον τρόπο ώστε να διασφαλίζεται η ισορροπία μεταξύ βλάστησης και παραγωγής. Σε υγρές περιοχές, ο καλός αερισμός της περιοχής γύρω από τους βότρυς θεωρείται σημαντικός και επιβάλλονται προληπτικά μέτρα, για την αποφυγή προσβολών από ασθένειες (κυρίως βοτρύτη).
- **Άμεσα μέτρα προστασίας για την υγεία των φυτών (καταπολέμηση):** Θα πρέπει να δοθεί προτεραιότητα στη χρήση φυσικών καλλιεργητικών, βιολογικών και πολύ εξειδικευμένων μεθόδων καταπολέμησης των εχθρών, των ασθενειών και των ζιζανίων. Η χρήση φυτοπροστατευτικών προϊόντων θα πρέπει να περιορίζεται στο ελάχιστο και να γίνεται μόνο όταν είναι απαραίτητο. Θα πρέπει να επιλέγονται εξειδικευμένα προϊόντα και διαδικασίες καταπολέμησης λιγότερο τοξικές, όσο το δυνατόν πιο ασφαλείς για τον άνθρωπο και το περιβάλλον.
- **Εκτίμηση του κινδύνου και παρακολούθηση του εχθρού ή των παθογόνων:** Οι πληθυσμοί των εχθρών και η εξέλιξη των ασθενειών πρέπει να παρακολουθούνται και να καταγράφονται τακτικά. Θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν επιστημονικά τεκμηριωμένες μέθοδοι εκτίμησης, κατάλληλες για κάθε περιφέρεια και περιοχή. Για κάθε εχθρό ή ασθένεια, θα πρέπει να προσδιορίζεται το ενδεδειγμένο επίπεδο προσβολής ή ο κίνδυνος από πιθανή βλάβη. Η απόφαση για ψεκασμό θα πρέπει να βασίζεται σε επιστημονικά καθοριζόμενα επίπεδα ανοχής, σε επίσημες προειδοποιήσεις, για την εξέλιξη του εχθρού ή της ασθένειας, και στο βαθμό του κινδύνου. Θα πρέπει να χρησιμοποιούνται αναγνωρισμένα μοντέλα πρόγνωσης των ασθενειών. Συνιστάται η παρακολούθηση του εχθρού ή της ασθένειας από ομάδες παραγωγών με τη χρήση ειδικών οργάνων.

8.5.4. Παράσιτο αμπέλου (Lobesia Botrana Denis and Schiff)

Το είδος Lobesia botrana (λεπιδόπτερα Tortricidae) έχει επιλεχθεί γιατί βρίσκεται σε σχεδόν όλες τις «κρασοπεριοχές» της Ευρώπης, της Ασίας και της Αφρικής, δηλαδή περίπου στο 90% των περιοχών. Είναι ο βασικός εχθρός αυτής της καλλιέργειας και ένα είδος που, λόγω της οικονομικής σημασίας του, έχει μελετηθεί σε μεγάλο βάθος.

8.5.4.1. Επίδραση θερμοκρασίας

Η εμφάνιση των ενηλίκων την άνοιξη πραγματοποιείται όταν η μέση ημερήσια θερμοκρασία αέρα είναι πάνω από 10° C, μεταξύ 10 και 12 ημέρες (Πίνακας 8.3). Μόλις προκύψουν, οι θερμοκρασίες λυκόφωτος πρέπει να είναι επάνω από 12° C, για να πραγματοποιηθεί η πτήση, ενώ το ζευγάρωμα των ενηλίκων είναι αποτελεσματικότερο σε θερμοκρασίες πάνω από 15° C. Εκτός από τη δραστηριότητα της προνύμφης, η διάρκεια ζωής της επηρεάζεται επίσης για 58 ημέρες σε 13,5° C ή για 9 ημέρες σε 30° C (Balachowsky, 1966), όταν η κανονική διάρκεια ζωής είναι περίπου 10 ημέρες. Η διάρκεια της ανάπτυξης εμβρύων είναι μια λειτουργία της θερμοκρασίας μεταξύ των ορίων 9° C και 34,5° C, με ελάχιστο τις 3,5 ημέρες στους 30° C. Επίσης, η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία έχουν μια συνδυασμένη επιρροή στη θνησιμότητα εμβρύων, που αυξάνεται σταδιακά πάνω από 22° C και κάτω από 18° C, το δε ποσοστό θνησιμότητας αυξάνεται με τη μείωση της υγρασίας. Ανεξάρτητα από τη σχετική υγρασία, η απόλυτη θανατηφόρα θερμοκρασία για το αυγό είναι μεταξύ 40° C και 50° C, ανάλογα με το χρόνο έκθεσης. Στους 45° C, όλα τα αυγά πεθαίνουν σε 9 λεπτά.

° C	**Ημέρες**	**° C**	**Ημέρες**
34,5	4	20	7
29-33	3,5	17	10
24-26	4,5	15	14,5
22	5,5	10,9	40

Πίνακας 8.3. *Σχέση θερμοκρασίας και εμφάνισης ενηλίκων στο αμπέλι.*

Η έκταση σε διάρκεια των ημεροβαθμών έχει σημαντική επίδραση στη διάρκεια των φάσεων. Στη διάρκεια της διάπαυσης, η πούπα έχει υψηλή ανθεκτικότητα στις χαμηλές θερμοκρασίες του χειμώνα. Σε βαρείς χειμώνες, έχει αντέξει ακόμα και σε –20° C. Για το Lobesia botrana, δίνεται ιδιαίτερη σημασία στον υπολογισμό των ημεροβαθμών, δηλαδή το σύνολο των ημερήσιων μέσων θερμοκρασιών πάνω από 10° C, ή στο σύνολο των αποτελεσματικών θερμοκρασιών, μεταξύ των πρώτων συλλήψεων στις παγίδες και της εμφάνισης της λευκής κορυφής, δεδομένου ότι αυτή είναι η στιγμή κατά την οποία απαιτείται να ξεκινήσει η ειδική μεταχείριση για την πρώτη γενεά, εφόσον είναι αναγκαία. Στη Σουηδία, τα αποτελέσματα έχουν δείξει 190 ημεροβαθμούς το 1976 και 220 το 1977. Επίσης, στην Ισπανία, τα αποτελέσματα αναφέρουν 194 +/–17 για μια περίοδο τριών ετών, 1977-1979. Έχουν γίνει ακόμα υπολογισμοί για το αρχικό, ενδιάμεσο και τελικό στάδιο του πρώτου και δεύτερου πετάγματος, με μέσο όρο 144 και 660 για τη δεύτερη πτήση.

8.5.4.2. Επίδραση σχετικής υγρασίας

Η σχετική υγρασία επηρεάζει τη διάρκεια ζωής των ενηλίκων, αλλά και τη θνησιμότητα των αυγών, σε σχέση με τη θερμοκρασία. Αυτή η επίδραση αυξάνεται όσο πλησιάζει στις περιοριστικές θερμοκρασίες για την ανάπτυξη των εντόμων. Σε πολύ ζεστά και υγρά καλοκαίρια, υπάρχει αρκετά σημαντική θνησιμότητα στα αυγά. Επίσης, η συνδυασμένη επίδραση της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας στη ζωή του εντόμου περιγράφεται στο κλιματόγραμμα, που έχει προκύψει από εργαστηριακά πειράματα (Σχήμα 8.9). Η αξιοπιστία αυτού του κλιματογράμματος έχει επιβεβαιωθεί από έρευνες πεδίου (Coscolla & Davila-Zurita, 1983).

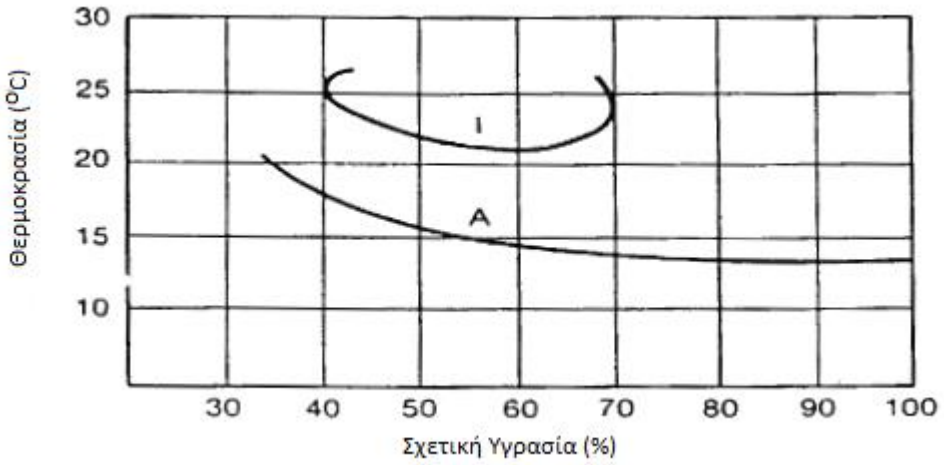
8.5.4.3. Επίδραση άλλων παραγόντων

Η βροχή παρεμποδίζει το πέταγμα των ενήλικων ατόμων στο λυκόφως, καθώς και την εναπόθεση των αυγών τους, ακόμα και όταν δεν βρέχει, αν τα αμπελόφυλλα είναι υγρά κατά τις ώρες του λυκόφωτος στη Γαλλία. Ακόμα και οι άνεμοι, όταν φτάσουν ένα ορισμένο επίπεδο, παρεμποδίζουν το πέταγμα των ενήλικων ατόμων.

8.5.4.4. Επίδραση φωτοπεριόδου

Στην Ρωσία, έχει διαπιστωθεί ότι ενδεχομένως να υπάρχει σχέση μεταξύ της φωτοπεριόδου και της διάπαυσης του Lobesia botrana. Τα αποτελέσματα διαφόρων πειραμάτων έχουν επιβεβαιώσει αυτή την υπόθεση, σύμφωνα με την οποία μειωμένες περίοδοι φωτός έχουν οδηγήσει σε διάπαυση της πούπας, αλλά μόνο όταν τα πρώτα στάδια, και ειδικότερα το στάδιο του αυγού έχει εκτεθεί σε συνθήκες μειωμένου φωτός. Από το τρίτο στάδιο της λάρβας και έπειτα, οι επιδράσεις της μειωμένης φωτοπεριόδου ήταν λιγότερο ορατές.

Από τη στιγμή που διαπιστώθηκε ότι υπάρχει μια κρίσιμη περίοδος, πέρα από τη διάπαυση, έγινε κατανοητή η ανωμαλία στην τρίτη πτήση, υπό αυτές τις οικολογικές συνθήκες, σε ακόλουθα έτη. Η ημερομηνία της κρίσιμης περιόδου μπορεί να προσδιοριστεί για κάθε περιοχή αμπέλου από το γεωγραφικό πλάτος. Λαμβάνοντας και άλλους παράγοντες υπόψη, και ειδικότερα τη θερμική ολοκλήρωση, θα πρέπει να αναμένεται η εμφάνιση τρίτης και τέταρτης πτήσης.



Σχήμα 8.9 *Δραστηριότητα του L. botrana σε σχέση με τη θερμοκρασία και την υγρασία. Α είναι το όριο της ζώνης δραστηριότητας του L. botrana και Ι η κύρια δραστηριότητα και η μέγιστη παραγωγή του L. botrana*.

8.5.4.5. Δημιουργία μοντέλου

Τα μοντέλα έχουν δημιουργηθεί για να δείξουν την ανάπτυξη στο πέρασμα του χρόνου, δηλαδή τα φαινολογικά μοντέλα, του Lobesia botrana, που σχετίζονται με τις κλιματικές παραμέτρους. Ένα από τα πιο προηγμένα μοντέλα έχει αναπτυχθεί στη Γαλλία. Σε αυτό, ορισμένοι βιολογικοί παράμετροι έχουν προκαθοριστεί, ενώ άλλοι εξαρτώνται από τις μέγιστες θερμοκρασίες, τη διάρκεια διύγρανσης των φύλλων, τη φωτοπερίοδο και άλλους παράγοντες, αλλά κυρίως από τη χρήση της θερμικής ολοκλήρωσης. Αν και γενικώς η φιλοσοφία του μοντέλου μπορεί να θεωρηθεί έγκυρη, οι παράμετροι πρέπει να ελεγχθούν και διορθωθούν σε κάθε περίπτωση, δεδομένου ότι πρέπει να γίνει προσαρμογή στις διαφορετικές συνθήκες ανά περιοχή. Στην Τσεχοσλοβακία, το μοντέλο του κύκλου ζωής του Lobesia botrana ολοκληρώθηκε βασιζόμενο στη συνεχή θερμική ολοκλήρωση για κάθε ανεξάρτητο στάδιο της ανάπτυξης, καθώς και στην επίδραση της φωτοπεριόδου στην επίτευξη της διάπαυσης, και έχει χρησιμοποιηθεί για προβλέψεις.

8.5.5. Εχθροί στο βαμβάκι (Petinophora Gossypiella Saund)

Από τους διάφορους εχθρούς που μπορεί να επιδράσουν στο βαμβάκι σε διάφορα μέρη του κόσμου, το ρόδινο σκουλήκι (Petinophora gossypiella) έχει επιλεγεί γιατί είναι από τους πλέον μελετούμενους εχθρούς σε περιοχές με βαμβάκι. Έχει εντοπιστεί στις βαμβακοπεριοχές της Ευρώπης, της Ασίας, της Αφρικής, της Βόρειας και της Νότιας Αμερικής, της Αυστραλίας και των νησιών του Ειρηνικού. Οι οικονομικές επιπτώσεις είναι σημαντικές, και για το λόγο αυτό χαρακτηρίζεται ως ένας από τους πιο κρίσιμους εχθρούς του βαμβακιού. Επιπλέον, υπάρχουν πολλές μελέτες που τεκμηριώνουν τη σχέση μεταξύ μετεωρολογικών παραμέτρων και ανάπτυξης για τον έλεγχο του εχθρού.

8.5.5.1. Επίδραση θερμοκρασίας

Η θερμοκρασία επηρεάζει την εμφάνιση των **ενηλίκων** την άνοιξη. Αυτή μειώνεται όταν η μέση θερμοκρασία πέσει κάτω από τους 21,1° C. Για παράδειγμα, στην Αριζόνα, το σύνολο των αποτελεσματικών θερμοκρασιών, δηλαδή πάνω από 12,8° C, όπου πάνω από 50% των ενηλίκων έχει εμφανιστεί, διαπιστώθηκε ότι ήταν 1.176 το 1980 και 1.174 το 1981. Το τελευταίο οδηγεί στην υπόθεση ότι η θερμοκρασία μπορεί να αποτελέσει ένδειξη της εμφάνισης των ενηλίκων και ότι η διάρκεια ζωής των ενηλίκων μπορεί να μειωθεί με την αύξηση της θερμοκρασίας. Η **γονιμότητα** επηρεάζεται επίσης από τη θερμοκρασία μεταξύ 22° C και 30,5° C. Η απόθεση των αυγών σταματά, πρακτικά, στους 15,6° C. Επίσης, η διάρκεια της **εκκόλαψης** εξαρτάται από τη θερμοκρασία και μειώνεται όταν αυτή αυξάνεται, μεταξύ 18° C και 35° C. Ακόμα, ο βαθμός επιβίωσης εξαρτάται από τη θερμοκρασία με μέγιστο στους 25° C και μειώνεται σημαντικά πάνω από 30° C ή κάτω από 22° C. Τέλος, υψηλές θερμοκρασίες, δηλαδή πάνω από 35° C ή 40° C, μπορεί να οδηγήσουν σε υψηλή **θνησιμότητα** αυγών, ανάλογα με την έκθεση και τη σχετική υγρασία. Η διάρκεια των διαφορετικών σταδίων προνύμφης μειώνεται καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία. Η θνησιμότητα βρίσκεται στο ελάχιστο στους 25° C και μετά αυξάνεται με κάθε αύξηση ή πτώση της θερμοκρασίας. Το όριο για την ανάπτυξη της **λάρβας** είναι 13° C. Αν και η επίσημη εγκατάσταση της **διάπαυσης** είναι ελεγχόμενη, κυρίως από τη φωτοπερίοδο, μπορεί να επηρεαστεί και από τη θερμοκρασία. Η διακοπή της διάπαυσης στην προνύμφη επηρεάζεται ακόμα και από τη θερμοκρασία. Γενικά, μπορούμε να υποστηρίξουμε ότι ο χρόνος που απαιτείται για τον τερματισμό της διάπαυσης μειώνεται καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται. Η θνησιμότητα το χειμώνα στην **προνύμφη** μπορεί, κατά περίπτωση, να οφείλεται στις χαμηλές θερμοκρασίες. Όπως και σε άλλα στάδια της ζωής του εντόμου, η διάρκεια του σταδίου της νύμφης αυξάνεται με την πτώση της θερμοκρασίας. Γενικά, η ιδανική θερμοκρασία του αέρα για την ανάπτυξη των διαφόρων σταδίων του εντόμου είναι μεταξύ 25° C και 28° C. Θερμοκρασίες πάνω ή κάτω από αυτά μειώνουν το βαθμό επιβίωσης.

8.5.5.2. Επίδραση σχετικής υγρασίας

Η ενήλικη διάρκεια ζωής αυξάνεται με την άνοδο της σχετικής υγρασίας, οπότε και η εκκόλαψη αυγών ευνοείται από την υψηλή σχετικής υγρασία. Στις περιπτώσεις της επαγωγής και της λήξης της διάπαυσης, προτείνεται η επιρροή της να είναι ελάχιστη. Ωστόσο, υπό ορισμένους όρους και στην περίοδο φωτός, τα υψηλά επίπεδα υγρασίας μπορεί να προωθήσουν τη γρήγορη λήξη της διάπαυσης και της νύμφωσης. Σε πολλές περιπτώσεις, η σχετική υγρασία παρουσιάζεται σε συνδυασμό με τη θερμοκρασία, όπως η προνυμφική θνησιμότητα στη διάρκεια της διάπαυσης, που αποδίδεται σε έναν συνδυασμό υψηλών θερμοκρασιών και χαμηλής σχετικής υγρασίας.

8.5.5.3. Επίδραση θερμοκρασίας του εδάφους

Η θερμοκρασία έχει επιπτώσεις στη θνησιμότητα των θαμμένων προνυμφών στο χώμα. Ακόμα, σημειώνεται ότι οι καθημερινές διακυμάνσεις στη θερμοκρασία έχουν δυσμενή επίπτωση στις προνύμφες. Οι Clayton και Henneberry (1983) έχουν δείξει ότι η αύξηση της επιφανειακής θερμοκρασίας εδάφους στους 68° C, για 10-15 δευτερόλεπτα, σκότωσε το 81% των προνυμφών. Γενικά, όταν η θερμοκρασία επιφάνειας είναι μεταξύ 50,6° C και 68,5° C, τότε η θνησιμότητα των σε διάπαυση προνυμφών είναι υψηλή. Η δράση των θαμμένων προνυμφών επηρεάζεται επίσης από τη θερμοκρασία εδάφους. Αυτή η δραστηριότητα αυξάνεται την άνοιξη, όταν το χώμα είναι θερμό και υγρό. Οι δυσμενείς θερμοκρασίες, εκτός από την προαγωγή της θνησιμότητας, καθυστερούν και την ανάπτυξη των προνυμφών που επιβιώνουν (Clayton & Henneberry, 1982).

8.5.5.4. Επίδραση βροχοπτώσεων και υγρασίας του εδάφους

Στις ΗΠΑ, η αύξηση της εδαφικής υγρασίας από την άρδευση στη διάρκεια του χειμώνα είναι μια σημαντική μέθοδος για τον έλεγχο του ρόδινου σκουληκιού. Εργαστηριακές μελέτες και παρατηρήσεις πεδίου δείχνουν ότι η περιεκτικότητα σε υψηλή υγρασία στο χώμα κατά τη χειμερινή περίοδο αυξάνει τη θνησιμότητα των προνυμφών και των νυμφών στο χώμα, σε σημαντικό βαθμό. Αυτά τα υψηλά επίπεδα υγρασίας μπορεί να οφείλονται στην άρδευση ή στις έντονες βροχοπτώσεις. Αντίθετα, η εμφάνιση την άνοιξη θαμμένων εντόμων μπορεί να ευνοηθεί από την υψηλή εδαφική υγρασία. Αφενός, έχει επιπτώσεις στο ποσοστό επιβίωσης, που αυξάνεται από την άρδευση την άνοιξη, και, αφετέρου, η εμφάνιση των ενηλίκων ευνοείται από την εδαφική υγρασία. Κατά συνέπεια, οι Clayton και Henneberry (1982) σημειώνουν ότι οι προνύμφες γίνονται ενεργές νωρίτερα στο υγρό χώμα (11-15% υγρασία), απ' ό,τι στο ξηρό χώμα (2% υγρασία), με συνέπεια να εισέρχονται στο στάδιο της πούπας νωρίτερα και

να προκύπτουν ως ενήλικοι νωρίτερα. Γενικά, μπορεί να ειπωθεί ότι οι υγροί χειμώνες μειώνουν, ενώ η υγρή άνοιξη ευνοεί τη δημιουργία πούπας και την επιβίωση.

8.5.5.5. Επίδραση ανέμου

Ο άνεμος μπορεί να βοηθήσει τη διασπορά των εντόμων, μερικά από τα οποία ταξιδεύουν σε μακρινούς τόπους (π.χ. στις ΗΠΑ, έχει σημειωθεί διασπορά σε απόσταση 240-400 km), δεδομένου ότι μπορούν να ανυψωθούν σε ύψος 900 m. Επίσης, ο άνεμος μπορεί να παρεμποδίσει την κανονική δραστηριότητά τους στο έδαφος. Συλλήψεις στις ελαφριές παγίδες είναι μεγαλύτερες όταν η ταχύτητα αέρα δεν υπερβαίνει τα 5 km/h, που μπορεί να ληφθεί ως κρίσιμο σημείο, δεδομένου ότι, πέρα από αυτό, τα έντομα εμφανίζουν ευαισθησία στη ρύθμιση της πτήσης τους.

8.5.5.6. Επίδραση φωτοπεριόδου

Η προνυμφική διάπαυση ξεκινά περίπου στον ίδιο χρόνο, σε οποιοδήποτε δεδομένο γεωγραφικό πλάτος. Αυτό μαρτυρά ότι η περίοδος φωτός έχει κάποια επίδραση στην επαγωγή της διάπαυσης. Ο Adkisson και οι συνεργάτες του (1963) σημείωσαν ότι εκείνες οι ημερήσιες διάρκειες 13 ωρών ή λιγότερο προκαλούν διάπαυση. Επίσης, έδειξαν ότι η διατροφή έχει επίδραση στην πρόκληση διάπαυσης. Αφού η διάπαυση στο έντομο είναι βασικά καθορισμένη μέχρι την περίοδο φωτός, αυτό σημαίνει ότι η περίοδος φωτός καθορίζει τις εποχικές κατανομές και την αφθονία του εντόμου. Κατά συνέπεια, η διάπαυση είναι σπάνιο φαινόμενο στην ισημερινή περιοχή, δεδομένου ότι η διάρκεια της ημέρας είναι σχεδόν σταθερή σε όλη τη διάρκεια του έτους σε περίπου 14 ώρες. Τέλος, η περίοδος φωτός από κοινού με τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας έχουν επίδραση στη λήξη της διάπαυσης.

Οι μετεωρολογικοί παράγοντες διαδραματίζουν σαφώς σημαντικό ρόλο και στη βιολογία και στον έλεγχο του **ρόδινου σκουληκιού**. Κατά κύριο λόγο, η φωτοπερίοδος και, κατά δεύτερο, η θερμοκρασία καθορίζουν τη διάπαυση και είναι, συνεπώς, οι σημαντικότεροι παράγοντες στη γεωγραφική και γενική κατανομή αυτού του εχθρού. Η θερμοκρασία και η εδαφική υγρασία μπορούν επίσης να είναι χρήσιμες για τον υπολογισμό της εμφάνισης των ενηλίκων την άνοιξη και για την πρόβλεψη της ανάγκης μέτρων ελέγχου. Επίσης, και ο άνεμος μπορεί να είναι σημαντικός παράγοντας. Προσπάθειες έχουν γίνει για να βρεθούν οι ποσοτικές σχέσεις μεταξύ των μετεωρολογικών παραγόντων, όπως μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες, σχετική υγρασία το πρωί και το απόγευμα, ώρες φωτός της ημέρας, ένταση και αριθμός βροχερών ημερών, καθώς και οι επιδράσεις στον εχθρό, με τη βοήθεια στατιστικών μοντέλων πολλαπλής παλινδρόμησης. Κατά συνέπεια, υπό συγκεκριμένες συνθήκες, μια άνοδος θερμοκρασίας όχι περισσότερο από 1° C μπορεί να παραγάγει μια αύξηση 4% στην επίδραση του παρασίτου, ενώ μια πρόσθετη βροχόπτωση, σε ορισμένο χρονικό διάστημα, μπορεί να μειώσει το ποσό ζημίας μέχρι 4%.

Τα ιδιαίτερα μέτρα ελέγχου, που είναι εν μέρει αγρομετεωρολογικά, μπορούν να είναι πολύ χρήσιμα. Για παράδειγμα, η πρώιμη συγκομιδή μπορεί να είναι σημαντική για να μειωθεί ο πληθυσμός που διαχειμάζει. Έτσι, κρίνεται απαραίτητο να επιλεγεί μια κατάλληλη ημερομηνία φύτευσης, με βάση έρευνες για τις μικροκλιματικές και φαινολογικές συνθήκες της συγκομιδής και του εχθρού, και ενδεχομένως να χρησιμοποιηθούν χημικά αποφυλλωτικά, για να προκληθεί η συγκομιδή πριν από την περίοδο φωτός, που προκαλεί διάπαυση. Χρησιμοποιώντας αυτές τις μεθόδους, έχει επιτευχθεί μείωση των πληθυσμών του εχθρού μέχρι και 85%. Η χειμερινή άρδευση με την αύξηση της περιεκτικότητας σε εδαφική υγρασία μπορεί επίσης να αυξήσει αρκετά τη λαρβική θνησιμότητα.

Μετεωρολογικά στοιχεία, μαζί με άλλα βιολογικά και φαινολογικά στοιχεία, είναι σαφώς απαραίτητα για την πρόβλεψη της ανάπτυξης και του πληθυσμού του εχθρού, και, συνεπώς, για την υιοθέτηση των κατάλληλων στρατηγικών ελέγχου. Εντούτοις, παρά τη σημασία των αγρομετεωρολογικών παραγόντων στην επιδημιολογία και τον έλεγχο του παρασίτου, απαιτούνται πρόσθετες μελέτες για να καλύψουν τα κενά στη γνώση ορισμένων σημαντικών σημείων. Ειδικά, περαιτέρω στατιστικές και αγρομετεωρολογικές μελέτες απαιτούνται, πριν να αναπτυχθούν επαρκή μοντέλα πρόβλεψης χρόνου και δριμύτητας των επιθέσεων, με βάση τα μετεωρολογικά στοιχεία, καθώς και στοιχεία συγκομιδής και εχθρού.

8.5.6. Εχθροί αποθηκών σίτου και άλλων δημητριακών

Οι απαιτήσεις για τρόφιμα παγκοσμίως προϋποθέτουν μια προσπάθεια αύξησης της γεωργικής παραγωγικότητας και ελαχιστοποίησης των μετασυλλεκτικών απωλειών. Τελευταία, παρατηρείται μια τάση καθιέρωσης εθνικών και διεθνών προσωρινών αποθεμάτων τροφίμων, ώστε να υπάρχει προστασία ενάντια στη διακύμανση της γεωργικής παραγωγής. Υπάρχει και ένας μεγάλος αριθμός εντόμων, εκτός από αυτά που απειλούν το καλαμπόκι στο χωράφι, τα οποία μπορεί να απειλήσουν και το σπόρο κατά τη μεταφορά και την αποθήκευση. Αυτοί μπορεί να κυριαρχούν σε περιοχές, όπως οι αναπτυσσόμενες χώρες, όπου οι αποθηκευτικοί χώροι δεν είναι οι ενδεδειγμένοι. Σε αυτές τις περιπτώσεις, οι απώλειες μετά τη συγκομιδή μπορεί να είναι υψηλότερες από αυτές που καταγράφονται στο χωράφι. Αυτό το σύστημα του μάρκετινγκ και της αποθήκευσης προσβάλλεται από τις εξωτερικές επιθέσεις εχθρών των διάφορων ειδών. Ειδικότερα, αναφέρεται χαρακτηριστικά η δραστηριότητα των εντόμων, δηλαδή κολεόπτερων και λεπιδόπτερων, που, σύμφωνα με τις εκτιμήσεις του FAO, είναι υπεύθυνα για τις απώλειες στα αποθηκευμένα δημητριακά και σε άλλα προϊόντα περισσότερο από 10%.

8.5.6.1. Εχθροί αποθηκών

Είναι ευρέως γνωστό ότι οι απώλειες λόγω αυτών των εντόμων ποικίλλουν σε μέγεθος, επειδή τα έντομα υπόκεινται σε μετεωρολογικούς παράγοντες, όπως είναι η υγρασία, η θερμοκρασία, τα επίπεδα φωτός, που έχουν επιπτώσεις στην ανάπτυξή τους. Για μεγάλο χρονικό διάστημα, δεν υπήρχε εκτίμηση του ρόλου της υγρασίας στις μελέτες των εχθρών αποθηκών, καθώς επίσης δεν λαμβάνονταν υπόψη οι διακυμάνσεις της μέσης θερμοκρασίας. Οι πιο πρόσφατες μελέτες έχουν περιλάβει τον έλεγχο της φυσικής αύξησης του πληθυσμού μέχρι μερικές εβδομάδες ή/και μήνες, ως συνάρτηση της επίδρασης της σχετικής υγρασίας, της περιεκτικότητας σε υγρασία, της θερμοκρασίας, των ευαισθησιών της ατμόσφαιρας του σιταριού κ.ά. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, τα έντομα που εξετάζονται κατατάσσονται στις εξής δύο κατηγορίες:

- **Κολεόπτερα:** *Granarius Sitophilus (Calandara) (L.), Oryzae Sitophilus (Calandra) (L.), Confusum Tribolium (Duv.), Cryptolesstes Ferrugineus (Steph.), Cryptolestes Pusilus (Schonh.),*Granarium Trogoderma, *Mauritanicus Tenebroides (L.), Dominika Rhyzophrth (F.)*.

- **Λεπιδόπτερα:** *Ephestia Kuehniella (Zell.), Plodia Intrepunctella (Hb.), Sitotroga Cerealella (Ol.)*.

Πρέπει να σημειωθεί ότι, στην περίπτωση των αποθηκευμένων προϊόντων, είναι δυνατόν να ρυθμισθούν οι μετεωρολογικές συνθήκες, δηλαδή η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία, η περιεκτικότητα σε υγρασία του σιταριού και άλλα συναφή. Με άλλα λόγια, η κατανόηση της επίδρασης αυτών των παραγόντων στα έντομα είναι ιδιαίτερα πολύτιμη.

Βιβλιογραφικές αναφορές

Adkisson , P.L. , Bell , R.A. and Wellso, S.G. (1963) Environmental factors controlling the induction of diapause in the pink boll worm, Pectinophora gossypiella. *Journal of Insect Physiology*, 9:299-230.

Balachowsky, A.S. (1966). *Entomologie Appliquee a l'agriculture. Tome II: Lepidopteres*. Paris: Masson et Cie Editeurs.

Bodenheimer, F.S. (1926). Première note sur les cochenilles de Syrie. *Bulletin de la Société Entomologique de France*. 41-47.

Chiang, H. C., & Hodson, A. C. (1959). Distribution of the first-generation egg masses of the European corn borer (Pyrausta nubilalis) in fields. *Journal of Economic Entomology*. 52:409-411.

Clayton, T.E., & Henneberry, T.J. (1982). Pink bollworm: Effect of soil moisture and temperature on moth emergence in field and laboratory studies. *Environment Entomology*. 11:147-149.

Coscollá, R & Dávila-Zurita, M. (1983). Influence of climatic factors on the severity of attack by Lobesia botrana in vineyards in the Valencia region. *Bull. OEPP/EPPO Bulletin*, 13(2):97-102.

Dalezios, N.R., D. Bampzelis and Daoularis, G. (2005). Agrometeorological Simulation Using PERO Model for Grape Vine Downy Mildew in Greece, *COST Scientific Meeting*, February 2005, Florence, Italy.

Dittrick, L.E. & Chiang, H.C. (1982). Developmental characteristics of Macrocentrus grandii as influenced by temperature and instar of its host, the european corn borer. *Journal og Insect Physiology*. 28:47-52.

Guennelon, G. & Audemard, H. (1960). La Pyrale du Mai's, Ostrinia (Pyrausta) nubilalis Hb. (Lépidopteres Pyralidae) dans la Basse Vallée du Rhone: Observations écologiques; incidences économiques. *Annals Epiph*., 11:337-396.

Κατσόγιαννος, Β. και Κωβαίος, Δ. (1993). *Εχθροί αμπελιού και καρποφόρων δέντρων. Βιολογικοί κύκλοι, μορφολογικά χαρακτηριστικά και στοιχεία καταπολέμησης.* Θεσσαλονίκη: Υπηρεσία δημοσιευμάτων, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

Kranz, J. (1974). The role and scope of mathematical analysis and modeling in epidemiology. In Kranz, J. (Ed.). *Epidemics of Plant Diseases* (Ecological Studies 13). Berlin: Springer.

Magarey, R.D., Sutton, T.B. and Thayer, C.L. (2005). A simple generic infection model for foliar fungal plant pathogens. *Phytopathology*, 95:92-100.

Malone, J.B., Gommes, R., Hansen, J., Yilma, J.M., Slingenberg, J., Snijders, F., Nachtergaele, F. and Ataman, E. (1998). A geographic information system on potential distribution of *Fasciola hepatica* and *F. gigantica* in East Africa based on Food and Agriculture Organization databases. *Veterinary Parasitology*, 78:87-101.

Orlandini, S. (2005). *PLASMO software program*. Version 3.2, IATA, Florence, Italy.

WMO. (1981). *Guide to Agricultural Meteorological Practices WMO-No. 134*. Geneva: World Meteorological Organization.

Paschall M.J., Hellingsworth, C., Coli, W. and Cohen, N.L. (1992). Working the bugs out. Integrated pest management saves crops and the environment. *Journal of the American Dietetic Association*. 92(8):931.

Rosa, M., Gozzini, B., Orlandini, S., and Seghi, L. (1995). A Computer program to Improve the Control of Grapevine Downy Mildew. *Computer and Electronics in Agriculture*. 12:311-322.

Rijsdijk, F.H. (1986). Weeds, pests and diseases. In H. van Keulen & J. Wolf (Eds.). *Modelling of Agricultural Production: Weather, Soils and Crops*. Wageningen: Pudoc.

ΜΕΡΟΣ 4: ΚΛΙΜΑ ΚΑΙ ΓΕΩΡΓΙΑ

Κεφάλαιο 9: Αγροκλιματολογία
Κεφάλαιο 10: Κλιματική Αλλαγή και Γεωργία

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9
ΑΓΡΟΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΑ

Σύνοψη
Στο κεφάλαιο αυτό καλύπτεται το αντικείμενο της αγροκλιματολογίας, η οποία μελετά την επίδραση του κλίματος στις συνθήκες των καλλιεργούμενων φυτών, στη ζωική παραγωγή, στην εμφάνιση επιζήμιων επιρροών, όπως βιολογικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις, και, γενικά, στις γεωργικές εργασίες και δραστηριότητες. Αρχικά, παρουσιάζεται η ταξινόμηση των κλιμάτων σύμφωνα με τις ισχύουσες μεθοδολογίες και αναπτύσσεται το θέμα του αγροκλίματος, μέσα από διάφορες κλίμακες κλιμάτων που ενδιαφέρουν τη γεωργία, όπως το τοποκλίμα, το μικροκλίμα ή το φυτοκλίμα. Στη συνέχεια, εξετάζονται η φαινολογική κλιματολογία και μια σειρά από θεματικούς τύπους κλιμάτων, όπως το κλίμα εδάφους, λιβαδιών, δημητριακών, δένδρων και δασών, καθώς και το κλίμα θερμοκηπίου. Τέλος, γίνεται αναφορά στο θέμα της βελτίωσης και προσαρμογής του κλίματος σε ειδικές συνθήκες για γεωργικούς σκοπούς.

Προαπαιτούμενη γνώση
Ο αναγνώστης απαιτείται να έχει βασικές γνώσεις φυσικής και μαθηματικών.

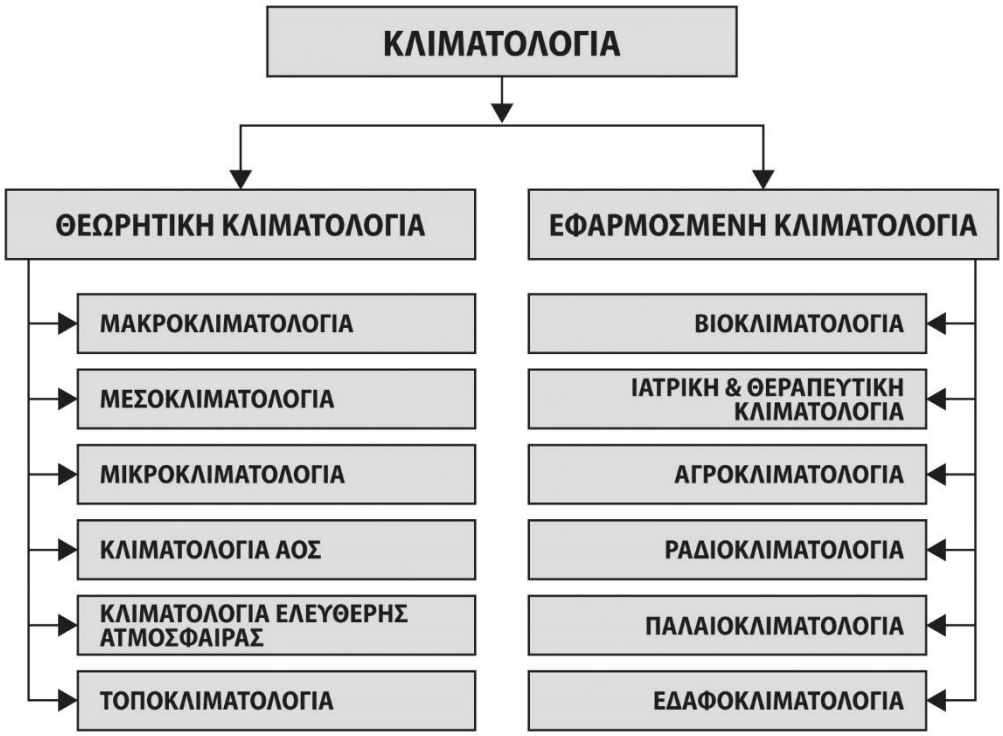
9.1. Ταξινόμηση των κλιμάτων

Ως γνωστόν, **καιρός** θεωρείται η κατάσταση της ατμόσφαιρας σε μια ορισμένη χρονική στιγμή, η οποία καλύπτει, επίσης, την εξέλιξη και τον κύκλο ζωής των συγκεκριμένων ατμοσφαιρικών διαταραχών, που αποτελούν τη γενική κατάσταση. Αντίθετα, **κλίμα** θεωρείται η μέση καιρική κατάσταση, ως σύνθεση του καιρού για μεγάλη χρονική περίοδο, ώστε να εξαλείφονται τυχόν σφάλματα, να καθιερώνονται και να ισχύουν οι στατιστικές παράμετροι, όπως η μέση τιμή, η διακύμανση, οι πιθανότητες ακραίων φαινομένων και άλλα συναφή. Σε αναλογία με τα παραπάνω, η **μετεωρολογία** προσδιορίζει και μελετά τα συστήματα καιρού που η κλίμακα χρόνου έχει ανώτερο όριο το χρόνο ζωής του αντίστοιχου ατμοσφαιρικού συστήματος ή φαινομένου, ο δε χρόνος αυτός εκτείνεται μέχρι και μερικές βδομάδες για τις διαταραχές συνοπτικής κλίμακας. Αντίθετα, η **κλιματολογία** μελετά τις μέσες τιμές και αποκλίσεις των κλιματικών στοιχείων και παραμέτρων για τόση χρονική περίοδο ώστε να εξαλείφονται τα σφάλματα. Επίσης, μελετά τις συχνότητες εμφάνισης καιρικών φαινομένων και συστημάτων, καθώς και τη χρονική και χωρική κατανομή τους. Τουλάχιστον τριάντα χρόνια θεωρούνται διεθνώς επαρκής χρόνος για κλιματικές αναλύσεις, ωστόσο συμπεράσματα είναι πολλές φορές αποδεκτά και για κλίμακες χρόνου από 10 μέχρι 15 χρόνια. Τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα της κλιματολογίας ενδιαφέρουν και άλλες επιστήμες, καθόσον τα κλιματικά στοιχεία καθορίζουν τελικά τη βλάστηση και, γενικά, τη συμπεριφορά των ζώντων οργανισμών στη Γη. Υπάρχουν διάφορες προσεγγίσεις κατηγοριοποίησης και ταξινόμησης των κλιμάτων. Γενικά, η κλιματολογία διακρίνεται σε θεωρητική και εφαρμοσμένη (Ζαμπάκας, 1981). Ειδικότερα, η **θεωρητική κλιματολογία** χωρίζεται, με βάση τις χωρικές κλίμακες κλιμάτων, σε μακροκλιματολογία, μεσοκλιματολογία, μικροκλιματολογία, κλιματολογία οριακού στρώματος, κλιματολογία ελεύθερης ατμόσφαιρας και τοποκλιματολογία. Αντίστοιχα, η **εφαρμοσμένη κλιματολογία** έχει στόχο την κάλυψη των αναγκών της ανθρωπότητας με πρακτικές εφαρμογές. Ειδικότερα, ανάλογα με τις ανάγκες που καλύπτει, διακρίνεται σε βιοκλιματολογία, ιατρική και θεραπευτική κλιματολογία, αγροκλιματολογία, ραδιοκλιματολογία, παλαιοκλιματολογία και εδαφοκλιματολογία. Στο Σχήμα 9.1. απεικονίζονται η ταξινόμηση κλιματολογίας και, ειδικότερα, οι κατηγορίες της θεωρητικής και εφαρμοσμένης κλιματολογίας.

9.1.1. Κλίμακες κλιμάτων

Από τους κλάδους της θεωρητικής κλιματολογίας, η **μακροκλιματολογία** εξετάζει το γενικό κλίμα μεγάλων εκτάσεων, μέσω των δικτύων συνοπτικών σταθμών. Αντίστοιχα, η **μεσοκλιματολογία** ασχολείται με το κλίμα μικρών εκτάσεων της επιφάνειας της Γης, που θεωρείται αντιπροσωπευτικό του κλίματος της ευρύτερης περιοχής. Επιπλέον, η **μικροκλιματολογία** μελετά τις λεπτές κλιματικές δομές του Ατμοσφαιρικού Οριακού Στρώματος (ΑΟΣ). Υπάρχει ακόμα η κλιματολογία του οριακού στρώματος τριβής, που μελετά γενικά το κλίμα μεγάλων περιοχών από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι το ύψος περίπου των 800-1.000 m, πάνω από το οποίο δεν υπάρχει

επίδραση της τριβής. Αναφέρεται ακόμα η κλιματολογία της ελεύθερης ατμόσφαιρας, που μελετά το κλίμα της ατμόσφαιρας πάνω από 1.000 m περίπου, όπου η επίδραση της τριβής είναι μηδενική. Τέλος, η τοποκλιματολογία μελετά τις σχέσεις μεταξύ των τοπικών κλιμάτων και των σχηματισμών του εδάφους. Τα ατμοσφαιρικά φαινόμενα ταξινομούνται σε διάφορες κλίμακες. Ωστόσο, η χρήση των όρων «μακροκλίματα», «μεσοκλίμακα» και «μικροκλίμακα» θεωρείται αυθαίρετη και φαίνεται να εξαρτάται από τις ανάγκες της κάθε εφαρμογής. Στη μετεωρολογική έρευνα και στις μετεωρολογικές εφαρμογές χρησιμοποιείται μια ολόκληρη κλίμακα από «μεσοκλίμακες» (Orlanski, 1975). Ενδεικτικά, αναφέρεται ότι ο όρος «μεσοκλίμακα» έχει εφαρμοσθεί σε μελέτη για ολόκληρο το υψηλό οροπέδιο του Θιβέτ, που αντιστοιχεί ανάμεσα στην πλανητική κλίμακα και την κλίμακα πρόγνωσης καιρού, καθώς και σε μελέτη μιας ομάδας φυτών, που αντιστοιχεί ανάμεσα στην κλίμακα ενός φύλλου και στην κλίμακα ενός ολόκληρου αγρού.



Σχήμα 9.1. *Ταξινόμηση κλιματολογίας.*

Ως γνωστόν, το ΑΟΣ έχει παρουσιαστεί αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3 της Γεωργικής Μικρομετεωρολογίας. Η γνώση της συμπεριφοράς του παρέχει, τουλάχιστον, δύο φυσικές κλίμακες, που είναι δυνατόν να ορίσουν τις μετεωρολογικές σφαίρες. Η πρώτη κλίμακα είναι το ημερήσιο ΑΟΣ, περίπου 1 χλμ., με συντελεστή αβεβαιότητας δύο, εξαρτώμενο από το τοπικό κλίμα. Το ΑΟΣ έχει στη διάρκεια της ημέρας αλληλεπίδραση με την επιφάνεια, είτε αυτή είναι ξηρά είτε βλάστηση είτε νερό. Η δεύτερη κλίμακα είναι το ύψος του αποκαλούμενου στρώματος επιφάνειας, περίπου 50 m, επίσης με συντελεστή αβεβαιότητας δύο. Κάτω από αυτό το επίπεδο, η ατμοσφαιρική συμπεριφορά εξαρτάται μόνιμα από την κατάσταση της υποκείμενης επιφάνειας, ενώ κάποιες δυνάμεις μακροκλίμακας, όπως η δύναμη Coriolis, δεν παίζουν ρόλο στο στρώμα εδάφους. Συνεπώς, τα μοντέλα επιφανειακού στρώματος, όπως τα μοντέλα εξάτμισης, είναι δύο διαστάσεων, δηλαδή ύψους και κατεύθυνσης κύριας οριζόντιας ροής, ενώ τα μοντέλα ΑΟΣ, όπως για τις θαλάσσιες αύρες, πρέπει να είναι τριών διαστάσεων. Ο καιρός σε αυτό το στρώμα-κάλυμμα είναι δυνατόν να ονομασθεί **μικροκαιρός**. Πάνω από τη βλάστηση, οριζόντιες κλίμακες στρωμάτων με δεδομένο ύψος προσδιορίζονται από την οριζόντια απόσταση, για προσαρμογή σε μια ξαφνική αλλαγή της υποκείμενης επιφάνειας. Ο λόγος ανάμεσα στην απόσταση προσαρμογής και στο ύψος προσαρμογής είναι τυπικά 100:1, για ολοκληρωτική προσαρμογή (WMO, 2001), ή 30:1, για μετριοπαθή προσαρμογή. Αντίστοιχα, η χρονική κλίμακα του στρώματος λαμβάνεται ως ο χρόνος που απαιτείται από ροή

ανέμου περίπου 5 ms^{-1}, για να διανύσει την απόσταση προσαρμογής. Από τα χαρακτηριστικά αυτά, εξάγονται μια σειρά από κλιματικές κλίμακες (Πίνακας 9.1). Ειδικότερα, στον Πίνακα 9.1 καταγράφεται ότι το εύρος της κάθε χωρικής κλίμακας συμπίπτει με την έκταση της περιοχής που καλύπτει, καθώς και με τη σχετική απόσταση προσαρμογής. Αντίστοιχα, για την κλίμακα χρόνου, υπάρχουν δύο καταγραφές, η περίοδος δειγματοληψίας και το ανώτατο όριο των διεργασιών στην εν λόγω κλίμακα.

Όνομα κλίμακας	Κλίμακα χρόνου	Οριζόντια κλίμακα	Κατακόρυφη κλίμακα
Μικροκλίμακα	0,1 sec-1 min	< 1 mm-100 m	< 1 mm-3 m
Τοποκλίμακα	3 sec-30 min	10 m-3 km	1 m-100 m
Μεσοκλίμακα	1 min-3 hr	300 m-30 km	10 m-1 km
Συνοπτική κλίμακα	1 hr-1 day	3 km-1.000 km	100 m-10 km
Μακροκλίμακα	½ day-1 week	30 km-10^4 km	1 km-20 km
Παγκόσμια κλίμακα	> 3 days	300 km-παγκόσμια	1 km-100 km

Πίνακας 9.1. *Περίληψη ατμοσφαιρικών κλιμάκων στο χρόνο και το χώρο.*

Η κατηγορία **μεσοκλίμακα** ορίζεται σύμφωνα με κοινές εφαρμογές, όπως είναι η εκτίμηση της θαλάσσιας αύρας ή της ροής κοιλάδας, η εξέλιξη καταιγίδας κτλ., και χαρακτηρίζεται **περιοχική** κλίμακα. Στην ορολογία της πρόγνωσης καιρού, η μεσοκλίμακα αντιστοιχεί στην **παροντική** (nowcasting) πρόγνωση ή πρόγνωση βραχείας διάρκειας για τις επόμενες λίγες ώρες. Επίσης, πρόγνωση καιρού μιας ή δύο εβδομάδων αντιστοιχεί στη **μακροκλίμακα**. Φυσικά, οι κατηγορίες κλίματος δεν ορίζονται αυστηρά μόνο από τις κλίμακες του Πίνακα 9.1. Για παράδειγμα, ένα τυπικό πρόβλημα είναι εκείνο της αναγνώρισης θυλάκων παγετού σε μια αρκετά μικρή περιοχή, όπως ένα περιβόλι με οπωροφόρα έκτασης 100 x 100 m^2. Αν και τα αποτελέσματα του παγετού εμφανίζονται μόνο σε μικρή κλίμακα, οι διαδικασίες έρευνας είναι τυπικές της **τοποκλιματολογίας**. Επιπλέον, αν συνυπολογίζονται και οι θερμοκρασίες φύλλων ή μπουμπουκιών, τότε η έρευνα θα υιοθετήσει πολλά χαρακτηριστικά ενός **μικροκλιματικού** προγράμματος. Τέλος, αν το περιβόλι με τα οπωροφόρα βρίσκεται στην πλαγιά μιας κοιλάδας, **μεσοκλιματικά** φαινόμενα, όπως πιθανοί καταβατικοί άνεμοι, πρέπει επίσης να εξετάζονται.

9.1.2. Κατηγορίες ταξινόμησης κλιμάτων

Η ταξινόμηση των κλιμάτων της Γης είναι εξαιρετικά πολύπλοκο θέμα. Τα κριτήρια για την ταξινόμηση κλιμάτων διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, στα αποτελέσματα της επίδρασης του κλίματος, όπως ερημικότητα ή φυτοκάλυψη, καθώς και στις αιτίες, που διαμορφώνουν τα διάφορα κλίματα, όπως θαλάσσια ρεύματα ή τοπικοί άνεμοι (π.χ. μουσσώνες). Υπάρχουν πολλές δυνατότητες ταξινόμησης κλιμάτων, ανάλογα με τον επιδιωκόμενο σκοπό (Oliver, 2005). Ωστόσο, τα όρια των κλιμάτων δεν είναι σαφή. Κατά συνέπεια, οι κλιματικές ταξινομήσεις θεωρούνται γενικές και ποιοτικές, καθόσον δεν έχει επιτευχθεί σαφής μαθηματική περιγραφή των ορίων των κλιμάτων.
Σκοπός της κλιματικής ταξινόμησης είναι η παροχή ενός αποτελεσματικού τρόπου κατάταξης των πληροφοριών, που αφορούν το κλίμα με όσο το δυνατόν απλούστερο τρόπο. Οι κύριες κατηγορίες κλιματικής ταξινόμησης είναι οι εξής:

I) Κλιματική ταξινόμηση κατά Koppen, με βάση τη βλάστηση και την ανάπτυξη των φυτών. Κλιματικοί παράμετροι είναι ο υετός και η θερμοκρασία.
II) Κλιματική ταξινόμηση κατά Thornthwaite, με βάση το ισοζύγιο ενέργειας και το υδατικό ισοζύγιο. Κλιματικοί παράμετροι είναι η θερμοκρασία, ο υετός και η εξατμισοδιαπνοή.
III) Κλιματική ταξινόμηση κατά Flohn και κατά Strahler, με βάση τη γενική κυκλοφορία της ατμόσφαιρας. Κλιματικοί παράμετροι είναι οι άνεμοι και η προέλευση αερίων μαζών.
IV) Βιοκλιματική ταξινόμηση κατά Steadman, με βάση το δείκτη δυσφορίας. Θερμική ισορροπία μεταξύ ανθρώπου και περιβάλλοντος.

Ειδικότερα:

I) Κλιματική ταξινόμηση κατά Koppen

Η αρχική κλιματική ταξινόμηση του W. Koppen (1900) βασίζεται στη συσχέτιση κλίματος και βλάστησης, χρησιμοποιώντας τον παγκόσμιο χάρτη ζωνών βλάστησης του De Candolle. Η αναθεωρημένη ταξινόμηση του

Koppen (1918) στηρίζεται στη θερμοκρασία και τη βροχόπτωση, καθώς και στην εποχική τους διακύμανση, ενώ έχει βελτιωθεί και προσαρμοστεί στη συνέχεια. Για τον προσδιορισμό των κύριων κλιματικών τύπων, έχουν χρησιμοποιηθεί τρεις κύριες ενότητες συμβόλων. Τα σύμβολα της πρώτης ενότητας (A, B, C, D, E, H) προσδιορίζουν γενικές θερμοκρασιακές καταστάσεις (Πίνακας 9.2), τα σύμβολα της δεύτερης ενότητας (F, f, m, s, T, w) προσδιορίζουν τα χαρακτηριστικά της βροχής (Πίνακας 9.3), εκτός από τα F και Τα, που αναφέρονται στη θερμοκρασία, ενώ τα σύμβολα της τρίτης ενότητας (a, b, c, d, h, k) προσδιορίζουν ειδικότερες θερμοκρασιακές καταστάσεις και εξειδικεύουν περισσότερο τις κατηγορίες κλιμάτων (Σχήμα 9.2).

A	Τροπικά κλίματα (θερμοκρασία ψυχρότερου μήνα > 18° C).
B	Ξηρά κλίματα (δεν υπάρχουν θερμοκρασιακοί περιορισμοί).
C	Θερμά εύκρατα κλίματα (βροχερά κλίματα, με ήπιους χειμώνες, μέση θερμοκρασία θερμομέτρου μήνα > 10° C, θερμοκρασία ψυχρότερου μήνα μεταξύ -3^0 C και +18° C).
D	Κλίματα ψυχρού βροχερού δάσους (δριμύς χειμώνες, μέση θερμοκρασία θερμότερου μήνα > 10° C).
E	Κλίματα τούνδρας ή αρκτικά κλίματα (μέση θερμοκρασία θερμότερου μήνα < 10° C).
F	Κλίματα αιώνιων πάγων (μέση θερμοκρασία θερμότερου μήνα < 0° C).

Πίνακας 9.2. *Κριτήρια θερμοκρασίας ταξινόμησης κλιματικών τύπων κατά Koppen*

Υετός	**Όριο μεταξύ κλίματος στέπας και ερήμου**	**Όριο μεταξύ κλίματος ψυχρού βροχερού δάσους και κλίματος στέπας**
Μέγιστο ύψος υετού τον χειμώνα	r* / t** = 1	r / t = 2
Υετός ομοιόμορφα κατανεμημένος	r / (t + 7) = 1	r / (t + 7) = 2
Μέγιστο ύψος υετού το καλοκαίρι	r / (t + 14) = 1	r / (t + 14) = 2
* r = ετήσιο ύψος υετού ** t = μέση ετήσια θερμοκρασία		

Πίνακας 9.3. *Κριτήρια ξηρότητας ταξινόμησης κλιματικών τύπων κατά Koppen*.

II) Κλιματική ταξινόμηση κατά Thornthwaite

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί για την ταξινόμηση κλιμάτων τη θερμοκρασία (T), τη βροχόπτωση (P) και την εξάτμιση (E). Βασίζεται στην έννοια της δυναμικής εξατμισοδιαπνοής (PE) και του υδατικού ισοζυγίου. Για τον υπολογισμό του υδατικού ισοζυγίου σε μηνιαία βάση, αρχικά υπολογίζεται η δυναμική εξατμισοδιαπνοή, που δίνεται από την εξίσωση:

$$PE = 1.6\,(10\,T/I)^{\alpha}, \quad (9.1)$$

όπου PE είναι η μηνιαία δυναμική εξατμισοδιαπνοή σε εκατοστά, Τα η μέση μηνιαία θερμοκρασία σε °C, ενώ ο εκθέτης α είναι συνάρτηση του I, που δίνεται από τη σχέση:

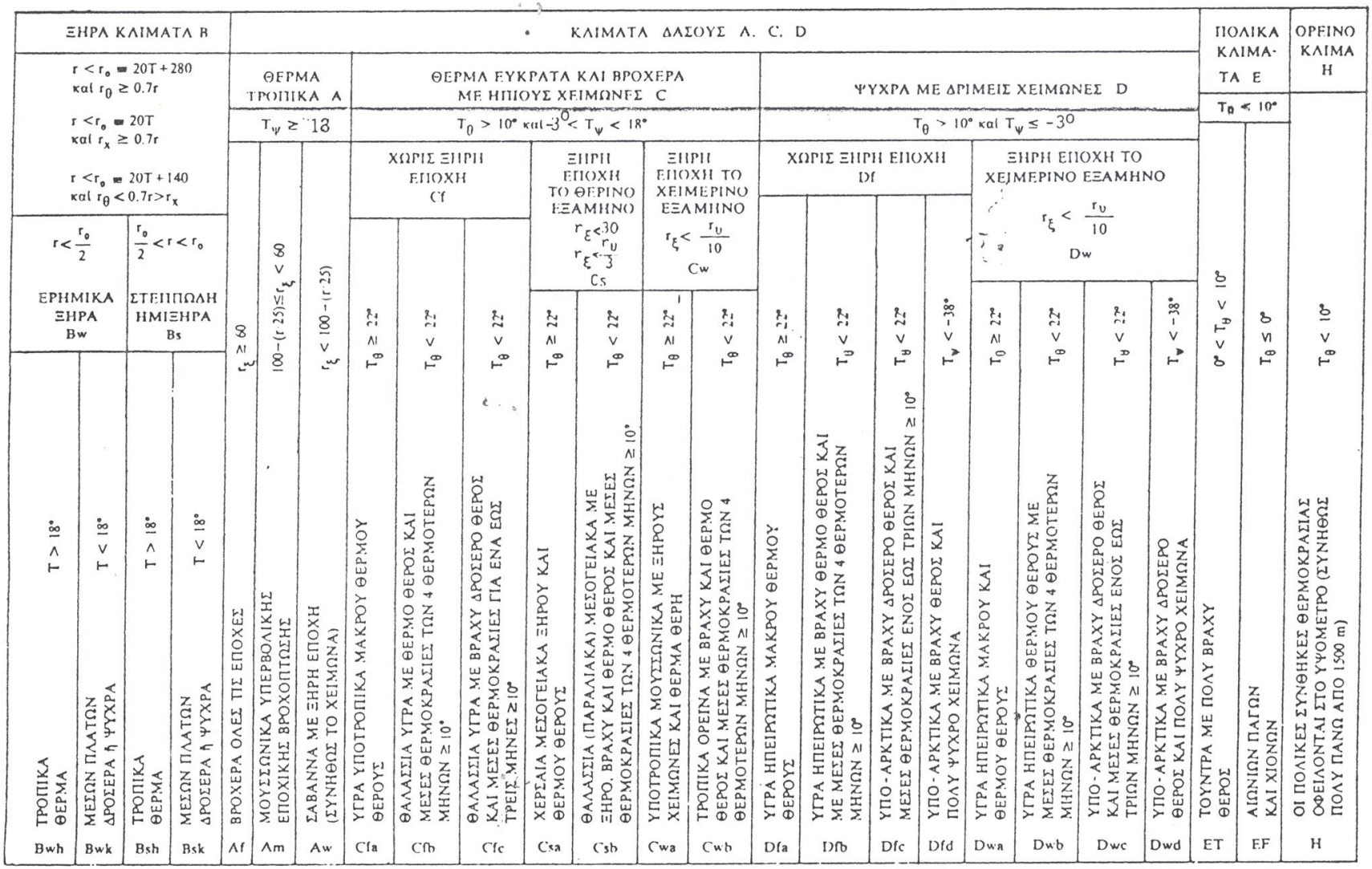
$$I = \sum_1^{12} (T/5)^{1.514}. \quad (9.2)$$

Στη συνέχεια, υπολογίζεται η επάρκεια υγρασίας του εδάφους για κάθε μήνα, που καθορίζεται από το μηνιαίο δείκτη υγρασίας $I_υ$ ως:

$$I_υ = 100\,(S - D) / PE, \quad (9.3)$$

όπου S είναι το μηνιαίο υδατικό πλεόνασμα και D το μηνιαίο υδατικό έλλειμμα.
Με την υπόθεση ότι η υγρασία του εδάφους παραμένει σταθερή, η εξίσωση (9.3) γίνεται:

$$I_υ = 100\,(P/PE) - 1. \quad (9.4)$$



Σχήμα 9.2. *Κύριοι κλιματικοί τύποι κατά Koppen*.

Για ολόκληρο το έτος, η επάρκεια υγρασίας καθορίζεται από το δείκτη:

$I_m = \sum_1^{12} I_u$, (9.5)

που είναι το άθροισμα των 12 μηνιαίων δεικτών.
Υπολογίζεται η αποθηκευμένη υγρασία στην υδατοϊκανότητα W_s και η πραγματική εξατμισοδιαπνοή (AE). Ισχύει:
(α) AE = PE, όταν W_s είναι στην υδατοϊκανότητα ή όταν (P – PE) > 0,
(β) AE = P + Δ W_s., δηλαδή μειωμένο W_s.
Ισχύει ακόμα:
D = (PE – AE) ή S = (P – PE) > 0, όταν W_s = < υδατοϊκανότητα.
Τελικά, στον Πίνακα 9.4 συνοψίζονται οι κατηγορίες κλιμάτων της μεθόδου Thornthwaite, με βάση τα κριτήρια της δυναμικής εξατμισοδιαπνοής και του δείκτη υγρασίας, που προκύπτουν από την παραπάνω διαδικασία.

III) Κλιματική ταξινόμηση κατά Flohn και κατά Strahler
Πρόκειται για δύο ανεξάρτητες κλιματικές ταξινομήσεις, που βασίζονται στη γενική κυκλοφορία της ατμόσφαιρας και στην κίνηση των αέριων μαζών. Ειδικότερα, η κλιματική ταξινόμηση κατά Flohn καταλήγει σε επτά κατηγορίες κλιμάτων της Γης (Πίνακας 9.5), με επιμέρους χαρακτηριστικά για την κάθε κατηγορία, με βάση τις υπάρχουσες αέριες μάζες ανά περιοχή ή κατηγορία, σύμφωνα με τη θεωρία της γενικής κυκλοφορίας της ατμόσφαιρας. Αντίστοιχα, η κλιματική ταξινόμηση κατά Strahler καταλήγει σε τρεις γενικές κατηγορίες κλιμάτων (Πίνακας 9.6), επίσης με επιμέρους χαρακτηριστικά ανά κατηγορία, βασιζόμενη επίσης στις αρχές της γενικής κυκλοφορίας της ατμόσφαιρας. Ας σημειωθεί ότι η κατανομή κλιματικών ζωνών με βάση τις παραπάνω δύο μεθόδους παρουσιάζει μεγάλες ομοιότητες με την αντίστοιχη κατανομή κατά Koppen.

IV) Βιοκλιματική ταξινόμηση κατά Steadman
Η βιοκλιματική ταξινόμηση κλιμάτων βασίζεται στο γνωστό δείκτη δυσφορίας (Discomfort Index/DI), που περιγράφεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 5 του παρόντος. Ως γνωστόν, ο δείκτης δυσφορίας βασίζεται σε εμπειρική εξίσωση της θερμοκρασίας του ξηρού και του υγρού θερμομέτρου και ισούται με την αισθητή θερμοκρασία για μεγάλο εύρος θερμοκρασιών, ενώ η αισθητή θερμοκρασία υπολογίζεται εμπειρικά, ως συνάρτηση της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας. Επιπλέον, ο δείκτης δυσφορίας συνυπολογίζει τόσο τις συνθήκες ψύχους, όσο και τις συνθήκες θερμικής δυσφορίας. Τελικά, η βιοκλιματική ταξινόμηση καταλήγει σε τρεις γενικές κατηγορίες, με επιμέρους υποκατηγορίες, όπως φαίνεται στον Πίνακα 9.7.

Δείκτης υγρασίας (lm)	**Χαρακτηρισμός κλίματος**	**Τύπος**	**Δυναμική Εξατμισοδιαπνοή (PE) cm**
lm 100	Διάβροχο	A	PE > 114
2 < lm < 100	Υγρό	B	57 < PE < 114
0 < lm < 20	Ημιυγρό προς υγρό	C_2	28,5 < PE < 57
–33 < lm < 0	Ημιυγρό προς ξηρό	C_1	14,2 < PE < 28,5
–67 < lm –33	Ημίξηρο	D	PE < 14,2
–100 < lm < –67	Ξηρό	E	

Πίνακας 9.4. *Κλιματική κατάταξη κατά Thornthwaite*.

1	Τροπικό ισημερινό κλίμα (συνεχώς υγρό).
2	Τροπικό κλίμα (αληγείς άνεμοι το χειμώνα, μέγιστο υετού το καλοκαίρι).
3	Υποτροπικό ξηρό κλίμα (αληγείς άνεμοι, συνθήκες ξηρασίας όλο το έτος).
4	Υποτροπικό κλίμα (μέγιστο υετού το χειμώνα), μεσογειακό.
5	Έξτρα-Τροπικό κλίμα (δυτικοί αληγείς άνεμοι, υγρό όλο το έτος).
6	Βόρειο ψυχρό κλίμα (μέγιστο υετού το καλοκαίρι).
7	Πολικό κλίμα (μέγιστου υετού το καλοκαίρι, χιονοπτώσεις από φθινόπωρο).

Πίνακας 9.5. *Κλιματική ταξινόμηση κατά Flohn*.

1	Χαμηλών γεωγραφικών πλατών (ισημερινές και τροπικές αέριες μάζες).
2	Μέσων γεωγραφικών πλάτων (τρόπικες και πολικές αέριες μάζες).
3	Υψηλών γεωγράφικων πλάτων (πολικές και αρκτικές αέριες μάζες).

Πίνακας 9.6. *Κλιματική ταξινόμηση κατά Strahler*.

1	**ΖΕΣΤΑ ΚΑΙ ΘΕΡΜΑ ΕΥΚΡΑΤΑ ΚΛΙΜΑΤΑ**
	Ερημικό
	Υποερημικό
	Μεσογειακό
	Τροπικό
2	**ΨΥΧΡΑ ΚΑΙ ΨΥΧΡΑ ΕΥΚΡΑΤΑ ΚΛΙΜΑΤΑ**
	Ψυχρό ερημικό
	Ψυχρό υποερημικό
	Ψυχρό στεπικό
	Ψυχρό υπόξηρο
	Ψυχρό ξηρό
3.	**ΠΑΓΕΤΩΔΗ ΚΛΙΜΑΤΑ**

Πίνακας 9.7. *Βιοκλιματική ταξινόμηση κλιμάτων.*

9.2. Αγροκλίμα

Η κλασική κλιματική στατιστική δεν θεωρείται επαρκής να αποδώσει ικανοποιητικά τα θέματα της αγροκλίματος. Στη γενική κλιματολογία είναι σύνηθες να καταγράφεται μια θετική απόκλιση από τη μακροπρόθεσμη μέση τιμή της βροχής ή θερμοκρασίας ως «αρκετά υγρή» ή «αρκετά θερμή», αντίστοιχα, καθώς και μια αρνητική απόκλιση ως «αρκετά ξηρή» ή «αρκετά κρύα». Η εφαρμογή τέτοιων εκτιμήσεων θεωρείται ανεπαρκής στην αγροκλιματολογία, αφού δεν μπορούν να χαρακτηρίσουν ικανοποιητικά την πραγματική κατάσταση (Oke, 1988· Seemann et al., 1979· Salinger et al., 2006· Δαλέζιος, 2011). Επισημαίνεται χαρακτηριστικά ότι αθροίσματα θερμοκρασιών ή μέσοι περιοχικοί όροι μπορεί να αποτελούνται από πολύ διαφορετικές μεμονωμένες τιμές, καθεμία εκ των οποίων έχει διαφορετική βιολογική επίδραση, ιδίως όταν επικρατούν για μεγάλο χρονικό διάστημα. Κατά συνέπεια, είναι χρήσιμο να μορφοποιηθούν συνδυασμοί διαφόρων κλιματικών στοιχείων, με τη βοήθεια μοντέλων και την ανάπτυξη μεθοδολογιών. Για παράδειγμα, πόσο συχνά μπορεί να υπάρχει σε συγκεκριμένες περιοχές συγκομιδή σιτηρών με περιεκτικότητα υγρασίας 20%, 18%, 16% ή 14%; Η απάντηση προϋποθέτει τη δημιουργία αγρομετεωρολογικού μοντέλου για τον προσδιορισμό των διεργασιών ξήρανσης σε σχέση με τον καιρό.

9.2.1. Αγροτοποκλίμα

Η γεωργική δραστηριότητα λαμβάνει κυρίως χώρα σε ένα ατμοσφαιρικό στρώμα μόνο μερικών μέτρων από την επιφάνεια του εδάφους, δηλαδή μέχρι περίπου 5 m σε περιβόλια με οπωροφόρα, ενώ στα δάση μπορεί να επεκτείνεται μέχρι τα 20 ή 30 m. Κατά συνέπεια, τα ατμοσφαιρικά φαινόμενα που επιδρούν άμεσα στις σοδειές, στα ζώα, στα αγροτικά κτίρια, στον εξοπλισμό και στις γεωργικές εργασίες ανήκουν κυρίως στην **τοποκλίμακα**. Σε μερικές περιπτώσεις οι ατμοσφαιρικές μεσοκλιματικές συνθήκες στα υψηλότερα στρώματα, όπως η ατμοσφαιρική ευστάθεια, μπορεί να είναι σημαντικές για τη γεωργία, ιδίως σε συνδυασμό με τη μεταφορά και τη διάχυση των σποριδίων, της γύρης, των εντόμων και των μολυσματικών ουσιών. Σύμφωνα με έναν σχετικά αυθαίρετο, αλλά χρήσιμο, ορισμό, **τοποκλιματολογίας** είναι η μελέτη των τροποποιήσεων των περιοχικών κλιμάτων λόγω χαρακτηριστικών, που είναι δυνατόν να επισημανθούν σε χάρτες κλίμακας από $1{:}10^3$ μέχρι $1{:}10^5$. Τα χαρακτηριστικά αυτά δίνουν κλιματικά πρότυπα που μπορούν να ονομαστούν **τοποκλίμα.** Όταν το τοποκλίμα εξετάζεται σε σχέση με τη γεωργία, τότε, εξ ορισμού, ονομάζεται **αγροτοποκλιματολογία** (WMO, 2010). Ο όρος **τοπογραφία** σχετίζεται επίσημα με χαρακτηριστικά του επιπέδου, καθώς επίσης και του μη επιπέδου εδάφους, αλλά ο συχνός συσχετισμός με κυματοειδείς και ορεινές περιοχές καθιστά τον όρο **μεσοκλιματολογία** πιο κατάλληλο για μελέτες κλίματος λοφώδους περιοχής.
Οι αγροτοποκλιματολογικές έρευνες και μελέτες περιλαμβάνουν συνήθως:

- προσδιορισμό της καταλληλότητας περιοχών για την καλλιέργεια συγκεκριμένων προϊόντων (π.χ. αμπέλια, είδη φρούτων ή μιας επιλογής καλλιεργήσιμων προϊόντων), που υπόσχονται καλή επένδυση σε κάποια έκταση,
- προσδιορισμό των εκτάσεων στις οποίες μπορεί να παρατηρηθούν καταστροφές ή ζημιές στο περιβάλλον, τα φυτά και τα ζώα, εξαιτίας τοποκλιματολογικών αιτίων,
- στατιστική και πιθανολογική ανάλυση για τη βελτίωση του τοποκλίματος.

Ένα χαρακτηριστικό γνώρισμα της μικροκλιματολογίας είναι η έμφαση στις αλλαγές θερμοκρασίας και ισοζυγίου ενέργειας και μάζας, που προκύπτουν ως αποτέλεσμα της αλληλοεπίδρασης τόσο μεταξύ των τοπικών κλιματικών στοιχείων της περιοχής, όσο και των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών της επιφάνειας του εδάφους. Η τοποκλιματολογία αναγνωρίζει διαφορές συνθηκών χαμηλού επιπέδου, όπως ανάμεσα σε συνεχόμενες περιοχές χέρσου εδάφους και βοσκοτόπων, άμμου και ανοικτών υδάτινων επιφανειών. Ο τύπος της βλάστησης που καλύπτει από χέρσες μέχρι πυκνά δασώδεις περιοχές περιλαμβάνεται στον κατάλογο αυτό. Για να εκτιμηθεί η οικονομική σημασία οποιασδήποτε προτεινόμενης ενέργειας που στοχεύει, για παράδειγμα, στη μείωση του κινδύνου από έντονες καταιγίδες ή στο όφελος της προστασίας από τον άνεμο, είναι ζωτικής σημασίας η στατιστική ανάλυση των σχέσεων μεταξύ έντασης, διάρκειας και συχνότητας τέτοιων ή γενικά ακραίων φαινομένων, που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 13 για βροχή.

9.2.1.1. Τοποκλίμα

Το τοποκλίμα τοποθετείται ανάμεσα στο μακροκλίμα και στο μικροκλίμα. Ως γνωστόν, η μακροκλιματολογία βασίζεται σε ένα ευρύ δίκτυο παρατηρήσεων και δεν καταγράφει τα ειδικά χαρακτηριστικά, που είναι επακόλουθα των τοπογραφικών διαφορών του εδάφους, ενώ το μικροκλίμα συνίσταται από περιοχές που είναι πάρα πολύ μικρές. Για το τοποκλίμα μιας ευρύτερης περιοχής, απαιτούνται μέθοδοι μέτρησης διαφορετικές από εκείνες που χρησιμοποιούνται γενικά στην κλιματολογία, και κυρίως πολύ πιο πυκνά δίκτυα παρατηρήσεων. Ειδικότερα, η αγροτοποκλιματολογία θεωρείται ένα ειδικό μέρος της γενικής τοποκλιματολογίας, που περιγράφει την κλιματική καταλληλότητα μιας έκτασης γης για συγκεκριμένα γεωργικά φυτά ή για ζώα αγροκτήματος. Η σπουδαιότητα των τοποκλιματολογικών ερευνών για εφαρμογές στην αγρομετεωρολογία καταδεικνύεται από τον μεγάλο αριθμό των σχετικών δημοσιευμάτων. Για παράδειγμα, από έρευνες σε περιοχές υψιπέδων έχει επισημανθεί ότι η περιοχική έκταση της θερμοκρασιακής μείωσης μεταξύ κοιλάδων και κορυφών εξαρτάται τόσο από την τοπογραφία, όσο και από την εποχή του έτους με σημαντικές διαφοροποιήσεις. Στον Πίνακα 9.8 δίνεται χαρακτηριστικά η μείωση της θερμοκρασίας με το ύψος. Οι εποχικές διακυμάνσεις της θερμοκρασίας αέρα καταδεικνύουν, επίσης, αισθητές διαφορές, που εξαρτώνται από τη γενική τοπογραφία, δηλαδή από το πλάτος των κοιλάδων και των παρακείμενων βουνών. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 9.8, η μείωση των ελαχίστων θερμοκρασιών με το υψόμετρο είναι μικρότερη από εκείνη των μεγίστων θερμοκρασιών, λόγω κυρίως των συχνά εμφανιζομένων θερμοκρασιακών αναστροφών τη νύχτα μέχρι κάποια συγκεκριμένα υψόμετρα.

	Χειμώνας			Καλοκαίρι		
	Για τη σύγκριση των σταθμών σε m					
	Στενές κοιλάδες	Μεγάλες κοιλάδες	Ανοιχτό ύψωμα	Στενές κοιλάδες	Μεγάλες κοιλάδες	Ανοιχτό ύψωμα
Μέγιστη	–0,7	–0,7	–1,0	–1,0	–1,2	–1,4
Ελάχιστη	–0,8	–0,5	–0,6	–1,2	–0,5	0,4

Πίνακας 9.8. *Μείωση των ακραίων θερμοκρασιών με κάθε 100m αύξηση του υψομέτρου (°C τιμές κατά προσέγγιση)*

Επίσης έχουν πραγματοποιηθεί πανομοιότυπα πειράματα σε φυτά, όπως μπιζέλια, των οποίων τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι μετεωρολογικές διαφορές των δύο τοποθεσιών επηρέασαν πρωταρχικά τη φάση της αναπαραγωγής. Στον Πίνακα 9.9 παρουσιάζονται οι αριθμοί των μπουμπουκιών που σχηματίστηκαν στα φυτά του μπιζελιού σε πέντε διαφορετικές περιπτώσεις σποράς. Τα παραπάνω πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν την πρακτική σπουδαιότητα των αγροτοποκλιματολογικών μελετών.
Επιπλέον, σημαντικής σημασίας για την τοποκλιματολογία είναι η διαφοροποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας, ως επακόλουθο του ανόμοιου προσανατολισμού της τέμνουσας επιφανείας. Ενδεικτικά, στον Πίνακα 9.10

παρουσιάζεται η έκταση της απόκλισης των μηνιαίων ποσών ηλιασμού της άμεσης ηλιοφάνειας σε πλαγιές με διαφορετικές κλίσεις και διαφορετικούς προσανατολισμούς.

	Καλλιεργητική περίοδος 1964		**Καλλιεργητική περίοδος 1965**		
	10,5-25,6	27,5-8,7	28,5-10,8	16,6-1,9	10,7-14,9
Επίπεδο έδαφος	100%	100%	100%	100%	100%
Υψίπεδο (κορυφή)	95%	69%	47%	57%	69%

Πίνακας 9.9. *Αριθμός οφθαλμών που σχηματίζονται σε φυτά μπιζελιού σε %.*

Η τοπογραφία παίζει ρόλο όχι μόνο όσον αφορά τη μεγαλύτερη θερμότητα στη διάρκεια της ημέρας, αλλά και την τοπική ψύχρανση στο στρώμα αέρα κοντά στο έδαφος τη νύχτα, ιδίως σε συνδυασμό με όψιμους ή πρώιμους παγετούς. Ως γνωστόν, η θερμοκρασία κοντά στο έδαφος πέφτει σημαντικά, κυρίως σε ξάστερες νύχτες, όταν το έδαφος έχει αποθηκεύσει λίγη από τη θερμότητα της ημέρας λόγω πτωχής θερμικής αγωγιμότητας ή μη ευνοϊκού ηλιασμο
ύ (insolation). Εξαιτίας των διαφορετικών ωρών της αληθινής δύσης του ήλιου για ξεχωριστά σημεία, όπως πλαγιές, κοιλάδες και κοιλώματα, καθώς επίσης και των ανόμοιων ιδιοτήτων των εδαφών και του επιστρώματός τους, η ψύχρανση τη νύχτα αρχίζει συνήθως νωρίτερα σε μερικά σημεία σε επίπεδο, καθώς επίσης και σε λοφώδες έδαφος, αλλά και με διαφορετικό ρυθμό. Συνεπώς, περιοχές με διαφορετικούς βαθμούς ψύχρανσης σχηματίζονται κοντά στο έδαφος ήδη από τη δύση του ήλιου. Οι θερμοκρασιακές διαφορές επιφέρουν, τελικά, αντισταθμιστική ροή ανέμου. Η τραχύτητα της επιφανείας, λόγω κυρίως της ύπαρξης και της ανάπτυξης φυτών, διαδραματίζει επίσης εμφανή ρόλο. Ως συνέπεια, ευρείες περιοχές επιπέδου εδάφους είναι συχνά ψυχρές σε ανέφελες νύχτες με ασθενείς ανέμους ή άπνοια, καθόσον εγκλωβίζεται ο ψυχρός αέρας μέσα σε αυτές. Αντίστοιχα, σε επικλινή εδάφη, ο ψυχρός αέρας γίνεται καταβατικός στην πλαγιά αμέσως μόλις αποκτήσει επαρκή ισχύ. Στην ουσία, η ροή ψυχρού αέρα αρχίζει νωρίς το βράδυ. Συμπερασματικά, σε περιοχές με μειωμένο κίνδυνο

Μήνας	Κλίση	N	NE	E	SE	S	Διαφορά μεταξύ βορινής και νότιας κλίσης
			NW	W	SW		
Δεκέμβριος	0 = Επίπεδο	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	0,0
	10 = Κλίση	0,7	1,2	2,0	3,0	3,5	2,8
	20	0,0	0,6	2,0	4,0	5,0	5,0
	30		0,1	2,0	4,8	6,0	6,0
	90 = Απότομη κλίση			1,4	5,7	8,3	8,3
Μάρτιος	0 = Επίπεδο	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	0,0
	10 = Κλίση	7,1	7,9	9,2	10,6	11,2	4,1
	20	4,9	5,6	8,9	11,8	12,8	7,9
	30	2,1	4,6	8,7	12,6	14,1	12,0
	90 = Απότομη κλίση		1,2	5,6	8,8	12,2	12,2
Ιούνιος	0 = Επίπεδο	18,6	18,6	18,6	18,6	18,6	0,0
	10 = Κλίση	17,8	18,1	18,7	19,4	19,5	1,7
	20	16,5	17,0	18,4	19,7	19,6	3,1
	30	14,2	15,0	17,5	18,8	18,8	4,6
	90 = Απότομη κλίση	2,0	5,4	8,8	8,0	7,0	5,0
Σεπτέμβριος	0 = Επίπεδο	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	0,0
	10 = Κλίση	9,2	9,6	11,0	12,1	12,9	3,7
	20	6,5	8,0	10,9	12,2	14,4	7,9
	30	3,9	6,3	10,6	13,8	15,4	11,5
	90 = Απότομη κλίση		1,8	6,3	9,9	11,2	11,2

Πίνακας 9.10. *Συνολική μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία από άμεσο ηλιακό φως σε kcal/cm^2, για καιρό χωρίς σύννεφα, για διάφορες κλίσεις και προσανατολισμούς, για φ = 50^o.*

παγετού στην απάνεμη πλευρά του εμποδίου, ενδείκνυται η φύτευση λωρίδων δασών κατά πλάτος της πλαγιάς ή κοιλάδας, που ισχύει μόνον όταν υπάρχει μια σχετικά μεγάλη κλίση στην απάνεμη πλευρά, έτσι ώστε ο ψυχρός αέρας κάτω από το εμπόδιο να μπορεί να φύγει μακριά. Τελικά, το ρεύμα ψυχρού αέρα και η συγκέντρωσή του σε κοιλάδες ή κοιλώματα παραμένουν αποτελέσματα της τοπογραφίας με μεγάλη σημασία στην αγροτοποκλιματολογία, λόγω της επακόλουθης αύξησης του κινδύνου παγετού.
Συνοπτικά, επισημαίνεται η διαφοροποίηση των συνθηκών θερμοκρασίας, λόγω της τοπογραφίας, και η μεγάλη σημασία της στο σχεδιασμό γεωργικής φύτευσης. Ειδικότερα, τονίζεται ότι η άνοδος της θερμοκρασίας του αέρα κοντά στο έδαφος δεν παράγεται μόνο από τη διαφορετική εισροή ενέργειας λόγω ηλιακής ακτινοβολίας, αλλά επηρεάζεται επίσης από τις διαφορετικές συνθήκες ανταλλαγής θερμότητας ή από τον άνεμο. Ως γνωστόν, σημεία που προστατεύονται από τον άνεμο γίνονται πολύ πιο θερμά στο φως του ήλιου, από ό,τι τα σημεία με ισχυρότερο άνεμο. Αυτές οι διαφορές στην ένταση του ανέμου οφείλονται ουσιαστικά στην τοπογραφία. Ειδικότερα, το είδος του εδάφους μπορεί να επηρεάσει το πεδίον των ανέμων, καθόσον υπάρχουν τοπικά συστήματα ανέμου, όπως ο άνεμος των ορέων και ο άνεμος της κοιλάδας ή η απόγεια και η θαλάσσια αύρα. Τελικά, στο σχεδιασμό καλλιεργειών σε περιοχές στις οποίες εμφανίζεται παγετός κατά την έναρξη ή το τέλος της βλαστικής περιόδου, μια από τις πλέον σημαντικές λειτουργίες της εφαρμοσμένης αγροτοποκλιματολογίας είναι να βρεθούν τα σημεία όπου υπάρχει συσσώρευση ψυχρού αέρα, δηλαδή παραλλακτικότητα στον αγρό, και αν είναι δυνατόν, να εξαλειφθούν από τη χρήση για καλλιεργούμενα που είναι ευαίσθητα στον παγετό.

9.2.1.2. Αντιπροσωπευτικότητα μετεωρολογικών παρατηρήσεων στην τοποκλίμακα

Για την πρόγνωση ή την ανάλυση της αλληλοεπίδρασης ατμόσφαιρας-βλάστησης, απαιτούνται αντιπροσωπευτικά μετεωρολογικά δεδομένα, όπως θερμοκρασία, υγρασία, βροχόπτωση, άνεμος, ακτινοβολία και άλλα συναφή, ακριβώς πάνω και δίπλα στο καλλιεργούμενο προϊόν ή κοντά στο στάβλο, δηλαδή στην **τοποκλίμακα**. Πληροφορίες τελικά χρειάζονται σε μικροκλίμακα, εντός της καλλιέργειας ή εντός του στάβλου. Στην περίπτωση έλλειψης άμεσων παρατηρήσεων, είναι δυνατή η εκτίμηση των μετεωρολογικών παραμέτρων με μεθόδους στατιστικής χωρικής παρεμβολής, όπως η γεωστατιστική ανάλυση (Dalezios & Tyraskis, 1989). Μία επιπλέον προσέγγιση για τη λήψη πυκνής χωρικής κατανομής αγρομετεωρολογικών παραμέτρων είναι η χρήση δεδομένων ή εκτιμήσεων με μεθόδους τηλεπισκόπησης (βλ. Κεφάλαιο 11).
Υπάρχει, βέβαια, ανάγκη για δίκτυα τοπικών αγρομετεωρολογικών σταθμών **μεσοκλίμακας** για αριθμό αγρομετεωρολογικών παραμέτρων και μεταβλητών, του οποίου κύρια πηγή του είναι η επιφάνεια, καθόσον η τοποκλιματική τους συμπεριφορά εξαρτάται από τις τοπικές συνθήκες επιφάνειας, βλάστησης και ακτινοβολίας. Επισημαίνονται ενδεικτικά τέτοιες παράμετροι σημαντικές για τη γεωργία, όπως η υγρασία του αέρα, η ύγρανση φύλλου (leaf wetness), το επιφανειακό ισοζύγιο ενέργειας, η μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία του αέρα, οι θερμοκρασίες εδάφους, καθώς και η υγρασία εδάφους.

9.2.2 Μικροκλίμα και φυτοκλίμα

Το **μικροκλίμα**, δηλαδή το κλίμα μιας μικρότερης περιοχής μέσα σε μια περιφέρεια, δημιουργείται από την επίδραση του ανάγλυφου του εδάφους, την επιφάνεια του εδάφους και άλλων παραγόντων, που καθορίζουν την ανομοιότητα μεταξύ θερμοκρασίας αέρα και εδάφους, υγρασίας και έντασης ανέμου (Mavi & Tupper, 2004). Τα χαρακτηριστικά ενός μικροκλίματος είναι φανερά στα στρώματα του αέρα κοντά στο έδαφος. Με το ανάγλυφο δημιουργούνται αξιοσημείωτες διαφορές θερμοκρασίας εδάφους και αέρα μεταξύ περιοχών που απέχουν αρκετές δεκάδες μέτρα. Αυτές οι διαφορές υπάρχουν μέχρι ένα ύψος μερικών μέτρων, μειώνονται με το υψόμετρο και τελικά εξισορροπούνται, λόγω ανάμειξης και στροβιλισμού του αέρα.
Σε μεσογειακό κλίμα, με άπνοιες και ανέφελο καιρό, αυτές οι διαφορές θερμοκρασίας είναι ιδιαίτερα αξιοσημείωτες, φτάνοντας σε ύψος αρκετών δεκάδων μέτρων. Ειδικότερα σε τέτοιες μέρες, η επιφανειακή θερμοκρασία του εδάφους διαφέρει μεταξύ βόρειων και νότιων πλαγιών, με μικρή φυτοκάλυψη, κατά 10°-12°C. Σε ύψος 20 εκατοστών από αυτό το έδαφος, η διαφορά φτάνει στους 3°-5° C. Αντίστοιχα, σε ανέφελες νύχτες, με άπνοια, δημιουργούνται σημαντικές μικροκλιματικές διαφορές, λόγω ψύξης από ακτινοβολία, αλλά και από μετακίνηση ψυχρότερων μαζών αέρα σε χαμηλότερα υψόμετρα. Για το λόγο αυτό, η ελάχιστη θερμοκρασία αέρα στα χαμηλά σημεία απότομων πλαγιών, αλλά και κοιλοτήτων, είναι μικρότερη κατά 3°-5° C από ό,τι στο υψηλότερο επίπεδο. Επίσης, στη διάρκεια ανοιξιάτικων ή φθινοπωρινών παγετών, το μικροκλίμα των παραπάνω περιοχών δεν είναι ευνοϊκό για τις καλλιέργειες, καθώς μειώνει την ελεύθερη παγετού περίοδο. Αντίθετα, παρατηρείται μικρότερη ένταση ανοιξιάτικων ή φθινοπωρινών παγετών, καθώς και μεγαλύτερη ελεύθερη παγετού περίοδος στις υψηλότερες περιοχές των πλαγιών, στις όχθες μεγάλων ποταμών και λιμνών.

Επισημαίνεται ότι το μικροκλίμα πλαγιών, κοιλάδων και κορυφογραμμών λόφων χαρακτηρίζεται από τα στοιχεία αυτά του ανάγλυφου. Ειδικότερα, το μικροκλίμα των πλαγιών εξαρτάται από την έκθεσή τους και την κλίση τους προς την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία. Για το λόγο αυτό, το χιόνι λιώνει νωρίτερα στις νότιες πλαγιές, το έδαφος θερμαίνεται και στεγνώνει πιο γρήγορα, η πρώιμη σπορά είναι δυνατή και η ωρίμανση των καλλιεργειών είναι πιο σίγουρη. Επίσης, το μικροκλίμα των νότιων πλαγιών είναι ξηρότερο από αυτό των οροπεδίων με αρκετή υγρασία. Αντίστοιχα, σε περιοχές στέπας, το κατάλληλο μικροκλίμα δημιουργείται με την άρδευση. Επιπλέον, το μικροκλίμα λιβαδιών, χώρων που περιβάλλονται από δέντρα ή δάση, καθώς και παράκτιων περιοχών λιμνών, είναι αποτέλεσμα της ανομοιότητας της θέρμανσης από ακτινοβολία της υποκείμενης επιφάνειας. Αντίθετα, το μικροκλίμα μιας πόλης μορφοποιείται, ως αποτέλεσμα της αστικής δόμησης και ανάπτυξης. Τέλος, επισημαίνεται ότι είναι απαραίτητο να μελετηθούν τα ημερήσια και νυχτερινά μικροκλιματικά χαρακτηριστικά ξεχωριστά, αφού οι φυσικές διεργασίες θέρμανσης την ημέρα και ψύξης τη νύχτα των υποκείμενων επιφανειών γίνονται με διαφορετικό τρόπο.

Ένας ειδικός τύπος μικροκλίματος, το **φυτοκλίμα**, δημιουργείται ανάμεσα στα φυτά. Το φυτοκλίμα, δηλαδή οι μετεωρολογικές συνθήκες που δημιουργούνται ανάμεσα στα φυτά, είναι ένα τροποποιημένο μικροκλίμα. Καθορίζεται από τη δομή της φυτοκάλυψης, δηλαδή από το ύψος των φυτών, την πυκνότητά τους, τη φυλλική επιφάνεια, τον τρόπο με τον οποίο τα φυτά είναι κατανεμημένα στο χώρο (π.χ. σε σειρές), καθώς και το πλάτος μεταξύ των γραμμών σποράς. Το φυτοκλίμα ίδιων καλλιεργειών μπορεί να ποικίλλει αρκετά, ανάλογα με τον τύπο κατανομής των φυτών στο χώρο, ή μπορεί να είναι το ίδιο, όπως στην περίπτωση διαφορετικών καλλιεργειών, που υφίστανται κάτω από όμοιες κατανομές στο χώρο. Επισημαίνεται ότι, ανάλογα με τα είδη, την προδιάθεση και την ηλικία μιας φυτοκοινωνίας, την πυκνότητα της φυτείας και τον τρόπο σποράς ή φύτευσης, η ένταση του φωτισμού, η θερμοκρασία του αέρα και του εδάφους, η υγρασία του αέρα και του εδάφους, και η ένταση του ανέμου διαφέρουν σημαντικά σε μια ευρεία περιοχή. Για παράδειγμα, σε μια θέση αναπτυγμένης, φυτείας με κατακόρυφη ανάπτυξη, όπως το καλαμπόκι, η ένταση φωτισμού στην επιφάνεια του εδάφους μπορεί να είναι 5-10 φορές μικρότερη από ό,τι αν η θέση ήταν ακάλυπτη. Χαρακτηριστικά, επισημαίνεται ότι, κάτω από πυκνό φύλλωμα, η θερμοκρασία του αέρα το μεσημέρι μιας ζεστής ημέρας είναι 4°-5° C χαμηλότερη και η θερμοκρασία στην επιφάνεια του εδάφους είναι 15°-25° C χαμηλότερη από ό,τι σε μη σκιαζόμενη θέση, ενώ και η σχετική υγρασία του αέρα είναι 10-20% υψηλότερη.

Για να υπολογιστούν κατάλληλα οι συνθήκες ανάπτυξης των καλλιεργειών, η μελέτη του φυτοκλίματος είναι πολύ σημαντική. Τα χαρακτηριστικά του φυτοκλίματος των καλλιεργειών καθορίζονται μέσω της μέτρησης βασικών μετεωρολογικών παραμέτρων, όπως είναι η θερμοκρασία, η υγρασία του αέρα, η ένταση του φωτισμού και η ένταση του ανέμου, σε μια κάθετη τομή ανάμεσα στα φυτά. Οι μετρήσεις γίνονται τόσο ανάμεσα, όσο και πάνω στις γραμμές ή στις ομάδες. Ταυτόχρονα, καταγράφονται το ύψος των φυτών, η φυλλική επιφάνεια, καθώς και η πυκνότητα των φυτών ανά τετραγωνικό μέτρο χωραφιού. Η μελέτη του μικροκλίματος και φυτοκλίματος σε περιπτώσεις διαφορετικών αναγλύφων γίνεται μετρώντας τις θερμοκρασιακές και τις υγρασιακές συνθήκες, καθώς και την ένταση του ανέμου σε αρκετά σημεία, όπως σε κορυφογραμμές, πλαγιές και κοιλάδες. Στην περίπτωση αυτή, συνυπολογίζεται η επίδραση των συνθηκών του περιβάλλοντος, όπως η απόσταση από υδάτινους όγκους ή δάση. Τα αποτελέσματα των παρατηρήσεων στα διάφορα σημεία συγκρίνονται μεταξύ τους, καθώς και με τα στοιχεία μιας περιοχής αναφοράς. Ενδεικτικά, επισημαίνεται ότι χάρτες μεγάλης κλίμακας που χαρακτηρίζουν το μικροκλίμα καλλιεργειών και κήπων έχουν βασιστεί σε μικροκλιματικές παρατηρήσεις. Η σύνθεση τέτοιων χαρτών έχει μεγάλο πρακτικό ενδιαφέρον στη γεωργία, αφού η μικροκλιματική ανομοιότητα επηρεάζει σημαντικά και την ανάπτυξη της καλλιέργειας, αλλά και τη συγκομιδή.

Η βελτίωση του μικροκλίματος των γεωργικών περιοχών είναι σημαντική για την αύξηση της απόδοσης των καλλιεργειών. Στις βόρειες περιοχές, όπου το κλίμα είναι αρκετά ψυχρό και υγρό, οι κύριες μέθοδοι βελτίωσης του μικροκλίματος είναι η μείωση της υπερβολικής υγρασίας του εδάφους, διαμορφώνοντας το έδαφος σε σειρές αναχωμάτων, αλλά και η παρεμπόδιση της μετακίνησης ψυχρών αέριων μαζών στις πλαγιές. Σε ξηρές περιοχές, διάφορες μέθοδοι συντήρησης της υγρασίας του εδάφους και άρδευσης χρησιμοποιούνται για να βελτιωθεί το μικροκλίμα. Επίσης, επισημαίνεται ότι λωρίδες δάσους αλλάζουν τη δομή του ανέμου, προκαλώντας μείωση της έντασής του μεταξύ των λωρίδων, που, σε περιόδους ζέστης και υγρασίας, μειώνει τη διατάραξη του φυτοκλίματος των αγρών. Αντίθετα, το χειμώνα, οι λωρίδες δάσους διευκολύνουν τη συσσώρευση χιονιού, αλλά και την ομοιόμορφη κατανομή του ανάμεσα στις λωρίδες. Τέτοιες λωρίδες, αλλά με κενά πάνω στην ίδια λωρίδα, θεωρούνται καλύτερες, καθόσον η ροή του αέρα μειώνεται και, επιπλέον, δεν υπάρχουν στροβιλισμοί. Πίσω από τη λωρίδα, σε απόσταση ίση με 3-5 φορές το ύψος της, επικρατεί πολύ ασθενής άνεμος, ενώ συγχρόνως μείωση του στροβιλισμού επιτυγχάνεται σε απόσταση 15-20 φορές το ύψος

της λωρίδας. Αυτό προστατεύει το έδαφος από τη διάβρωση λόγω ισχυρού ανέμου. Το μεγαλύτερο αποτέλεσμα μιας λωρίδας δάσους επιτυγχάνεται σε μια απόσταση ίση με 25 φορές το ύψος της λωρίδας, δηλαδή, για ύψος 20 m, η απόσταση μεταξύ των λωρίδων πρέπει να είναι 500 m. Ως αποτέλεσμα της μείωσης του στροβιλισμού μεταξύ των λωρίδων, προκύπτει ένα πιο κατάλληλο μικροκλίμα για γεωργική ανάπτυξη.

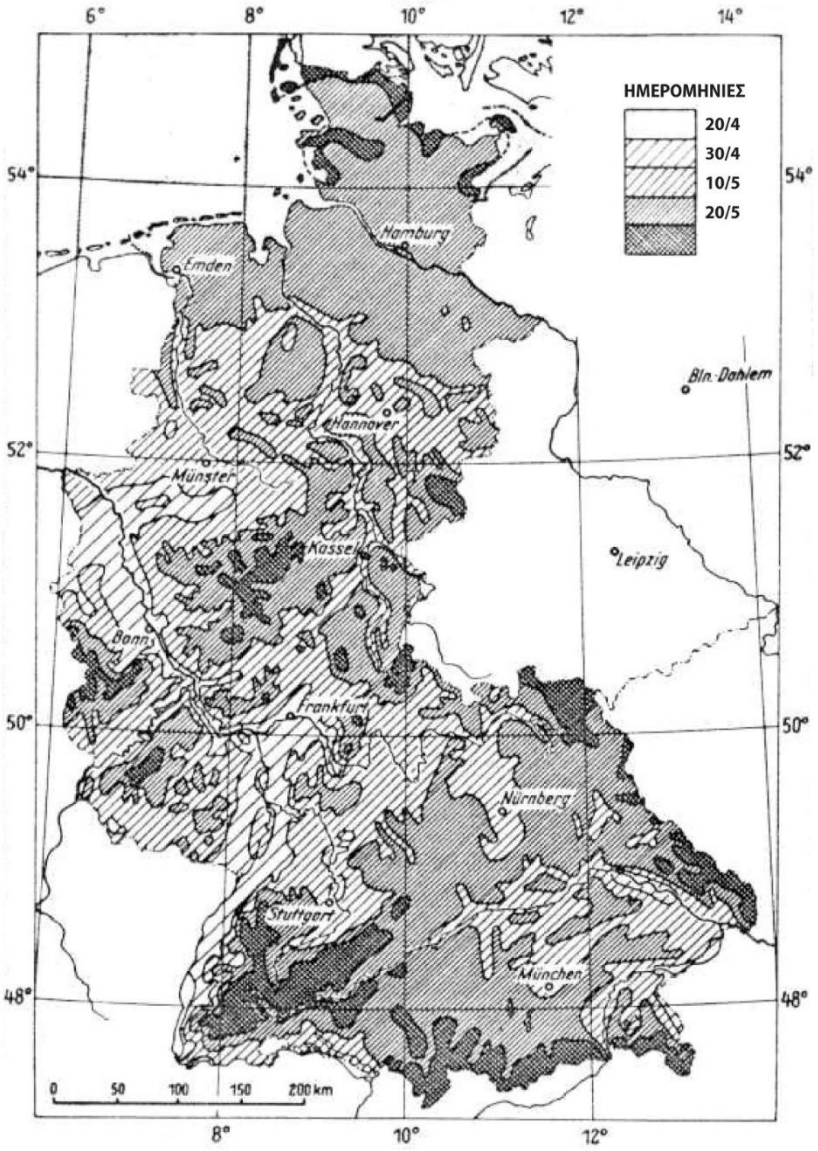
9.3. Φαινολογική κλιματολογία

Η φαινολογία παίζει σημαντικό ρόλο στην αγροκλιματολογία με δύο τρόπους. Πρώτον, στοιχεία από φαινολογικά συμβάντα περιέχουν έμμεσα συγκεκριμένες καιρικές συνθήκες. Δεύτερον, η φαινολογία προσφέρει τη δυνατότητα διαχωρισμού σταδίων ανάπτυξης των φυτών κατά τρόπο βιολογικά χρήσιμο (Seemann et al., 1979). Από αυτό προκύπτει, για τους σκοπούς της αγροκλιματολογίας, ένα «φυσικό» ημερολόγιο, σε αντίθεση με το αστρονομικό.

Πριν συζητηθεί η εφαρμογή της φαινολογίας στην αγροκλιματολογία, είναι χρήσιμο, αρχικά, να εξεταστεί η φαινολογία πιο ειδικά. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα φαινολογικά αναπτυξιακά στάδια ή η διάρκεια μεταξύ δύο σταδίων αντικατοπτρίζει πάντα την πολυπλοκότητα των καιρικών συνθηκών ή εκείνη του κλίματος στην περιοχή των υπό παρατήρηση φυτών. Η πορεία της θερμοκρασίας επηρεάζει πρωταρχικά την πρόσκαιρα διαφορετική εμφάνιση ενός αναπτυξιακού σταδίου και, σε κάποια έκταση, το ίδιο και οι βροχοπτώσεις. Κατά συνέπεια, η παρουσίαση υπό μορφή χάρτου της έναρξης μιας φάσης ανάπτυξης σε μια περιοχή καταλήγει σε μια εικόνα διαφοροποίησης της πορείας της θερμοκρασίας στη διάρκεια μιας συγκεκριμένης αναπτυξιακής περιόδου των φυτών. Στο Σχήμα 9.3 παρουσιάζεται ο μέσος όρος έναρξης της ανθοφορίας των μηλιών στην τότε Ομοσπονδιακή Δημοκρατία της Γερμανίας. Αυτή η φάση, που καθιερώθηκε με βάση τον μέσο όρο πολλών ετών, εμφανίζεται στα γεωγραφικά πλάτη την περίοδο πριν από την 20ή Απριλίου μέχρι την 20ή Μαΐου. Ένας τέτοιος φαινολογικός χάρτης παρουσιάζει τις περιοχές με διαφοροποιημένη πρώιμη ανοιξιάτικη άνοδο της θερμοκρασίας και εκφράζει τις διαφορές στην τοπική πορεία της ενεργού θερμοκρασίας. Ως εκ τούτου, παρέχει γνώσεις σχετικά με τις κατά μέσο όρο χρήσιμες γεωργικά περιόδους, γεγονός που θα ήταν πολύ δύσκολο να επιτευχθεί με βάση μόνο κλιματολογικές τιμές. Φυσικά, μικρότερες περίοδοι βλάστησης μπορούν επίσης να καθοριστούν μέσω φαινολογικών φάσεων.

Τέτοιοι συνδυασμοί από φαινολογικές και κλιματολογικές τιμές εφαρμόζονται συχνά και ισχύουν στην αγροκλιματολογία. Για παράδειγμα, είναι δυνατόν να προσδιοριστεί η συχνότητα παγετού που προκαλεί καταστροφές κατά την ανθοφορία καρποφόρων σε μια συγκεκριμένη περιοχή, οπότε μπορούν να καταγραφούν ημέρες ανθοφορίας με αρνητικές θερμοκρασίες (Seemann et al., 1950). Γενικά, στοιχεία για τη συχνότητα εμφάνισης συγκεκριμένων μετεωρολογικών φαινομένων διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη γεωργία. Αναφέρονται ενδεικτικά συχνές περίοδοι ξηρασίας, συχνότητα ανοιξιάτικων ή φθινοπωρινών παγετών, διάρκεια περιόδου ελεύθερης παγετού, όψιμη άνοιξη, διάρκεια βλαστικής περιόδου και παρόμοια στοιχεία, που καθιστούν το κλίμα περιοριστικό παράγοντα για τη γεωργία ορισμένων περιοχών. Επίσης, έχουν αναπτυχθεί και εφαρμοστεί μέθοδοι δημιουργίας αγροκλιματικών ζωνών στην Ελλάδα και διεθνώς (Tsiros et al., 2009).

Ένα μεγάλο εύρος φαινολογικών και κλιματολογικών συνδυασμών έχει αναπτυχθεί, των οποίων τα αποτελέσματα έχουν παρουσιαστεί με τη μορφή χαρτών. Στο χάρτη του Σχήματος 9.4 απεικονίζονται η διάρκεια των ολοκληρωμένων περιόδων βλάστησης στην Ευρώπη, καθώς και ο κλιματικός χαρακτηρισμός διαφόρων τοποθεσιών. Η ολοκληρωμένη περίοδος βλάστησης υπολογίζεται από τη διαφορά μεταξύ φυτέματος καλοκαιρινών σπόρων την άνοιξη και φυτέματος χειμερινού σίτου το φθινόπωρο. Επιπλέον, η ετήσια πορεία της θερμοκρασίας αέρα και η μηνιαία ποσότητα βροχόπτωσης επίσης παρουσιάζονται για έναν αριθμό περιοχών. Εισάγεται η διάρκεια της βλαστικής περιόδου για κάθε σταθμό και απεικονίζεται με μια οριζόντια γραμμή κάτω από τις στήλες βροχόπτωσης, έτσι ώστε οι βροχοπτώσεις και οι θερμοκρασίες να μπορούν να συγκριθούν με τις περιόδους βλάστησης στις διάφορες περιοχές. Επιπλέον, τα σημεία δείχνουν την κατανομή των περιοχών ανάπτυξης σίτου. Για παράδειγμα, το Μπέγκεν (Νορβηγία) χαρακτηρίζεται από μικρή περίοδο βλάστησης, χαμηλές θερμοκρασίες και υψηλή βροχόπτωση, ενώ η Ρώμη (Ιταλία) από εκτεταμένη περίοδο βλάστησης, υψηλές θερμοκρασίες και μικρές ποσότητες βροχόπτωσης, κυρίως το καλοκαίρι.



Σχήμα 9.3. *Μέση έναρξη φαινολογικού φαινομένου.*

Το Σχήμα 9.4 αποτελεί παράδειγμα χαρτογραφημένης εκτίμησης ενός φαινολογικογεωργικοοικονομικού συνδυασμού. Συμπερασματικά, το παράδειγμα αυτό δείχνει τις δυνατότητες αξιοποίησης της αγροκλιματολογίας μέσω της φαινολογίας. Προς το παρόν όμως, δεν υπάρχει ακόμη κάποια γεωργική-κλιματολογική προσέγγιση για ολόκληρες χώρες ή για ηπείρους, εκτός ελαχίστων εξαιρέσεων.

9.4. Θεματικοί τύποι κλιμάτων

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται διάφοροι θεματικοί τύποι κλιμάτων, που ενδιαφέρουν τη γεωργία. Ειδικότερα, περιγράφονται και αναλύονται το κλίμα εδάφους, λιβαδιών, δημητριακών, δένδρων-οπωρώνων-δασών, καθώς και το κλίμα θερμοκηπίου.



Σχήμα 9.4 *Χαρτογράφηση βλάστησης στην Ευρώπη.*

9.4.1. Κλίμα εδάφους

Αρχικά, ο Ρώσος επιστήμονας P.A. Kostychev προσδιόρισε τον 19ο αιώνα το κλίμα εδάφους, θεωρώντας το έδαφος ένα ξεχωριστό μέσο για τη διαμόρφωση ενός ατμοσφαιρικού κλίματος. Στη συνέχεια, το κλίμα εδάφους αποτέλεσε αντικείμενο έρευνας σε διάφορες επιστήμες, όπως τη φυσική, την πεδολογία και την αγροκλιματολογία, όταν η εξαιρετική σημασία του έγινε αποδεκτή. Υπό την επίδραση της βλάστησης, των μικροοργανισμών και άλλων φυσικών και ανθρωπογενών παραγόντων, το κλίμα εδάφους ποικίλλει σε χρόνο σημαντικά από ένα ατμοσφαιρικό κλίμα. Εξαρτώμενα από τις ιδιότητες και την υγρασία του εδάφους, ο εξαερισμός του και τα θερμικά χαρακτηριστικά του ποικίλλουν σε σημαντικό βαθμό. Τέλος, το κλίμα εδάφους μπορεί να ελεγχθεί από τον άνθρωπο σε μεγαλύτερη έκταση από το κλίμα του στρώματος αέρα κοντά στο έδαφος. Για το λόγο αυτό, μέτρα βελτίωσης ενός κλίματος εδάφους, όπως η άρδευση, η αποχέτευση ή η διαχείριση, είναι αρκετά αποτελεσματικά. Η αγροκλιματολογία μελετά το κλίμα εδάφους από γεωγραφικής άποψης, σε μια δυναμική κλίμακα που προσδιορίζεται από τις εποχές του έτους, λαμβάνοντας υπόψη τις συνθήκες του φυσικογεωγραφικού μέσου που καθορίζει το σχηματισμό του.

Κατά συνέπεια, το κλίμα εδάφους είναι αποτέλεσμα του ατμοσφαιρικού κλίματος, των ιδιοτήτων του εδάφους, του ανάγλυφου, της βλάστησης και της παραγωγικής δραστηριότητας του ανθρώπου, δηλαδή αποτελεί ένα πολύπλοκο θέμα έρευνας. Επηρεάζει το μικροκλίμα του στρώματος αέρα κοντά στο έδαφος, καθώς και τις

διαδικασίες του εδάφους, ενώ επίσης προσδιορίζει, κατά ένα σημαντικό μέρος, την παραγωγική ικανότητα των αναπτυσσομένων φυτών. Βασικά, το κλίμα εδάφους απαρτίζεται από τρία στοιχεία:

- τη θερμοκρασία εδάφους,
- την υγρασία εδάφους και
- τον αερισμό εδάφους.

Ημερήσιες και ετήσιες διακυμάνσεις είναι χαρακτηριστικές για τις συνιστώσες ενός κλίματος εδάφους, όπως και η κατανομή αυτών των αποκλίσεων, εξαιτίας της περιοχής, εξαρτώμενες από το ατμοσφαιρικό κλίμα. Στη συνέχεια, περιγράφονται επιγραμματικά τα στοιχεία του κλίματος εδάφους.

9.4.1.1. Θερμοκρασία εδάφους

Η κύρια πηγή θερμότητας που εισχωρεί στο έδαφος είναι το φως του ήλιου, το οποίο απορροφάται από την επιφάνεια του εδάφους, μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια και εκπέμπεται στα υποκείμενα στρώματα εδάφους. Στη διάρκεια της νύχτας, η εξερχόμενη θερμότητα μέσω ακτινοβολίας υπερβαίνει την εισροή, με αποτέλεσμα η επιφάνεια του εδάφους και τα υποκείμενα στρώματα να ψύχονται. Ο ρυθμός θέρμανσης και ψύξης του εδάφους εξαρτάται από τις ιδιότητες του εδάφους, δηλαδή τη θερμική χωρητικότητα, τη θερμική αγωγιμότητα και τη θερμική διάχυση, καθώς και από τη διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στην επιφάνεια εδάφους και τα υποκείμενα στρώματα. Όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά, τόσο μεγαλύτερη είναι η ποσότητα θερμότητας που εισέρχεται ή που εξέρχεται από το έδαφος. **Η θερμική χωρητικότητα (ογκομετρική) ξηρών ορυκτών εδαφών** είναι περίπου δύο φορές μικρότερη από εκείνη του ύδατος. Κατά συνέπεια, η θερμική χωρητικότητα αυξάνεται με την αύξηση της υγρασίας. Μια αύξηση της ποσότητας του αέρα στο χώμα ελαττώνει τη θερμική του χωρητικότητα. Για το λόγο αυτό, η θερμική χωρητικότητα ξηρών εδαφών από φυτάνθρακα είναι μικρότερη από εκείνη ορυκτών εδαφών, ενώ η θερμική χωρητικότητα των υγρών φυτανθρακικών εδαφών είναι μεγαλύτερη, αντίστοιχα. **Η θερμική αγωγιμότητα του εδάφους** εξαρτάται βασικά από την πορώδη σύστασή του, καθώς και από την υγρασία του. Εφόσον η θερμική αγωγιμότητα του αέρα του εδάφους είναι περίπου 50 φορές λιγότερη από εκείνη των ορυκτών σωματιδίων στο έδαφος, όσο χαμηλότερη είναι η πυκνότητα του ξηρού εδάφους, δηλαδή όσο μεγαλύτερη είναι η πορώδης σύστασή του, τόσο χαμηλότερη είναι και η θερμική του αγωγιμότητα. Όταν το νερό καλύπτει τους πόρους του εδάφους, η θερμική του αγωγιμότητα αυξάνεται σε μια τιμή αγνώστου ορίου, καθώς η θερμική αγωγιμότητα του νερού είναι 24 φορές υψηλότερη από την αντίστοιχη του αέρα. **Η θερμική διάχυση του εδάφους** χαρακτηρίζεται από το λόγο του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας προς την ογκομετρική θερμική χωρητικότητα. Ο συντελεστής θερμικής διάχυσης είναι μια συνάρτηση της υγρασίας του εδάφους και της περιεκτικότητας αέρα μέσα στο έδαφος. Σε χαμηλές τιμές υγρασίας εδάφους, η θερμική διάχυση αυξάνεται, όμως με μια αύξηση στην υγρασία ελαττώνεται, εφόσον η θερμική διάχυση του αέρα (0,16) είναι μεγαλύτερη από εκείνην του νερού (0,0013). Αλλαγές στη θερμική διάχυση είναι αποτέλεσμα συνδυασμένης αλλαγής στη θερμική χωρητικότητα και στη θερμική αγωγιμότητα.

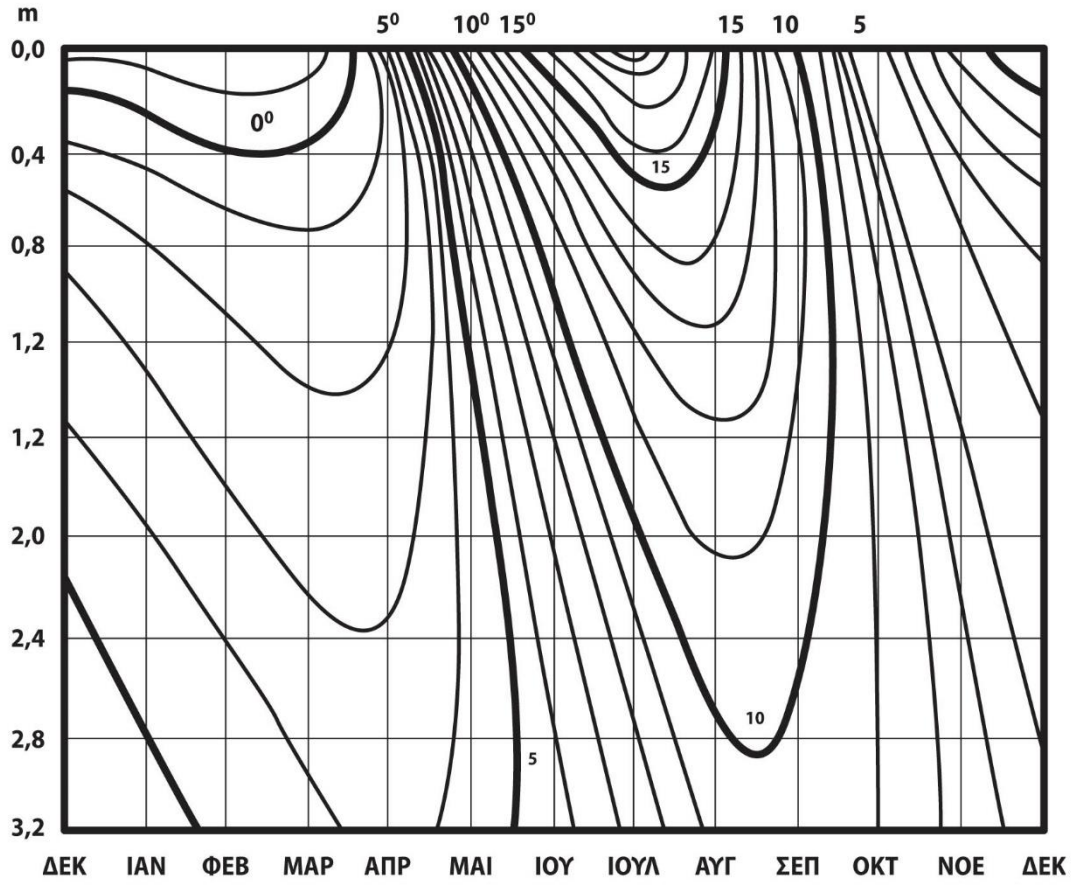
9.4.1.2. Υγρασία εδάφους

Αποτελεί ένα από τα πλέον σημαντικά στοιχεία ενός κλίματος εδάφους, συνήθως μετρούμενο με τη μέθοδο θερμοστάτη-βάρους, αν και οι μέθοδοι με ισότοπα χρησιμοποιούνται πλέον ευρέως. Με βάση τη μέθοδο θερμοστάτη-βάρους, η υγρασία εδάφους προσδιορίζεται ως εκατοστιαία σύσταση του βάρους εντελώς ξηρού χώματος, οπότε η ποσότητα της παραγωγικής υγρασίας υπολογίζεται από τις λαμβανόμενες τιμές, χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$W = 0,1\ q\ h\ (u - k), \quad (9.6)$$

όπου W είναι τα αποθέματα παραγωγικής υγρασίας σε χιλιοστά, q το ογκομετρικό βάρος του χώματος (g/cm^3), h το πάχος του στρώματος εδάφους σε εκατοστά, u η υγρασία χώματος ως εκατοστιαία σύσταση του εντελώς ξηρού χώματος και 0,1 ένας συντελεστής μετατροπής ενός στρώματος νερού σε χιλιοστά.
Οι μέγιστες μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες επιφανειακού εδάφους παρατηρούνται τον Ιούλιο, όταν η εισροή θερμότητας είναι η μέγιστη, ενώ οι ελάχιστες θερμοκρασίες παρατηρούνται τον Ιανουάριο. Το ετήσιο εύρος της θερμοκρασίας εδάφους αυξάνεται μαζί με το γεωγραφικό πλάτος. Στην περιοχή του Ισημερινού, ανέρχεται σε περίπου 3° C κατά μέσο όρο, ενώ στις ηπειρωτικές πολικές περιοχές ξεπερνά τους 70° C.

Στο Σχήμα 9.5 απεικονίζονται στοιχεία που απορρέουν από μακροχρόνιες παρατηρήσεις θερμοκρασίας εδάφους σε διάφορα βάθη, με τη μορφή ειδικών θερμοϊσογραμμών καμπύλων. Ειδικότερα, για τη δημιουργία του σχήματος, έχουν συνδυαστεί τρεις μεταβλητές, η θερμοκρασία εδάφους, το βάθος και ο χρόνος. Η δημιουργία του γραφήματος έχει γίνει ως εξής: το βάθος παρουσιάζεται στον κατακόρυφο άξονα, ενώ ο χρόνος, συνήθως σε μήνες, στον οριζόντιο. Μέσες μηνιαίες τιμές θερμοκρασίας εδάφους για όλα τα βάθη σημειώνονται στο γράφημα και τα σημεία που έχουν ίδια τιμή θερμοκρασίας ενώνονται με συνεχή γραμμή, σχηματίζοντας έτσι τις θερμοϊσογραμμές ή τις ισοπληθείς της θερμοκρασίας εδάφους. Οι θερμοϊσογραμμές δίνουν μια γραφική απεικόνιση της θερμοκρασίας στα διάφορα στρώματα του εδάφους των αγροτικών περιοχών, σε οποιοδήποτε βάθος, για κάθε μήνα.



Σχήμα 9.5. *Ισοπληθείς θερμοκρασίας εδάφους.*

9.4.1.3. Επίδραση του ανάγλυφου στο κλίμα εδάφους

Το ανάγλυφο έχει σημαντική επίδραση στις θερμοκρασιακές συνθήκες του εδάφους. Η εισροή της ηλιακής ακτινοβολίας σε μια εδαφική επιφάνεια εξαρτάται από την κλίση και την έκθεσή της. Στο βόρειο ημισφαίριο, πλαγιές με νότιο προσανατολισμό δέχονται περισσότερη θερμότητα, ενώ αυτές με βόρειο δέχονται λιγότερο από τις επίπεδες εκτάσεις της ίδιας περιοχής. Επίσης, η ημερήσια θέρμανση και η νυχτερινή ψύξη είναι μεγαλύτερες για κοίλα εδαφικά ανάγλυφα, π.χ. κοιλάδες, και μικρότερες για κυρτά ανάγλυφα, π.χ. κορυφογραμμές, λόγω της έντασης της εναλλαγής των αέριων μαζών, που είναι περισσότερη στις κορυφογραμμές και λιγότερη στις κοιλάδες. Τέλος, το γυμνό έδαφος σε πλαγιές θερμαίνεται πιο έντονα από ό,τι το καλυμμένο με βλάστηση.

9.4.1.4. Επίδραση της βλάστησης στο κλίμα εδάφους

Τα φυτά σκιάζουν το έδαφος, απορροφώντας μια σημαντική ποσότητα του ηλιακού φωτός, και την ίδια στιγμή το προστατεύουν από την ακτινοβολία. Έτσι, το έδαφος κάτω από φυτοκάλυψη είναι ψυχρότερο το καλοκαίρι από ένα γυμνό και θερμότερο το χειμώνα. Το δάσος έχει επίσης μια χαρακτηριστική επίδραση στη θερμοκρασία

του εδάφους. Η μέση ετήσια θερμοκρασία του είναι 1° C ψυχρότερη, σε βάθος 1 m, σε σχέση με ένα κοινό χωράφι. Το καλοκαίρι, το έδαφος στο δάσος σε βάθος 20 cm είναι ψυχρότερο κατά μερικούς βαθμούς από ένα χωρίς δέντρα.

9.4.1.5. Επίδραση της χιονοκάλυψης στο κλίμα εδάφους

Το χιόνι έχει μια θερμομονωτική ιδιότητα, λόγω της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητάς του. Το βάθος παγώματος μειώνεται ανάλογα με το πάχος της χιονοκάλυψης. Η προστατευτική ιδιότητα του χιονιού είναι πολύ σημαντική για τις χειμερινές καλλιέργειες και τα οπωροφόρα. Κάτω από χιόνι του οποίου το πάχος ξεπερνά τα 30 cm, τα νεαρά φυτά δεν παγώνουν όταν επικρατούν ισχυροί παγετοί.

9.4.1.6. Ρύθμιση θερμοκρασίας εδάφους

Η ρύθμιση γίνεται σε διάφορες κλιματικές περιοχές, για ποικίλους λόγους. Στον Βορρά, είναι χρήσιμο να αυξηθεί η θερμοκρασία εδάφους, ειδικά την άνοιξη, για να πρωιμίσει η σπορά ή η φύτευση και να δημιουργηθούν περισσότερο κατάλληλες συνθήκες για το φύτρωμα, το σχηματισμό των ριζών των σπορόφυτων, αλλά και την επιτάχυνση της ανάπτυξης των φυτών. Αντίθετα, στον Νότο, η υπερβολική θέρμανση μπορεί να παραφορτώσει ή να καταπονήσει τα φυτά, και γι' αυτό πρέπει να εφαρμόζονται τρόποι μείωσης της θερμοκρασίας, τόσο της επιφάνειας, όσο και του ανώτερου στρώματος του εδάφους. Το όργωμα και το σκάλισμα του εδάφους δημιουργούν πιο γρήγορη ανταλλαγή θερμότητας μέσα σ' αυτό. Το σκάλισμα σε βάθος 2-4 cm μειώνει τη θερμοκρασία στο βαθύτερο έδαφος κατά 1°-3° C, περισσότερο το καλοκαίρι από την άνοιξη, ενώ το κυλίνδρισμα προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας κατά 1°-2° C.

Η ρύθμιση της εδαφικής θερμοκρασίας επιτυγχάνεται επίσης με την κάλυψή του με διάφορα υλικά, όπως άχυρα ή φυτικά υπολείμματα. Η κάλυψη μειώνει τη διακύμανση της εδαφικής θερμοκρασίας. Ανάλογα με το χρώμα της κάλυψης, η θερμοκρασία αυξάνεται (μαύρο χρώμα) ή μειώνεται. Για να αυξηθεί η θερμοκρασία εδάφους, τα ανοικτόχρωμα χωράφια σκουραίνονται, με προσθήκη τύρφης και ασφαλτώδη γαλακτώματα. Με αυτόν τον τρόπο, όταν ο καιρός είναι σταθερός, μειώνεται η ανάκλαση του φωτός κατά περίπου 5% και αυξάνεται η απορρόφηση ακτινοβολίας κατά περίπου 15%. Πειράματα έδειξαν ότι η ποσότητα των νιτρικών, του φωσφόρου και του καλίου αυξάνονται στα σκουρόχρωμα εδάφη, στοιχείο ευνοϊκό για την ανάπτυξη των φυτών. Επίσης, διάφανα πλαστικά φύλλα πολυαιθυλενίου, ως υλικά κάλυψης, δημιουργούν αύξηση της θερμοκρασίας και της υγρασίας στο ανώτερο έδαφος.

Επιπλέον, μια από τις μεθόδους αύξησης της θερμοκρασίας εδάφους είναι η δημιουργία γραμμικών αναχωμάτων, που αυξάνουν την επιφάνειά του κατά 20-25%, με αποτέλεσμα να προωθείται η απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Επίσης, η άρδευση έχει σημαντική επίδραση στη θερμοκρασία εδάφους. Πειράματα έχουν δείξει ότι η θερμοκρασία εδάφους είναι σημαντικά χαμηλότερη σε αρδευόμενες εκτάσεις από ό,τι σε μη αρδευόμενες. Επίσης, η στράγγιση βαλτωδών εκτάσεων αυξάνει τη θερμοκρασία εδάφους, ειδικά στην επιφάνεια, κατά τους θερινούς μήνες. Μείωση θερμοκρασίας επίσης παρατηρείται όταν υπάρχουν λωρίδες δάσους. Σήμερα, οι προαναφερόμενες μέθοδοι ρύθμισης της θερμοκρασίας των εδαφών χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο στη γεωργία, αποκτώντας έτσι μεγάλη πρακτική σημασία.

9.4.2 Κλίμα λιβαδιών

Οι κλιματικές και εδαφικές συνθήκες καθορίζουν τον πολλαπλασιασμό των φυτών των λειμώνων σε όλο τον κόσμο. Ανάλογα με τις απαιτήσεις σε θερμοκρασία και υγρασία, η χλόη χωρίζεται στις εξής κατηγορίες:

- **Υγρόφιλη**: Αναπτύσσεται σε περιοχές με υγρά και πολύ υγρά εδάφη, όπως είναι οι βάλτοι και τα πλημμυρισμένα εδάφη, όπου, όταν το έδαφος στεγνώσει, τα φυτά πεθαίνουν.
- **Ξηροανθεκτική χλόη**: Μεγαλώνει στις στέπες και ημιερημικές περιοχές. Τα φυτά αυτής της κατηγορίας έχουν ειδικούς προστατευτικούς μηχανισμούς, για να αντέχουν σε περιόδους ξηρασίας του αέρα και του εδάφους.
- **Μεσοϋγρόφιλη**: Μεγαλώνει σε δάση και δασώδεις περιοχές ή στέπες.

Το φως, η θερμοκρασία και η υγρασία αποτελούν μια οικολογική βάση για την αύξηση, ανάπτυξη και απόδοση όλων των φυτών, περιλαμβανομένης και της χλόης. Για να εξακριβωθούν τα αγροκλιματικά χαρακτηριστικά μιας περιοχής, συνυπολογίζοντας τις απαραίτητες συνθήκες αύξησης της χλόης, είναι απαραίτητη η εξοικείωση με τις αριθμητικές εκφράσεις που περιγράφουν τις ανάγκες της χλόης στους προαναφερόμενους κλιματικούς παράγοντες. Ακολουθώντας την έναρξη της αύξησης, ο ρυθμός ανάπτυξης των φυτών των λιβαδιών εξαρτάται

πρωταρχικά από τη θερμοκρασία αέρα, ενώ η αύξηση της βιομάζας εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα νερού. Στον Βορρά, εκτός της υγρασίας, η αύξηση της βιομάζας εξαρτάται και από τη θερμοκρασία.
Στη μεσογειακή ζώνη, ένα μεγάλο πλήθος από αυτοφυή και καλλιεργούμενα είδη ξεκινά να αναπτύσσεται με μέση ημερήσια θερμοκρασία από +3° C έως +5° C, που συμπίπτει με τη συσσώρευση θετικών αθροιστικών θερμοκρασιών αέρα στο εύρος 25°-45° C. Στις ημιερημικές περιοχές, κάποια είδη ξεκινούν την ανάπτυξη όταν η μέση ημερήσια θερμοκρασία είναι μεταξύ +9° C και 14° C. Στις ξηρές περιοχές, μια θερμοκρασία αέρα πάνω από 35°-40° C είναι ακατάλληλη για τα περισσότερα είδη χλόης. Στην Ευρώπη, τα συνολικά αθροίσματα θερμοκρασιών είναι περίπου 80°-120° C κατά τη συσσώρευση βιομάζας και το ύψος της χλόης φτάνει τα 8-10 εκατοστά. Την άνοιξη, στις ημιερημικές και ερημικές περιοχές, η υγρασία στο εδαφικό στρώμα βάθους 0-20 εκατοστών είναι κατά τη βλάστηση περίπου 20 mm, εξασφαλίζοντας έτσι την ανάπτυξη μιας παροδικής φυτοκοινωνίας χλόης, που στη συνέχεια πεθαίνει. Υγρασία εδάφους κάτω από 20 χιλιοστά σε βάθος 0-20 εκατοστών, θερμοκρασία αέρα πάνω από 18° C και έλλειμμα υγρασίας αέρα 10 χιλιοστά αποτελούν αγρομετεωρολογικούς δείκτες για την έναρξη της εξάλειψης αυτής της παροδικής βλάστησης.
Για να απομονωθούν αγροκλιματικές υγρασιακές ζώνες, έχει χρησιμοποιηθεί ο δείκτης υγρασίας M, που υπολογίζεται μέσω του τύπου:

$$M = (Bb + Oc)/\Sigma d, \quad (9.7)$$

όπου Bb είναι η διαθέσιμη υγρασία εδάφους σε βάθος 1 m, σε χιλιοστά, την άνοιξη, Oc η ποσότητα βροχόπτωσης από την άνοιξη έως το χρόνο μέγιστης απόδοσης της χλόης, σε χιλιοστά, και Σd η μέση συνολική ημερήσια απώλεια υγρασίας του αέρα την ίδια περίοδο, επίσης σε χιλιοστά.
Για παράδειγμα, η αγροκλιματική ζωνοποίηση του Καζακστάν πραγματοποιείται με το δείκτη υγρασίας M [εξίσωση (9.7)]. Υποθετικά, θεωρώντας ότι ο δείκτης M είναι πάνω από 100 βαθμούς, για μια μέτρια υγρή δασώδη/στεπώδη περιοχή, πραγματοποιείται μια συγκριτική εκτίμηση του κλίματος σε διαφορετικές περιοχές. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 9.11, ανάλογα με την ποσότητα θερμότητας και υγρασίας του εδάφους, η παραγωγικότητα των λειμώνων σε φυσικές περιοχές σπάνια μεταβάλλεται, δηλαδή σε μονάδες, από 26-28 έως 170-190. Ωστόσο, η παραγωγικότητα των φυτών μπορεί να κυμαίνεται σημαντικά στην ίδια φυσική περιοχή, όταν υπάρχουν διαφορετικές καιρικές συνθήκες.

Αγροκλιματική ζώνη	**Αντίστοιχη φυσική ζώνη**	**Μέσος δείκτης υγρασίας M**	**Συγκριτική κλιματολογική αξιολόγηση των συνθηκών (σε λίμνες)**
Μέτρια υγρή	Δασική στέπα	0,50	100
Μέτρια ξηρή	Στέπα	0,35	70
Ξηρή	Ημιάνυδρο	0,22	44
Πολύ ξηρή	Τυπική έρημος	0,13	26
Ξηροί πρόποδες	Πρόποδες ερήμου	0,23	46
Πολύ ξηρή βορινή έκθεση	Εποχική έρημος	0,18	36
Μέτρια ξηροί και υγροί πρόποδες	Πρόποδες στέπας	0,40	80
Υγρά βουνά	Ορεινή στέπα	0,60	120
Πολύ υγρά	Ορεινό δάσος	0,95	190
Υπερβολικά υγρά	Ψηλοί λόφοι	1,66	75

Πίνακας 9.11 *Συγκριτική αξιολόγηση κλίματος και των εδαφοκλιματικών συνθηκών.*

Πολυετή είδη χλόης αποδίδουν τα μέγιστα σε υγρασία εδάφους 80-85% της συνολικής υδατοϊκανότητας. Γι' αυτό το λόγο, η άρδευση των λειμώνων τους καλοκαιρινούς μήνες, ακόμα και σε συνθήκες δασώδεις-στέπας και δάσους, έχει θετική επίδραση. Η αναγκαιότητα της άρδευσης λειμώνων στον Βορρά έχει επιβεβαιωθεί από πολλούς ερευνητές. Για παράδειγμα, οι καλλιεργούμενοι λειμώνες της Λιθουανίας απαιτούν άρδευση συνολικά 90-210 χιλιοστών, ανάλογα με τη βροχόπτωση. Παρόμοια αποτελέσματα έχουν βρεθεί σε πολλές χώρες. Στην Αγγλία, όπου η άρδευση των λειμώνων ήταν πρακτικώς άγνωστη έως το 1945, οι αρδευόμενοι λειμώνες έφτασαν σε έκταση τα 42.000 εκτάρια το 1963. Έχει δειχθεί ότι, υπό τις επικρατούσες συνθήκες στην Αγγλία, οι ανάγκες σε νερό κυμαίνονται μεταξύ 450-500 χιλιοστά, ενώ η μέση ποσότητα βροχόπτωσης την ίδια περίοδο,

δηλαδή τη βλαστική, ανέρχονται σε 230-370 χιλιοστά. Συνεπώς, το υπολογιζόμενο έλλειμμα υγρασίας, σε συνθήκες Αγγλίας, είναι περίπου 200 χιλιοστά για τη χλόη την περίοδο βλάστησης. Αντίστοιχα, στις Σκανδιναβικές χώρες σήμερα, η άρδευση των λειμώνων γίνεται κυρίως σε μεγάλες αγροτικές φάρμες. Ωστόσο, η συνεχιζόμενη αύξηση της παραγωγικότητας των καλλιεργούμενων λειμώνων σε αυτή την περιοχή έχει συνδεθεί με την προοπτική για διεύρυνση της άρδευσης. Τέλος, στην κεντρική Ασία και στο Καζακστάν είναι δυνατή η παραγωγή 5-6 συγκομιδών χλόης ανά έτος μέσω άρδευσης, ενώ οι αποδόσεις φτάνουν τα 20.000 kg ανά εκτάριο.

9.4.3 Κλίμα δημητριακών

Οι πιο γνωστές καλλιέργειες δημητριακών είναι το σιτάρι, το καλαμπόκι και το ρύζι. Το **σιτάρι** αναπτύσσεται κάτω από ποικίλες κλιματικές συνθήκες, από τον Τροπικό έως τον Αρκτικό κύκλο. Η έκταση της περιοχής όπου φυτεύεται το σιτάρι ξεπερνά τα 210 εκατομμύρια εκτάρια. Όπως είναι αναμενόμενο, η διαφοροποίηση των ποικιλιών και των τύπων του σιταριού είναι εξαιρετικά μεγάλη. Πρώιμες και όψιμες ποικιλίες σιταριού απαιτούν ιδιαιτερότητα στην παροχή θερμότητας. Με βάση την υγρασία, μια σημαντική διαφορά εντοπίζεται μεταξύ ποικιλιών ανθεκτικών και μη ανθεκτικών στην ξηρασία. Το σιτάρι χωρίζεται στις ακόλουθες ποικιλίες, σύμφωνα με τις συνθήκες που χρειάζονται για την εμφάνιση του σταδίου της εαρινοποίησης: ο χειμερινός τύπος, που φυτεύεται το φθινόπωρο, με τη διαδικασία της εαρινοποίησης να γίνεται σε χαμηλές θερμοκρασίες, και οι εαρινές ποικιλίες, που φυτεύονται στη διάρκεια της άνοιξης.
Με βάση τις συνθήκες χειμερίας νάρκης του σιταριού, διακρίνονται οι εξής τρεις τύποι κλιματικών περιοχών:

(I) περιοχές με μια σταθερή περίοδο χειμερινού λήθαργου, δηλαδή αρνητικές θερμοκρασίες κατά τους πιο ψυχρούς μήνες,
(II) περιοχές με μια ασταθή περίοδο χειμερινού ληθάργου,
(III) περιοχές χωρίς περίοδο χειμερινού λήθαργου.

Στην περιοχή (I), που ενδιαφέρει κυρίως την Ανατολική και Κεντρική Ευρώπη, το βόρειο μέρος της Ασίας και το νότιο μέρος της Αμερικής, το εύρος της ενεργούς περιόδου ανάπτυξης είναι περίπου 4 μήνες το φθινόπωρο. Στην περιοχή (II), η χιονοκάλυψη συχνά διακόπτεται το χειμώνα. Το καλοκαίρι χαρακτηρίζεται από υψηλές διαφορές υγρασίας, όπως στις περιοχές της Κεντρικής Ασίας, το Ιράν και το Πακιστάν, που είναι πολύ στεγνές, ενώ η νοτιοανατολική Ασία είναι πολύ υγρή.
Στην περιοχή (III), που περιλαμβάνει τις υποτροπικές και τις ορεινές ζώνες των τροπικών περιοχών, το σιτάρι αναπτύσσεται στην ψυχρή βροχερή περίοδο. Και το χειμερινό και το εαρινό σιτάρι αναπτύσσονται σε αυτήν την περιοχή ταυτόχρονα. Εδώ, ο χρόνος φύτευσης εξαρτάται από την υγρασία, καθώς και από την έναρξη της βροχερής περιόδου. Συνεπώς, η χειμωνιάτικη ζέστη παραμένει στις χειμερινές καλλιέργειες στις υποτροπικές περιοχές, με αποτέλεσμα αυτές να ωριμάζουν αργότερα από τις εαρινές.
Οι ημεροβαθμοί με θερμοκρασία βάσης 10^{o} C χρησιμοποιούνται συχνά ως αγροκλιματικοί δείκτες, για τις ανάγκες θερμότητας του χειμερινού σιταριού. Το βόρειο όριο αναγκών θερμότητας χειμερινού σιταριού στη διάρκεια του καλοκαιριού επεκτείνεται πάνω από την ισόθερμη των 1.500^{o}-1.800^{o} C ημεροβαθμών για περίπου το 80% του χρόνου, ανάλογα και με την ποικιλία. Το χειμώνα, η ελάχιστη θερμοκρασία εδάφους εξαρτάται από τη θερμοκρασία του αέρα και το ύψος του χιονιού που το καλύπτει. Σε περιοχές με ελαφρές χιονοπτώσεις, με μέση θερμοκρασία τους ψυχρότερους μήνες από -10^{o} έως -12^{o} C, η πιθανότητα ζημιάς στο χειμερινό σιτάρι είναι σημαντική. Για την εκτίμηση της σοδειάς χειμερινού σιταριού, με βάση τις αγροκλιματικές συνθήκες, χρησιμοποιείται ο εμπειρικός δείκτης:

$$K = (W + R)/0,01 \sum t, \quad (9.8)$$

όπου W είναι τα ανοιξιάτικα αποθέματα παραγωγικής υγρασίας σε ένα έδαφος βάθους 0-1 m. Κατά την επανάληψη της αύξησης, R είναι η συνολική βροχόπτωση, από την επανάληψη της βλάστησης έως την πλήρη ωρίμανση, και Σt οι ημεροβαθμοί θερμοκρασίας αέρα για την ίδια περίοδο.
Το εαρινό σιτάρι αναπτύσσεται σχεδόν αποκλειστικά στο Βόρειο Ημισφαίριο, όπου οι αγροκλιματικές συνθήκες χαρακτηρίζονται από μικρότερες διαφορές σε σχέση με το χειμερινό σιτάρι. Το βόρειο γεωγραφικό όριο χαρακτηρίζεται από έλλειψη θερμότητας και εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της ποικιλίας, επεκτείνεται δε κατά μήκος της ισόθερμης των 1.400^{o}-1.600^{o} C ημεροβαθμών. Η φύτευση εαρινού σιταριού σε ξηρές περιοχές με ελαφρές χιονοπτώσεις γίνεται με μέσες ημερήσιες θερμοκρασίες των 5^{o}-6^{o} C, ενώ στις υγρές

περιοχές του Βορρά στους 8°-10° C. Η ωρίμανση του σιταριού στο βόρειο γεωγραφικό όριο πραγματοποιείται σε μέσες ημερήσιες θερμοκρασίες αέρα 15°-16° C. Ένα σημαντικό ποσοστό του εαρινού σιταριού βρίσκεται σε ξερικές περιοχές, όπως είναι ο Καναδάς, οι ΗΠΑ και οι στέπες της Ρωσίας, όπου το μέγεθος της σοδειάς καθορίζεται από τα εαρινά αποθέματα της εδαφικής υγρασίας και από την κατανομή των βροχοπτώσεων το καλοκαίρι. Σε αυτές τις περιοχές, χρησιμοποιούνται ευρέως μέτρα που στοχεύουν στην αύξηση της επάρκειας υγρασίας των νεαρών φυτειών.

Το **καλαμπόκι** είναι δεύτερο σε εύρος γεωγραφικής κατανομής και τρίτο σε μέγεθος φυτεμένης περιοχής (106 εκατομμύρια εκτάρια), μετά το σιτάρι και το ρύζι. Οι κύριες περιοχές φύτευσης βρίσκονται ανάμεσα στο 50° βόρειο γεωγραφικό πλάτος και στο 40° νότιο. Κατά συνέπεια, θεωρείται αναμενόμενο ότι οι κλιματικές συνθήκες σε μια γεωγραφική ζώνη καλλιέργειας καλαμποκιού διαφέρουν σημαντικά. Το καλαμπόκι είναι ένα εξαιρετικά πολύμορφο είδος, αποτελούμενο από ένα μεγάλο εύρος ποικιλιών και από υβρίδια, που διαφέρουν σημαντικά στην πρωιμότητα ή στην κατανάλωση θερμότητας και υγρασίας. Στη διάρκεια του φυτρώματος, το ελάχιστο θερμοκρασιακό εύρος είναι 8°-10° C. Την περίοδο από το φύτρωμα έως την ωρίμανση, το εύρος είναι 10° C. Για το λόγο αυτό, η κατανάλωση υγρασίας του καλαμποκιού εκφράζεται σε ημεροβαθμούς, με θερμοκρασία βάσης τους 10° C. Οι ημεροβαθμοί από τη σπορά έως την ωρίμανση μεταβάλλονται σημαντικά, εξαρτώμενοι από την πρωιμότητα των ποικιλιών (Πίνακας 9.12).

Αρ. εξίσωσης	Περίοδος	Εξίσωση παλινδρόμησης	R
1	Δημιουργία φούντας	y = 30,2x +.31,8	0,86
2	Αρχική ωρίμανση	y = 35,2x + 241,1	0,83
3	Πλήρης ωρίμανση	y = 41,6x + 290,5	0,80

Πίνακας 9.12. *Εξισώσεις παλινδρόμησης μεταξύ ημεροβαθμών (y) και αριθμού φύλλων (x), που δημιουργούνται στις ποικιλίες και στα υβρίδια του καλαμποκιού.*

Κατά μέσο όρο, η συνολική αποτελεσματική θερμοκρασία φτάνει τους 30° C ± 2° C ($\Sigma t > 10°$ C) την περίοδο κατά την οποία εμφανίζεται το πρώτο πλήρες φύλλο, για περιοχές όπου η μέση θερμοκρασία τον Ιούλιο δεν ξεπερνά τους 20° C. Εφόσον ο αριθμός φύλλων χαρακτηρίζει την πρωιμότητα μιας ποικιλίας, τόσο στη διάρκεια των ιδιαίτερων περιόδων ανάπτυξης του καλαμποκιού, όσο και στη διάρκεια όλης της περιόδου, έχουν αναπτυχθεί εξισώσεις παλινδρόμησης, όπως παραπάνω (Πίνακας 9.12). Για την εκτίμηση των αναγκών θερμότητας στις νότιες περιοχές την περίοδο ανάπτυξης του καλαμποκιού, καθώς και για τη σύγκριση των διαφορετικών περιοχών του γεωγραφικού εύρους της καλλιέργειας, έχει υπολογιστεί η σχέση ανάμεσα στις ολικές αποτελεσματικές θερμοκρασίες (y) στο εύρος των 10°-20° C και στους ημεροβαθμούς πάνω από 10° C. Αυτή η σχέση, για πάνω από ένα ολικό εύρος θερμοκρασιών 600°-1.800° C, έχει μια σχεδόν γραμμική μορφή και εκφράζεται από την εξίσωση:

$$y = 0,74x + 140,\ R = 0,94, \quad (9.9)$$

όπου $y = -\Sigma t$ στο εύρος των 10°-20° C και $x = -\Sigma t > 10°$ C. Χρησιμοποιώντας αυτή την εξίσωση, είναι εύκολο να υπολογιστούν τα πραγματικά θερμικά αποθέματα στο γεωγραφικό εύρος της καλλιέργειας του καλαμποκιού. Το μέγεθος της παραγωγής καλαμποκιού καθορίζεται, σε σημαντικό βαθμό, από τη θερμοκρασία και την υγρασία. Οι κλιματικές συνθήκες, που εξασφαλίζουν την παραγωγή μεγάλων και σταθερών σοδειών καλαμποκιού, χαρακτηρίζονται από καλά αποθέματα εδαφικής υγρασίας, δηλαδή 140-180 χιλιοστά παραγωγικής υγρασίας σε έδαφος βάθους 1 m, κατά το μεγαλύτερο μέρος της περιόδου ανάπτυξης, μαζί με άριστες συνθήκες θερμοκρασίας, δηλαδή μέση ημερήσια θερμοκρασία 18°-22° C. Επίσης, όταν προσδιορίζονται οι κλιματικές συνθήκες βέλτιστης παραγωγικότητας του καλαμποκιού, είναι απαραίτητο να συνυπολογίζονται οι αποστάσεις των φυτών, που είναι βέλτιστες ανάλογα με το είδος και τα μικροκλιματικά χαρακτηριστικά.

Ο καθορισμός της υγρασιακών αναγκών παραγωγικότητας του καλαμποκιού μπορεί επίσης να προσδιοριστεί με έναν υδροθερμικό συντελεστή K, που εξαρτάται από το νερό και δίνεται από τη σχέση:

$$K = (0,5\ R_1 + R_2)/0,18 \sum t_2, \quad (9.10)$$

όπου R_1 είναι η βροχόπτωση κατά τη φθινοπωρινή-χειμερινή περίοδο, R_2 η βροχόπτωση κατά την περίοδο ανάπτυξης του καλαμποκιού και Σt_2 η ολική θερμοκρασία την ίδια περίοδο.
Η καλλιέργεια του **ρυζιού** γίνεται κυρίως σε περιοχές με τύπο κλίματος μουσώνων, όπου η βροχερή περίοδος εναλλάσσεται με τη στεγνή περίοδο. Με την έναρξη της περιόδου των βροχών, οι σπόροι του ρυζιού βλαστάνουν γρήγορα, λόγω της εδαφικής υγρασίας, στη συνέχεια οι περιοχές πλημμυρίζουν και τα νεαρά φυτά παραμένουν βυθισμένα, έως την αρχική ωρίμανση. Κατόπιν, το νερό αρχίζει να εξατμίζεται, όταν μειώνονται οι βροχοπτώσεις, και συνεχίζεται η περίοδος ωρίμανσης χωρίς βύθιση. Σήμερα, το ρύζι καλλιεργείται κυρίως σε χωράφια που πλημμυρίζουν από νερό, του οποίου το ύψος ρυθμίζεται είτε με αποστράγγιση του βρόχινου νερού, όπως στις περιοχές των μουσώνων, είτε με τη χρήση συστημάτων ποτίσματος. Το ρύζι είναι μια καλλιέργεια επιρρεπής στη ζέστη, με συνέπεια οι πόροι θέρμανσης να περιορίζουν το γεωγραφικό εύρος της. Οι πρώιμες ποικιλίες ρυζιού έχουν μια περίοδο ανάπτυξης περίπου 110 ημερών και χρειάζονται συνολικές δραστικές θερμοκρασίες περίπου 2.200° C. Οι ποικιλίες αυτές καλλιεργούνται στις περιοχές της Άπω Ανατολής και της Ρωσίας. Αντίθετα, οι ποικιλίες που ωριμάζουν σε ένα μέτριο βαθμό καλλιεργούνται στη νότια περιοχή της Ρωσίας, τη Βουλγαρία και την Ιταλία και χρειάζονται μια συνολική δραστική θερμοκρασία 2.800°-3.200° C. Τέλος, στις τροπικές περιοχές όψιμες ποικιλίες χρειάζονται δραστικές θερμοκρασίες 4.000° C την περίοδο ανάπτυξης.

9.4.4. Κλίμα δένδρων, οπωρώνων και δασών

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται το κλίμα μεμονωμένων δένδρων, οπωρώνων και δασών. Επισημαίνονται τα χαρακτηριστικά των κλιματικών παραμέτρων σε μεμονωμένα δένδρα, καθώς και η επίδραση της μετάβασης από μεμονωμένα δένδρα, τόσο σε οπωρώνες, όσο και σε δάση.

9.4.4.1. Μεμονωμένα δένδρα

Αρχικά, το γεωμετρικό σχήμα θεωρείται ουσιώδες, καθόσον από αυτό εξαρτάται η επίδραση των μετεωρολογικών παραγόντων και, συνεπώς, η σημασία της επίπτωσης του κλίματος στην ανάπτυξή τους, κυρίως μέσω της ακτινοβολίας. Ένα μεμονωμένο δένδρο μπορεί να συγκριθεί με ένα μακρύ κύλινδρο μικρής διαμέτρου, που στηρίζει μια μεγάλη σφαίρα και δέχεται όχι μόνο την άμεση ακτινοβολία από τον ήλιο και τη διαχεόμενη από τον ουρανό, αλλά επίσης την ακτινοβολία, που εκπέμπεται από το περιβάλλον και ειδικότερα από το έδαφος. Για το λόγο αυτό, μπορεί να θεωρηθεί ότι το μεμονωμένο δένδρο αποτελεί ένα τέλειο δοχείο για περισφαιρική ακτινοβολία, δηλαδή αυτό το σταθερό σώμα εκπέμπει τη δική του ακτινοβολία σε όλες τις κατευθύνσεις. Στην περίπτωση ενός κωνοφόρου, ο κορμός ή ο κύλινδρος που στηρίζει το δένδρο χάνει τη σημασία του σε σχέση με όλο το δένδρο. Επιπλέον, σε ενεργειακούς υπολογισμούς, που αφορούν ένα δένδρο τέτοιου σχήματος, είναι απαραίτητο να λαμβάνεται αρχικά υπόψη η σφαιρική ακτινοβολία και όχι η περισφαιρική ακτινοβολία.

9.4.4.2. Εξωτερικές δράσεις σε ένα μεμονωμένο δένδρο

Υπάρχουν **ατμοσφαιρικοί** και **υπόγειοι** παράγοντες, διότι η ανάπτυξη ενός δένδρου επηρεάζεται όχι μόνο από τις μετεωρολογικές συνθήκες που αντιμετωπίζει στην ατμόσφαιρα, αλλά και από τις συνθήκες που διαμορφώνονται γι' αυτό στο έδαφος, δηλαδή στο επίπεδο της ρίζας.

1.Ατμοσφαιρικοί παράγοντες

Ακτινοβολία: Η ακτινοβολία έχει τη μεγαλύτερη επίδραση στην ανάπτυξη ενός μεμονωμένου δένδρου. Το δένδρο, όπως και το φυτό, αποκτά την περισσότερη ενέργεια από την ακτινοβολία, για να μετατρέψει το διοξείδιο του άνθρακα σε γλυκόζη και να φτιάξει τα άλλα οργανικά συστατικά, όπως βιταμίνες και πρωτεΐνες. Επίσης, το γεωμετρικό σχήμα του δένδρου παίζει σημαντικό ρόλο στο ποσό της ενέργειας που δέχεται από την ακτινοβολία. Συνεπώς, η σφαιρική ακτινοβολία, δηλαδή η άμεση και διαχεόμενη ακτινοβολία, είναι κυρίως μικρού μήκους κύματος, δηλαδή από υπεριώδες στο κοντινό υπέρυθρο. Ωστόσο, η ακτινοβολία που εκπέμπεται από το περιβάλλον και κυρίως το έδαφος περιορίζεται στο υπέρυθρο φάσμα και είναι, επομένως, μεγάλου μήκους κύματος, βασικά θερμική.

Θερμοκρασία: Η κίνηση του χυμού των κυττάρων σε καθένα από τα κύτταρα που σχηματίζει το φυτό είναι μια λειτουργία της θερμοκρασίας του. Η ένταση του κυττάρου, συμπεριλαμβανομένης της δύναμης για απορρόφηση, οι δυνατότητες μεταμόρφωσης και η ικανότητα να διαιρείται, με αποτέλεσμα να αυξάνει τον

αριθμό των κυττάρων στο φυτό, εξαρτάται από τη θερμοκρασία του. Συνεπώς, η παραγωγική ικανότητα όλου του φυτού περιλαμβάνει αυτές τις ιδιαιτερότητες. Η όλη δραστηριότητα των κυττάρων που σχηματίζουν ένα μεμονωμένο δένδρο εξαρτάται από τη δραστηριότητα του καθενός ξεχωριστά, συνεπώς από τη θερμοκρασία τους, σε σχέση με το υπόλοιπο φυτό. Επίσης, οι ικανότητες αφομοίωσης των διαφόρων ιστών εξαρτώνται όχι μόνο από την ακτινοβολία που λαμβάνεται από το φύλλο, αλλά επίσης ή περισσότερο από τη μορφολογική και φυσιολογική του κατάσταση. Τέλος, μέσα στην κόμη η θερμοκρασία των φύλλων είναι παραπλήσια με τη θερμοκρασία του αέρα.

Υγρασία του αέρα: Ως αποτέλεσμα των φαινομένων της διάχυσης, η υγρασία του αέρα στο εσωτερικό της κόμης των δένδρων τείνει να φτάσει σε ένα σημείο ισορροπίας με την εξωτερική υγρασία. Άρα, η υγρασία στο εσωτερικό της κόμης είναι πάντα, τουλάχιστον, λίγο υψηλότερη από την εξωτερική.

Υετός: Το νερό που φτάνει στην εξωτερική πλευρά ενός δένδρου είτε με τη μορφή υετού είτε με τη μορφή δροσιάς, μόνο μερικώς μπορεί να φτάσει το εσωτερικό της κόμης. Το νερό που πέφτει σε ένα μεμονωμένο δένδρο επιμερίζεται ανόμοια ανάμεσα στην επιφάνεια των φύλλων, την περιφέρεια της κόμης και τη βάση του δένδρου. Η περιφέρεια της κόμης είναι περισσότερο βρεγμένη απ' ό,τι η βάση του δένδρου, αλλά ένα σημαντικό ποσό βροχόπτωσης (περίπου 4 mm στην αρχή κάθε βροχής) κατακρατείται στην περιφέρεια της κόμης και στο εσωτερικό της, για να υγράνει τα φύλλα, τα κλαδιά, τους βραχίονες και τον κορμό, καθώς και τα άνθη ή τους καρπούς. Αυτό το νερό δεν κυλάει προς το έδαφος, αλλά εξατμίζεται στο ίδιο σημείο. Συνεπώς, η παρουσία δένδρων προκαλεί αυξημένη εξάτμιση, που προέρχεται από τον υετό.

Άνεμος: Η δράση του ανέμου σε ένα μεμονωμένο δένδρο μπορεί να είναι δύο ειδών, φυσιολογική και μηχανική. Η φυσιολογική δράση έχει δύο βασικά αποτελέσματα: την εξισορρόπηση των θερμοκρασιών με το έξω περιβάλλον και την αύξηση της διαπνοής, που σημαίνει απώλεια νερού και, συνεπώς, μείωση της θερμοκρασίας των φύλλων. Η μηχανική δράση τείνει να λυγίσει το δένδρο κατά μήκος της διαδρομής του επικρατούντος ανέμου. Τοπικές αύρες αδύναμες από τη φύση τους, που φυσούν μόνο σε μερικές περιόδους του έτους, όπως την άνοιξη, μπορούν να έχουν παρόμοιες επιπτώσεις στη συμπεριφορά των δένδρων.

2.Υπόγειοι παράγοντες

Θερμοκρασία: Κύρια λειτουργία των ριζών ενός δένδρου είναι να το στερεώνει στο έδαφος, αλλά επίσης να το καθιστά ικανό να απορροφά το νερό και τα μεταλλικά άλατα. Η δραστηριότητα των υπόγειων οργάνων, όπως και των εναέριων οργάνων του φυτού, εξαρτάται από τη θερμοκρασία τους, που δεν επηρεάζεται πλέον από την ακτινοβολία ή την εξάτμιση, αλλά μόνο από τη θερμοκρασία του εδάφους. Συνεπώς, είναι αναγκαία η γνώση του θερμοκρασιακού πρότυπου μέσα στο ριζόστρωμα. Αυτή η θερμοκρασία εξαρτάται μερικώς από το θερμικό αποτέλεσμα των στρωμάτων που βρίσκονται βαθιά, αλλά οι μεγαλύτερες διακυμάνσεις προκαλούνται από τις απώλειες και τα οφέλη στην επιφάνεια, μέσω της ακτινοβολίας, της εξάτμισης και, δευτερευόντως, μέσω της επαφής με τον αέρα που βρίσκεται πάνω από αυτό. Συνεπώς, θεωρείται απαραίτητη η μελέτη των συνθηκών θερμοκρασίας στο έδαφος ενός οπωρώνα.

Νερό: Το δένδρο παρουσιάζει μόνιμες απώλειες νερού στην ατμόσφαιρα, λόγω της διαπνοής των φύλλων του. Το νερό αναπληρώνεται με αναρρόφηση, που προέρχεται από το ριζικό σύστημα. Συνεπώς, υπάρχει συνεχής ροή νερού από τις ρίζες στην κόμη, αλλά, για να είναι ικανές οι ρίζες, να απορροφήσουν νερό, πρέπει όχι μόνο να διατηρούνται σε επαρκή θερμοκρασία, αλλά να βρουν αυτό το νερό στο έδαφος. Η μελέτη των ισοζυγίων νερού μέσω της βροχόπτωσης και του υπολογισμού της εξάτμισης και διαπνοής, όπως επίσης και η μελέτη των κινήσεων του νερού στο έδαφος, αποτελούν σημαντικά στοιχεία στη γνώση των συνθηκών ζωής του δένδρου.

9.4.4.3. *Οπωρώνες*

Οπωρώνες με τετράπλευρο πρότυπο ή πρότυπο Quincunx: Στην περίπτωση τέτοιων οπωρώνων, η διαφορά του με μεμονωμένο δένδρο είναι η αύξηση της **ακτινοβολίας** που εκπέμπεται από τα άλλα δένδρα. Συνεπώς, υπάρχει ανταλλαγή ενέργειας από το ένα δένδρο στο επόμενο, και αντίστροφα, η οποία είναι αξιοσημείωτη συγκρινόμενη με αυτήν που δέχεται ένα μεμονωμένο δένδρο. Επίσης, ο **άνεμος** συναντά εμπόδια σε έναν οπωρώνα, που δύσκολα μπορεί να προσπεράσει. Αυτό είναι τόσο αποτελεσματικό όσο μεγαλύτερος είναι ο οπωρώνας και όσο πιο μικρή απόσταση έχουν τα δένδρα μεταξύ τους. Σε σχέση με τις άλλες επιδράσεις, όπως

τη **θερμοκρασία**, τη **βροχόπτωση** και την **υγρασία**, πρακτικά δεν υπάρχει διαφορά μεταξύ ενός μεμονωμένου δένδρου και ενός οπωρώνα. Συνεπώς, η παραγωγή ενός οπωρώνα είναι το άθροισμα της παραγωγής των μεμονωμένων δένδρων.

Οπωρώνες σε γραμμές: Αν τα δένδρα φυτευτούν έτσι ώστε τα κλαδιά του ενός να ακουμπούν σε αυτά του άλλου σε δεδομένη κατεύθυνση, τότε το αποτέλεσμα είναι απλώς γεωμετρικά σχήματα που διαμορφώνονται από πολλά αντιπαρατιθέμενα φυτά. Για παράδειγμα, χαμηλές σειρές μπορούν να αφομοιωθούν σε ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο στο έδαφος. Στην πραγματικότητα, για λόγους αντιπαρασιτικής φροντίδας, συγκομιδής και καλλιέργειας του εδάφους, η σύγχρονη τάση είναι να χαμηλώνουν τα κλαδιά όσο το δυνατόν περισσότερο και να κλαδεύονται τα δένδρα όσο το δυνατόν πιο γεωμετρικά. Το αποτέλεσμα είναι η επίδραση της ακτινοβολίας του εδάφους να γίνεται αμελητέα σε σχέση με τη συνολική ακτινοβολία. Τότε, και ο άνεμος θα μπορεί να διαπεράσει τον οπωρώνα και να επηρεάσει την εξάτμιση και τη διαπνοή, αλλά και μια προσεκτική τοποθέτηση των σειρών σε σχέση με τον επικρατούντα άνεμο θα κάνει δυνατή τη μείωσή του.

9.4.4.4. *Μετάβαση από το μεμονωμένο δένδρο στον οπωρώνα*

Αφού οι περιβαλλοντικές παράμετροι δεν δρουν ομοιόμορφα, είναι απαραίτητο να μελετηθούν ειδικές περιπτώσεις. Ειδικότερα:

Οπωρώνας με τετράπλευρο πρότυπο ή πρότυπο Quincunx: Στην περίπτωση τέτοιου οπωρώνα, τα δένδρα αποτελούν, στην πραγματικότητα, μεμονωμένους παράγοντες. Μόνο ο άνεμος, ως ανεξάρτητη μετεωρολογική παράμετρος, εξετάζεται διαφορετικά σε οπωρώνα και σε μεμονωμένα δένδρα. Ειδικότερα, ο οπωρώνας αντιδρά ως σύνολο, οπότε ο άνεμος εξασθενεί από τη διαδοχική δράση του κάθε δένδρου.

Οπωρώνας σε σειρές: Στην περίπτωση ενός οπωρώνα σε σειρές, υπάρχει αλληλοεπίδραση μεταξύ των δένδρων. Στην πραγματικότητα, τα γεωμετρικά σχήματα στο χώρο είναι εντελώς διαφορετικής φύσης. Έχει επισημανθεί παραπάνω η σημασία αυτής της τοποθέτησης των δένδρων στο χώρο, χωρίς διακοπή στη συνέχεια, όσον αφορά την ακτινοβολία. Ωστόσο, η υγρασία στο εσωτερικό της κόμης επηρεάζεται, επίσης ως αποτέλεσμα της έλλειψης πλευρικής διάχυσης ανάμεσα στις κόμες, που εφάπτονται μεταξύ τους. Συνεπώς, υπάρχει διάχυση υγρασίας προς το περιβάλλον μόνο από την κορυφή και τις πλευρές κάθε σειράς, που δημιουργεί ένα αρκετά ιδιόμορφο μικροκλίμα μέσα στη σειρά. Το ίδιο συμβαίνει, αλλά σε μικρότερη έκταση, για τη θερμοκρασία. Ωστόσο, η επίδραση του ανέμου σε έναν οπωρώνα με διάταξη δένδρων σε σειρές εξαρτάται, βασικά, από τη γωνία πρόσπτωσης προς την ίδια τη σειρά, δηλαδή αν ο επικρατών άνεμος έχει την ίδια διεύθυνση. Αντίθετα, αν η διεύθυνση του ανέμου είναι κάθετη προς τη σειρά των δένδρων στον οπωρώνα, τότε διακόπτεται η ροή του ανέμου από την πρώτη και, ενδεχομένως, τη δεύτερη σειρά. Στη συνέχεια, εμφανίζεται επιτάχυνση της ροής του αέρα στον οπωρώνα και έντονο τυρβώδες στρώμα ανάμεσα στις σειρές.

9.4.4.5. *Δάσος*

Σε αντίθεση με τον οπωρώνα, το δάσος αποτελείται από ένα συμπαγές σύνολο, που μπορεί να αφομοιωθεί σε έναν ανασχηματισμό του γεωγραφικού ανάγλυφου. Σε σχέση με την **ακτινοβολία**, η επιφάνεια του δάσους είναι πανομοιότυπη με την επιφάνεια του εδάφους. Η ολική επίδραση αφορά σε όλα τα δένδρα και εξαρτάται μόνο από την έκθεση και την κλίση του εδάφους, δηλαδή μόνο από ορογραφικά χαρακτηριστικά. Σε σχέση με τον **άνεμο**, οι διαφορές ύψους μεταξύ των κορυφών των δένδρων αυξάνουν την τριβή με τον αέρα. Συνεπώς, η ροή του αέρα, σχεδόν ομαλή στη θάλασσα ή στο γυμνό έδαφος, διαταράσσεται όταν περνά πάνω από το δάσος, καθόσον παράγεται ένας αξιοσημείωτος στροβιλισμός. Στην ουσία, το δάσος ως σύνολο επιδρά στο δικό του μικροκλίμα. Η μείωση της έντασης του ανέμου, της εξάτμισης και διαπνοής έχει συνέπεια την αύξηση της **υγρασίας**. Η ανάσχεση της ακτινοβολίας από την κόμη των δένδρων μειώνει τη θέρμανση του εδάφους στο δάσος, με συνέπεια τη μείωση της ημερήσιας θερμοκρασίας. Επίσης, τη νύχτα, εφόσον η ακτινοβολία του εδάφους παρεμποδίζεται από τα φύλλα και σε μεγάλο βαθμό επιστρέφει στο έδαφος, η θερμοκρασία μέσα στο δάσος είναι υψηλότερη από το ανοικτό έδαφος.

Μετάβαση από το μεμονωμένο δένδρο στο δάσος: Το δάσος, ως σύνολο ή ως απλό γεωμετρικό σχήμα, θεωρείται ένα είδος ανώμαλου ανάγλυφου του εδάφους με τις ιδιότητές του. Η συμπεριφορά των μετεωρολογικών παραμέτρων σε κάθε δένδρο εξαρτάται από τη θέση του σε σχέση με το σύνολο ή από κάποια σημεία του ίδιου του δένδρου σε σχέση με την εξωτερική επιφάνεια του γεωμετρικού σχήματος που δημιουργεί

το δάσος. Αναλογικά, η άκρη ενός δάσους μπορεί να συγκριθεί με την πρώτη σειρά ενός οπωρώνα σε σειρές, Συνεπώς, τα δένδρα που αποτελούν την παρυφή του δάσους είναι ασύμμετρα, αναπτυγμένα όπως τα δένδρα του οπωρώνα σε σειρές.
Οι κλιματικές επιδράσεις για τα δένδρα αυτά είναι αρκετά διαφορετικές. Ειδικότερα, τα δένδρα αυτά είναι εκτεθειμένα εξωτερικά στον άνεμο και στην περισφαιρική ακτινοβολία σε μέρος της κόμης τους, στην ολική ακτινοβολία στις κορυφές τους, αλλά βρίσκονται στη σκιά και προφυλαγμένα από το ίδιο το δάσος, στο μεγαλύτερο μέρος της περιφέρειάς τους. Η επίδραση των διαφόρων μετεωρολογικών παραμέτρων στην ανάπτυξή τους είναι πολύ πολύπλοκη. Συνεπώς, υπάρχει εκτεταμένη διαταραχή της ροής του ανέμου και δημιουργία ενός στρώματος στο οποίο η κίνηση είναι πολύ τυρβώδης. Από θερμική άποψη, ο περιβάλλον αέρας δέχεται και εκπέμπει ακτινοβολία. Έτσι, η εξωτερική επιφάνεια του δάσους είναι θερμότερη από τον περιβάλλοντα αέρα την ημέρα και ψυχρότερη το βράδυ. Η θέρμανση στη διάρκεια της ημέρας προκαλεί αυξημένη εξάτμιση και διαπνοή στα ψηλότερα μέρη του δένδρου, και συνεπώς αξιοσημείωτη ανάγκη για κινητική ενέργεια, ώστε το νερό να μπορέσει να ανεβεί από το ριζικό σύστημα προς την κορυφή. Όλες οι μετεωρολογικές παράμετροι δρουν διαφορετικά στα φυτά που βρίσκονται στο εσωτερικό του δάσους, απ' ό,τι στα μεμονωμένα φυτά.

Ακτινοβολία: Η ολική ακτινοβολία που φτάνει στην ανώτερη επιφάνεια του δάσους προσλαμβάνεται από τα περιφερειακά μέρη του φυτού. Συνεπώς, στο εσωτερικό του δάσους εμφανίζεται περιορισμένη ακτινοβολία, της οποίας η ένταση και σύνθεση εξαρτώνται από τη φύση των ανώτερων οργάνων των φυτών. Άρα, υπάρχει διάκριση ανάμεσα σε φύλλα φωτός και φύλλα σκιάς, δένδρα φωτός και εσωτερικά δένδρα.

Θερμοκρασία: Οι θερμικές διακυμάνσεις μέσα στο δάσος είναι λιγότερο έντονες απ' ό,τι στο εξωτερικό και η εισροή ενέργειας από την ακτινοβολία είναι μικρότερη, αν όχι ανύπαρκτη. Συνεπώς, η θέρμανση την ημέρα και η ψύξη το βράδυ μειώνονται, και το ημερήσιο θερμομετρικό εύρος είναι μικρό. Δηλαδή, η θερμοκρασία στο δάσος επηρεάζεται από τη διαπνοή των φυτών και την εξάτμιση νερού από το έδαφος. Συνεπώς, σ τη διάρκεια της περιόδου ανάπτυξης υπάρχει απώλεια θερμικής ενέργειας, λόγω των δύο φαινομένων, που καταλήγει σε μικρή πτώση της ολικής θερμοκρασίας.

Υγρασία: Έχει επισημανθεί ότι, ως αποτέλεσμα του μεταβολισμού των φυτών, μεγάλες ποσότητες νερού απελευθερώνονται από τα φυτά προς την ατμόσφαιρα. Συνεπώς, η υγρασία του αέρα είναι υψηλότερη στο εσωτερικό απ' ό,τι στο εξωτερικό του δάσους.

Υετός: Σε ένα δάσος, οι κόμες των δένδρων λαμβάνουν την ίδια ποσότητα νερού όπως ένα μεμονωμένο δένδρο, όσον αφορά τη διαβροχή των φύλλων και την εξάτμιση αυτού του επιφανειακού νερού. Αφού διαβραχεί όμως, το δάσος δεν δρα πλέον ως σκεπή, που εκτρέπει τη βροχή προς την περιφέρειά του, δηλαδή τα δένδρα στάζουν το ένα πάνω στο άλλο, έτσι ώστε το ποσό του νερού που πέφτει στο έδαφος είναι πρακτικά το ίδιο με το νερό που πέφτει στο ανοικτό έδαφος. Συνεπώς, υπάρχει μείωση του συνολικού ποσού. Για το λόγο αυτό, εκτός από μικρή μείωση στην αρχή μιας βροχόπτωσης, της τάξης των 4-6 χιλιοστών, τα ποσά νερού που φτάνουν στο έδαφος ενός δάσους είναι πρακτικά τα ίδια με εκείνα που θα έφταναν εκτός αυτού.

9.4.5. Κλίμα θερμοκηπίου

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται και αναλύονται οι συνιστώσες που συνθέτουν το κλίμα του θερμοκηπίου. Ειδικότερα, εξετάζονται οι συνθήκες ακτινοβολίας, το τεχνητό φως, το θερμικό ισοζύγιο, η θερμοκρασία και ο έλεγχός της, η υγρασία και η εξάτμιση.

9.4.5.1. Συνθήκες ακτινοβολίας

Η ηλιακή ακτινοβολία στο θερμοκήπιο είναι πολύ σημαντική για την ανάπτυξη του φυτού και, σε συνδυασμό με το γυαλί, δημιουργεί το κλίμα του θερμοκηπίου. Συνεπώς, η ηλιακή ακτινοβολία αποτελεί βασικό κλιματικό στοιχείο για το θερμοκήπιο. Ένα ποσοστό της ακτινοβολίας είτε απορροφάται είτε ανακλάται από τις διάφορες επιφάνειες, δηλαδή το γυαλί και την αντίστοιχη πλαστική κάλυψη. Το μέγεθος της ακτινοβολίας που κατακρατείται από το θερμοκήπιο με απορρόφηση εξαρτάται από τη χημική σύνθεση του υλικού κάλυψης, καθώς και από το πάχος του. Ενώ η μείωση της ακτινοβολίας με απορρόφηση από το γυαλί ή τα πλαστικά παραμένει πρακτικά η ίδια, η απώλεια της έντασης της ακτινοβολίας στο θερμοκήπιο μεταβάλλεται σημαντικά στη διάρκεια του έτους ή ακόμα και στη διάρκεια της ημέρας, από εξωτερική αντανάκλαση. Η σπουδαιότητα

της αντανάκλασης καθορίζεται επίσης, σε συνάρτηση με τις συνθήκες επιφάνειας του γυαλιού ή των πλαστικών, από τη γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας. Στη λαχανοκομική πρακτική, αυτό το γεγονός οδηγεί αυτόματα στην πιο κατάλληλη γωνία κλίσης της σκεπής του θερμοκηπίου και στον προσανατολισμό της κατασκευής. Γενικά, μια σκεπή με μεγάλη κλίση θεωρείται πιο κατάλληλη το χειμώνα, ενώ μια πιο επίπεδη είναι καταλληλότερη το καλοκαίρι. Στην πράξη, μια κλίση οροφής των 26,5^{o} έχει καθοριστεί για το πρότυπο θερμοκήπιο με κριτήρια ακτινοβολίας και κατασκευής., καθώς επίσης προτιμάται προσανατολισμός Ανατολή-Δύση, λόγω της αυξημένης διαθεσιμότητας φωτός το χειμώνα.
Επίσης, το φαινόμενο του θερμοκηπίου προκαλείται από το γεγονός ότι το γυαλί ή το πλαστικό, ως υλικό κάλυψης του θερμοκηπίου, εκπέμπει πρωταρχικά μικρού μήκους κύματος ηλιακή ακτινοβολία, όμως απορροφά πολύ έντονα τη μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία, δηλαδή θερμική ακτινοβολία από το έδαφος, από τα φυτά και από τους οπωρώνες που θερμαίνονται. Το φαινόμενο του θερμοκηπίου δεν εμφανίζεται στον ίδιο βαθμό στα διαφορετικά πλαστικά, όπως γίνεται με το γυαλί, αφού αυτά επιτρέπουν στο μεγαλύτερο μέρος της μεγάλου μήκους κύματος θερμικής ακτινοβολίας να περάσει.

9.4.5.2. Τεχνητό φως

Σε αρκετές περιοχές του πλανήτη, η ένταση του φωτός από τη φυσική ηλιακή ακτινοβολία είναι γενικά πολύ μικρή το χειμώνα, οπότε και εμφανίζονται δυσκολίες στην καλλιέργεια των φυτών στο θερμοκήπιο. Η ανάπτυξη εμποδίζεται, συνήθως, σημαντικά και η ποιότητα των φυτών απέχει πολύ από το επιθυμητό. Για το λόγο αυτό, έχουν γίνει προσπάθειες να εξαλειφθούν οι δυσκολίες που εμφανίζονται από τις ακατάλληλες συνθήκες φωτισμού, μέσω τεχνητού φωτισμού. Για παράδειγμα, στη λαχανοκομία επιδιώκονται δύο σημαντικοί στόχοι με τεχνητό φωτισμό, δηλαδή να επιτευχθεί επαρκής αφομοίωση CO_2, καθώς και φωτοπεριοδικά αποτελέσματα. Ειδικότερα, για μια γενική αύξηση της φωτοσυνθετικής παραγωγής (αφομοίωση CO_2) των φυτών, τεχνητός φωτισμός εφαρμόζεται είτε πριν από το ημερήσιο φως είτε μετά το σκοτάδι είτε, ως επιπρόσθετο φως, σε συννεφιασμένες χειμωνιάτικες μέρες.
Όταν προστίθεται φως, για να αυξηθεί η παραγωγή φωτοσύνθεσης από τα φυτά, πρέπει επίσης να εξετάζεται τόσο η ένταση του φωτός, όσο και η φασματική σύνθεση των πηγών φωτός. Ως γνωστόν, έρευνες φυσιολογίας στο φυτό έχουν δείξει ότι οι ξεχωριστές ζώνες χρώματος του φωτός έχουν διαφορετικά αποτελέσματα στην ανάπτυξη των φυτών. Ειδικότερα, δύο φασματικές ζώνες του φωτός είναι εξαιρετικά σημαντικές, τα μήκη κύματος γύρω στα 660 χιλιοστά (κόκκινο) και τα μήκη κύματος μεταξύ 400 και 450 χιλιοστών (μπλε). Επιπλέον, στη λαχανοκομία, η επιλογή πηγών φωτός με βάση τη φωτεινή τους σύσταση περιορίζεται σε λαμπτήρες φωτός. Στην ουσία, ο τεχνητός φωτισμός χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά για την αναπαραγωγή φυτών στη διάρκεια περιόδων φτωχών σε φωτισμό. Επίσης, ο χρόνος αναπαραγωγής είναι σημαντικά μειωμένος και οι καλλιέργειες έχουν καλύτερη νεαρή ανάπτυξη, κάτι που αργότερα εκφράζεται σε απόδοση και ποιότητα. Με τη βοήθεια της τεχνητής ακτινοβολίας, προσδιορίζεται ο χρόνος άνθισης μέσα σε καθορισμένα όρια σε βραχυήμερα και μακροήμερα φυτά. Το πιο ενδιαφέρον παράδειγμα είναι η καλλιέργεια του χρυσάνθεμου. Τέλος, είναι απαραίτητο η νύχτα, δηλαδή η φάση σκίασης, να ακολουθεί μια συνεχή πορεία στη μεταχείριση μικρής φωτοπεριόδου.

9.4.5.3. Θερμικό ισοζύγιο σε θερμοκήπιο

Η φυσική θερμότητα στο θερμοκήπιο, όπως έχει ήδη αναφερθεί, προέρχεται από την ηλιακή ακτινοβολία. Η ηλιακή ακτινοβολία με μήκος κύματος μεταξύ 360 και 2.800 nm, αφού περάσει από το γυαλί, προσπίπτει στο έδαφος του θερμοκηπίου, στα φυτά και στα παρακείμενα αντικείμενα. Ένα μέρος αντανακλάται από τις επιφάνειες και, σε μεγάλο ποσοστό, αφήνει ξανά το θερμοκήπιο, περνώντας μέσα από το γυαλί. Ωστόσο, ένα μέρος ακτινοβολείται πίσω, μέσα στο θερμοκήπιο, από τις επιφάνειες του γυαλιού, το δε υπόλοιπο της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας μετατρέπεται σε θερμότητα στις επιφάνειες. Μέσω της μεταγωγής, η θερμότητα μεταφέρεται από τις επιφάνειες στον αέρα του θερμοκηπίου, ενώ η επιφάνεια του εδάφους μεταφέρει θερμότητα μέσα στο έδαφος.
Η ροή της θερμότητας αντιστρέφεται όταν η ακτινοβολία μειώνεται ή στη διάρκεια της νύχτας. Έτσι, η αποθηκευμένη θερμότητα στο έδαφος του θερμοκηπίου γίνεται ξανά διαθέσιμη, για τη συνολική θέρμανση του θερμοκηπίου. Σε μη θερμαινόμενο θερμοκήπιο, περίπου τα 9/10 της θερμότητας που απελευθερώνεται στη διάρκεια της νύχτας καλύπτονται από τη θερμότητα που έχει αποθηκευτεί στο έδαφος. Θερμότητα ακτινοβολείται, επίσης, και από τις επιφάνειες του θερμοκηπίου. Αυτή αντιστοιχεί σε ακτινοβολίες θερμότητας στην περιοχή των μεγάλων μηκών κύματος, δηλαδή πάνω από 2.800 nm, που δεν περνά μέσα από το γυαλί, με

αποτέλεσμα να απορροφάται. Αυτή η θερμότητα, μέσω της θέρμανσης που προκαλεί στο γυαλί και μέσω της αντανάκλασης στην επιφάνεια του γυαλιού, παραμένει στο θερμοκήπιο κατά το μεγαλύτερο μέρος της.
Στη διάρκεια της ψυχρής περιόδου του έτους, όταν η ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας είναι ανεπαρκής για την απαιτούμενη θέρμανση, η θέρμανση του θερμοκηπίου καλύπτεται από επιπρόσθετη πηγή θέρμανσης, δηλαδή από σώματα θερμού νερού και συστήματα θέρμανσης θερμού αέρα. Η θέρμανση με θερμό αέρα αντιπροσωπεύει καθαρά τη θέρμανση με μεταγωγή, δηλαδή η θερμότητα προστίθεται άμεσα σε αυτή του θερμοκηπίου. Αντίθετα, η θέρμανση με σώματα προσθέτει ακτινοβολία θερμότητας στη μεταφορά θερμότητας με μεταγωγή. Επισημαίνεται ότι, εκτός από τη θέρμανση του αέρα του θερμοκηπίου, μεγάλη είναι η σημασία και της θέρμανσης του εδάφους. Θα μπορούσε γενικά να θεωρηθεί ένας τύπος επιπρόσθετης θέρμανσης, που παράγει καλύτερη θέρμανση από αυτήν η οποία θα μπορούσε να επιτευχθεί με κανονική θέρμανση του θερμοκηπίου.
Ένα σχετικά μεγάλο μέρος της ενέργειας της ηλιακής ακτινοβολίας ή της θερμότητας που προστίθεται στο θερμοκήπιο μέσω της θέρμανσης καταναλώνεται για εξάτμιση. Ενώ μέρος της ενέργειας αυτής παραμένει στο θερμοκήπιο ως λανθάνουσα θερμότητα και απελευθερώνεται ξανά με συμπύκνωση των υδρατμών στο εσωτερικό του γυαλιού και των τμημάτων του σκελετού, το θερμοκήπιο χάνει θερμότητα με μεταγωγή, μέσω του γυαλιού, των τμημάτων του σκελετού και του εδάφους, όπως επίσης και με ανταλλαγή αέρα, μέσω των διαφυγών και του αερισμού. Το μέγεθος των απωλειών θερμότητας με μεταγωγή εξαρτάται από το μέγεθος της ακτινοβολίας από τις εξωτερικές επιφάνειες, τη διαφορά μεταξύ εσωτερικής και εξωτερικής θερμοκρασίας και την ταχύτητα του ανέμου. Ο άνεμος ελέγχει τις απώλειες, λόγω ανταλλαγής αέρα, που εξαρτώνται από τη συνεκτικότητα του θερμοκηπίου, τον τύπο και το είδος του αερισμού, καθώς και την ταχύτητα του ανέμου και τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού αέρα.

9.4.5.4. Συνθήκες θερμοκρασίας

Οι συνθήκες θερμοκρασίας του αέρα στο θερμοκήπιο ποικίλλουν, εν μέρει, σε σχέση με αυτές της υπαίθρου. Για παράδειγμα, η καλλιέργεια κηπευτικών γίνεται κυρίως σε θερμοκήπια, λόγω των ειδικών συνθηκών θερμοκρασίας. Το κλειστό, μη θερμαινόμενο, θερμοκήπιο είναι πάντα στη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας πιο θερμό σε σχέση με τον ανοιχτό αέρα. Το ποσό της θέρμανσης του αέρα σε ένα θερμοκήπιο και οι επακόλουθες ημερήσιες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις εξαρτώνται, επίσης, από το μέγεθος του θερμοκηπίου ή τον όγκο του αέρα του. Τα μεγαλύτερα ημερήσια θερμοκρασιακά εύρη σε θερμοκήπια παρατηρούνται λόγω του σχετικά μικρού όγκου αέρα. Λαμβάνοντας υπόψη την κατακόρυφη κατανομή της θερμοκρασίας, σε σύγκριση με αυτήν στον ανοιχτό αέρα, οι αντίθετες συνθήκες έχουν αποτέλεσμα τη μη θέρμανση ή τον ανεπαρκή αερισμό του θερμοκηπίου. Ενώ στον ανοιχτό αέρα και με ηλιοφάνεια, η θερμοκρασία του χαμηλότερου στρώματος αέρα μειώνεται με το ύψος, αντίθετα στο θερμοκήπιο αυξάνεται με το ύψος, με αποτέλεσμα ο θερμότερος αέρας να είναι κοντά στην οροφή του θερμοκηπίου. Το ποσό της διακύμανσης της θερμοκρασίας εξαρτάται από το μέγεθος της κατασκευής και από τον καιρό στον ανοιχτό αέρα. Σε ένα θερμοκήπιο με καλό αερισμό οροφής, οι κατακόρυφες θερμοκρασιακές συνθήκες σε ανέφελο καιρό ή σε σχετικά χαμηλή εξωτερική θερμοκρασία είναι ψυχρότερες στην περιοχή της οροφής απ' ό,τι κοντά στο έδαφος. Ενώ, το καλοκαίρι το έδαφος πάνω από, πρακτικά, όλο το θερμοκήπιο θερμαίνεται ισομερώς, το χειμώνα αναπτύσσεται μια οριζόντια διακύμανση θερμοκρασίας μεταξύ του κέντρου και των άκρων. Σε μεγαλύτερα θερμοκήπια, η μείωση της θερμοκρασίας προς τα άκρα είναι περίπου 0,5° C/m. Σε μικρότερα θερμοκήπια, η θερμοκρασία στο ανώτερο στρώμα του εδάφους μπορεί να ξεπεράσει τους 3°C/m. Η θερμοκρασία του φυτού και, ειδικότερα, η θερμοκρασία του φύλλου γενικά κυμαίνονται παράλληλα προς τη θερμοκρασία του αέρα στο θερμοκήπιο και στον ανοιχτό αέρα. Μέσω της προσφοράς ενέργειας από την άμεση ηλιακή ακτινοβολία και από άλλες πηγές ακτινοβολίας, όπως σωλήνες θέρμανσης ή ηλεκτρικές λάμπες, τα φυτά επιτυγχάνουν θερμοκρασίες μεγαλύτερες από εκείνες του περιβάλλοντος αέρα. Η θερμοκρασία του φύλλου πέφτει κάτω από τη θερμοκρασία του αέρα σε περιπτώσεις μικρών ποσών ακτινοβολίας ή υψηλής διαπνοής. Γενικά, οι θερμοκρασίες του φύλλου είναι γενικά υψηλότερες στο θερμοκήπιο σε σχέση με τον ανοιχτό αέρα, τόσο στην περίπτωση της άμεσης σύγκρισης, όσο και στην περίπτωση της σύγκρισης με τη θερμοκρασία του αέρα.

9.4.5.5. Έλεγχος θερμοκρασίας στο θερμοκήπιο

Σε θερμαινόμενο θερμοκήπιο, η ρύθμιση της θερμοκρασίας συνίσταται στον έλεγχο της θερμοκρασίας του αέρα και, συνεπώς, στον έλεγχο της θέρμανσης. Επίσης, μείωση της νυχτερινής θερμοκρασίας πραγματοποιείται σήμερα πλέον σχεδόν σε όλα τα σύγχρονα θερμοκήπια. Με βάση την απόδοση της φωτοσύνθεσης, είναι χρήσιμο, στη διάρκεια της ημέρας, να προσαρμοστεί η θερμοκρασία στις επικρατούσες

συνθήκες φωτός σε θερμαινόμενο θερμοκήπιο. Επισημαίνεται ότι εφαρμόζονται υψηλές θερμοκρασίες σε θερμαινόμενο θερμοκήπιο μόνο όταν μια σχετικά υψηλή ένταση φωτός είναι διαθέσιμη για απορρόφηση CO_2. Επίσης, μείωση της θερμοκρασίας είναι αυτόματα δυνατή στη διάρκεια της νύχτας. Αυτός ο τύπος ελέγχου θερμότητας σε θερμαινόμενο θερμοκήπιο είναι ο μοναδικός κατάλληλος από οικολογική άποψη και, επιπρόσθετα, ο πιο οικονομικός.
Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό όταν υπάρχει άμεσο ηλιακό φως, καθόσον παράγεται μια αυξανόμενη ανταλλαγή θερμότητας στο θερμοκήπιο και στα φυτά. Ιδιαίτερη σημασία δίνεται στον έλεγχο του κλίματος στη διάρκεια του καλοκαιριού, για την αυξανόμενη ανταλλαγή θερμότητας από το φυτό και τα φύλλα, λόγω αύξησης της διαπνοής. Αν το απόθεμα νερού του φυτού καταναλώνεται έντονα από την αυξανόμενη διαπνοή, τότε το φυτό αντιδρά κλείνοντας τα στόματα και διακόπτοντας άλλες φυσιολογικές διαδικασίες, με συνέπεια τον περιορισμό της διαπνοής του. Συνδεδεμένη με αυτές τις διαδικασίες είναι μια αύξηση της αντίστασης στη διάχυση του CO_2 από την ατμόσφαιρα, που οδηγεί σε μείωση της φωτοσυνθετικής απόδοσης του φυτού.
Ο έλεγχος των θερμοκρασιακών συνθηκών στο θερμοκήπιο στη διάρκεια της θερμής περιόδου με ηλιακή ακτινοβολία είναι δυνατός με:

- τη μείωση της καθαρής ακτινοβολίας, η οποία επιτυγχάνεται, στην πράξη, με το σκιασμό του θερμοκηπίου,
- την αύξηση της ανταλλαγής αέρα και του βαθμού μεταφοράς θερμότητας σε σχέση με την ανταλλαγή θερμότητας στο φυτό, στην οποία συμβάλλει ο αερισμός του θερμοκηπίου,
- την κατανάλωση της ηλιακής ενέργειας (θερμότητα), λόγω αυξημένης εξάτμισης, με ψεκασμούς ή με κατάλληλες εγκαταστάσεις εξάτμισης, τις λεγόμενες υγρές παρειές.

9.4.5.6. Υγρασία

Η υγρασία αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία του κλίματος του θερμοκηπίου, μαζί με τη θερμοκρασία και το φως. Η μεταβολή της απόλυτης υγρασίας σε μη αεριζόμενα θερμοκήπια βρίσκεται σε στενή σχέση με τη θερμοκρασία του εδάφους, δηλαδή αυξάνεται όταν το έδαφος θερμαίνεται, καθόσον αυξάνεται η εξάτμιση, και μειώνεται όταν το έδαφος ψύχεται. Η απόλυτη υγρασία μειώνεται με τον αερισμό, ακόμα και με σταθερή θερμοκρασία εδάφους, ενώ η επανατροφοδότηση νερού αυξάνεται με την εξάτμιση. Σε μια σταθερή πορεία της θερμοκρασίας, δημιουργείται ένα ισοζύγιο μεταξύ της επανατροφοδότησης των υδρατμών και της απόλυτης υγρασίας στο ανοιχτό έδαφος (στη βάση της ανταλλαγής αέρα), με αποτέλεσμα η σχετική και η απόλυτη υγρασία μέσα στο θερμοκήπιο να είναι σταθερές. Η δημιουργία «ξηρού» αέρα, δηλαδή με χαμηλή σχετική υγρασία, μπορεί να επιτευχθεί πρακτικά στο θερμοκήπιο, τόσο με αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα, όσο και με αερισμό. Υγρός αέρας μπορεί να δημιουργηθεί με αυξημένη εξάτμιση από το έδαφος σε κλειστό θερμοκήπιο, με σχετικά χαμηλή θερμοκρασία αέρα. Στην περίπτωση της θέρμανσης με θερμό αέρα, ο αέρας μπορεί γενικά να είναι ξηρότερος σε σχέση με άλλα συστήματα θέρμανσης, επειδή το έδαφος παραμένει συνήθως ψυχρότερο.

9.4.5.7. Εξάτμιση και κατανάλωση νερού

Με επαρκή παροχή νερού στο έδαφος του θερμοκηπίου επικρατεί, γενικά, η δυναμική εξατμισοδιαπνοή, που αντιστοιχεί στην εξάτμιση του νερού από την επιφάνεια του εδάφους και των φύλλων και είναι ισοδύναμη με την εξάτμιση μιας υγρής επιφάνειας. Ως γνωστόν, τα φυτά διαπνέουν μέσα από τα φύλλα και, σε μικρό βαθμό, μέσα από άλλα μέρη των βλαστών. Διάκριση μπορεί να γίνει μεταξύ της στοματικής (διαμέσου των στομάτων) και της επιδερμικής (διαμέσου της επιδερμίδας) διαπνοής. Ενώ η τελευταία αποτελεί ένα πολύ μικρό ποσοστό της συνολικής εξάτμισης και μπορεί να πραγματοποιείται μέρα και νύχτα, ο βαθμός της στοματικής διαπνοής εξαρτάται, μεταξύ άλλων, από το πλάτος των ανοιχτών στομάτων. Σε οποιαδήποτε περίπτωση, η στοματική διαπνοή πραγματοποιείται μόνο στη διάρκεια της νύχτας, καθώς μόνο τότε τα στόματα στα περισσότερα φυτά είναι κλειστά.
Στο φυτό, καθώς αυξάνεται η ηλιακή ακτινοβολία, αυξάνεται αντίστοιχα η διαπνοή και, συνεπώς, και η κατανάλωση νερού από το φυτό. Το έλλειμμα κορεσμού αυξάνεται με ηλιόλουστο καιρό, σε συνδυασμό με τον αερισμό του θερμοκηπίου, καθώς ο ξηρότερος εξωτερικός αέρας οδηγεί σε χαμηλότερη περιεκτικότητα νερού της ατμόσφαιρας του θερμοκηπίου. Η διαπνοή των φυτών δεν μπορεί να αυξηθεί με ακαθόριστο τρόπο, σε αντίθεση με την εξάτμιση της υγρής επιφάνειας του εδάφους. Αν το απόθεμα νερού του φυτού εκτίθεται πέραν από έναν συγκεκριμένο βαθμό, τότε το φυτό περιορίζει τη μεταφορά νερού, το οποίο γίνεται, μεταξύ άλλων, με το κλείσιμο των στομάτων.

9.5. Βελτίωση κλίματος για γεωργικούς σκοπούς

Σύγχρονες μέθοδοι επίδρασης ενός κλίματος για τη βελτιστοποίηση των συνθηκών σχετικά με τη γεωργία είναι αρκετά διαφορετικές. Οι μέθοδοι ελέγχου του βασικού κλίματος στοχεύουν στη ρύθμιση των υδατικών συνθηκών, που προκαλεί, ωστόσο, επιπτώσεις και σε άλλους κλιματικούς παράγοντες. Η άρδευση ξηρών περιοχών, η αποστράγγιση βαλτωδών περιοχών, η εδαφοπροστατευτική αναδάσωση και η δημιουργία δεξαμενών είναι οι πιο σημαντικές βελτιώσεις κλίματος για γεωργικούς σκοπούς.

Κατά την **άρδευση** στεγνών περιοχών στέπας, ημιάγονων ζωνών και ερήμων, πραγματοποιείται σημαντική μεταβολή στο νερό, στην ακτινοβολία και στη θερμική ισορροπία του εδάφους. Οι τιμές εξάτμισης σπάνια αυξάνονται. Ωστόσο, η κατανάλωση θερμότητας για εξάτμιση αυξάνεται σημαντικά. Αυτό προκαλεί μείωση της θερμοκρασίας μιας ενεργής επιφάνειας, με αποτέλεσμα τη μείωση της διαφοράς μεταξύ της θερμοκρασίας του αέρα και της ενεργής επιφάνειας, ενδέχεται δε να δημιουργείται αναστροφή θερμοκρασίας στο στρώμα αέρα κοντά στο έδαφος. Χωρίς άρδευση, η ηλιακή ακτινοβολία απορροφάται από την επιφάνεια της Γης, κυρίως σε ερήμους, λόγω του μικρού βαθμού θερμικής κατανάλωσης για εξάτμιση, με αποτέλεσμα η θερμοκρασία της ενεργής επιφάνειας να φτάνει σε πολύ υψηλές τιμές. Συνεπώς, **διύγρανση** και θερμοκρασιακές συνθήκες είναι επίσης σημαντικά βελτιωμένες στο πάνω μέρος του εδάφους, καθώς και στα στρώματα αέρα κοντά στη επιφάνεια, μέσω του ποτίσματος των καλλιεργειών που παράγουν υψηλότερες αποδόσεις. Έρευνες στις ερήμους της Κεντρικής Ασίας δείχνουν ότι η μέση μηνιαία θερμοκρασία του αέρα είναι κατά 3,1° C χαμηλότερη τον Ιούλιο και κατά 2,8° C χαμηλότερη τον Αύγουστο, κάτω από σκέπαστρο, σε μια μεγάλη όαση, απ' ό,τι στην έρημο, ενώ η διαστολή των υδρατμών τον Ιούλιο και Αύγουστο είναι 5,4 mbar υψηλότερη στην όαση απ' ό,τι στην έρημο. Αντίστοιχα, η θερμοκρασία εδάφους ενός αρδευόμενου χωραφιού μετά τη διύγρανση είναι 15°-20° C χαμηλότερη από αυτήν ενός μη αρδευόμενου.

Η αύξηση του όγκου των αρδευόμενων περιοχών έχει ήδη αρχίσει να παρουσιάζει αποτελέσματα στο κλίμα σε παγκόσμιο επίπεδο. Το συνολικό ποσό αρδευόμενης γης ξεπερνά ήδη τα 2 εκατομμύρια km^2. Στη διάρκεια της άρδευσης μεγάλων περιοχών, γίνεται μετατροπή των αερίων μαζών πάνω από τις αρδευόμενες περιοχές, με αποτέλεσμα ο επερχόμενος στεγνός θερμός αέρας να ψύχεται και να υγραίνεται, καθώς κινείται πάνω από την αρδευόμενη περιοχή. Μεγάλες δεξαμενές που δημιουργούνται σε περιοχές με αυξημένη γεωργία διευκολύνουν επίσης τη βελτίωση του κλίματος σε ξηρές περιοχές.

Η **αποστράγγιση** βαλτωδών περιοχών έχει αποτέλεσμα στο κλίμα αντίθετο από εκείνο που έχει η άρδευση. Η εξάτμιση από την επιφάνεια του εδάφους μειώνεται, λόγω μείωσης της υγρασίας, ενώ η θερμοκρασία επιφάνειας των υψηλότερων στρωμάτων του εδάφους αυξάνεται. Η διαφορά ανάμεσα στη θερμοκρασία μιας ενεργής επιφάνειας και στη θερμοκρασία του αέρα σπάνια αυξάνεται. Για το λόγο αυτό, ενισχύονται οι στροβιλισμοί και η ένταση του ανέμου. Ευνοϊκές συνθήκες για τη γεωργική δραστηριότητα δημιουργούνται κατά την άρδευση βαλτωδών εδαφών. Ειδικότερα, το έδαφος στεγνώνει πιο γρήγορα την άνοιξη, επιταχύνοντας έτσι την έναρξη των εργασιών στον αγρό. Επίσης, η αποστράγγιση του πλεονάζοντος νερού με τη χρήση εγγειοβελτιωτικών συστημάτων βελτιώνει τον αερισμό του εδάφους και τη δραστηριότητα του ριζικού συστήματος. Σε βόρειες περιοχές, αποκατεστημένα εδάφη γίνονται θερμότερα, φαινόμενο που οδηγεί στη βελτίωση της θρέψης του φυτού και στην αύξηση της απόδοσής του.

Η κατασκευή **δεξαμενών** σε υγρές περιοχές δεν έχει σημαντικό αποτέλεσμα στο κλίμα της περιοχής. Ωστόσο, σε ξηρές περιοχές, το αποτέλεσμα μεγάλων δεξαμενών είναι αισθητό για αρκετά χιλιόμετρα. Επίσης, στην παράκτια ζώνη, η θερμοκρασία του αέρα το καλοκαίρι είναι 2°-3° C χαμηλότερη από ό,τι σε περιοχές που είναι μακριά από την ακτή, επειδή αναπτύσσεται αρκετά ισχυρή αύρα (έως 3-4 m/s).

Η **εδαφοπροστατευτική αναδάσωση** είναι επίσης μία από τις μεθόδους για τη βελτίωση του κλίματος σε περιοχές στεπώδεις. Από τις διάφορες μορφές σχεδιασμού, οι εδαφοπροστατευτικές λωρίδες παρέχουν το μεγαλύτερο όφελος, ως μέσα βελτίωσης του κλίματος.

Λωρίδες δάσους αναπτύσσονται κατά μήκος των παρυφών αγροτεμαχίων, δημιουργώντας έτσι ένα σύστημα ανεμοφράκτη, που μειώνει την ένταση του ανέμου και την τυρβώδη ροή στο στρώμα εδάφους κοντά στη Γη. Η εξασθένιση της τυρβώδους ροής προκαλείται από τη διάσπαση των δυνατών στροβίλων, καθώς αυτοί περνούν μέσα από τη λωρίδα δάσους. Έρευνα έχει δείξει ότι η δράση της εξασθένισης του ανέμου από μια διαπερατή λωρίδα δάσους είναι πολύ αποτελεσματική. Μια αδιαπέραστη λωρίδα δρα ως τείχος, ενάντια στη ροή του ανέμου. Όταν ένα ρεύμα αέρα πλησιάζει μια αδιαπέραστη λωρίδα, περνά πάνω από τη λωρίδα χωρίς μείωση του στροβιλισμού. Η περιοχή ηρεμίας πίσω από μια τέτοια λωρίδα δεν είναι πολύ μεγάλη. Στη διάρκεια θυελλών σκόνης, εναποθέματα εδάφους, που επίσης βλάπτουν τις νεαρές καλλιέργειες, συγκεντρώνονται στις περιοχές αυτές. Η ένταση του στροβιλισμού πίσω από την περιοχή ηρεμίας αυξάνεται γρήγορα, φτάνοντας στα

ίδια επίπεδα μιας απροστάτευτης περιοχής. Η μείωση της έντασης των στροβίλων στο στρώμα αέρα κοντά στο έδαφος έχει μεγάλη πρακτική αξία, καθόσον προλαμβάνει την εδαφική διάβρωση (θύελλες σκόνης) και μειώνει την εξάτμιση από νεαρές καλλιέργειες, καθώς και από το έδαφος, διατηρώντας την εδαφική υγρασία. Ένα πιο ευνοϊκό μικροκλίμα και φυτοκλίμα δημιουργείται στην περιοχή μεταξύ των λωρίδων.

Πολλές μέθοδοι επίδρασης του κλίματος για γεωργικούς σκοπούς στοχεύουν στη βελτιστοποίηση του μικροκλίματος χωραφιών, λιβαδιών και οπωρώνων, ρυθμίζοντας την εδαφική θερμοκρασία και το ποσοστό υγρασίας. Η ανάπτυξη μεθόδων και τεχνικών για τη βελτίωση του κλίματος αποκτά αυξανόμενη πρακτική αξία στη γεωργία. Μόνο η εξάπλωση ενός από τα πιο αποτελεσματικά μέσα για τη βελτιστοποίηση του κλίματος, δηλαδή της άρδευσης, έχει συμβάλει σημαντικά στη γεωργική ανάπτυξη, με πάνω από 12 εκατομμύρια εκτάρια γης σε ξηρές περιοχές την περασμένη δεκαετία. Επιπλέον, επιχειρείται επίδραση του κλίματος στα γεωργικά φυτά, τις καλλιέργειες, τα ζώα, καθώς και τις βιολογικές και καιρικές επιδράσεις, όπως και στις γεωπονικές λειτουργικές μεθόδους.

Βιβλιογραφικές αναφορές

Δαλέζιος, Ν.Ρ. (2011). Κλιματική αλλαγή και γεωργία: Επιπτώσεις – Αντιμετώπιση – Προσαρμογή. *Γεωτεχνικά Επιστημονικά Θέματα*. 21(1):13-28.

Dalezios, N.R. & Tyraskis, P.A. (1990). Accuracy Assessment of Optimum Interpolation in Multichannel Precipitation Analysis. *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, 4:43-53.

Ζαμπάκας, Ι.Δ. (1981). *Γενική Κλιματολογία*. Αθήνα: Πανεπιστήμιο Αθηνών.

Oliver, J.E. (Ed.). (2005). Encyclopedia of World Climatology. Springer.

Mavi, H.S. & Tupper, G.J. (2004). *Agrometeorology: Principles and Applications of Climate Studies in Agriculture*. Food Products Press.

Oke, T.R. (1988). *Boundary Layer Climates*. 2nd Edition. New York: Routledge.

Orlanski, J. (1975). A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bull. AMS*, 56:529-530.

Salinger, J., Sivakumar, M.V.K. and Motha, R.P. (Eds.). (2005). *Increasing Climate Variability and Change*. Springer. Reprint from Climate Change, 70:1-2.

Seemann, I., Chirkov, Y.I., Lomas, J. and Primault, B. (1979). *Agrometeorology*. Springer.

Tsiros, E., Domenikiotis, C. and Dalezios, N.R. (2009). Sustainable production zoning for agroclimatic classification using GIS and remote sensing. *IDOJARAS,* 113(1-2):55-68.

WMO (2010). *Guide to Agricultural Meteorological Practices*. WMO - No134.

WMO (2001). *Lecture Notes for training Agricultural Meteorological Personnel* (by J.Wieringa & J. Lomas). WMO - No 551.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10
ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ ΚΑΙ ΓΕΩΡΓΙΑ

Σύνοψη
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται αρχικά η κλιματική μεταβλητότητα και αλλαγή, καθώς και τα αίτια που τις προκαλούν, οι μέθοδοι ανάλυσης της κλιματικής μεταβλητότητας, τα κλιματικά μοντέλα και οι μέθοδοι εποχικής κλιματικής πρόγνωσης. Ακολουθεί περιγραφή των διαχρονικών χαρακτηριστικών της κλιματικής μεταβλητότητας και αλλαγής, καθώς και καταγραφή της παρελθούσας και της παρούσας κατάστασης, όπως και των μελλοντικών κλιματικών τάσεων στον 21ο αιώνα. Τέλος, μελετάται η σχέση της κλιματικής μεταβλητότητας και αλλαγής με τα γεωργικά οικοσυστήματα, και αναλύεται το τρίπτυχο επιπτώσεις-αντιμετώπιση-προσαρμογή της γεωργίας στην κλιματική μεταβλητότητα και αλλαγή.

Προαπαιτούμενη γνώση
Ο αναγνώστης απαιτείται να έχει βασικές γνώσεις φυσικής και μαθηματικών.

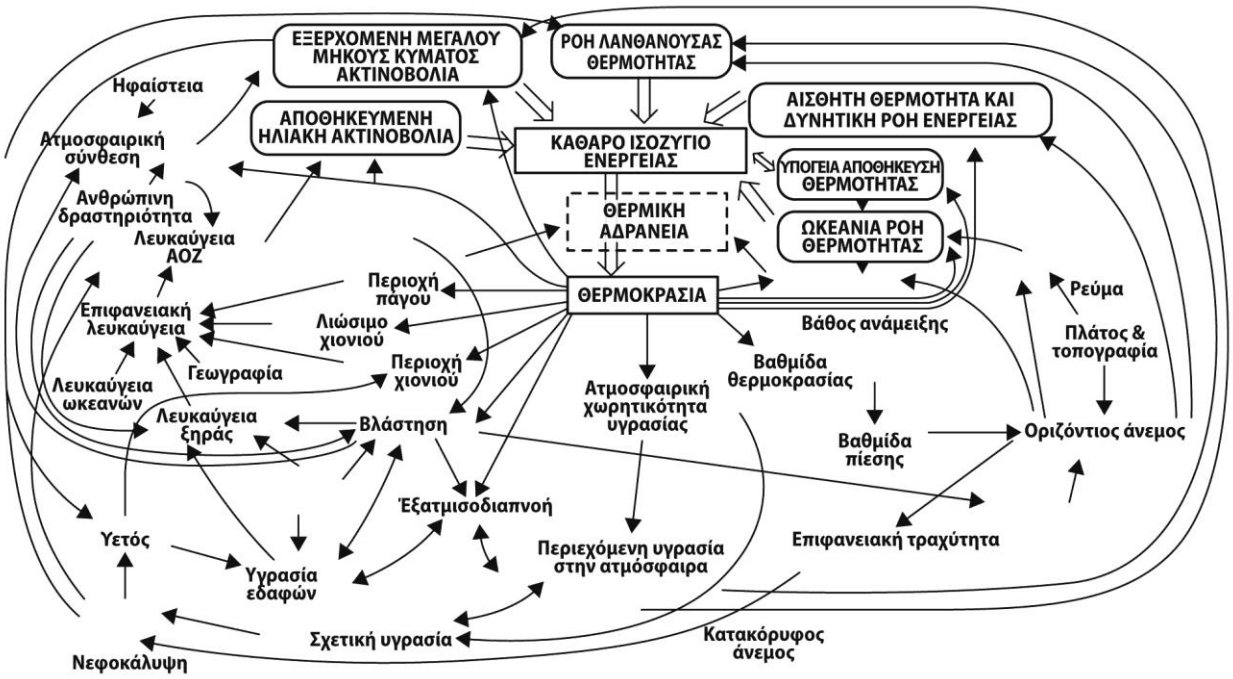
10.1 Κλιματική μεταβλητότητα και αλλαγή

Το κλίμα αλλάζει συνεχώς και οι ενδείξεις δείχνουν πως αυτή η διαδικασία αλλαγής μπορεί να αξιολογηθεί σε ένα εύρος χρονικών και χωρικών κλιμάκων. Εδώ παρουσιάζεται η κλιματική μεταβλητότητα και τα αίτια που την προκαλούν, καθώς και μέθοδοι ανάλυσης της κλιματικής μεταβλητότητας. Επίσης, παρουσιάζονται τα κλιματικά μοντέλα, δηλαδή τα μοντέλα πλανητικής κυκλοφορίας, τα περιοχικά μοντέλα και η υποκλιμάκωση, όπως και οι μέθοδοι εποχικής κλιματικής πρόγνωσης.

10.1.1. Κλιματική μεταβλητότητα

Το κλίμα θεωρείται η μέση κατάσταση του καιρού. Αυτό δεν σημαίνει ότι παραμένει ένα σταθερό, μη μεταβαλλόμενο φαινόμενο. Αντίθετα, το κλιματικό σύστημα χαρακτηρίζεται από σταθερή αλλαγή. Οι κλιματικές μεταβολές οδηγούν σε τροποποιήσεις των μέσων όρων, της μεταβλητότητας και της συχνότητας των ακραίων τιμών της θερμοκρασίας, του υετού, της πίεσης και άλλων μετεωρολογικών μεταβλητών. Τέτοιες αλλαγές, που μπορεί να συμβούν σε όλες τις κλίμακες χρόνου και χώρου, πέραν των μεμονωμένων καιρικών συμβάντων, ορίζονται ως **κλιματική μεταβλητότητα** (IPCC, 2007). Αντίστοιχα, στατιστικά σημαντικές αλλαγές στη μέση κατάσταση του κλίματος ή στην αναμενόμενη μεταβλητότητα, που παρουσιάζουν εμμονή για εκτεταμένη περίοδο της τάξης δεκαετιών ή περισσότερο, αναφέρονται ως **κλιματική αλλαγή** (IPCC, 2001). Στο Σχήμα 14.1 απεικονίζεται το πλανητικό κλιματικό σύστημα, καθώς και όλες οι διαδικασίες και αλληλεπιδράσεις του.
Οι αιτίες της κλιματικής μεταβλητότητας και αλλαγής περιλαμβάνουν φυσικές εσωτερικές διαδικασίες, όπως δυναμικές και θερμοδυναμικές αλληλοεπιδράσεις μεταξύ ατμόσφαιρας και ωκεανών, ηφαιστειογενείς εκρήξεις, αλλαγές στην ηλιακή ακτινοβολία, ανθρωπογενείς αλλαγές στη δομή και σύσταση της ατμόσφαιρας ή αλλαγές στη χρήση γης. Τέτοιοι παράγοντες μπορεί να επηρεάζουν άμεσα το κλίμα, αλλοιώνοντας το τοπικό ατμοσφαιρικό ισοζύγιο θερμότητας και/ή τροποποιώντας, έμμεσα, την πλανητική κυκλοφορία αέριων μαζών και ωκεάνιων ρευμάτων, απ' όπου ρυθμίζεται, σε μεγάλο βαθμό, το τοπικό κλίμα. Οι επιδράσεις της κλιματικής μεταβολής είναι πολλές και συχνά επηρεάζουν κοινωνικοοικονομικά και φυσικά συστήματα. Γεωγραφικά, οι κλιματικές αλλαγές είναι τόσο εκτεταμένες που εξετάζονται ως ένα ολοκληρωμένο πλανητικό φαινόμενο. Στην ουσία, η ημισφαιρική ή παγκόσμια θεώρηση απαιτεί να εξεταστούν οι σχέσεις αίτιου και αποτελέσματος. Σε παγκόσμια κλίμακα, μεταβολές της μέσης κατάστασης του κλίματος της επιφάνειας έχουν αρχίσει από τα μέσα του 19ου αιώνα να περιγράφονται με ικανοποιητική πιστότητα βάσει παρατηρήσεων οργάνων, ωστόσο αναλύσεις για την επιφανειακή μεταβλητότητα και τις ακραίες τιμές, καθώς και για το κλίμα της ανώτερης ατμόσφαιρας, είναι περισσότερο περιορισμένες.
Τα διαθέσιμα δεδομένα παρατηρήσεων καλύπτουν την περίοδο της αύξησης του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2), λόγω ανθρωπογενών αιτίων και άλλων συγκεντρώσεων αερίων του θερμοκηπίου, καθώς και της σύγχρονης πλανητικής θέρμανσης. Η πλανητική θέρμανση έχει οδηγήσει, μεταξύ άλλων, σε ιδιαίτερα ακραίο κλίμα, αύξηση του πλανητικού υετού και του περιεχομένου των υδρατμών της ατμόσφαιρας, αύξηση της περιεχόμενης θερμότητας των ωκεανών και της στάθμης της θάλασσας, μείωση της έκτασης παγετώνων και χιονοκάλυψης στα βουνά, περιορισμό των εποχών πάγου σε λίμνες και ποτάμια, και συστηματική μείωση

του εαρινού και θερινού πάγου στις αρκτικές περιοχές. Δεδομένα παρατηρήσεων συνεισφέρουν στη γνώση των παλαιοκλιματικών μεταβολών, στη βαθμονόμηση της σχέσης μεταξύ, αφενός, πληρεξούσιων (proxy) δεδομένων, όπως είναι οι δακτύλιοι δένδρων, οι πυρήνες πάγου, οι γεωτρήσεις, οι φερτές ύλες, τα κοραλλιογενή και ιστορικά δοκίμια, και, αφετέρου, μετεωρολογικών μεταβλητών. Τέλος, δεδομένα παρατηρήσεων θεωρούνται απαραίτητα επίσης σε κλιματικά μοντέλα, που μπορούν να εκτιμήσουν τη μελλοντική εξέλιξη του κλίματος και την πιστότητα των αποτελεσμάτων.



Σχήμα 10.1 *Το κλιματικό σύστημα και οι διαδικασίες του.*

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται επιγραμματικά η ομοιογένεια χρονοσειρών ενός σταθμού. Επισημαίνεται επίσης ότι χρησιμοποιούνται στις κλιματικές αναλύσεις τόσο η ανάλυση συχνοτήτων, η ανάλυση περιοδικότητας και η ανάλυση τάσεων, που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 13, όσο και η ανάλυση χρονοσειρών και τα μοντέλα ARIMA, που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 12.

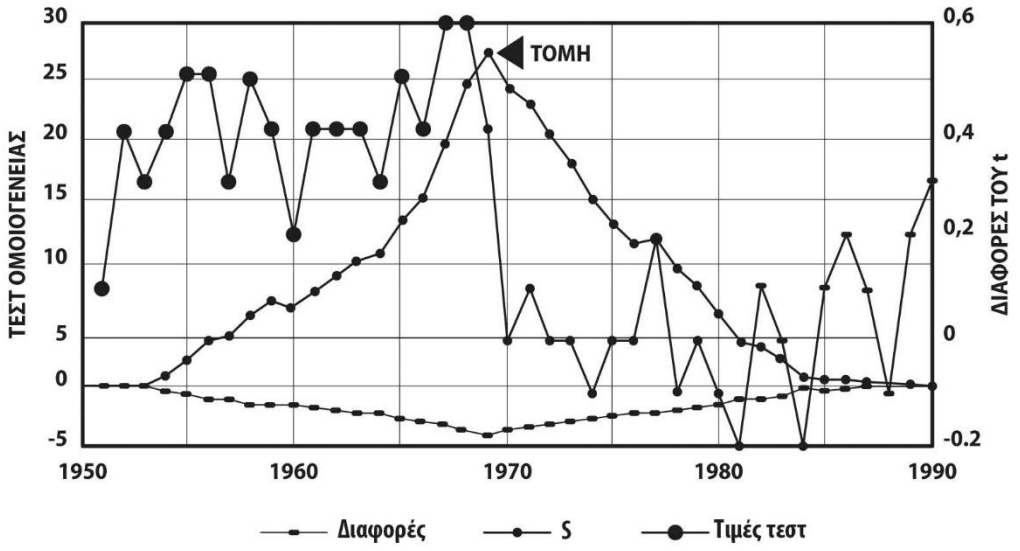
10.1.1.1. Ομοιογένεια (homogeneity) δεδομένων

Οι κλιματικές αναλύσεις απαιτούν ομογενή δεδομένα, που είναι ιδιαίτερα σημαντικά για αναλύσεις κλιματικής αλλαγής και μεταβλητότητας. Ομογενής κλιματική χρονοσειρά ορίζεται εκείνη της οποίας οι μεταβολές οφείλονται μόνο στο κλίμα. Ωστόσο, οι περισσότερες μεγάλες κλιματικές χρονοσειρές έχουν επηρεαστεί από μη κλιματικούς παράγοντες, οι οποίοι καθιστούν τα δεδομένα μη αντιπροσωπευτικά της πραγματικής μεταβολής του κλίματος που εμφανίζεται διαχρονικά. Οι παράγοντες αυτοί περιλαμβάνουν, μεταξύ άλλων, αλλαγές σε όργανα, πρακτικές παρατήρησης, τοποθεσίες σταθμών, χρησιμοποιούμενους τύπους και εξισώσεις και μικροκλίμα σταθμού. Μερικές αλλαγές προκαλούν απότομες ασυνέχειες, ενώ άλλες αλλαγές, όπως η αλλαγή στο περιβάλλον γύρω από το σταθμό, μπορεί να προκαλέσουν βαθμιαίες στατιστικές «μεροληψίες» (bias) στα δεδομένα. Όλες αυτές οι ανομοιογένειες μπορεί να προκαλέσουν μεροληψία σε μια χρονοσειρά και να οδηγήσουν σε παρερμηνείες. Είναι απαραίτητο είτε να εξαλειφθούν όλες αυτές οι μη κλιματικές μεροληψίες ή ανομοιογένειες είτε, τουλάχιστον, να υπολογιστεί το πιθανό σφάλμα που προκαλούν, πριν εξαχθούν συμπεράσματα από τα δεδομένα (Aguilar et al., 2004).

Υπάρχουν διάφορες άμεσες και έμμεσες μεθοδολογίες για τον έλεγχο της ομοιογένειας. Οι άμεσες μεθοδολογίες περιλαμβάνουν χρήση μεταδεδομένων (metadata), συγκρίσεις γειτονικών οργάνων, καθώς και στατιστικές αναλύσεις για αλλαγές οργάνων. Οι έμμεσες μεθοδολογίες εξετάζουν χρήση δεδομένων ενός μόνο σταθμού, ανάπτυξη χρονοσειρών αναφοράς, καθώς και υποκειμενικές και αντικειμενικές μεθόδους. Οι

διαθέσιμες αντικειμενικές μέθοδοι περιλαμβάνουν τη μέθοδο Potter, το τυπικό κανονικό πείραμα ομοιογένειας (Standard Normal Homogeneity Test/SNHT), την παλινδρόμηση δύο φάσεων, το σημειακό πείραμα αλλαγής τάξης, το πείραμα Craddock, την τεχνική Caussinus-Mestre (Caussinus & Mestre, 1997), καθώς και την πολλαπλή ανάλυση σειρών για ομοιογένεια (βλ., για παράδειγμα, Alexandersson & Moberg, 1997). Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα πειράματα Craddock και SNHT, καθώς και η μέθοδος Caussinus-Mestre.

Τα πειράματα Craddock και SNHT (Craddock, 1979· Alexandersson, 1986· Dalezios et al., 1994) μπορούν να εφαρμοστούν σε ετήσιες, εποχικές ή μηνιαίες χρονοσειρές μέσης, ελάχιστης και μέγιστης θερμοκρασίας, υετού και διάρκειας ηλιοφάνειας, αντίστοιχα. Και για τις δύο μεθόδους, απαιτείται χρονοσειρά αναφοράς. Το πείραμα **Craddock** βασίζεται στην ανάλυση του κλάσματος von Neumann (von Neumann ratio), που σχετίζεται στενά με το σειριακό συντελεστή συσχέτισης πρώτης τάξης. Αν η σειρά είναι ομογενής, με σταθερό μέσο, το κλάσμα von Neumann έχει τιμή κοντά στο 2, διαφορετικά έχει τιμή μικρότερη του 2. Στο Σχήμα 10.2 απεικονίζεται μια εφαρμογή των ελέγχων Alexandersson και Craddock για τη θερμοκρασία. Αντίστοιχα, η μέθοδος **SNHT** χρησιμοποιεί το T-test για την ανάλυση των μετατοπίσεων μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης στις χρονοσειρές. Οι υπολογιζόμενες μετατοπίσεις επιβεβαιώνονται από το ιστορικό αρχείο του σταθμού και κατόπιν προσαρμόζονται. Επίσης, ημερήσιες θερμοκρασίες ομογενοποιούνται, χρησιμοποιώντας αρμονικές συναρτήσεις με μηνιαίες διορθώσεις. Η μέθοδος **Caussinus-Mestre** υπολογίζει συγχρόνως άγνωστο αριθμό πολλαπλών ανοιγμάτων, δημιουργώντας σειρά αναφοράς. Βασίζεται στην αρχή ότι η χρονοσειρά μεταξύ δύο ανοιγμάτων είναι ομογενής και τα ομογενή αυτά τμήματα μπορεί να χρησιμοποιηθούν ως σειρές αναφοράς. Κάθε μεμονωμένη σειρά συγκρίνεται με άλλες στην ίδια κλιματική περιοχή, δημιουργώντας σειρές κλασμάτων για υετό και διαφορών για θερμοκρασία, αντίστοιχα. Οι σειρές αυτές κλασμάτων ή διαφορών εξετάζονται για ασυνέχειες. Αν ένα υπολογιζόμενο άνοιγμα παραμένει σταθερό σε όλες τις συγκρίσεις ενός σταθμού με τους γειτονικούς, τότε το άνοιγμα αποδίδεται στη χρονοσειρά του σταθμού. Για τους υπολογισμούς, χρησιμοποιείται ένα κανονικό γραμμικό μοντέλο, με άγνωστο αριθμό ανοιγμάτων, για τον έλεγχο πολλαπλών υποθέσεων. Τελικά, έχει καθιερωθεί η διαδικασία διπλού βήματος, που παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα υπολογισμών από τη διαδικασία μεμονωμένου βήματος, και έχει υιοθετηθεί από τη Μετεωρολογική Υπηρεσία της Γαλλίας. Τέλος, υπάρχουν λογισμικά πακέτα, όπως τα AnClim, ProClimDB, LoadData και ClimDex (Eitzinger et al., 2008), που επίσης παρουσιάζουν εκτεταμένη χρήση.



Σχήμα 10.2. *Εφαρμογή των ελέγχων Alexandersson και Craddock για θερμοκρασία.*

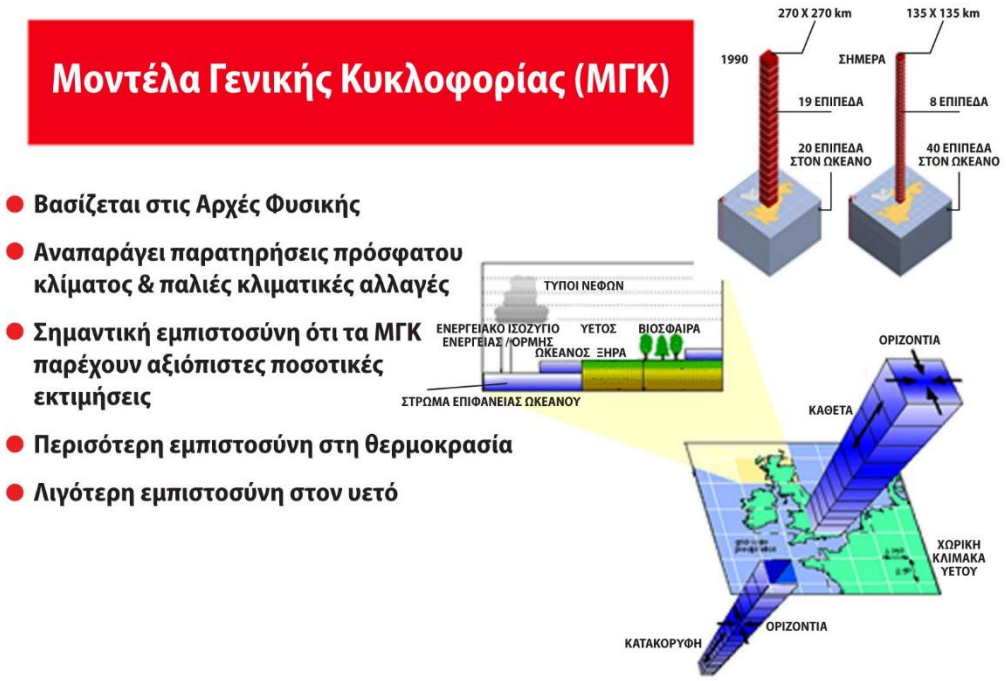
10.1.2 Κλιματικά μοντέλα

Ένα μοντέλο γενικής κυκλοφορίας/ΜΓΚ (General Circulation Model/GCM) είναι ένα μαθηματικό μοντέλο γενικής κυκλοφορίας πλανητικής ατμόσφαιρας ή ωκεανού και βασίζεται στις εξισώσεις Navier-Stokes μιας περιστρεφόμενης σφαίρας με θερμοδυναμικούς όρους, για διάφορες πηγές ενέργειας, όπως η ακτινοβολία και η λανθάνουσα θερμότητα. Οι εξισώσεις αυτές αποτελούν τη βάση για πολύπλοκα προγράμματα υπολογιστών, που συνήθως χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση της ατμόσφαιρας ή του ωκεανού της Γης. Ατμοσφαιρικά ΜΓΚ/ΑΜΓΚ (Atmospheric General Circulation Model/AGCM) και ωκεάνια ΜΓΚ/ΩΜΓΚ (Oceanic General Circulation Model/OGCM) είναι βασικές συνιστώσες των πλανητικών κλιματικών μοντέλων (Global Climate Models), μαζί με συνιστώσες θάλασσας-πάγου και εδάφους-επιφάνειας. Τα ΜΓΚ και τα πλανητικά κλιματικά μοντέλα εφαρμόζονται ευρέως για την πρόγνωση του καιρού, την κατανόηση του κλίματος, καθώς και την προβολή της κλιματικής αλλαγής. Έχουν σχεδιαστεί εκδοχές κλιματικών εφαρμογών για χρονικές κλίμακες από δεκαετία μέχρι αιώνα. Αυτά τα εντατικά υπολογιστικά αριθμητικά μοντέλα βασίζονται στην ολοκλήρωση διαφόρων εξισώσεων δυναμικής ρευστών, καθώς και χημικών και σε κάποιες περιπτώσεις βιολογικών εξισώσεων.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, υπάρχουν ΑΜΓΚ και ΩΜΓΚ. Ένα ΑΜΓΚ και ένα ΩΜΓΚ μπορούν να συνδυαστούν, για να σχηματίσουν ένα μοντέλο γενικής κυκλοφορίας ατμόσφαιρας-ωκεανού (ΑΩΜΓΚ). Με την προσθήκη άλλων συνιστωσών, όπως ενός μοντέλου θάλασσας-πάγου ή ενός μοντέλου εξατμισοδιαπνοής πάνω από την ξηρά, το ΑΩΜΓΚ γίνεται η βάση για ένα πλήρες **κλιματικό μοντέλο.** Μέσα στη δομή αυτή, μπορεί να υπάρχουν διαφοροποιήσεις, οπότε μπορεί να μελετηθεί η μεταβαλλόμενη ανταπόκρισή τους στην κλιματική αλλαγή. Σχηματικά, όλα αυτά παρουσιάζονται ως εξής.

ΑΜΓΚ + ΩΜΓΚ = ΑΩΜΓΚ + άλλες συνιστώσες = κλιματικό μοντέλο

Στο Σχήμα 10.3 παρουσιάζεται σχηματικά ένα ΜΓΚ.



Σχήμα 10.3 *Απεικόνιση ενός ΜΓΚ.*

Τα ΜΓΚ βασίζονται σε καθιερωμένες αρχές της φυσικής και αναπαράγουν παρατηρηθέντα χαρακτηριστικά πρόσφατου κλίματος και κλιματικών αλλαγών του παρελθόντος. Παρέχουν αξιόπιστες ποσοτικές εκτιμήσεις μελλοντικών κλιματικών αλλαγών, ιδιαίτερα σε κλίμακες ηπείρου ή/και μεγαλύτερες (IPCC, 2007). Υπάρχει μεγαλύτερη εμπιστοσύνη σε εκτιμήσεις κάποιων μεταβλητών, όπως η θερμοκρασία, παρά για άλλες, όπως ο

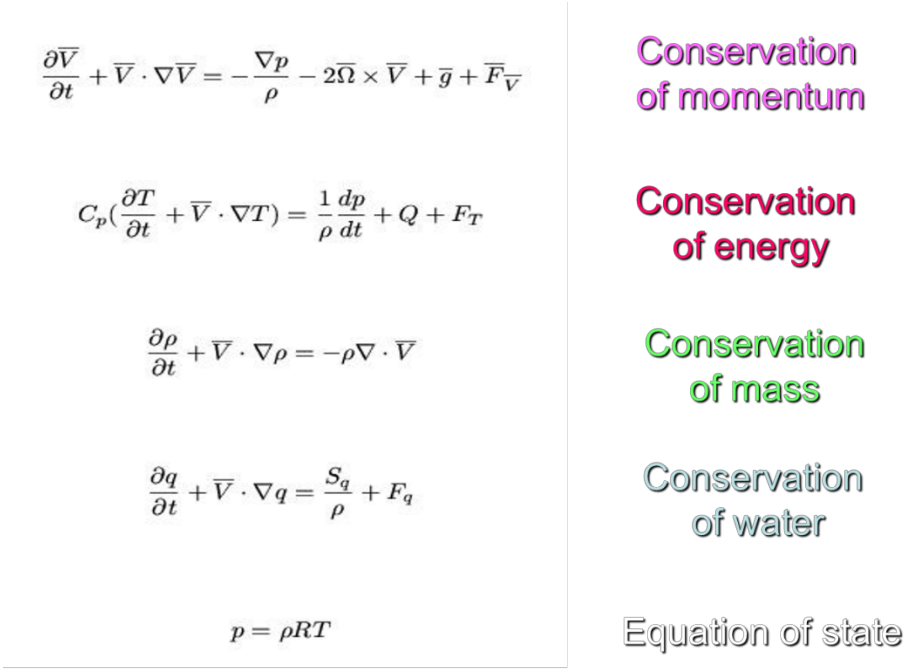
υετός. Επιπλέον, η μοντελοποίηση μπορεί με τον καλύτερο τρόπο να προσδιορίσει τη σπουδαιότητα των εξωτερικών παραγόντων, όπως η ηφαιστειακή και η ηλιακή δραστηριότητα, την περίοδο του παρόντος κλίματος. Ένα κλιματικό μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσομοιώσει τις αλλαγές της θερμοκρασίας που εμφανίζονται τόσο από φυσικές όσο και από ανθρωπογενείς αιτίες. Από τις προσομοιώσεις αυτές (IPCC, 2001), μπορεί να εξαχθεί ότι η επίδραση στο κλίμα από αλλαγές στην ηλιακή ακτινοβολία και την ηφαιστειακή δράση έχει μάλλον προκληθεί εξαιτίας διακυμάνσεων στις πλανητικές και τις ημισφαιρικές μέσες θερμοκρασίες κατά το πρώτο μέρος του 20ού αιώνα. Ωστόσο, οι μεταβολές αυτές της θερμοκρασίας είναι πολύ μικρές, για να δημιουργήσουν τις αυξήσεις της μέσης θερμοκρασίας κατά το τέλος του 20ού αιώνα.

Τα ΜΓΚ αποτελούν τη βάση για την ανάπτυξη μελλοντικών σεναρίων, που συμβάλλουν στην εκτίμηση των πιθανών επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στη γεωργία. Η έρευνα στα ΜΓΚ έχει παρουσιάσει σημαντική εξέλιξη τα τελευταία τριάντα χρόνια. Αρχικά, η έρευνα αυτή εστιαζόταν σε μια γενική παρουσίαση του κλίματος, με απλουστεύσεις σε σημαντικές διαδικασίες και περιορισμένη ένταξη παραγόντων του κλιματικού συστήματος, όπως οι ωκεανοί, η κρυόσφαιρα και η βιόσφαιρα. Ο συνδυασμός αυτών των συνιστωσών και η ένταξη ακόμα περισσότερων υπομοντέλων αποτελούν μεγάλη πρόοδο την αναφερόμενη περίοδο, που έχει διευκολυνθεί και από την εκθετική αύξηση της ισχύος των υπολογιστών. Ειδικότερα, συνδυασμοί μοντέλων και πολλαπλές προσομοιώσεις από ένα μεμονωμένο μοντέλο αυξάνουν επιπλέον την αξιοποίηση των ΜΓΚ. Σήμερα, τα ΜΓΚ μπορούν να παρέχουν επιτυχείς προσομοιώσεις πολλών παραγόντων του τρέχοντος κλίματος, όπως ο προσδιορισμός κλιματικών κινδύνων για κάποιες καλλιέργειες. Αυτό προσδίδει αξιοπιστία στην ικανότητά τους να παρέχουν αληθοφανή μελλοντικά σενάρια. Ωστόσο, τα ΜΓΚ δεν μπορούν ακόμη να προσομοιώσουν όλους τους τομείς και παράγοντες του κλίματος. Για παράδειγμα, τα μοντέλα δεν προσομοιώνουν ακόμη πλήρως την παρατηρηθείσα διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ επιφάνειας και κατώτερης ατμόσφαιρας. Επίσης, υπάρχουν σημαντικές αβεβαιότητες σχετικά με νέφη και την αλληλεπίδραση με ακτινοβολία και αιωρούμενα σωματίδια (UNFCCC, 2004).

Ένα ΜΓΚ περιγράφεται από τις κύριες εξισώσεις που αναφέρονται στην κίνηση ενέργειας και ορμής, μαζί με τη διατήρηση της μάζας και των υδρατμών σε τρεις διαστάσεις. Ενδεικτικά, στο Σχήμα 10.4 παρουσιάζονται οι βασικές εξισώσεις ενός κλιματικού μοντέλου. Τυπικά, ένα ΜΓΚ έχει μέγεθος εσχάρας 100-300 χλμ., περίπου 20 επίπεδα πάνω από την επιφάνεια της ξηράς ή κάτω από την επιφάνεια, σε ωκεανούς, και ένα χρονικό βήμα 10-30 λεπτών. Αναπόφευκτα, η διακριτική ικανότητα περιορίζει την αποτελεσματικότητα των ΜΓΚ, ιδιαίτερα στη γεωργία, που χρειάζεται τοπική πληροφορία. Τα ΜΓΚ είναι επιστημονικά σύνθετα μοντέλα και συστήματα και με υψηλό κόστος ανάπτυξης. Κατά συνέπεια, λειτουργούν σε σχετικά μικρό αριθμό ερευνητικών κέντρων. Σήμερα, ξεχωρίζουν τρία κέντρα στις ΗΠΑ, από δύο σε Γαλλία, Ιαπωνία και Αυστραλία, και από ένα στο Ηνωμένο Βασίλειο, τον Καναδά, τη Γερμανία και την Κίνα. Στον Πίνακα 10.1 αναγράφονται τα πιο γνωστά και ευρέως χρησιμοποιούμενα ΜΓΚ. Τα εξαγόμενα των ΜΓΚ είναι άμεσα διαθέσιμα για τα περισσότερα μοντέλα, ενώ λεπτομερείς οδηγίες για την απόκτηση δεδομένων δίδονται στις αντίστοιχες ιστοσελίδες. Ειδικότερα, μερικά ΜΓΚ έχουν χρησιμοποιηθεί από την IPCC, όπως το γαλλικό μοντέλο ARPEGE, τα αμερικανικά GEOS-2 και GISS της NASA, καθώς και CCM2 της NOAA, το γερμανικό μοντέλο ECHAM και το καναδικό μοντέλο MAM, μεταξύ άλλων.

Α/Α	**Τίτλος**	**Πηγή**	**Αναφορά**
1.	GSIRO2	Αυστραλία	IPCC 2006
2.	CGCM2	Καναδάς	PCMDI 2006
3.	ECHAMS	Γερμανία	WDC 2008
4.	HadCM3	Ηνωμένο Βασίλειο	
5.	CCSM	ΗΠΑ	
6.	ARPECE	Γαλλία	
7.	MAM	Καναδάς	
8.	GEOS-2	ΗΠΑ (NASA)	
9.	GISS	ΗΠΑ (NASA)	
10.	CCM2	NOAA	

Πίνακας 10.1 *Λίστα ΜΓΚ (GCMs).*



Σχήμα 10.4. *Βασικές εξισώσεις κλιματικού μοντέλου.*

10.1.2.1. Σενάρια κλιματικής αλλαγής

«Ένα σενάριο κλιματικής αλλαγής είναι μια συνεκτική, εσωτερικά αμετάβλητη και αληθοφανής περιγραφή μιας μελλοντικής κατάστασης του κόσμου» (Parry et al., 2004) και «ένα αληθοφανές μελλοντικό κλίμα, που έχει δημιουργηθεί για σαφή αξιοποίηση στη διερεύνηση δυνητικών συνεπειών της ανθρωπογενούς κλιματικής αλλαγής» (IPCC, 2001). Επισημαίνεται ότι ένα σενάριο κλιματικής αλλαγής δεν αποτελεί πρόγνωση μελλοντικού κλίματος. Τα σενάρια κλιματικής αλλαγής θεωρούνται απαραίτητα, καθόσον παρέχουν δεδομένα για εκτιμήσεις τρωτότητας, επιπτώσεων και προσαρμογής, ενεργούν ως μηχανισμοί ενημερωτικής αφύπνισης, συμβάλλουν σε στρατηγική σχεδίαση και δημιουργία πολιτικών, συνοψίζουν τη γνώση μας για το μέλλον και διερευνούν τις επιπλοκές των αποφάσεων για πολιτικές. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά αποτελούν και πλεονεκτήματα της ανάπτυξης κλιματικών σεναρίων. Είναι σκόπιμο να υπάρχει διάκριση μεταξύ ενός κλιματικού σεναρίου και ενός σεναρίου κλιματικής αλλαγής (IPCC, 2001). Ειδικότερα, ένα σενάριο κλιματικής αλλαγής αναφέρεται αυστηρά στην αναπαράσταση της διαφοράς μεταξύ ενός αληθοφανούς μελλοντικού κλίματος και του τρέχοντος ή κλίματος ελέγχου, που συνήθως αναπαρίσταται μέσω ενός κλιματικού μοντέλου μηνιαίων, εποχικών ή ετήσιων τιμών. Αντίστοιχα, κλιματικό σενάριο είναι ο συνδυασμός του σεναρίου κλιματικής αλλαγής και της περιγραφής του τρέχοντος κλίματος, όπως αναπαρίσταται μέσω των παρατηρήσεων του κλίματος. Σχηματικά, ισχύει η εξής σχέση:

Κλιματικό σενάριο = τρέχον κλίμα + σενάριο κλιματικής αλλαγής

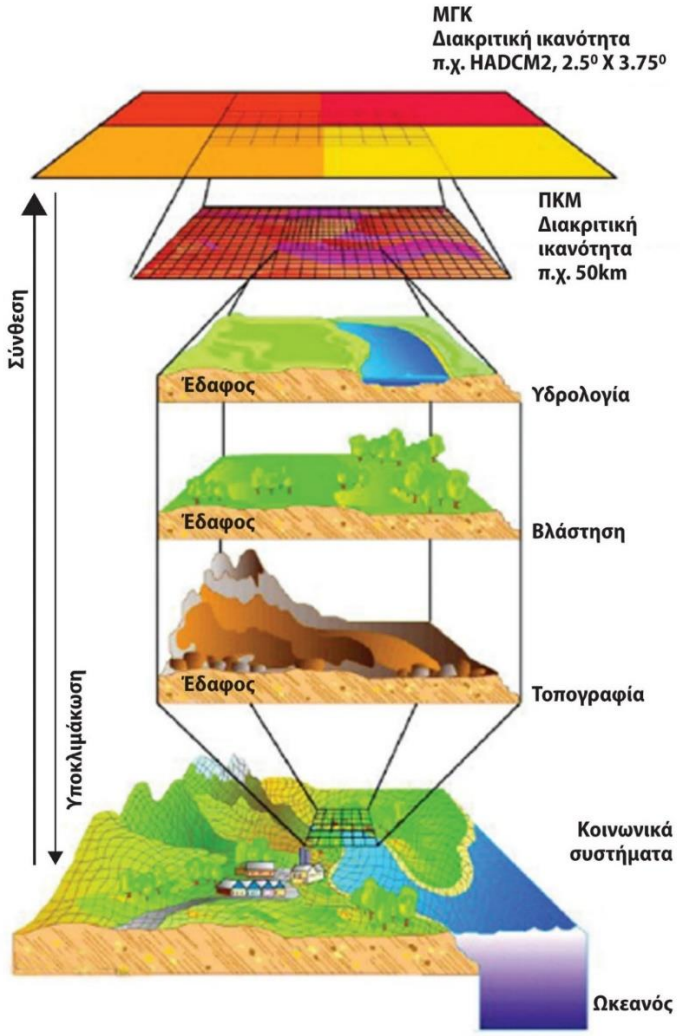
Ανάλογα με το εξεταζόμενο θέμα, χρησιμοποιούνται διαφορετικά χρονικά δεδομένα. Για παράδειγμα, όταν εξετάζονται κλιματική μεταβλητότητα και αλλαγές ακραίων κλιματικών φαινομένων, χρησιμοποιούνται ημερήσια δεδομένα, ώστε να καλύπτονται οι αλλαγές συμβάντων υψηλής συχνότητας, κυρίως για επιπτώσεις και προσαρμογή. Ωστόσο, τα περισσότερα σενάρια κλιματικής αλλαγής που προέρχονται από εξαγόμενα ΜΓΚ βασίζονται, γενικά, σε αλλαγές μέσου μηνιαίου ή εποχικού κλίματος. Παρ' όλα αυτά, πρόσφατα έχουν αρχίσει να καταγράφονται ημερήσιες τιμές από τα μοντέλα.

Επισημαίνονται μερικά βασικά χαρακτηριστικά των σεναρίων. Τα σενάρια πρέπει να είναι συνεπή με ένα μεγάλο εύρος προβολών πλανητικής θέρμανσης, στη βάση της αύξησης συγκεντρώσεων αερίων του θερμοκηπίου, που κυμαίνεται μεταξύ $1{,}4^0$ C και $5{,}8^0$ C μέχρι το 2100 (IPCC, 2001). Επίσης, τα σενάρια δεν πρέπει να παραβιάζουν τους βασικούς νόμους της φυσικής, δηλαδή οι αλλαγές πρέπει να παρουσιάζουν φυσική συνέπεια μεταξύ περιοχών, καθώς και μεταξύ διαφορετικών κλιματικών μεταβλητών. Επιπλέον, τα σενάρια πρέπει να περιγράφουν αλλαγές σε έναν επαρκή αριθμό κλιματικών μεταβλητών σε τέτοια χωρική και χρονική κλίμακα, ώστε να είναι δυνατή η εκτίμηση των επιπτώσεων. Το θέμα αυτό θεωρείται σχετικά

απλό όταν αναπτύσσονται σενάρια της ίδιας χωρικής διακριτικής ικανότητας με το χρησιμοποιούμενο ΜΓΚ, ενώ ανάπτυξη σεναρίων μικρότερης διακριτικής ικανότητας δημιουργεί προβλήματα και απαιτείται υποκλιμάκωση (downscaling). Ακόμα, τα σενάρια πρέπει να είναι αντιπροσωπευτικά του δυνητικού εύρους της περιοχικής κλιματικής αλλαγής, ώστε να εκτιμηθεί ένα ρεαλιστικό εύρος πιθανών επιπτώσεων. Τέλος, τα σενάρια πρέπει να είναι προσβάσιμα για ερμηνεία και εφαρμογή σε εκτιμήσεις επιπτώσεων.

10.1.2.2. Υποκλιμάκωση

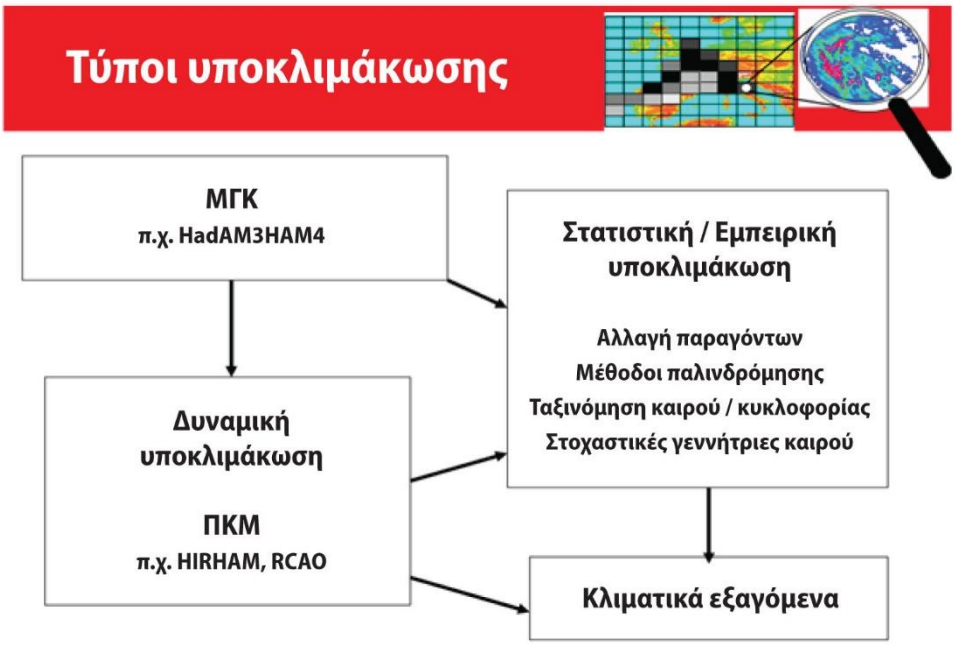
Σενάρια κλιματικής αλλαγής που προέρχονται άμεσα από εξαγόμενα ΜΓΚ μπορεί να μη διαθέτουν επαρκή χωρική ή χρονική διακριτική ικανότητα, για να αποδώσουν αλλαγές σε μια περιοχή ή ειδική τοποθεσία ή στα κλιματικά εισαγόμενα, με στόχο τη μοντελοποίηση της συγκεκριμένης διαδικασίας. Ειδικότερα, η χωρική διακριτική ικανότητα των ΜΓΚ σημαίνει ότι τα χαρακτηριστικά επιφάνειας εδάφους και ορογραφίας είναι σε μεγάλο βαθμό απλοποιημένα σε σχέση με την πραγματικότητα, με αποτέλεσμα την απώλεια κάποιων χαρακτηριστικών, που μπορεί να έχουν σημαντικές επιπτώσεις στο περιοχικό κλίμα. Η ανάγκη για λεπτομερή περιοχικά σενάρια κλιματικής αλλαγής έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη ενός αριθμού μεθοδολογιών για την εξαγωγή τέτοιας πληροφορίας γενικά από ΜΓΚ. Ας σημειωθεί ότι τα ΜΓΚ, παρά το μειονέκτημα της χαμηλής διακριτικής ικανότητας, αναγνωρίζονται ως η καλύτερη διαθέσιμη μεθοδολογία για τον υπολογισμό εσωτερικά σταθερών σεναρίων μελλοντικού κλίματος. Οι μεθοδολογίες αυτές ονομάζονται υποκλιμάκωση και έχουν σχεδιαστεί για να καλύψουν το χάσμα μεταξύ της πληροφορίας που τα κλιματικά μοντέλα μπορούν να διαθέτουν και των απαιτούμενων στις έρευνες επιπτώσεων. Η υποκλιμάκωση διακρίνεται σε χωρική και χρονική. Στο Σχήμα 10.5 απεικονίζονται η έννοια και η ιεράρχηση των διαδικασιών χωρικής υποκλιμάκωσης.



Σχήμα 10.5. *Ιεράρχηση διαδικασιών χωρικής υποκλιμάκωσης.*

Επισημαίνονται μερικά χαρακτηριστικά της υποκλιμάκωσης. Αρχικά, πρέπει να είναι γνωστά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των διαφόρων μεθόδων. Γενικά, η θερμοκρασία θεωρείται καλύτερη μεταβλητή από τον υετό για υποκλιμάκωση. Επίσης, είναι καλύτερα να χρησιμοποιούνται χειμερινά δεδομένα από θερινά, καθώς και ψυχρότερα κλίματα από ξηρότερα. Επιπλέον, συστηματικές συγκρίσεις δεν προσδίδουν την καλύτερη μέθοδο. Ακόμα, η επιλογή της μεθόδου πρέπει να βασίζεται στην ανάγκη για μεταβλητές υποκλιμάκωσης στη μελέτη επιπτώσεων. Τέλος, στην υποκλιμάκωση μπορεί να χρησιμοποιηθούν πολλαπλές μεταβλητές, όπως Περιοχικά Κλιματικά Μοντέλα (ΠΚΜ), γεννήτριες καιρού (weather generators) και στατιστικές μέθοδοι.

Η χωρική υποκλιμάκωση αναφέρεται σε τεχνικές που χρησιμοποιούνται για να εξάγουν κλιματική πληροφορία υψηλότερης διακριτικής ικανότητας από εξαγόμενα ΜΓΚ ή ΠΚΜ χαμηλότερης διακριτικής ικανότητας. Τα ΠΚΜ χρησιμοποιούν γενικά τις ίδιες αρχές φυσικής με τα ΜΓΚ, αλλά παρέχουν εξαγόμενα για μέρος του πλανήτη σε υψηλότερη διακριτική ικανότητα, τυπικά μεταξύ 10-50 χλμ. Η χωρική υποκλιμάκωση βασίζεται στην αρχή ότι είναι δυνατόν να υπολογιστούν σημαντικές στατιστικές σχέσεις μεταξύ τοπικού και μεγάλης κλίμακας κλίματος, μόνο από πληροφορία μεγάλης κλίμακας, και ότι αυτές οι σχέσεις ισχύουν σε μελλοντικές κλιματικές συνθήκες. Δηλαδή, το μεγάλης κλίμακας κλίμα χρησιμοποιείται ως ανεξάρτητη μεταβλητή για το τοπικό κλίμα, που είναι η εξαρτημένη μεταβλητή. Οι τεχνικές χωρικής υποκλιμάκωσης μπορεί να διακριθούν σε εμπειρικές/στατιστικές μεθόδους, καθώς και σε στατιστικές/δυναμικές μεθόδους. Οι τελευταίες περιλαμβάνουν γενικά τεχνικές τύπων καιρού και μοντελοποίηση υψηλής διακριτικής ικανότητας, όπως τα ΠΚΜ (Σχήμα 10.6).



Σχήμα 10.6. *Τύποι υποκλιμάκωσης.*

Πολλές διαδικασίες ελέγχου του τοπικού κλίματος, όπως η τοπογραφία, η βλάστηση και η υδρολογία, δεν περιλαμβάνονται στη χαμηλή διακριτική ικανότητα των ΜΓΚ. Ειδικότερα, τα ΜΓΚ που χρησιμοποιούνται στη χωρική υποκλιμάκωση πρέπει να μπορούν να προσομοιώνουν με ακρίβεια όσα ατμοσφαιρικά χαρακτηριστικά επηρεάζουν το τοπικό κλίμα, όπως είναι οι αεροχείμμαροι (jet streams) και η ιχνηλάτηση καταιγίδων (storm tracking). Επιπλέον, οι ανεξάρτητες μεταβλητές πρέπει ιδανικά να είναι κύριες μεταβλητές του μοντέλου, δηλαδή άμεσα εξαγόμενα του μοντέλου, όπως η πίεση στάθμης θάλασσας, και να μη βασίζονται σε παραμετροποίηση με άλλες μεταβλητές του μοντέλου, όπως στην περίπτωση του υετού. Στον Πίνακα 10.2 αποτυπώνονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της στατιστικής υποκλιμάκωσης.

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
1. Δεν υπάρχει υπολογιστική ένταση.	1. Απαιτούν μεγάλη χρονοσειρά αξιόπιστων παρατηρήσεων.
2. Εφαρμόζονται τόσο σε εξαγόμενα GCMs, όσο και σε RCMs.	2. Επηρεάζονται από «μεροληψία» στα GCMs.
3. Παρέχουν τιμές σταθμού/σημείου.	3. Δεν βασίζονται σε νόμους της φυσικής.
	4. Υπάρχει μη στασιμότητα στη σχέση μεταξύ ανεξάρτητης και εξαρτημένης μεταβλητής.

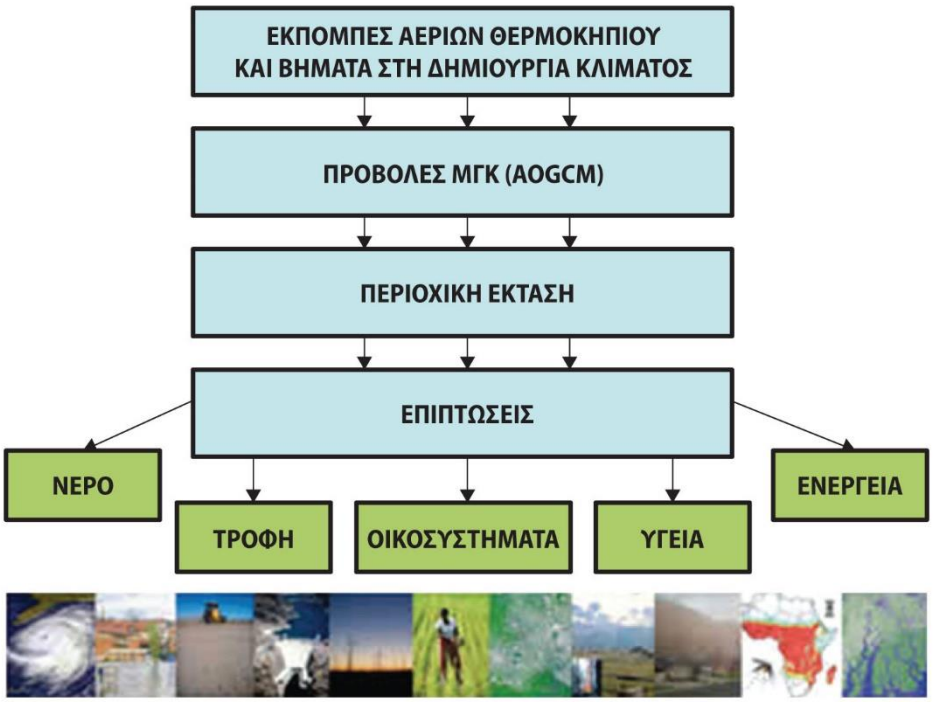
Πίνακας 10.2. *Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα στατιστικής υποκλιμάκωσης.*

10.1.2.3. Περιοχικά Κλιματικά Μοντέλα (ΠΚΜ)

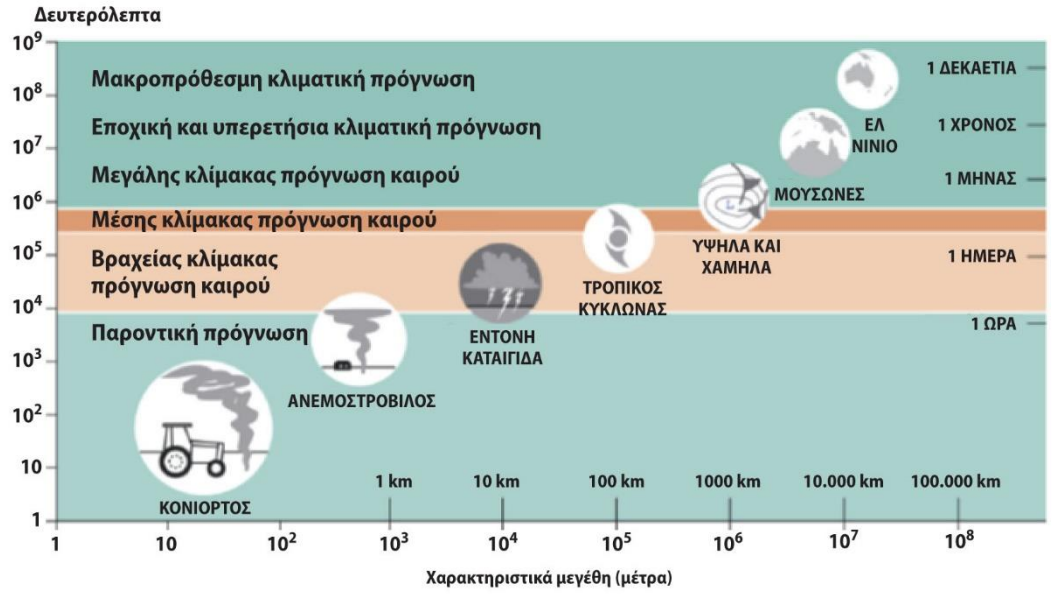
Ο περιορισμός της ανάγκης μεγάλης υπολογιστικής ισχύος των ΜΓΚ σημαίνει ότι η μοναδιαία κλίμακά τους είναι ακατάλληλη για λήψη αποφάσεων στη γεωργία. Ως γνωστόν, οι τοπικοί παράγοντες διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην απόδοση των καλλιεργειών. Πολλοί κίνδυνοι, όπως χαλαζοπτώσεις ή έντονες καταιγίδες, εμφανίζονται σε υποκλίμακα των ΜΓΚ. Κατά συνέπεια, η υποκλιμάκωση των ΜΓΚ είναι σήμερα κύριος ερευνητικός στόχος, κυρίως για εφαρμογές στη γεωργία. Ωστόσο, η υποκλιμάκωση εισάγει πρόσθετες αβεβαιότητες στα κλιματικά σενάρια (Giorgi, 2005). Τα ΠΚΜ δημιουργούνται από την ενσωμάτωση ενός δευτερεύοντος μοντέλου σε μια ή περισσότερες μοναδιαίες κλίμακες των ΜΓΚ. Εξαγόμενα από ΜΓΚ, όπως πίεση, άνεμος, θερμοκρασία και υδρατμοί, σε διάφορες στάθμες για την περιοχή ειδικού πεδίου ενδιαφέροντος, χρησιμοποιούνται στα ΠΚΜ. Δεδομένα χρήσεων γης, υψόμετρο, βροχοπτώσεις, εδαφικές συνθήκες και μεταγωγικά νέφη εκφράζονται καλύτερα μέσω ΠΚΜ, παρά μέσω ΜΓΚ. Η διακριτική ικανότητα είναι κρίσιμος παράγοντας. Για παράδειγμα, αν είναι πολύ χαμηλή, σημαντικές διαδικασίες μικρής κλίμακας, όπως σχηματισμός νεφών και τοπικοί άνεμοι, μπορεί να χαθούν. Αντίθετα, αν είναι πολύ υψηλή, χαρακτηριστικά μέσης κλίμακας, όπως καταιγίδες, μπορεί να μην καλύπτονται επαρκώς από το μοντέλο. Επίσης, σε κάποιες περιπτώσεις, μοντέλα αριθμητικής πρόγνωσης καιρού έχουν προσαρμοστεί έτσι ώστε να συμβάλλουν σε ΠΚΜ. Περιοχικά κλίματα υπολογίζονται από τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των πλανητικών και μεγάλης κλίμακας διαδικασιών και των περιοχικών και τοπικής κλίμακας διαδικασιών. Στην ουσία, οι πλανητικές πιέσεις και κυκλοφορίες υπολογίζουν τις στατιστικές των συμβάντων καιρού που χαρακτηρίζουν το κλίμα μιας περιοχής. Αντίστοιχα, περιοχικές και τοπικής κλίμακας πιέσεις και κυκλοφορίες σηματοδοτούν τις αλλαγές του περιοχικού κλίματος και, πιθανώς, ανατροφοδοτούν τις κυκλοφορίες μεγάλης κλίμακας. Κατά συνέπεια, για την προσομοίωση του κλίματος και, ειδικότερα, της κλιματικής αλλαγής σε περιοχική κλίμακα είναι απαραίτητη η προσομοίωση διαδικασιών σε μεγάλο εύρος χωρικών και χρονικών κλιμάκων. Οι περιοχικές τεχνικές βασίζονται σε ΠΚΜ και σε μεθόδους στατιστικής υποκλιμάκωσης.

Στο Σχήμα 10.7 απεικονίζονται τα απαραίτητα βήματα για την εξαγωγή πληροφορίας κλιματικής αλλαγής μέσω περιοχικών μεθόδων, με στόχο την εκτίμηση επιπτώσεων. Στο Σχήμα 10.8 (IPCC, 2007) παρουσιάζεται χαρακτηριστικά η κλιμάκωση της διασύνδεσης μεταξύ αγροτικής δραστηριότητας και θερμοκρασίας του πλανήτη, δηλαδή μεταξύ μικροκλίματος και πλανητικής κλίμακας, σε σχέση τόσο με την έκταση των κλιματικών φαινομένων, όσο και με το αντίστοιχο χρονικό προγνωστικό βήμα. Τέλος, στο Σχήμα 10.9 παρουσιάζεται μια ιεραρχική μεθοδολογική προσέγγιση μοντελοποίησης από την πλανητική κλίμακα στην κλίμακα καλλιέργειας. Οι πλανητικές και μεγάλης κλίμακας διαδικασίες αφορούν τα εισαγόμενα ηλιακής ακτινοβολίας, τις συγκεντρώσεις αερίων του θερμοκηπίου, την κατανομή ηπείρων και ωκεανών, καθώς και τα μεγάλα τοπογραφικά συστήματα. Επίσης, οι επιπτώσεις στη γενική κυκλοφορία αφορούν στην ιχνηλάτηση καταιγίδων, στη δυναμική της ζώνης ισημερινού, στα πρότυπα πλανητικών κυμάτων, στους μουσώνες, καθώς και στα μοντέλα του συνδυασμένου συστήματος, όπως είναι τα NAO και ENSO. Αντίστοιχα, οι πιέσεις των περιοχικών και τοπικής κλίμακας διαδικασιών αφορούν στην τοπογραφία, στις χρήσεις γης, στις ακτογραμμές, στα εσωτερικά νερά, στις λίμνες, στην κατανομή θερμοκρασίας της θάλασσας, καθώς και στο τροποσφαιρικό όζον (O_3). Ακόμα, οι επιπτώσεις στο περιοχικό κλίμα αναφέρονται στον υετό, στα επιφανειακά ενεργειακά και υδατικά ισοζύγια, στις κυκλοφορίες μέσης κλίμακας, στις αλληλεπιδράσεις ξηράς-ατμόσφαιρας και αέρα-θάλασσας, καθώς και στα ακραία φαινόμενα. Τα ΠΚΜ χρησιμοποιούνται ευρέως διεθνώς για να υπολογίσουν ειδικά χαρακτηριστικά του καιρού στη μεσοκλίμακα. Έχουν ένα περιοχικό πεδίο, όπως μια περιοχή ή μια χώρα, και παρέχουν χωρικές προγνώσεις με μεγαλύτερη λεπτομέρεια απ' ό,τι τα ΜΓΚ. Η τεχνική εφαρμογής ενός ΠΚΜ βασίζεται στο ότι ένα ΠΚΜ ενσωματώνεται σε ένα ΜΓΚ, για να αυξήσει τη διακριτική ικανότητα της προσομοίωσης ενός κλίματος. Οι αρχικές συνθήκες, καθώς και οι πλευρικές οριακές συνθήκες ενός ΠΚΜ,

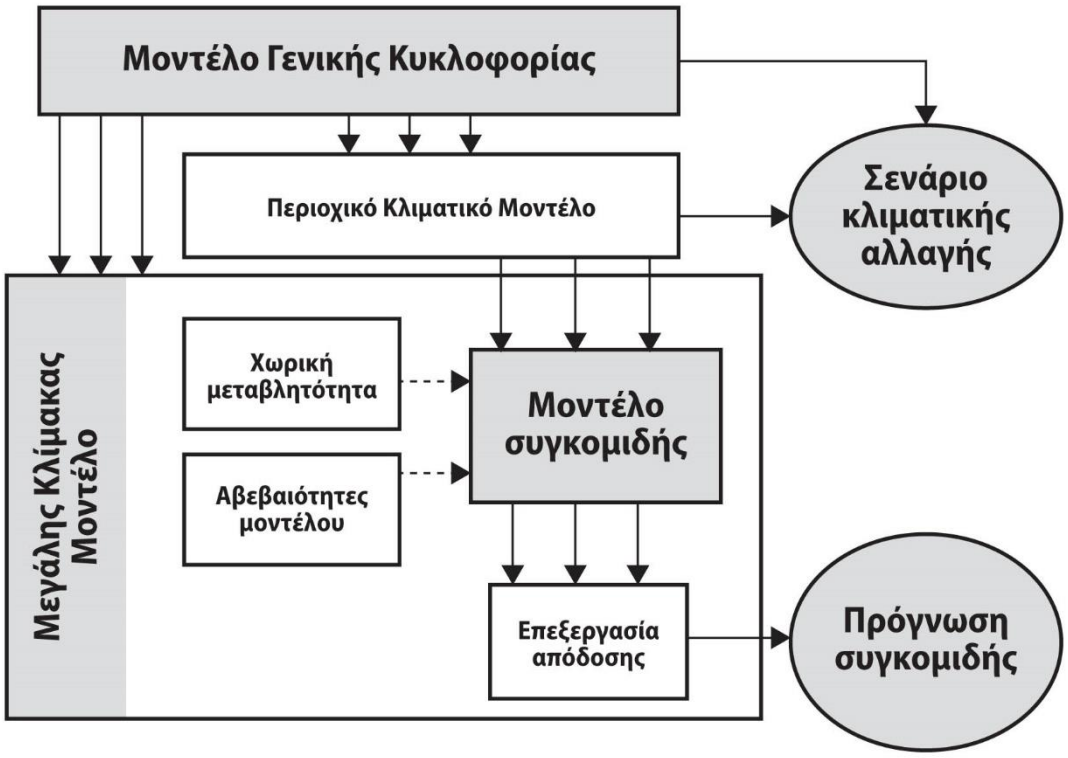
εξάγονται από το ΜΓΚ. Η στρατηγική προσέγγιση θεωρεί ότι το ΜΓΚ χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της ανταπόκρισης των πιέσεων μεγάλης κυκλοφορίας, ενώ το ΠΚΜ χρησιμοποιείται για την προσομοίωση των επιπτώσεων των πιέσεων υποκλίμακας ενός ΜΓΚ, καθώς και για την παροχή περιοχικής πληροφορίας υψηλής διακριτικής ικανότητας. Στην ουσία, τα ΠΚΜ στοχεύουν μόνο στην αύξηση της πληροφορίας του ΜΓΚ.
Στο Σχήμα 10.10 απεικονίζεται η ροή διαδικασιών ενός ΠΚΜ. Πολλά ΠΚΜ έχουν προσαρμοστεί και εφαρμόζονται σε διαφορετικά μέρη του πλανήτη. Επίσης, στον Πίνακα 10.3 συνοψίζονται τα κυριότερα ΠΚΜ.



Σχήμα 10.7. *Διαδικασία εκτίμησης επιπτώσεων κλιματικής αλλαγής.*



Σχήμα 10.8. *Χωρική και χρονική κλίμακα καιρού-κλίματος-αγρού.*



Σχήμα 10.9. *Διάγραμμα ροής της κλίμακας κλίμα-συγκομιδή.*

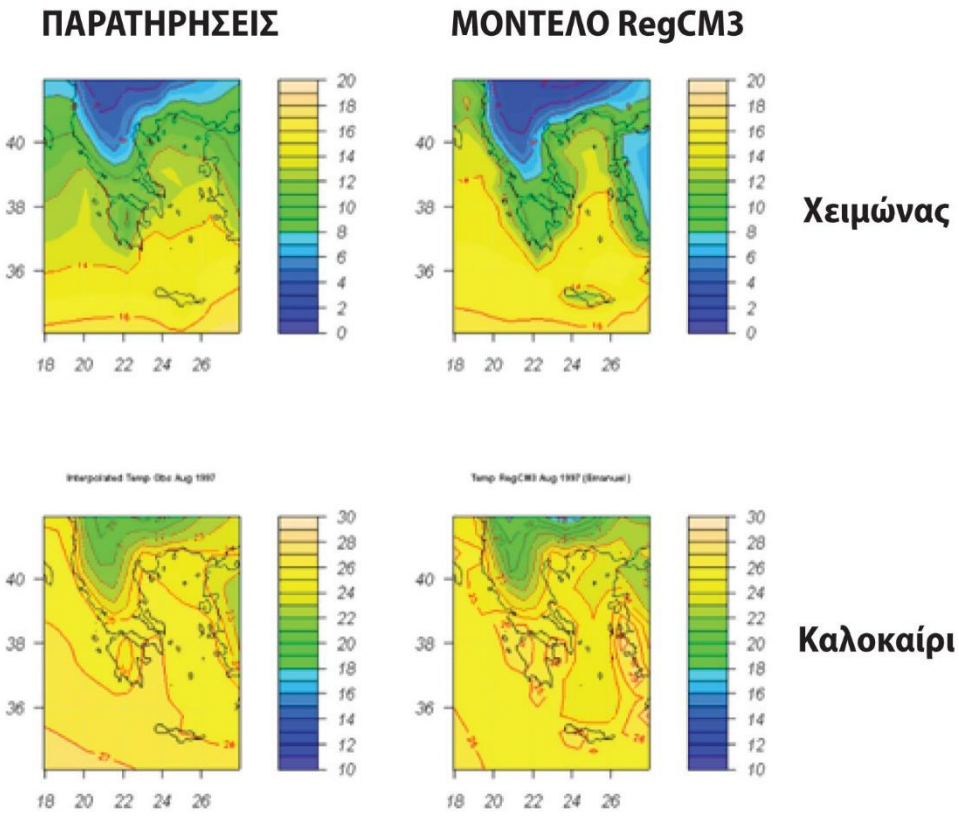


Σχήμα 10.10. *Διάγραμμα ροής ενός ΠΚΜ.*

Α/Α	Τίτλος	Πηγή/Αναφορά	
1.	RAMS	Regional Atmosphere Modelling System	Pielke et al., 1992
2.	ETA-RCM	Eta Coordinate	
3.	MMS	Penn State Mesoscale Model 5th Gen.	Chan and Dubhia, 2001
4.	ARPS	Advanced Regional Prediction System	Xue et al., 1995
5.	MBAR	Brazilian model of High Resolution	INMET

Πίνακας 10.3 *Κυριότερα ΠΚΜ*.

Τα πλεονεκτήματα της χρήσης των ΠΚΜ περιλαμβάνουν υποκλιμάκωση, που βασίζεται σε αρχές της φυσικής, δηλαδή σ' ένα εννοιολογικό σύστημα κλιματικής μοντελοποίησης. Επίσης, τα ΠΚΜ καλύπτουν μεγάλο εύρος εφαρμογών, όπως μελέτες διαδικασιών, παλαιοκλίματα, κλιματική αλλαγή και εποχική πρόγνωση. Ακόμα, διαθέτουν υψηλή διακριτική ικανότητα μέσω πολλαπλών ενσωματώσεων, που κυμαίνεται από 10 έως 50 χλμ., αν και πολύ πρόσφατα έχουν αρχίσει να εμφανίζονται εφαρμογές και στα 2 χλμ.
Αντίστοιχα, υπάρχουν και περιορισμοί στη χρήση των ΠΚΜ. Για παράδειγμα, είναι εφικτή μόνο η υποκλιμάκωση από πλανητική σε περιοχική κλίμακα, και όχι το αντίθετο, δηλαδή η μετάβαση από περιοχική σε πλανητική κλίμακα. Επίσης, δεν μπορούν να διορθωθούν συστηματικά σφάλματα στα πεδία πιέσεων μεγάλης κλίμακας, ενώ απαιτείται μεγάλη υπολογιστική ισχύς. Τα βήματα προσομοίωσης περιοχικής κλιματικής αλλαγής περιλαμβάνουν αρχικά υπολογισμό των αρχικών συνθηκών και των πλευρικών οριακών συνθηκών από αναλύσεις παρατηρήσεων μέσω ΜΓΚ. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται προσομοίωση των πραγματικών περιόδων, στην οποία η πιστοποίηση του μοντέλου γίνεται με παρατηρήσεις της περιόδου προσομοίωσης. Τέλος, επιχειρείται προσδιορισμός και πιθανή ελαχιστοποίηση των συστηματικών σφαλμάτων στη δομή, τη δυναμική και τη φυσική του μοντέλου.
Στο Σχήμα 10.11 απεικονίζονται τα αποτελέσματα συγκρίσεων μεταξύ παρατηρήσεων και εξαγομένων του ΠΚΜ RegCM3 των θερμοκρασιών της Ελλάδας το χειμώνα και το καλοκαίρι.



Σχήμα 10.11. *Πεδία θερμοκρασιών της Ελλάδας το χειμώνα και το καλοκαίρι.*

Από την ανάλυση προσομοιώσεων κλιματικής αλλαγής με χρήση ΠΚΜ, προκύπτει ότι υπάρχουν αβεβαιότητες στην ανθρωπογενή πρόγνωση κλιματικής αλλαγής. Πρώτον, δεν υπάρχει ικανοποιητική γνώση των αρχικών συνθηκών του κλιματικού συστήματος κατά την έναρξη του πειράματος βιομηχανοποίησης, δηλαδή της αρχικής κατάστασης των ωκεανών, της βιόσφαιρας και της κρυόσφαιρας. Κατά συνέπεια, γίνεται σαφές ότι το κλίμα μπορεί να εξελιχθεί διαφορετικά, ανάλογα με τις αρχικές συνθήκες. Δεύτερον, υπάρχει μη προβλεψιμότητα των εξωτερικών πιέσεων. Ειδικότερα, επισημαίνεται μη προβλεψιμότητα των φυσικών πιέσεων, όπως της ηφαιστειακής και της ηλιακής δραστηριότητας. Επίσης, είναι απρόβλεπτες ή λίγο προβλέψιμες οι ανθρωπογενείς πιέσεις, όπως οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και αιωρούμενων σωματιδίων, καθώς και οι αλλαγές στη χρήση γης. Ως γνωστόν, τα παραπάνω σχετίζονται με την κοινωνική και οικονομική ανάπτυξη, καθώς και με την τεχνολογική εξέλιξη. Το αποτέλεσμα είναι η ανάπτυξη σεναρίων, παρά οι προγνώσεις των πιέσεων. Επισημαίνεται ακόμα ότι, λόγω της εσωτερικής μεταβλητότητας και της μη γραμμικότητας του κλιματικού συστήματος, καθώς και της τυχαίας συνιστώσας των εξωτερικών πιέσεων, μας ενδιαφέρει μόνο η κλιματική αλλαγή που συνιστά μια πραγματοποίηση μέσα σε ένα εύρος πιθανών πραγματοποιήσεων, εκ των οποίων η καθεμία χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένη πιθανότητα εμφάνισης. Συμπερασματικά, στόχος της κλιματικής πρόγνωσης δεν είναι η πρόγνωση του ακριβούς μελλοντικού κλίματος, αλλά η ανακατασκευή όσο το δυνατόν πιστότερα της πολύ γνωστής Συνάρτησης Πυκνότητας Πιθανότητας/ΣΠΠ (Probability Density Function/PDF) των πιθανών μελλοντικών κλιμάτων.

Επισημαίνεται ότι η πρόγνωση κλιματικής αλλαγής είναι πιο δύσκολη στην περιοχική, παρά στην πλανητική κλίμακα. Η φυσική μεταβλητότητα αυξάνεται σε μικρότερες κλίμακες, που καθιστούν πιο δύσκολη την εξαγωγή του σήματος της αλλαγής από το υπάρχον σφάλμα (noise). Επίσης, αλλαγές στη δομή κυκλοφορίας, στα καθεστώτα και στους τύπους φυσικών κλιμάτων είναι πιο σημαντικές στην περιοχική κλίμακα, καθόσον το περιοχικό κλίμα είναι περισσότερο μη γραμμικό. Τέλος, τα περιοχικά κλίματα επηρεάζονται από πιέσεις και διαδικασίες τοπικής κλίμακας, που δεν επιλύονται επαρκώς από τα κλιματικά μοντέλα.

Συνοψίζοντας, επισημαίνεται ότι τα ΠΚΜ είναι σημαντικά εργαλεία για τη μελέτη των διαδικασιών του κλίματος και των κλιματικών αλλαγών σε περιοχική κλίμακα. Η απόδοση των ΠΚΜ στην προσομοίωση διαφορετικών συνιστωσών του κλίματος βελτιώνεται, καθόσον αναπτύσσονται καλύτερα μοντέλα και καλύτερα πεδία-οδηγοί των ΜΓΚ, ενώ συγχρόνως διαπιστώνεται η ανάγκη παρατηρήσεων υψηλής διακριτικής ικανότητας, για την εκτίμηση της απόδοσης του μοντέλου. Ειδικότερα, τα ΠΚΜ παρουσιάζουν καλή απόδοση στην αναπαραγωγή χωρικών κλιματικών προτύπων, λόγω τοπογραφίας, καθόσον το σήμα κλιματικής αλλαγής παρουσιάζει συχνά δομή μικρής κλίμακας καθώς και στην ανταπόκριση τοπογραφικών και άλλων επιφανειακών πιέσεων. Επίσης, σε πειράματα πλευρικών οριακών συνθηκών, προσομοιώνουν ικανοποιητικά την υπερετήσια (interannual) μεταβλητότητα, που στα ΜΓΚ εξαρτάται από την ποιότητα των πεδίων πίεσης. Ακόμα, μπορούν να βελτιώσουν την προσομοίωση ακραίων φαινομένων και σχετικών αλλαγών σε σχέση με τα ΜΓΚ, όμως χρειάζεται ακόμα περισσότερη έρευνα στην απόδοση των ΠΚΜ για ακραία φαινόμενα. Τέλος, τα εξαγόμενα των προσομοιώσεων με ΠΚΜ μπορεί να χρησιμοποιηθούν σε μελέτες εκτίμησης επιπτώσεων.

Για τις μελλοντικές προοπτικές των ΠΚΜ, επισημαίνεται ότι αυξάνεται συνεχώς η διαθεσιμότητα καλύτερης κλίμακας και υψηλότερης ποιότητας πεδίων των ΜΓΚ για τα ΠΚΜ. Επίσης, η συνεχής αύξηση της ισχύος των υπολογιστών αναμένεται να επιτρέψει ακόμα υψηλότερες διακριτικές ικανότητες, δηλαδή μικρότερες των 10 χλμ. για μη υδροστατικά μοντέλα. Ακόμα, η διαθεσιμότητα μεγαλύτερης διάρκειας προσομοιώσεων συμβάλλει στην καλύτερη εκτίμηση της μεταβλητότητας και των ακραίων φαινομένων. Συνδυασμός των ΠΚΜ με άλλες συνιστώσες του κλιματικού συστήματος, όπως είναι οι ωκεανοί, ο θαλάσσιος πάγος, η ατμοσφαιρική χημεία, η βιόσφαιρα και η υδρολογία, οδηγεί στην ανάπτυξη συστήματος μοντέλων ΠΚΜ. Τέλος, επισημαίνεται ότι η υλοποίηση περισσότερων συγκριτικών μελετών και συντονισμένων προγραμμάτων αναμένεται να επιτρέψει την πληρέστερη κατανόηση των δυνατοτήτων και των περιορισμών των ΠΚΜ.

10.2. Διαχρονικά χαρακτηριστικά κλιματικής μεταβλητότητας

Ως γνωστόν οι βασικοί παράγοντες που διαμορφώνουν το κλίμα της Γης είναι το μέγεθος και η κατανομή της ηλιακής ενέργειας που δέχεται η Γη, οι μεταβολές στη σύσταση και τη δομή της ατμόσφαιρας, καθώς και οι μεταβολές στις χρήσεις γης. Επίσης, είναι σκόπιμο να επισημανθεί ότι τα κύρια αίτια της κλιματικής μεταβλητότητας εντοπίζονται στην ηλιακή δραστηριότητα, την ηφαιστειακή δραστηριότητα, τη σύνθεση και τη δομή τα ατμόσφαιρας, τις συγκεντρώσεις διοξειδίου τον άνθρακα (CO_2) και άλλων αερίων, τη λευκαύγεια (albedo), την

έκταση των πάγων στους πόλους σε σχέση με την λευκαύγεια, την κυκλοφορία της ατμόσφαιρας και των ωκεάνιων ρευμάτων, καθώς και τη χημική σύσταση ωκεανών και ατμόσφαιρας.
Η ιστορία προσφέρει αξιόλογα μαθήματα σχετικά με τις επιπτώσεις της κλιματικής μεταβλητότητας στον άνθρωπο. Επίσης, έχει παρατηρηθεί υπερετήσια κλιματική μεταβλητότητα σε πολλές περιοχές του πλανήτη κατά τον 20ό αιώνα (Salinger et a1., 2000). Σήμερα έχουν κατανοηθεί ευρέως το κλιματικό σύστημα και οι φυσικοί και ανθρωπογενείς παράγοντες που προκάλεσαν την κλιματική μεταβλητότητα και αλλαγή τον περασμένο αιώνα, καθώς και οι ενδεχόμενες αλλαγές στο κλίμα και τη μεταβλητότητά του κατά τον 21ο αιώνα (IPCC, 2001). Η ανασκόπηση στις τάσεις τον κλίματος στο παρελθόν, συγκεκριμένα την τελευταία χιλιετία, αποτελεί τη βάση για να εξεταστεί η τρέχουσα κλιματική μεταβλητότητα και οι μελλοντικές τάσεις, ώστε να εξασφαλισθεί καλύτερη προετοιμασία της γεωργίας στις μελλοντικές αλλαγές. Ως προς τις μελλοντικές επιπτώσεις της αυξημένης θερμοκρασίας, ενδιαφέρει το είδος των επιδράσεων στην κοινωνία και την οικονομία, και ειδικότερα στη γεωργία.
Στη συνέχεια παρουσιάζεται το παρελθόν κλίμα της τελευταίας χιλιετίας, το παρόν κλίμα, με τα χαρακτηριστικά της κλιματικής μεταβλητότητας, εκτιμώνται οι κλιματικές τάσεις κατά τον 21ο αιώνα, με διάφορα σενάρια ανθρώπινων δραστηριοτήτων, μαζί με ευρείας κλίμακας επιπλοκές στη γεωργία. Το θέμα αυτό εξετάζεται σε σχέση με την ικανότητα της γεωργίας να προσαρμοσθεί σε ανθρωπογενείς κλιματικές αλλαγές αυτόν τον αιώνα.

10.2.1. Παρελθόν κλίμα

Η τελευταία χιλιετία. Η τελευταία χιλιετία αποτελεί ιδιαίτερα σημαντικό χρονικό πλαίσιο, για την εκτίμηση της φυσικής μεταβλητότητας τον κλίματος, δεδομένου ότι τόσο τα μοντέρνα, όσο και τα παραδοσιακά γεωργικά συστήματα αναπτύχθηκαν κατά τη χιλιετία αυτή. Παλαιοκλιματικοί προσεγγιστικοί δείκτες περιλαμβάνουν δακτυλίους δένδρων, που παρέχουν ακριβείς πληροφορίες ανά έτος, κοράλλια και συμπαγείς πάγους στις πολικές περιοχές της Γροιλανδίας και της Ανταρκτικής, που επιτρέπουν τη διαπίστωση της ετήσιας μεταβολής του κλίματος. Ακόμα, δεδομένα μπορεί να εξαχθούν από γεωτρήσεις, που καταγράφουν ευρείας κλίμακας τάσεις της θερμοκρασίας, καθώς και από ορεινούς παγετώνες, που παρέχουν ενδείξεις για τη μέχρι τώρα εξέλιξή τους.
Από τις πηγές αυτές, υπάρχουν αρκετές ενδείξεις για την κατάσταση των επιπέδων θερμοκρασίας στο Βόρειο Ημισφαίριο πίσω στο χρόνο, μέχρι το 1000 μ.Χ. Οι παραστάσεις αυτές δείχνουν μια βραδεία ψύξη, με αιχμές περί το 1450 και το 1880 μ. Χ. κατά τα τελευταία 1.000 χρόνια. Η υπερδεκαετής πτώση της θερμοκρασίας στα τέλη του 16ου αιώνα στην Ευρώπη είχε συνέπεια μια περίοδο ψύξης, την επονομαζόμενη «μικρή εποχή των παγετώνων» στην Ευρώπη. Η εν λόγω κλιματική μεταβολή εκδηλώθηκε με 0,5° C πτώση στη μέση ετήσια θερμοκρασία. Μετακινήσεις αγροτών και εγκατάσταση σε νέους οικισμούς παρατηρήθηκαν σε ολόκληρη τη Βόρεια και Κεντρική Ευρώπη την εποχή αυτή. Η επικρατούσα πλεονάζουσα υγρασία οδήγησε στη μετάδοση ασθενειών. Τεκμηριωμένες ενδείξεις καταδεικνύουν τις επιπτώσεις κλιματικών διαταραχών στις τιμές των αγροτικών προϊόντων και στην παραγωγή κρασιού. Άμεση σύνδεση γίνεται και με τις διακυμάνσεις στις τιμές των σιτηρών, ενώ σοδειές και τιμές κρασιού δείχνουν μια πιο δραματική επίπτωση. Ενδιαφέρον, ωστόσο, παρουσιάζει η επισήμανση ότι στο Βόρειο Ημισφαίριο η πιο ψυχρή περίοδος εμφανίστηκε στο τέλος τον 15ου αιώνα, όταν οι θερμοκρασίες ήταν χαμηλότερες κατά 0,5° C από τον μέσο όρο της περιόδου 1961-1990. Επίσης, υπάρχει έντονο ενδιαφέρον για την πτώση της θερμοκρασίας και την αντίστοιχη ψυχρή περίοδο, που καταγράφηκε τον 19ο αιώνα στο Βόρειο Ημισφαίριο τουλάχιστον και την απότομη αύξηση της θερμοκρασίας στον πλανήτη κατά τα τέλη του 20ού αιώνα.

Θερμοκρασία. Η μέση πλανητική θερμοκρασία υ αέρα έχει αυξηθεί σχεδόν 0,6° C από το 1860, δηλαδή από τότε που υπάρχουν επαρκή στοιχεία για πλανητικές εκτιμήσεις. Επιπλέον, σε παγκόσμια βάση η δεκαετία τον 1990 ήταν η πιο θερμή δεκαετία. Κατά μέσον όρο, οι ελάχιστες θερμοκρασίες τη νύχτα πάνω από τη στεριά έχουν αυξηθεί ανά δεκαετία περίπου σε διπλάσιο βαθμό (σχεδόν κατά 0,2° C), σε σχέση με τις μέγιστες θερμοκρασίες της ημέρας (με 0,1° C) περίπου από το 1950. Η τάση αυτή έχει επιμηκύνει την ελεύθερη παγετού περίοδο σε μέσα και υψηλά πλάτη, όπου επίσης έχει παρατηρηθεί μείωση της συχνότητας εμφάνισης παγετού της τάξης του 10%.

Υετός. Γενικά, σε πλανητικό επίπεδο, ο υετός στη στεριά έχει αυξηθεί περίπου 2%, κατά τον 20ό αιώνα. Στα μέσα και υψηλά πλάτη του Βόρειου Ημισφαίριου, ο υετός αυξήθηκε από 7% έως 12% μεταξύ 30° N και 85° N, ειδικά το φθινόπωρο και το χειμώνα. Αντίθετα, παρατηρείται μείωση υετού στα βόρεια υποτροπικά και τροπικά πλάτη, όπου έχουν αυξηθεί οι ξηρασίες. Τα χαμηλότερα ύψη υετού έχουν παρατηρηθεί στις περιοχές του Ισημερινού τη δεκαετία του 1990.

10.2.2. Παρόν κλίμα

Το παρόν κλίμα παρουσιάζει σημαντική μεταβλητότητα σε χρονικές κλίμακες, από εποχές έως δεκαετίες, που είναι σημαντικές στη γεωργία. Μεταβολές πιο σημαντικές σε υπερετήσια βάση είναι η Ελ Νίνιο Νότια Ταλάντωση (E1 Nino Southern Oscillation/ENSO) και η Βορειοατλαντική Ταλάντωση (North Atlantic Oscillation/NAO), καθώς και η Υπερδεκαετής Ταλάντωση Ειρηνικού (Interdecadal Pacific Oscillation/IPO). Αυτές οι ημιπεριοδικές μεταβολές επιδρούν ενισχυτικά στη γενική τάση της θέρμανσης της γης, καθώς και στις συχνότητές τους.
Ειδικότερα:

- **ENSO:** Είναι το πρωταρχικό πλανητικό χαρακτηριστικό φυσικής υπερετήσιας κλιματικής μεταβλητότητας σε χρονικό ορίζοντα 2-7 ετών. Αποτελεί ένα συνδυαστικό φαινόμενο ωκεανού-ατμόσφαιρας στο κέντρο του τροπικού Ειρηνικού, αλλά οι αλλαγές στις θερμοκρασίες της επιφάνειας της θάλασσας (SST: Sea Surface Temperature) επηρεάζουν συχνά και άλλες λεκάνες των ωκεανών. Επίσης, η νότια διαταραχή (Southern Oscillation/SO) είναι μια καταγραφή της ατμοσφαιρικής πίεσης στην περιοχή του Ειρηνικού-Ινδικού ωκεανού. Οι συνθήκες της ατμόσφαιρας και του ωκεανού μεταβάλλονται σημαντικά στη διάρκεια του ENSO, μεταξύ της φάσης του Ελ Νίνιο και της αντίθετης φάσης, Λα Νίνα. Στην πρώτη περίπτωση, θερμά ύδατα από τον δυτικό τροπικό Ειρηνικό μετακινούνται ανατολικά, ενώ στη δεύτερη περίπτωση, εμφανίζεται ψύξη του τροπικού Ειρηνικού.

- **NAO:** Είναι η μεγάλης κλίμακας εναλλαγή της ατμοσφαιρικής πίεσης μεταξύ των περιοχών του Βόρειου Ατλαντικού των υποτροπικών υψηλών (κοντά στις Αζόρες) και της υποπολικής χαμηλής πίεσης (νότια και ανατολικά της Γροιλανδίας). Επιπλέον, ο υετός στην Ευρώπη σχετίζεται με τη NAO (Hurrell, 1995). Όταν ο δείκτης αυτός είναι θετικός, όπως έχει συμβεί για αρκετούς χειμώνες την τελευταία δεκαετία, τότε ξηρότερες από τις κανονικές συνθήκες εμφανίζονται στη Νότια Ευρώπη και στη Μεσόγειο, με πάνω από τον μέσο υετό μεταξύ Ισλανδίας και Σκανδιναβίας. Η NAO επηρεάζει τις συνθήκες στη Βόρεια Αφρική και στη ζώνη Σαχέλ.

- **IPO:** Πρόσφατα, μεταβολές στο κλίμα έχουν εκτιμηθεί στον Ειρηνικό Ωκεανό, προκαλούμενες από ένα νέο κλιματικό χαρακτηριστικό, την IPO, πού μεταβάλλει το κλίμα κάθε μία με τρεις δεκαετίες (Salinger et a1., 2000). Είναι μια μορφή τύπου ENSO του κλιματικού συστήματος, που λειτουργεί σε κλίμακες χρόνου μερικών δεκαετιών.

Πλανητική θέρμανση

Τα τρία χαρακτηριστικά, ENSO, NAO και IPO, αναφέρονται σε πτυχές του παγκόσμιου κλίματος, εκ των οποίων τα δύο αποτελούν κυρίαρχα στοιχεία του τροπικού Ειρηνικού και του ωκεάνιου νότιου Ημισφαιρίου, που επηρεάζουν την κλιματική μεταβλητότητα στις τρεις νότιες ηπείρους. Στη βάση αυτή της εσωτερικής κλιματικής μεταβλητότητας, έχουν ενεργήσει εξωτερικοί μηχανισμοί, όπως ηφαίστεια και αύξηση των αερίων του θερμοκηπίου από ανθρωπογενείς δραστηριότητες (Salinger et a1., 2000). Καλή μείξη αερίων θερμοκηπίου, π.χ. διοξείδιο του άνθρακα, μεθάνιο, χλωροφθοράνθρακες, πρέπει να έχουν επιδράσει τα μέγιστα στην ακτινοβολία, ώστε να θερμανθεί το κλίμα στα τέλη του 20ού αιώνα, όπως τώρα πιστοποιείται από τις προσομοιώσεις κλιματικών μοντέλων στη μέση επιφανειακή θερμοκρασία της Γης.

10.2.3 Μελλοντικό κλίμα στον 21ο αιώνα

Σύμφωνα με πρόσφατη έκθεση (IPCC, 2007), η κλιματική αλλαγή οφείλεται σε ανθρωπογενή αίτια, είναι αναμφισβήτητη και επιταχύνεται με πιθανές μη αναστρέψιμες συνθήκες κατά τον 21ο αιώνα, εάν δεν ληφθούν μέτρα. Άλλες διαπιστώσεις και εκτιμήσεις της έκθεσης για τον 21ο αιώνα αποτελούν η άνοδος της στάθμης της θάλασσας, η υψηλότερη συγκέντρωση διοξειδίου τον άνθρακα (CO_2) των τελευταίων 650.000 ετών και η αύξηση τον διοξειδίου τον άνθρακα κατά 90% έως το 2030, εάν δεν ληφθούν μέτρα, καθώς και η αύξηση των αερίων του θερμοκηπίου, όπως του μεθανίου. Επιπλέον, αναμένονται μέχρι το 2020, έλλειψη νερού στην Αφρική για 75-250 εκατομμύρια ανθρώπους, υψηλός κίνδυνος πλημμυρών στην Ασία, βιαιότερα κύματα καύσωνα στη Βόρεια Αμερική, καθώς και απώλειες φυτικών και ζωικών ειδών στην Ευρώπη (Salinger et a1., 2005). Με βάση μελλοντικά κλιματικά σενάρια, αναμένεται ερημοποίηση περιοχών στην νοτιοανατολική Μεσόγειο, γεωγραφική μετατόπιση των καλλιεργειών, μείωση της γεωργικής παραγωγής, δυνητική αύξηση της θερμοκρασίας μέχρι 6° C τα επόμενα 100 χρόνια, αύξηση των ακραίων φαινομένων, μείωση των αποθεμάτων νερού, αυξανόμενη διάρκεια των περιόδων ξηρασίας, καθώς και αύξηση της υπεριώδους ακτινοβολίας.

Όπως ήδη επισημάνθηκε, η αύξηση των αερίων τον θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα λόγω ανθρωπογενών δραστηριοτήτων αναμένεται να είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας που θα επιδράσει στην αλλαγή του κλίματος τον 21ο αιώνα. Αν και το κύριο αέριο του θερμοκηπίου είναι οι υδρατμοί, ωστόσο το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), το όζον (O_3), το μεθάνιο (CH_4) και τα οξείδια του αζώτου (N_20), μαζί με τα νέφη, διατηρούν την επιφάνεια της Γης 33° C θερμότερη από ό,τι θα ήταν εάν δεν υπήρχαν. Αυτό ονομάζεται «φυσική επίδραση του θερμοκηπίου». Τα αέρια τον θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα αναμένεται να διπλασιαστούν ή να αυξηθούν εκθετικά μέχρι το 2100. Για προβολές μελλοντικού κλίματος, χρησιμοποιούνται επτά κύρια σενάρια εκπομπών αερίων τον θερμοκηπίου και άλλων εκπομπών σχετικών με τον άνθρωπο, με βάση σχετική ειδική έκθεση σεναρίων εκπομπών (IPCC, 2001). Συνολικά, έχουν παραχθεί σαράντα δύο σενάρια με βάση τον αριθμό των κλιματικών μοντέλων. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η παγκόσμια μέση επιφανειακή θερμοκρασία εκτιμάται ότι θα αυξηθεί από 1,4 έως 5,8° C την περίοδο 1990-2100. Το 90% της αύξησης κυμαίνεται από 2 έως 4,5° C. Ο προβαλλόμενος ρυθμός θέρμανσης είναι πολύ μεγαλύτερος από τις παρατηρηθείσες αλλαγές κατά τον 20ό αιώνα και από την περίοδο έναρξης της γεωργίας. Οι προσομοιώσεις του πλανητικού μοντέλου δείχνουν ότι σχεδόν όλες οι πεδινές εδαφικές περιοχές θα θερμανθούν πιο απότομα από τις πλανητικές μέσες, κυρίως εκείνες στα βόρεια υψηλά πλάτη. Περισσότερο κρίσιμες στη γεωργία είναι οι πιθανές αλλαγές στον υετό, ειδικά σε περιοχές χαμηλών πλατών, όπου οι δραστηριότητες εξαρτώνται από τις βροχές. Οι εκτιμήσεις δείχνουν ότι στο δεύτερο μισό του 21ου αιώνα, είναι πιθανόν ο υετός να αυξηθεί στα βόρεια και στα μέσα προς βόρεια πλάτη. Αντίστοιχα, στα χαμηλά πλάτη τόσο αυξήσεις όσο και μειώσεις του υετού έχουν εκτιμηθεί πάνω από διάφορες περιοχές. Οι τάσεις του υετού στις περιοχές αυτές αναμένεται να είναι κρίσιμες.

Ακραία φαινόμενα έχουν επίσης σημαντικές επιπτώσεις στη γεωργία. Τα σημερινά κλιματικά μοντέλα στερούνται της χωρικής λεπτομέρειας που απαιτείται για αξιόπιστες προβολές στο μέλλον. Ωστόσο, έχουν γίνει ευρείας κλίμακας εκτιμήσεις των παρατηρούμενων αλλαγών στα ακραία φαινόμενα κατά τον 20ό αιώνα και των προβαλλόμενων αλλαγών για τον 21ο αιώνα (IPCC, 2001). Ακολουθείται η θεωρία των αλλαγών σε ακραία φαινόμενα, ως αποτέλεσμα αλλαγών τόσο στις μέσες τιμές, όσο και στη διακύμανση. Η πιθανότητα εμφάνισης ακραίων φαινομένων δείχνει ότι οι μετατοπίσεις των μέσων τιμών, αλλά και της διακύμανσης μπορεί να έχουν πολύ σημαντική επίδραση στη συχνότητα των ακραίων φαινομένων.

Τελικά, οι κύριοι στόχοι μέχρι το 2100 για την προστασία τον κλίματος σε παγκόσμιο επίπεδο είναι αφενός ο περιορισμός της μακροπρόθεσμης αύξησης της θερμοκρασίας κάτω του 1° C (ή μέχρι 2° C), σε σχέση με την παγκόσμια μέση θερμοκρασία της προβιομηχανικής περιόδου, και αφετέρου ο περιορισμός της μακροπρόθεσμης ανόδου της στάθμης της θάλασσας κάτω από 20 cm, σε σχέση με τα επίπεδα του 1990. Ενδεικτικά, στον Πίνακα 10.4 παρατίθενται τα ακραία φαινόμενα και η προβολή τους μέχρι το 2100 (IPCC, 2001).

Αλλαγή στο φαινόμενο	**Εφικτότητα της προβαλλόμενης αλλαγής***
Υψηλότερες μέγιστες θερμοκρασίες, περισσότερες θερμές μέρες.	Πολύ πιθανό.
Υψηλότερες ελάχιστες θερμοκρασίες, λιγότερες ψυχρές ημέρες και ημέρες παγετού.	Πολύ πιθανό.
Αύξηση του δείκτη καύσωνα.	Πολύ πιθανό, στις περισσότερες περιοχές.
Περισσότερα επεισόδια έντονης βροχόπτωσης.	Πολύ πιθανό, σε πολλές περιοχές.
Αυξημένη θερινή ηπειρωτική ξηρότητα και συνδυαζόμενο ρίσκο ξηρασίας.	Πιθανό, στις περισσότερες ηπειρωτικές περιοχές μέσων γεωγραφικών πλατών.
Αύξηση της αιχμής σε ριπές ανέμου και των εντάσεων υετού σε τροπικούς κυκλώνες.	Πιθανό σε κάποιες περιοχές.
*Αιτιολογημένες εκτιμήσεις εμπιστοσύνης από την IPCC. Πολύ πιθανό: 90-99%. Πιθανό: 66-90%.	

Πίνακας 20.4. *Προβολή ακραίων φαινομένων στο έτος 2100.*

10.3. Κλιματική μεταβλητότητα και γεωργικά οικοσυστήματα

Μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις της ανθρωπότητας είναι η εξασφάλιση αποδεκτού επιπέδου ζωής για τις τρέχουσες και μελλοντικές γενιές: επαρκής τροφή, νερό, ενέργεια, ασφάλεια, στέγη και υγιεινό περιβάλλον. Η ανθρωπογενής κλιματική αλλαγή και η αυξημένη κλιματική μεταβλητότητα, καθώς και τα άλλα υφιστάμενα περιβαλλοντικά προβλήματα, όπως η υποβάθμιση των εδαφών, η απώλεια της βιοποικιλότητας, η αυξημένη ρύπανση της ατμόσφαιρας και των υδάτων, και η μείωση του στρατοσφαιρικού όζοντος, δυσκολεύουν τον άνθρωπο να ανταπεξέλθει στην ικανοποίηση των παραπάνω αναγκών. Αξιόλογες προσπάθειες έχουν γίνει για την παρακολούθηση και ανάδειξη των αλλαγών, και τη δημιουργία πιθανών επιλογών στη διαχείριση συστημάτων που αφορούν τη γεωργία, τα δάση και το περιβάλλον.

Έχει καταστεί σαφές ότι το κλίμα πάντα αλλάζει και θα συνεχίσει να αλλάζει. Επίσης, η αλλαγή του κλίματος περιλαμβάνει, μεταξύ άλλων, αλλαγές στη βροχόπτωση, στη θερμοκρασία και στις συγκεντρώσεις διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Βέβαια, η πιθανότητα να είναι η κλιματική αλλαγή φυσική ή ανθρωπογενής σχετίζεται με την πιθανή προέλευση και το της αλλαγής. Παραμένει σημαντικό θέμα η ικανότητα των αγροτών και των κτηνοτρόφων να προσαρμόσουν τη διαχείριση καλλιεργειών και αγροτικών οικοσυστημάτων σ' ένα μεταβαλλόμενο κλίμα, με στόχο την ελαχιστοποίηση των αρνητικών συνεπειών. Ωστόσο, μερικές από τις συνέπειες της κλιματικής αλλαγής μπορεί να είναι ευεργετικές για τη γεωργία. Για παράδειγμα, η αύξηση των συγκεντρώσεων του διοξειδίου του άνθρακα μπορεί να ισοσκελίσει τις καταστρεπτικές συνέπειες ξηρότερων εποχών, μέσω της αύξησης της σοδειάς και της αποδοτικότητας στη χρήση νερού. Επίσης, η εκτίμηση του δείκτη SOI μπορεί να βοηθήσει τους παραγωγούς στην προσαρμογή των γεωργικών πρακτικών, για ικανοποιητική παραγωγή στην ανατολική Αυστραλία (Nicholls, 1999). Επιπλέον, το κλίμα μπορεί να αλλάζει και έξω από το εύρος προηγούμενης εμπειρίας και παρατηρήσεων, ειδικά σε σχέση με την ένταση και τη συχνότητα ακραίων κλιματικών φαινομένων. Τέλος, η προσαρμογή σε μεγαλύτερο χρονικό ορίζοντα απαιτεί προηγούμενη γνώση της φύσης της κλιματικής αλλαγής και όχι μόνο πρόσφατες εμπειρίες.

Η αγροτική παραγωγή παρουσιάζει υψηλή εξάρτηση από το κλίμα και επηρεάζεται αρνητικά από την αύξηση της κλιματικής μεταβλητότητας και της ανθρωπογενούς κλιματικής αλλαγής, οδηγώντας σε αύξηση των ακραίων κλιματικών φαινομένων. Η γεωργία δεν αποτελεί σήμερα αντικείμενο βέλτιστης διαχείρισης όσον αφορά την τρέχουσα φυσική κλιματική μεταβλητότητα, λόγω των πολιτικών που ακολουθούνται, αλλά και της τεχνολογίας και των πρακτικών που εφαρμόζονται. Μια πιο επικαιροποιημένη επιλογή πολιτικών, πρακτικών και τεχνολογιών αναμένεται να περιορίσει μακροπρόθεσμα την ευπάθεια της γεωργίας στην κλιματική αλλαγή. Για παράδειγμα, η ενσωμάτωση εποχικών κλιματικών προγνώσεων σε αποφάσεις διαχείρισης μπορεί να περιορίσει την τρωτότητα και ευπάθεια της γεωργίας σε ακραία κλιματικά φαινόμενα, όπως πλημμύρες και ξηρασίες, που προκαλούνται από τα φαινόμενα ENSO και NAO.

Η παγκόσμια γεωργία αναμένεται να αντιμετωπίσει πολλές προκλήσεις τα επόμενα χρόνια, όπως είναι ο διεθνής ανταγωνισμός, η περαιτέρω απελευθέρωση τον παγκόσμιου , καθώς και η μείωση του πληθυσμού. Σε αυτές, η κλιματική αλλαγή θα προσθέσει τις πιέσεις και θα καταστήσει τις προκλήσεις δυσκολότερες και δαπανηρότερες. Οι προβαλλόμενες κλιματικές αλλαγές αναμένεται να επηρεάσουν τη συγκομιδή καλλιεργειών, τη διαχείριση του κεφαλαίου και τη χωρική κατανομή της παραγωγής, με σημαντικές αβεβαιότητες στο εισόδημα του αγρότη και την εγκατάλειψη της γης σε ορισμένες περιοχές της Γης. Η διακινδύνευση (risk) της παραγωγής τροφίμων μπορεί να αποτελέσει σοβαρό θέμα σε ορισμένες περιοχές της Γης, καθόσον καύσωνες, ξηρασίες και προσβολές από έντομα πιθανόν να αυξήσουν το ενδεχόμενο των αποτυχιών στη σοδειά. Όσο η μεταβλητότητα της συγκομιδής αυξάνεται, τόσο το παγκόσμιο απόθεμα τροφών θα είναι σε αυξανόμενη διακινδύνευση. Στο πλαίσιο αυτό, η δυνητική επίπτωση της πιθανής αύξησης της βιομάζας για παραγωγή ενέργειας στο παγκόσμιο απόθεμα τροφών πρέπει να εκτιμηθεί.

Σε συνθήκες αλλαγής κλίματος, ο ρόλος της γεωργίας, ως παροχέα υπηρεσιών στο περιβάλλον και στα οικοσυστήματα, αποκτά πρόσθετη σημασία. Η αγροτική διαχείριση διαδραματίζει μεγάλο ρόλο σχετικά, μεταξύ άλλων, με την αποτελεσματική χρήση του νερού σε ξηρές περιοχές, την προστασία υδάτινων διαδρομών ενάντια σε πλεονάζουσες εισροές νιτρικών, τη βελτίωση της διαχείρισης πλημμυρών, τη διαχείριση και αποκατάσταση πολυχρηστικών τοποθεσιών. Η υποστήριξη των τοπικών κοινωνιών στη γεωργία και στην αγροτική ανάπτυξη παίζει σημαντικό ρόλο στην παραγωγή τροφίμων, στη διατήρηση αγροτικών περιοχών και στην παροχή περιβαλλοντικών υπηρεσιών. Η πρόσφατη αναθεώρηση της κοινής αγροτικής πολιτικής (Common Agricultural Policy/CAP) αποτελεί το πρώτο βήμα προς ένα πλαίσιο για την αειφόρο ανάπτυξη της ευρωπαϊκής γεωργίας.

Η κλιματική αλλαγή αναμένεται να επηρεάσει σημαντικά οικονομίες και κοινωνίες, μέσω των επιπτώσεων στα οικοσυστήματα και, ειδικότερα, στο φυτικό κεφάλαιο, στη βιοποικιλότητα και στη ροή οικοσυστημικών υπηρεσιών σε εδαφικά και θαλάσσια οικοσυστήματα, καθώς και οικοσυστήματα εσωτερικών νερών (Σχήμα 10.12). Αυτό συμβαίνει καθόσον, για τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στον άνθρωπο, μεσολαβούν σε μεγάλο ποσοστό φυσικά οικοσυστήματα. Τα υγιή οικοσυστήματα αναμένεται να είναι περισσότερο ανθεκτικά στην κλιματική αλλαγή και, επομένως, περισσότερο ικανά να διατηρήσουν την παροχή οικοσυστημικών υπηρεσιών, από τις οποίες εξαρτάται η ευημερία και η ευμάρεια του ανθρώπου. Τελικά, αποτελούν την καρδιά κάθε πολιτικής προσαρμογών. Συνεπώς, «συμβατικές» πιέσεις, που προκαλούν κατάτμηση, υποβάθμιση, υπερεκμετάλλευση και ρύπανση των οικοσυστημάτων, πρέπει να περιοριστούν.
Η κλιματική αλλαγή θα έχει σημαντικές επιπτώσεις στις φυσικές και βιολογικές συνιστώσες των οικοσυστημάτων: νερό, έδαφος, αέρας και βιοποικιλότητα. Νομοθεσία και πολιτικές πρέπει να είναι διαθέσιμες προς υλοποίηση, ώστε να επιτρέπουν την έγκαιρη επέμβαση, για την ενίσχυση της αντίστασης του οικοσυστήματος στην κλιματική αλλαγή. Σημαντική συνεισφορά στη διάσωση και αποκατάσταση της βιοποικιλότητας και των οικοσυστημάτων προσφέρουν κυρίως η κατοχύρωση της ακεραιότητας, της συνοχής και της συνδετικότητας του δικτύου Natura 2000, η διατήρηση και η αποκατάσταση της βιοποικιλότητας και των οικοσυστημικών υπηρεσιών στην ευρύτερη περιοχή, η προώθηση της συμβατής με τη βιοποικιλότητα περιοχικής ανάπτυξης, καθώς και ο περιορισμός των ανεπιθύμητων επιπτώσεων από εισβάλλοντα ξένα είδη.

10.4. Επιπτώσεις κλιματικής αλλαγής στη γεωργία

Η κλιματική αλλαγή, ως κοινός όρος, που χρησιμοποιείται από το μεγαλύτερο μέρος του πληθυσμού, θεωρείται πλέον η ανθρωπογενούς προέλευσης αλλαγή του κλίματος. Αυτή η αλλαγή του κλίματος μπορεί να επηρεάσει τη γεωργία με θετικό τρόπο (π.χ. λίπανση CO_2, επιμήκυνση καλλιεργητικών περιόδων, περισσότερες βροχοπτώσεις) ή με αρνητικό τρόπο (π.χ. περισσότερη ξηρασία, ταχύτερη ανάπτυξη, με συνέπεια πιο μικρούς βιολογικούς κύκλους, υφαλμύρωση). Με την αλλαγή του κλίματος, αυξάνονται οι χερσαίες και θαλάσσιες θερμοκρασίες και μεταβάλλονται το ύψος και η κατανομή των βροχοπτώσεων, με συνέπεια την άνοδο της μέσης στάθμης των θαλασσών, τον κίνδυνο διάβρωσης των ακτών και τις προβλέψεις έντασης των σχετιζόμενων με τον καιρό φυσικών καταστροφών. Η μεταβολή της στάθμης των υδάτων, η αλλαγή των θερμοκρασιών και των ροών θα έχουν, με τη σειρά τους, επιπτώσεις στην προσφορά τροφής, την υγεία, τη βιομηχανία, τις μεταφορές και την ακεραιότητα των οικοσυστημάτων. Η αλλαγή του κλίματος θα έχει σημαντικές οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις, ιδίως σε ορισμένες περιφέρειες και τομείς, που θα θιγούν περισσότερο.

10.4.1. Μεταβολές σε κλιματικές παραμέτρους και οικοσυστήματα

Από τις πλέον κατανοητές τάσεις του κλίματος στον 21ο αιώνα είναι η συνεχιζόμενη απότομη αύξηση της θερμοκρασίας στα υψηλά πλάτη του βόρειου ημισφαιρίου, η περαιτέρω ξήρανση των περιοχών της Μεσογείου και σε μερικά τροπικά και υποτροπικά πλάτη, καθώς και η ενίσχυση των κλιματικών ακραίων, ως συνέπεια της αυξανόμενης κλιματικής μεταβλητότητας, ειδικά σε υποτροπικά και τροπικά πλάτη. Ενδεικτικά, παρατίθεται η ανάλυση συχνοτήτων της βροχόπτωσης του σταθμού της Λάρισας για τα διαστήματα 1950-1975 και 1976-2007, αντίστοιχα. Στο Σχήμα 10.13 (Dalezios, 2011) παρατηρούμε ότι οι συχνότητες βροχόπτωσης στη Λάρισα της πρόσφατης περιόδου παρουσιάζουν συνολικά μικρότερο εμβαδόν, δηλαδή μείωση του συνολικού ύψους βροχής, καθώς και μετατόπιση της αιχμής προς υψηλότερες εντάσεις βροχής, δηλαδή περισσότερες καταιγιδοφόρες περιπτώσεις.
Η θερμοκρασία, η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, το νερό και η διαθεσιμότητα θρεπτικών είναι οι κύριοι παράγοντες που γενικά καθορίζουν τη γεωργική παραγωγή. Τα βιολογικά συστήματα βασίζονται κυρίως στη φωτοσύνθεση και, συνεπώς, εξαρτώνται από την προσπίπτουσα ακτινοβολία. Η δυναμική για παραγωγή, που καθορίζεται από την ακτινοβολία, τροποποιείται σε μεγάλο βαθμό από τη θερμοκρασία και τη βροχόπτωση. Η κύρια επίδραση της θερμοκρασίας είναι ο έλεγχος της διάρκειας της βλαστικής περιόδου. Επιπλέον, άλλες διαδικασίες, που συνδέονται με τη συσσώρευση ξηρής ουσίας, επηρεάζονται από τη θερμοκρασία. Βροχόπτωση και διαθεσιμότητα εδαφικού ύδατος μπορεί να επηρεάσουν τη διάρκεια της ανάπτυξης μέσω της διάρκειας της φυλλικής επιφάνειας και της αποτελεσματικότητας της φωτοσύνθεσης. Οι γενικοί αυτοί κλιματικοί περιορισμοί στη γεωργική παραγωγή τροποποιούνται από τοπικούς κλιματικούς περιορισμούς. Ενδεικτικά, στο Σχήμα 10.14

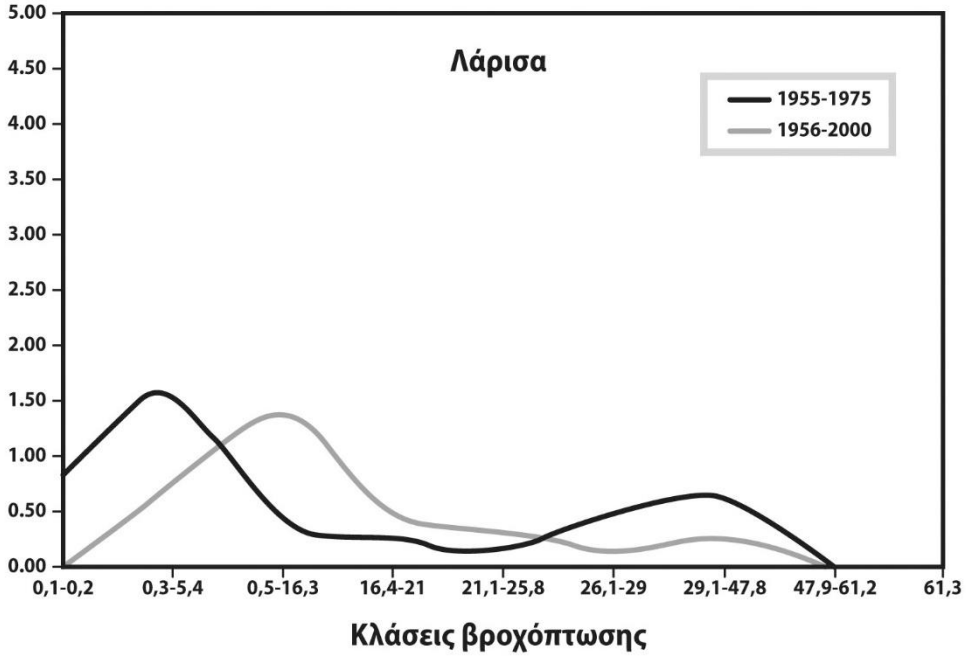
παρουσιάζονται οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στην παραγωγή σιτηρών σε διαφορετικές περιοχές και, ειδικότερα, η μεταβολή (μείωση) της παραγωγής ως συνάρτηση της συνεχούς αύξησης της θερμοκρασίας.



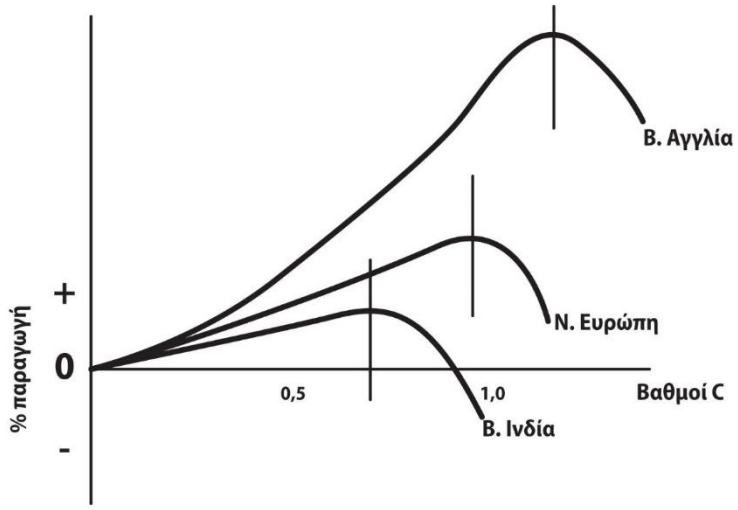
Σχήμα 10.12. *Κλιματική αλλαγή και οικοσυστήματα*

Στις βόρειες χώρες, η διάρκεια της βλαστικής περιόδου, ο όψιμος ανοιξιάτικος και πρώιμος φθινοπωρινός παγετός και η διαθεσιμότητα ηλιακής ακτινοβολίας είναι τυπικοί κλιματικοί περιορισμοί. Στα περιβάλλοντα αυτά, η διάρκεια της βλαστικής περιόδου περιορίζει την παραγωγικότητα των καλλιεργειών. Η μικρή βλαστική περίοδος είναι η κύρια αιτία για τις χαμηλότερες σοδειές σιτηρών στις Σκανδιναβικές χώρες. Επιπλέον, οι νυχτερινοί παγετοί αυξάνουν το αγροτικό ρίσκο στα περιβάλλοντα αυτά. Οι υγρές συνθήκες στις ακτές τον Ατλαντικού και στις ορεινές περιοχές, προκαλώντας ψυχρά και βροχερά καλοκαίρια, περιορίζουν τη διαθεσιμότητα της ηλιακής ακτινοβολίας και οδηγούν σε απώλειες στη σοδειά και την ποιότητα σε πολλές αροτριαίες καλλιέργειες. Αυτή είναι η κύρια αιτία για μικρές σοδειές σιτηρών στα Βρετανικά νησιά και στις Αλπικές χώρες, σε σύγκριση με άλλες περιοχές. Στις Μεσογειακές χώρες, οι σοδειές σιτηρών περιορίζονται από τη διαθεσιμότητα νερού, την καταπόνηση λόγω καύσωνα και τη μικρή διάρκεια βασικών φαινολογικών σταδίων. Τα σιτηρά είναι, συνεπώς, λιγότερο σημαντικά στην περιοχή αυτή. Μόνιμες καλλιέργειες, όπως ελιές, αμπέλια και

φρούτα, είναι ιδιαίτερα σημαντικές στη Μεσόγειο. Οι καλλιέργειες αυτές επηρεάζονται από ακραία καιρικά φαινόμενα, όπως χαλάζι και καταιγίδες, που μπορεί να περιορίσουν ή/και να καταστρέψουν τελείως τη σοδειά. Η άρδευση είναι σημαντική για την παραγωγή καλλιεργειών σε πολλές Μεσογειακές χώρες, λόγω της υψηλής εξατμισοδιαπνοής και της περιορισμένης βροχόπτωσης. Το ηπειρωτικό κλίμα της ανατολικής Ευρώπης, που προκαλεί ξηρότερες συνθήκες και μεγαλύτερο εύρος στον κύκλο της ετήσιας θερμοκρασίας, περιορίζει το εύρος των καλλιεργειών που μπορεί να αναπτυχθούν. Οι πιο παραγωγικές περιοχές της Ευρώπης βρίσκονται στις κεντρικές, σχετικά υψηλές περιοχές. Επιπρόσθετα, υπάρχουν χαμηλές περιοχές, όπως τα ουγγρικά πεδία, με εξίσου διαθέσιμες ευνοϊκές συνθήκες.



Σχήμα 10.13. *Ανάλυση συχνοτήτων της βροχόπτωσης του σταθμού της Λάρισας για τα διαστήματα 1950-1975 και 1976-2007.*



Σχήμα 10.14 *Επίπτωση στην παραγωγή σιτηρών.*

10.4.2. Επιπτώσεις σε τομείς της οικονομίας

Κατά τα τελευταία τριάντα χρόνια, η κλιματική αλλαγή έχει ήδη αξιοσημείωτη επίδραση σε πολλά φυσικά και βιολογικά συστήματα, και σε τομείς της οικονομίας (Salinger et a1., 2005· IPCC, 2007). Επισημαίνονται ενδεικτικά τα ακόλουθα:

10.4.2.1. Γεωργία

Οι επιπλοκές τόσο της παρελθούσας όσο και της παρούσας κλιματικής μεταβλητότητας και αλλαγής στη γεωργία αποτελούν αντικείμενο μελετών των επιπτώσεων (IPCC, 2001). Στη γεωργία, οι προβλεπόμενες κλιματικές μεταβολές θα έχουν επιπτώσεις στις αποδόσεις, στη διαχείριση του ζωικού κεφαλαίου και στον γεωγραφικό προσανατολισμό της παραγωγής. Οι αυξανόμενες πιθανότητες εκδήλωσης ακραίων φαινομένων θα αυξήσουν, με τη σειρά τους, τον κίνδυνο ζημιών στη συγκομιδή. Ακόμα, αναμένεται να υπάρχει επίπτωση στις γεωργικές πρακτικές, όπως αλλαγές στη χρήση τον νερού, στις γεωργικές εισροές, στα λιπάσματα, στους ψεκασμούς και σε άλλα συναφή. Σε περιβαλλοντικό επίπεδο, οι επιπτώσεις εντοπίζονται στη συχνότητα και ένταση της στράγγισης εδαφών, στη διάβρωση των εδαφών, καθώς και στον περιορισμό της δυνατότητας αναδιάρθρωσης των καλλιεργειών. Η κλιματική αλλαγή θα επηρεάσει εξάλλου και το έδαφος, απομακρύνοντας τις οργανικές ύλες, που αποτελούν βασικό παράγοντα της γονιμότητας των εδαφών. Στον αγροτικό χώρο γενικά, οι επιπτώσεις παρουσιάζονται ως απώλεια καλλιεργούμενων εδαφών, αλλά και ως τάσεις για ευκαιρίες κερδοφορίας. Επιπλέον, άμεση επίπτωση στη γεωργία αποτελούν η σύνθεση της γήινης ατμόσφαιρας και η περιεκτικότητα σε διοξείδιο τον άνθρακα (CO_2) και σε όζον (O_3). Οι επιπτώσεις της αλλαγής του κλίματος στα **δάση** θα περιλαμβάνουν, ενδεχομένως, επιπτώσεις στην υγεία και την παραγωγικότητα των δασών, και μεταβολές στη γεωγραφική εξάπλωση ορισμένων ειδών δένδρων. Η αλλαγή του κλίματος θα ασκήσει συμπληρωματική πίεση στους τομείς της **αλιείας** και των **υδατοκαλλιεργειών.** Σοβαρές θα είναι επίσης οι επιπτώσεις στις ακτές και στα θαλάσσια οικοσυστήματα.

10.4.2.2. Ευπάθεια της γεωργίας

Ευπάθεια (vulnerability) του κλίματος ορίζεται ο βαθμός στον οποίο ένα σύστημα είναι επιρρεπές ή ανίκανο να ανταποκριθεί σε αρνητικές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, συμπεριλαμβανομένης της κλιματικής μεταβλητότητας και των ακραίων (Smith et al., 2003). Δηλαδή, η ευπάθεια αποτελεί το όριο στο οποίο ένα φυσικό ή κοινωνικό σύστημα είναι επιρρεπές σε διατηρήσιμη ζημιά, λόγω κλιματικής αλλαγής. Ειδικότερα, η ευπάθεια είναι συνάρτηση τόσο της κλιματικής αλλαγής ή μεταβλητότητας, στην οποία το σύστημα εκτίθεται, όσο και της φύσης του συστήματος, σχετικά με την ευαισθησία του σε κλιματικό έλεγχο και την ικανότητα προσαρμογής του. Η γεωργία είναι, αναμφισβήτητα, το κοινωνικό σύστημα στο οποίο η ευπάθεια μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί και να επισημανθεί. Διασυνδέει περιβαλλοντικά και κοινωνικά συστήματα, και σχετίζεται με τους υδάτινους πόρους. Η γεωργική παραγωγή επηρεάζεται, κατά βάση, από τη διαθεσιμότητα νερού και θρεπτικών στοιχείων, καθώς και τη θερμοκρασία. Οι ανθρώπινοι παράγοντες, δηλαδή η γενετική παρέμβαση, μπορούν να τροποποιήσουν, αλλά δεν αντικαθιστούν αυτούς τους φυσικούς περιορισμούς. Η παγκόσμια αύξηση της θερμοκρασίας μπορεί να επιτρέψει την καλλιέργεια σε υποπολικές περιοχές, οι οποίες είναι τώρα αφιλόξενες, λόγω του μικρού βιολογικού κύκλου που προκαλούν στις καλλιέργειες, εάν οι εδαφικές συνθήκες στις περιοχές αυτές είναι αποδεκτές για καλλιέργεια. Σε άλλες περιοχές ωστόσο, όπως στις τροπικές και τις ξηρές περιοχές, η καταπόνηση από τη ζέστη ή την ξηρασία μπορεί να αυξηθεί, με αποτέλεσμα τη μείωση της παραγωγικότητας. Επίσης, οι υδάτινοι πόροι ελέγχονται σε μεγάλο βαθμό από τις βροχοπτώσεις και την εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία εξάτμιση. Τα σενάρια κλιματικής αλλαγής δείχνουν αύξηση των βροχοπτώσεων σε υψηλά γεωγραφικά πλάτη και σε ορισμένες περιοχές του ισημερινού, γεγονός που μειώνει την υδατική καταπόνηση, αλλά δείχνουν επίσης μείωση σε πολλές περιοχές μέσου γεωγραφικού πλάτους, σε υποτροπικές και ημίξηρες περιοχές, γεγονός που αυξάνει την υδατική καταπόνηση. Με την αύξηση του πληθυσμού, την αστικοποίηση και τη βελτίωση του βιοτικού επιπέδου, αναμένεται να παρατηρηθεί αυξημένη ζήτηση του νερού για αστική και δημοτική χρήση, εντείνοντας έτσι τον ανταγωνισμό για τους λιγοστούς υδάτινους πόρους, την ίδια στιγμή που η γεωργική ζήτηση αυξάνεται. Κατά συνέπεια, είναι δυνατόν να υπάρχει αύξηση της ανισότητας στην παραγωγή τροφίμων μεταξύ αναπτυγμένων και αναπτυσσόμενων εθνών, για διάφορα σενάρια κλιματικής αλλαγής κατά τον 21ο αιώνα (Smith et al., 2003).

10.4.2.3. Υδάτινοι πόροι

Η αλλαγή του κλίματος θα έχει αποτέλεσμα σημαντικές αλλαγές στην ποιότητα και τη διαθεσιμότητα των υδάτινων πόρων, επηρεάζοντας πολλούς τομείς, όπως την παραγωγή τροφίμων, όπου το νερό διαδραματίζει καίριο ρόλο. Ποσοστό μεγαλύτερο του 80% των γεωργικών γαιών αρδεύεται από τις βροχές. Επίσης, η παραγωγή τροφίμων εξαρτάται από τους διαθέσιμους για άρδευση υδάτινους πόρους. Επιπλέον, η κλιματική αλλαγή αναμένεται να περιορίσει ακόμα περισσότερο την πρόσβαση σε ασφαλές πόσιμο νερό. Αυτό θα μπορούσε επίσης να εντείνει τις μεταναστευτικές πιέσεις. Η τήξη των παγετώνων παρέχει προς το παρόν νερό σε πάνω από ένα δισεκατομμύριο ανθρώπους, και μόλις εξαφανιστεί, οι πληθυσμοί θα βρίσκονται υπό πίεση και πιθανόν να μεταναστεύσουν σε άλλες περιοχές, προκαλώντας τοπική και ίσως παγκόσμια αναταραχή και ανασφάλεια. Η κλιματική αλλαγή θα τροποποιήσει τα πεδία της βροχόπτωσης, εξάτμισης, απορροής και αποθήκευσης υγρασίας τον εδάφους. Επίσης, αναμένεται αύξηση των επιπτώσεων των περιβαλλοντικών κινδύνων, όπως ερημοποίηση, ελλείμματα νερού, έντονες βροχοπτώσεις και πλημμύρες και συχνότητα ξηρασιών.

10.4.2.4. Οικοσυστήματα και βιοποικιλότητα

Περίπου το 20-30% των φυτικών και ζωικών ειδών εκτιμάται μέχρι τώρα ότι βρίσκεται μάλλον σε πιθανό ρίσκο εξαφάνισης αν οι αυξήσεις στην παγκόσμια μέση θερμοκρασία ξεπεράσουν τους 1,5-2,5° C. Η αλλαγή του κλίματος θα είναι ολοένα και περισσότερο υπεύθυνη για την απώλεια βιοποικιλότητας και την υποβάθμιση των οικοσυστημάτων, των θαλάσσιων οικοσυστημάτων, γεγονός που θα βλάψει όχι μόνο τα είδη που διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στα οικοσυστήματα, αλλά και τις συνδεόμενες με αυτά υπηρεσίες, στις οποίες στηρίζεται η κοινωνία. Τα οικοσυστήματα διαδραματίζουν άμεσο ρόλο στη ρύθμιση του κλίματος: οι τυρφώνες, οι υγρότοποι και τα πελάγη αποθηκεύουν μεγάλες ποσότητες άνθρακα. Επιπλέον, τα οικοσυστήματα των αλμυρών βάλτων και των θινών παρέχουν προστασία από τις καταιγίδες. Αναμένεται να θιγούν υπηρεσίες που παρέχουν τα οικοσυστήματα, όπως είναι η παροχή πόσιμου νερού, η παραγωγή τροφίμων και οικοδομικών υλικών, ενώ ενδέχεται να υποβαθμιστούν οι ωκεανοί, μέσω της οξίνισης. Ορισμένες πρακτικές χρήσεων γης και χωροταξικές αποφάσεις, όπως η οικοδόμηση σε πλημμυρικές ζώνες, καθώς και η μη βιώσιμη χρήση των θαλασσών (π.χ. υπεραλίευση), καθιστούν περισσότερα εκτεθειμένα στην αλλαγή του κλίματος τα οικοσυστήματα και τα κοινωνικοοικονομικά συστήματα, και, ως εκ τούτου, μειώνουν την ικανότητα προσαρμογής τους.

10.4.2.5. Τρόφιμα

Η ετήσια αύξηση της παγκόσμιας γεωργικής παραγωγής τις τρεις τελευταίες δεκαετίες του 20ού αιώνα έφτανε, κατά μέσο όρο, στο 2,2%, ποσοστό που αναμένεται να μειωθεί στο περίπου 0,8% από το 2040 (FAO, 2005). Αυτή η επιβράδυνση αντανακλά τη μείωση των ποσοστών αύξησης του πληθυσμού και τα μέσα προς υψηλά ποσοστά κατανάλωσης σε πολλές χώρες, γεγονός που θα μειώσει το ρυθμό αύξησης της ζήτησης για γεωργικά προϊόντα. Την περίοδο έως το 2040, η αλλαγή του κλίματος είναι πιθανόν να επιδεινώσει τα προβλήματα παραγωγής τροφίμων, κυρίως σε τροπικές περιοχές με ακανόνιστες βροχοπτώσεις. Και όπως συμβαίνει με τους περισσότερους φυσικούς κινδύνους, οι πιο ευάλωτοι είναι οι φτωχοί και, επίσης, όσοι έχουν περιορισμένες επιλογές προσαρμογής. Η κλιματική αλλαγή αναμένεται να αυξήσει τον κίνδυνο τον λιμού για σημαντικό μέρος τον πληθυσμού. Ο συνολικός αριθμός ανθρώπων σε κίνδυνο λιμού μπορεί να φτάσει σε μερικές εκατοντάδες εκατομμύρια. Οι σοδειές καλλιεργειών επηρεάζονται από τις διακυμάνσεις κλιματικών παραγόντων, όπως η θερμοκρασία, ο υετός, καθώς και η συχνότητα και η ένταση ακραίων φαινομένων, όπως οι ξηρασίες, οι πλημμύρες, οι τυφώνες, οι ανεμοστρόβιλοι και το χαλάζι (Alexandrov & Hoogenbown, 2000). Αναμένεται αύξηση της ευαισθησίας των φυτών στις κλιματικές συνθήκες, με ενδεχόμενα χαρακτηριστικά την επιμήκυνση της βλαστικής περιόδου, τη γεωγραφική και υψομετρική μετατόπιση του εύρους των φυτών, την πρώιμη άνθιση και έξαρση των ασθενειών των φυτών, με τελική επίπτωση στην ποσότητα και την ποιότητα της γεωργικής παραγωγής.

10.4.2.6. Ενέργεια

Στον τομέα της ενέργειας, η αλλαγή του κλίματος θα έχει άμεσες επιπτώσεις στην προσφορά και στη ζήτηση. Σύμφωνα με τις μελλοντικές προβολές σχετικά με τη συχνότητα των βροχοπτώσεων και την τήξη των παγετώνων, η παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας θα μπορούσε να αυξηθεί κατά 5%, τουλάχιστον στη Βόρεια Ευρώπη, και να μειωθεί κατά 25%, τουλάχιστον στη Νότια Ευρώπη. Η μείωση των βροχοπτώσεων και τα κύματα καύσωνα αναμένεται, επίσης, να επηρεάσουν αρνητικά τη διαδικασία ψύξης των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής. Από την πλευρά της ζήτησης, ο πολλαπλασιασμός των αιχμών ζήτησης για σκοπούς ψύξης

και οι επιπτώσεις των ακραίων κλιματικών φαινόμενων θα επηρεάσουν ιδιαίτερα τη διανομή ηλεκτρικού ρεύματος.

10.4.2.7. Παράκτιες-αστικές ζώνες

Η αύξηση της στάθμης της θάλασσας αναμένεται να απειλήσει τα δέλτα μεγάλων ποταμών και να μετατοπίσει περισσότερο από ένα εκατομμύριο ανθρώπους σε κάθε δέλτα μέχρι το 2050. Μικρά νησιά επηρεάζονται ήδη. Τα ακραία κλιματικά φαινόμενα έχουν τεράστιες οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις. Θίγονται οι υποδομές (κτίρια, μεταφορές, παραγωγή ενέργειας και παροχή νερού), απειλώντας ιδιαίτερα τις πυκνοκατοικημένες περιοχές. Η κατάσταση θα μπορούσε να επιδεινωθεί με την άνοδο της στάθμης της θάλασσας. Θα χρειαστεί μια στρατηγικότερη και πλέον μακροπρόθεσμη χωροταξική προσέγγιση, τόσο στις χερσαίες, όσο και στις θαλάσσιες περιοχές, συμπεριλαμβανομένων των μεταφορών, της περιφερειακής πολιτικής, της βιομηχανίας, του τουρισμού και της ενέργειας. Πιθανόν να αντιμετωπίσει επιπτώσεις και ο κλάδος του **τουρισμού**, λόγω της μειούμενης χιονοκάλυψης των ορεινών περιοχών και της αύξησης της θερμοκρασίας στις παράκτιες περιοχές. Οι μη βιώσιμες μορφές τουρισμού ενδέχεται να επιτείνουν τις αρνητικές επιπτώσεις της αλλαγής του κλίματος.

10.4.2.8. Υγεία

Η κλιματική αλλαγή αναμένεται να έχει άμεσες και έμμεσες επιπτώσεις στην υγεία ανθρώπων, ζώων και φυτών. Οι επιπτώσεις των ακραίων καιρικών φαινομένων και η αύξηση των μεταδοτικών ασθενειών είναι μεταξύ των πιο σημαντικών κινδύνων που εξετάζονται. Ασθένειες προκαλούμενες από κλιματικά αίτια και μεταδίδονται μέσω φορέων, μαζί με ζωονόσους, είναι μεταξύ των πιο θανατηφόρων παγκοσμίως. Διάρροια, ελονοσία και ελλειμματική σε πρωτεΐνες κακή διατροφή προκάλεσαν περισσότερους από 3,3 εκατομμύρια θανάτους παγκοσμίως το 2002, με το 29% αυτών να εμφανίζονται στην Αφρική. Επίσης, η αλλαγή του κλίματος θα απειλήσει τις συνθήκες διαβίωσης των ζώων και θα έχει, ενδεχομένως, επιπτώσεις στην υγεία των φυτών, ευνοώντας την εξάπλωση νέων ή μεταναστευτικών επιβλαβών οργανισμών, που θα μπορούσαν να επηρεάσουν αρνητικά το εμπόριο ζώων, φυτών και προϊόντων τους.

10.5. Αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής στη γεωργία

Η βασική αρχή της αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής στη γεωργία, καθώς και της αγροτικής πολιτικής σε σχέση με την κλιματική αλλαγή, στοχεύει στη διαχείριση διακινδύνευσης (ή ρίσκου) μέσω της υλοποίησης μέτρων προετοιμασίας και αντιμετώπισης. Η προετοιμασία αναφέρεται σε δράσεις που σχεδιάζονται για να βελτιώσουν το επίπεδο ετοιμότητας ή να αυξήσουν την επιχειρησιακή και θεσμική αποτελεσματικότητα για ανταπόκριση στην κλιματική αλλαγή. Αντίστοιχα, η αντιμετώπιση περιλαμβάνει μικρού και μεγάλου ορίζοντα δράσεις, προγράμματα ή πολιτικές που εφαρμόζονται για να περιορίσουν το βαθμό διακινδύνευσης από την κλιματική αλλαγή, για τον άνθρωπο, την παραγωγική αποδοτικότητα και τα οικοσυστήματα. Κύριος στόχος εθνικών σχεδίων αγροτικής πολιτικής για την κλιματική αλλαγή παραμένει η βελτίωση της προετοιμασίας και της αποτελεσματικής ανταπόκρισης, μέσω έγκαιρων προειδοποιήσεων και παρακολούθησης, εκτίμησης επιπτώσεων, καθώς και αντιμετώπισης. Σήμερα, η τάση βρίσκεται στην αντιμετώπιση ως βασικό στοιχείο κάθε σχεδίου.

10.5.1. Παράγοντες αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής

Όταν γίνεται αξιολόγηση των πιθανών επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής και της προετοιμασίας για τις επιπτώσεις της, διάφοροι παράγοντες πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό δράσεων αντιμετώπισης, όπως:

α. Η ευπάθεια της κοινωνίας. Εξετάζεται η επισιτιστική ασφάλεια, η αυτάρκεια αγαθών, η δυνατότητα διάθεσης χρηματικών πόρων για τη διαφοροποίηση της παραγωγής και, γενικά, η διατήρηση της βιωσιμότητας μιας κοινότητας.

β. Η πιθανή αβεβαιότητα της φύσης της κλιματικής αλλαγής. Οι αλλαγές αποτελούν σταδιακή μετατόπιση των μέσων κλιματικών τιμών, με μικρή αλλαγή στα άκρα και στο εύρος τους, ή αναμένονται περισσότερα ακραία καιρικά φαινόμενα; Σε περιοχές στις οποίες τα μόνα διαθέσιμα στοιχεία είναι τα αποτελέσματα των ΜΓΚ, οι όποιες εκτιμήσεις δε μπορεί να είναι ιδιαίτερα λεπτομερείς. Αντίστοιχα, τα ΠΚΜ και η στατιστική υποκλιμάκωση επιτρέπουν μια λεπτομερέστερη χωρική εκτίμηση.

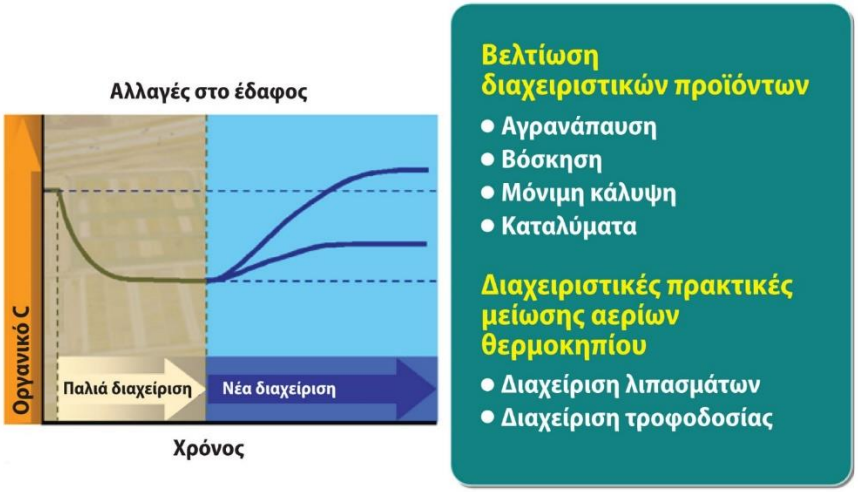
γ. Η πιθανή κοινωνικοπολιτική κατάσταση της περιοχής. Η κοινωνική και οικονομική αβεβαιότητα είναι πιθανώς εξίσου σημαντική με την αβεβαιότητα της κλιματικής αλλαγής, κατά την ερμηνεία των δεδομένων που συλλέγονται για τη μελέτη των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής.
δ. Η διαθεσιμότητα κατάλληλων μοντέλων για την προσομοίωση της πρωτογενών και δευτερογενών επιπτώσεων στα γεωργικά συστήματα. Τα μοντέλα επισιτιστικών ή τροπικών καλλιεργειών τείνουν να είναι ελλιπή, ενώ η προσομοίωση των επιδράσεων του CO_2 και οι σύνθετες αλληλεπιδράσεις μπορεί να είναι προβληματικές.
ε. Η αβεβαιότητα που συνδέεται με την παραμετροποίηση και βαθμονόμηση μοντέλων για την αξιολόγηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής. Υπάρχει ίσως μια υπόθεση για την απλοποίηση των ποσοτικών μοντέλων και την ανάπτυξη ενός συνολικού, αλλά ποιοτικά ερμηνευτικού πλαισίου, αντί να ενσωματώνονται όλες τις αλληλεπιδράσεις σε ένα σύστημα προσομοίωσης.
Οι προβλεπόμενες συνέπειες των δράσεων εξαρτώνται από το συνδυασμό και την αλληλεπίδραση της ευπάθειας, του φυσικού και κοινωνικού περιβάλλοντος και του κινδύνου, που στην περίπτωση αυτή είναι η αλλαγή του κλίματος. Όταν ευπάθεια και κίνδυνος συμπίπτουν σε ένα περιβάλλον που αντιστέκεται στην προσαρμογή, αναμένονται αρνητικές επιπτώσεις.
Οι κυριότεροι αναμενόμενοι κίνδυνοι για το κλίμα και η φύση των επιπτώσεων αυτών εξετάζονται στη συνέχεια, προκειμένου να δοθεί ένα πλαίσιο για τον αρχικό σχεδιασμό των δράσεων αντιμετώπισης. Ωστόσο, η αύξηση του CO_2 και άλλες περιβαλλοντικές μεταβλητές αλληλοεπιδρούν με αυτούς τους παράγοντες. Οι ενότητες αυτές περιλαμβάνουν ειδικές επιδράσεις, που συνδέονται με τον καιρό, τις επιδράσεις της θερμοκρασίας, τη διαθεσιμότητα υδάτινων πόρων, την επίδραση του ανέμου, τη φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία, καθώς και τις αυξημένες επιδράσεις CO_2.

10.5.2. Δράσεις της αντιμετώπισης

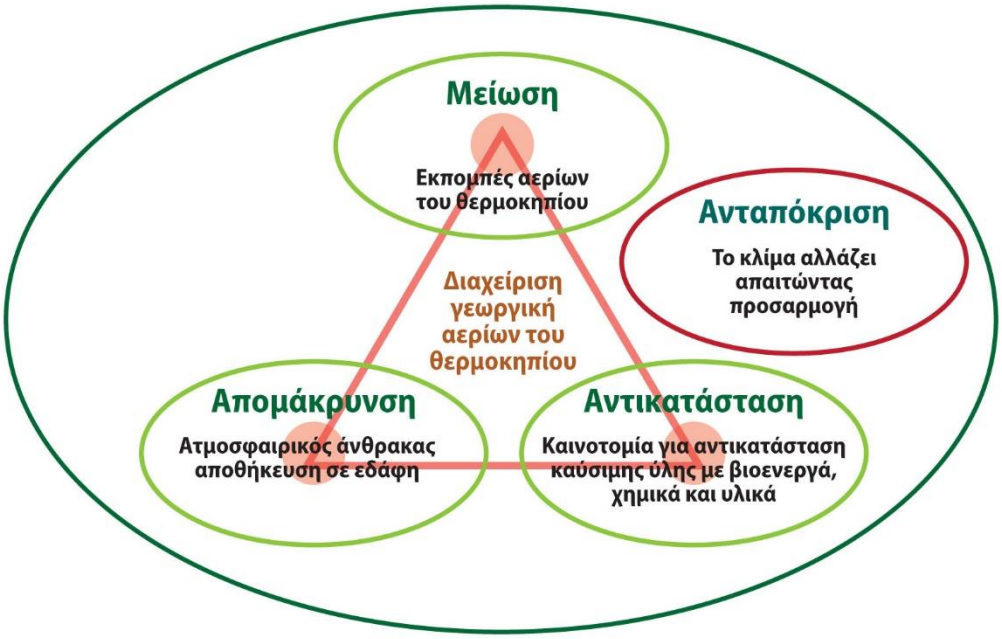
Η αντιμετώπιση της αλλαγής του κλίματος πρέπει να γίνει σε δύο επίπεδα. Το πρώτο επίπεδο θα πρέπει να αφορά την ανάγκη δράσεων αντιμετώπισης, για τη σταθεροποίηση και τον περιορισμό των Εκπομπών Αερίων του Θερμοκηπίου (ΕΑΘ) στην ατμόσφαιρα. Η γεωργία προσφέρει ευκαιρίες για αντιμετώπιση των ΕΑΘ. Απομάκρυνση CO_2 και πιθανή αύξηση N_2O επιτυγχάνονται με διαχείριση του αγρού, όπως όργωμα, διαχείριση άρδευσης και λίπανσης, κάλυψη καλλιεργειών και κατάργηση αγρανάπαυσης, καθώς και με αλλαγή χρήσεων γης σε λιβάδια και δάση. Ακόμα, μείωση εκπομπών CO_2, N_2O και μεθανίου επιτυγχάνεται με ενεργειακές εκπομπές, ζωοτεχνία, προϊόντα βιοενέργειας και ανανεώσιμες πηγές.
Στο Σχήμα 10.15 παρουσιάζεται η δυνατότητα συμβολής της γεωργίας στην αντιμετώπιση των ΕΑΘ, μέσω συγκεκριμένων πρακτικών διαχείρισης της γεωργικής γης. Επίσης, στο σχήμα 10.16 απεικονίζεται το πλαίσιο των απαραίτητων δράσεων γεωργικής διαχείρισης των ΕΑΘ. Ωστόσο, ακόμα και εάν επιτευχθούν η συγκράτηση και, στη συνέχεια, ο περιορισμός των εκπομπών ΕΑΘ σε παγκόσμιο επίπεδο, θα χρειαστεί χρόνος, για να ανανήψει ο πλανήτης από τις επιπτώσεις των αερίων του θερμοκηπίου, που βρίσκονται ήδη στην ατμόσφαιρα. Αυτό σημαίνει ότι οι επιπτώσεις της αλλαγής του κλίματος θα είναι αισθητές για 50 τουλάχιστον χρόνια. Επομένως, είναι αναγκαίο να ληφθούν μέτρα προσαρμογής. Το δεύτερο επίπεδο αφορά τη λήψη μέτρων προσαρμογής, για να αντιμετωπιστούν οι αναπόφευκτες επιπτώσεις, που εξετάζονται στην επόμενη ενότητα.

Σχέδια αντιμετώπισης

Τα σχέδια αντιμετώπισης των αρνητικών ή των δυσμενών συνθηκών της κλιματικής αλλαγής στη γεωργία στηρίζονται σε τρεις βασικές συνιστώσες, σε συστήματα έγκαιρων προειδοποιήσεων, σε εκτιμήσεις ρίσκου και σε δράσεις ή μέτρα αντιμετώπισης, είτε αυτά εφαρμόζονται σε περιφερειακό, εθνικό ή ευρύτερης περιοχής επίπεδο (IPCC, 2007· Salinger et a1., 2005).
Πρώτον, ένα σύστημα έγκαιρων προειδοποιήσεων για περιβαλλοντικούς κινδύνους αποτελεί τη βάση για τη λήψη αποφάσεων πριν από την εκδήλωση του φαινομένου. Υπάρχει επίσης ανάγκη για ένα σύστημα διάχυσης της πληροφορίας, ώστε αυτή να κατανέμεται αξιόπιστα και έγκαιρα. Σε εθνικό επίπεδο, λόγω κλιματικής αλλαγής, η συχνότητα και η ένταση των μεγάλων και μεγάλης κλίμακας καταστροφών, όπως πυρκαγιές δασών, κατολισθήσεις, ξηρασίες, καύσωνες, πλημμύρες ή ασθένειες, αναμένεται να αυξηθούν. Πρόληψη καταστροφών, προετοιμασία σε διάφορα επίπεδα ετοιμότητας, ανταπόκριση και αποκατάσταση αποτελούν πλέον κύριες προτεραιότητες σε εθνικό επίπεδο.



Σχήμα 10.15. *Συμβολή της γεωργίας στην αντιμετώπιση των ΕΑΘ.*



Σχήμα 10.16 *Απαραίτητες δράσεις για ΕΑΘ.*

Δεύτερον, είναι σημαντικό να γίνει εκτίμηση ρίσκου, για να προσδιοριστούν το υποκείμενο και οι αιτίες του ρίσκου, με μελέτες επιπτώσεων των κινδύνων. Κύριος στόχος των σχεδίων αντιμετώπισης παραμένει ο περιορισμός της ευπάθειας σε κινδύνους και καταστροφές. Επομένως, σήμερα προωθείται περισσότερο η προσέγγιση της διαχείρισης ρίσκου, ώστε η διαχείριση κινδύνων να στοχεύει στην πρόληψη και τη βελτίωση της συνολικής προετοιμασίας. Ωστόσο, υπάρχουν ακόμα μέτρα ανταπόκρισης στην εμφάνιση καταστροφών που ανήκουν στην προσέγγιση της διαχείρισης κρίσεων.
Τρίτον, είναι απαραίτητο να προσδιοριστούν κατάλληλα μέτρα αντιμετώπισης, για να περιοριστεί το ρίσκο της κάθε επίπτωσης για μελλοντικά ακραία φαινόμενα. Η αντιμετώπιση των αρνητικών επιπτώσεων στη γεωργία, όπως η διαθεσιμότητα ελλειμματικών υδατικών πόρων, συνδυάζεται τόσο με τις επιπτώσεις όσο και με την προσαρμογή της γεωργίας στην κλιματική αλλαγή. Η ορθολογική διαχείριση της γεωργίας και του γεωργικού χώρου μπορεί να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στο μέλλον. Η αποτελεσματική χρήση του νερού σε ξηρές περιοχές, η βελτίωση της διαχείρισης πλημμυρών, η προστασία των υδατορευμάτων από ανεπιθύμητες

εισροές, η συντήρηση και αποκατάσταση ειδικών τοποθεσιών, η προώθηση της διαχείρισης ανθεκτικών στο κλίμα οικοσυστημάτων, τα μέτρα διαχείρισης εδαφών, καθώς και η προστασία μόνιμων λιβαδότοπων, αποτελούν μέτρα αντιμετώπισης που επίσης συμβάλλουν στην προσαρμογή της γεωργίας στους κινδύνους της κλιματικής αλλαγής.

Οι δράσεις αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής στη γεωργία περιλαμβάνουν προγράμματα εκτίμησης, όπως ανάπτυξη κριτηρίων ειδικών δράσεων αντιμετώπισης, δημιουργία νέων δικτύων δεδομένων, καθώς και ανάπτυξη συστημάτων έγκαιρων προειδοποιήσεων και παρακολούθησης του κλίματος. Νομοθετικές δράσεις αφορούν μέτρα προστασίας του περιβάλλοντος, χαμηλότοκα δάνεια σε αγρότες, φραγμούς στην αστική επέκταση, καθώς και καθιέρωση δικαιωμάτων νερού σε ελλειμματικές περιόδους. Επισημαίνεται ακόμα η ανάγκη ενημέρωσης του κοινού, των συναντήσεων και θεματικών ημερίδων, καθώς και παροχής τεχνικής βοήθειας. Οι δράσεις αντιμετώπισης περιλαμβάνουν ακόμα και προγράμματα συντήρησης και διαχείρισης, καθώς και προγράμματα ανταπόκρισης σε επείγουσες ανάγκες. Επιπλέον, η δυνατότητα άμεσης ανταπόκρισης στην κλιματική αλλαγή χρειάζεται να συνοδεύεται από μια στρατηγική για αποφυγή καταστροφών και εγρήγορση, τόσο σε εθνικό, όσο και σε διεθνές επίπεδο. Πρέπει να ενισχυθούν τα εργαλεία διαχείρισης διακινδύνευσης (ή ρίσκου) και να προωθηθούν νέες τεχνικές και μεθοδολογίες. Για παράδειγμα, η χαρτογράφηση ευπαθών περιοχών, σε συνδυασμό με τους τύπους των επιπτώσεων, η ανάπτυξη μεθόδων και μοντέλων, η εκτίμηση και πρόγνωση κινδύνων, η εκτίμηση των επιπτώσεων σε υγεία, περιβάλλον, οικονομία και κοινωνία, το σύστημα δορυφορικών και επίγειων παρατηρήσεων και το Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών/ΓΣΠ (GIS: Geographical Information System), προς υποστήριξη των τεχνολογιών διαχείρισης ρίσκου αποτελούν πλέον εφικτές και εφαρμοζόμενες τεχνικές. Άλλα παραδείγματα μέτρων αντιμετώπισης σε περιφερειακό ή τοπικό επίπεδο, με στόχο την καλύτερη προσαρμογή της γεωργίας στην κλιματική αλλαγή, περιλαμβάνουν χωρική σχεδίαση χρήσεων γης και αλλαγές χρήσεων γης, πρωτοβουλίες για συστήματα διανομής νερού για άρδευση καλλιεργειών, που μπορεί να υλοποιηθούν σε διάφορες κλίμακες.

10.6. Προσαρμογή της γεωργίας στην κλιματική αλλαγή

Η γνώση της κλιματικής μεταβλητότητας μπορεί να βοηθήσει στην προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή. Το κλίμα μπορεί επίσης να αλλάξει πέρα από κάθε προηγούμενη εμπειρία, κυρίως ανάλογα με τη δριμύτητα και τη συχνότητα των ακραίων συνθηκών. Μακροπρόθεσμα, η προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή θα απαιτήσει κάποια προηγούμενη γνώση της φύσης της και όχι απλώς στήριξη στην πρόσφατη εμπειρία. Η προσαρμογή της γεωργίας στην κλιματική αλλαγή, σε συνδυασμό και με τις άλλες δυο συνιστώσες, δηλαδή τις επιπτώσεις και την αντιμετώπιση (Σχήμα 10.17), αντίστοιχα, στοχεύει να μειώσει το ρίσκο της ζημιάς από τρέχουσες ή μελλοντικές επιβλαβείς επιπτώσεις, στη βάση κόστους-αποτελεσματικότητας, και, συγχρόνως, να εκμεταλλευτεί και να αξιοποιήσει πιθανά οφέλη. Η εκτίμηση και η προσαρμογή των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής απαιτούν εξισορρόπηση μεταξύ των κοινωνικών, οικονομικών και περιβαλλοντικών παραγόντων, στο πλαίσιο ενός συνεχώς διευρυνόμενου πεδίου στόχων, αβεβαιοτήτων και διαχειριστικών επιλογών (Pyke et al., 2007). Η προσαρμογή στοχεύει τελικά στην ανάπτυξη εννοιολογικών και ολοκληρωμένων μεθοδολογιών, για την εκτίμηση των επιπτώσεων, της ευπάθειας και της αποτελεσματικής προσαρμογής σε σχέση με το κόστος. Συνέργειες μεταξύ μέτρων προσαρμογής και αντιμετώπισης είναι βασικές, υπό την προϋπόθεση ότι δεν υπάρχουν αντικρουόμενες επιπλοκές μεταξύ των αντίστοιχων μέτρων και της επίδρασής τους σε διάφορους τομείς. Επίσης, στο σχήμα 10.18 παρουσιάζεται ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο εκτίμησης της κλιματικής αλλαγής, όπου απεικονίζονται και οι αλληλοεπιδράσεις μεταξύ επιπτώσεων, αντιμετώπισης και προσαρμογής.

10.6.1. Επιλογές προσαρμογής

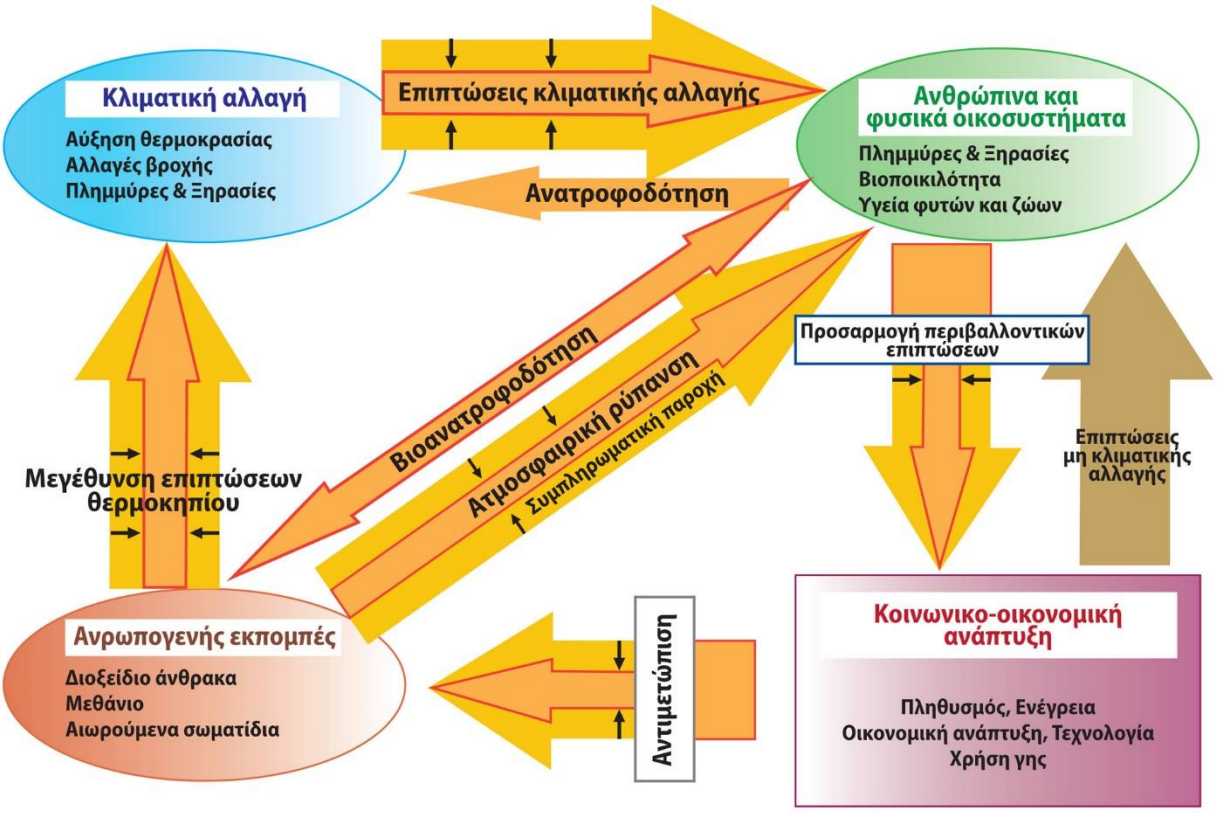
Η προσαρμογή έχει ήδη αρχίσει, πλην όμως γίνεται με αποσπασματικό τρόπο. Χρειάζεται να διαμορφωθεί μια στρατηγική προσέγγιση που θα προωθεί την έγκαιρη και αποτελεσματική λήψη μέτρων προσαρμογής, διασφαλίζοντας τη συνοχή μεταξύ των διαφόρων τομέων και επιπέδων διακυβέρνησης. Η προσαρμογή της γεωργίας στην κλιματική αλλαγή περιλαμβάνει επιλογές, εκ των οποίων οι πιο σημαντικές είναι:

- **Ανάπτυξη και αποδοχή νέων τεχνολογιών:** Τεχνολογικές βελτιώσεις, όπως άρδευση, όργωμα και ολοκληρωμένα στραγγιστικά συστήματα. Γενετική βελτίωση καλλιεργειών με ποικιλίες «κλιματικά»

ανθεκτικές σε μεταβαλλόμενες συνθήκες ασθενειών, εχθρών, καύσωνα και ξηρασίας, καθώς και επενδύσεις σε τράπεζες γενετικού υλικού. Αξιοποίηση βιοτεχνολογίας.



Σχήμα 10.17. *Διάγραμμα αλληλεπίδρασης επιπτώσεων, αντιμετώπισης και προσαρμογής.*



Σχήμα 10.18. *Ολοκληρωμένο πλαίσιο εκτίμησης για την κλιματική αλλαγή.*

- **Προώθηση συμβουλευτικών υπηρεσιών στη γεωργία**: Έχει ρόλο-κλειδί στην προώθηση της αγροτικής παραγωγικότητας σε αναπτυσσόμενες χώρες.

- **Βελτίωση διαχείρισης υδάτων**: Καλύτερες στρατηγικές κατανομής νερού. Αλλαγές στη σχεδίαση της άρδευσης των καλλιεργειών, για αποτελεσματική αξιοποίηση της βροχόπτωσης. Βελτίωση των τεχνολογιών άρδευσης. Ανακύκλωση νερού και συνδυασμένη χρήση υπόγειου νερού. Τιμολογιακή πολιτική νερού.

- **Βελτίωση διαχείρισης αγρού**: Αλλαγή στις πρακτικές στον αγρό. Εναλλαγή ποικιλιών σε καλλιέργειες. Αντικατάσταση τύπων φυτών με «κλιματικά» ανθεκτικές νέες ποικιλίες. Ορθολογική χρήση λιπασμάτων και εντομοκτόνων. Εκσυγχρονισμός και βελτίωση της διαχειριστικής ικανότητας σε επίπεδο αγρού. Εφαρμογή γεωργίας ακριβείας.

- **Εναλλαγή στις ευκαιρίες απασχόλησης**: Ανάγκη ενθάρρυνσης εναλλακτικών επιλογών αγροτικής παραγωγής. Δραστηριότητες εκτός αγρού, όπως αγαθά και υπηρεσίες, που γίνονται στο σπίτι.

- **Θεσμική σχεδίαση και υλοποίηση**: Θεσμικές αναμορφώσεις, που υποστηρίζουν τη μακροπρόθεσμη σχεδίαση και ενισχύουν τις προσαρμογές σε βραχείας και μακράς κλίμακας κλιματικές επιπτώσεις. Οι κυβερνήσεις χρειάζεται να αντιστρέψουν τις μειούμενες επενδύσεις στην αγροτική έρευνα και τις υπηρεσίες. Βελτιωμένη επιμόρφωση και γενική εκπαίδευση του πληθυσμού εξαρτώμενου από τη γεωργία.

- **Βελτίωση υποδομών και προσαρμοστικής ικανότητας**: Η προσαρμογή εισροών κεφαλαίου και εργασίας μπορεί να βοηθήσει τους αγρότες να προβούν στις αναγκαίες προσαρμογές. Εξάλειψη των επιδοτήσεων, με διατήρηση, κατά το δυνατόν, των τιμών, μπορεί να επικαλύψει το σήμα κινδύνου της κλιματικής αλλαγής στις αγορές. Προγράμματα τροφίμων και άλλα προγράμματα κοινωνικής ασφάλισης, ώστε να παρέχουν εξασφάλιση ενάντια στις αλλαγές σε προσφορές.

Η προσαρμογή στην αυξανόμενη κλιματική μεταβλητότητα παρέχει, τελικά, εργαλεία για να μειωθεί και να περιοριστεί η ευπάθεια της γεωργίας. Μερικά γεωργικά συστήματα με ενδογενή ανθεκτικότητα μπορεί να προσαρμοστούν με περισσότερη ετοιμότητα στις κλιματικές πιέσεις, επιτυγχάνοντας μακροπρόθεσμες προσαρμογές σε μεταβαλλόμενες συνθήκες. Άλλα συστήματα μπορεί να χρειάζονται παρεμβάσεις για προσαρμογή. Παραδοσιακή γνώση και συμβατικές τεχνολογίες δεν πρέπει να αγνοούνται. Διαχρονικές τεχνολογίες, ημερολόγια σποράς, όργωμα, αγρανάπαυση περιορίζουν την ευπάθεια στα κλιματικά ακραία φαινόμενα.

10.6.2. Μέτρα προσαρμογής

Το μεγάλο εύρος των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής απαιτεί διαφορετικά μέτρα προσαρμογής, ειδικά για κάθε περίπτωση. Γενικά, τα μέτρα προσαρμογής ταξινομούνται σε **μαλακά**, δηλαδή χαμηλής έντασης και κόστους, και **σκληρά**, δηλαδή τεχνικά μέτρα υψηλού κόστους (Hallegate, 2009). Όσον αφορά τις ελλείψεις σε νερό σε ξηρές περιοχές, τα σκληρά μέτρα περιλαμβάνουν κατασκευή φραγμάτων και ταμιευτήρων, ανύψωση αναχωμάτων, δίκτυα παροχής νερού, σύγχρονα αρδευτικά δίκτυα, υποδομές διόδευσης νερού και εγκαταστάσεις αφαλάτωσης. Αυτά αποτελούν μακροπρόθεσμες επενδύσεις, με μεγάλη δυνατότητα αντιμετώπισης της έλλειψης νερού σε ξηρές περιοχές, αλλά είναι δαπανηρές και η επιτυχία τους εξαρτάται από το επίπεδο ολοκλήρωσης των κλιματικών προγνώσεων και της κλιματικής αβεβαιότητας στα στάδια σχεδίασης και ανάπτυξης.

Έτσι, οι τεχνικές λύσεις δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελούν τον μοναδικό τρόπο προσαρμογής σε μεταβαλλόμενες κλιματικές συνθήκες, εφόσον μέτρα μαλακής προσαρμογής μπορεί να είναι επίσης αποτελεσματικά θεσμικά και οικονομικά εργαλεία. Με έμφαση στη γεωργία, η παραγωγή καλλιεργειών είναι, ως γνωστόν, πολύ ευαίσθητη στη διαθεσιμότητα νερού. Ωστόσο, όταν η ετήσια βροχόπτωση μειώνεται, τα προβλήματα στον τομέα της γεωργίας μπορεί να προέλθουν αρχικά από ακραία φαινόμενα στην έλλειψη νερού (π.χ. μακράς διάρκειας ξηρασίες), παρά από τη μείωση του μέσου διαθέσιμου νερού. Στην περιοχή της Μεσογείου, οι μέσες σοδειές αναμένεται να μειωθούν, αλλά το πρωτεύον θέμα είναι η επανεμφάνιση ακραίων ξηρασιών με καταστροφικές συνέπειες. Ωστόσο, η κατασκευή ταμιευτήρων μπορεί να θεωρηθεί

αποτελεσματική, αν, για παράδειγμα, η κλιματική αλλαγή διατηρείται στο χρόνο και παραμένει έντονη, αλλιώς δεν μπορεί να χαρακτηριστεί θετική λύση, με εκτιμήσεις για μείωση της κλιματικής αλλαγής.
Μέτρα μαλακής προσαρμογής για τη διαθεσιμότητα νερού στη γεωργία περιλαμβάνουν την αποτελεσματική χρήση τον ελλειμματικού νερού σε ξηρές περιοχές, την ανάπτυξη και ενίσχυση συστημάτων έγκαιρης προειδοποίησης ξηρασίας, την ολοκλήρωση της προετοιμασίας για ξηρασία στις σχετικές πολιτικές στους διάφορους τομείς και επίπεδα της κοινωνίας, και την ανάπτυξη και εισαγωγή καλλιεργειών ανθεκτικών στην ξηρασία. Με βάση τα αποτελέσματα από πρόσφατες έρευνες στην Ελλάδα (Tsiros et al., 2009), προτείνεται ένα πλαίσιο προσαρμογής της γεωργίας για αγροτικές περιοχές που περιλαμβάνει μαλακά μέτρα. Αρχικά, προτείνονται αλλαγές στις ημερομηνίες σποράς και φυτρώματος, με βάση τη φαινολογία της καλλιέργειας και τις αναλύσεις τάσεων της θερμοκρασίας, σύμφωνα με την οποία η πρώιμη σπορά παρέχει γενικά μεγαλύτερης διάρκειας βλαστική περίοδο. Προτείνονται επίσης αναδιάρθρωση και εναλλαγή καλλιεργειών, καθώς και επιλογή και εισαγωγή καλλιεργειών ανθεκτικών στην ξηρασία, με βάση τη σύγχρονη αγροκλιματική ζωνοποίηση. Ακόμα, προτείνονται αλλαγές στις απαιτήσεις αρδεύσεων, για εκλογίκευση των αναγκών σε νερό, μέσω της εκτίμησης και παρακολούθησης της εξατμισοδιαπνοής με σύγχρονες τεχνικές. Τέλος, προτείνονται αλλαγές στην προσφορά θρεπτικών στοιχείων και μείωση των εισροών, με την ενσωμάτωση περιβαλλοντικών δεικτών.

Επιλογικά

Τα ιστορικά στοιχεία δείχνουν ότι το κλίμα μας έχει αλλάξει από το παρελθόν και θα συνεχίσει να μεταβάλλεται και να αλλάζει στη διάρκεια των επόμενων εποχών και δεκαετιών. Το βασικό πρόβλημα της ανθρωπογενούς πλανητικής θέρμανσης είναι πιθανόν να προκαλέσει αυξήσεις στη θερμοκρασία και στα ακραία κλιματικά φαινόμενα, όπως καύσωνες, με κλιματικά σενάρια αλλαγών στα πεδία των βροχοπτώσεων τον 21ου αιώνα, πλημμύρες και ξηρασίες. Αυτά αποτελούν πρόκληση χωρίς προηγούμενο στην ιστορία των κοινωνιών για τη γεωργία.
Η αλλαγή τον κλίματος επηρεάζει όλους τους τομείς της οικονομίας, αλλά ο γεωργικός τομέας είναι ίσως ο πλέον ευάλωτος και ευπαθής στις κλιματικές διακυμάνσεις. Η κλιματική αλλαγή, η ξηρασία και τα άλλα ακραία κλιματικά φαινόμενα έχουν άμεση επίδραση στην ποσότητα και την ποιότητα της γεωργικής παραγωγής, και σε πολλές περιπτώσεις έχουν αρνητική επίδραση, ειδικά στις αναπτυσσόμενες χώρες. Η γεωργία δεν έχει μέχρι σήμερα καταφέρει να διαχειριστεί την τρέχουσα φυσική κλιματική μεταβλητότητα με τον καλύτερο δυνατό τρόπο, εξαιτίας των πολιτικών που ακολουθούνται, καθώς και των πρακτικών και τεχνολογιών που εφαρμόζονται.
Η τρέχουσα έρευνα διεθνώς εστιάζεται περισσότερο στο σκέλος της προσαρμογής, η οποία, στην αυξανόμενη κλιματική μεταβλητότητα τον 21ου αιώνα, παρέχει τα εργαλεία για να ενδυναμωθεί ο γεωργικός τομέας και να γίνει η γεωργία λιγότερο ευπαθής. Μερικά γεωργικά συστήματα μπορεί να είναι πιο έτοιμα να προσαρμοστούν στις κλιματικές πιέσεις και να ενισχυθούν έτσι μακροπρόθεσμα απέναντι στις μεταβαλλόμενες συνθήκες. Άλλα συστήματα μπορεί να χρειάζονται παρεμβάσεις για να προσαρμοστούν, ωστόσο παραδοσιακή γνώση και τεχνολογίες δεν πρέπει επίσης να αγνοούνται. Η αυξανόμενη κλιματική μεταβλητότητα και αλλαγή απαιτεί την εισαγωγή περισσότερο προηγμένων τεχνολογιών και μεθόδων. Η εποχική έως υπερετήσια κλιματική πρόγνωση είναι σχετικά νέος κλάδος στην επιστήμη του κλίματος, που υπόσχεται μείωση της ευπάθειας στη γεωργία. Βελτιωμένες εποχικές προγνώσεις συνδυάζονται τώρα με συστήματα καλλιεργειών, αναπτύσσοντας πρακτικές κλιματικού ρίσκου, για τη βελτίωση των εφαρμογών της κλιματικής πληροφορίας στη γεωργική διαχείριση, με στόχο την αύξηση της παραγωγικότητας. Η εφαρμογή της κλιματικής γνώσης στη βελτίωση τον διαχειριστικού ρίσκου αναμένεται να αυξήσει την ανθεκτικότητα των γεωργικών συστημάτων.
Συνεπώς, η εμφάνιση εποχικής μέχρι υπερετήσιας κλιματικής μεταβλητότητας και τα ακραία της μπορεί να προβλεφθούν με μεγάλο βαθμό ακρίβειας. Η διαθεσιμότητα τέτοιας κρίσιμης πληροφορίας προκαταβολικά μπορεί να βοηθήσει σημαντικά να ληφθούν αποτελεσματικά μέτρα στο τρίπτυχο επιπτώσεις-αντιμετώπιση-προσαρμογή, ώστε να προληφθούν απώλειες και να μειωθεί η τρωτότητα της γεωργίας. Άρα, οι συνεπαγόμενες καταστροφικές συνέπειες μπορεί να μειωθούν σημαντικά, με κατάλληλη σχεδίαση και περισσότερο αποτελεσματική προετοιμασία. Ειδικά, η ευπάθεια που συνδυάζεται με το κλίμα μπορεί να ελεγχθεί με ακριβείς και έγκαιρες προγνώσεις, καθώς και με τη λήψη μέτρων που να μειώνουν τις επιπτώσεις στους διάφορους τομείς της γεωργίας. Συμπερασματικά, είναι σκόπιμο να επισημανθεί ότι η επιστημονική αγρομετεωρολογική κοινότητα θα πρέπει να βοηθήσει τους αγρότες, ώστε να αποκτήσουν τα εφόδια για τη μετάβαση από την παθητική αποδοχή της κλιματικής αλλαγής προς την ενεργητική ανταπόκριση. Τόσο οι αγρότες, όσο και οι

επιστήμονες, πρέπει να συνειδητοποιήσουν όσο το δυνατόν πιο σύντομα ότι το παρελθόν δεν αποτελεί πλέον καλό οδηγό για το μέλλον και ότι η προσαρμογή δεν αποτελεί υποκατάστατο της αντιμετώπισης.

Βιβλιογραφικές αναφορές

Aguilar, E., Auer, I., Brunet, M., Peterson, T.C. and Wieriga, J. (2001). *Guidance on Metadata and Homogenization*. Geneva, Commission on Climatology: WMO.

Alexandersson, A. (1986). A homogeneity test applied to precipitation data. *J. Climatol*., 6(6):661-675.

Alexandersson, H. & Moberg, A. (1997). Homogenization of Swedish temperature data. Part: A homogeneity test for linear trends. *International Journal of Climatology*. 17:25-34.

Alexandrov, V.A. & Hoogenbowm, G. (2000). The impact of climate variability and change on crop yield in Bulgaria. *Agricultural and Forest Meteorology*, 104:315-327.

Caussinus, H. & Mestre, O. (1997). New mathematical tools and methodologies for relative homogeneity testing. *Proceedings of the first seminar for homogenization of surface climatological data*. Budapest: Hungarian Meteorological Service, 63-82.

Craddock, J.M. (1979). Methods of comparing annual rainfall records for climatic purposes. *Weather*. 34(9):332-346.

Dalezios, N.R. (2011). Climatic change and Agriculture: Impacts-Mitigation- Adaptation. *Scientific Journal of GEOTEE*. 27(January):13-28.

Dalezios, N.R., Tsidarakis M.L. and Spanos, S.I. (1994). Testing Homogeneity of Temperature and Precipitation Series in Greece. *Proceedings of International Symposium/Workshop on Climatic Variability and Impact to Agriculture*, University of Thessaly, 21 April, Volos, Greece, 35-49.

Eitzinger J., Thaler, S., Orlandini, S., Nejedlik, P., Kazandjiev, V., Vucetic, V., Sivertsen, T.H., Mihailovic, D.T., Lalic, B., Tsiros, E., Dalezios, N.R., Susnik, A., Kersebaum, C.K.C., Holden, N.M. and Matthews, R. (2008). Agroclimatic Indices and Simulation Models. In P. Nejedlik and S. Orlandini (Eds.). *Survey of Agrometeorological Practices and Applications in Europe Regarding Climate Change Impacts*, COST Action 734, EU, 15-114.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2005). *World Agriculture: Towards 2050 – Highlights*. Rome: FAO.

Giorgi, F. (2005). Climate change prediction. *Climatic Change*, 73:239-265.

Hallegate, S. (2009). Strategies to adapt to an uncertain climate change. *Global Environmental Change*, doi: 10.1016/j.gloenvcha.2008.12.003.

Hurrell, J.W. (1995). Decadal trends in the North Atlantic oscillation regional temperatures and precipitation. *Science* 269:676-679. from http://www.ecmwf.int/products/forecasts/seasonal/τεκμηρίωση /ch1_2.html.

IPCC (2001). *Climate Change 2001*: *The scientific basis*. Houghton: J.H.Y (Editor).

Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC). (2007). *Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report to the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

Nicholls, N. (1999). Cognitive illusions, heuristics, and climate prediction. *Bulletin of American Meteorology Society*. 80:1385-1397.

Parry, M., Rosenzweig, M., Iglesias, A., Livermore, C. and Fischer, C. (2004). Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios. *GlobalEnviron. Change*, 14:53-67.

Pyke, C.R., Bierwagen, B.G., Furlow, J., Gamble, J., Johnson, T., Julius, S. and West, J. (2007). A decision inventory approach for improving decision support for climate impact assessment and adaptation. *Environmental Science and Policy*, 10:610-621.

Smith, J.B., Schellnhuber, H.-J., and Mirza, M.M.Q. (2001). Vulnerability to climate change and reasons for concern: a synthesis. In McCarthy, J.J., Canzlani, O.F., Leary, N.A., Dokken, D.J., and White, K.S., (Eds), *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Cambridge: Cambridge University Press.

Salinger, M. J., Stigter, C. J. and Das, H. P. (2000) Agrometeorological adaptation strategies to increasing climate variability and change, *Agriculture and Forest Meteorology*. 103:167-194.

Salinger, M.J., Sivakunan, M.V.K. and Motha, R.P. (Eds.). (2005). *Increasing climate Variability and change*. Springer.

Tsiros E., Domenikiotis, C. and Dalezios, N.R. (2009). Sustainable production zoning for agroclimatic classification using GIS and remote sensing, *IDOJARAS*, 113(1-2): 55-68.

United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). (2004). *The Evidence from Climate Models*. Climate Change Information Sheet 7, from http://unfccc.int/essential_background/background_publications_htmlpdf/climate_change_information_kit/items/277.php

ΜΕΡΟΣ 5: ΑΓΡΟΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Κεφάλαιο 11: Αγρομετεωρολογική Τηλεπισκόπηση
Κεφάλαιο 12: Αγρομετεωρολογική Προσομοίωση
Κεφάλαιο 13: Αγροϋδρολογική Προσομοίωση
Κεφάλαιο 14: Περιβαλλοντικοί Κίνδυνοι

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11
ΑΓΡΟΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΗ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

Σύνοψη
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται το αντικείμενο της αγρομετεωρολογικής τηλεπισκόπησης, που έχει αυξανόμενες εφαρμογές στη γεωργία, το αγροτικό περιβάλλον και τα αγροοικοσυστήματα. Αρχικά, μελετώνται οι βασικές έννοιες τηλεπισκόπησης, καθώς και τα υπάρχοντα συστήματα τηλεπισκόπησης, όπως επίσης η μεθοδολογία επεξεργασίας και ανάλυσης εικόνων. Τέλος, περιγράφονται οι σύγχρονες εφαρμογές της, στις οποίες περιλαμβάνονται οι μέθοδοι εκτίμησης της θερμοκρασίας επιφάνειας ξηράς και θάλασσας, οι δείκτες βλάστησης, το ισοζύγιο ενέργειας και νερού, η εδαφική υγρασία, το έλλειμμα νερού, η ταξινόμηση χρήσεων γης και καλλιεργειών, η παρακολούθηση και εκτίμηση της βιομάζας και της γεωργικής παραγωγής, η ποσοτική εκτίμηση και παρακολούθηση των περιβαλλοντικών κινδύνων, καθώς και η γεωργία ακριβείας.

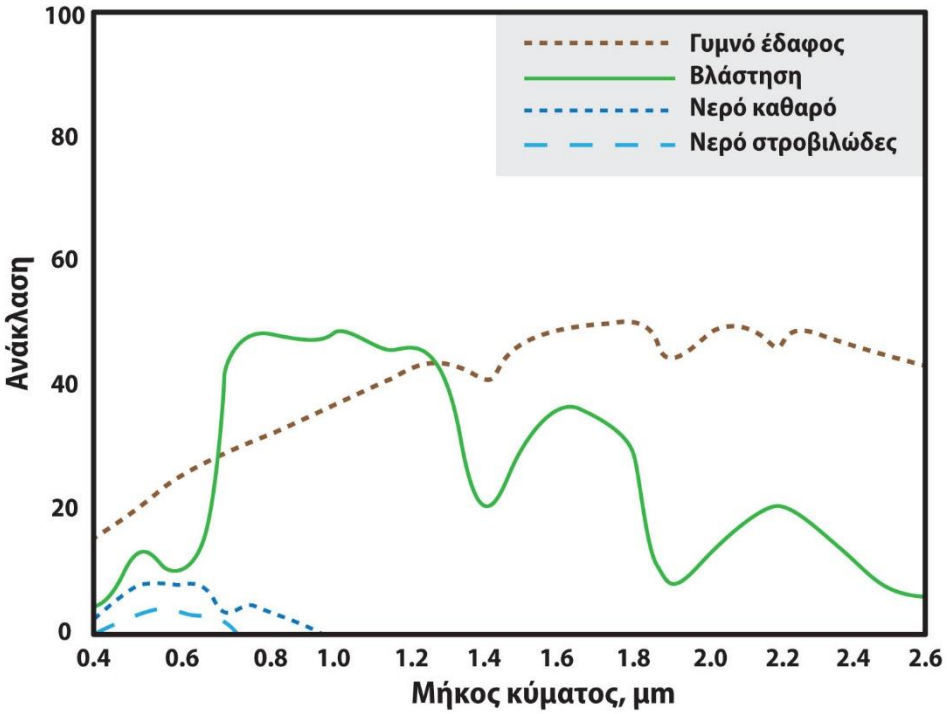
Προαπαιτούμενη γνώση
Ο αναγνώστης απαιτείται να έχει βασικές γνώσεις φυσικής και μαθηματικών.

11.1. Συνιστώσες και συστήματα τηλεπισκόπησης

Τηλεπισκόπηση ορίζεται η επιστήμη, και, έως έναν ορισμένο βαθμό, η τέχνη, της απόκτησης πληροφοριών για τη γήινη επιφάνεια χωρίς να υπάρχει επαφή με αυτήν. Αυτό επιτυγχάνεται με την καταγραφή της ανακλώμενης ή της εκπεμπόμενης Ηλεκτρομαγνητικής Ακτινοβολίας (ΗΜΑ) και της περαιτέρω επεξεργασίας, ανάλυσης, ερμηνείας και εφαρμογής των τελικών αποτελεσμάτων. Δηλαδή, τηλεπισκόπηση είναι η απόκτηση και η ερμηνεία των φασματικών μετρήσεων που πραγματοποιούνται σε μια μακρινή τοποθεσία και λαμβάνουν πληροφορίες σχετικά με την επιφάνεια της Γης. Κύριος στόχος της είναι η μέτρηση, καταγραφή και ανάλυση της ενέργειας σε επιλεγμένα τμήματα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (Bauer, 1976). Στο Κεφαλαίο 3 έχουν περιγραφεί η φύση και τα χαρακτηριστικά της ΗΜΑ, καθώς και η αλληλεπίδραση με την ατμόσφαιρα και τα αντικείμενα (στόχους) της γήινης επιφάνειας, που αποτελούν τις διαδικασίες τηλεπισκόπησης. Ειδικότερα, αξιοποιούνται επιμέρους στοιχεία, που περιλαμβάνουν πηγές ενέργειας και φωτισμό στόχου, ακτινοβολία και ατμόσφαιρα, αλληλεπίδραση, με στόχο την καταγραφή της ενέργειας από τους αισθητήρες, τη μετάδοση, τη λήψη και την αρχική επεξεργασία. Στις τεχνικές λήψης περιλαμβάνεται και η καταγραφή εκπεμπόμενης θερμικής ακτινοβολίας.
Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι φασματικές υπογραφές, με έμφαση στη βλάστηση, το νερό και το έδαφος, οι διακριτικές ικανότητες, δηλαδή η χωρική, η χρονική, η ραδιομετρική και η φασματική, καθώς και οι κατηγορίες αισθητήρων. Στη συνέχεια, εξετάζονται τα συστήματα τηλεπισκόπησης και η διασύνδεση μεταξύ τηλεπισκόπησης και Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών/ΓΣΠ (Geographic Information System/GIS).

11.1.1. Φασματικές υπογραφές και διακριτικές ικανότητες

11.1.1.1. Φασματικές υπογραφές
Η μοναδικότητα των φασματικών υπογραφών (spectral signatures) των αντικειμένων είναι ένα πολύ σημαντικό κριτήριο για την τοποθέτηση των τηλεπισκοπικών συστημάτων στις επιθυμητές περιοχές του φάσματος, σε συνδυασμό, βέβαια, με τα ατμοσφαιρικά παράθυρα. Παρ' όλο που το ορατό και το υπέρυθρο είναι τα πιο γνωστά τμήματα, και άλλα τμήματα του φάσματος είναι εξίσου σημαντικά, όπως τα μικροκύματα. Στο Σχήμα 9.1 απεικονίζονται οι φασματικές υπογραφές εδάφους, βλάστησης και νερού, που παρουσιάζουν υψηλή ανακλαστικότητα στο ορατό και το υπέρυθρο μήκος κύματος. Εξετάζεται η αλληλεπίδραση της ΗΜΑ με τρία βασικά αντικείμενα της γήινης επιφάνειας, τη βλάστηση, το νερό και το έδαφος.



Σχήμα 11.1. *Ποσοστό ανάκλασης βασικών στοιχείων της γήινης επιφάνειας (νερό καθαρό, νερό στροβιλώδες, βλάστηση, γυμνό έδαφος) σε σχέση με το μήκος κύματος.*

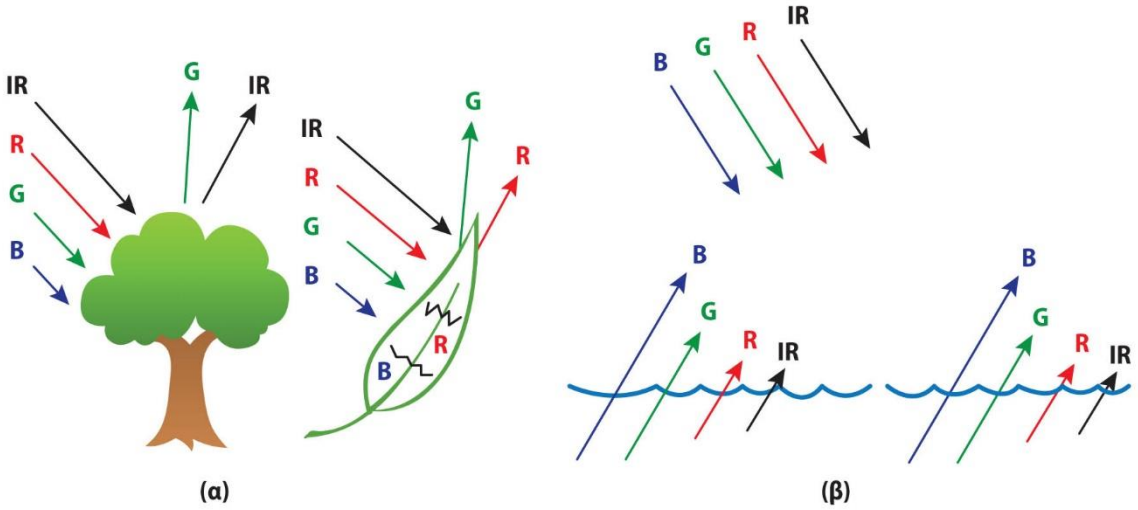
11.1.1.2. Βλάστηση

Η φασματική υπογραφή της βλάστησης εμφανίζει πάντα «κορυφές» και «κοιλάδες». Οι κοιλάδες, δηλαδή οι χαμηλές τιμές στην ορατή περιοχή του φάσματος, οφείλονται στη χρωστική στα φύλλα. Η χλωροφύλλη απορροφά σε μεγάλο βαθμό την ενέργεια στις περιοχές 0,45 μm (μπλε περιοχή: Blue και 0,67 μm (κόκκινη περιοχή: Red) του φάσματος και αντανακλά στην πράσινη (Green). Τυπικά, το 70-90% της μπλε και κόκκινης ακτινοβολίας απορροφάται για παραγωγή ενέργειας, που είναι απαραίτητη στη διαδικασία της φωτοσύνθεσης (Σχήμα 11.2α). Αν μεταβάλλεται η χλωροφύλλη, τότε μειώνεται η απορρόφηση ακτινοβολίας στην μπλε και κόκκινη περιοχή. Με την αύξηση της ηλικίας του φυτού, η υπέρυθρη ανακλαστικότητα μειώνεται και μαζί η μέγιστη ανακλαστικότητα στην πράσινη περιοχή του ορατού φάσματος, καθόσον μειώνεται η χλωροφύλλη, με συνέπεια τα φύλλα να αρχίζουν να χάνουν την πρασινάδα και να κιτρινίζουν ή να κοκκινίζουν. Στο κοντινό υπέρυθρο, περίπου στα 0,75 μm του φάσματος, η αντανάκλαση της υγιούς βλάστησης αυξάνεται πάρα πολύ. Έτσι, αν ήταν δυνατόν να δούμε στο υπέρυθρο, η βλάστηση θα εμφανίζονταν πολύ «φωτεινή». Στην περιοχή 0,7-1,3 μm, ένα φύλλο φυτού τυπικά αντανακλά 40-50% της προσπίπτουσας ενέργειας. Το μεγαλύτερο τμήμα της υπόλοιπης ακτινοβολίας μεταδίδεται, αφού η απορρόφηση σε αυτήν τη φασματική περιοχή είναι ελάχιστη, περίπου 5%. Οι μετρήσεις της αντανάκλασης στη συγκεκριμένη περιοχή επιτρέπουν συχνά τη διάκριση μεταξύ των ειδών, ακόμα και αν αυτά φαίνονται στο ίδιο ορατό μήκος κύματος.

Μετά την περιοχή των 1,3 μm, η αντανάκλαση των φύλλων είναι αντιστρόφως ανάλογη της περιεχόμενης υγρασίας των φύλλων (μεγαλύτερης απορρόφησης) και ανάλογη με τη λεπτότητα των φύλλων (μικρότερη απορρόφηση). Η φυτική υποβάθμιση λόγω περιβαλλοντικών παραγόντων, όπως είναι η ξηρασία ή η παρουσία ειδικών ορυκτών στο έδαφος, μπορεί να επιφέρει φασματική αντίδραση όμοια με τη γήρανση του φυτού. Στις σχετικές με την ακτινοβολία ιδιότητες της βλάστησης, έχουν μεγαλύτερη σημασία το είδος της βλάστησης και ο προσανατολισμός των φύλλων συστάδας. Συγκεκριμένα, όσο αυξάνεται το ύψος της συστάδας, τόσο αυξάνεται και ο συντελεστής ανάκλασης της βλάστησης, ενώ μικρότερη σημασία έχει η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας. Ο συντελεστής ανάκλασης φυτικών επιφανειών κυμαίνεται από 0,1 (ή 10%),έως 0,3 (ή 30%) με μέση τιμή ίση με 0,25 (ή 25%).

11.1.1.3. Νερό

Το πλέον διακριτό χαρακτηριστικό είναι η απορρόφηση του νερού στο κοντινό υπέρυθρο (Σχήμα 11.1). Το καθαρό νερό απορροφά σχετικά μικρή ενέργεια σε μήκη κύματος μικρότερα των 0,6 μm. Η μεγάλη μεταδοτικότητα, που χαρακτηρίζει αυτά τα μήκη κύματος, είναι μέγιστη στην μπλε-πράσινη περιοχή του φάσματος (Σχήμα 11.2β). Ωστόσο, τα νερά, που περιέχουν μεγάλες ποσότητες αιωρούμενων ιζημάτων (suspended sediment), ως αποτέλεσμα διάβρωσης του εδάφους, παρουσιάζουν πολύ μεγαλύτερη ανάκλαση στο ορατό από ό,τι σε άλλα «καθαρά» νερά. Ομοίως, με την αύξηση της συγκέντρωσης χλωροφύλλης στο νερό μειώνεται η αντανάκλαση της ενέργειας από το νερό στην μπλε περιοχή του φάσματος και αυξάνεται στην πράσινη περιοχή, με αποτέλεσμα το νερό να φαίνεται πιο πράσινο. Οι μεταβολές αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην παρακολούθηση και εκτίμηση της συγκέντρωσης αλγών με δεδομένα τηλεπισκόπησης. Τα δεδομένα αντανάκλασης μπορούν να χρησιμοποιηθούν και στον προσδιορισμό της παρουσίας ή της απουσίας χρώματος ταννίνης από βαλτώδη βλάστηση σε χαμηλές περιοχές και στον εντοπισμό ενός πλήθους παραγόντων ρύπανσης, όπως πετρελαίου ή βιομηχανικών αποβλήτων. Άλλοι παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν την φασματική εμφάνιση του νερού είναι η τοπογραφία της επιφάνειας, όπως ήρεμο, κυματώδες και με επιπλέοντα αντικείμενα.



Σχήμα 11.2. *Απορρόφηση χλωροφύλλης σε: (α) βλάστηση και (β) νερό.*

Πολλά σημαντικά χαρακτηριστικά, όπως η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου, του PH και η συγκέντρωση άλατος, δεν μπορούν να παρατηρηθούν κατευθείαν από τις μεταβολές της ανάκλασης ενέργειας από το νερό. Όταν η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει πάνω σε επιφάνειες καθαρού νερού, με γωνία πρόσπτωσης μικρότερη από 45^{o}, τότε ο συντελεστής ανάκλασης (albedo) της επιφάνειας αυτής είναι σχεδόν σταθερός και ίσος με περίπου 0,05 (ή 5% της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας). Αντίθετα, όταν η γωνία πρόσπτωσης ξεπερνά τις 45^{o}, ο συντελεστής αυξάνεται ταχέως με τη μείωση της γωνιακής πρόσπτωσης, προσεγγίζοντας το 1 (ή 100%) όταν οι ακτίνες προσπίπτουν με γωνία σχεδόν ίση με το 0, δηλαδή παράλληλα με το έδαφος.

11.1.1.4. Έδαφος

Στο σχήμα 11.1, η καμπύλη του εδάφους φαίνεται πιο ομαλή. Αυτό συμβαίνει διότι οι παράγοντες που επηρεάζουν την ανακλαστικότητα του εδάφους δεν επιδρούν πολύ διαφορετικά στις διάφορες φασματικές περιοχές. Μερικοί από αυτούς είναι η περιεχόμενη υγρασία, η υφή του εδάφους, δηλαδή η αναλογία σε άμμο, ιλύ και άργυρο, η τραχύτητα της επιφάνειας του εδάφους και η περιεκτικότητα σε οξείδιο του σιδήρου και οργανικές ουσίες. Οι παράγοντες αυτοί είναι σύνθετοι, ασταθείς και αλληλοεπιδρώμενοι. Για παράδειγμα, η παρουσία υγρασίας στο έδαφος μειώνει την ανακλαστικότητά του. Όπως με τη βλάστηση, η επίδραση αυτή είναι μεγαλύτερη στις φασματικές περιοχές υδατικής απορρόφησης, που κυμαίνεται στα 1,4, 1,9 και 2,7 μm, ωστόσο και τα αργιλώδη εδάφη έχουν επίσης διαύλους απορρόφησης του υδροξυλίου στις περιοχές 1,4 και 2,2 μm. Η περιεχόμενη υγρασία στο έδαφος σχετίζεται έντονα με την υφή του. Εδάφη με χοντρή άμμο, τραχεία υφή, συνήθως αποστραγγίζονται καλά, με αποτέλεσμα τη χαμηλή υγρασία και σχετικά μεγάλη ανακλαστικότητα. Εδάφη με λεπτή υφή έχουν χαμηλή αποστράγγιση, μεγαλύτερη υγρασία και, συνεπώς,

χαμηλότερη ανακλαστικότητα. Στην περίπτωση απουσίας νερού από το έδαφος, αυτό λειτουργεί αντίστροφα απ' ό,τι παραπάνω, δηλαδή τραχείας υφής εδάφη εμφανίζονται σκοτεινότερα, με μικρή ανάκλαση, από τα λεπτής υφής εδάφη, που παρουσιάζουν μεγαλύτερη ανάκλαση. Έτσι, οι ιδιότητες ανακλαστικότητας ενός εδάφους είναι συνεπείς μόνο με τις ιδιαίτερες προϋποθέσεις. Δύο άλλοι παράγοντες που μειώνουν την ανακλαστικότητα του εδάφους είναι η τραχύτητα της επιφάνειας και η περιεκτικότητα σε οργανικές ουσίες. Η παρουσία οξειδίου του σιδήρου στο έδαφος επίσης μειώνει σημαντικά την ανακλαστικότητά του, τουλάχιστον στην ορατή περιοχή. Η ανακλαστικότητα του εδάφους εξαρτάται επίσης από τη γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας. Είναι συνήθως πολύ μικρή στο μπλε μέρος του φάσματος (κοντά στα 0,4 μm), κατόπιν αυξάνεται με το μήκος κύματος και φτάνει ένα μέγιστο τα 1-2 μm (Σχήμα 11.1). Για διάφορα εδάφη, οι συντελεστές ανάκλασης κυμαίνονται περίπου από 0,1 (ή 10%), για εδάφη με υψηλό ποσοστό οργανικής ουσίας, έως 0,3 (ή 30%), για την άμμο των ερήμων. Αξίζει να αναφερθεί εδώ ότι ακόμα και ένα πολύ μικρό ποσοστό οργανικής ουσίας μπορεί να μειώσει την ανακλαστικότητα του εδάφους.

11.1.1.5. Διακριτικές ικανότητες

Οι διακριτικές ικανότητες καθορίζουν τους αισθητήρες των δορυφόρων και αποτελούν καθοριστικό παράγοντα στην επιλογή εικόνων ανάλογα με την εφαρμογή.

- **Χωρική διακριτική ικανότητα:** Χωρική διακριτική ικανότητα θεωρείται η μικρότερη δυνατή επιφάνεια μιας εικόνας στο έδαφος. Οι περισσότερες δορυφορικές εικόνες σχηματίζονται από σειρές και στήλες εικονοστοιχείων (pixels), που είναι τα μικρότερα στοιχεία κάθε εικόνας. Για παράδειγμα, ένας αισθητήρας έχει διακριτική ικανότητα 20 m, δηλαδή το εικονοστοιχείο αντιπροσωπεύει περιοχή 20 m x 20 m στο έδαφος. Ανάλογα με την εφαρμογή για την οποία έχει σχεδιαστεί ο αισθητήρας, μπορεί να έχει μικρή ή μεγάλη διακριτική ικανότητα.

- **Χρονική διακριτική ικανότητα:** Η χρονική διακριτική ικανότητα αναφέρεται στον χρόνο που απαιτείται για να καταγράψει ο αισθητήρας του δορυφόρου την ίδια περιοχή. Είναι σημαντική, επειδή δίνει τη δυνατότητα διαχρονικής παρακολούθησης φαινομένων και περιβαλλοντικών παραμέτρων. Για παράδειγμα, γίνεται δυνατή η παρακολούθηση της κατάστασης μιας καλλιέργειας στη διάρκεια ανάπτυξης του φυτού.

- **Ραδιομετρική διακριτική ικανότητα:** Η ραδιομετρική ικανότητα περιγράφει τη δυνατότητα του συστήματος να διακρίνει μεταξύ μικρών διαφορών της ανιχνευόμενης ενέργειας. Τα δορυφορικά δεδομένα αναπαριστώνται ως ψηφιακοί αριθμοί με ελάχιστο το μηδέν και είναι μικρότεροι ή ίσοι με μια δύναμη του δύο. Το εύρος των τιμών αντιστοιχεί σε έναν αριθμό bits, που χρησιμοποιούνται για να κωδικοποιήσουν τους αριθμούς σε δυαδική μορφή. Ο μέγιστος αριθμός των επιπέδων λαμπρότητας (brightness) που είναι διαθέσιμα εξαρτάται από τον αριθμό των bits που χρησιμοποιούνται για την καταγραφή της ενέργειας. Έτσι, εάν ένας αισθητήρας χρησιμοποιεί 8 bits για την καταγραφή των δεδομένων, θα έχει διαθέσιμες $2^8 = 256$ ψηφιακές τιμές και, εάν χρησιμοποιεί 4 bits, η εικόνα θα έχει $2^4 = 16$ τιμές.

- **Φασματική διακριτική ικανότητα:** Η φασματική διακριτική ικανότητα περιγράφει την ικανότητα του αισθητήρα να καταγράψει την πληροφορία σε διαφορετικές περιοχές ή δέσμες συχνοτήτων του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Έτσι, όσο πιο πολλές δέσμες χρησιμοποιεί ο αισθητήρας, τόσο μεγαλύτερη είναι η διακριτική ικανότητά του. Για παράδειγμα, οι παγχρωματικές εικόνες έχουν μικρότερη φασματική διακριτική ικανότητα από μια πολυφασματική εικόνα, που διακρίνει το μπλε, το πράσινο και το κόκκινο. Σήμερα, υπάρχουν αισθητήρες που δίνουν εικόνες σε εκατοντάδες μήκη κύματος του ορατού, κοντινού υπέρυθρου και μέσου υπέρυθρου.

11.1.2. Συστήματα αισθητήρων

Τα περισσότερα όργανα που φέρουν οι δορυφόροι είναι σχεδιασμένα να μετρούν φωτόνια. Η θεμελιώδης αρχή της λειτουργίας των αισθητήρων είναι η αρχή του φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Σύμφωνα με αυτό το φαινόμενο, θα παρατηρηθεί εκπομπή ηλεκτρονίων όταν μια αρνητικά φορτισμένη πλάκα, από ειδικό φωτοευαίσθητο υλικό, υπόκειται σε μια δέσμη φωτονίων. Μπορεί να κατασκευαστεί έτσι ώστε τα ηλεκτρόνια

να ρεύσουν, κατόπιν, από την πλάκα, να συλλεχθούν και να μετρηθούν ως σήμα. Το μέγεθος του ηλεκτρικού ρεύματος που παράγεται (αριθμός φωτοηλεκτρονίων ανά μονάδα χρόνου) είναι ανάλογο της έντασης του φωτός. Έτσι, μεταβολές στο ηλεκτρικό ρεύμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μέτρηση μεταβολών των φωτονίων, που προσπίπτουν στην πλάκα (ανιχνευτή) στη διάρκεια χρονικών διαστημάτων.
Οι δύο κατηγορίες αισθητήρων είναι παθητικά συστήματα, δηλαδή ενέργεια από ακτινοβολία που προέρχεται από εξωτερική πηγή, όπως από τον ήλιο, και ενεργητικά, δηλαδή ενέργεια που παράγεται από όργανα του συστήματος του αισθητήρα, κατευθύνεται προς τα έξω, και το μέρος που επιστρέφει μετριέται. Στο Σχήμα 11.3 παρουσιάζεται το πλαίσιο των συστημάτων αισθητήρων. Οι αισθητήρες μπορεί να μη δημιουργούν εικόνες (non-imaging), δηλαδή μετρούν την ακτινοβολία που λαμβάνεται από όλα τα σημεία του παρατηρούμενου στόχου, την ολοκληρώνουν και αναφέρουν το αποτέλεσμα ως ένταση του ηλεκτρικού σήματος, ή δημιουργούν εικόνες (imaging), δηλαδή τα ηλεκτρόνια που απελευθερώνονται χρησιμοποιούνται για να διεγείρουν ή ιονίσουν μια ουσία, όπως άργυρο (Ag) σε φιλμ, ή να παραγάγουν εικόνα σε μηχανισμό, όπως η τηλεόραση ή η οθόνη ενός Η/Υ. Επειδή η ακτινοβολία σχετίζεται με συγκεκριμένα σημεία του στόχου, το τελικό αποτέλεσμα είναι μια εικόνα (φωτογραφία) ή ένα ψηφιδωτό.
Μία άλλη διάκριση των τηλεπισκοπικών αισθητήρων σχετίζεται με τον τρόπο κίνησης του αισθητήρα κατά μήκος της τροχιάς, για τη συγκέντρωση των δεδομένων. Η περιοχή σάρωσης κατά μήκος της τροχιάς ονομάζεται εύρος σάρωσης (swath width). Οι τρόποι σάρωσης του αισθητήρα είναι (Σχήμα 11.4) είτε κάθετα στην τροχιά (cross-track), ή κατά μήκος της τροχιάς (along-track).

11.1.2.1. Ραδιόμετρο

Το ραδιόμετρο (radiometer) είναι ένας γενικός όρος για κάθε όργανο που μετρά ποσοτικά την ΗΜΑ (Ηλεκτρομαγνητική Ακτινοβολία) σε κάποιες περιοχές του ΗΜΦ (Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα). Όταν η καταγραφόμενη ακτινοβολία προέρχεται από την ορατή περιοχή του φάσματος, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο όρος «φωτόμετρο» (photometer). Εάν ο αισθητήρας περιλαμβάνει ένα όργανο, όπως το πρίσμα ή πλέγμα παρεκτροπή ς (diffraction grating), που μπορεί να «σπάσει» την ακτινοβολία σε διακριτά μήκη κύματος και να τα ξεχωρίσει σε διαφορετικές γωνίες, έτσι ώστε να καταγραφούν από τους ανιχνευτές, τότε ονομάζεται «φασματόμετρο» (spectrometer). Ο όρος «φασματοραδιόμετρο» (spectroradiometer) χρησιμοποιείται όταν η καταγραφή της ΗΜΑ γίνεται σε ένα εύρος (band) μηκών κύματος, παρά σε διακριτό μήκος κύματος. Τα κύρια εξαρτήματα ενός συστήματος αισθητήρα φασματοραδιομέτρου δίνονται στον Πίνακα 11.1.



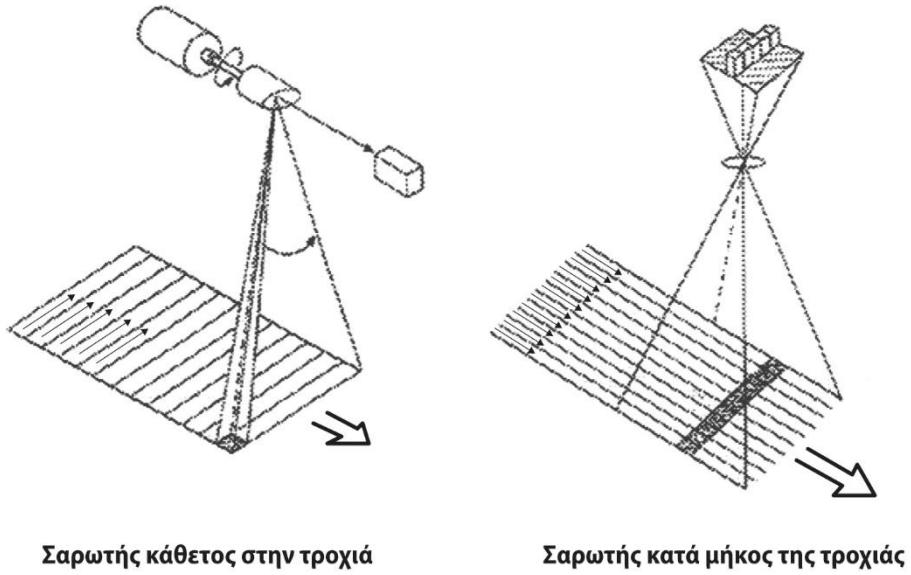
Σχήμα 11.3. *Πλαίσιο συστημάτων αισθητήρων.*

11.1.2.2. Οπτικό σύστημα

Το μπροστινό μέρος ενός αισθητήρα είναι, συνήθως, ένα τηλεσκοπικό σύστημα για τη συλλογή και κατεύθυνση της ακτινοβολίας σε καθρέπτη ή φακούς (lens). Μερικοί αισθητήρες έχουν τη δυνατότητα να στραφούν σε κάποια γωνία από το ναδίρ και να λαμβάνουν πληροφορίες από τις αντίστοιχες περιοχές, όπως το σύστημα του δορυφόρου SPOT (Satellite Pour l'Observation de la Terre). Η ακτινοβολία, συνήθως ορατή και κοντινή, μέση και θερμική υπέρυθρη, πρέπει να διασπαστεί σε στενές ή ευρείες δέσμες. Αυτό επιτυγχάνεται με τα φίλτρα.

Οπτικό σύστημα	Φακοί, κάτοπτρο, διαφράγματα, διαμορφωτής (modulator) και όργανα ανάλυσης φωτός (dispersion devices).
Ανιχνευτές	Παρέχει ηλεκτρικό σήμα ανάλογο με την ένταση ακτινοβολίας στην ενεργή επιφάνεια, γενικά κάποιος τύπος ημιαγωγού.
Επεξεργασία σήματος	Εκτελούνται ειδικές λειτουργίες (functions) στο ηλεκτρικό σήμα, για να παραχθούν τα επιθυμητά δεδομένα εξόδου.

Πίνακας 11.1. *Κύρια στοιχεία ενός φασματοραδιομέτρου.*



Σχήμα 11.4. *Κατάταξη των αισθητήρων ανάλογα με τον τρόπο κίνησής τους.*

11.1.2.3. Φίλτρα

Εκτός από το πρίσμα ή πλέγμα παρεκτροπής, η διάσπαση της ακτινοβολίας, σε δέσμη συχνοτήτων (bands), μπορεί να επιτευχθεί και με φίλτρα. Από τα φίλτρα απορρόφησης περνά μόνο ένα περιορισμένο εύρος μηκών κύματος, απορροφώντας την ακτινοβολία που είναι εκτός αυτού του εύρους. Τα φίλτρα αυτά μπορεί να είναι ευρεία ή στενά φίλτρα (bandpass). Επίσης, μπορεί να είναι υψηλά ή χαμηλά (law), όπως φαίνεται στο Σχήμα 11.5. Τα φίλτρα παρεμβολής ανακλούν τα μη επιθυμητά μήκη κύματος και επιτρέπουν τη διάδοση των υπολοίπων σε συγκεκριμένο διάστημα.



Σχήμα 11.5. *Φίλτρο για τη διάσπαση της ακτινοβολίας.*

11.1.2.4. Ανιχνευτές

Το επόμενο βήμα είναι να ληφθεί η φασματικά διαχωρισμένη ακτινοβολία από κατάλληλους ανιχνευτές. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω φακών ή με την τοποθέτηση ανιχνευτή ή, όπως στην περίπτωση του MSS και άλλων αισθητήρων, με τη διοχέτευση της ακτινοβολίας σε μια σειρά ανεξάρτητων αισθητήρων.

11.1.2.5. Επεξεργασία σήματος

Αφού το σήμα έχει δημιουργηθεί στον ανιχνευτή, μεταφέρεται μέσω του συστήματος ηλεκτρονικής επεξεργασίας, του οποίου η έξοδος είναι το σήμα που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία εικόνων, οι οποίες θα μπορούν να επεξεργαστούν ηλεκτρονικά. Το πρώτο στάδιο είναι η προενίσχυση (pre-amplification). Συνήθως, γίνεται ψηφιοποίηση του σήματος και της ακτινοβολίας αναφοράς, που χρησιμοποιείται για τη βαθμονόμηση. Το αποτέλεσμα της ακτινοβολίας αποστέλλεται στους επίγειους σταθμούς λήψης. Εναλλακτικά, η πληροφορία αποθηκεύεται στην πλατφόρμα του δορυφόρου και μεταδίδεται σε επίγειους σταθμούς, όταν περάσει από πάνω.

11.1.2.6. Αισθητήρες μικροκυμάτων

Οι αισθητήρες μικροκυμάτων υπερτερούν έναντι των οπτικών συστημάτων, καθώς μπορούν να συλλέξουν πληροφορίες σε νεφελώδεις συνθήκες και στη διάρκεια της νύχτας, επειδή καταγράφουν την εκπεμπόμενη ακτινοβολία και όχι την ανακλώμενη. Όμως, η χωρική διακριτική ικανότητα των παθητικών αισθητήρων μμικροκυμάτων είναι μικρότερη από αυτή των οπτικών και υπέρυθρων. Αυτό συμβαίνει επειδή το μήκος κύματος των μικροκυμάτων είναι μεγαλύτερο και το θεωρητικό όριο της χωρικής διακριτικής ικανότητας εξαρτάται από το λόγο του μήκους κύματος προς το άνοιγμα (aperture) του αισθητήρα. Επίσης, η ένταση της μικροκυματικής ακτινοβολίας που εκπέμπεται ή ανακλάται από την επιφάνεια της Γης είναι πολύ μικρή. Οι τύποι ενεργητικών αισθητήρων μικροκυμάτων περιλαμβάνουν τα υψόμετρα, τους μετρητές διασποράς και τα ραντάρ συνθετικού ανοίγματος.

11.1.2.7. Υψόμετρο

Το υψόμετρο (altimeter) χρησιμοποιεί το χρόνο που απαιτείται για να επιστρέψει ένα εκπεμπόμενο (σε κατακόρυφη διεύθυνση) σήμα, προκειμένου να προσδιορίσει το ύψος του δορυφόρου από την επιφάνεια του εδάφους ή της θάλασσας. Τέτοια όργανα έχουν μεταφερθεί από τα Skylab, GOES και SEASAT, επιτυγχάνοντας ακρίβεια της τάξης των ±30 cm με ±l0 cm. Η αρχική χρήση των υψομέτρων αφορούσε τον προσδιορισμό της μέσης επιφάνειας της θάλασσας, το ύψος των κυμάτων και της ταχύτητας (όχι της κατεύθυνσης) του ανέμου κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας (με ακρίβεια ±2 ms^{-1}).

11.1.2.8. Μετρητής διασποράς

Ο μετρητής διασποράς (scatterometer) είναι άλλο ένα σύστημα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη της κατάστασης της θάλασσας. Αξιοποιεί μια πολύπλοκη συστοιχία από δέσμες ραντάρ, που επιτρέπουν τον υπολογισμό της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου με ακρίβεια ±20°, όπως στο SEASAT.

11.1.2.9. Ραντάρ συνθετικού ανοίγματος

Για να επιτευχθεί μεγάλη χωρική διακριτική ικανότητα, το άνοιγμα της κεραίας πρέπει να είναι πολύ μεγάλο. Στα ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (Synthetic Apperture Radar/SAR), το ανακλώμενο σήμα λαμβάνεται από την κεραία σε διαδοχικές θέσεις, καθώς κινείται ο δορυφόρος. Με τον τρόπο αυτό, σχηματίζεται μια εικόνα παρόμοια με αυτήν που θα σχηματιζόταν εάν η διάμετρος της κεραίας ήταν αρκετές εκατοντάδες μέτρα ή χιλιόμετρα. Η σχηματισμένη εικόνα μεταδίδεται στους επίγειους σταθμούς και, για την αποκατάστασή της, ακολουθεί πολύπλοκη επεξεργασία (επεξεργασία της μετατόπισης Doppler), κυρίως όταν, εκτός της κίνησης του δορυφόρου, κινείται και ο στόχος.

11.1.2.10. Ηχητικοί αισθητήρες

Οι υποβρύχιοι (sonic) ηχητικοί αισθητήρες (Sound Navigation and Ranging/SONAR) είναι παρόμοια των ραντάρ, αλλά χρησιμοποιούν ηχητικούς παλμούς, αντί για παλμούς μικροκυμάτων. Το αντίθετο με τα μικροκύματα, που διαδίδονται ελεύθερα στην ατμόσφαιρα, αλλά υποβαθμίζονται στο νερό, συμβαίνει με τα ηχητικά κύματα. Οι υποβρύχιοι ηχητικοί αισθητήρες χρησιμοποιούνται για υποθαλάσσιες μελέτες, που μπορεί να περιλαμβάνουν εύρεση απόστασης (ranging), ανίχνευση υποθαλάσσιων αντικειμένων (π.χ. ναυάγια, υποβρύχια) και χαρτογράφηση του πυθμένα. Διακρίνονται δύο τύποι ηχητικών αισθητήρων, οι ηχογράφοι (echo sounding) και τα πλευρικής ηχητικής σάρωσης (side scan sonar).

11.1.3. Συστήματα τηλεπισκόπησης

Η ταξινόμηση των δορυφορικών συστημάτων βασίζεται σε διάφορα κριτήρια. Ένα βασικό κριτήριο είναι το μήκος κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που κατατάσσει τα συστήματα ως ευαίσθητα σε περιοχές του φάσματος, όπως η ακτινοβολία ορατού, υπέρυθρου και μικροκυμάτων. Άλλο κριτήριο αφορά την ταξινόμηση σε ενεργητικά και παθητικά δορυφορικά συστήματα. Ειδικότερα, τα ενεργά δορυφορικά συστήματα εκπέμπουν ενέργεια και καταγράφουν το ποσοστό του επιστρεφόμενου σήματος. Τέτοια συστήματα είναι τα ραντάρ καιρού και τα ραντάρ συνθετικού ανοίγματος, που λειτουργούν στην περιοχή μικροκυμάτων του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Τα ραντάρ θεωρούνται συστήματα παντός καιρού, δεδομένου ότι το σήμα μπορεί να διαπεράσει τα νέφη, χωρίς εξασθένηση. Αντίθετα, τα παθητικά δορυφορικά συστήματα απλώς καταγράφουν τη με φυσικό τρόπο ανακλώμενη ή εκπεμπόμενη ακτινοβολία. Υπάρχουν δύο κατηγορίες παθητικών συστημάτων τηλεπισκόπησης, οι μετεωρολογικοί (meteorological) δορυφόροι και οι περιβαλλοντικοί (environmental) δορυφόροι ή δορυφόροι πόρων (resource satellites). Οι κύριες διαφορές μεταξύ των δύο κατηγοριών παθητικών δορυφορικών συστημάτων αφορά τις χωρικές και χρονικές διακριτικές ικανότητές τους, που αντίστοιχα επηρεάζουν τις εφαρμογές και τις χρήσεις τους. Στον Πίνακα 9.2 παρουσιάζεται μια ενδεικτική λίστα με τις τρέχουσες δορυφορικές αποστολές περιβαλλοντικών εφαρμογών, που αναμένεται να αυξηθεί σημαντικά τα επόμενα χρόνια.

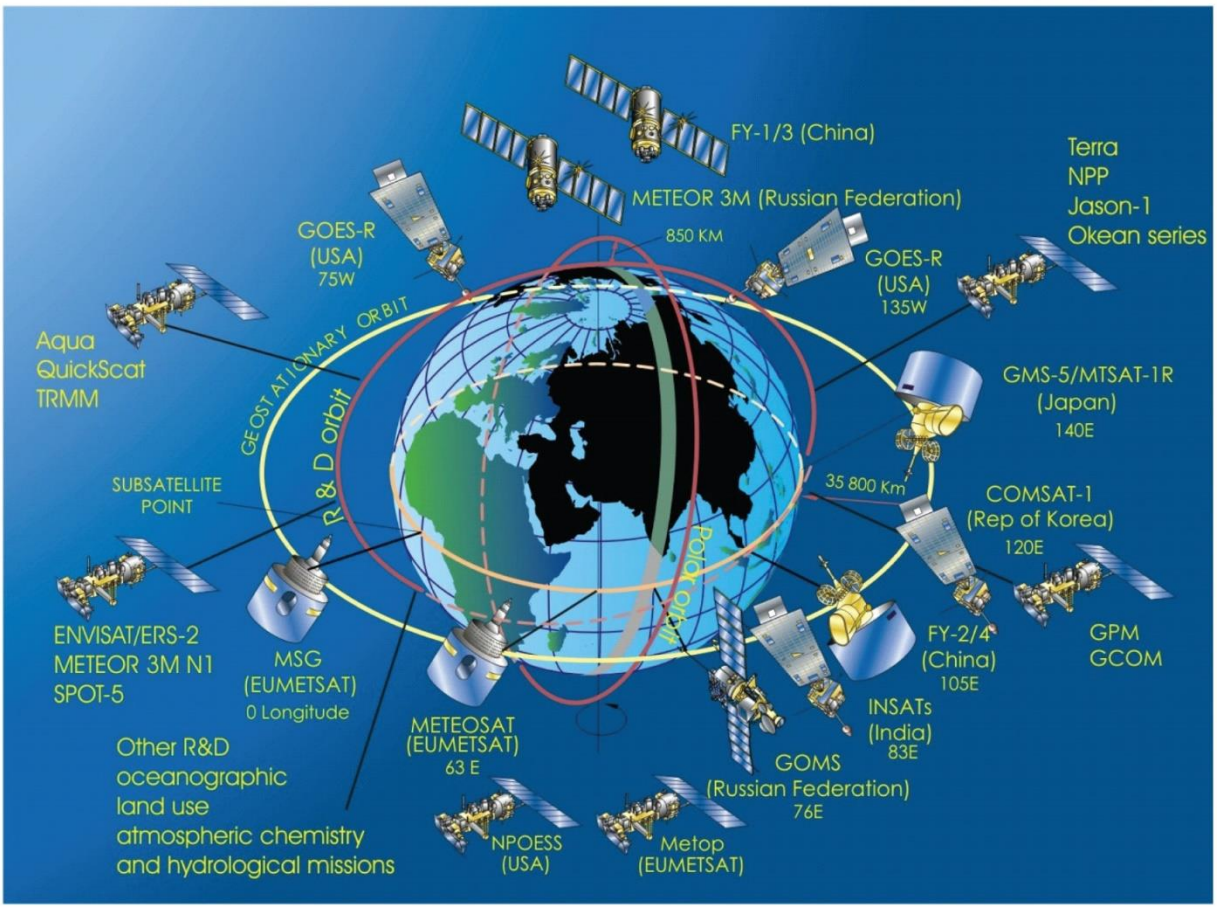
Στην πλειονότητά τους, οι μετεωρολογικοί δορυφόροι λειτουργούν σε ύψη μεταξύ 800 και 1.500 km, είναι πολικής ή σχεδόν πολικής χαμηλής ηλιοσύγχρονης τροχιάς, δηλαδή τέμνουν τον ισημερινό την ίδια χρονική στιγμή, όπως η σειρά του NOAA-N. Αντίστοιχα, οι δορυφόροι υψηλής τροχιάς λειτουργούν στα περίπου 36.000 km και ονομάζονται γεωστάσιμοι δορυφόροι, καθόσον μοιάζουν να «στέκονται» στο ίδιο σημείο στον ισημερινό, κινούμενοι με την ταχύτητα περιστροφής της Γης. Υπάρχουν πέντε γεωστάσιμοι δορυφόροι (π.χ. METEOSAT και GOES), που καλύπτουν τη Γη και παρέχουν εικόνες κάθε 30 λεπτά, με χωρική ανάλυση των 2,5 km στο ορατό. Οι μετεωρολογικοί δορυφόροι είναι κατάλληλοι κυρίως για επιχειρησιακές εφαρμογές και παρέχουν πληροφορίες για την παρακολούθηση των καιρικών συστημάτων και των επιπτώσεων, τις θερμοκρασίες ξηράς και θάλασσας, την ατμοσφαιρική υγρασία, την κρυόσφαιρα (πάγος, χιόνι, παγετώνες), τα πεδία ανέμων, τις καταιγίδες και τα ακραία φαινόμενα. Στο Σχήμα 11.6 απεικονίζονται οι τρέχοντες μετεωρολογικοί δορυφόροι σε τροχιά γύρω από τη Γη.

Οι περιβαλλοντικοί δορυφόροι είναι πολικής ή σχεδόν πολικής χαμηλής τροχιάς, έχουν συνήθως υψηλή χωρική διακριτική ικανότητα, αλλά χαμηλή χρονική επανεμφάνιση, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιούνται κυρίως στην ταξινόμηση χρήσεων γης. Υπάρχει ένα μακρύ ιστορικό επιτυχημένων εφαρμογών σε όλους τους τομείς του περιβάλλοντος και των γεωεπιστημών, με πρώτο το δορυφόρο LANDSAT (1971), που ακόμα παρέχει πολύτιμα δεδομένα και πληροφορίες. Το κύριο χαρακτηριστικό της σειράς των περιβαλλοντικών δορυφόρων είναι η σταδιακή βελτίωση της χωρικής διακριτικής ικανότητας διαχρονικά, κατά την οποία, για παράδειγμα, από ENVISAT και SPOT, φτάνουν σήμερα στο επίπεδο της μικροτηλεπισκόπησης, δηλαδή της τάξης του ενός μέτρου ή λιγότερο, με νέους δορυφόρους, όπως είναι, μεταξύ άλλων, οι Quickbird και IKONOS, και πολύ πρόσφατα οι WV-2 και WV-3, για εφαρμογές πλέον στη γεωργία ακριβείας. Επισημαίνεται ότι υπάρχει ήδη

ένας μεγάλος αριθμός δορυφορικών συστημάτων, που αυξάνεται σταθερά κάθε χρόνο. Επίσης, υπάρχει μια πολύ πρόσφατη τάση να αυξηθεί ο αριθμός των διαθέσιμων ζωνών στους υπάρχοντες δορυφόρους, με αποτέλεσμα νέες και πολύτιμες πληροφορίες, που καλύπτουν ένα φάσμα νέων και σύνθετων εφαρμογών. Ενδεικτικά, αναφέρεται η οικογένεια των δορυφόρων Sentinel, που είναι ήδη σε τροχιά και έχει αρχίσει να παρέχει πληροφορίες, με νέες δυνατότητες ανίχνευσης για τις γεωεπιστήμες, αποτελεί δε μέρος του προγράμματος Copernicus, του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Διαστήματος (ESA, 2014).

Satellite	Type of sensor carrying on	Applications
LANDSAT	Optical, medium spatial resolution, multispectral	General land-cover, land-use mapping, agriculture, environmental monitoring
TERRA	Optical moderate spatial resolution, multispectral, microwave sensors for land and atmosphere	General land-cover, land-use mapping, quality of atmosphere, environmental monitoring, agriculture
AQUA	Optical moderate spatial resolution, multispectral, microwave sensors for atmosphere, land and sea	General land-cover, land-use mapping, quality of atmosphere, environmental monitoring, ocean monitoring
NOAA-AVHRR	Optical low resolution imaging sensors	Atmosphere-Meteorology small scale land-cover mapping sea environment monitoring,
Meteosat Third Generation satellites	Optical and microwave low resolution sensors	Atmosphere - Meteorology small scale land-cover mapping, ocean environment monitoring,
GeoEye-1	Optical, very-high spatial resolution, multispectral	Mapping, environmental monitoring security, precision farming
IKONOS	Optical, very-high spatial resolution, multispectral	Mapping, environmental monitoring security, precision farming
Pleiades	Optical, very-high spatial resolution, multispectral	Mapping, environmental monitoring security, precision farming
RapidEye	Optical, high spatial resolution, multispectral	Mapping, environmental monitoring, precision farming
SPOT 6,7	Optical, very-high spatial resolution, multispectral	Mapping, environmental monitoring security, precision farming
WorldView-1	Optical, very-high spatial resolution, panchromatic	Mapping,
WorldView-2	Optical, very-high spatial resolution, multispectral	Mapping, environmental monitoring security, precision farming
TanDEM-X	Radar, high spatial resolution,	Land and Sea: environmental monitoring security, precision farming, sea monitoring
TerraSAR-X	Radar, high spatial resolution,	Land and Sea: environmental monitoring security, precision farming, sea monitoring
COSMO-SkyMed	Radar, very-high spatial resolution,	Land and Sea Mapping, environmental monitoring security, precision farming, sea monitoring
Radarsat-2	Radar, high spatial resolution,	Land and Sea: environmental monitoring security, precision farming, sea monitoring

Πίνακας 11.2. *Τρέχοντες δορυφόροι και εφαρμογές.*



Σχήμα 11.6. *Τρέχοντες μετεωρολογικοί δορυφόροι σε τροχιά γύρω από τη Γη.*

11.1.4. Τηλεπισκόπηση και ΓΣΠ

Ένα ΓΣΠ αποτελεί ένα σύστημα που έχει σχεδιαστεί να δέχεται και να χειρίζεται μεγάλους όγκους χωρικών δεδομένων, προερχόμενους από διάφορες πηγές. Έχει τις ακόλουθες βασικές λειτουργίες: την εισαγωγή δεδομένων, ακόμα και αυτόματα ψηφιοποιημένων λειτουργιών, μαζί με καθαρισμό και επεξεργασία δεδομένων. Αποθήκευση και ανάκτηση δεδομένων της αρχικής χωρικής βάσης, με δυνατότητα επικαιροποίησης. Επεξεργασία των δεδομένων για τη δημιουργία σύνθετων μεταβλητών με χωρικά και μη χωρικά χαρακτηριστικά. Δημιουργία εξαγομένων, με τη μορφή πινάκων και χαρτογραφικών αναφορών. Συμπερασματικά, τα ΓΣΠ αποτελούν ισχυρά εργαλεία, για τη διαχείριση και ανάλυση χωρικών δεδομένων.

Αντίστοιχα, τα συστήματα τηλεπισκόπησης αποτελούν δυναμικά εργαλεία για τη συλλογή και ταξινόμηση χωρικών δεδομένων. Εισαγόμενα τηλεπισκόπησης αντιπροσωπεύουν σε πολλές περιπτώσεις είτε μια δυνητική πηγή νέων δεδομένων για το ΓΣΠ είτε μια εναλλακτική μορφή συλλογής δεδομένων για ένα ή περισσότερα σαφώς καθορισμένα στοιχεία του ΓΣΠ. Βέβαια, το θέμα της κατάλληλης χωρικής κλίμακας και διακριτικής ικανότητας παραμένει ανοικτό και δεν μπορεί να καλυφθεί επαρκώς από τα περισσότερα υπάρχοντα συστήματα τηλεπισκόπησης. Ωστόσο, η τρέχουσα τάση σε νέα δορυφορικά συστήματα με αυξανόμενη χωρική διακριτική ικανότητα είναι πολλά υποσχόμενη.

Ένα ΓΣΠ είναι ισχυρό στο μετασχηματισμό των αρχικών δεδομένων σε χρήσιμες πληροφορίες. Ωστόσο, υπάρχει μια βασική διάσταση απόψεων μεταξύ της λειτουργίας του ΓΣΠ και της δημιουργίας των δεδομένων τηλεπισκόπησης, καθώς το ΓΣΠ θεωρεί ότι τα ακριβή, ψηφιακά, πολυγωνικά, σημειακά ή δικτυακά δεδομένα αποτελούν πρωτογενή δεδομένα, που συνιστούν το σημείο εκκίνησης για το μετέπειτα έργο. Αντίθετα, το ψηφιακό πεδίο τηλεπισκόπησης αντιπροσωπεύει τα πρωτογενή δεδομένα και τα ταξινομημένα εξαγόμενα, με τη μορφή πολυγώνων ή άλλη μορφή, αποτελούν προϊόντα υψηλής επεξεργασίας. Επιπλέον, η ταξινομημένη εικόνα τηλεπισκόπησης, σε μορφή εικονοστοιχείων, δεν αντιπροσωπεύει γενικά ένα αποδεκτό στοιχείο για τα

περισσότερα ΓΣΠ. Η ακρίβεια του χρησιμοποιούμενου πλαισίου ταξινόμησης βρίσκεται συνήθως κάτω από το διαθέσιμο επίπεδο άλλων στοιχείων του ΓΣΠ. Ακόμα, η ακρίβεια θέσης της πληροφορίας τηλεπισκόπησης είναι συχνά λιγότερο σημαντική από τα άλλα στοιχεία. Τέλος, τα επίπεδα ακρίβειας είναι επαρκή για ευρείες περιφερειακές αναλύσεις, αλλά σήμερα πολλά ΓΣΠ είναι προσανατολισμένα σε μικρότερες περιοχές και ενσωματώνουν μεγαλύτερα επίπεδα λεπτομερειών. Αντίθετα, εισαγόμενα ΓΣΠ σε συστήματα τηλεπισκόπησης θεωρούνται βοηθητικά δεδομένα. Αναγνωρίζεται ότι σημαντικές βελτιώσεις μπορούν να επιτευχθούν στην ακρίβεια της ταξινόμησης, εφόσον βοηθητικά δεδομένα, όπως το ανάγλυφο, το έδαφος, η εδαφοκάλυψη και άλλα, χρησιμοποιούνται στη διαδικασία ταξινόμησης. Επίσης, είναι δυνατός ο μετασχηματισμός της ταξινομημένης εικόνας τηλεπισκόπησης με βάση εικονοστοιχεία σε ένα σύνολο ομοιογενών πολυγώνων, που ορίζονται σε δομή δεδομένων διανύσματος. Τέλος, υπάρχοντα συστήματα βασίζονται ουσιαστικά στις κλασικές δυνατότητες επεξεργασίας εικόνας, αλλά περιέχουν μια σειρά από δυναμικές δυνατότητες των ΓΣΠ.

11.2. Επεξεργασία και ανάλυση εικόνας

Στη φυσική της μορφή, μια ψηφιακή εικόνα είναι παράταξη δύο διαστάσεων από μικρές περιοχές, που, όπως έχει αναφερθεί, καλούνται εικονοστοιχεία και ανταποκρίνονται χωρικά σε σχετικά μικρές περιοχές, που καλούνται εδαφικές κυψελίδες διαχωρικής ικανότητας (ground resolution cells). Η μετατροπή του συνεχόμενου αναλογικού σήματος πραγματοποιείται σε διακριτές ψηφιακές τιμές. Κάθε ψηφιακή τιμή καταγράφεται ως ένα σύνολο ψηφιακών bits. Κάθε bit καταγράφει ένα αντιπροσωπευτικό σήμα σε μια εκθετική δύναμη του 2. Αυτές οι τιμές είναι γνωστές ως ψηφιακοί αριθμοί (Digital Numbers/DN), τιμές λαμπρότητας (Brightness Values/BV) ή ψηφιακοί υπολογισμοί.

Πρέπει να σημειωθεί ότι ο αριθμός των τιμών λαμπρότητας μέσα σε μια ψηφιακή εικόνα καθορίζεται από τον αριθμό των διαθέσιμων bits. Για παράδειγμα, τα οκτώ bits του Landsat TM δίνουν ένα μέγιστο $256 = 2^8$ πιθανών τιμών (0-255), για κάθε εικονοστοιχείο. Έτσι, είναι φανερό ότι ο αριθμός των bits καθορίζει τη ραδιομετρική ανάλυση των ψηφιακών εικόνων. Αυξάνοντας τον αριθμό αυτό για κάθε εικονοστοιχείο, συνεπάγεται λιγότερα εικονοστοιχεία ανά εικόνα, με αποτέλεσμα το μέγεθος των εικονοστοιχείων να είναι μεγαλύτερο. Ο σχεδιασμός των συστημάτων τηλεπισκόπησης απαιτεί μια ισορροπία μεταξύ της έκτασης που καλύπτει η εικόνα και της ραδιομετρικής, φασματικής και χωρικής διακριτικής ικανότητας. Πριν δοθεί μια εικόνα υψηλής πιστότητας για ανάλυση, υπόκειται σε διορθώσεις και αποκατάσταση της αρχικής της μορφής, που περιλαμβάνουν γεωμετρικές και ραδιομετρικές διορθώσεις, καθώς και απομάκρυνση «θορύβων» (noise) (Mather, 1999). Τα βασικά τμήματα επεξεργασίας και ανάλυσης της εικόνας (Campbell, 1996) είναι: πρώτον, η προεπεξεργασία της εικόνας, που περιλαμβάνει την αποκατάσταση ή προεπεξεργασία (preprocessing) της, καθώς και τη βελτίωση της παρουσίασής της (image enhancement), και δεύτερον, η επεξεργασία της εικόνας, που περιλαμβάνει την ταξινόμησή της (image classification).

11.2.1. Προεπεξεργασία εικόνας

Η αποκατάσταση ή προεπεξεργασία της εικόνας ή, αλλιώς, διόρθωση αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά στάδια της ψηφιακής επεξεργασίας, γιατί τα επόμενα στάδια, όπως η βελτίωση και η ταξινόμηση, βασίζονται σε μεγάλο βαθμό σε αυτήν. Μια σειρά υπολογιστικών αλγόριθμων έχουν δημιουργηθεί για να διορθώνουν λάθη και παραμορφώσεις στις εικόνες. Τα σημαντικότερα λάθη για την αποκατάσταση της εικόνας είναι οι ατμοσφαιρικές επιδράσεις και οι γεωμετρικές παραμορφώσεις.

11.2.1.1. Ατμοσφαιρικές διορθώσεις

Η ένταση του ηλεκτρομαγνητικού σήματος που λαμβάνει ένας δορυφορικός δέκτης εξαρτάται από τους ακόλουθους παράγοντες (Mather, 1999): την ανάκλαση από το στόχο, την κλίση και τον προσανατολισμό της επιφάνειας σε σχέση με το ηλιακό αζιμούθιο, την ατμοσφαιρική επίδραση, τη γωνία λήψης του δέκτη και τη γωνία του ηλιακού ύψους. Είναι, λοιπόν, φανερό ότι η ατμόσφαιρα παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην εξασθένιση του σήματος, που φτάνει στο δορυφόρο ειδικά στα μήκη κύματος του ορατού φάσματος. Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί αρκετοί αλγόριθμοι για την εφαρμογή των ατμοσφαιρικών διορθώσεων στις δορυφορικές εικόνες, με στόχο να προσεγγίσουν την πραγματικότητα. Οι ατμοσφαιρικές διορθώσεις σε ορισμένες περιπτώσεις αποτελούν ένα απαραίτητο στάδιο προεπεξεργασίας των δεδομένων, όμως θα πρέπει να γίνονται προσεκτικά.

11.2.1.2. Γεωμετρικές διορθώσεις

Η δορυφορική εικόνα ως πρωτογενές δεδομένο εμφανίζει γεωμετρικές παραμορφώσεις που σχετίζονται με (Mather, 1999): την προοπτική απεικόνιση του συστήματος καταγραφής, την κίνηση του συστήματος σαρωτή, την κίνηση ή/και τη σταθερότητα της εξέδρας, την ταχύτητα και το ύψος της εξέδρας, το ανάγλυφο της γήινης επιφάνειας και την καμπυλότητα και περιστροφή της Γης. Μια δορυφορική εικόνα δεν έχει τις ιδιότητες ενός χάρτη και η κατάλληλη μετατροπή της για την απόκτηση κλίμακας και ιδιοτήτων προβολής ενός χάρτη ονομάζεται γεωμετρική διόρθωση. Η γεωμετρική διόρθωση έχει στόχο να μετασχηματίσει το σύστημα συντεταγμένων της εικόνας (x, y), που έχει παραμορφώσεις, σε ένα συγκεκριμένο σύστημα (XY) χαρτογραφικής προβολής. Είναι σημαντική για εφαρμογές που αφορούν:

- τη σύγκριση μεταξύ δύο εικόνων ίδιας περιοχής σε διαφορετικό χρόνο, σε επίπεδο εικονοστοιχείου, για την ανίχνευση των αλλαγών,
- την ανάπτυξη ενός ΓΣΠ, με τη χρήση και συσχέτιση άλλων θεματικών χαρτών,
- τη μέτρηση αποστάσεων ή επιφανειών,
- τη δημιουργία μωσαϊκού,
- τις ανάγκες κάθε ανάλυσης που απαιτεί ακρίβεια στον εντοπισμό θέσεων.

Τα βήματα της γεωμετρικής επεξεργασίας περιλαμβάνουν επιλογή του κατάλληλου συστήματος συντεταγμένων, επιλογή του τύπου της διόρθωσης, εντοπισμό των εδαφικών σημείων ελέγχου, επιλογή του βαθμού μετασχηματισμού και επιλογή της τεχνικής της αναδόμησης.
Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι γεωμετρικής διόρθωσης ανάλογα με την πηγή της πληροφορίας: πρώτον, η εγγραφή εικόνας σε άλλη εικόνα (image to image), που αναφέρεται στο μετασχηματισμό του συστήματος συντεταγμένων μιας εικόνας σε κάποιο άλλο μιας δεύτερης εικόνας, και δεύτερον, η εγγραφή εικόνας σε χάρτη, που αναφέρεται στον μετασχηματισμό του συστήματος της εικόνας στο σύστημα συντεταγμένων του τοπογραφικού χάρτη.

11.2.1.3. Γεωμετρική διόρθωση με πολυώνυμα. Επιλογή του βαθμού μετασχηματισμού

Η γεωμετρική διόρθωση με πολυώνυμα βασίζεται στον καθορισμό ενός μαθηματικού μετασχηματισμού πολυωνύμων, ανεξαρτήτως της πηγής και του είδους της γεωμετρικής διόρθωσης. Ο βαθμός μετασχηματισμού είναι ο βαθμός του πολυωνύμου που χρησιμοποιείται για το μετασχηματισμό αυτό. Συνήθως, χρησιμοποιούνται ο 1ος και ο 2ος βαθμός μετασχηματισμού.

11.2.1.4. Εδαφικά Σημεία Ελέγχου

Τα Εδαφικά Σημεία Ελέγχου (Ground Control Points/GCP) αποτελούν συγκεκριμένα εικονοστοιχεία σε μια εικόνα, για τα οποία είναι γνωστές οι συντεταγμένες από άλλη πηγή αναφοράς.

11.2.1.5. Απαιτούμενος αριθμός GCP

Ο ελάχιστος αριθμός σημείων για να πραγματοποιηθεί μετασχηματισμός t βαθμού δίνεται από τη σχέση:

Ελάχιστος αριθμός σημείων = (t+1)*(t+2) /2 (11.1)

Στην πράξη, πρέπει να χρησιμοποιούνται περισσότερα σημεία από τον ελάχιστο αριθμό που ορίζει ο τύπος.

11.2.1.6. Μέθοδοι αναδόμησης εικόνας

Μετά το βαθμό μετασχηματισμού, το επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός εκ νέου των νέων τιμών DN του επιπέδου διαβάθμισης του γκρι. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιούνται η μέθοδος του πλησιέστερου σημείου, η μέθοδος της διγραμμικής παρεμβολής και η μέθοδος της κυβικής παρεμβολής.

11.2.1.7. Βελτίωση εικόνας

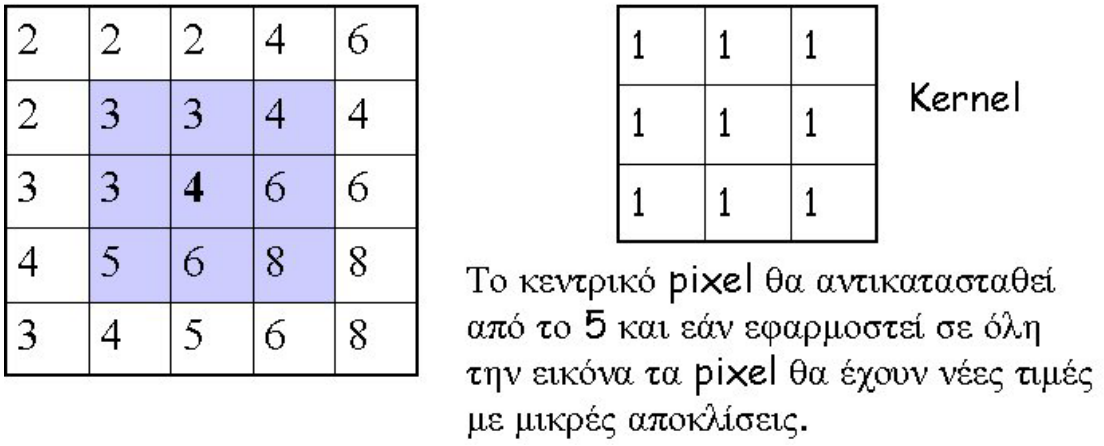
Η ακτινοβολία, η οποία μετριέται από ένα σύστημα για ένα αντικείμενο, επηρεάζεται από παράγοντες όπως ο φωτισμός, οι ατμοσφαιρικές συνθήκες και τα χαρακτηριστικά του οργάνου που κάνει τη μέτρηση. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τη διόρθωση μιας εικόνας από τις επιδράσεις αυτές ονομάζονται ραδιομετρικές και είναι δυσκολότερες στην εφαρμογή τους σε σχέση με τις γεωμετρικές. Βασικά, τα ραδιομετρικά προβλήματα οφείλονται, κατά κύριο λόγο, είτε σε σφάλματα καταγραφής και ψηφιοποίησης είτε στην απορροφούμενη ή

ανακλώμενη από την ατμόσφαιρα και τα αντικείμενα ενέργεια, καθώς και τη διάχυση (Mather, 1999). Χρησιμοποιούνται ιστογράμματα της συχνότητας κατανομής των ψηφιακών τιμών των εικονοστοιχείων (Digital Numbers/DN), η διάμεσος, η τυπική απόκλιση ή η μέση τιμή. Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση της εικόνας ταξινομούνται στις εξής κατηγορίες:

- **Βελτίωση της αντίθεσης (contrast enhancement):** Η τεχνική της βελτίωσης της αντίθεσης αποτελεί ραδιομετρική βελτιστοποίηση. Για τη βελτίωση της εικόνας, εφαρμόζονται οι τεχνικές διόρθωσης του ιστογράμματος, που αποσκοπούν στη βελτίωση των αντιθέσεων της εικόνας και μπορεί να πραγματοποιηθούν με:

  (i) γραμμική επέκταση της αντίθεσης (linear contrast stretching),
  (ii) λογαριθμική επέκταση,
  (iii) πολλαπλή γραμμική επέκταση (piece-wise linear stretch),
  (iv) ισοδυναμοποίηση του ιστογράμματος (histogram equalization),
  (v) χρωματική βελτίωση με τεμαχιοποίηση της πυκνότητας (density slicing).

- **Χρήση φίλτρων (filters):** Τα φίλτρα θεωρούνται χωρική βελτίωση. Μια εικόνα θεωρείται το άθροισμα συνιστωσών υψηλής και χαμηλής συχνότητας. Τα ψηφιακά φίλτρα χρησιμοποιούνται για να αφαιρεθούν οι υψηλές ή οι χαμηλές συνιστώσες. Η χωρική βελτιστοποίηση συνδέεται με τη χωρική συχνότητα, που είναι η διαφορά μεταξύ των υψηλότερων και χαμηλότερων τιμών σε μια ομάδα εικονοστοιχείων. Τα φίλτρα χαμηλής διέλευσης χρησιμοποιούνται για την εξάλειψη των θορύβων που παρατηρούνται συχνά στις εικόνες. Τα φίλτρα υψηλής διέλευσης χρησιμοποιούνται συχνά για να αναδείξουν γεωμορφολογικά ή γεωλογικά χαρακτηριστικά. Με την τεχνική εφαρμογής φίλτρων εισάγεται μια εικόνα και υπολογίζονται τα εικονοστοιχεία της νέας εικόνας, σε συνάρτηση με τα γειτονικά τους εικονοστοιχεία. Τα γειτονικά εικονοστοιχεία ορίζονται από πίνακες τιμών (kernel). Υπάρχουν, λοιπόν, φίλτρα διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων (low pass filter) (Σχήμα 9.7), φίλτρα διέλευσης υψηλών συχνοτήτων (high pass filter) και βελτίωση των ακμών (edge enhancement).



Σχήμα 11.7. *Φίλτρο διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων.*

- **Ανάλυση κύριων συνιστωσών (principal components analysis):** Η τεχνική της ανάλυσης κύριων συνιστωσών καλείται φασματική. Οι μέθοδοι των κύριων συνιστωσών ή κανονικών συνιστωσών αποτελούν μια τεχνική μετατροπής δεδομένων με υψηλό βαθμό συσχέτισης σε νέα δεδομένα μη συσχετισμένα. Κατά τη διαδικασία αυτή, βέβαια, διατηρείται το σύνολο σχεδόν της πληροφόρησης των αρχικών δεδομένων (Lillesand & Kiefer, 2000). Όλες οι κύριες συνιστώσες μετρούν στο 100% τη διακύμανση, ωστόσο οι τρεις πρώτες συνήθως έχουν το μεγαλύτερο ποσοστό (50-95%).
- **Συνδυασμός φασματικών ζωνών (combination of spectral zones):** Ο συνδυασμός διαφόρων φασματικών καναλιών οδηγεί στη δημιουργία πολυφασματικών εικόνων με βελτιωμένη ευαισθησία

στη φασματική ανάκλαση ή χρωματική διαφοροποίηση μεταξύ επιφανειακών αντικειμένων που είναι συχνά δύσκολο να ανιχνευτούν στα επιμέρους φασματικά κανάλια.

- **Λόγοι φασματικών ζωνών (ratios):** Οι αριθμητικές πράξεις της πρόσθεσης, αφαίρεσης, πολλαπλασιασμού και διαίρεσης στις τιμές του επιπέδου του γκρι (DN, ψηφιακή τιμή για κάθε εικονοστοιχείο) των εικονοστοιχείων, από δύο φασματικές ζώνες μιας εικόνας μπορούν να σχηματίσουν μια νέα εικόνα. Από όλες τις πράξεις, η πλέον χρήσιμη είναι η διαίρεση. Η δημιουργία λόγου μεταξύ δύο φασματικών ζωνών μιας περιοχής είναι η πλέον συχνή εφαρμογή. Ο αριθμός n των πιθανών συνδυασμών λόγων για ένα πολυφασματικό σαρωτή με P φασματικά κανάλια δίνεται από τον τύπο:

  $$n = P (P-1). \quad (11.2)$$

Για παράδειγμα, για τα έξι φασματικά κανάλια (εκτός του θερμικού) του θεματικού χαρτογράφου (TM: Thematic Mapper) του Landsat 5, υπάρχουν 30 διαφορετικοί πιθανοί συνδυασμοί λόγων, 15 κανονικοί και 15 αντίστροφοι. Για μεθοδικότερη παρατήρηση της βλάστησης, έχουν αναπτυχθεί διάφορες μορφές συνδυασμών λόγων, χρησιμοποιώντας μήκη κύματος στο ορατό και κοντινό υπέρυθρο. Οι συνδυασμοί είναι γνωστοί ως **δείκτες βλάστησης** (Vegetation Indices), για τον περιορισμό των χρονοβόρων και πολυδάπανων εργασιών υπαίθρου, συνεκτιμώντας τις τεράστιες ποσότητες των δορυφορικών δεδομένων. Οι δείκτες βλάστησης περιγράφονται στις εφαρμογές.

- **Συγχώνευση δεδομένων:** Η συγχώνευση ή ενοποίηση ή συνέργεια δεδομένων (fusion ή merge) έδωσε νέα ώθηση την τελευταία δεκαετία στην καλύτερη αξιοποίηση της πληθώρας των δεδομένων που παρέμεναν ανεκμετάλλευτα σε πολλές εφαρμογές. Τα τελικά προϊόντα παρέχουν πολλές φορές αυξημένες ικανότητες ερμηνείας και πιο αξιόπιστα αποτελέσματα, επειδή συνδυάζονται δεδομένα με διαφορετικά χαρακτηριστικά (Pohl & Van Genderen, 1998). Οι μέθοδοι συγχώνευσης ομαδοποιούνται σε μεθόδους, που σχετίζονται με τα χρωματικά συστήματα (RGB, IHS κ.ά.) (Welch & Ehlers, 1987) και σε στατιστικές ή αριθμητικές μεθόδους.

11.2.2. Επεξεργασία εικόνας

Μια τυπική δορυφορική εικόνα, στην αρχική της μορφή, αποτελείται από ομοιογενείς ή μη περιοχές τοποθετημένες σε κάποια διάταξη. Καθεμία από τις περιοχές αυτές περιλαμβάνει μια «κλάση» της κάλυψης γης. Αυτές οι ομοιογενείς περιοχές είναι τα «αντικείμενα» της εικόνας. Σκοπός μιας βασικής επεξεργασίας (processing) των δορυφορικών δεδομένων είναι ο εντοπισμός και η αναγνώριση, δηλαδή η ταξινόμηση, των αντικειμένων και η παρουσία τους σε μορφή χάρτου ή/και πινάκων. Ο εντοπισμός και τα χωρικά χαρακτηριστικά (spatial features), δηλαδή μέγεθος, σχήμα και κατεύθυνση, των αντικειμένων προσδιορίζονται μέσω των αλλαγών των μέσων τιμών των φασματικών ιδιοτήτων τους. Αυτά τα χωρικά χαρακτηριστικά επιτρέπουν και την εξέταση των μεταβολών που λαμβάνουν χώρα στα αντικείμενα. Όμως, επιτρέπουν μόνο μια γενική κατάταξη των αντικειμένων της εικόνας. Οι μέθοδοι ταξινόμησης βασίζονται, τις περισσότερες φορές, στα φασματικά χαρακτηριστικά, χρησιμοποιώντας τεχνικές αναγνώρισης προτύπων (pattern recognition). Η ταξινόμηση των πολυφασματικών εικόνων βασίζεται στην εφαρμογή ενός απλού κανόνα απόφασης (decision rule) για κάθε εικονοστοιχείο, που ταξινομείται ξεχωριστά, μόνο βάσει των φασματικών μετρήσεων. Βασική προϋπόθεση: ένα αντικείμενο να είναι αρκετά μεγαλύτερο από το μέγεθος του εικονοστοιχείου. Διαφορετικά, ένα μεγάλο ποσοστό εικονοστοιχείων μπορεί να αποτελείται από δύο ή περισσότερα αντικείμενα, κάνοντας τη στατιστική ταξινόμηση αναξιόπιστη.

11.2.2.1. Επιβλεπόμενη ταξινόμηση

Η επιβλεπομένη ταξινόμηση χρησιμοποιείται για την ποσοτική ανάλυση των τηλεπισκοπικών δεδομένων, χρησιμοποιώντας αλγόριθμους, οι οποίοι κατατάσσουν τα εικονοστοιχεία μιας εικόνας ανάλογα με την κατηγορία στην οποία ανήκουν. Οι αλγόριθμοι αυτοί στηρίζονται κυρίως στη θεωρία των πιθανοτήτων. Τα βασικά βήματα που ακολουθούνται κατά τη διαδικασία της ταξινόμησης είναι:

1ο βήμα: Προσδιορισμός του αριθμού των κλάσεων στις οποίες θα χωριστεί (segmented) η εικόνα (π.χ. νερό, έδαφος, διάφορα είδη καλλιεργειών). Στο στάδιο αυτό καθορίζεται, αντικειμενικά, ο αριθμός των τάξεων που θα χρησιμοποιηθούν, ο οποίος και εξαρτάται από το σκοπό της μελέτης και την περιοχή. Για παράδειγμα, όταν χρειάζεται να γίνει ταξινόμηση των ειδών βλάστησης μιας αγροτικής περιοχής, τότε οι διαφορετικές

καλλιέργειες λαμβάνονται ως ξεχωριστές κλάσεις. Όταν το ενδιαφέρον στρέφεται σε γενικότερη ταξινόμηση της περιοχής (π.χ. αγροτική, αστική, υδάτινη), τότε τα είδη βλάστησης λαμβάνονται ως μία κατηγορία.

2ο βήμα: Ειλογή προτύπων (prototypes) εικονοστοιχείων από κάθε κλάση, που αποτελούν τα εκπαιδευτικά δεδομένα (training data). Η επιλογή γίνεται βάσει πληροφοριών που συλλέγονται από κατά τόπους επισκέψεις, αεροφωτογραφίες κτλ. Η δειγματοληψία των προτύπων πρέπει να είναι αντιπροσωπευτική και, εάν αυτό είναι δυνατόν, να γίνει από όλη την περιοχή της εικόνας. Το στάδιο αυτό είναι σημαντικό, γιατί θα καθορίσει το ποσοστό ακρίβειας της ταξινόμησης.

3ο βήμα: Προσδιορισμός των παραμέτρων των ταξινομητών (classifiers) που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν. Οι παράμετροι αυτές λέγονται υπογραφές (signatures) των δεδομένων.

4ο βήμα: Ένταξη κάθε εικονοστοιχείου της εικόνας σε μία από τις κλάσεις που έχουν προσδιοριστεί, χρησιμοποιώντας τον εκπαιδευμένο ταξινομητή (trained classifier).

5ο βήμα: Δημιουργία πινάκων ή θεματικών χαρτών. για τα αποτελέσματα της ταξινόμησης.

Δύο από τους πιο διαδεδομένους αλγόριθμους που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο 3ο και στο 4ο βήμα είναι η ταξινόμηση με τη μέθοδο της μέγιστης πιθανοφάνειας και η ορθογώνια παραλληλεπιπεδοειδής ταξινόμηση.

11.2.2.2. Μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση

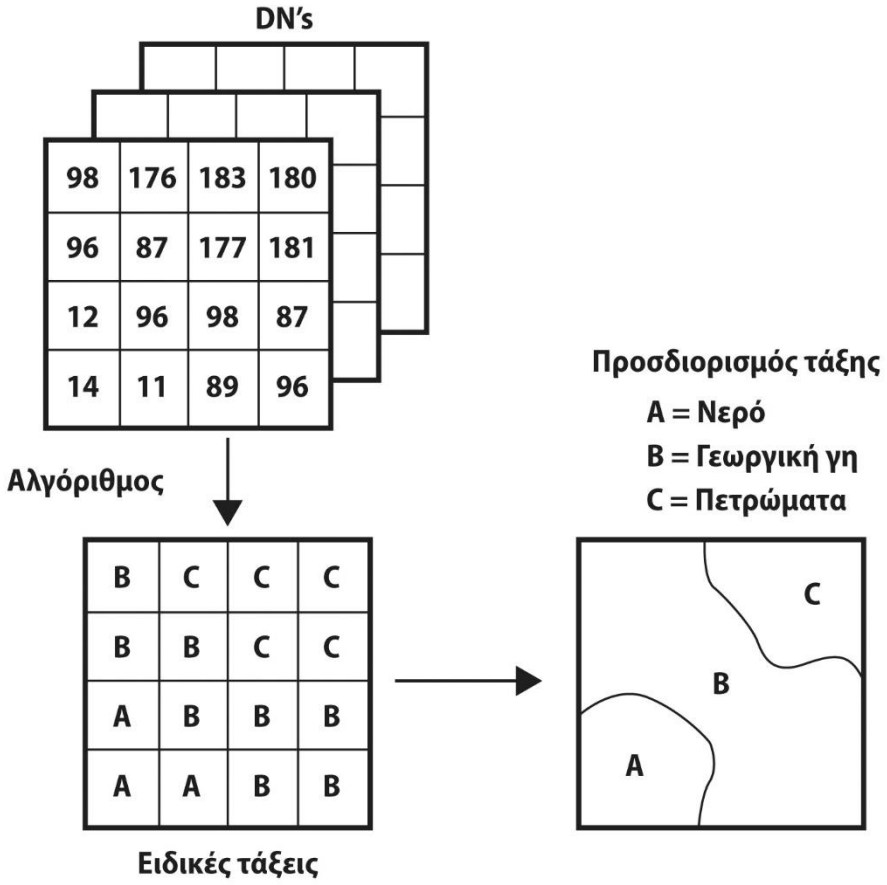
Η ανεξάρτητη ταξινόμηση δεν απαιτεί γνώση της εικόνας εκ των προτέρων, αλλά εφαρμόζει υποδιαιρέσεις που βασίζονται σε «εσωτερικές» ιδιότητες των εικόνων. Εξετάζονται οι ψηφιακές τιμές κάθε εικονοστοιχείου, σε κάθε μήκος κύματος, και κατόπιν η εικόνα υποδιαιρείται σε έναν αριθμό κλάσεων (Σχήμα 9.8). Σχεδόν όλα τα λογισμικά επεξεργασίας εικόνων επιτρέπουν στο χρήστη να ορίσει τον αριθμό των κλάσεων ή τις φασματικές διαφορές που θα πρέπει να υπάρχουν μεταξύ των κλάσεων. Στην πράξη, για εξοικονόμηση χρόνου, η αρχική ομαδοποίηση ξεκινά με την αναγνώριση των «φυσικών κλάσεων», εξετάζοντας μόνο ένα δείγμα από το σύνολο των εικονοστοιχείων της εικόνας. Κατόπιν, καθορίζονται στατιστικές ποσότητες των κλάσεων και γίνεται ταξινόμηση ολόκληρης της εικόνας. Η μέθοδος αυτή είναι σχετικά γρήγορη και επιτρέπει στο χρήστη να λάβει μια αντικειμενική εικόνα των κύριων φασματικών τύπων. Βάσει αυτών των αποτελεσμάτων, μπορεί να ακολουθήσει επιβλεπόμενη ταξινόμηση.

11.2.2.3. Συσταδοποίηση

Μία από τις τεχνικές ανεξάρτητης ταξινόμησης είναι η συσταδοποίηση (clustering). Στην τεχνική αυτή γίνεται η κατάταξη των εικονοστοιχείων της εικόνας σε συστάδες (clusters), με κριτήριο ότι τα εικονοστοιχεία της ίδιας συστάδας πρέπει να έχουν κάποιες ομοιότητες. Συστάδα ορίζεται το σύνολο των εικονοστοιχείων στο οποίο η απόσταση μεταξύ δύο τυχαίων προτύπων, που ανήκουν στην ίδια συστάδα, είναι μικρότερη από την απόσταση μεταξύ κάθε εικονοστοιχείου μιας συστάδας με κάθε εικονοστοιχείο άλλης συστάδας. Στην τεχνική της συσταδοποίησης χρειάζεται να καθοριστεί ένα μέτρο βάσει του οποίου θα γίνουν η μέτρηση ομοιότητας μεταξύ των προτύπων και ο χωρισμός των προτύπων σε συστάδες.

Μια μέθοδος χωρισμού της εικόνας σε συστάδες χρησιμοποιεί τα ιστογράμματα πυκνότητας της πολυφασματικής εικόνας και την τεχνική του ιστογράμματος ισότητας. Με την τεχνική του ιστογράμματος ισότητας, η εικόνα χωρίζεται σε τμήματα ίσης πυκνότητας εικονοστοιχείων. Αφού προσδιοριστεί ο αριθμός των κλάσεων στην εικόνα, ακολουθεί η ταξινόμηση. Για κάθε εικονοστοιχείο, υπολογίζεται το μέτρο ομοιότητας με όλες τις συστάδες, που χρησιμοποιείται ως κριτήριο ταξινόμησης. Η κάθε ψηφίδα καταχωρείται στη συστάδα με την οποία έχει το μεγαλύτερο μέτρο ομοιότητας. Συνήθως, χρησιμοποιούνται δύο κριτήρια, δηλαδή μέτρα ομοιότητας Το ένα είναι η ευκλείδεια απόσταση της ψηφίδας από όλες τις συστάδες: η κάθε ψηφίδα καταχωρείται στη συστάδα που απέχει τη μικρότερη απόσταση, δηλαδή έχει το μεγαλύτερο μέτρο ομοιότητας. Εναλλακτικά, άλλο κριτήριο είναι η απόσταση Mahalanobis κάθε ψηφίδας από όλες τις συστάδες. Συγκριτικά με την επιβλεπόμενη ταξινόμηση, η μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση είναι αποδεκτή μόνο εάν οι παραγόμενες συστάδες παρουσιάζουν ομοιότητα με τις πραγματικές κλάσεις πληροφοριών. Σε ιδανικές συνθήκες, μπορούν να αναγνωριστούν διαφορετικοί τύποι επιφανειών από φυσικές ομάδες στην ραδιομετρική περιοχή (domain). Οι τεχνικές της μη επιβλεπόμενης ταξινόμησης χρησιμοποιούνται κυρίως για την αναγνώριση φυσικών ομαδοποιήσεων των δεδομένων. Η εικόνα υποδιαιρείται, χρησιμοποιώντας μια

μαθηματική διαδικασία, σε έναν αριθμό περιοχών ή ομογενών ομάδων. Μικροί τομείς αυτών των ομάδων συγκρίνονται με τα πραγματικά δεδομένα του εδάφους. Από τη στιγμή που προσδιορίζεται μια συσχέτιση μεταξύ των διαφόρων ομάδων και της εδαφοκάλυψης, ολόκληρη η εικόνα μπορεί να ταξινομηθεί. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφοροι αλγόριθμοι, για τη συσταδοποίηση πολυδιάστατων δεδομένων, όμως η διατήρηση φυσικών ή φυσικής σημασίας και ευστάθειας συσταδοποιήσεων αποτελεί πρόβλημα. Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη τεχνική είναι η ανάλυση συστάδων.



Σχήμα 11.8. *Γενική μεθοδολογία μη επιβλεπόμενης ταξινόμησης Οι αρχικές πολυφασματικές εικόνες ταξινομούνται, μέσω ενός αλγορίθμου, σε κλάσεις, σύμφωνα με τις φασματικές ιδιότητες τους.*

11.2.2.4. Ανάλυση συστάδων

Παρουσιάζεται επιγραμματικά η αλληλουχία των βημάτων που ακολουθούνται κατά την επεξεργασία εικόνων με την ανάλυση συστάδων (cluster analysis), χωρίς τεχνικές λεπτομέρειες και μαθηματικούς όρους:

1ο βήμα: Δομές δεδομένων. Υπάρχουν τρεις βασικές λειτουργικές δομές δεδομένων, κατάλληλες για την κατανόηση της συσταδοποίησης: οι συστάδες (clusters), οι δενδρώδεις (trees) και οι διαχωρισμοί (partitions).

2ο βήμα: Μέτρα ομοιότητας για σημεία. Δεδομένου ότι η συστάδα είναι μια ομάδα παρόμοιων αντικειμένων, ένα θεμελιώδες πρόβλημα είναι ο ποσοτικός προσδιορισμός της έννοιας «παρόμοιο». Υπάρχουν πολλοί τρόποι μέτρησης της ομοιότητας μεταξύ δύο αντικείμενων, μεταξύ των οποίων είναι η ευκλείδεια απόσταση, η χιλβερτιανή (Hilbertian) απόσταση, η συμμεταβολή και η συσχέτιση.

3ο βήμα: Κριτήρια ομοιότητας. Οι περισσότεροι αλγόριθμοι συσταδοποίησης απαιτούν μέτρηση της ομοιότητας μεταξύ προστατικών συστάδων, απ' ό,τι μεταξύ σημείων. Για το λόγο αυτό, χρειάζεται ένα κριτήριο για να αποφασιστεί ποια δύο αντικείμενα ή ποιες τιμές πρέπει να χρησιμοποιηθούν σε κάθε συστάδα, για να μετρηθεί η ομοιότητα μεταξύ των συστάδων. Για παράδειγμα, εάν δοθούν δύο συστάδες X και Y, ποιες δύο

τιμές Η και Ι, όπου Η ανήκει στο Χ και το Ι ανήκει στο Υ, θα πρέπει να επιλεγούν για τη μέτρηση, ώστε να υπολογιστεί η μεταξύ τους ομοιότητα. Κατά μια προσέγγιση, ένα σημείο μπορεί να επιλεγεί για να αντιπροσωπεύσει κάθε ομάδα:

- **Απλή σύνδεση ή κοντινότερο ζεύγος:** Επιλέγεται το ομοιότερο ζεύγος αντικειμένων μεταξύ δύο συστάδων, το οποίο θα ενώσει τις συστάδες με τα κοντινότερα προσκείμενα όρια, έχοντας την τάση να επιτρέψει τη δημιουργία μακρών αλυσοειδών ομάδων.
- **Απλή σύνδεση ή πιο απομακρυσμένο ζεύγος:** Επιλέγεται το λιγότερο όμοιο ζεύγος αντικειμένων μεταξύ δύο συστάδων, το οποίο ενώνει συστάδες με τα λιγότερο απομακρυσμένα ακρότατα όρια, έχοντας την τάση να εμποδίζει το σχηματισμό αλυσοειδών συστάδων.
- **Απλή ή κεντροειδής σύνδεση:** Επιλέγονται τα μέσα δύο ομάδων. Αυτό φαίνεται να είναι η πιο λογική επιλογή, αν και περιλαμβάνει περισσότερους υπολογισμούς.
- **Ολοκληρωμένη σύνδεση, διακύμανση (μέθοδος Ward):** Επιλέγεται η αύξηση της διακύμανσης δύο συνδεδεμένων συστάδων, σε σχέση με τη συνδυασμένη διακύμανση των δύο συστάδων ξεχωριστά. Αυτό απαιτεί συμπληρωτικούς υπολογισμούς των συνολικών διακυμάνσεων των δεδομένων.
- **Ολοκληρωμένη σύνδεση, διακύμανση (K-means):** Χρησιμοποιεί το ίδιο μέτρο ομοιότητας όπως η μέθοδος Ward, με τη διαφορά ότι σε κάθε πέρασμα, ολόκληρη η συστάδα αναπροσδιορίζεται γύρω από βελτιστοποιημένα κέντρα βάρους.

4ο βήμα: Αλγόριθμοι. Υπάρχουν πολλές μέθοδοι περιγραφής ομοειδών αντικειμένων, αλλά μόνο ελάχιστες είναι βασικά διαφορετικές. Αναφέρονται τρεις βασικοί αλγόριθμοι, όπως: η ανομοιογενής (agglomerative) μέθοδος, η διαιρετική (devicive) μέθοδος και η μεταγωγική (switching) μέθοδος.

11.2.2.5. Μέθοδοι συσταδοποίησης

Αναφέρονται επιγραμματικά, χωρίς τεχνικές λεπτομέρειες και μαθηματικούς όρους, οι μέθοδοι συσταδοποίησης που χρησιμοποιούν διαφορετικούς αλγόριθμους, διαφορετικά μέτρα ομοιότητας και κριτήρια ομοιότητας:

- **Ομαδοποίηση συγχώνευσης.**
- **Διαδοχική και Κ - μέση ομαδοποίηση.**
- **Διαιρετική ομαδοποίηση.**

11.2.3. Ανάλυση και ερμηνεία εικόνας

Η μεθοδολογία επεξεργασίας μιας εικόνας βασίζεται σε δύο βασικά βήματα, την **ανάλυση** και την **ερμηνεία**. Οι δύο αυτές μέθοδοι διαφέρουν μεταξύ τους, γιατί η ανάλυση είναι ο διαχωρισμός ή διάσπαση ενός συνόλου στα τμήματά του και η ερμηνεία, που ακολουθεί την ανάλυση, είναι η επεξήγηση της σημασίας κάθε τμήματος της εικόνας αναφορικά με το σύνολό της και ο συσχετισμός των φασματικών και χωρικών ιδιοτήτων των διαφόρων χαρακτηριστικών δεδομένων που την αποτελούν. Η ανάλυση δορυφορικών εικόνων είναι η διαδικασία διάκρισης των φυσικών και ανθρωπογενών χαρακτηριστικών που είναι αποτυπωμένα σε αυτές. Η αναγνώριση και καταγραφή των χαρακτηριστικών αυτών ονομάζεται ποιοτική ανάλυση, ενώ ο καθορισμός της γεωμετρίας τους στο χώρο ονομάζεται ποσοτική ανάλυση. Η ποιοτική ανάλυση λέγεται **φωτοερμηνεία,** ενώ η ποσοτική **φωτογραμμετρία**. Στη φωτοερμηνεία σημαντικό ρόλο παίζουν οι υποκειμενικοί παράγοντες, όπως η οξύτητα όρασης και αντίληψης του ερευνητή. Σημαντικό επίσης ρόλο παίζουν οι αντικειμενικοί παράγοντες, όπως είναι η ποιότητα των δεδομένων, καθώς και η τεχνική που ακολουθείται.

11.2.3.1. Στοιχεία εικόνας

Η ποιοτική ανάλυση βασίζεται σε διαγνωστικά κριτήρια. Στο Σχήμα 11.9 παρουσιάζεται μια ιεράρχηση των στοιχείων εικόνας, ανάλογα με το βαθμό και το επίπεδο πολυπλοκότητας. Τα στοιχεία αυτά αποτελούν και τα διαγνωστικά κριτήρια, που περιγράφονται ανά επίπεδο στη συνέχεια.



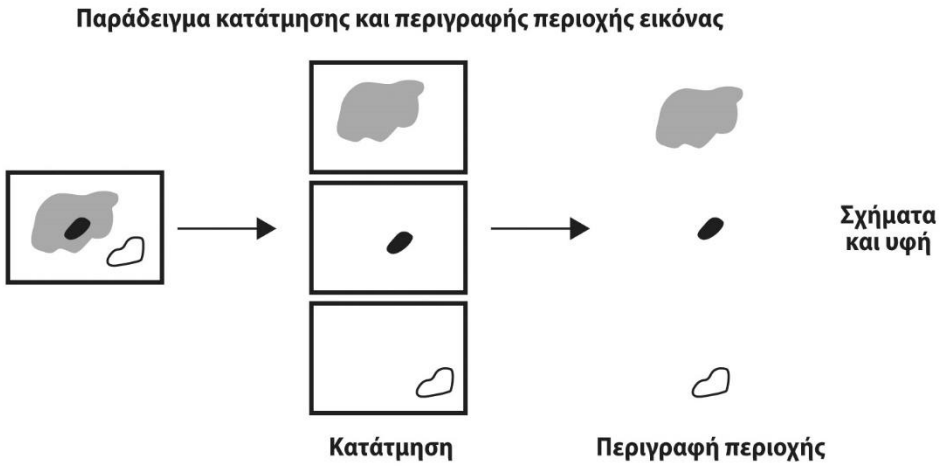
Σχήμα 11.9. *Πρωταρχική διάταξη ανάλυσης εικόνας.*

- **Φωτογραφικός τόνος**: Επηρεάζει το σχετικό ποσό του φωτός που ανακλάται από ένα αντικείμενο και το χρόνο λήψης της εικόνας. Στην εικόνα μεταφράζεται σε αποχρώσεις του γκρι. Εξαρτάται από την ώρα, την εποχή και τις καιρικές συνθήκες. Επειδή η ώρα λήψης δορυφορικών εικόνων είναι πάντοτε η ίδια, διαφορές στις εικόνες υπάρχουν μόνο λόγω εποχικών διαφοροποιήσεων. Ο τόνος αναφέρεται στη σχετική φωτεινότητα ή χρωματική απόδοση ενός αντικειμένου στην εικόνα. Γενικά, είναι το βασικό στοιχείο διάκρισης χαρακτηριστικών. Οι μεταβολές στον τόνο επιτρέπουν στα υπόλοιπα κριτήρια αναγνώρισης να γίνουν ορατά.
- **Χρώμα**: Εκφράζεται με διάφορες αποχρώσεις χρωμάτων στις έγχρωμες δορυφορικές εικόνες και με διαβαθμίσεις του γκρι στις ασπρόμαυρες εικόνες.
- **Υφή**: Αναφέρεται στην κατανομή και συχνότητα των τονικών μεταβολών σε συγκεκριμένες περιοχές της εικόνας. Οι διαβαθμίσεις του γκρι προκύπτουν επειδή τα διάφορα αντικείμενα ανακλούν ή εκπέμπουν ακτινοβολία σε διαφορετικά μήκη κύματος.
- **Σχήμα**: Αναφέρεται στο γενικό σχήμα, τη δομή και το περίγραμμα μεμονωμένων αντικειμένων. Αποτελεί ένα ιδιαίτερο κριτήριο ορισμένων φυσικών και ανθρωπογενών χαρακτηριστικών.
- **Μέγεθος**: Σε πολλές περιπτώσεις το μήκος, το πλάτος και ο όγκος είναι σημαντικά κριτήρια αναγνώρισης αντικειμένων, φυσικών και μη. Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα υπολογισμού της κλίμακας πολλών αντικειμένων εάν συγκρίνονται με άλλα αντικείμενα γνωστής κλίμακας, όπως είναι οι δρόμοι.
- **Διάταξη (pattern)**: Αναφέρεται στη χωρική διευθέτηση ευδιάκριτων αντικειμένων. Επαναλαμβανόμενες διευθετήσεις φυσικών και ανθρωπογενών χαρακτηριστικών είναι συνήθεις. Τυπικά, μια επανάληψη παρόμοιων τόνων και υφών θα δημιουργήσει μια ξεχωριστή διάταξη. Αυτά τα χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν γεωργικές δραστηριότητες, χαρακτηριστικά του εδάφους κτλ. Το αστικό οδικό δίκτυο με τα σπίτια εκατέρωθεν είναι ένα συγκεκριμένο παράδειγμα διάταξης.
- **Ύψος:** Τα σχετικά ύψη και τα τρισδιάστατα γεωμετρικά σχήματα αντικειμένων παρέχουν συχνά ερμηνείες για την ταυτότητά τους.
- **Σκιές:** Μπορεί να βοηθούν ή όχι στην ερμηνεία, καθόσον δείχνουν σιλουέτες, αλλά μπορεί να αποκρύπτουν λεπτομέρειες.

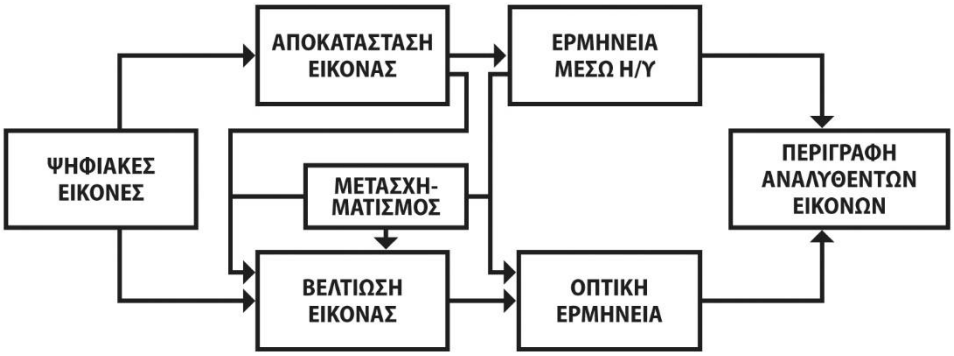
- **Θέση και σύνδεση:** Αντιπροσωπεύουν στοιχεία εικόνας υψηλότερης τάξης. Η θέση (τοποθεσία) των αντικειμένων σε σχέση με άλλα αντικείμενα ή με τα χαρακτηριστικά του ανάγλυφου βοηθά συνήθως στη μείωση της αβεβαιότητας κατά την ερμηνεία της εικόνας.

11.2.3.2. Διαδικασίες ανάλυσης της εικόνας

Στο Σχήμα 11.10α παρουσιάζεται η αλληλουχία των βημάτων ανάλυσης της εικόνας, που περιλαμβάνει κυρίως βήματα προεπεξεργασίας. Επίσης, στο Σχήμα 11.10β παρουσιάζεται ένα παράδειγμα, στο οποίο απεικονίζονται τα βήματα των σταδίων κατάτμησης και περιγραφής περιοχής. Τέλος, στο Σχήμα 11.11 παρουσιάζεται η ροή της διαδικασίας επεξεργασίας της εικόνας, που οδηγεί στην ανάλυση και την ερμηνεία της.



Σχήμα 11.10. *Παράδειγμα κατάτμησης και περιγραφής περιοχής εικόνας.*



Σχήμα 11.11. *Επεξεργασία εικόνας για ερμηνεία μέσω Η/Υ.*

11.3. Αγρομετεωρολογικές εφαρμογές τηλεπισκόπησης

Οι κλασικές εφαρμογές τηλεπισκόπησης στη γεωργία εμπίπτουν στις εξής τρεις ευρείες κατηγορίες (Steven & Jaggard, 1995):

- την ταξινόμηση χρήσεων γης και εδαφών και τη χαρτογράφηση καλλιεργειών,
- την παρακολούθηση και την πρόγνωση της γεωργικής παραγωγής,
- τον προσδιορισμό και την εκτίμηση της καταπόνησης των καλλιεργειών και, γενικά, της βλάστησης.

Αντίστοιχα, η χρονολογική εξέλιξη της τηλεπισκόπησης ταξινομείται στις εξής τρεις, επίσης ευρείες κατηγορίες:

- την αρχική περίοδο, της δεκαετίας του 1970, που χαρακτηρίζεται από απλές ποιοτικές παρατηρήσεις, διαφορές στη χρωματικότητα και εκτιμήσεις μέσω παρεμβολής ή επέκτασης,
- τη δεύτερη περίοδο, από τη δεκαετία του 1980, οπότε και εμφανίζονται ποσοτικές αναλύσεις χρήσεων γης, γεωμετρικά σχήματα, γεωγραφικά σημεία, έκταση, μήκος των χαρακτηριστικών, καθώς και ποσοστοποίηση της καλυπτόμενης έκτασης από διάφορες κατηγορίες εδαφοκάλυψης,
- την τρίτη περίοδο, που αρχίζει από τη δεκαετία του 1990 και συνεχίζεται μέχρι σήμερα, και χαρακτηρίζεται από άμεσες ποσοτικές εκτιμήσεις περιβαλλοντικών, αγρομετεωρολογικών και υδρολογικών παραμέτρων, αρχικά με μεθόδους χωρικής συσχέτισης (Dalezios, 2008). Ουσιαστικά, από αυτή την περίοδο αναπτύσσονται και οι εφαρμογές τηλεπισκόπησης στην αγρομετεωρολογική ανάλυση.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται εφαρμογές αγρομετεωρολογικής τηλεπισκόπησης, όπως μέθοδοι εκτίμησης θερμοκρασίας επιφάνειας ξηράς και θάλασσας, δείκτες βλάστησης, ισοζύγιο ενέργειας και νερού, εδαφική υγρασία, έλλειμμα νερού, ταξινόμηση χρήσεων γης και καλλιεργειών, παρακολούθηση και εκτίμηση βιομάζας και γεωργικής παραγωγής, ποσοτική εκτίμηση και παρακολούθηση περιβαλλοντικών κινδύνων, καθώς και γεωργία ακριβείας.

11.3.1. Θερμοκρασία επιφάνειας ξηράς και θάλασσας

Τα μοντέλα δύο καναλιών (bichannel) (Price, 1980) δίνουν την θερμοκρασία επιφάνειας, Ts, ως γραμμικό συνδυασμό των θερμοκρασιών λαμπρότητας (brightness temperature), Τι, και Tj, που μετριούνται από δύο γειτονικά θερμικά κανάλια ί και j:

$$T_s = A_o + A_1T_j + A_2T_j \text{ , (11.3)}$$

όπου τα A_o, Αι και A_2 είναι τοπικοί συντελεστές, που εξαρτώνται από τις φασματικές ικανότητες εκπομπής της επιφάνειας. Η ακρίβεια του Ts εξαρτάται από την ορθή επιλογή των συντελεστών A_o, Αι και A_2.

11.3.1.1. Υπολογισμός της θερμοκρασίας επιφάνειας ξηράς

Ο υπολογισμός της θερμοκρασίας επιφάνειας ξηράς (Land Surface Temperature/LST) είναι πολύπλοκος για τρεις κυρίως λόγους:

- Η επιφανειακή εκπομπή αφορά επιφάνειες βραχώδεις, γυμνού εδάφους, έρημες αμμώδεις, καθώς και περιοχές με φυτοκάλυψη. Η ικανότητα εκπομπής της επιφάνειας παρουσιάζει μεταβλητότητα. Κατά συνέπεια, για κάθε εικονοστοιχείο, υπάρχουν δύο άγνωστοι, η θερμοκρασία και η ικανότητα εκπομπής, ενώ στην επιφάνεια της θάλασσας υπάρχει μόνο η θερμοκρασία.
- Η επιφανειακή θερμοκρασία δεν είναι ομογενής σε ένα εικονοστοιχείο σε σχέση με την αντίστοιχη στη θάλασσα. Ακόμα και επιφάνειες εδάφους χωρίς βλάστηση, εκτός από κάποιες ερήμους, είναι συχνά πολύ ανομοιογενείς. Σε επιφάνεια με φυτοκάλυψη είναι δύσκολος ο καθορισμός της θερμοκρασίας επιφάνειας.
- Η διαφορά μεταξύ της επιφανειακής θερμοκρασίας του εδάφους και της θερμοκρασίας του αέρα κοντά στο έδαφος είναι μεγαλύτερη στην ξηρά απ' ό,τι στη θάλασσα. Οι θερμοκρασίες του αέρα ακριβώς πάνω από τη θάλασσα είναι αρκετά διαφορετικές από τις επιφανειακές θερμοκρασίες του εδάφους, και είναι δύσκολη η χρήση της μεθόδου διαχωρισμού παραθύρων, που εφαρμόζεται ευρέως στην επιφάνεια της θάλασσας.

Η βάση των τεχνικών διαχωρισμού παραθύρων (split-window) για τον υπολογισμό της θερμότητας είναι η διαφορά στην ατμοσφαιρική απορρόφηση σε δύο διαφορετικά μήκη κύματος. Διάφοροι μέθοδοι διαχωρισμού έχουν αναπτυχθεί, σύμφωνα με τις οποίες η θερμοκρασία επιφάνειας, Ts, εκφράζεται σε σχέση με έναν γραμμικό συνδυασμό των ραδιομετρικών θερμοκρασιών στα κανάλια 4 (11 μm) και 5 (l2 μm) του AVHRR/2 (Πίνακας 11.3). Οι Becker και Li (1995) έχουν εισάγει στη μέθοδο διαχωρισμού παραθύρων διόρθωση και για την περιεχόμενη υγρασία στην ατμόσφαιρα, W(gr/m^2), κατά μήκος της διαδρομής μεταξύ του στόχου και του

αισθητήρα και την οπτική γωνία, θ. Οι συντελεστές A_o, Αι και A_2 έχουν υπολογιστεί με το λογισμικό Lowtran-7. Το αποτέλεσμα είναι η σχέση:

$$T_s = A_0 + P\frac{T_4 + T_5}{2} + M\frac{T_4 + T_5}{2}, \text{ (11.4)}$$

όπου P = 1,0290 + (0,2106 – 0,0307 cosθW)(1- ε_4) - (0,3696 – 0,0737W)(ε_4 - ε_s),

M = 4,25 + 0,56W + (3,41 + 1,59W)(1- ε_4) - (23,85 – 3,89W)(ε_4 - ε_s),

$$W = \frac{0,259}{\cos\Theta} - 11,352\ln(\frac{\sigma_{45}}{\sigma_{44}}) - 11,649\cos\Theta[\ln(\frac{\sigma_{45}}{\sigma_{44}})]^2, \; A_o = -7,49 - 0,407W.$$

Το περιεχόμενο υδρατμών στην ατμόσφαιρα, W (g/cm^2), κατά μήκος της διαδρομής μεταξύ του στόχου και του αισθητήρα, με οπτική γωνία θ, μπορεί να υπολογιστεί από δορυφορικές μετρήσεις των διακυμάνσεων (σ_{45}) και (σ_{44}) της θερμοκρασίας λαμπρότητας, από τα κανάλια 4 και 5 του AVHRR, αντίστοιχα.

11.3.1.2. Υπολογισμός της θερμοκρασίας της επιφάνειας της θάλασσας

Ο υπολογισμός της θερμοκρασίας της επιφάνειας της θάλασσας (Sea Surface Temperature/SST) βασίζεται σε αλγόριθμους που χρησιμοποιούν τα θερμικά κανάλια (π.χ. 3, 4 και 5 για NOAA-AVHRR, 6 για LANDSAT TM), για την αναγωγή των τιμών εικονοστοιχείων (Pixel Values/PV) της εικόνας σε βαθμούς Κελσίου. Συνήθως, οι αλγόριθμοι δίνουν τη θερμοκρασία της επιφάνειας νερού με μεγαλύτερη ακρίβεια σε σύγκριση με αυτή του εδάφους. Με τη χρήση των πληροφοριών βαθμονόμησης (calibration infoπnation), που συνοδεύουν τα δεδομένα του δορυφόρου, υπολογίζονται οι φυσικές τιμές ανάκλασης της ηλιακής ακτινοβολίας από τη γήινη επιφάνεια (Albedo) και της θερμοκρασίας. Οι συντελεστές βαθμονόμησης υπολογίζονται από ένα γραμμικό συνδυασμό, μετατρέποντας τις PV σε τιμές ενέργειας για τα θερμικά κανάλια και σε τιμές ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας για τα ορατά κανάλια, αντίστοιχα. Για κάθε δίαυλο (band) υπάρχει τιμή για κλίση (slope) και παρεμπόδιση (intercept).

Οι PV των θερμικών διαύλων μετατρέπονται σε ενέργεια με τη σχέση:

$$E = S * PV + I, \text{ (11.5)}$$

όπου Ε είναι η ενέργεια σε milliwatts/m^2*steradians*cm^{-1}, PV η τιμή του εικονοστοιχείου, S η κλίση σε χιλιοβάτ ανά τετραγωνικό μέτρο (milliwatts/m^2*steradians*cm^{-1}) και Ι η παρεμπόδιση στις ίδιες μονάδες (milliwatts/m^2*steradians*cm^{-1}).

Στη συνέχεια, με την εξίσωση του Planck μπορεί να μετατραπεί η ενέργεια σε θερμοκρασία λαμπρότητας:

$$T = \frac{C_2\lambda}{\ln(\frac{C_1\lambda^{-5}}{W} + 1)}, \text{ (11.6)}$$

όπου το Τ είναι σε βαθμούς Kelvin.

Για τα κανάλια 3, 4 και 5 του NOAA-AVHRR, χρησιμοποιούνται συντελεστές για τη δημιουργία εικόνας με τιμές 270-310 Κ (–3-37°C). Τιμές εκτός αυτού του διαστήματος παίρνουν την τιμή 0. Η εικόνα που προκύπτει έχει ως ελάχιστο το 4 (–3° C) και βήματα των 0,2 βαθμών ανά PV. Για τον υπολογισμό της SST, χρησιμοποιείται συνδυασμός των καναλιών 4 και 5, με βάση τη μέθοδο McClain (εγχειρίδιο NOAA, 1995). Η κλίμακα τίθεται έτσι ώστε οι 10° C να αντιστοιχούν στην τιμή 50 εικονοστοιχείων και η αύξηση να είναι 0,1 βαθμοί ανά επίπεδο. Με αυτό τον τρόπο, λαμβάνονται θερμοκρασίες από 1 έως 30 βαθμούς. Ο αλγόριθμος υπολογίζει την απολαβή (gain) και την παρεμπόδιση (intercept) για θερμικά κανάλια, με στόχο να εξαχθεί η αντιστοιχία μεταξύ PV και ακτινοβολίας σε πίνακα. Στη συνέχεια, οι ακτινοβολίες μετασχηματίζονται σε θερμότητα, σύμφωνα με το νόμο του Planck, και κατόπιν διορθώνονται για τη μη γραμμικότητα του αισθητήρα. Η ακρίβεια της θερμοκρασίας μπορεί να φτάσει τους 0,50° C και εξαρτάται από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες, τον άνεμο, την εγγύτητα της στεριάς, τους υδρατμούς στην ατμόσφαιρα και τη ρύπανση.

Αλγόριθμοι	Αναφορές
$T_s = 1.274 + PA\frac{T_4+T_5}{2} + MA\frac{T_4+T_5}{2}$	Becker & Li, 1990b*
$T_s = 3{,}45\frac{T_4-T_0}{\varepsilon_4} - 2{,}45\frac{T_5-T_0}{\varepsilon_5} + 40\frac{1-\varepsilon_4}{\varepsilon_4} + T_0$	Prata & Platt, 1991
$T_s = [T_4 + 3{,}33(T_4-T_5)][\frac{5{,}5-\varepsilon_4}{4{,}5}] + 0{,}75T_5(\varepsilon_4-\varepsilon_5)$	Price, 1984
$T_s = T_4 + 3{,}00(T_4-T_5) + 51{,}57 - 52{,}45\varepsilon$	Ulivieri et al., 1985
$T_s = T_4 + 1{,}8(T_4-T_5) + 48(1-\varepsilon) - 75(\varepsilon_4-\varepsilon_5)$	Ulivieri et al., 1994
$T_s = T_4 + 1{,}06(T_4-T_5) + 0{,}46(T_4-T_5)^2 + 53(1-\varepsilon_4) - 53(\varepsilon_4-\varepsilon_5)$	Sobrino et al., 1993
$T_s = T_4 + A(T_4-T_5) + B$	Sobrino et al., 1993**
$T_s = 1{,}0162T_4 + 2{,}657(T_4-T_5) + 0{,}526(\sec\theta - 1)(T_4-T_5) - 4{,}58$	NESDIS (May et al., 1992)

$* PA = 1 + 0{,}15616\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} - 0{,}482\frac{\varepsilon_4-\varepsilon_5}{\varepsilon^2}, MA = 6{,}26 + 3{,}98\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} + 38{,}33\frac{\varepsilon_4-\varepsilon_5}{\varepsilon^2}$

$** A = 0{,}349W + 1{,}320 + (1{,}385W - 0{,}204)(1-\varepsilon_4) + (1{,}056W - 10{,}532)(\varepsilon_4-\varepsilon_5)$

$B = (1-\varepsilon_4)/\varepsilon_4 T_4[-0{,}146W + 0{,}561 + (0{,}575W - 1{,}966)(\varepsilon_4-\varepsilon_5)]$

$12(1-\varepsilon_5)/\varepsilon_5 T_5[-0{,}95W + 0{,}320 + (0{,}597W - 1{,}916)(\varepsilon_4-\varepsilon_5)]$

Πίνακας 11.3. *Σύνοψη αλγόριθμων διαχωρισμού παραθύρων (T_s T_4, T_5, σε ^0K και T_o=273.15^0K, $\varepsilon=(\varepsilon_4+\varepsilon_5)/2$).*

11.3.2. Δείκτες βλάστησης

Η διαφορετική ανακλαστικότητα της πράσινης βλάστησης σε τμήματα του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (ορατό και κοντινό υπέρυθρο) παρέχει μια καινοτομική μέθοδο παρακολούθησης της επίγειας βλάστησης από το διάστημα. Ειδικότερα, η φασματική συμπεριφορά της φυτικής κάλυψης στο ορατό (0,4-0,7 μm) και στο κοντινό υπέρυθρο (0,74-1,1 μm, 1,3-2,5 μm) προσφέρει τη δυνατότητα παρακολούθησης από το διάστημα των μεταβολών στα διάφορα στάδια καλλιεργούμενων και μη φυτών, λαμβάνοντας όμως υπόψη και την αντίστοιχη συμπεριφορά του γύρω μικροπεριβάλλοντος, όπως του εδάφους. Από το ορατό τμήμα του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας είναι δυνατόν να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με το ρυθμό φωτοσύνθεσης, ενώ από το κοντινό υπέρυθρο συμπεράσματα σχετικά με την πυκνότητα της χλωροφύλλης και με το ποσό του φυλλώματος στη φυτική μάζα, καθώς και με το περιεχόμενο νερό στα φύλλα, που συνδέεται άμεσα με το ρυθμό διαπνοής και, κατ' επέκταση, με την επίδρασή του στη φυσιολογική διεργασία της φωτοσύνθεσης. Σύμφωνα με τα παραπάνω, τέσσερις είναι οι φασματικές περιοχές που ενδιαφέρουν περισσότερο, διότι σε αυτές κυριαρχούν πολύ σημαντικά φυσιολογικά φαινόμενα, όπως φαίνεται στον Πίνακα 11.4.

1	Απορρόφηση ακτινοβολίας από καροτενοειδή και χλωροφύλλη.	μέχρι 0,5 μm
2	Ισχυρή απορρόφηση ακτινοβολίας από χλωροφύλλη.	0,62-0,7 μm
3	Ανάκλαση ακτινοβολίας από τα κυτταρικά τοιχώματα κυττάρων του μεσοφύλλου.	0,74-1,1 μm
4	Απορρόφηση ακτινοβολίας από το νερό.	1,3-2,5 μm

Πίνακας 11.4. *Φασματικές περιοχές φυσιολογικών διεργασιών φυτικών κυττάρων.*

Δείκτης βλάστησης κανονικοποιημένης διαφοράς (NDVI)

Για την παρακολούθηση της βλάστησης, χρησιμοποιούνται δύο είδη δορυφορικών δεδομένων, δηλαδή εικόνες υψηλής διακριτικής ικανότητας, με χαμηλή συχνότητα επανάληψης όπως SPOT και Landsat, καθώς και εικόνες χαμηλής διακριτικής ικανότητας, με υψηλή συχνότητα επανάληψης, όπως NOAA/AVHRR. Χρησιμοποιώντας εικόνες SPOT και Landsat, λαμβάνεται κυρίως ποιοτική πληροφορία, που μπορεί να είναι συμπληρωματική σε άλλες πηγές, με περισσότερο ακριβείς πληροφορίες. Επίσης, μία από τις σημαντικότερες αναπτύξεις του Landsat Πολυφασματικού Σαρωτή (Multispectral Scanner/MSS) είναι η χρήση του ορατού και του κοντινού υπέρυθρου, κανάλια 5 και 7, για την παρακολούθηση της υγείας και της ανάπτυξης της βλάστησης και των καλλιεργειών.

Ωστόσο, δεδομένα μετεωρολογικών δορυφόρων πολικής τροχιάς της σειράς NOAA/AVHRR παρέχουν εικόνες χαμηλής διακριτικής ικανότητας (1 x 1 km^2 περίπου), με υψηλή συχνότητα επανάληψης (τουλάχιστον δυο φορές ημερησίως). Ο NOAA διαθέτει ακτινόμετρο υψηλής ευκρίνειας (Advanced Very High Resolution Radiometer/AVHRR) και πέντε ζώνες φασματικών συχνοτήτων ορατού και υπέρυθρου. Το ορατό και το κοντινό υπέρυθρο κανάλι του AVHRR, τα κανάλια 1 και 2, έχουν φασματική απόκριση παρόμοια με τα κανάλια 5 και 7 του MSS. Το πλεονέκτημα των δορυφόρων NOAA, για την παρακολούθηση πράσινης βλάστησης, είναι η παροχή ημερήσιας παρατήρησης, ενώ ο Landsat έχει ένα χρόνο επανάληψης της τάξης των 18 ημερών. Διάφοροι μαθηματικοί συνδυασμοί των καναλιών 1 και 2 έχουν βρεθεί, για να είναι ευαίσθητοι δείκτες στην ύπαρξη πράσινης βλάστησης. Υπάρχουν πολυάριθμοι δείκτες, που έχουν προταθεί και μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη θέση του δείκτη βλάστησης κανονικοποιημένης διαφοράς (Normalized Difference Vegetation Index/NDVI) (Jackson et al., 1986). Ο Πίνακας 11.5 είναι ενδεικτικός, όμως περιλαμβάνει και δείκτες βλάστησης που προέρχονται από πρόσφατους δορυφόρους πολύ υψηλής ευκρίνειας (Δαλέζιος, 2014).

1	V I = Ch1 – Ch2
2	NDVI = (Ch1 – Ch2)/(Ch1 + Ch2)
3	NIR/RED = NIR/RED
4	Red Edge = RED/RED. edge
5	Red Edge NDVI = (NIR – RED.edge) / (NIR + RED.edge)
6	Green NDVI = (NIR – GREEN) / (NIR + GREEN)
7	Chlorophyl Index 1 = (NIR/GREEN) – 1
8	Chlorophyl Index 2 = (NIR/RED. Edge) – 1

Πίνακας 11.5. *Ενδεικτικοί δείκτες βλάστησης*

Ο NDVI προτιμάται για ολική φυτική παρακολούθηση, διότι εν μέρει αντισταθμίζει τις αλλαγές των συνθηκών φωτισμού, την κλίση του εδάφους και τον προσανατολισμό θέασης. Επίσης τα νέφη, το νερό και το χιόνι παρουσιάζουν μεγαλύτερη ανακλαστικότητα στο ορατό, παρά στο κοντινό υπέρυθρο και έχουν, συνεπώς, αρνητικό NDVI. Ακόμα, το γυμνό και το βραχώδες έδαφος δίνουν τιμές δείκτη βλάστησης κοντά στο μηδέν. Επιπλέον, ο NDVI αποτελεί μέτρο του βαθμού απορρόφησης από τη χλωροφύλλη σε μήκη κύματος του ερυθρού στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Συνεπώς, αποτελεί αξιόπιστο δείκτη της πυκνότητας της χλωροφύλλης στο φύλλο, καθώς και του ποσοστού πυκνότητας φυλλικής επιφάνειας στο έδαφος, και, κατ' επέκταση, αποτελεί αξιόπιστο μέτρο εκτίμησης της ξηρής φυτικής ουσίας (βιομάζας) σε διάφορα είδη φυτοκάλυψης.

Από τα παραπάνω, καθίσταται σαφές ότι ο NDVI είναι άρρηκτα συνδεδεμένος με την αύξηση και την ανάπτυξη των φυτών και πρακτικά εφαρμόσιμος, για την παρακολούθηση της επίγειας βλάστησης από το διάστημα. Η διαχρονική αύξηση της τιμής του NDVI κατά τη βλαστική περίοδο αντικατοπτρίζει τη βλαστική και αναπαραγωγική ανάπτυξη (ανθοφορία, καρποφορία), λόγω έντονης φωτοσυνθετικής δραστηριότητας, καθώς και την ικανοποιητική συσχέτιση με την τελική παραγωγή βιομάζας στο τέλος μιας βλαστικής περιόδου. Αντίθετα, βαθμιαία μείωση του NDVI υποδηλώνει καταπόνηση από έλλειψη νερού ή υπερβολικά υψηλές θερμοκρασίες για την εποχή ή για τα φυτά, που οδηγούν σε μείωση του ρυθμού φωτοσύνθεσης και, τελικά, σε ποιοτική και ποσοτική υποβάθμιση των φυτών. Οι τιμές του NDVI κυμαίνονται θεωρητικά από –1 έως +1, όπως εξάγεται από τη μαθηματική εξίσωση που τον ορίζει. Τιμές άνω του 0 υποδηλώνουν ύπαρξη πράσινης βλάστησης (χλωροφύλλης) ή γυμνού εδάφους (τιμές γύρω στο 0), ενώ κάτω του 0 δηλώνουν ύπαρξη νερού, χιονιού, πάγου και νεφών. Ενδεικτικές τιμές παρουσιάζονται στον Πίνακα 11.6.

	Τύπος Εδαφοκάλυψης	NDVI Κλίμακα –1 έως +1	NDVI Κλίμακα 0 - 255
1	Πυκνή βλάστηση	0,500 =< NDVI =< 1	210 =< NDVI =<255
2	Πράσινη βλάστηση	0,140 =< NDVI < 0,500	118 =< NDVI < 210
3	Αραιή βλάστηση	0,090 =< NDVI < 0,140	105 =< NDVI <118
4	Γυμνό έδαφος	0,025 =< NDVI < 0,090	88 =< NDVI<105
5	Νέφη	0,002 =< NDVI < 0,025	83 =< NDVI < 88
6	Χιόνι και πάγος	-0,046=< NDVI < 0,002	70 =< NDVI < 83
7	Νερό	-1 =< NDVI < -0,046	0 =< NDVI < 70

Πίνακας 11.6. *Ενδεικτικές τιμές NDVI σε διάφορους τύπους εδαφοκάλυψης.*

11.3.3. Υδατικό και ενεργειακό ισοζύγιο – Θερμική αδράνεια

Το ισοζύγιο ενέργειας μιας επιφάνειας μπορεί να παρασταθεί από την εξίσωση:

$R_n – ETo – J – G – P = 0$ [Watts m^{-2}], (11.7)

όπου R_n είναι η καθαρή πυκνότητα ροής ακτινοβολίας (Next Radiation), ETo η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς, J η πυκνότητα ροής της θερμότητας προς το έδαφος (Soil Heat Flux) και P η πυκνότητα ροής της ακτινοβολίας που καταναλίσκεται στην φωτοσύνθεση. Η μεταβλητή P είναι πολύ μικρή και θεωρείται αμελητέα.

Η συμβολή της τηλεπισκόπησης στην εκτίμηση του ισοζυγίου ενέργειας στην επιφάνεια της Γης συνίσταται κυρίως στη χρήση της θερμοκρασίας της επιφάνειας επαφής (skin temperature). Παρά τη σημαντική πρόοδο στις μεθόδους και τις τεχνικές, υπάρχουν ακόμη σοβαροί περιορισμοί στα αποτελέσματα δορυφορικών μετρήσεων, τόσο για τις ροές επιφάνειας, όσο και για την υγρασία εδάφους, που πρέπει να βελτιωθούν.

Για μια επιφάνεια με βλάστηση, η σύνθετη εξίσωση του ισοζυγίου ενέργειας μπορεί να γραφεί (Brutsaert, 1982):

$$R_n - LE - H - G - L_p F_p + A_h = \frac{\theta Q}{\theta t}, \text{ (11.8)}$$

όπου H είναι η πυκνότητα ροής της αισθητής θερμότητας, LE η πυκνότητα ροής της λανθάνουσας θερμότητας, G η πυκνότητα ροής της θερμότητας του εδάφους, L_n ο θερμικός συντελεστής μετατροπής του CO_2, F_p η ειδική ροή του CO_2, A_h η οριζόντια ενέργεια μεταφοράς και Q η αποθηκευμένη ενέργεια στο χρόνο t.

Η απορρόφηση ενέργειας από φωτοσύνθεση L_pF_p, είναι συνήθως μικρότερη από 1% της ολικής ακτινοβολίας, βρίσκεται μέσα στα όρια του πειραματικού σφάλματος και δεν λαμβάνεται υπόψη. Ο ρυθμός αποθήκευσης ενέργειας είναι σημαντικός στην ανατολή και δύση του ηλίου, όταν η καθαρή ακτινοβολία είναι πολύ μικρή, αλλά μπορεί να παραλειφθεί στη διάρκεια της μέρας. Όταν η τροχιά του δορυφόρου είναι νωρίς το απόγευμα, απουσία οριζόντιας μεταφοράς ενέργειας, η εξίσωση του επιφανειακού ισοζυγίου ενέργειας ρυθμίζεται κυρίως από την καθαρή ακτινοβολία, τη ροή εδάφους, τη λανθάνουσα και την αισθητή ροή.

Έτσι, η εξίσωση του ισοζυγίου ενέργειας μπορεί να γραφεί:

$R_n = G + H + LE$, (11.9)

όπου τα R_n, G και H υπολογίζονται από εμπειρικούς τύπους, με τη χρήση δορυφορικών και επίγειων παρατηρήσεων και το LE εκτιμάται ως υπολειπόμενος όρος της εξίσωσης (11.9).

Η θερμική υπέρυθρη θερμοκρασία χρησιμοποιείται συνήθως στον υπολογισμό της H, που οδηγεί σε υπερεκτίμηση της H σε ασταθείς συνθήκες. Εναλλακτικά, η αεροδυναμική θερμοκρασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη θέση της θερμοκρασίας επιφάνειας, αλλά αυτό οδηγεί σε συστηματικά σφάλματα στην H, που χρειάζονται προσαρμογές (Smith et al., 1989).

Στο πρόγραμμα FIFE έχει εξεταστεί ο τρόπος με τον οποίο η βλάστηση και το Ατμοσφαιρικό Οριακό Στρώμα (ΑΟΣ) αλληλοεπιδρούν, για να επηρεάσουν τον καιρό και το κλίμα, καθώς και η χρήση τηλεπισκόπησης στην παρακολούθηση των συνιστωσών του ενεργειακού ισοζυγίου στην επιφάνεια. Ραδιομετρικές θερμοκρασίες που

έχουν εκτιμηθεί με τηλεπισκόπηση παρουσιάζουν υψηλή συσχέτιση με αεροδυναμικές θερμοκρασίες της βλάστησης, παρ' όλο που η τηλεπισκοπική εκτίμηση του Η δεν είναι ακόμη ικανοποιητική. Η σκέδαση και η απορρόφηση της ατμόσφαιρας έχουν μεγάλη επίδραση στις δορυφορικές μετρήσεις της ακτινοβολίας της επιφάνειας. Έχει αναπτυχθεί σχέση μεταξύ της ροής θερμότητας εδάφους και της καθαρής ακτινοβολίας (Novak & Black, 1983), ενώ και η ροή θερμότητας του εδάφους αποτελεί συνάρτηση του κλάσματος που μετριέται από τον NDVI (Daughtry et al., 1990).

Το πιο κρίσιμο μειονέκτημα στη χρήση δορυφορικών μετρήσεων της LST, για τον ποσοτικό υπολογισμό του Επιφανειακού Ενεργειακού Ισοζυγίου (EEI) ή για τον υπολογισμό της υγρασίας του εδάφους, έχει σχέση με την ύπαρξη πολλών πιθανών θερμοκρασιών επιφάνειας για ένα δεδομένο επιφανειακό ισοζύγιο, οι οποίες μπορούν να μετρηθούν με τηλεπισκόπηση. Από τις πιο μεγάλες προκλήσεις στη χρήση της τηλεπισκόπησης για τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας επιφάνειας επαφής για το EEI και την υγρασίας εδάφους είναι η σχέση της μετρούμενης θερμοκρασίας με την αεροδυναμική θερμοκρασία, και αυτές σε σχέση με τη μεταφορά θερμότητας από μια σύνθετη επιφάνεια με γυμνό έδαφος και βλάστηση. Για το λόγο αυτό, αναζητούνται συμπληρωματικά δεδομένα. Για παράδειγμα, έχει αναπτυχθεί ταυτόχρονη εκτίμηση της επιφανειακής θερμοκρασίας της επιφάνειας επαφής και του NDVI (Carlson & Gillies,1991). Επίσης, έχει αναπτυχθεί μια μέθοδος για τον υπολογισμό ενός EEI στην οποία χρησιμοποιείται η ημερήσια αλλαγή του βάθους του ΑΟΣ, σε συνδυασμό με τις επιφανειακές θερμοκρασίες, που μετριούνται από γεωστάσιμους δορυφόρους (Diak & Whipple, 1993). Επίσης, χρησιμοποιώντας τη σχέση μεταξύ του δείκτη φυλλικής επιφάνειας (Leaf Area Index/LAI) και του κλάσματος της μεσημβρινής ροής θερμότητας εδάφους προς την καθαρή ακτινοβολία (G/R_n) και δύο δείκτες βλάστησης (VI), έχουν αναπτυχθεί εξισώσεις που περιγράφουν τις σχέσεις μεταξύ G/R_n και VI (Kustas et al., 1993) και δείχνουν ότι οι μη γραμμικές προσεγγίσεις είναι πιο κατάλληλες, εκτός από την περίπτωση του NDVI, για την οποία γραμμικές σχέσεις φαίνεται να ταιριάζουν με τα δεδομένα.

Θερμική αδράνεια

Η θερμική αδράνεια είναι μια φυσική μεταβλητή που περιγράφει την τάση σε διακυμάνσεις της θερμοκρασίας. Υψηλές τιμές θερμικής αδράνειας οδηγούν σε μικρές μεταβολές της θερμοκρασίας, για δεδομένη μεταφορά θερμότητας, ενώ χαμηλές τιμές θερμικής αδράνειας οδηγούν σε μεγάλες αλλαγές της θερμοκρασίας, για το ίδιο ποσό μεταφοράς θερμότητας. Η θερμική αδράνεια δεν μπορεί να μετρηθεί απευθείας, αλλά συνάγεται από μετρήσεις των διακυμάνσεων θερμοκρασίας κατά τον ημερήσιο κύκλο, σε συνδυασμό με γνώση των διεργασιών θέρμανσης που συμβαίνουν στη διάρκεια του κύκλου αυτού και των διεργασιών ανάκλασης του ορατού και του κοντινού υπέρυθρου στη διάρκεια της ημέρας. Επισημαίνεται ότι έχει αναπτυχθεί μέθοδος για την εκτίμηση της θερμικής αδράνειας από το Ημερήσιο Θερμοκρασιακό Εύρος (ΗΘΕ) από υπέρυθρες (Infrared/IR) δορυφορικές εικόνες (Watson et al., 1971). Το μοντέλο αυτό έχει εφαρμοστεί με δεδομένα από Nimbus 3 και Nimbus 4 (Phon et al., 1974), από τα οποία διαπιστώθηκε ότι η υγρασία του εδάφους έχει μεγάλη επίδραση στη θερμική αδράνεια του πορώδους εδάφους.

Ο δορυφόρος της αποστολής χαρτογράφησης θερμοχωρητικότητας (Heat Capacity Mapping Mission/HCMM) έχει σχεδιαστεί για να αποκτά θερμικά υπέρυθρα δεδομένα 500 m ανάλυσης, ενώ έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι με βάση τα δεδομένα αυτά (Price, 1980). Ο HCMM έχει συλλέξει στοιχεία σχετικά με τη δυνατότητα αξιοποίησης των δεδομένων υπέρυθρης θερμοκρασίας, για τον υπολογισμό της θερμικής αδράνειας στην επιφάνεια της γης. Η λεγόμενη «φαινομενική θερμική αδράνεια» έχει προκύψει από τις δυναμικές τιμές του δορυφόρου με επιφανειακά δεδομένα. Η σειρά των δορυφόρων NOAA και των γεωστάσιμων μετεωρολογικών δορυφόρων, όπως ο METEOSAT, παρέχουν παγκόσμιες εικόνες με υψηλό ρυθμό επανάληψης στο ορατό και στο θερμικό υπέρυθρο. Έχουν αναπτυχθεί σύνθετα μοντέλα για την εκτίμηση της θερμικής αδράνειας από το ΗΘΕ, τα δε αποτελέσματα έχουν δείξει ότι υπάρχει χαρακτηριστική μείωση της εξάτμισης και διαθέσιμης υγρασίας, με αντίστοιχη αύξηση της ροής αισθητής θερμότητας σε αστικές περιοχές και σε καλλιεργημένες περιοχές με μικρή βλάστηση (Carlson et al., 1981). Επίσης, έχει αναπτυχθεί μια θεωρητική σχέση για την εκτίμηση της ημερήσιας θερμοχωρητικότητας, σε σχέση με τη θερμική αδράνεια και την υγρασία του εδάφους σε γυμνό έδαφος (Price, 1980).

11.3.4. Εδαφική υγρασία

Οι πρακτικές μέθοδοι τηλεπισκόπησης που έχουν εφαρμογή στις καλλιέργειες περιορίζονται σε δύο βασικά κανάλια μήκους κύματος: το θερμικό υπέρυθρο και τα μικροκύματα. Καθένα από αυτά έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, που συχνά αλληλοσυμπληρώνονται. Οι τεχνικές των μικροκυμάτων, που βασίζονται στη μεγάλη επίδραση του νερού στη διηλεκτρική σταθερά του εδάφους, έχουν το πλεονέκτημα του μεγάλου

δυναμικού εύρους στα σήματα μεταξύ υγρών και ξηρών εδαφών. Επιτρέπουν, επίσης, μετρήσεις μέσα από μη βροχοφόρα νέφη. Από την άλλη μεριά, το πλεονέκτημα της εδαφικής υγρασίας στο θερμικό υπέρυθρο είναι ότι δεν χρειάζεται απαιτητικά συστήματα αισθητήρων.

Έχει επισημανθεί μια μέθοδος υπολογισμού της θερμικής αδράνειας από το εύρος της ημερήσιας θερμοκρασίας (Watson et al., 1971), που έχει επιτυχώς εφαρμοστεί σε δορυφορικές παρατηρήσεις από τους Nimbus 3 και 4 (Phon et al., 1974). Έχει χρησιμοποιηθεί ένα στοιχειώδες ατμοσφαιρικό διορθωτικό μοντέλο, για να υπολογιστεί η εδαφική υγρασία σε γυμνό έδαφος απευθείας από το ΗΘΕ (Idso et al., 1976) και έχει, επίσης, χρησιμοποιηθεί ένα πολύ πιο περίπλοκο μοντέλο (Carlson et al., 1981). Ωστόσο, σε κανένα από τα παραπάνω μοντέλα δεν συνυπολογίστηκε η επίδραση της καλλιέργειας στη σχέση μεταξύ εδάφους, υγρασίας και επιφάνειας. Επισημαίνεται ότι η χρήσιμη ποιοτική πληροφορία για την εδαφική υγρασία στη ζώνη των ριζών μπορεί να ληφθεί από τις μετρήσεις της θερμοκρασίας κάτω από τη σκιά της καλλιέργειας, όπου το έδαφος είναι τελείως καλυμμένο. Για το σκοπό αυτό, έχει εφαρμοστεί το παραπάνω μοντέλο (Carlson et al., 1981) με δεδομένα του GOES και έχει βρεθεί καλή συσχέτιση μεταξύ των αποτελεσμάτων αυτών και του προηγούμενου δείκτη βροχόπτωσης.

Έχουν γίνει σημαντικά βήματα στη βελτίωση των διαδικασιών για την εκτίμηση της υγρασίας εδάφους και στο EEI από δορυφορικές μετρήσεις (Wetzel et al., 1984) και έχει βρεθεί ότι η αλλαγή θερμοκρασίας τις πρωινές ώρες είναι ο καλύτερος προγνώστης της υγρασίας του εδάφους, για την οποία έχει χρησιμοποιηθεί ένα μονοδιάστατο ΑΟΣ και ένα μοντέλο επιφάνειας. Η αξιοποίηση των αλλαγών θερμοκρασίας και όχι των απόλυτων τιμών είναι μια πολύ χρήσιμη τεχνική, για να μετριάσει κάποια προβλήματα της χρήσης απόλυτων δορυφορικών μετρήσεων θερμοκρασιών επιφάνειας επαφής, εξαιτίας της έλλειψης γνώσης της ικανότητας εκπομπής της επιφάνειας. Η ροή θερμότητας στο έδαφος και η εξατμισοδιαπνοή έχουν διατυπωθεί ως συνάρτηση μέρους της συνολικής υγρασίας στη ζώνη των ριζών. Η καλλιέργεια αντιμετωπίζεται με έναν γενικό τρόπο, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μεγάλα ετερογενή επιφανειακά τμήματα. Οι έλεγχοι ευαισθησίας έχουν δείξει ότι η μεταβολή της μεσημβρινής επιφανειακής θερμοκρασίας σε σχέση με την απορροφούμενη ηλιακή ακτινοβολία είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη στην εδαφική υγρασία. Τα αποτελέσματα του μοντέλου έχουν, επίσης, δείξει ότι η εδαφική υγρασία μπορεί να υπολογιστεί με μεγάλη ακρίβεια. Η γραμμική συμμεταβολή χρησιμοποιείται για να συνδέσει την εδαφική υγρασία με την επιφανειακή θερμοκρασία και άλλες μεταβλητές, όπως είναι η ταχύτητα του ανέμου, η φυτοκάλυψη και η σύγκλιση στα χαμηλά στρώματα. Μια χρήσιμη παράμετρος για την περιγραφή του εδαφικού υδατικού ελλείμματος είναι η διαθέσιμη υγρασία Μ, δηλαδή το κλάσμα του ρυθμού εξατμισοδιαπνοής προς τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή. Η διαθέσιμη υγρασία έχει εκτιμηθεί (Carlson et al., 1981· Wetzel et al.,1984· Taconet et al., 1986) ως η απαραίτητη παράμετρος που καθορίζει το διαχωρισμό μεταξύ αισθητής και λανθάνουσας ροής θερμότητας στην επιφάνεια. Οι συσχετίσεις ανάμεσα στον υετό και τη διαθέσιμη υγρασία είναι υψηλές (~0.8). Η χωρική διακύμανση της υγρασίας είναι πολύ μεγαλύτερη από την ήδη υπάρχουσα αβεβαιότητα της μεθόδου.

11.3.5. Έλλειμμα νερού

Το έλλειμμα νερού μπορεί να εντοπιστεί με τη χρήση τηλεπισκόπησης, όπως με νέους αισθητήρες μεγαλύτερης φασματικής διακριτικής ικανότητας. Η ανίχνευση του ελλείμματος νερού του φυτού, που προκαλείται από την ξηρασία, είναι αντικείμενο ιδιαίτερου ενδιαφέροντος για την τηλεπισκόπηση (Jackson et al, 1986). Η αλληλεπίδραση της βλάστησης με την ακτινοβολία, και ειδικότερα με το κοντινό υπέρυθρο (NIR, 0,7-1,3 μm) και μέσο υπέρυθρο (MIR, 1,3-2,5 μm), εξαρτάται εν μέρει από τον όγκο του νερού στα κύτταρα των φύλλων (leaf cells). Μέθοδοι ανίχνευσης της καταπόνησης με μεθόδους τηλεπισκόπησης που βασίζονται στη φυσιολογία φυτών είναι επιθυμητές, γιατί μπορούν να είναι άμεσα διαθέσιμες, με μικρές τροποποιήσεις, ανάλογα με τον τύπο της βλάστησης. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούν δεδομένα από NIR και MIR μπορούν να ξεχωρίσουν τις περιοχές καταπόνησης ικανοποιητικά. Έχει χρησιμοποιηθεί ο λόγος των καναλιών 5 και 4 του LANDSAT/TM, για την εξαγωγή του δείκτη καταπόνησης υγρασίας (Moisture Stress Index/MSI), για την ανίχνευση καταστροφής κωνοφόρου δάσους (Rock et al., 1986). Οι δείκτες βλάστησης που χρησιμοποιούν το κόκκινο (R 0.,65-0,70 μm) και κοντινό υπέρυθρο έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία στην παραγωγικότητα των φυτών (Rickardson & Everitt, 1987). Οι δείκτες αυτοί σχετίζονται με τη μάζα των φύλλων ανά μονάδα επιφάνειας. Ο λόγος (NIR/R) σχετίζεται με το ποσό της χλωροφύλλης στα φυτά, που απορροφάται για τη φωτοσύνθεση (Tucker & Sellers, 1986) και ελαττώνεται με την ανάπτυξη των φυτών, και όχι από το χαμηλό σχετικά περιεχόμενο νερού (Relative Water Content/RWC) ή το υδατικό δυναμικό φύλλων (leaf water potential), και ανιχνεύεται από τούς δείκτες αυτούς (Jackson et al., 1986). Καθώς η αγωγιμότητα των στομάτων (stomatal conductance) μειώνεται, υπάρχει απώλεια της λανθάνουσας θερμότητας (latent heat), λόγω της

διαπνοής, με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας των φύλλων, που ανιχνεύεται με αισθητήρες στο θερμικό υπέρυθρο. Με βάση αυτήν τη μεταβολή της θερμοκρασίας, το μέγεθος του ελλείμματος νερού μπορεί να ποσοτικοποιηθεί (Jackson et al., 1986).
Η μεταβολή της θερμοκρασίας λόγω ξαφνικής έλλειψης νερού είναι γρηγορότερη από τη μεταβολή της ανάκλασης στο NIR. Μέθοδοι που συνδυάζουν τα θερμικά δεδομένα με NIR και R πλεονεκτούν για τον εντοπισμό περιοχών με έλλειμμα νερού βλάστησης (Nemani & Running, 1989). Υπάρχει ισχυρή απορρόφηση της ακτινοβολίας στη MIR περιοχή του φάσματος και είναι μείζων παράγων, που επηρεάζει τις φασματικές ιδιότητες των φύλλων. Η αντανάκλαση αυξάνει καθώς ελαττώνεται η περιεκτικότητα σε νερό στα φύλλα (Carlson et al.,1981). Έτσι, τα μήκη κύματος του MIR (κυρίως 1,55-1.75 μm) ενδείκνυνται για τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας σε νερό των φύλλων με μεθόδους τηλεπισκόπησης. Για να ρυθμιστούν οι ραδιομετρικές διαφορές σε μια περιοχή, έχουν αναπτυχθεί δείκτες για τη σύγκριση δύο περιοχών σε μία εικόνα. Ένας τέτοιος δείκτης είναι ο MSI (Rock et al.,1986). Η έρευνα έχει δείξει ότι ο NDVI σχετίζεται με το περιεχόμενο σε νερό της βλάστησης (Hardiskh et al., 1983). Επίσης, και ο λόγος των καναλιών 5 με 7 σχετίζεται με το περιεχόμενο σε νερό του εδάφους και της βλάστησης (Musick & Pelletier, 1988). Ο κύριος σκοπός παραμένει η εξέταση της ικανότητας του Leaf Water Content Index (LWCI) να συσχετιστεί με τον RWC των φύλλων από διαφορετικά είδη και διαφορετική μορφολογία των φύλλων. Οι διαφορές στην ανάκλαση βλάστησης, που βρίσκεται σε κατάσταση έλλειψης νερού από βλάστηση σε κανονικές συνθήκες, μπορούν να εντοπιστούν μόνο αν είναι μεγάλες και είναι γνωστό το φαινόμενο από επίγειες μετρήσεις. Συνεπώς, δεν είναι δυνατόν να ανιχνευθεί έλλειμμα νερού του φυτού από NIR και MIR. Μόνο κωνοφόρα σχεδόν σε επίπεδα λήθαργου, λόγω καταπόνησης από έλλειψη νερού, φαίνεται ότι παρουσιάζουν αρκετές διαφορές, για να γίνουν αντιληπτά με μεθόδους τηλεπισκόπησης.
Το έλλειμμα νερού για παρατεταμένη περίοδο, σε συνδυασμό με την έντονη διαπνοή των φυτών, οδηγεί στη διάσπαση της χλωροφύλλης στα φύλλα και, συνεπώς, σε μικρές τιμές του δείκτη βλάστησης. Είναι δυνατόν όμως αυτό το φαινόμενο να είναι παροδικό και να μην έχει καμία επίπτωση στην τελική παραγωγή (Steven & Jaggard, 1983). Η απώλεια του πράσινου χρώματος των φύλλων, λόγω έλλειψης χλωροφύλλης, μπορεί να μην οφείλεται στο έλλειμμα νερού, αλλά σε κάποια ασθένεια, και έτσι να υπάρχουν συμπτώματα χλώρωσης ή να πρόκειται για προσβολή από ιό που καταστρέφει τη χλωροφύλλη.

11.3.6. Ταξινόμηση χρήσεων γης και καλλιεργειών

Από τις πρώτες εφαρμογές της επεξεργασίας δορυφορικών εικόνων, κυρίως περιβαλλοντικών δορυφόρων, είναι η ταξινόμηση χρήσεων γης (land use). Γενικά, ο όρος «χρήση γης» αναφέρεται στον τρόπο χρήσης της γης από τον άνθρωπο, με έμφαση στο ρόλο της γης σε οικονομικές δραστηριότητες. Αντίστοιχα, ο όρος «κάλυψη γης» (land cover) αναφέρεται στην κατηγοριοποίηση των διάφορων φυσικών και ανθρωπογενών στοιχείων του εδάφους, με βάση κυρίως τις ορατές ενδείξεις χρήσεων γης. Έχουν αναπτυχθεί διεθνώς συστήματα ταξινόμησης χρήσεων γης και κάλυψης γης, που οδηγούν σε αντίστοιχες χαρτογραφήσεις με πλανητική κάλυψη.
Στη γεωργία, η ταξινόμηση χρήσεων γης και κάλυψης γης συμβάλλουν σημαντικά στην ανάπτυξη μοντέλων και μεθοδολογιών προσομοίωσης για κάθε επιμέρους κατηγορία περιοχής ή λεκάνης απορροής, όπως είναι η αστική, η αγροτική, η δασική, η χιονοσκεπής ή/και η ορεινή (Domenikiotis et al., 2004). Επίσης, σημαντική εφαρμογή της ταξινόμησης χρήσεων γης στη γεωργία θεωρείται η ταξινόμηση καλλιεργειών, που, για να είναι επιτυχής, πρέπει να συνυπολογίζει τον τύπο της καλλιέργειας και το φαινολογικό στάδιο ανάπτυξης. Είναι αυτονόητο ότι η ταξινόμηση καλλιεργειών διαφέρει ανά καλλιέργεια, ενώ μπορεί μάλιστα να χρησιμοποιούνται διαφορετικοί δορυφόροι κατά περίπτωση. Επίσης, η ταξινόμηση καλλιεργειών θεωρείται πολύ σημαντική συνιστώσα στη γεωργική έρευνα και γεωργική πρακτική, όπως είναι η αγρομετεωρολογική προσομοίωση, η εκτίμηση γεωργικής παραγωγής, η εκτίμηση εχθρών και ασθενειών, καθώς και η αναδιάρθρωση των καλλιεργειών και η δημιουργία αγροκλιματικών ζωνών.
Ειδική αναφορά γίνεται για δορυφορικά δεδομένα SAR. Οι εικόνες SAR βοηθούν στην αναγνώριση των διαφόρων τύπων χρήσης γης (αστικών, γεωργικών περιοχών, δασών, υδάτινων μαζών), γεγονός που οφείλεται κυρίως στην ευαισθησία των συστημάτων χαρτογράφησης των χρήσεων γης, όμως κρίνονται αναγκαίες η εργασία υπαίθρου και η συνδυασμένη χρήση με δεδομένα των οπτικών συστημάτων, έτσι ώστε τα αποτελέσματα να είναι αξιόπιστα. Ένα βασικό πλεονέκτημα των ραντάρ, σε σχέση με άλλα αισθητήρια όργανα (οπτικά), για την αναγνώριση των καλλιεργειών, είναι η δυνατότητα λήψης δεδομένων σε οποιαδήποτε περίοδο απαιτείται, για τη διάκριση των καλλιεργειών κατά τον φαινολογικό κύκλο, ανεξάρτητα από τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες. Η ανακλώμενη ενέργεια από μια γεωργική περιοχή μπορεί να διαιρεθεί σε επιμέρους τμήματα, στο τμήμα που ανακλάται από τη βλάστηση, στο τμήμα των πολλαπλών ανακλάσεων από το έδαφος

και τη βλάστηση, και στο τμήμα που ανακλάται μόνο από το έδαφος. Σημαντική βοήθεια δίνουν οι σύνθετες έγχρωμες εικόνες SAR (διαχρονικές), για την παρακολούθηση και αναγνώριση των καλλιεργειών.

11.3.7 Παρακολούθηση καλλιεργειών και γεωργικής παραγωγής

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται αγρομετεωρολογικές εφαρμογές τηλεπισκόπησης στη φαινολογία καλλιεργειών, στην εκτίμηση βιομάζας, καθώς και στην παρακολούθηση και εκτίμηση της γεωργικής παραγωγής.

11.3.7.1. Φαινολογία καλλιεργειών

Η εφαρμογή αναφέρεται στην παρακολούθηση της εξέλιξης και ανάπτυξης καλλιεργειών κατά τα φαινολογικά στάδια, με χρήση του NDVI (Dalezios, 2014). Έχουν επιλεγεί δύο καλλιέργειες στη Θεσσαλία, αμπέλια και μήλα. Εξετάζεται η διαχρονική διακύμανση του NDVI ανά δεκαήμερο από την 1η Μαρτίου μέχρι την 31η Οκτωβρίου 1994, καθώς και η συσχέτιση με άλλους δείκτες που χρησιμοποιούνται στην αγρομετεωρολογία. Η βάση δεδομένων συνίσταται από ημερήσιες εικόνες NOAA, με βάση τις οποίες εξάγονται ημερήσιες εικόνες NDVI και, τελικά, δημιουργούνται δεκαήμερες εικόνες μέγιστου NDVI ανά ιχνοστοιχείο. Οι αγρομετεωρολογικοί δείκτες υπολογίζονται από μετεωρολογικά επίγεια δεδομένα και εξάγονται μέσες τιμές δεκαημέρου ανά δείκτη.

Τα αποτελέσματα έχουν δείξει για τα αμπέλια ότι υπάρχει μια διαχρονική μεταβλητότητα του NDVI με διακυμάνσεις υψηλών και χαμηλών τιμών. Η αύξηση της συγκέντρωσης χλωροφύλλης κατά την ανθοφορία αντιστοιχεί σε αύξηση της τιμής του NDVI. Δεν παρατηρείται σχέση μεταξύ αθροιστικής βροχόπτωσης και NDVI, λόγω συστηματικής άρδευσης των αμπελιών. Τέλος, παρατηρείται αρνητική συσχέτιση μεταξύ ημερόβαθμων και NDVI, κυρίως κατά τα μέσα Αυγούστου. Αντίθετα, τα αποτελέσματα έχουν δείξει για τα μήλα ότι υπάρχει θετική σχέση μεταξύ του δείκτη θερμικής μονάδας και NDVI. Ειδικότερα, η τιμή του δείκτη των αθροιστικών ημερόβαθμων παρουσιάζεται σημαντική στο τέλος της φυσικής ωρίμανσης, που σηματοδοτεί τη σπουδαιότητα της θερμικής μονάδας στα μήλα. Επίσης, επισημαίνεται η σημασία της αθροιστικής βροχόπτωσης σε όλη τη βλαστική περίοδο, κυρίως από το τέλος της ανθοφορίας μέχρι τη φυσική ωρίμανση. Συμπερασματικά, εικόνες μέγιστου NDVI μπορεί να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά, για την παρακολούθηση καλλιεργειών στη διάρκεια της βλαστικής περιόδου. Επίσης, υπάρχει θετική σχέση μεταξύ NDVI και μερικών αγρομετεωρολογικών δεικτών, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Το τελευταίο οφείλεται κυρίως στην κρίσιμη σημασία βασικών μετεωρολογικών παραμέτρων στη φυσιολογία και στη φαινολογία φυτών, όπως είναι η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία και ο υετός.

11.3.7.2. Εκτίμηση βιομάζας

Βιομάζα/φυτομάζα ορίζεται το βάρος της ξηρής ουσίας των φυτών ανά μονάδα έκτασης. Η ξηρή βιομάζα από δορυφορικά δεδομένα μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση (Συλλαίος, 1990):

Ξηρή βιομάζα = –321,7 + 429,02(ch10/ch8), (11.10)

όπου ch8 και ch10 είναι τα εύρη του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος 0,66-0,72 μm και 0,8-1,0 μm, αντίστοιχα. Η ξηρή βιομάζα είναι δυνατόν να οδηγήσει σε πρόγνωση παραγωγής, καθώς υπάρχει υψηλή συσχέτιση μεταξύ ξηρής βιομάζας και τελικής παραγωγής. Επίσης, υπάρχει άμεση σχέση του δείκτη NDVI με τη φυτομάζα των καλλιεργειών (Groten, 1993), που εξαρτάται από το είδος του φυτού, τη φυλλική επιφάνεια, δηλαδή όσο μεγαλύτερη φυλλική επιφάνεια και εδαφοκάλυψη υπάρχει, τόσο μεγαλύτερες τιμές NDVI εκτιμώνται, καθώς και την ποσότητα της χλωροφύλλης στα φύλλα. Ο δείκτης βλάστησης έχει άμεση σχέση με τη φωτοσυνθετική δραστηριότητα των φυτών (Steven et al., 1983). Έχει αναπτυχθεί ένα μοντέλο από το οποίο προκύπτει πως η παραγωγή ξηρής βιομάζας (dW) ανά μονάδα έκτασης (dt) είναι ανάλογη με τη φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία (S), το ποσοστό *(f)* που απορροφάται από την καλλιέργεια και την «απόδοση» *(n)* της μετατροπής της απορροφούμενης ενέργειας σε βιομάζα (Steven & Jaggard, 1983), ως εξής:

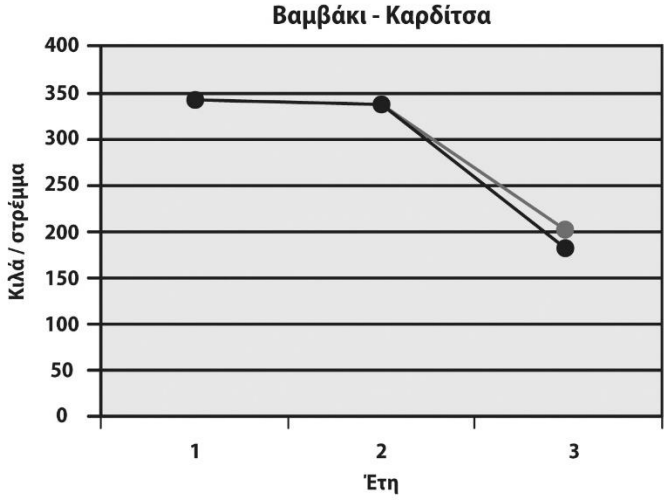
$$dW/dt = n.f.S. \quad (11.1)$$

Το S μπορεί να προκύψει από μετεωρολογικά δεδομένα. Η απόδοση *n* δεν υπολογίζεται εύκολα, αλλά έχει διαπιστωθεί ότι έχει μικρή διαφοροποίηση, αν ληφθεί ως μέσος όρος σε όλη τη διάρκεια της βλαστικής

περιόδου, με εξαίρεση την περίπτωση ύπαρξης καταπόνησης (stress) στην καλλιέργεια. Το *f* μπορεί να υπολογιστεί από εμπειρικούς τύπους.
Ο Gamon και οι συνεργάτες του (1995) μελέτησαν αρκετές γραμμικές σχέσεις μεταξύ $\ln(P_{mass})$ ή $\ln(GP_{mass})$, όπου GP_{mass} είναι η υπέργεια βιομάζα διάφορων τύπων βλάστησης της Καλιφόρνιας, και NDVI, υπολογισμένη από δεδομένα των καναλιών των NOAA-AVHRR. Χρησιμοποιώντας τον $\ln(GP_{mass})$ ως μεταβλητή στη θέση του $\ln(P_{mass})$, οι συντελεστές συσχέτισης ήταν υψηλότεροι, επιβεβαιώνοντας την ανάγκη μέτρησης του λόγου των πράσινων μερών των φυτών προς τα μη πράσινα, για τη βελτίωση της σχέσης φυτομάζας και δεικτών βλάστησης. Ο Pereira και οι συνεργάτες του (1994) κατέληξαν σε μια άλλη σχέση, που συνδέει το δείκτη βλάστησης NDVI (από δεδομένα LANDSAT) και τη φυτομάζα P_{mass} (σε κιλά ανά τετραγωνικό μέτρο):

$$P_{mass} = -0{,}2088 + 2{,}0212 * (NDVI)^2 \quad (11.12)$$

Υπολογισμός βιομάζας βαμβακιού
Το μοντέλο εκτίμησης βιομάζας [εξίσωση (11.12)] εφαρμόστηκε στην περιοχή της Καρδίτσας, για την καλλιέργεια βαμβακιού. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία αυτή προήλθαν από εικόνες των δορυφόρων NOAA. Κάθε μέρα λαμβάνονταν δύο εικόνες από διαφορετικούς δορυφόρους της σειράς NOAA, μια ημερήσια και μια νυχτερινή, στη διάρκεια τριών ετών (1994, 1995, 1996), για τη δημιουργία δεκαήμερων εικόνων μέγιστης τιμής ανά εικονοστοιχείο. Το επόμενο βήμα περιλάμβανε τον υπολογισμό των «μέγιστων» εικόνων για κάθε έτος και κάθε περιοχή. Κατόπιν, εφαρμόστηκε το μοντέλο 11.12, για κάθε εικονοστοιχείο της εικόνας. Τα δεδομένα των αποδόσεων για την περιοχή της Καρδίτσας παρουσιάζονται στο Σχήμα 11.12, στο οποίο γίνεται η γραφική αναπαράσταση των μέσων τιμών του μοντέλου και των αντίστοιχων αποδόσεων.



Σχήμα 11.12. *Αποδόσεις μοντέλου για την καλλιέργεια βαμβακιού στην περιοχή της Καρδίτσας.*

11.3.7.3. Εκτίμηση γεωργικής παραγωγής
Υπάρχουν πολλές εφαρμογές τηλεπισκόπησης στην εκτίμηση γεωργικής παραγωγής διαχρονικά, με έμφαση στη χρήση του NDVI. Ωστόσο, επισημαίνεται η σημασία και άλλων δεικτών, όπως είναι ο Δείκτης Συνθήκης Βλάστησης (VCI: Vegetation Condition Index) και ο Δείκτης Συνθήκης Θερμοκρασίας (TCI: Temperature Condition Index), για την εκτίμηση της απόδοσης καλλιεργειών. Ειδικότερα, έχει γίνει μια εκτενής ανασκόπηση, στην οποία ο NDVI αποτελεί τη βάση για στατιστικά μοντέλα εκτίμησης της απόδοσης καλλιεργειών (McVicar & Jupp, 1998). Σε μια μεικτή γεωργική έκταση, στην Εμίλια Ρομάνια της Ιταλίας, χρησιμοποιήθηκαν δεκαήμερες εικόνες NDVI (MVC) από NOAA/AVHRR, για την εκτίμηση της απόδοσης σιταριού, καθώς και ένα μοντέλο ανάπτυξης της καλλιέργειας, για την εκτίμηση του ξηρού βάρους τεσσάρων κύριων καλλιεργειών, σόγιας, καλαμποκιού, τεύτλων και σιταριού (Benedetti & Rossini, 1993). Χρησιμοποιήθηκε ο συσσωρευμένος NDVI σε καλλιεργούμενες εκτάσεις στην Ελλάδα, για να εκτιμηθεί η απόδοση σημαντικών καλλιεργειών (Quarmby et al., 1993). Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν δεκαήμερες εικόνες MODIS-NDVI, για την εκτίμηση της παραγωγής σιταριού το χειμώνα στην Κίνα (Ren et al., 2008). Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε μια χρονοσειρά εβδομαδιαίων εικόνων NDVI από NOAA/AVHRR (4 x 4 χλμ. χωρική

ανάλυση) την περίοδο 1985-1992, για την εξαγωγή του VCI όσον αφορά την καλλιέργεια σιταριού και καλαμποκιού (Hayes & Decker, 1996). Ακόμα, χρησιμοποιήθηκαν VCI και TCI, για την ανάπτυξη στατιστικού μοντέλου πρόβλεψης της απόδοσης σιτηρών στην Πολωνία (Dabrowska-Zielinska et al., 2002).

Πρόδρομη εκτίμηση παραγωγής βαμβακιού

Η εφαρμογή του NDVI αναφέρεται στην καλλιέργεια βαμβακιού στην Κεντρική και Βόρεια Ελλάδα (Domenikiotis et al., 2004). Χρησιμοποιείται ο VCI, που αποτελεί προέκταση του NDVI. Ο VCI συνδέεται με τα μακράς διάρκειας ελάχιστα και μέγιστα του NDVI, και εκφράζεται από την εξίσωση:

VCI = 100 x (NDVI – NDVImin)/(NDVImax – NDVImin), (11.13)

όπου NDVI, NDVImax, NDVImin είναι οι ομαλοποιημένες τιμές δεκαήμερου του NDVI, οι διαχρονικές μέγιστες και ελάχιστες τιμές του NDVI, αντίστοιχα, για κάθε εικονοστοιχείο. Οι τιμές του VCI κυμαίνονται από 0, για εξαιρετικά δυσμενείς συνθήκες, μέχρι 100, για βέλτιστες συνθήκες. Συνεπώς, υψηλότερες τιμές του VCI αντιπροσωπεύουν υγιή βλάστηση, χωρίς καταπόνηση.

Η βάση δεδομένων, που χρησιμοποιείται αποτελείται από χρονοσειρές ημερήσιων εικόνων NOAA, με διακριτική ικανότητα 8 x 8 km^2, για την Κεντρική και Βόρεια Ελλάδα, την περίοδο 1982-1999. Από τις ημερήσιες τιμές NDVI, εξάγεται για κάθε εικονοστοιχείο η μέγιστη συνθετική τιμή δεκαημέρου του NDVI, απ' όπου παράγονται εικόνες NDVI της περιοχής, που χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό του δείκτη VCI. Τα στοιχεία της περιόδου 1982-1997 χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη των στατιστικών μοντέλων παλινδρόμησης, σχετικά με την εκτίμηση της παραγωγής βαμβακιού, ενώ τα στοιχεία των ετών 1998 και 1999 χρησιμοποιούνται για πιστοποίηση. Για την ομαλοποίηση των χρονοσειρών NDVI, χρησιμοποιείται ένα «4352» φίλτρο κινούμενου διάμεσου. Επίσης, εφαρμόζεται μία ανάλυση συσχετίσεων μεταξύ των δεκαήμερων τιμών του VCI στη διάρκεια της βλαστικής περιόδου και των επίσημων τιμών παραγωγής βαμβακιού. Η ανάλυση αυτή προσδιορίζει τις κρίσιμες περιόδους με σημαντική επίπτωση στην τελική παραγωγή, που συμπίπτουν με το διάστημα της μέγιστης φυτοκάλυψης του βαμβακιού, δηλαδή τα δεκαήμερα στο τέλος Ιουλίου και αρχές Αυγούστου. Τα στατιστικά μοντέλα που έχουν προκύψει είναι:

Για Βόρεια Ελλάδα, y = 16530 (VCI) - 1 E + 06 (R2 = 0,7423) (11.14)

Για Κεντρική Ελλάδα, y = 21581 (VCI) - 888809 (R2 = 0,8451) (11.15)

Για όλη την Ελλάδα, y = 40877 (VCI) - 2 E + 06 (R2 = 0,8707) (11.16)

όπου y είναι η εκτιμώμενη παραγωγή βαμβακιού σε τόνους.

Κατά την πιστοποίηση, τα αποτελέσματα των μοντέλων έδειξαν απόλυτη ποσοστιαία διαφορά σε σχέση με την επίσημη παραγωγή βαμβακιού υψηλότερη από 20% περίπου στο 84% των περιπτώσεων. Στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκε η ανάλυση συστάδων, για την ομαδοποίηση των περιοχών με παρόμοια φαινολογικά χαρακτηριστικά, με βάση τις τιμές του VCI. Οι ομάδες παρουσίασαν τελικά μέση απόλυτη διαφορά μεταξύ εκτιμώμενης και επίσημης τιμής παραγωγής βαμβακιού από 5% έως 19% σε περιοχικό επίπεδο και 7,6% σε εθνικό επίπεδο, αντίστοιχα, όπως φαίνεται στον Πίνακα 11.7. Τα αποτελέσματα αυτά θεωρούνται άκρως ικανοποιητικά διεθνώς.

Περιοχή	Παραγωγή 1998	Παραγωγή 1999	Εκτίμηση 1998	Εκτίμηση 1999	Απόκλιση 1998(%)	1999(%)
Κεντρική Ελλάδα	723.370	733.862	689.512	693.145	4,5	3,5
Βόρεια Ελλάδα	310.738	458.875	375.549	370.158	20,0	19,0
Ελλάδα	1.033.108	1.192.737	1.195.560	1.192.335	15,0	0,03

Πίνακας 11.7. *Πιστοποίηση της εκτιμώμενης παραγωγής βαμβακιού (σε τόνους)*

11.3.8. Εκτίμηση περιβαλλοντικών κινδύνων

Στη γεωργία θεωρούνται περιβαλλοντικοί κίνδυνοι όλα τα δυσμενή καιρικά φαινόμενα που έχουν επίπτωση στη γεωργική παραγωγή και το αγροτικό περιβάλλον, όπως είναι οι πλημμύρες και η πλεονάζουσα βροχή, οι καταιγίδες και το χαλάζι, οι ξηρασίες, ο παγετός, ο καύσωνας, η ερημοποίηση, οι δασικές πυρκαγιές, οι ισχυροί άνεμοι, καθώς και βιολογικοί κίνδυνοι. Αντίστοιχα, οι μεθοδολογίες εκτίμησης κινδύνων περιλαμβάνουν τρία στάδια ή τομείς:

- την πρόγνωση και τις έγκαιρες προειδοποιήσεις, πριν εκδηλωθεί το φαινόμενο,
- την παρακολούθηση, στη διάρκεια της εκδήλωσης μιας φυσικής καταστροφής,
- την εκτίμηση της ζημιάς, μετά το τέλος μιας καταστροφής.

Επισημαίνεται ότι οι σημερινές επιστημονικές και τεχνολογικές δυνατότητες της τηλεπισκόπησης καλύπτουν και τους τρείς τομείς. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται ενδεικτικές εφαρμογές τηλεπισκόπησης στους περισσότερους από τους παραπάνω κινδύνους:

- **Πλημμύρες και πλεονάζουσα βροχή**. Η ποσοτικοποίηση μπορεί να γίνει με δύο αριθμητικούς τρόπους, ανάλογα με την περίπτωση, είτε με τη συχνότητα εμφάνισης πλημμύρας σε μια περιοχή είτε με τη δυνητική ζημιά μιας πλημμύρας, όπως απώλεια της γεωργικής παραγωγής. Η καταγραφή της έκτασης της πλημμύρας ή της ζημιάς αποτελεί από τις πρώτες εφαρμογές τηλεπισκόπησης με διάφορα συστήματα, όπως LANDSAT, SAR, NOAA/AVHRR. Επίσης, εκτεταμένες εφαρμογές τηλεπισκόπησης υπάρχουν σε μοντέλα βροχόπτωσης-απορροής, στα οποία έχουν διαχρονικά αναπτυχθεί δεδομένα και αλγόριθμοι τηλεπισκόπησης, και έχουν χρησιμοποιηθεί στην πρόγνωση και παρακολούθηση πλημμυρών σε λεκάνες απορροής (Dalezios, 2014).
- **Γεωργική ξηρασία.** Η αγρομετεωρολογική η γεωργική ξηρασία αναφέρεται στην απώλεια παραγωγής και εμφανίζεται όταν μειώνεται η υγρασία του εδάφους, τόσο ώστε να περιορίζεται σημαντικά η συγκομιδή των καλλιεργειών. Στην εφαρμογή αυτή χρησιμοποιείται ο δείκτης υγιούς βλάστησης (Vegetation Health Index/VHI) (Kogan, 2001· Dalezios, 2013). Ο VHI βασίζεται σε στοιχεία NDVI και δίνεται από την εξίσωση:

VHI = 0,5 (VCI) + 0,5 (TCI), (11.17)

όπου ο VCI έχει ήδη οριστεί από την εξίσωση (9.13) και ο TCI είναι ο δείκτης κατάστασης θερμοκρασίας, που δίνεται από την εξίσωση (9.18).

TCI = 100 x (BTmax – BT)/(BTmax – BTmin) (11.18)

όπου BT (Brightness Temperature) είναι η θερμοκρασία λαμπρότητας, που προέρχεται από το δορυφόρο NOAA.
Χρησιμοποιούνται ημερήσιες εικόνες NOAA και στη συνέχεια δημιουργούνται εικόνες VHI ανά δεκαήμερο για τη χρονική περίοδο Οκτωβρίου 1981-Σεπτεμβρίου 2001. Εφαρμογή έχει γίνει στη Θεσσαλία (Dalezios et al., 2014). Έχουν εξεταστεί διάφορα χαρακτηριστικά της ξηρασίας, όπως διάρκεια, περιοχική έκταση, δριμύτητα, καθώς και έναρξη και λήξη ξηρασίας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι γεωργική ξηρασία εμφανίζεται κάθε χρόνο κατά τη βλαστική περίοδο. Επίσης, η περιοχική έκταση μειώνεται όσο αυξάνεται η δριμύτητα της ξηρασίας, κυρίως το καλοκαίρι. Γενικά, οι εμφανιζόμενες ξηρασίες χαρακτηρίζονται ως ασθενείς μέχρι μέτριες.

- **Εκτίμηση δασικής πυρκαγιάς.** Στην εφαρμογή αυτή χρησιμοποιούνται εικόνες NDVI από NOAA, με διακριτική ικανότητα περίπου 1 x 1 km^2, για την εκτίμηση της καμένης έκτασης από τη δασική πυρκαγιά που σημειώθηκε στην Πεντέλη Αττικής, στις 21-24 Ιουλίου 1995, που εκτιμήθηκε στα 63 km^2 (Domenikiotis et al., 2002). Η βάση δεδομένων αποτελείται από δυο ημερήσιες εικόνες NDVI, μία στις 20 Ιουλίου 1995, δηλαδή πριν από την πυρκαγιά, και μία στις 25 Ιουλίου 1995, δηλαδή μετά την πυρκαγιά. Στο στάδιο της επαλήθευσης χρησιμοποιούνται επιπλέον δυο εικόνες NDVI από δορυφόρο Landsat TM, με διακριτική ικανότητα 30 m, μία στις 13 Ιουνίου 1994 (πριν) και μία στις 27 Ιουλίου 1995 (μετά).

Αρχικά, αναπτύσσεται ένας ψηφιακός χάρτης αναφοράς της περιοχής, βασιζόμενος σε ένα ΓΣΠ. Οι εικόνες NDVI από NOAA απαιτούν τη χρήση του χάρτη αναφοράς για να προσδιοριστούν οι καμένες και μη καμένες εκτάσεις. Στη συνέχεια, χρησιμοποιείται το διάγραμμα διασποράς διαχρονικών εικόνων NDVI, τόσο από , όσο και από Landsat TM, για να υπολογιστούν οι φασματικές αλλαγές με την εξάλειψη της βλάστησης, λόγω της δασικής πυρκαγιάς. Οι εικόνες NDVI από NOAA εγγράφονται στην αντίστοιχη εικόνα NDVI από Landsat TM και πραγματοποιείται ανά δειγματοληψία στα 30 m, που επιτρέπει τη διαχρονική ανάλυση. Συμπερασματικά, η ακρίβεια του NDVI από NOAA είναι συγκρίσιμη με την αντίστοιχη από Landsat TM. Συνεπώς, τα δεδομένα από NOAA μπορούν να χρησιμοποιούνται επιχειρησιακά, για τη χαρτογράφηση της καμένης έκτασης.

- **Χαλάζι**. Στην ποσοτική πρόγνωση χαλαζιού έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία μια μεθοδολογία που βασίζεται σε συνδυασμό των δεικτών ατμοσφαιρικής αστάθειας και του δείκτη ταξινόμησης μεγέθους χαλαζόκοκκων (Dalezios & Papamanolis, 1991). Επίσης, για την ποσοτικοποίηση και παρακολούθηση της εξέλιξης χαλαζοφόρων καταιγίδων, εκτός από τα ραντάρ καιρού, που αποτελούν το κύριο σύστημα, έχει χρησιμοποιηθεί ένα πολύ γνωστό διεθνώς περιοχικό αριθμητικό μοντέλο, το WRF (Weather Research and Forecasting) (Skamarock et al., 2006). Τέλος, για την εκτίμηση και έκταση της ζημιάς από χαλάζι, τα ραντάρ καιρού, μαζί με δορυφορικά δεδομένα, αποτελούν επίσης το κύριο σύστημα.

- **Παγετός και καύσωνας.** Και οι δύο αυτοί περιβαλλοντικοί κίνδυνοι βασίζονται στη θερμοκρασία και τις χωροχρονικές μεταβολές της. Γενικά, για την ποσοτικοποίηση τόσο του παγετού όσο και του καύσωνα εφαρμόζεται η ίδια μεθοδολογική προσέγγιση, που χρησιμοποιεί την ίδια δορυφορική βάση δεδομένων. Ωστόσο, για μεν τον παγετό χρησιμοποιείται η ελάχιστη θερμοκρασία, ενώ για δε τον καύσωνα η μέγιστη. Η βάση δεδομένων αποτελείται από εικόνες, κυρίως μετεωρολογικών δορυφόρων, όπως NOAA και METEOSAT, στις οποίες η θερμοκρασία εκτιμάται ανά εικονοστοιχείο, όπως έχει περιγραφεί στο αντίστοιχο εδάφιο της θερμοκρασίας παραπάνω. Για την πρόγνωση και παρακολούθηση του παγετού και του καύσωνα μπορούν να χρησιμοποιηθούν παρόμοια στατιστικά ή στοχαστικά μοντέλα, με βάση την υπόθεση ότι η ημερήσια μεταβολή της θερμοκρασίας ακολουθεί μια ημιτονοειδή συνάρτηση. Υπάρχουν αρκετές εφαρμογές στη διεθνή βιβλιογραφία.

11.3.9. Γεωργία ακριβείας

Γεωργία ακριβείας θεωρείται η στρατηγική διαχείρισης, η οποία χρησιμοποιεί τεχνολογίες και πληροφορίες από πολλαπλές πηγές για να παράγουν δεδομένα και αφορούν στις συνδεδεμένες με την παραγωγή αποφάσεις. Η γεωργία ακριβείας βασίζεται σε τρεις πυλώνες:
α) τη συγκέντρωση των δεδομένων σε κατάλληλη κλίμακα και συχνότητα,
β) την ερμηνεία και ανάλυση των δεδομένων,
γ) την εφαρμογή της διαχειριστικής λύσης σε κατάλληλη κλίμακα και σε κατάλληλο χρόνο.
Η σημαντικότερη συνέπεια της γεωργίας ακριβείας πιθανόν να είναι στον τρόπο με τον οποίο οι διαχειριστικές αποφάσεις εξετάζουν τη χωρική και χρονική μεταβλητότητα στα συστήματα παραγωγής. Μια βασική διαφορά μεταξύ της συμβατικής διαχείρισης και της γεωργίας ακριβείας είναι η εφαρμογή των σύγχρονων τεχνολογιών πληροφόρησης. Οι τεχνολογίες αυτές παρέχουν, επεξεργάζονται και αναλύουν δεδομένα υψηλής χωρικής και χρονικής ανάλυσης που έχουν αποκτηθεί από πολλές πηγές, για τη λήψη αποφάσεων και διαδικασιών στη διαχείριση της γεωργικής παραγωγής. Η γεωργία ακριβείας θεωρείται περισσότερο μια ακολουθία από τεχνολογίες, παρά μια ενιαία τεχνολογία. Οι αγρότες των οποίων οι εφαρμογές έχουν πολυάριθμα διαφορετικά χαρακτηριστικά, όπως διαφορετικές καλλιέργειες, καιρό, τύπους παρασίτων και διαχειριστικές μεθόδους, χρησιμοποιούν τα ποικίλα χαρακτηριστικά αυτής της ακολουθίας. Όλα αυτά τα συστατικά έχουν κοινό χαρακτηριστικό γνώρισμα την αύξηση της ροής των πληροφοριών στη γεωργία.
Παρουσιάζεται μια εφαρμογή της γεωργίας ακριβείας, με στόχο τη διαχείριση τόσο των υδατικών αναγκών των καλλιεργειών (εκτατικών, οπωροκηπευτικών, δενδρωδών κτλ.), όσο και της λίπανσης, με χρήση δεδομένων και μεθόδων μικροτηλεπισκόπησης (Dalezios et al., 2012). Το αντικείμενο περιλαμβάνει εκτίμηση και παρακολούθηση των αναγκών σε νερό των καλλιεργειών, δηλαδή της εξατμισοδιαπνοής, στη διάρκεια της βλαστικής περιόδου, καθώς και παρακολούθηση της χωρικής μεταβλητότητας, με στόχο την καταγραφή και διατήρηση της ευρωστίας των καλλιεργειών, για βέλτιστη παραγωγή. Αντίστοιχα, με βάση τα ίδια δεδομένα, η ανάλυση επιτρέπει επίσης τον έλεγχο των σταδίων λίπανσης σε επίπεδο αγροτεμαχίου.
Η εφαρμογή αυτή αποτελεί διεθνή καινοτομία, καθόσον τα στοιχειά είναι διαθέσιμα διεθνώς από το 2013. Επίσης, παρέχει πολύ μεγάλη προστιθέμενη αξία, καθόσον στοχεύει στη μεγιστοποίηση της παραγωγής, με

μείωση του λειτουργικού κόστους παραγωγής και της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης. Η μικροτηλεπισκοπική ανάλυση για την επιχειρησιακή γεωργία περιλαμβάνει ορθοαναγωγή των δορυφορικών δεδομένων και χαρτογράφηση των καλλιεργειών σε κλίμακες καλύτερες από 1:2.500, εκτίμηση του φυτικού συντελεστή (Kc), εκτίμηση της εδαφικής υγρασίας και εκτίμηση του κατάλληλου χρόνου άρδευσης. Οι παραγόμενοι ορθοφωτοχάρτες είναι θεματικοί, με ταξινόμηση των παραπάνω παραμέτρων σε ζώνες. Τα δεδομένα προέρχονται από πολυφασματικούς δορυφόρους, με δυνατότητα κάλυψης μεγάλων περιοχών σε σύντομα χρονικά διαστήματα και υψηλή επισκεψιμότητα, σε συνδυασμό με μέγεθος αρχικού εικονοστοιχείου (nominal ground resolution) στο δέκτη 0,5 m, όπως στα στοιχεία του δορυφόρου WV-2 (World View-2), και με δυνατότητα παραγωγής ορθοφωτοχαρτών με μέγεθος εικονοστοιχείου 0,5 m. Χαρακτηριστικά, επισημαίνεται ότι δημιουργούνται χάρτες επιχειρησιακής γεωργίας που βασίζονται σε δεδομένα από τον ίδιο δορυφόρο:

- Χάρτης εδαφοκάλυψης. Επίσης, χαρτογράφηση και ζωνοποίηση περιοχής υψηλής παραγωγικότητας, με ψηφιακές δορυφορικές εικόνες πολύ υψηλής διακριτικής ικανότητας.
- Χάρτες χλωροφύλλης. Απεικονίζει τις διαφορές στο «πράσινο» μέσα σε μια περιοχή. Με τους χάρτες χλωροφύλλης είναι εφικτό να εκτιμηθεί η αποτελεσματικότητα λιπασμάτων που χρησιμοποιούνται, σύμφωνα με τους οποίους συντάσσεται το πρόγραμμα λίπανσης και προκαθορίζονται ζώνες με χρόνιες ελλείψεις σε άζωτο.
- Χάρτης NDVI. Δείχνει τις διαφορές στην ανάπτυξη των φυτών.
- Χάρτης φυτικού συντελεστή Kc. Εξαρτάται από τον τύπο της βλάστησης και το στάδιο του φαινολογικού κύκλου, και χρησιμοποιείται για τις ανάγκες εκτίμησης της εξατμισοδιαπνοής και, έμμεσα, για τη ρύθμιση των υδατικών αναγκών του φυτού. Ορθοφωτοχάρτες με εκτίμηση εδαφικής υγρασίας, στους οποίους βασίζεται το πρόγραμμα άρδευσης.

Η ορθή ανάπτυξη, εφαρμογή και πιστοποίηση του παραπάνω συστήματος παρουσιάζει μια σειρά από πλεονεκτήματα, όπως:

- Εκτίμηση και έλεγχος των υδατικών αναγκών και των σταδίων λίπανσης των καλλιεργειών, με τη χρήση ψηφιακών δορυφορικών τηλεσκοπικών απεικονίσεων.
- Εξοικονόμηση ποσότητας αρδευτικού ύδατος, δηλαδή αποφυγή υπεράντλησης και υποβάθμισης υδάτινων πόρων.
- Δυνατότητα μεγιστοποίησης της παραγωγής, με τη χαμηλότερη δυνατή περιβαλλοντική επίπτωση.
- Σχεδίαση και σύνταξη αξιόπιστου προγράμματος άρδευσης και λίπανσης, βασιζόμενου στις τηλεσκοπικές μετρήσεις της περιοχής, και κοινοποίηση των αποτελεσμάτων στο σύνολο των παραγωγών της περιοχής μελέτης.

Επιλογικά

Μέθοδοι, τεχνικές και δεδομένα τηλεπισκόπησης παρουσιάζουν αυξανόμενη αξιοπιστία, ενώ υπάρχουν ήδη αρκετές σημαντικές εφαρμογές στην αγρομετεωρολογική ανάλυση και στη γεωργία (Dalezios,2013). Η δορυφορική τηλεπισκόπηση έχει συμβάλει στη γεωργική έρευνα από τις αρχές της δεκαετίας του 1970, αρχικά με οπτικά δεδομένα, για την ταξινόμηση, καθώς και την παρακολούθηση της εξέλιξης και της ανάπτυξης των καλλιεργειών. Προοδευτικά, εμφανίζονται εφαρμογές τηλεπισκόπησης στην αγρομετεωρολογική ανάλυση, που σταδιακά περιλαμβάνουν όχι μόνο ανάλυση των εικόνων, αλλά και εξαγωγή ποσοτικών πληροφοριών και εκτίμηση περιβαλλοντικών παραμέτρων από δορυφορικά δεδομένα με διαχρονικά αυξανόμενη αξιοπιστία. Η αγρομετεωρολογική τηλεπισκόπηση παρουσιάζει αυξανόμενο ενδιαφέρον και συνεχώς διευρυνόμενο πλαίσιο εφαρμογών στη γεωργία, το αγροτικό περιβάλλον και τα αγροοικοσυστήματα, που καλύπτουν τόσο κλασικά θέματα της διαχρονικής εξέλιξης του αντικειμένου, όσο και τις σύγχρονες τάσεις σύνθετων εφαρμογών.

Βιβλιογραφικές αναφορές

Bauer, M.E. (1976), Technological Basis and Applications of Remote Sensing of the Earth's Resources. *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*. GE-14(1):3-18.

Becker, F. & Li, Z.-I. (1990). Temperature-independent indices in thermal infrared, *Remote Sensing of Environment*, 33.

Benedetti, R. & Rossini, P. (1993). On the use of NDVI profiles as a tool for Agricultural Statistics. The case study of wheat yield estimate and forecast in Emilia Romagna. *Remote Sensing of Environment*, 45:311-326.

Brutsaert, W. (1982). *Evaporation in to the Atmosphere*, Reidel, 299.

Campbell, B.J. (1996). Introduction to Remote Sensing. 2nd edition, Virginia Polytechnic Institute and State University, Guilford Publications Press, NY, London.

Carlson, T.N. & Gillies, R.R. (1991). Remote sensing of soil moisture over vegetatíon. Sensitivity and limitations of the infrared temperature method, Preprint from *20th Conference on Aagricultural and Forest Meteorology*, Salt Lake City, 10-13 Sep. 1991.

Carlson, T.N., Dodd, J.K, Benjamin, S.G., and Cooper, J.N. (1981). Satellite Estimation of the Surface Energy Balance, Moisture Availability and Thermal Inertia, *Journal of Applied Meteorology*. 20, 67-81.

Dabrowska-Zielinska, K., Kogan, F.N., Ciolkosz A., Gruszczynska., M. and Kowalik, W. (2002). Modelling of crop growth conditions and crop yield in Poland using AVHRR-based indices, *International Journal of Remote Sensing*, 23:1109-1123.

Dalezios, N.R. & Spyropoylos, N.V. (2015). Remote Sensing in Drought Quantification and Assessment. Book chapter in Vol. 3 of 3-Volume Handbook of Drought and Water Scarcity (HDWS). Editor: Prof. S. Eslamian. Publisher: Taylor & Francis (in press).

Dalezios, N.R. & Papamanolis, N.K. (1991). Objective Assessment of Instability Indices for Operational Hail Forecasting in Greece. *Meteorology and Atmosphere Physics*. 45:87-100.

Dalezios, N.R. (2008). *Agrometeorology*. Volos: University of Thessaly Press (in greek).

Dalezios, N.R. (2011). *Remote Sensing in Water Resources*. Version 2, 248 (in english).

Dalezios, N.R. (2013): *The Role of Remotely Sensed Vegetation Indices in Contemporary Agrometeorology*. Invited paper in Honorary Special Volume in memory of late Prof. A. Flokas. Publisher: Hellenic Meteorological Society, 33-44.

Dalezios, N.R. (2014). Remote Sensing Potential in Hydrological Simulation. Invited paper in 20-year Anniversary Special Volume of Dept. of Civil Engineering, University of Thessaly, Volos, Greece entitled "Advances in Civil Engineering Research" by A. Liakopoulos, E. Mistaskidis and A. Giannakopoulos (Ed.), 253-264.

Dalezios, N.R., Blanta, A. and Spyropoulos, N.V. (2012). Assessment of remotely sensed drought features in vulnerable agriculture. *Natural Hazards Earth System Sciences (NHESS)*, 12:3139-3150.

Dalezios, N.R., Blanta, A., Spyropoulos, N.V. and Tarquis, A.M. (2014). Risk Identification of Agricultural Drought for Sustainable Agroecosystems. *Natural Hazards Earth System Sciences (NHESS)*. 14:2435-2448.

Domenikiotis, C., Spiliotopoulos, M., Tsiros, E. and Dalezios, N.R. (2004). Early Cotton Yield Assessment by The Use Of The NOAA/AVHRR Derived Drought Vegetation Condition Index In Greece, *International Journal of Remote Sensing*, 25(14):2807-2819.

Domenikiotis, C., Dalezios, N.R., Loukas, A. and Karteris, M. (2002). Agreement assessment of NOAA/AVHRR NDVI with landsat TM NDVI for mapping burned forested areas. *International Journal of Remote Sensing*, 23(20):4235-4246.

Diak, G.R. & Whipple, M.A. (1993). Improvements to models and methods for evaluating the land- surface energy balance and "effective" roughness using radiosonde reports and satellite-measured "skin" temperatures, *Journal of Agricultural and Forest Meteorology*. 63:189-218.

Daughtry, S.T., Kustas., W.P., Mora., M.S., Pinter, P.J., Jackson., Jr., R.D., Brown, P.W., Nichls, W.D. and Gay, L.W. (1990). Spectral estimates of net radiation and soil heat flux. *Remote Sensing of Environ*Ment. 32:114-124.

ESA (2014). Sentinel, Earth online - ESA, <https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-future-missions/sentinel-1> (accessed on 06/04/2014).

Gamon J.A., Field, C.B., Goulden, M.L., Giffin, K.L., Hartley, A.E., Joel, G., Penuelas, J. and Valentini, R. (1995). Relationships between NDVI, canopy structure, and photosynthesis in three Californian vegetation types. *Ecological Applications*. 28-41.

Groten S.M.E., 1993, New-crop monitoring and early yield assessment of Burkina Faso. *International Journal of Remote Sensing*, 14(8):1495-1515.

Hardisly, M.A., Klemas, V. and Smatt, R.M. (1983). The infuence of soi1 sa1inity, growth from, and leaf moisture on the spectral reflectance of Spartina a1tenliflora canopies, *Photogrammetic Engineering and Remote Sensing*. 49:77-83.

Hayes, M. J. & Decker, W.L. (1996). Using NOAA AVHRR data to estimate maize production in the United States corn belt. *International Journal of Remote Sensing*, 17:3189-3200.

Idso, S.B., Jackson, R.D. and Reginato, R.J. (1976). Determining emittances for use in infrared thermometry: A simple technique for expanding the utility of existing methods. *Journal of Applied Meteorology*. 15:16-20.

Jackson, RD., Pínter, P.J.Jr., Reginato, R.J. and Idso, S.B. (1986). Detection and eva1uation of plant stresses for crop management decision, *IEEE Trans*. *Geosci, Remote Sensing*. GE- 24:99-106.

Kogan, F.N., 2001. Operational space technology for global vegetation assessment. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 82:1949-1964.

Kustas W.P., Craig S., Daughtry, T, and Van Oevelen, P.J. (1993). Analytical Treatment of, the Relationship between Soil Heat Flux/Net Radiation Ratio and Vegetation Indices. *Remote Sensing of Environment*. 46:319-330.

Lillesand T.M. & Kiefer R.W. (2000). *Remote Sensing and Image Interpretation*. 4th edition, J. Wiley & Sons, p. 750, USA.

Mather M.P. (1999). *Computer Processing of Remotely-Sensed Images*. 2nd edition, J. Wiley & Sons, Great Britain, 292.

May, D.A., Stowe, L.I., Hawkins, J.D. and McClain, E.P. (1992). A correction for Saharan dust effects on satellite sea surface temperature measurements. *Journal of Geophysic Research*. 97(C3):3611-3619.

McVicar, T.R. & Jupp, D.L.B. (1998). The Current and Potential Operational Uses of Remote Sensing to Aid Decisions on Drought Exceptional Circumstances in Australia: a Review, *Agricultural Systems*, 57:399-468.

Musick, H. B. & Pelletier R.E. (1988). Response to soil moisture of spectra1 indexes derived from bidirectional reflectance ín thematic mapper wavebands. *Remote Sensing of Environment*, 25:167-184.

Nemani, R.R. & Running, S.W. (1989). Estin1ation of regional surface resistance in evapotranspiration from NDVI and thermal-IR AVHRR data, *Journal of Applied Meteorology*. 28:276-284.

Novak, M.D. & Black, T.A. (1983). The surface heat flux density of a bare soil. *Atmosphere-Ocean*. 21:431-443.

Pereira J.M.C, Oliveira, T.M. and Paul, J.P.C. (1994). Fuel mapping in a Mediteaanean shrubland using Landsat TM imagery, in P.J. Kennedy & M. Karteris (eds.). *Procedings International Workshop on Sate11ite technology and GIS for Mediteranean forest mapping and fire management* (Office for Official Publications of the European Communities: Luxembourg), 97-106.

Phon, H.A, Offield, TW., and Watson, K. (1974). Thermal inertia mapping fτom satellite discriminations of geotogic units in Oman, *Journal of Research USGS*, 2:141-158.

Pohl C. & van Genderen J.L. (1998). Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications. *International Journal of Remote Sensing*, 19(5):823-854.

Prata, A.J. & Platt, C.M.R. (1991) Land surface temperature measurements from the AVHRR. *Proceedings Of 5th A VHRR Data Users Conference*, June 25-28, Tromso, Norway, EUM P09, 433- 438.

Price, J.C. (1980). The potential of remotely sensed thermal infrared data to infer soil moisture and evaporation. *Water Resources Research*. 16787-795.

Price, J.C. (1984). Land surface temperature measurements from the split window channels of the NOAA 7 Advanced Very High Resolution Radiometer. *Journal of Geophysic Research*. 89(D5):7231-7237.

Quarmby, N. A., Milnes, M., Hindle, T. L. and Silleos, N. (1993). The use of multi-temporal NDVI measurements from AVHRR data for crop yield estimation and prediction. *International Journal of Remote Sensing*. 14:199-210.

Ren, J., Chen, Z., Zhou, Q. and Tang, H. (2008). Regional yield estimation for winter wheat with MODIS-NDVI data in Shandong, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, doi:10.1016/j.jag.2007.11.003.

Richardson, A.J. & Everitt, J.H. (1987). Monitoring water stress in buffel grass using handheld radiometers, *International Journal of Remote Sensing*. 8:1797-1806.

Rock, B.N., Vogelmamι, J.E., Williams, D.L., Vogelmamι, A.F. and Hoshizaki, T. (1986). Remote detection of forest damage, *Bioscience*. 36:439-445.

Sivakumar, M.V.K., Motha, R.P. and Das, H.P. (Eds.) (2005). *Natural Disaster and Extreme Events in Agriculture*. Springer, ISBN-10 3-540-22490-4, 367.

Skamarock, W.C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D.O., Barker, D.M., Wang, W. and Powers, J.G. (2006). A Description of the Advanced Research WRF Version 2, NCAR/TN-468+STR, 88.

Smith, RC.G., Bars, H.D. and Meyer, W.S. (1989). Evaporation from irrigated wheat estimated using radiative surface temperature: An operational approach. *Agricultural and Forest Meteorology*. 48:331-344.

Sobrino, J.A., Case11es, V. and Co11, C. (1993). Theoretical split window algorithms for determining the actual surface temperature. *11 Nuovo Cimento*. 16 (3):219-236.

Steven M.D., Biscoe P.V. and Jaggard, K.W. (1983). Estimation of sugar beet productivity from reflection in the red and infrared spectral bands, *International Journal of Remote Sensing*. 325-334.

Steven M.D. & Jaggard, K.W. (1995). Advances in Crop Monitoring by Remote Sensing, In: *Advances in Remote Sensing* (edited by M. Danson & S.E. Plununer), John Wiley & Sons Ltd., Chichester, Wset Sussex, England, 143-156.Ζήτη

Συλλαίος, Γ.Ν., (1990). *Εφαρμογές τηλεπισκόπησης στη γεωργία*. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη. 217.

Taconet O., Bemard, R and Vidal-Madjar, D. (1986). Evapotranspiratioin ονετ an ragriculmr region using α surface flux/temperature modet based on NOAA-AVHRR data, *Journal of Climate and Applied Meteorology*. 25(3):285-307.

Tucker, C.J. & Sellers, P.J. (1986). Satellite remote sensing of primary production, *International Journal of Remote Sensing*. 7:1395-1416.

Ulivieri, C. & Cannizzaro, G. (1985) Land surface temperature retrievals from satellite measurements. *Acta Astronautica*. 12(12):977-985.

Ulivieri, C., Castronuovo, M. M., Francioni, R. and Cardillo, A. (1994). A split window algorithm for estimating land surface temperature from satellites. *Advances in Space Research*. 14(3):59-65.

Watson, K., Rowan, L.C. and Offield, T.W. (1971). Application of thermal modelling in the geologic interpretation of IA images. *Proceedings Seventh International Symposium of Remote Sensing of Environment*. 3:2017-2041.

Welch R. & Ehlers M. (1987). Merging multiresolution SPOT HRV and LANDSAT TM data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 53:301-303.

Wetzel, P.J., Atlas, D. and Woodward, R.H. (1984). Determining Soil Moisture from Geosynchronous Satellite Infrared Data: A Feasibility Study. *Journal of Climate Applied Meteorology*. 23:375-391.

Ψωμιάδης, Ε. (2003). *Τηλεπισκόπηση: Εφαρμογές στις γεωεπιστήμες*, Αθήνα: Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 12
ΑΓΡΟΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Σύνοψη
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται αρχικά το πλαίσιο αγρομετεωρολογικής μοντελοποίησης, στο οποίο περιλαμβάνονται οι συνιστώσες των αγρομετεωρολογικών μοντέλων, οι απαιτήσεις σε ακρίβεια, καθώς επίσης η βαθμονόμηση και η πιστοποίηση των μοντέλων. Στη συνέχεια, δίνονται παραδείγματα μοντέλων στις διάφορες κατηγορίες της επιλεγείσας ταξινόμησης: συναρτησιακά μοντέλα, στατιστικά μοντέλα, μοντέλα προσομοίωσης, στοχαστικά μοντέλα και φαινολογικά μοντέλα. Τέλος, εξετάζονται τα μοντέλα εκτίμησης των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στη γεωργία και η εποχική κλιματική πρόγνωση.

Προαπαιτούμενη γνώση
Ο αναγνώστης απαιτείται να έχει βασικές γνώσεις φυσικής και μαθηματικών.

12.1. Αγρομετεωρολογική μοντελοποίηση

Τα μοντέλα καιρού για σοδειά καλλιεργειών αφορούν τεχνικές που μπορεί να χρησιμοποιηθούν επιχειρησιακά, για να υπολογιστούν πιθανές επιπτώσεις του καιρού στις σοδειές. Η ανάλυση χρονοσειρών γεωργικών στατιστικών δείχνει ότι η υπερετήσια μεταβλητότητα στις σοδειές καλλιεργειών ταξινομείται σε τρεις συνιστώσες, δηλαδή στις τάσεις, στους άμεσους πράγοντες καιρού και στις έμμεσες επιδράσεις του καιρού, όπως έχθροί, ασθένειες, ζιζάνια και άλλα συναφή (Gommes, 1998). Ως γνωστόν, η τεχνολογία, τα εργαλεία και οι μέθοδοι μοντελοποίησης καλλιεργειών έχουν παρουσιάσει ραγδαία ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια. Εκτιμάται ότι η μελλοντική εξέλιξη και προοπτική θα εστιάζονται στην ανάπτυξη μοντέλων ειδκής κλίμακας, στην ανάπτυξη μη παραμετρικών μοντέλων, καθώς και μοντέλων που βασίζονται σε κανόνες, στην ολοκλήρωση εισαγομένων στα μοντέλα σε πραγματικό χρόνο, στη μεγαλύτερη συμβατότητα μεταξύ των μοντέλων, καθώς και στην ανάπτυξη μοντέλων για την επίδραση παραγόντων καιρού σε διάφορες κλίμακες που προκαλούν ζημιά στα φυτά, όπως παγετός ή πολύ ισχυροί άνεμοι, αλλά και στην καλύτερη ολοκλήρωση μεταξύ καλλιέργειας, παθογενών και ξενιστών.
Τα αγρομετεωρολογικά μοντέλα μπορεί να ταξινομηθούν με βάση πολλά κριτήρια, όπως είναι ο τύπος των εισαγόμενων στοιχείων, η κλίμακα εφαρμογής, η ικανότητα λειτουργίας των μοντέλων σε δυσμενείς περβαλλοντικές συνθήκες, το κόστος ανάπτυξης και υλοποίησης, το επίπεδο της αναλυτικής και υπλογιστικής επιστημονικής δυσκολίας, μεταξύ των άλλων (Σταμπουλής, 2001). Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια μικρή παρέκκλιση από την κλασική ταξινόμηση μοντέλων, όπως αυτή παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 13. Ειδικότερα, εδώ τα αγρομετεωρολογκά μοντέλα ταξινομούνται με βάση την κλιμακούμενη επιστημονική δυσκολία και έτσι κατηγοριοποιούνται σε συναρτησιακά μοντέλα, στατιστικά μοντέλα, μοντέλα προσομοίωσης, στοχαστικά μοντέλα και φαινολογικά μοντέλα. Ακολουθεί η παρουσίαση των μοντέλων.

12.1.1. Συνιστώσες αγρομετεωρολογικών μοντέλων
Επισημαίνεαι αρχικά ότι όλες οι συνιστώσες των αγρομετεωρολογικών μοντέλων σχετίζονται μεταξύ τους, δηλαδή είναι εσωτερικές μεταβλητές του μοντέλου. Εκτός από τις συνιστώσες, υπάρχουν και οι σταθερές του μοντέλου, όπως η αποθηκευμένη ξηρή ουσία στις ρίζες και σε άλλα όργανα, η συνολική επιφάνεια φύλλου, ο ρυθμός ανάπτυξης και ο ρυθμός αναπνοής, και άλλα συναφή. Επισημαίνειται επίσης ότι τα μοντέλα χαρακτηρίζονται από τα απαιτούμενα εισαγόμενα στοιχεία, που είναι, βασικά, οι περβαλλοντικές συνθήκες, οι οποίες μεταβάλλοναι από χρόνο σε χρόνο και επηρεάζουν το μοντέλο. Ακολουθεί μια σύντομη και επιγραμματική περιγραφή των συνιστωσών των αγρομετεωρολογικών μοντέλων.

α. Αφομοίωση και αναπνοή
Η τάξη μεγέθους της αφομοίωσης CO_2 είναι: 1 m^2 φύλλου παράγει 1g σακχάρου σε μία ώρα. Η διαδικασία μέσω της οποίας δραστηριοποιείται ενέργεια είναι η αναπνοή, που συχνά υποδιαιρείται σε αναπνοή συντήρησης και αναπνοή ανάπτυξης. Η αναπνοή εξαρτάται σημαντικά από τη θερμοκρασία.

β. Φαινολογία
Περιγράφει ποιοτικά τα διαδοχικά στάδια ανάπτυξης των φυτών, από φύτρωμα σπόρου σε άνθιση και σε ωρίμανση. Επειδή τα στάδια εξαρτώνται από το φυτό, είναι δύσκολη η καθιέρωση ενός καθολικού συστήματος περιγραφής των φάσεων, καθώς μόνο τα κύρια στάδια, όπως το φύτρωμα, η διαφοροποίηση ανθού, η άνθιση,

ο σχηματισμός σπόρου, η ωρίμανση, είναι κοινά σχεδόν σε όλα τα φυτά με άνθη. Υπάρχουν, βέβαια, πρόσθετα στάδια, που δεν μπορούν να γενικευθούν. Ωστόσο, επισημαίνεται ότι έχει αναπτυχθεί ένα ενιαίο κωδικοποιημένο σύστημα (BBCH), που καλύπτει όλες τις καλλιέργειες (Menzel et al., 2006).

Φωτοπερίοδος. Τα φυτά μπορεί να ταξινομηθούν ως: φυτά ημέρας μεγάλης διάρκειας, φυτά ημέρας μικρής διάρκειας και ουδέτερα φυτά. Η διαφοροποίηση ανθού ενεργοποιείται σε φυτά ημέρας μεγάλης διάρκειας από μια τιμή κατωφλίου κάτω από την οποία δεν υπάρχουν άνθη. Αντίστοιχα, τα φυτά ημέρας μικρής διάρκειας δεν θα έχουν άνθη, αν η ημέρα υπερβαίνει μια τιμή κατωφλίου.

Εξαερισμός. Μπορεί να θεωρηθεί η ανάγκη των σπόρων ή των φυτών σε ένα ψυχρό κατώφλι θερμοκρασίας, T, μεταξύ T_1 και T_2 ($T_1 < T < T_2$). Συνιστά, επίσης, μηχανισμό για να αποφευχθεί ζημιά λόγω παγετού. Αν $T < T_1$, τότε το φυτό δεν αναπτύσσεται. Αυτό μπορεί να συνδυαστεί με τη διάρκεια της έκθεσης, δηλαδή μικρότερη έκθεση είναι συνήθως κοντά στην T_1, ενώ μαγαλύτερη διάρκεια εξαερισμού είναι κοντά στην T_2.

Επίπτωση θερμοκρασίας στη φαινολογία. Η θερμοκρασία έχει μια πολύ άμεση επίπτωση στο ρυθμό ανάπτυξης των φυτών. Οι επιπτώσεις είναι σημαντικές τόσο στις εύκρατες όσο και στις τροπικές περιοχές. Η πιο κοινή μέθοδος υπολογισμού της επίπτωσης της θερμοκρασίας είναι η μέθοδος των αθροισμάτων θερμοκρασίας, γνωστή ως άθροισμα ημεροβαθμών (Sum of Degree-Days/SDD) (Chang, 1974), ή θερμικός χρόνος ή θερμική μονάδα. Η μέθοδος SDD παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 6, καθώς και στο εδάφιο 12.6 του παρόντος κεφαλαίου, που αναφέρεται στα φαινολογικά μοντέλα.

Εναλλακτικά, ο ρυθμός ανάπτυξης (Development Rate/ D) μπορεί να εκφραστεί με το εξής μοντέλο, που βασίζεται στην κατανομή beta (Xiniou Yin et al., 1995):

$$DR = e^{\mu} (T - T_b)^{\alpha} (T_u - T)^{\beta}, \quad (12.1)$$

όπου T_b και T_u είναι οι τιμές θερμοκρασίας βάσης και άνω ορίου, αντίστοιχα, μ η παράμετρος μεγέθους, ενώ α και β οι παράμετροι μορφής.

Η εξίσωση δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα σε επίπεδο αγροτεμαχίου, όχι όμως απαραίτητα και σε περιοχική κλίμακα (Σχήμα 12.1). Για δεδομένο φαινολογικό διάστημα μεταξύ σταδίων, ο DR είναι αντίστροφος του χρόνου σε μέρες που απαιτείται για την ολοκλήρωση της φάσης. Η καμπύλη του σχήματος 12.1 παίρνει τη βέλτιστη τιμή της, T_o, από τη σχέση:

$$T_o = (\alpha T_u + \beta T_b) / (\alpha + \beta). \quad (12.2)$$

Υπόψη ότι ο μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης, R_o, υπολογίζεται αν αντικατασταθεί η T της εξίσωσης (12.1) με την T_o από την εξίσωση (12.2).

γ. Διαχωρισμός βιομάζας

Ο διαχωρισμός της βιομάζας, δηλαδή η κατανομή της βιομάζας μεταξύ των οργάνων, όπως φύλλα και ρίζες, απαιτεί κατανάλωση ενέργειας. Για το λόγο αυτό, αφομοίωση και διαχωρισμός εξετάζονται συνήθως μαζί. Οδιαχωρισμός είναι χαρακτηριστικό της καλλιέργειας.

δ. Ανάπτυξη ριζών

Σύμφωνα με τη συνήθη προσέγγιση, θεωρείται ότι υπάρχει κάποια σχέση μεταξύ της βιομάζας ριζών, που προκύπτει από το διαχωρισμό της βιομάζας, το βάρος ή το μήκος ριζών και το τρέχον βάθος. Η κατανομή των ριζών σε σχέση με την κατατομή θεωρείται ότι απλά είναι γραμμική ή αρνητική εκθετική μεταξύ επιφάνειας και μέγιστου βάθους ριζών. Επισημαίνεται ότι πιστοποιημένα μοντέλα, όπως το CERES, μπορεί να δίνουν ικανοποιητική πρόγνωση σοδειάς και υδατικού ισοζυγίου, ενώ η προσομοίωση της κατανομής ριζών και βιομάζας είναι μάλλον μη ρεαλιστική.

ε. Υδατικό ισοζύγιο

Το θέμα καλύπεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 13.

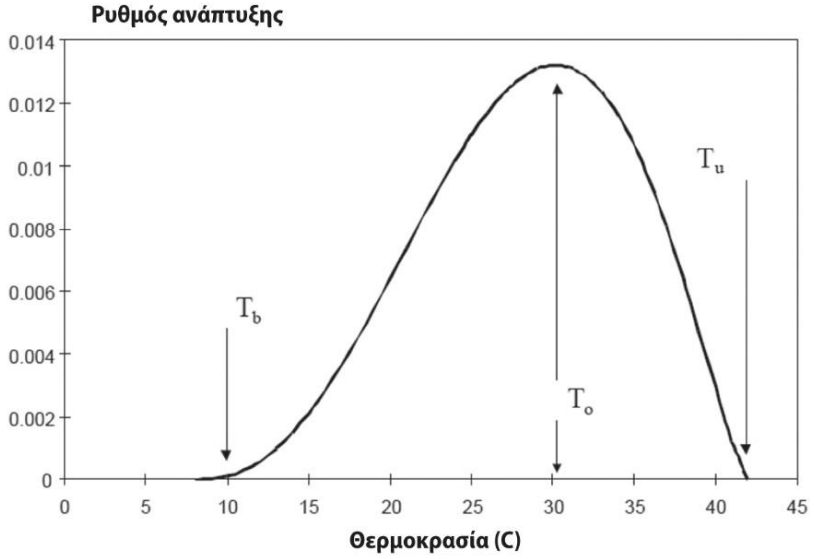
στ. Διαχείριση θρεπτικών

Η απορρόφηση θρεπτικών παρουσιάζει ομοιότητες με το νερό σχετικά με τις βαθμίδες. Ωστόσο, η κύρια πηγή εδαφικού αζώτου είναι οι λιπαντές αζώτου. Η συνολική ημερήσια ζήτηση αζώτου καλλιέργειας (Total Demand/TD) είναι το άθροισμα της ζήτησης που προέρχεται από το τρέχον έλλειμμα στο φυτό στην αρχή της ημέρας (Deficit Demand/DD), συν τη ζήτηση που προέρχεται από νέα ανάπτυξη (Growth Deficit/GD) και δίνεται από τη σχέση:

$$TD = DD + GD. \quad (12.3)$$

Αν N_{max} είναι η μέγιστη συγκέντρωση αζώτου, N_w η πραγματική συγκέντρωση και W η βιομάζα, τότε:

$DD = W (N_{max} – N_w)$ (12.4)



Σχήμα 12.1. *Κατανομή beta του ρυθμού ανάπτυξης.*

και
$GD = N_{max} \times \Delta W$. (12.5)

Το άζωτο λαμβάνεται από όλα τα εδαφικά στρώματα και εξαρτάται, μεταξύ των άλλων, από το διαθέσιμο νερό, καθόσον είναι διαλυτό σε αυτό. Υπάρχουν πολλές τεχνικές να ποσοτικοποιηθεί η επίδραση της λήψης αζώτου στις σοδειές. Στο Σχήμα 12.2 απεικονίζεται η καμπύλη ανταπόκρισης της σοδειάς στο άζωτο σε συνθήκες κορεσμού. Η καμπύλη μπορεί να προσαρμοστεί για μέγιστη απορρόφηση διοξειδίου του άνθρακα (CO_2), που οδηγεί στην αναμενόμενη ανταπόκριση.

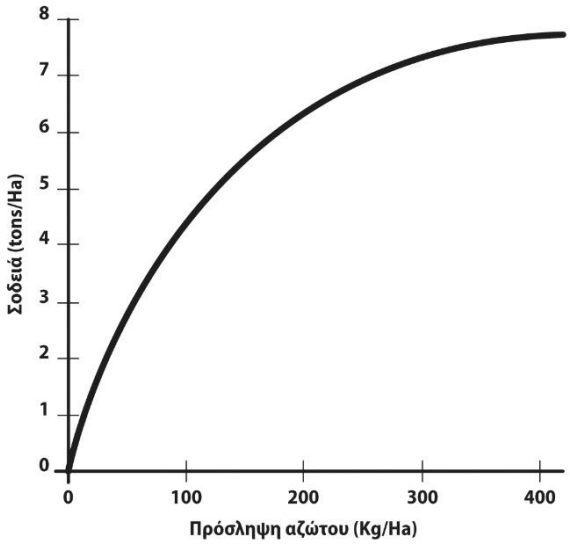
12.1.2. Απαιτήσεις ακρίβειας αγρομετεωρολογικών μοντέλων

Τα γενικά βήματα για την ανάπτυξη ενός μοντέλου πρόγνωσης παραγωγής μπορεί να περιλαμβάνουν: ανάλυση της διαδικασίας και καθορισμό του βασικού φαινομένου, καθορισμό του συστήματος και των ορίων του, ανάπτυξη της δομής του μοντέλου με επαρκή ακρίβεια για τις άγνωστες παραμέτρους, δημιουργία του αλγόριθμου του μοντέλου, ταυτοποίηση των παραμέτρων για το μοντέλο, σε σχέση με τα διαθέσιμα στοιχεία, και καθορισμό του εύρους των εισαγόμενων και εξαγομένων μεταβλητών, δοκιμή της επάρκειας του μοντέλου μέσω της ανάλυσης των αποτελεσμάτων αριθμητικών πειραμάτων, για τη συνολική διαδικασία ανάπτυξης του μοντέλου.

Η αβεβαιότητα μπορεί να εισαχθεί σε κάθε στάδιο της ανάπτυξης του μοντέλου. Σε κάθε μοντέλο θεωρείται ότι υπάρχει κάποια αβεβαιότητα. Η ακρίβεια των διαφόρων αποτελεσμάτων των μοντέλων καθορίζεται, τελικά, από το σκοπό της χρήσης τους. Οι πιο συχνές χρήσεις των μοντέλων είναι:

- Πρόβλεψη της παραγωγής: Το ζητούμενο είναι η ακριβής πρόγνωση της τελικής παραγόμενης βιομάζας.
- Χρήση σε πρακτικές καλλιέργειας: Τα ζητούμενα είναι η χρονική διάρκεια και τα στάδια ανάπτυξης της παραγωγής.
- Έρευνα σε όλες τις σχέσεις των διαφόρων περιβαλλοντικών φαινομένων και τις επιδράσεις τους στην παραγωγή.

- Εφαρμογή μοντέλων σε συγκεκριμένες καλλιέργειες και συνθήκες.



Σχήμα 12.2. *Ανταπόκριση σοδειάς σε λήψη αζώτου.*

Οι απαιτήσεις σε δεδομένα του μοντέλου καθορίζουν τα εισαγόμενα. Για παράδειγμα, όταν το μοντέλο εφαρμόζεται τοπικά, χρησιμοποιούνται δεδομένα του τοπικού μετεωρολογικού δικτύου, δεδομένα παραγωγής από γεωργικές εφαρμογές ή από φαινολογικές παρατηρήσεις. Αυτό δημιουργεί προβλήματα έλλειψης δεδομένων, αλλά και αβεβαιότητα για την ποιότητά τους. Γι' αυτό, είναι σημαντικό να τηρούνται κάποια κριτήρια κατά την εισαγωγή των δεδομένων στο μοντέλο (WMO, 2010). Γενικά, η ακρίβεια των μετεωρολογικών παραμέτρων συνοψίζεται στον Πίνακα 12.1:

Παράμετρος	**Απαιτούμενη ακρίβεια**
Εξάτμιση	± 1 mm
Ηλιοφάνεια	10% (± 0, 1 h)
Φωτοπερίοδος	10% (± 0,1 h)
Βροχόπτωση	± 1 mm
Σχετική υγρασία	± 5%
Θερμοκρασία	0,5-1° C
Ταχύτητα ανέμου	± 0,5 m/s

Πίνακας 12.1. *Ακρίβεια μετεωρολογικών παραμέτρων.*

Αυτή η προτεινόμενη ακρίβεια αναφέρεται συνήθως στο σημείο των μετρήσεων, σε συνοπτικά, κλιματολογικά και αυτοματοποιημένα δίκτυα. Υπάρχουν βέβαια και μοντέλα που απαιτούν ιδιαίτερες παραμέτρους και άλλα που απαιτούν μεγαλύτερη ακρίβεια στις μετρήσεις των παραπάνω παραμέτρων (Πίνακας 12.2). Ωστόσο, ανακρίβειες στα εισαγόμενα στοιχεία μπορεί να προκαλέσει επιπτώσεις στα εξαγόμενα στοιχεία. Γενικά, τα δεδομένα δεν είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους. Η αλληλεπίδραση μεταξύ τους μπορεί να διερευνηθεί με τη χρήση παραγοντικής ανάλυσης ευαισθησίας στη λειτουργία του μοντέλου, για χαμηλές και υψηλές απαιτήσεις παραμέτρων. Αυτή η προσέγγιση απαιτεί πρόσθετο υπολογιστικό φόρτο, ανάλογα με τον αριθμό των παραμέτρων.

Η παραλλακτικότητα των μεταβλητών είναι ένας ακόμα λόγος αβεβαιότητας ενός μοντέλου. Οι συντελεστές αναλογίας μπορούν να αποκτηθούν με δύο τρόπους, είτε ως χρονικά μεταβαλλόμενες τιμές είτε ως σταθερές. Στα μοντέλα που βασίζονται σε χρονικά μεταβαλλόμενες προσομοιώσεις, οι συντελεστές αναλογίας μπορούν να αλλάξουν σημαντικά και η κατανομή πιθανότητάς τους μπορεί να εκφράσει το εύρος τους πολύ καλύτερα από μια σταθερή παράμετρο. Όμως, παρ' όλο που οι σταθερές παράμετροι εισάγουν μεγαλύτερα ποσοστά αβεβαιότητας, απλοποιούν το μοντέλο. Η ανάλυση ευαισθησίας και η προσομοίωση Monte Carlo χρησιμοποιούνται συνήθως για να ερευνηθεί το ποσοστό αβεβαιότητας ενός μοντέλου λόγω παραμέτρων.

Παράμετρος	Αναφερόμενη ανάλυση	2 Απαιτούμενη ακρίβεια
Ολική ακτινοβολία	1 $MJm^{-2}d^{-1}$	±0,4 για ≤8 $MJm^{-2}d^{-1}$ ±5 για >8 $MJm^{-2}d^{-1}$
Θερμοκρασία εδάφους	0,1° C	0,1° C
Ελάχιστη θερμοκρασία φυτοκάλυψης (5 cm)	0,5 ° C	0,5° C
Ημερήσια διαδρομή ανέμου	1 km	1 Km
Εδαφική υγρασία	1% κατ' όγκο	2% κατ' όγκο
Ένταση βροχόπτωσης	1 mm/h	1 mm/h
Υδατικό ισοδύναμο χιονιού	1 mm	1 mm
Διάρκεια υγρασίας φυτοκάλυψης	0,2 h	0,2 h
Διάρκεια δρόσου	0,2 h	0,2 h

Πίνακας 12.2. *Πρόσθετες απαιτήσεις ακρίβειας παραμέτρων.*

12.1.3. Βαθμονόμηση και πιστοποίηση αγρομετεωρολογικών μοντέλων

12.1.3.1. Βαθμονόμηση αγρομετεωρολογικών μοντέλων

Η πολυπλοκότητα της βαθμονόμησης μοντέλων προέρχεται από τον αριθμό των παραμέτρων και τις σχέσεις μεταξύ τους, που πρέπει να διερευνηθούν πριν το μοντέλο μπορέσει να εφαρμοστεί. Η διαδικασία βελτιστοποίησης μπορεί να επιτευχθεί με διαφορετικούς τρόπους, είτε εμπειρικά, με την αλλαγή ομάδας παραμέτρων, ανεξάρτητα από τις άλλες, είτε με διαδικασίες βελτιστοποίησης, χρησιμοποιώντας εκτιμήσεις μέγιστης πιθανοφάνειας. Η τελευταία μέθοδος απαιτεί μεγάλα δείγματα δεδομένων, σε σχέση με τον αριθμό των προς εκτίμηση παραμέτρων. Τα φαινολογικά στάδια δεν είναι απαραίτητα ανεξάρτητα μεταξύ τους, οπότε και οι τιμές των παραμέτρων για τα διάφορα στάδια πρέπει να εκτιμηθούν ταυτόχρονα, πράγμα που προσθέτει επιπλέον πολυπλοκότητα στο πρόβλημα. Κριτήριο για την παρουσίαση ενός μοντέλου με διαφορετικές τιμές παραμέτρων χρησιμοποιείται συνήθως το στάδιο της άνθισης. Αυτό το στάδιο έχει το πλεονέκτημα να μπορεί να καθοριστεί με μεγάλη ακρίβεια και εξαρτάται ελάχιστα από τις διακυμάνσεις του περιβάλλοντος. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων λαμβάνονται αυτές που ελαχιστοποιούν την τυπική απόκλιση της φωτο-εαρινής-θερμικής περιόδου μεταξύ δύο φαινολογικών σταδίων, εκφρασμένες ως νούμερο με μονάδες και όχι ως ποσοστό του μέσου όρου. Η αποτελεσματικότητα της βαθμονόμησης μπορεί, επίσης, να μετρηθεί από το τυπικό σφάλμα σε ημέρες, υπολογιζόμενες από τις αποκλίσεις μεταξύ των εκτιμήσεων του μοντέλου και των παρατηρούμενων ημερομηνιών των φαινολογικών σταδίων. Η μέση διαφορά μεταξύ παρατηρούμενων και προβλεπόμενων ημερομηνιών λαμβάνεται υπόψη κατά την υλοποίηση του μοντέλου. Μια αμερόληπτη λύση μπορεί να επιτευχθεί με μια αποτελεσματική διαδικασία βαθμονόμησης.

Τα μοντέλα αντικατοπτρίζουν τη πραγματικότητα, όχι όμως επακριβώς. Ωστόσο, τα μοντέλα μπορούν να περιγράψουν κάποια φαινόμενα και επίσης να παρουσιάσουν σχέσεις μεταξύ των φαινομένων. Μια σχετική αναλογία μεταξύ μοντέλου και πραγματικότητας υπάρχει σε διάφορα επίπεδα: στο επίπεδο των εισαγομένων, το επίπεδο των δομών, που στο μοντέλο αντιπροσωπεύονται κυρίως από ένα σύστημα λειτουργιών, και στο επίπεδο των στοιχείων αυτών των δομών. Τα μοντέλα γεωργικής παραγωγής είναι, συνήθως, περίπλοκα συστήματα εξισώσεων που περιέχουν διάφορες ομάδες παραμέτρων και δεδομένων. Η τιμή και η κατανομή της απόκρισης των παραμέτρων πρέπει να είναι γνωστές. Για την ταυτοποίηση ενός μοντέλου, χρησιμοποιούνται γενικά αποδεκτές τιμές κατά τη βαθμονόμηση και αναλύονται τα εξαγόμενα δεδομένων, σύμφωνα με πειραματικά στοιχεία. Οι αποκλίσεις των δεδομένων προσομοίωσης από τα μετρηθέντα δεδομένα είναι το κριτήριο της πιστοποίησης μιας παραμέτρου, ενώ η ανάλυση αυτής της πιστοποίησης μπορεί να οδηγήσει σε νέες ρυθμίσεις της παραμέτρου. Οι παράμετροι μπορεί ακόμα να αποκτηθούν με τη χρήση πειραματικών δεδομένων για την ανάπτυξη του μοντέλου και στη συνέχεια η προσαρμογή των παραμέτρων να γίνεται έτσι ώστε η προσομοίωση να συμπέσει με τα αρχικά δεδομένα.

12.1.3.2. Πιστοποίηση μοντέλου

Για την ακρίβεια και επάρκεια ενός μοντέλου, χρησιμοποιούνται δύο βήματα, η πιστοποίηση και η επαλήθευση. Πιστοποίηση θεωρείται η διερεύνηση της ορθότητας και καταλληλότητας του μοντέλου. Η πιστοποίηση ενός μοντέλου δεν σημαίνει μόνο σύγκριση των πειραματικών ή στατιστικών και των εξαγομένων δεδομένων. Γενικά, η συμβατότητα και η συμφωνία μεταξύ προσομοιωμένων και πραγματικών δεδομένων είναι απλώς βήματα πιστοποίησης. Επαλήθευση θεωρείται η διαδικασία κατά την οποία το μοντέλο υποβάλλεται στην

εκτίμηση της λογικής του κατασκευής, σύνταξης του προγράμματος και ελέγχου για λάθη. Αρχικά, είναι απαραίτητο να καθοριστεί ο βασικός στόχος του μοντέλου που είναι προς πιστοποίηση. Η δομή του μοντέλου και των συντελεστών του διερευνώνται ποιοτικά, για το αν αντιστοιχούν επαρκώς στην υπόθεση του μοντέλου και στην ακρίβεια και επάρκεια των παραμέτρων, με αποτέλεσμα να πρέπει να αναλυθούν ποσοτικά και οι μεταβλητές και τα εξαγόμενα. Η πιστοποίηση ενός μοντέλου είναι πιο πολύπλοκη διαδικασία από την επαλήθευση. Προτείνονται τα εξής βήματα πιστοποίησης ενός μοντέλου:
1ο βήμα. «Τρέξιμο» του μοντέλου για ακραίες τιμές δεδομένων.
2ο βήμα. «Τρέξιμο» του μοντέλου με ανεξάρτητες ομάδες εισαγομένων, σύγκριση των εξαγομένων με εμπειρικά δεδομένα και διερεύνηση της καταλληλότητας της υπόθεσης που χρησιμοποιήθηκε κατά τη δημιουργία και ανάπτυξη του μοντέλου.
3ο βήμα. Ανάλυση ευαισθησίας. Αναφέρεται στο βαθμό προσομοίωσης των μετρούμενων μεγεθών του μοντέλου όταν αλλάζουν κάποιες από τις αρχικά παραδεκτές συνθήκες ή παραμέτρους, τηρουμένων των άλλων σταθερών. Η ανάλυση της ευαισθησίας του μοντέλου σε σχέση με το σύνολο των παραμέτρων είναι το ολοκλήρωμα της ευαισθησίας ως προς την καθεμία ξεχωριστά. Υπάρχουν στατιστικά πακέτα για την κατανομή ευαισθησίας του μοντέλου. Πάντως, μετά την ανάλυση ευαισθησίας το μοντέλο αποκτά τα λεγόμενα «όρια ευαισθησίας» (sensitivity limits), για να είναι δυνατή η χρήση του από άλλους χρήστες σε άλλες περιοχές.
4ο βήμα. Σταθερότητα του μοντέλου (model stability). Αναφέρεται στο εύρος των δυνατών χρησιμοποιούμενων πακέτων δεδομένων και αρχικών και οριακών συνθηκών, τα οποία το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιήσει, μέσα στα όρια της ευαισθησίας του, για την προσομοίωση του φυσικού φαινομένου. Είναι ένα χαρακτηριστικό του μοντέλου αντιστρόφως ανάλογο της ευαισθησίας του. Τα όρια σταθερότητας του μοντέλου (stability limits) γίνονται σαφή μέσα από μια πληθώρα εφαρμογών του μοντέλου με ένα μεγάλο πλήθος αρχικών και οριακών συνθηκών.
5ο βήμα. Εκτίμηση των επιτρεπόμενων σφαλμάτων και της ακρίβειας ανάλογα με το σκοπό του μοντέλου. Το βασικό κριτήριο πιστοποίησης είναι η σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με εντελώς ανεξάρτητες σειρές δεδομένων. Ακόμα και με τη χρησιμοποίηση τέτοιων δεδομένων, το μοντέλο χαρακτηρίζεται από την αβεβαιότητα των πειραματικών (στατιστικών) δεδομένων με τα οποία συγκρίνονται τα εξαγόμενα της προσομοίωσης.
Η πιστότητα της πιστοποίησης μπορεί να βελτιωθεί με τη χρήση διαφορετικών, ανεξάρτητων στατιστικών βάσεων δεδομένων ή με επαναλήψεις των μετρήσεων. Αυτό είναι συνήθως δυνατό όταν εξετάζεται ένα μοντέλο περιοχικά, οπότε και μπορούν να βρεθούν δεδομένα από διαφορετικές πηγές. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η πλήρης συμφωνία μεταξύ των στατιστικών και των προσομοιωμένων δεδομένων δεν είναι συνήθως εφικτή, αλλά αυτό σχετίζεται και με τις αρχικές συνθήκες των πιστοποιημένων συντελεστών του μοντέλου. Η ανακρίβεια των εισαγομένων δεδομένων μπορεί να δημιουργήσει διάφορες αλλαγές στα εξαγόμενα. Σκοπός είναι να διερευνηθούν η επίδραση της παραλλακτικότητας στα εισαγόμενα δεδομένα και οι επιπτώσεις στα εξαγόμενα αποτελέσματα και να προσδιοριστεί το μέγεθος της αλλαγής των συγκεκριμένων δεδομένων.

12.2. Συναρτησιακά μοντέλα

Τα αγρομετεωρολογικά συναρτησιακά μοντέλα προσομοίωσης της ανάπτυξης καλλιεργειών, της εκτίμησης γεωργικής παραγωγής, καθώς και της επίπτωσης του καιρού στις καλλιέργειες και σοδειές βασίζονται στις ίδιες διαδικασίες, όπως και οι άλλες κατηγορίες μοντέλων. Ωστόσο, στα συναρτησιακά μοντέλα, οι διαδικασίες αυτές εκφράζονται με πιο απλοποιημένο τρόπο, καθόσον συγκεκριμένες λεπτομερείς διατυπώσεις αντικαθίστανται από εμπειρικές προσεγγίσεις. Ως αποτέλεσμα, τα μοντέλα αυτά χρειάζονται συνήθως πολύ λιγότερα εισαγόμενα στοιχεία, δηλαδή σημαντική μείωση του υπολογιστικού χρόνου. Κατά συνέπεια, τα συναρτησιακά μοντέλα, λόγω της φύσης τους, εφαρμόζονται συνήθως σε περιοχικές εκτιμήσεις και με χρονικό βήμα από μήνα μέχρι και έτος, σε αντίθεση με τις λεπτομερείς ημερήσιες διαδικασίες προσομοίωσης των άλλων μοντέλων. Επισημαίνεται, τέλος, ότι η τάση σήμερα είναι η δημιουργία συστημάτων ιεραρχικής προσέγγισης της ανάπτυξης καλλιεργειών, στα οποία τα συναρτησιακά μοντέλα χρησιμοποιούνται ως περιοχικοί πρόδρομοι δείκτες και ακολουθούν τα μοντέλα προσομοίωσης.
Στη συνέχεια διακρίνονται οι κατηγορίες μοντέλων βιομάζας, μοντέλων βλάστησης και εμπειρικών μοντέλων, που παρουσιάζονται επιγραμματικά με ενδεικτικά παραδείγματα:

12.2.1. Μοντέλα βιομάζας

Τα μοντέλα βιομάζας είναι περιγραφικές μέθοδοι ή απλές εξισώσεις που συνδέουν περιβαλλοντικές συνθήκες ή παραμέτρους με την παραγωγή βιομάζας σε πολύ γενικευμένη κλίμακα. Είναι κατάλληλα για αγροκλιματικές μελέτες και πολύ χρήσιμα για εκτίμηση της δυνητικής σοδειάς. Συνήθως, χρησιμοποιούν ετήσια κλιματικά στοιχεία. Παρουσιάζονται μερικά παραδείγματα.

12.2.1.1. Δυνητική βιομάζα

Η κλιματική δυνατότητα συσσώρευσης ξηρής ύλης, χωρίς περιοριστικούς παράγοντες (π.χ. νερό), δίνεται από τη σχέση (Kumar & Monteith, 1981):

$$DM = H \times Eff_H \times Eff_c \times Eff_a, \quad (12.6)$$

όπου DM είναι η ξηρή ύλη σε g m^{-2} $year^{-1}$, H η πλανητική καθαρή ακτινοβολία, Eff_H η κλιματική επάρκεια, Eff_c η επάρκεια μετασχηματισμού της απορρόφησης φωτοσυνθετικά ενεργούς ακτινοβολίας (PAR: Photosynthetically Active Radiation) και Eff_a η επάρκεια απορρόφησης, που δίνεται από τη σχέση:

$$Eff_a = a\,[1 - \exp(-k \times LAI)], \quad (12.7)$$

όπου k είναι ο συντελεστής εξασθένησης ακτινοβολίας, LAI ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας, με $LAI_{max} = 1.3$.

12.2.1.2. Μοντέλο Miami

Δίνεται από πολύ απλές εξισώσεις (Lieth, 1975):

$$NPP = \min(NPP_T, NPP_P) \quad (12.8)$$

$$NPP_T = 3000 / [1 + \exp(1{,}315 - 0{,}119\, T_c)] \quad (12.9)$$

$$NPP_P = 3000 \times [1 - \exp(-0{,}000664\, P)] \quad (12.10)$$

όπου NPP (Net Primary Productivity) είναι η καθαρή κύρια παραγωγικότητα, T_c η μέση ετήσια θερμοκρασία και P η ετήσια βροχή.

12.2.1.3. Μοντέλο NPP

Εμπειρικές σχέσεις μεταξύ NPP και κλιματικών μεταβλητών, που οδηγούν σε γραφήματα και δίνονται από τη σχέση (White et al., 1992· Gommes, 1998):

$$NPP_X = a\,[1 - \exp(-b\,X)], \quad (12.11)$$

όπου X είναι είτε η βροχή, P, είτε η πραγματική εξατμισοδιαπνοή, ET_a, και οι συντελεστές: για βροχή (mm) είναι a = 2909 και b = 0,000688, ενώ για πραγματική ET_a (mm) είναι a = 3511 και b = 0,000778, αντίστοιχα.

12.2.1.4. Μοντέλο Chikugo

Δίνεται από την εμπειρική σχέση (Uchijima & Seino, 1985):

$$NPP = 6{,}938 \times 10^{-7} \times H \times \exp[-3{,}6 \times 10^{-14} \times (H / P)^2] \quad (12.12)$$

όπου H είναι η καθαρή ετήσια ακτινοβολία και P η ετήσια βροχή.

12.2.1.5. Εκτίμηση βιομάζας

Έχει παρουσιαστεί στις εφαρμογές του Κεφαλαίου 11.

12.2.2. Μοντέλα βλάστησης

Υπάρχουν τύποι μοντέλων βλάστησης που καλύπτουν ποιοτικά διάφορα είδη φυτών. Η μεθοδολογία τους είναι ποσοτική και βασίζεται σε διαδικασίες και στην τυπολογία βλάστησης. Υπάρχουν τα πλανητικά μοντέλα βλάστησης, που χρησιμοποιούνται σε κλιματικές ταξινομήσεις και είναι πολύ δημοφιλή. Αναφέρονται ενδεικτικά τα μοντέλα Bomes και BIOME3 (Haxeltine & Prentice, 1996). Σε διαφορετική κλίμακα είναι το μοντέλο Agricultural Land Management Alternative Numerical Assessment Criteria (ALMANAC) (Kiniry et al., 1992). Το ALMANAC είναι ένα προγνωστικό μοντέλο που βασίζεται σε διαδικασίες. Μπορεί να προσομοιώνει συγκρίσεις μεταξύ 2 μέχρι 10 φυτών. Περιλαμβάνει λεπτομερείς συναρτήσεις για υδατικό ισοζύγιο, ανακύκλωση θρεπτικών, ανάπτυξη φυτού, σύγκριση στο φως, επιπτώσεις πυκνότητας πληθυσμού και ελλείμματος τάσης υδρατμών. Υπάρχει ακόμα ένα ειδικό μοντέλο, το CLIMEX, που μπορεί να εκτιμά τη δυνητική γεωγραφική κατανομή φυτών, ασθενειών και εχθρών. Κλιματικά στοιχεία χρησιμοποιούνται σε κάθε πλέγμα ενός πλαισίου, για να εκτιμηθεί η δυνατότητα να αναπτυχθεί σε κάθε πλέγμα συγκεκριμένος οργανισμός με γνωστά οικοφυσιολογικά χαρακτηριστικά.

Κρίνεται σκόπιμο να επισημανθεί ότι δεδομένα και μέθοδοι τηλεπισκόπησης θεωρούνται κατάλληλα για συναρτησιακά μοντέλα. Υπάρχουν εκτεταμένες εφαρμογές δεικτών τηλεπισκόπησης, όπως ο δείκτης βλάστησης κανονικοποιημένης διαφοράς (NDVI: Normalized Difference Vegetation Index), ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας (LAI: Leaf Area Index) και η φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία (PAR: Photosynthetic Active Radiation), μεταξύ των άλλων. Ενδεικτικά, αναφέρεται ότι χρονοσειρές NDVI και άλλων δεικτών έχουν χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση της ανάπτυξης καλλιεργειών, φαινολογίας και εκτίμηση παραγωγής (Dalezios et al., 2002a, 2002b). Στο Κεφάλαιο 11 παρουσιάζονται τέτοια παραδείγματα.

12.2.3. Ημιεμπειρικά μοντέλα για περιοχικές εφαρμογές

Είναι γεγονός ότι υπάρχει ένα κενό μεταξύ πλανητικής κλίμακας και κλίμακας αγροκτήματος. Έχει ήδη αναπτυχθεί πρωτοβουλία από τον FAO (Food and Agriculture Organization) (Gommes, 1998), για την προσομοίωση και την πρόγνωση καλλιεργειών σε εθνικό ή περιοχικό επίπεδο σε αναπτυσσόμενες κυρίως χώρες. Με βάση μετεωρολογικά και αγρονομικά δεδομένα, αναπτύσσονται διάφοροι δείκτες για την εκτίμηση της σοδειάς, αλλά και άλλων μεταβλητών και παραμέτρων, όπως πλεονάσματα και ελλείμματα υγρασίας, επάρκεια νερού, εξατμισοδιαπνοή, μέση υγρασία εδάφους, και άλλα συναφή. Οι δείκτες αυτοί χρησιμοποιούνται στη συνέχεια ως μεταβλητές σε εξίσωση συνήθως πολλαπλής παλινδρόμησης, για την εκτίμηση της σοδειάς, που αποτελεί και τη συνάρτηση σοδειάς. Τα αγρομετεωρολογικά και τηλεπισκοπικά στοιχεία χρησιμοποιούνται σε όλα τα επίπεδα. Επίσης, χρησιμοποιείται πλέγμα για περιοχική εκτίμηση, αλλά αφού έχει προηγηθεί η μοντελοποίηση. Το χρονικό βήμα είναι συνήθως το δεκαήμερο. Τα αποτελέσματα βαθμονομούνται με γεωργικές στατιστικές μέσω εμπειρικών μοντέλων σοδειάς.

12.3. Στατιστικά μοντέλα

Τα στατιστικά μοντέλα παρουσιάζουν ιστορικά εκτεταμένη χρήση. Η πιο συνήθης εφαρμογή τους είναι η χρήση εξισώσεων απλής ή πολλαπλής παλινδρόμησης, συνήθως γραμμικών, μεταξύ σοδειάς καλλιεργειών και μιας ή περισσοτέρων αγρομετεωρολογικών μεταβλητών. Το κύριο πλεονέκτημα των στατιστικών μοντέλων είναι η ευκολία υπολογισμών και οι μικρές απαιτήσεις δεδομένων. Παραμένουν σε χρήση για μεγάλης κλίμακας εκτιμήσεις και βασίζονται στην αρχή ότι η καλλιεργητική έκταση παραμένει σχετικά σταθερή από χρόνο σε χρόνο και ότι ακολουθεί είτε τις στατιστικές εκτιμήσεις ή δειγματοληψίες πεδίου, είτε πληροφορίες, όπως φαινολογικές παρατηρήσεις, είτε το μέγεθος σοδειάς προηγουμένων ετών. Γενικά, δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα σε μέσες χρονιές, όχι όμως σε ακραίες χρονιές. Επίσης, λειτουργούν ικανοποιητικά στα όρια της περιοχής όπου έχουν αναπτυχθεί και στο εύρος των τιμών για τα οποία έχουν βαθμονομηθεί. Αγροκλιματικές μέθοδοι πρόγνωσης παραγωγής καλλιεργειών εμπίπτουν στην κατηγορία των στατιστικών μοντέλων, εφόσον έχουν την ίδια απόδοση και διαθέτουν το πλεονέκτημα της μη εξάρτησης από ειδικά στοιχεία πεδίου.

Στα μειονεκτήματα των στατιστικών μοντέλων περιλαμβάνεται ακόμα η μη θεώρηση κατά προτεραιότητα της αγρονομικής σημασίας του μοντέλου σε σχέση με τη στατιστική σημασία. Ένα άλλο μειονέκτημα σχετίζεται με την ανάγκη συνεχούς ανάπτυξης εξισώσεων, για την παρακολούθηση της εξέλιξης των φαινολογικών σταδίων και της βλαστικής περιόδου. Επισημαίνεται ότι πολλά μειονεκτήματα των μοντέλων παλινδρόμησης μπορεί να αποφευχθούν όταν χρησιμοποιούνται δείκτες ή μεταβλητές «προστιθέμενης αξίας», αντί για πρωτογενείς αγρομετεωρολογικές μεταβλητές (Gommes, 1998). Για παράδειγμα, η πραγματική εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας είναι μια μεταβλητή που συνδέεται άμεσα με την ηλιακή ακτινοβολία που

απορροφάται από τα φυτά σε ικανοποιητικές συνθήκες παροχής νερού. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται κατηγορίες και παραδείγματα στατιστικών μοντέλων.

12.3.1. Μοντέλα παλινδρόμησης

Παρουσιάζονται μερικά ενδεικτικά παραδείγματα από το πολύ μεγάλο εύρος μοντέλων παλινδρόμησης, που έχουν εφαρμοστεί κυρίως τις δεκαετίες του 1970 και του 1980:

12.3.1.1. Μοντέλο παλινδρόμησης

Τυπικό παράδειγμα είναι το μοντέλο εκτίμησης σοδειάς καλλιεργειών (Gommes, 1998):

$$\text{Yield} = 5 + 0{,}03\ \text{Rain}_{\text{March}} - 0{,}10\ T_{\text{C, June}}\ , \quad (12.13)$$

όπου Yield είναι η σοδειά σε tons ha^{-1}, Rain η βροχόπτωση του Μαρτίου και T η θερμοκρασία του Ιουνίου.

12.3.1.2. Μοντέλο πολλαπλής παλινδρόμησης

Ένα τυπικό παράδειγμα εκτίμησης σοδειάς καλλιεργειών είναι το κλασικό μοντέλο πολλαπλής παλινδρόμησης, που έχει εφαρμοστεί με επιτυχία σε πολλές περιπτώσεις (Baier, 1973):

$$Y = \sum V_1 \ x \ V_2 \ x \ V_3\ , \quad (12.14)$$

όπου V_1, V_2, V_3 είναι συναρτήσεις ανεξάρτητων μεταβλητών για ενέργεια, θερμοκρασία και υγρασία εδάφους ή εξατμισοδιαπνοή, αντίστοιχα.
Η μορφή μιας τέτοιας συνάρτησης μπορεί να είναι:

$$V = (u_1 t + u_2 t^2 + u_3 t^3 + u_4 t^4) + (u_5 t^5 + u_6 t^6 + u_7 t^7 + u_8 t^8)\ X + \ldots\ . \quad (12.15)$$

12.3.1.3. Ανάλυση παλινδρόμησης και στατιστικά μοντέλα

Αυτή η μέθοδος κάνει χρήση των στατιστικών σχέσεων που υπάρχουν μεταξύ απόδοσης (ή παραγωγής) και των συνθηκών που μπορεί να έχουν επιδράσει στην παραγωγή ή την καλλιεργούμενη περιοχή, όπως παράμετροι του καιρού, τιμές λιπασμάτων, εισροές, ακαθάριστο εθνικό προϊόν, ή αναμενόμενη παραγωγή. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται ευρέως, για παράδειγμα στη Γαλλία, σε διάφορες πολιτείες των ΗΠΑ, στον Καναδά και στην Ινδία. Η χρήση των στατιστικών σχέσεων της μεθόδου παρουσιάζει τους εξής περιορισμούς: τα αποτελέσματα μπορεί να είναι αμφίβολα ή ασταθή και μερικές από τις απαιτούμενες πληροφορίες μπορεί να είναι διαθέσιμες μόνο μεταγενέστερα.

12.3.2. Ανάλυση τάσεων και παλινδρόμηση

Στην κατηγορία αυτή παρουσιάζονται ενότητες που δείχνουν νέα τάση προσέγγισης στη μοντελοποίηση (Vossen & Rijks, 1995):

12.3.2.1. Ανάλυση χρονικής τάσης

Αυτή η μέθοδος βασίζεται στη στατιστική σχέση μεταξύ της παραγωγής του φυτού (απόδοση) στη διάρκεια των ετών και της εξέλιξης που παρατηρήθηκε. Η γενική διατύπωση στην πιο απλή της μορφή είναι:

$$Y = a + b\ \{\text{συνάρτηση χρονικής τάσης}\} + \text{σφάλμα.} \quad (12.16)$$

Για παράδειγμα, $Y = a + b\ \{\text{έτος}\} + c\ \{\text{έτος}\}^2$, όπου τα b και/ή c μπορεί να είναι μηδέν, θετικά ή αρνητικά. Μια θετική τάση μπορεί να παρατηρηθεί στην περίπτωση της προόδου ή του κίνητρου για υψηλότερες αποδόσεις. Αντίθετα, αρνητική τάση μπορεί να εμφανισθεί σε περιπτώσεις υποβάθμισης της οικονομίας, μειωμένες εισροές, περιβαλλοντικά θέματα και άλλα.

12.3.2.2. Συνδυασμός χρονικής τάσης και ανάλυσης παλινδρόμησης

Αυτή η μέθοδος συνδυάζει τη χρονική τάση και άλλες παραμέτρους σε μια απλή προσέγγιση. Οι δύο εναλλακτικές σχέσεις είναι:

Y = a + b {συνάρτηση τάσης} + Υπόλοιπο, όπου Υπόλοιπο = f {άλλοι όροι} (12.17)

Y = a + b {συνάρτηση τάσης} + c {άλλοι όροι}. (12.18)

Οι άλλοι όροι μπορεί να είναι παράμετροι του καιρού, αναμενόμενες τιμές λιπασμάτων, εισροές, ακαθάριστο εθνικό προϊόν ή αναμενόμενη παραγωγή. Ωστόσο, επισημαίνεται ότι στην περίπτωση των εύκρατων περιοχών, οι άλλες παράμετροι μπορεί να μην επιδράσουν στην τάση ή να επιδράσουν ελάχιστα.

12.3.2.3. Προσομοίωση αύξησης φυτών με χρήση δεικτών

Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται από τον FAO, τη Ρωσία, τη Γαλλία, για το καλαμπόκι, καθώς και από άλλες χώρες. Στη μέθοδο αυτή χρησιμοποιείται μια στατιστικώς έγκυρη σχέση μεταξύ των φυτών και απλών βιολογικών ή αγρονομικών δεικτών, οι οποίοι μπορούν να συσχετισθούν με την απόδοση. Τέτοια παραδείγματα δεικτών μπορεί να είναι η βροχόπτωση, το άθροισμα θερμοκρασιών, η αναλογία βροχόπτωσης και βασικής εξατμισοδιαπνοής, η ξηρασία ή οι δείκτες καταπόνησης από τη θερμοκρασία. Η προσομοίωση αύξησης φυτών μπορεί να υλοποιηθεί με τη θεώρηση ολόκληρου του κύκλου ανάπτυξης του φυτού ή τμήματος, όπως από τη φύτευση έως τη συγκομιδή, από τη φύτευση έως την άνθιση, από την άνθιση έως τη συγκομιδή, πριν από τη φύτευση ή κατά τη συγκομιδή. Οι απαιτούμενες πληροφορίες εισαγωγής είναι οι δείκτες παραγωγής και τα εθνικά στατιστικά που αφορούν την παραγωγή των φυτών. Τέλος, πρέπει να επισημανθεί ο περιορισμός ότι οι διαφορές στην απόδοση, οι οποίες δεν εξηγούνται με τους δείκτες, δεν διακρίνονται. Για παράδειγμα, η απόδοση σε μια ημιάνυδρη περιοχή στη διάρκεια μιας ασυνήθιστης δροσερής περιόδου.

12.3.2.4. Συνδυασμός προσομοίωσης αύξησης φυτών και χρονικής τάσης σε παλινδρόμηση

Η μέθοδος αυτή στοχεύει να εγκαταστήσει και να αξιοποιήσει μια στατιστική σχέση μεταξύ της παρατηρούμενης πραγματικής απόδοσης των φυτών και των αποτελεσμάτων ενός μοντέλου προσομοίωσης, πιθανώς σε συνδυασμό με μια συνάρτηση χρονικής τάσης, καθώς και άλλων παραμέτρων. Τα αποτελέσματα του προσδιοριστικού μοντέλου προσομοίωσης αναμένεται να είναι μια απεικόνιση της πραγματικότητας. Τα αποτελέσματα του μοντέλου γίνονται δείκτες, που χρησιμοποιούνται ως εισαγόμενα σε μια εξίσωση παλινδρόμησης, ενώ η σχέση μεταξύ προσομοίωσης και πραγματικής απόδοσης δεν μπορεί να είναι άλλο παρά έγκυρη. Οι δύο πιθανές εναλλακτικές σχέσεις είναι :

Y = a + b {συνάρτηση τάσης} + Υπόλοιπο (12.19)

Y = a + b {συνάρτηση τάσης} + c {αποτελέσματα μοντέλου}, (12.20)

όπου Υπόλοιπο = f {αποτελέσματα μοντέλου}, ενώ το b μπορεί να είναι μηδέν, θετικό ή αρνητικό.
Τα αποτελέσματα του μοντέλου προσομοίωσης ποικίλλουν και, ανάλογα με την περίπτωση, μπορεί να είναι η βιομάζα, η ποσότητα των σπόρων, η φυλλική επιφάνεια, το στάδιο ανάπτυξης, το απόθεμα εδαφικής υγρασίας, ή η βροχόπτωση. Επισημαίνεται ότι η μέθοδος αυτή επιτρέπει να γίνουν απλοποιήσεις και γενικεύσεις στο μοντέλο, καθώς λανθασμένες υποθέσεις μπορούν μερικώς να αντισταθμιστούν στην ανάλυση παλινδρόμησης. Αυτό το γεγονός διευκολύνει τη χρήση της μεθόδου σε εθνική ή τοπική κλίμακα και την εγκυρότητά της απέναντι σε εθνικές ή τοπικές στατιστικές. Επίσης, τα αποτελέσματα εξαρτώνται παρά πολύ από την ποιότητα και την αξιοπιστία των στατιστικών, που προηγουμένως αναφέρθηκαν. Δεν υπολογίζονται ακραίες καταστάσεις, όπως ακραίες θερμοκρασίας ή υπερβολική βροχόπτωση. Τέλος, δεν υπολογίζονται οι ξαφνικές αλλαγές στις καλλιεργητικές πρακτικές των αγροτών.

12.3.3. Μέθοδοι τηλεπισκόπησης

Εφαρμογές τηλεπισκόπησης αναφέρονται στο Κεφάλαιο 11. Τρεις είναι οι κύριες προσεγγίσεις μεθόδων τηλεπισκόπησης:

12.3.3.1. Στατιστική προσέγγιση

Οι δείκτες που λαμβάνονται από αισθητήρες δορυφόρων ή αεροσκαφών είναι ένας μέσος όρος πάνω από μια ορισμένη περιοχή ή χώρα και εισάγονται σε μια ανάλυση παλινδρόμησης. Για παράδειγμα :

Απόδοση = a + b {μέσο NDVI μιας περιοχής}. (12.21)

12.3.3.2. Προσδιοριστική προσέγγιση

Σύμφωνα με ένα κλασικό παράδειγμα της μεθόδου, από έναν αρχικό υπολογισμό του NDVI (δείκτη βλάστησης κανονικοποιημένης διαφοράς), του LAI (δείκτη φυλλικής επιφάνειας), της APAR (απορροφούμενης φωτοσυνθετικώς ενεργής ακτινοβολίας· Absorbed Photosynthetically Active Radiation), καθώς και της βιομάζας, λαμβάνονται στοιχεία που οδηγούν σε εκτίμηση της παραγωγής.

12.3.3.3. Συνδυασμένη προσέγγιση τηλεπισκόπησης σε μοντέλο προσομοίωσης

Ένα παράδειγμα είναι η εκτίμηση της πραγματικής απόδοσης, συγκρίνοντας τις τωρινές συνθήκες ανάπτυξης (π.χ., NDVI, Ts), που εκτιμώνται με μεθόδους τηλεπισκόπησης, με αυτές των προηγούμενων ετών, δηλαδή ο απολογισμός είναι η απόδοση του έτους ν/απόδοση έτους ν – 1. Επίσης, η συνδυασμένη προσέγγιση χαρακτηρίζεται από την εκτίμηση της πιο πιθανής ημερομηνίας σποράς με βάση την ανάλυση δεδομένων τηλεπισκόπησης, τη ρύθμιση προσομοιούμενου δείκτη φυλλικής επιφάνειας, σύμφωνα με πληροφορίες που λαμβάνονται από τηλεπισκόπηση, καθώς και τη ρύθμιση προσομοιούμενης βιομάζας, χωρίς έλλειψη νερού, σε συνθήκες καταπόνησης, που εκτιμάται με τηλεπισκόπηση.

12.3.4. Νέες μεθοδολογίες

Αναφέρονται επιγραμματικά δύο νέες μέθοδοι, παρ' όλο που η επιστημονική τάση συνεχώς διευρύνει τις δυνατότητες και προοπτικές:

12.3.4.1. Αεροπαλυνολογική μέθοδος

Εφαρμόζεται κυρίως στην Γαλλία και είναι προεπιχειρησιακή. Επίσης, έχει υιοθετηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση και συστήνεται στα κράτη-μέλη να την υλοποιήσουν. Εφαρμόζεται κυρίως για προγνώσεις στην παραγωγή σταφυλιών και ελιάς. Η βασική αρχή ορίζει ότι η τελική παραγωγή σταφυλιών και ελιάς στο στάδιο της άνθισης σχετίζεται άμεσα με την ποσότητα της γύρης που απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα. Το μειονέκτημα της μεθόδου είναι ο μη υπολογισμός των μετά την άνθιση συνθηκών, όπως είναι η εκδήλωση παγετού ή ξηρασίας. Επίσης, η μέθοδος είναι πολύ ευαίσθητη σε μεταβολές του φυσικού περιβάλλοντος, όπως η μείωση της καλλιεργούμενης έκτασης γύρω από τους μετρητές γύρης.

12.3.4.2. Μέθοδος βαθμιαίας μεταβολής του CO_2

Βασίζεται στο γεγονός ότι οι βαθμιαίες μεταβολής του CO_2 και οι αλλαγές πάνω από ένα χωράφι σχετίζονται ποσοτικά με την παραγωγή καλλιεργειών και τη σοδειά.

12.4. Μοντέλα προσομοίωσης

Τα αγρομετεωρολογικά μοντέλα προσομοίωσης βασίζονται σε διαδικασίες και έχουν αναπτυχθεί για πολλούς διαφορετικούς σκοπούς και χρήσεις, όπως καλλιέργειες, κλίμακες ή κλίμα, όπου αποδίδουν καλύτερα. Ωστόσο, μπορούν να προσδιοριστούν μερικές γενικές περιοχές εφαρμογών. Αρχικά, απαιτείται ακόμα έρευνα για την κατανόηση της πραγματικής συμπεριφοράς φυτού-περιβάλλοντος. Τα μοντέλα επίσης προσφέρουνμεθόδους υπολογισμού της τάξης μεγέθους μερικών μεταβλητών και σταθερών των καλλιεργειών, που δεν προσφέρονται πειραματικά. Είναι δυνατή η απόκτηση προσθετης γνώσης και ενημέρωσης σχετικά με τη συμπεριφορά των καλλιεργειών όταν εκτίθενται σε μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες και επιλογές διαχείρισης. Εξετάζεται η διαχείριση σε επίπεδο αγροκτήματος, καθώς και άλλες επιχειρησιακές εφαρμογές για τη βελτίωση της σχεδίασης και του συγχρονισμού των λειτουργιών. Ειδικότερα, επισημαίνεται ότι εξετάζεται η γεωργία ακριβείας, που αποτελεί τελείως νέα κατηγορία εφαρμογών. Τέλος, επισημαίνεται η ανάγκη έρευνας για περιοχικές εφαρμογές προσομοίωσης καλλιεργειών, δηλαδή για κλίμακες πάνω από το αγρόκτημα μέχρι μεγάλες περιοχικές εκτάσεις, όπου απαιτούνται ειδικά εισαγόμενα στοιχεία και οι στόχοι εφαρμογών αλλάζουν. Στον Πίνακα 12.3 δίνονται οι πιο γνωστές ιστοσελίδες αναφοράς μοντέλων, ενώ στον Πίνακα 12.4 οι ιστοσελίδες των πιο γνωστών και με εκτεταμένη χρήση μοντέλων, μερικά από τα οποία παρουσιάζονται στη συνέχεια, όπως τα CropSyst, WOFOST, EPIC, DSSAT και CERES.

ECOBAS (ECOlogical models data BASe)	http://www.ecobas.org/
CAMASE (Concerted Action for the development and testing of quantitative Methods for research on Agricultural Systems and the Environment)	
CIESIN-USDA	
CEAM Center for exposure Assessment Models for US Environmental protection agency	http://www2.epa.gov/exposure-assessment-models
	http://www.powersim.com/
	http://greenhat.com/
	http://geoglam-crop-monitor.org/

Πίνακας 12.3. *Ιστοσελίδες αναφοράς μοντέλων προσομοίωσης καλλιεργειών.*

Model	Information
DSSAT (CERES)	http://dssat.net/
AQUACROP	http://www.fao.org/nr/water/aquacrop.html
CROPWAT	http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_cropwat.html
CROPSYST	http://modeling.bsyse.wsu.edu/CS_Suite_4/CropSyst/index.html
STICS	http://www6.paca.inra.fr/stics_eng
WOFOST	http://www.wageningenur.nl/en/Expertise-Services/Research-Institutes/alterra/Facilities-Products/Software-and-models/WOFOST.htm
SUCROS	http://models.pps.wur.nl/node/3
SWAP	http://www.swap.alterra.nl/
EPIC / APEX	http://epicapex.tamu.edu/epic/
SWAT	http://swat.tamu.edu/
APSIM	http://www.apsim.info/
DAISY	http://code.google.com/p/daisy-model/
GLAM	https://www.ictp.it/research/esp/models/glam.aspx

Πίνακας 12.4. *Ιστοσελίδες γνωστών μοντέλων προσομοίωσης καλλιεργειών.*

CropSyst (www.bsyse.wsu.edu/cropsyst/)

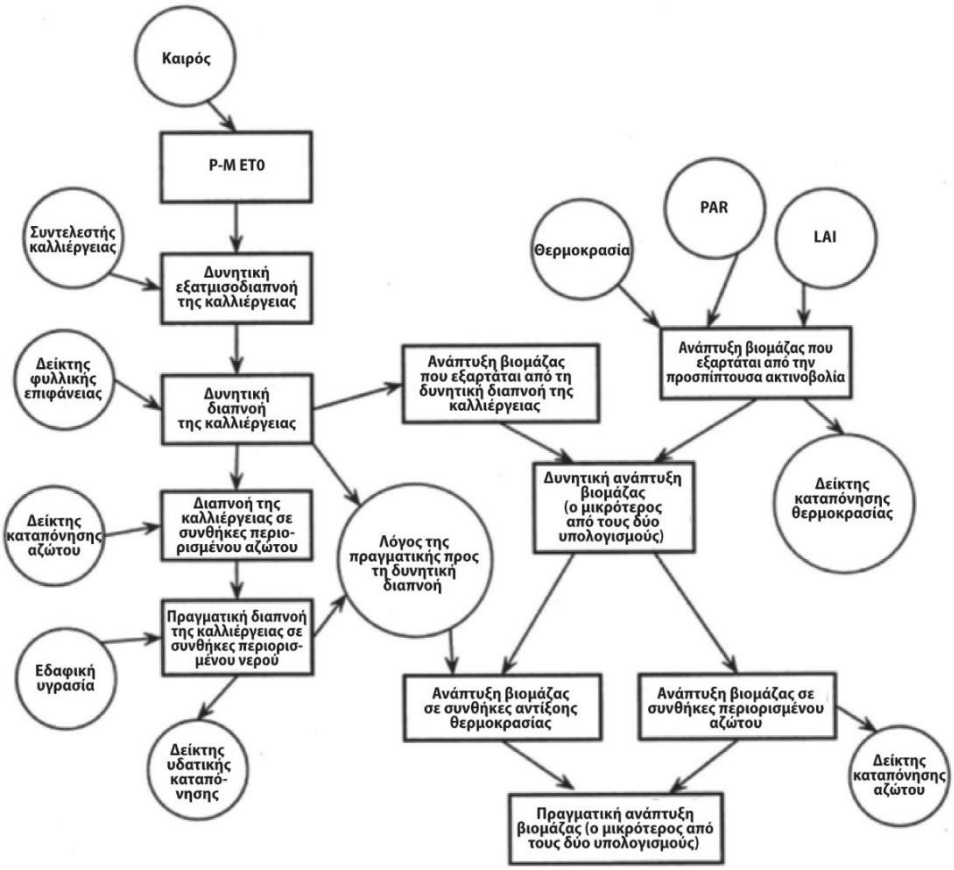
Το CropSyst (Cropping Systems Simulation Model) είναι ένα μοντέλο προσομοίωσης ανάπτυξης καλλιεργειών για πολυετείς και πολλαπλές καλλιέργειες με ημερήσιο χρονικό βήμα. Είναι εύκολο στη χρήση του, με διασύνδεση με λογισμικό ΓΣΠ (Geographical Information Systems/GIS) και γεννήτρια καιρού (Stockle et al., 1994), καθώς και μοντέλα οικονομικής ανάλυσης και ρίσκου. Στο Σχήμα 12.3 απεικονίζεται το διάγραμμα ροής του CropSyst. Στόχος του μοντέλου είναι να λειτουργεί ως αναλυτικό εργαλείο, για τη μελέτη της επίδρασης της διαχείρισης καλλιεργητικών συστημάτων στην παραγωγικότητα καλλιεργειών και στο περιβάλλον. Για το σκοπό αυτό, το CropSyst προσομοιώνει το υδατικό ισοζύγιο εδαφών, το ισοζύγιο αζώτου στο σύστημα έδαφος-φυτό, τη φαινολογία καλλιεργειών, το φύλλωμα καλλιέργειας και την ανάπτυξη ριζών, την παραγωγή βιομάζας, σοδειά, τα υπολλείμματα παραγωγής και την αποσύνθεση, τη διάβρωση του εδάφους από το νερό και τα εντομοκτόνα. Όλα αυτά επηρεάζονται από τον καιρό, τα χαρακτηριστικά του εδάφους και της καλλιέργειας, και τις επιλογές διαχείρισης καλλιεργητικών συστημάτων, που περιλαμβάνουν αγρανάπαυση, επιλογή καλλιέργειας, άρδευση, λίπανση αζώτου, εφαρμογές εντομοκτόνου, αλατότητα εδαφών και αρδευτικού νερού, όργωμα και διαχείριση υπολλειμμάτων.

Το CropSyst είναι πρόγραμμα πολύ φιλικό στο χρήστη, τα εισαγόμενα αρχεία μπορεί εύκολα να υποστούν επεξεργασία, η προσομοίωση είναι πολύ στρωτή, με πολλές ευελιξίες, ενώ υπάρχει πληθώρα επιλογών στη μορφή των εξαγομένων του μοντέλου. Το μοντέλο είναι πλήρως τεκμηριωμένο, το δε εκτελέσιμο πρόγραμμα, εγχειρίδιο και φροντιστήριο μπορούν να αποκτηθούν από την ιστοσελίδα.

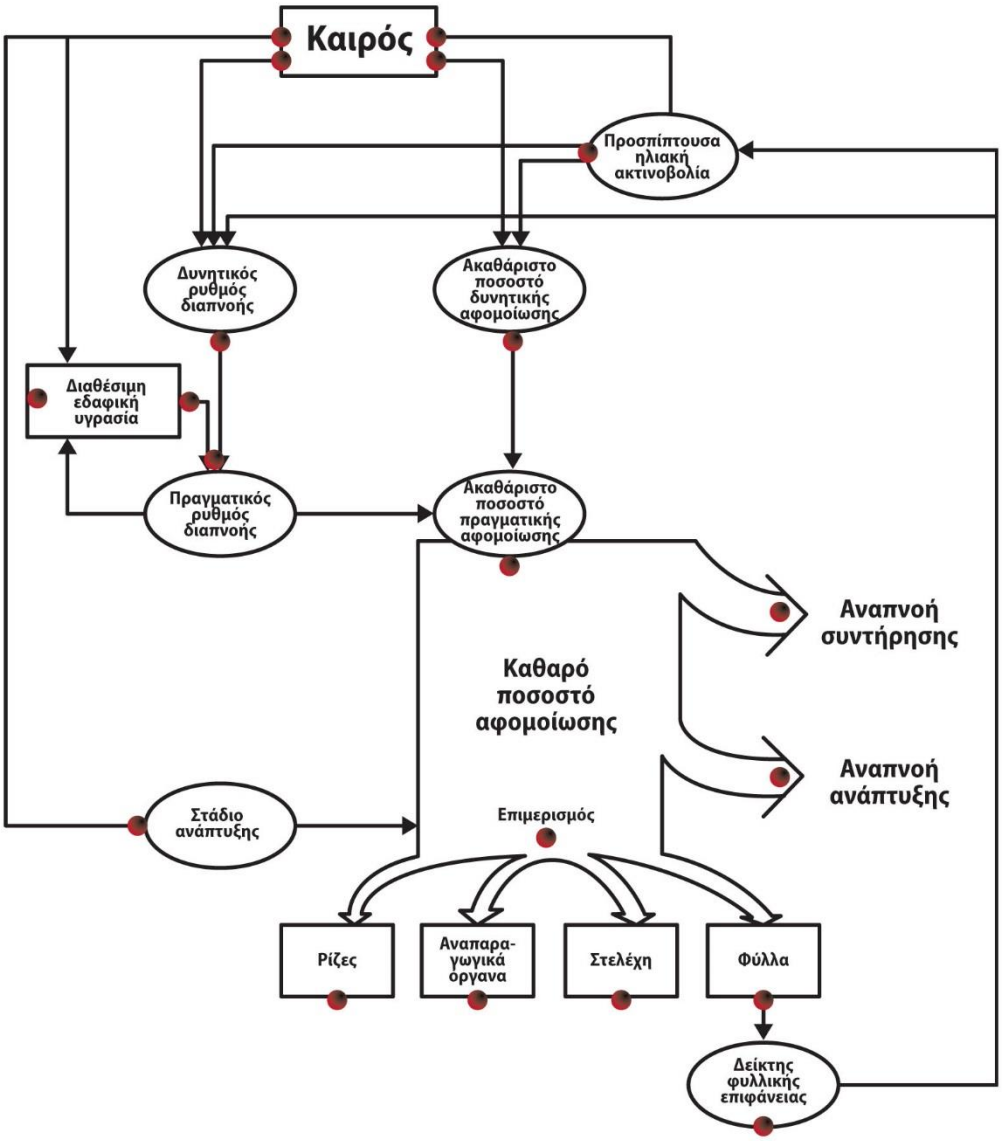
WOFOST (http://dino.wiz.uni-kassel.de/model_db/mdb/wofost.html)

Το μοντέλο WOFOST (World Food Studies) ανήκει στην οικογένεια του Πανεπιστημίου του Wageningen (Van Diepen et al., 1991). Το μοντέλο μπορεί να αποκτηθεί από την ιστοσελίδα ECOBAS του Πανεπιστημίου Κάσελ της Γερμανίας. Το WOFOST, έκδοση 6.0, είναι ένα μηχανιστικό μοντέλο, που προσομοιώνει την ανάπτυξη των καλλιεργειών, βάσει των υφιστάμενων διαδικασιών, όπως η φωτοσύνθεση και η αναπνοή και δείχνει ότι οι διαδικασίες αυτές επηρεάζονται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Περιγράφει την ανάπτυξη καλλιέργειας ως συσσώρευση βιομάζας, σε συνδυασμό με τη φαινολογική εξέλιξη. Προσομοιώνει τον κύκλο ζωής καλλιέργειας, από τη σπορά ή φύτρωμα μέχρι την ωρίμανση. Μετεωρολογικά στοιχεία, όπως βροχή, θερμοκρασία, ταχύτητα ανέμου, ολική ακτινοβολία και υγρασία αέρα, χρειάζονται ως εισαγόμενα. Άλλα εισαγόμενα στοιχεία περιλαμβάνουν περιεχόμενη εδαφική υγρασία σε διάφορα βάθη και άλλα στοιχεία σχετικά με την κορεσμένη και ακόρεστη ροή νερού. Επίσης, χρειάζονται και τοπικά στοιχεία εδάφους και διαχείρισης καλλιέργειας. Η προσομοίωση γίνεται με ημερήσιο χρονικό βήμα. Στο Σχήμα 12.4 απεικονίζεται το διάγραμμα ροής του μοντέλου WOFOST.

Διάκριση γίνεται μεταξύ δυνητικής παραγωγής και παραγωγής σε συνθήκες περιορισμένης διαθεσιμότητας νερού ως προσεγγίσεις οροφής παραγωγής για αρδευόμενες και μη αρδευόμενες καλλιέργειες, αντίστοιχα. Το μοντέλο ανάπτυξης καλλιέργειας είναι γενικό και περιλαμβάνει παραμέτρους για σιτάρι, καλαμπόκι, αραβόσιτο, ρύζι, σαχαρότευτλα, πατάτα, φασόλια, σόγια και ηλίανθο. Στην έκδοση 6.0, οι τιμές των παραμέτρων καλλιέργειας αντιπροσωπεύουν ειδικά χαρακτηριστικά της καλλιέργειας, όπως αθροίσματα θερμοκρασίας και φως ημέρας, που έχουν υιοθετηθεί για περιοχικές συνθήκες σε όλη την Ευρώπη. Επίσης, υπάρχουν εκδόσεις για τροπικές περιοχές, ακόμα και για προσομοίωση ανάπτυξης τουλίπας.



Σχήμα 12.3. *Διάγραμμα ροής μοντέλου CropSyst*.

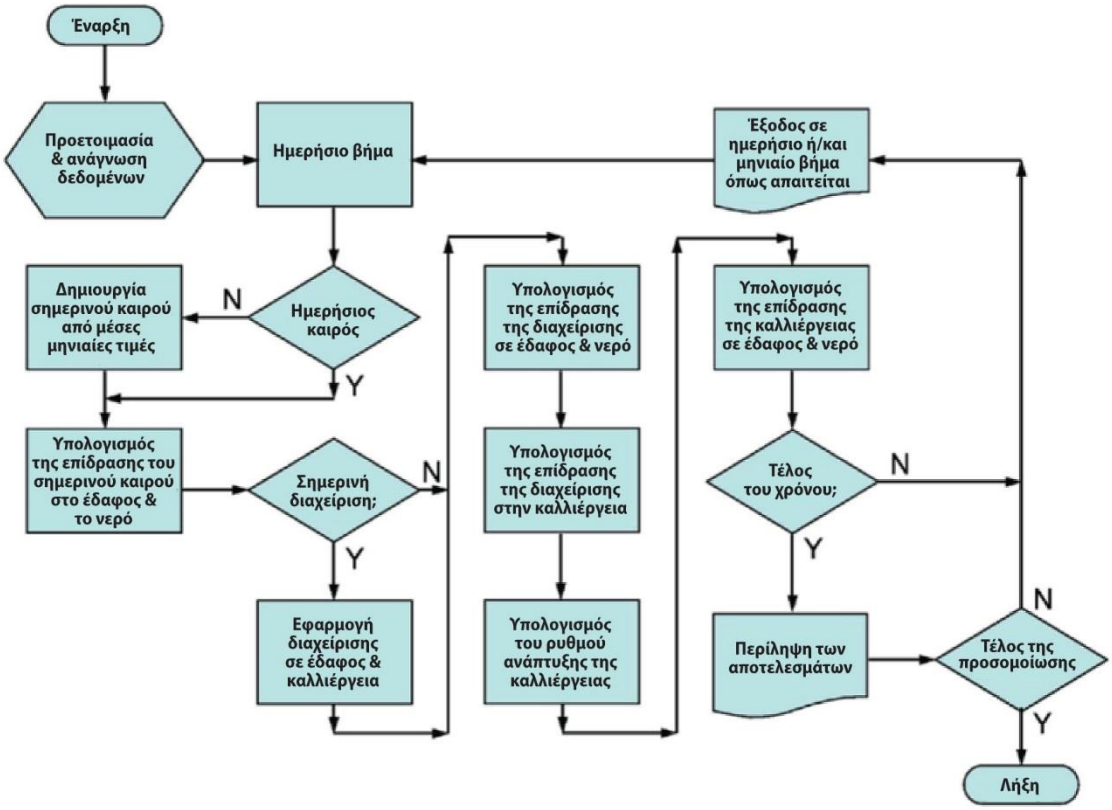


Σχήμα 12.4. *Διάγραμμα ροής μοντέλου WOFOST.*

EPIC (http://bresun0.tamu.edu/epic/)

Το μοντέλο EPIC (Environmental Policy Integrated Climate), που παλαιότερα ονομαζόταν επίσης EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator), ανήκει στο Texas A&M University (TAMU) (Williams et al., 1990). Στο TAMU ανήκει επίσης το μοντέλο Soil & Water Assessment Tool/SWAT, που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 13. Στο Σχήμα 12.5 απεικονίζεται το διάγραμμα ροής του EPIC. Στόχοι του μοντέλου, έκδοση 5300 (Mitchell et al., 1995), είναι η εκτίμηση των επιπτώσεων της διάβρωσης εδάφους στην παραγωγικότητα, καθώς και η πρόγνωση των επιπτώσεων των αποφάσεων διαχείρισης εδαφών, νερού και μετακινήσεων εχθρών και η συνδυασμένη επίπτωση σε απώλεια εδάφους, ποιότητα νερού και σοδειές σε περιοχές με ομογενή εδάφη και διαχείριση. Οι συνιστώσες του μοντέλου περιλαμβάνουν λεπτομερές ισοζύγιο εδαφικού νερού, που καλύπτει πλευρική υπόγεια ροή, τήξη χιονιού, διάβρωση νερού και ανέμου, λεπτομερές ισοζύγιο αζώτου, N, και φωσφόρου, P, μετακίνηση εχθρών, ανάπτυξη καλλιέργειας και σοδειά για πάνω από 20 καλλιέργειες, διαχείριση καλλιέργειας, κοστολογήσεις, καθώς και διαχείριση αποβλήτων. Το EPIC λειτουργεί σε χρονικό βήμα μιας ημέρας και δέχεται στοιχεία παραμέτρων για έδαφος, καιρό, όργωμα και καλλιέργεια. Το έδαφος μπορεί να χωρίζεται σε μέχρι 10 στρώματα. Το EPIC επικαιροποιείται συνεχώς από το 1980 και καλύπτει την κλιματική αλλαγή, το σχεδιασμό σε επίπεδο αγροκτήματος και της εκτίμηση απώλειας εδάφους. Κύρια

εφαρμογή του μοντέλου παραμένει η διάβρωση. Στο μοντέλο EPIC έχει πρόσφατα ενσωματωθεί ένα μοντέλο γεννήτριας τυχαίου καιρού (RNG: Random Number Generator), όπως λέγονται, με αποτέλεσμα το μοντέλο EPIC να μπορεί να εκτελεί προσομοιώσεις χιλιάδων ετών, για την εκτίμηση των επιπτώσεων της διάβρωσης, που είναι μια πολύ βραδεία διαδικασία.



Σχήμα 12.5. *Διάγραμμα ροής μοντέλου EPIC*.

DSSAT και CERES (http://everex.ibsnat.hawaii.edu/)
Την ομάδα μοντέλων DSSAT/CERES, που περιλαμβάνει επίσης τα GRO (BEANGRO, SOYGRO, PNUTGRO), SUBSTOR και CASSAVA, διαχειρίζεται το IBSNAT, που προέρχεται από τα USAID και USDA-CSRS.

DSSAT (http://dssat.net/)
Το DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) είναι ένα σύστημα υποστήριξης αποφάσεων, που έχει σχεδιαστεί για να βοηθήσει τους αγρότες στην ανάπτυξη μακροπρόθεσμων στρατηγικών αγρανάπαυσης. Δεκαπέντε μοντέλα προσομοίωσης καλλιεργειών, όπως τα CERES-σιτάρι, καλαμπόκι, ρύζι, αραβόσιτος, σόγια, ηλίανθος, σαχαπαροκάλαμο, τομάτα, κεχρί, ρεβύθι και ζωοτροφές, καθώς και τα SOYGRO, PNUTGRO, BEANGRO, SUBSTOR-πατάτα είναι προσβάσιμα από το DSSAT. Τα μοντέλα έχουν αναπτυχθεί για να εκτιμήσουν την επίδραση του καιρού και διαχειριστικές πρακτικές στην ανάπτυξη και εξέλιξη καλλιεργειών. Το DSSAT αναπτύσσει τυποποιήσεις (standards), για τη συλλογή δεδομένων, και σχήματα (formats), για την απόκτηση και ανταλλαγή δεδομένων. Αυτό επιτρέπει στα μοντέλα της ομάδας να έχουν πρόσβαση σε κοινά στοιχεία εδάφους και καιρού. Καθένα από τα μοντέλα βασίζεται στις διαδικασίες και προσομοιώνει την ημερήσια ανάπτυξη και εξέλιξη των καλλιεργειών από την επίδραση του καιρού της ημέρας. Πολλαπλή εποχική προσομοίωση παρέχει αθροιστική ανάλυση πιθανότητας για διαχείριση ρίσκου. Πολλά μοντέλα της ομάδας έχουν ενταχθεί σε ανώτερου επιπέδου περιβαλλοντική μοντελοποίηση, γνωστή ως συστήματα καλλιεργειών (CropSyst). Το DSSAT παρουσιάζεται και στο τέλος αυτού του κεφαλαίου. Στο Σχήμα 12.6 απεικονίζεται το διάγραμμα ροής του μοντέλου DSSAT.

***CERES* (Crop Environment Resource Synthesis)**
Το μοντέλο CERES συνοδεύεται στην ονομασία του συνήθως με την καλλιέργεια που προσομοιώνει, π.χ. CERES-καλαμπόκι. Είναι ένα προσδιοριστικό μοντέλο, που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση εδάφους, νερού και θερμοκρασίας, τη συμπεριφορά εδαφικού αζώτου σε κλίμακα αγρού για μια βλαστική περίοδο. Είναι πολύ δημοφιλή μοντέλα και έχουν χρησιμοποιηθεί πρόσφατα στην αξιολόγηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στις καλλιέργειες. Δυνητική παραγωγή ξηρής ύλης υπολογίζεται ως συνάρτηση της ακτινοβολίας, του δείκτη φυλλικής επιφάνειας και παραγόντων μείωσης της παραγωγής, λόγω καταπόνησης θερμοκρασίας και υγρασίας. Προσομοιώνονται έξι φαινολογικά στάδια με βάση τους ημερόβαθμους και υπολογίζονται ρυθμοί ανάπτυξης φύλλου και κλώνων. Η διαθέσιμη φωτοσύνθεση διαχωρίζεται σε φύλλα και κλώνους, ενώ η υπόλοιπη κατανέμεται στην ανάπτυξη των ριζών. Ξεχωριστές ρουτίνες υπολογίζουν το υδατικό ισοζύγιο, που περιλαμβάνει απορροή, διείσδυση, κορεσμένη και ακόρεστη ροή νερού και στράγγιση. Υπολογίζονται επίσης η δυναμική και το διαθέσιμο άζωτο για την καλλιέργεια. Τέλος, το μοντέλο παρέχει πληροφορίες για την επιφανειακή ξηρή ύλη, το περιεχόμενο άζωτο, την κοκκώδη ξηρή ύλη και το περιεχόμενο άζωτο, καθώς και τις συνόψεις υδατικού ισοζυγίου.



Σχήμα 12.6. *Διάγραμμα ροής μοντέλου DSSAT.*

12.5. Στοχαστικά μοντέλα

Σήμερα είναι γεγονός ότι υπάρχει πολύ μικρή ανάπτυξη και εξέλιξη μεθόδων και συστημάτων που αφορούν αυτό που ονομάζεται στοχαστική μοντελοποίηση, παρά τα όσα υπόσχεται η σύγχρονη επιστημονική τάση. Σχετικά πρόσφατες εφαρμογές αφορούν τη χρήση νευρονικών δικτύων στη μοντελοποίηση ορισμένων διαδικασιών του αγροοικοσυστήματος. Μια άλλη εξέλιξη της στοχαστικής μοντελοποίησης προσφέρει δυναμικοστατιστικά μοντέλα για εκτιμήσεις καλλιεργειών και αγροοικοσυστημάτων στο πλαίσιο έδαφος-φυτό-νερό-ατμόσφαιρα. Τα μοντέλα αυτά προσφέρουν αισιόδοξες εκτιμήσεις του πεδίου μεταβλητών. Επίσης, συνυπολογίζουν τον τυχαίο παράγοντα, δέχονται σφάλματα, τόσο στο σύστημα, όσο και στα εισαγόμενα και εξαγόμενα, και προσπαθούν την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων με μεθόδους βελτιστοποίησης. Στη συνέχεια, περιγράφονται τα μοντέλα «μαύρου κουτιού», δηλαδή μοντέλα που βασίζονται μόνο σε δεδομένα χωρίς εξήγηση του φυσικού φαινομένου, καθώς και ένα συστημικό μοντέλο προσομοίωσης του κύκλου του αζώτου.

12.5.1. Μοντέλα «μαύρου κουτιού» (black box).

Η ανάλυση χρονοσειρών για την προσομοίωση και την πρόγνωση αγρομετεωρολογικών και γενικά κλιματικών μεταβλητών αποτελεί σημαντικό βήμα στην έρευνα της κλιματικής μεταβλητότητας. Στην ουσία, η ανάλυση χρονοσειρών βασίζεται σε προσομοίωση και στατιστική θεωρία αποφάσεων. Μια ευέλικτη κατηγορία εμπειρικών μοντέλων είναι η γενική οικογένεια των μοντέλων «μαύρου κουτιού», που βασίζονται στις διαδικασίες αυτοπαλινδρόμησης και ολοκληρωμένου κινούμενου μέσου (Autoregressive Integrated Moving Average/ARIMA) (Box & Jenkins, 1976). Τα μοντέλα αυτά έχουν αποδειχθεί πολύ χρήσιμα στις κλιματικές γενικά αναλύσεις και, εφόσον είναι μοντέλα μιας μεταβλητής (univariate), μπορούν να εφαρμοστούν σε μεμονωμένες σειρές δεδομένων. Στη δημιουργία ενός κατάλληλου δυναμικού στοχαστικού μοντέλου για μια δεδομένη μονοδιάστατη χρονοσειρά ακολουθείται συνήθως η επαναληπτική διαδικασία των τριών σταδίων, γνωστή ως μέθοδος Box-Jenkins, που οδηγεί στο σχηματισμό της γενικής οικογένειας των μοντέλων ARIMA. Υπάρχει ήδη πολύ εκτεταμένη βιβλιογραφία και δημοσιευμένο έργο τα τελευταία 40 χρόνια.

12.5.1.1. Μοντελοποίηση ARIMA

Η κατηγορία των μοντέλων ARIMA εκφράζεται ως ένας σταθμιστικός συνδυασμός παλαιών παρατηρήσεων και σφαλμάτων, που μπορεί να παρουσιάζουν υστέρηση στο χρόνο. Επισημαίνονται δύο ειδικές υποκατηγορίες των μοντέλων ARIMA: μοντέλα, που δεν περιέχουν όρο κινούμενου μέσου και αναφέρονται ως αυτοπαλινδρομούμενη (AR:AutoRegressive) διαδικασία, καθώς και μοντέλα που δεν περιέχουν αυτοπαλινδρομούμενο όρο και αναφέρονται ως διαδικασία κινούμενου μέσου (MA:Moving Average) κάποιας τάξης στο χρόνο. Γενικά, η διαδικασία μοντελοποίησης ARMA μιας διακριτής χρονοσειράς οδηγεί σε συνάρτηση αυτοπαλινδρομούμενων όρων, Z(t-i), και όρων κινούμενου μέσου, που συνίσταται από αριθμό όρων λευκού θορύβου, U(t-i):

$$Z(t) = a_1 Z(t\ \ 1) + a_2 Z(t\ \ 2) + \ldots + a_n Z(t - n) + U(t) + u_1 U(t - 1) + \ldots + u_m U(t - m). \quad (12.22)$$

Συνδυασμός AR και MA παρέχει ένα δυναμικό εργαλείο, με στόχο τη δημιουργία αναλυτικών μοντέλων για τη δομή συσχέτισης τυχαίων διαδικασιών, ιδιαίτερα αν υπάρχει οποιοσδήποτε δομικός μηχανισμός να επιβεβαιώσει είτε μεγάλη μνήμη προηγούμενων καταστάσεων είτε συσσώρευση προηγούμενων τυχαίων παραγόντων του εξεταζόμενου συστήματος. Τα τρία βήματα ανάπτυξης μοντέλων ARIMA είναι:
I) ο προσδιορισμός (identification) του μοντέλου ARIMA,
II) ο υπολογισμός παραμέτρων του μοντέλου ARIMA,
III) ο διαγνωστικός έλεγχος (diagnostic checking) του μοντέλου ARIMA.
Στην ανάπτυξη του μοντέλου εξετάζεται επίσης ο εποχικός όρος, δηλαδή η εποχική περιοδικότητα. Χρησιμοποιούνται τα τεστ διαγνωστικού ελέγχου και εξατάζεται αν υπάρχει όρος υψηλότερης τάξης, που είναι στατιστικά σημαντικός, ενώ άλλοι όροι χαμηλότερης τάξης δεν είναι. Ακολουθεί σύντομη περιγραφή των τριών βημάτων:

12.5.1.1.1. Προσδιορισμός μοντέλου ARIMA (ή ARMA)

Ο προσδιορισμός του μοντέλου γίνεται με ανάλυση των ιστορικών στοιχείων. Για μια δεδομένη χρονοσειρά, τόσο ο βαθμός μη σταθερότητας (stationarity), όσο και η τάξη και ο τύπος των αντιπροσωπευτικών μοντέλων μπορούν να αποφασιστούν από τη μελέτη του σχήματος των συναρτήσεων αυτοσυσχέτισης και μερικής αυτοσυσχέτισης, αντίστοιχα. Η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης (Autocorrelation Function/ACF) εκφράζει τη συνδιακύμανση μεταξύ τυχαίων μεταβλητών που παρουσιάζουν υστέρηση στο χρόνο. Η συνάρτηση μερικής αυτοσυσχέτισης (Partial Autocorrelation Function/PACF) μπορεί να εκφραστεί από τον κλασικό ορισμό των Kendal και Stuart (1968). Για τον προσδιορισμό της PACF, είναι απαραίτητο να υπολογιστεί ο συμμετρικός πίνακας αυτοσυσχέτισης. Ο πίνακας εκτιμά τις υπερσυσχετίσεις όλων των ζευγών μεταβλητών με υστέρηση. Ένα πλεονέκτημα της μεθόδου των Kendal και Stuart είναι η τάξη στην οποία οι αυτοσυσχετίσεις καταγράφονται ως μη σημαντικές, καθόσον κάθε μερική αυτοσυσχέτιση υπολογίζεται με την απόδοση συγκεκριμένων τιμών σε όλους τους άλλους όρους με υστέρηση. Αν μια χρονοσειρά είναι μη σταθερή (stationary), τότε απαιτείται η δημιουργία νέας σειράς από τις χρονικές διαφορές των μεταβλητών, για να γίνει σταθερή. Οι διαδικασίες ARMA χαρακτηρίζονται από διακριτές ACF και PACF. Στον Πίνακα 12.5 συνοψίζεται η διαδικασία προσδιορισμού.

Μορφή μοντέλου	ACF	PACF
AR(p)	Μειώνεται ασυμπτωτικά.	Μηδενίζεται μετά από p βήματα χρονικής υστέρησης.
MA(q)	Μηδενίζεται μετά από q.	Μειώνεται ασυμπτωτικά βήματα χρονικής υστέρησης.
ARMA(p,q)	Μειώνεται ασυμπτωτικά.	Μειώνεται ασυμπτωτικά.

Πίνακας 12.5. *Χαρακτηριστικά ACF και PACF για μοντέλα ARMA, AR και MA*.

12.5.1.1.2. Παράμετροι μοντέλου ARMA

Εκτίμηση των παραμέτρων του μοντέλου ARMA μπορεί να γίνει με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων των υπολοίπων (residuals) με βάση το μοντέλο παλινδρόμησης που προκύπτει από το πρώτο βήμα του προσδιορισμού. Η διαδικασία μοντελοποίησης Box-Jenkins απαιτεί τα σφάλματα a_t να είναι καθαρού λευκού θορύβου. Εφόσον δεν υπάρχουν παρατηρήσεις για τα τυχαία σφάλματα a_t, απαιτείται μια επαναληπτική προσέγγιση για τον υπολογισμό των a_t από τη σειρά παρατηρήσεων z_t, όπου $z_t = y_t - y$, με y την εκτίμηση της μέσης τιμής. Τα μοντέλα AR είναι γραμμικά, δηλαδή μπορεί να εφαρμοστεί η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων. Αντίθετα, τα μοντέλα MA είναι μη γραμμικά, δηλαδή όποια μη γραμμική μεθοδος βελτιστοποίησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των παραμέτρων των μοντέλων.

12.5.1.1.3. Διαγνωστικός έλεγχος μοντέλου ARMA

Διαγνωστικός έλεγχος πραγματοποιείται για να διαπιστωθεί ενδεχόμενη ανεπάρκεια του επιλεγέντος μοντέλου. Εφαρμόζονται διάφοροι έλεγχοι (tests), για να διερευνηθεί αν αυτά τα υπόλοιπα είναι λευκού θορύβου. Ακολουθεί σύντομη περιγραφή των πιο γνωστών τεστ:

- **Τεστ Anderson**. Χρησιμοποιείται για την προσεγγιστική εκτίμηση της στατιστικής σημαντικότητας της αυτοσυσχέτισης των υπολοίπων από το μηδέν. Αν τα υπόλοιπα είναι λευκού θορύβου, τότε οι αυτοσυσχετίσεις θα έχουν μέση τιμή μηδέν και πίνακα διακύμανσης-συνδιακύμανσης $S = \sum (2i/N)$, ενώ οι αυτοδιακυμάνσεις με μη μηδενικές υστερήσεις είναι μηδέν. Αν κάποιες από τις αυτοσυσχετίσεις των υπολοίπων είναι σημαντικά διάφορες από το μηδέν, τότε η διαδικασία ανάπτυξης του μοντέλου θεωρείται ανεπαρκής και επαναλαμβάνεται.

- **Τεστ Port Manteau**. Τα υπόλοιπα λευκού θορύβου των επιλεγέντων μοντέλων ελέγχονται από τη σχέση:

$$Q = N \cdot \sum_{K=1}^{K} r_k{}^2 \cdot (a), \quad (12.23)$$

όπου $r_k{}^2$ (a) είναι η αυτοσυσχέτιση των υπολοίπων a_t, N το μέγεθος του δείγματος και K η μέγιστη χρονική υστέρηση.
Η ποσότητα Q προσεγγίζει την κατανομή X^2 με (k-p-q) βαθμούς ελευθερίας, όπου p και q είναι ο αριθμός των παραμέτρων των όρων AR και MA, αντίστοιχα. Η επάρκεια του μοντέλου ARMA διαπιστώνεται από τη σύγκριση της Q με την πινακοποιημένη τιμή X^2 (k-p-q), για δεδομένο επίπεδο σημαντικότητας.

- **Τεστ αθροιστικού περιοδογράμματος**. Παρέχει έναν αποτελεσματικό τρόπο περιοδικής μη τυχαιότητας. Αν τα υπόλοιπα περιέχουν περιοδικότητες, τότε το αθροιστικό περιοδόγραμμα μπορεί να δείξει σημαντική απόκλιση από τα όρια εμπιστοσύνης στο συγκεκριμένο επίπεδο σημαντικότητας.

12.5.2. Συστημικά μοντέλα

Είναι γνωστές δύο κατηγόριες στοχαστικών συστημικών μοντέλων: τα λεγόμενα δυναμικά μοντέλα και τα μοντέλα που βασίζονται στη θεωρία εκτιμητικής και ελέγχου, γνωστά και ως φίλτρα του Kalman (Kalman Filters). Μια μαθηματική δομή με βάση την πιο πάνω περιγραφή αποτελείται από δύο σχετικά σετ εξισώσεων:

- Ανταλλαγή ενέργειας και μάζας: Περιγραφή της μεταφοράς ηλιακής ακτινοβολίας, θερμότητας, υγρασίας, διοξειδίου του άνθρακα και άλλων υλικών στην υπερεπιφάνεια ατμόσφαιρα-έδαφος, όπου οι παράμετροι του φυτικού υλικού λειτουργούν ως πηγές συνεισφοράς των μεταφερόμενων υλικών.

- Βιοδυναμικό σετ: Περιγράφονται η αύξηση και η ανάπτυξη των φυτών, καθώς και οι δυναμικές της φυτικής βιομάζας, της φυλλικής επιφάνειας και της γεωμετρίας φυτού, όπως είναι οι φυτικοί παράμετροι ποικιλότητας στη διάρκεια της οντογένεσης.

Το πρώτο από τα δύο σετ καθορίζει τις συχνότητες κατά τις οποίες η λειτουργία της πράσινης μηχανής εξαρτάται από τις τρέχουσες περιβαλλοντικές συνθήκες, το δεύτερο περιγράφει τις αλλαγές που θα υποστεί το σύστημα στο χρόνο.
Στο Σχήμα 12.7 παρουσιάζεται μια τυποποιημένη μορφή των κύριων φυσιολογικών σχέσεων του φυτού. Επίσης, περιέχονται δύο πηγές διατήρησης διαλυτών σακχάρων, δηλαδή φωτοσύνθεση και διάσπαση δομικών υλικών, καθώς και δύο απώλειες υδρογονανθράκων, για τη σύνθεση νέων δομών και τη διασταύρωση όλων των απαιτήσεων των οργανισμών σε ενέργεια. Επίσης, ορίζονται οι διαδικασίες των διαλυτών σακχάρων που κατευθύνονται στις πηγές διατήρησης υδρογονανθράκων, και το αντίστροφο.
Οι Sirotenko και Abashina (1985) παρουσιάζουν το πιο πλήρες μοντέλο στην κατηγορία των αυτορρυθμιζόμενων μοντέλων. Η ξηρή φυτική βιομάζα (m) διαιρείται σε τέσσερα περιεχόμενα: διαλυτά σάκχαρα (mc), αποθέματα υδρογονανθράκων (ms), κινητά αποθέματα αζώτου (mN), και δομική ύλη (mg):

$$M = mc + ms + mN + mg. \quad (12.24)$$

Στη συστημική ορολογία, η εξίσωση αυτή αποτελεί τη λεγόμενη εξίσωση μέτρησης, που δείχνει τις σχέσεις των εισαγομένων στοιχείων με το εξαγόμενο. Ο κύκλος αζώτου του φυτού ορίζεται με πιο απλό τρόπο, επειδή οι ουσίες που περιέχουν άζωτο παίζουν το ρόλο δομικών υλικών και δεν μπορούν την ίδια ώρα να δράσουν ως ενεργειακός προμηθευτής, όπως συμβαίνει με τους υδρογονάνθρακες. Αυτές οι θεωρήσεις επιτρέπουν την περιγραφή των συστατικών μερών της φυτικής βιομάζας, που γίνεται με τις εξής διαφορικές εξισώσεις:

$$d(mc)/dt = v_1\Phi - v_2(G - Q) + K_{sc}\, ms - K_{sc}\, mc - D, \quad (12.25)$$

$$d(ms)/dt = K_{cs}\, mc - K_{sc}\, ms, \quad (12.26)$$

$$d(mN)/dt = P - v_3(G - Q), \quad (12.27)$$

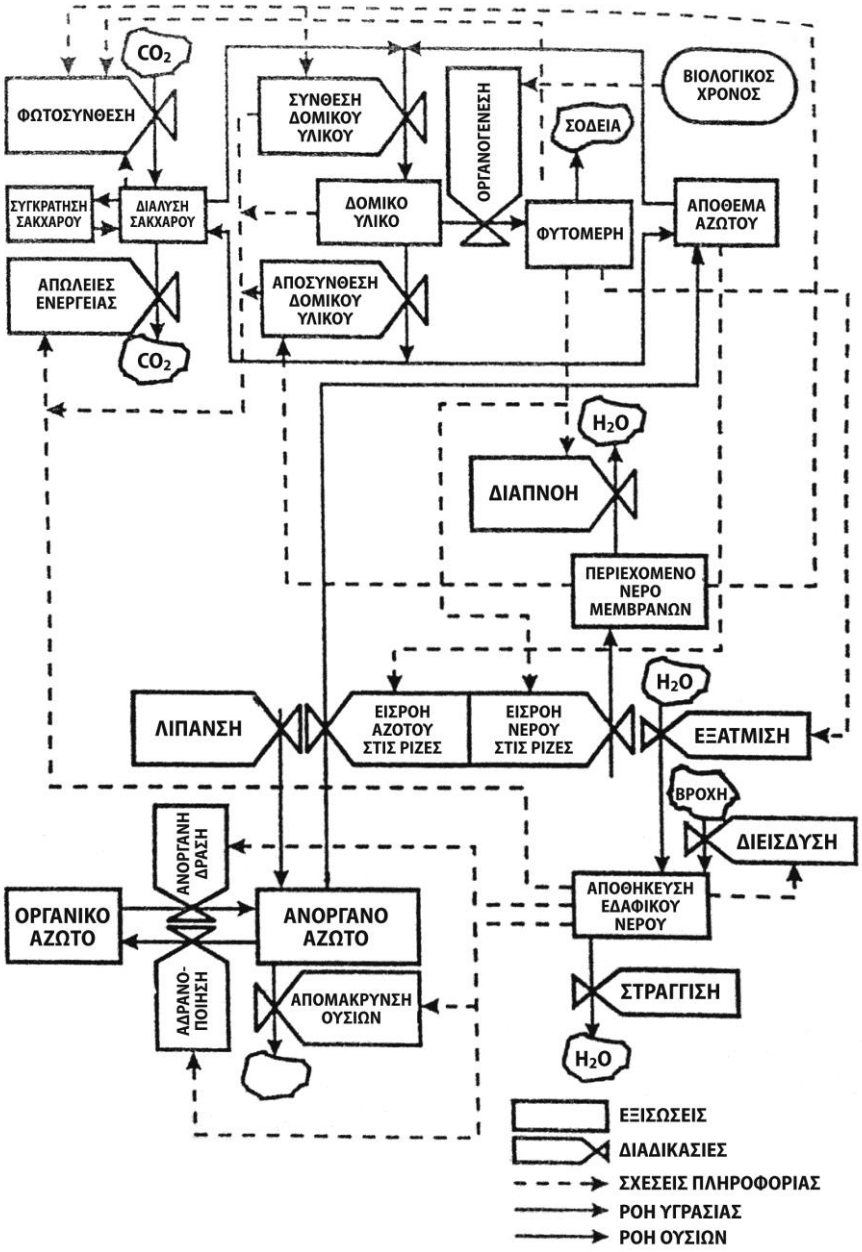
$$d(mg_{ij})/dt = G_{ij} - Q_{ij} \quad (12.28),$$

όπου Φ είναι η ολική φωτοσύνθεση, G ο ρυθμός παραγωγής δομικής βιομάζας σε φυτό που αυξάνει, Q ο ρυθμός διάσπασης δομικών υλικών, D η ολική απώλεια υδρογονανθράκων κατά την αναπνοή για τις ενεργειακές απαιτήσεις των φυτών, P ο ρυθμός πρόσληψης αζώτου από τις ρίζες, K_{cs} και K_{sc} οι σταθερές, i ο αριθμός των ομάδων φυτικών οργάνων και j ο αριθμός του οργάνου του φυτού κατά σειρά εμφάνισης. Οι εξισώσεις (12.25)–(12.27) παρουσιάζουν τη δυναμική των διαλυτών σακχάρων, διατηρημένων υδρογονανθράκων και τις πηγές κινητού αζώτου, αντίστοιχα, και το υποσύστημα (12.28) παρουσιάζει τη δυναμική της δομικής βιομάζας των ατομικών οργάνων του φυτού, των οποίων ο αριθμός αλλάζει στην οντογένεση. Οι εξισώσεις (12.25)-(12.28) αποτελούν τις εξισώσεις του συστήματος και το μοντέλο είναι προσαρμοσμένο για ανοιξιάτικο σιτάρι. Ως στοχαστικό σύστημα δέχεται την ύπαρξη σφάλματος, τόσο στις εξισώσεις του συστήματος, όσο και στο μοντέλο μέτρησης, δηλαδή στα εισαγόμενα και στα εξαγόμενα στοιχεία.

12.6. Φαινολογικά μοντέλα

Ο όρος «φαινολογία» χρησιμοποιείται για να περιγράψει το χρονοδιάγραμμα των κύκλων ζωής και των βιολογικών δραστηριοτήτων των ζωντανών οργανισμών (Demaree, 2009). Η φαινολογία καλύπτει τις σχέσεις μεταξύ κλίματος και περιοδικότητας των βιολογικών φαινομένων, και σηματοδοτεί την ανταπόκριση των ζωντανών οργανισμών σε εποχικές και μακροπρόθεσμες κλιματικές αλλαγές του περιβάλλοντος στο οποίο ζουν. Επισημαίνεται ότι όλες οι κυκλικές μεταβολές στην ανάπτυξη των ζωντανών οργανισμών συνδέονται στενά με το κλίμα και τις καιρικές συνθήκες. Η φαινολογική ανάπτυξη μπορεί να χρησιμεύσει ως δείκτης του κύκλου ζωής συγκεκριμένου οργανισμού. Ο συγχρονισμός των φαινολογικών γεγονότων είναι σημαντικός σε πολλούς τομείς, όπως στην υγεία των οργανισμών (αλλεργιογόνα και μολυσματικές ασθένειες),τη γεωργία και

τη δασοκομία (χρόνος φύτευσης και συγκομιδής, έλεγχος παρασίτων), τη διαχείριση των φυσικών πόρων (νερό και ξυλεία), την κατανόηση των κινδύνων (παρακολούθηση και πρόγνωση ξηρασίας και κινδύνου πυρκαγιάς), καθώς και την αειφορία (αφθονία και ποικιλότητα φυτών και ζώων).



Σχήμα 12.7. *Συστημική προσέγγιση διαδικασιών ανταλλαγής ενέργειας και μάζας.*

Οι οργανισμοί που δεν μπορούν να ρυθμίσουν τη θερμοκρασία τους εξαρτώνται από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος στο οποίο εκτίθενται. Αντίθετα, πολλοί οργανισμοί που ρυθμίζουν την εσωτερική θερμοκρασία τους εξαρτώνται από την ύπαρξη και τη διαθεσιμότητα των προηγούμενων οργανισμών σε μια ορισμένη φάση της ανάπτυξής τους. Για παράδειγμα, πολλά έντομα και ζώα στηρίζονται σε φύλλα, λάχανα και μπουμπούκια, η δε έλλειψη ή απουσία βασικών τροφών τους σε ένα ορισμένο χρονικό διάστημα επηρεάζει την περαιτέρω ανάπτυξη των βιολογικών κοινοτήτων. Η σχέση μεταξύ της θερμοκρασίας και της φαινολογίας είναι σημαντική (Chuine et al., 2003). Υπάρχει μια ποσότητα θερμότητας απαραίτητη για την ανάπτυξη ενός οργανισμού από ένα στάδιο σε άλλο στον κύκλο ζωής του. Υπάρχει πάντα κατώτερο και ανώτερο όριο, που είναι διαφορετικά για διαφορετικούς οργανισμούς. Επίσης, υπάρχουν διαφορετικές ποσότητες της συνολικής θερμότητας που

απαιτείται για την επίτευξη ορισμένων σταδίων ανάπτυξης του οργανισμού ή για την ολοκλήρωση του κύκλου βλάστησης.
Τα φαινολογικά μοντέλα στοχεύουν στην αξιολόγηση, παρακολούθηση και πρόγνωση της ανάπτυξης του κύκλου ζωής των ζωντανών οργανισμών. Η φαινολογία έχει αρχίσει να παίζει σημαντικό ρόλο στην παραγωγικότητα των οικοσυστημάτων, κυρίως με μοντέλα ανάπτυξης καλλιεργειών, από τις αρχές της δεκαετίας του 1970. Διαθέσιμη σειρά φαινολογικών δεδομένων έχει δώσει τη δυνατότητα ρύθμισης και επαλήθευσης μοντέλων για συγκεκριμένα είδη. Γενικά, διακρίνονται η μοντελοποίηση της ανάπτυξης φυτών, που αντιπροσωπεύει την μοντελοποίηση της ανάπτυξης των ετήσιων και πολυετών φυτών, καθώς και η μοντελοποίηση του κύκλου ζωής των ζώων. Η τελευταία αναφέρεται κυρίως σε έντομα και στην περαιτέρω ανάπτυξη οργανισμών που προκαλούν ασθένειες φυτών, προκειμένου να ελεγχθούν παράσιτα και ασθένειες, αλλά και στην ανάπτυξη ορισμένων ζωικών ειδών (Chmielewski et al., 2013). Βασική αρχή, που εφαρμόζεται σε διάφορες τροποποιήσεις σε όλες σχεδόν τα φαινολογικά μοντέλα, προϋποθέτει την ύπαρξη ενός ορισμένου ποσού της συσσωρευμένης θερμότητας, για την έναρξη συγκεκριμένης φαινολογικής φάσης. Στην πράξη, το άθροισμα ημερόβαθμων (Growing Degree Days/GDD) χρησιμοποιείται, συνήθως, για τον υπολογισμό του αριθμού των συσσωρευμένων μονάδων θερμοκρασίας που χρειάζονται προκειμένου να φτάσει ένας οργανισμός σε ορισμένο επίπεδο ανάπτυξης (φαινολογική φάση) και να περιγράψει τα στάδια της φαινολογικής ανάπτυξης. Επαναλαμβάνεται η βασική εξίσωση του GDD για ημερήσιο βήμα, που έχει ως εξής:

Ημερήσιο GDD = [(Tmax + Tmin) / 2] – Tbase (12.29)

όπου T max είναι η μέγιστη ημερήσια θερμοκρασία του αέρα, Tmin η ημερήσια ελάχιστη θερμοκρασία του αέρα και Tbase η θερμοκρασία βάσης GDD για τον οργανισμό που παρακολουθείται.
Τα κύρια εισαγόμενα στοιχεία στα φαινολογικά μοντέλα αποτελούνται από κλιματικά δεδομένα, αλλά και αγρονομικά στοιχεία και φαινολογικές παρατηρήσεις, όπου είναι διαθέσιμες. Ωστόσο, υπάρχει συνεχής αύξηση των μοντέλων που βασίζονται σε δορυφορικά δεδομένα, καλύπτοντας πολύ μεγαλύτερες εκτάσεις. Αυτό φέρνει μια νέα προσέγγιση (Botta et al., 2000· Fu et al., 2014) και δίνει τη δυνατότητα παρακολούθησης και διαμόρφωσης της φαινολογικής ανάπτυξης σε περιφερειακό επίπεδο.
Τα φαινολογικά μοντέλα βασίζονται στον εξαερισμό, τη φωτοπερίοδο, τη θερμική ανταπόκριση και την εσωτερική πρωιμότητα (Cao & Moss, 1997), τα περισσότερα εκ των οποίων εξαρτώνται από το φυτό. Ειδικότερα, η εσωτερική πρωιμότητα εξαρτάται από τα γενετικά χαρακτηριστικά του φυτού, αποτελεί δε κύριο αντικείμενο των γενετιστών, καθώς η πρωϊμότητα είναι ένας από τους μηχανισμούς αποφυγής δυσμενών παραγόντων, όπως η ξηρασία ή ο παγετός. Η φωτοπερίοδος και ο εξαερισμός είναι ποιοτικές αντιδράσεις των σπόρων ή των νεαρών φυτών, που χρειάζονται την ένταση και την έκθεση σε μια ψυχρή περίοδο για κάποιο διάστημα πριν από την κατάλληλη ανάπτυξη. Ο ακριβής υπολογισμός της φαινολογίας έχει πολύ μεγάλη οικονομική σημασία. Επισημαίνεται ότι η συνιστώσα της φαινολογίας υπάρχει σε όλα τα αγρομετεωρολογικά μοντέλα. Επίσης, η αύξηση της θερμοκρασίας μπορεί να αλλάξει την κατάσταση καλλιεργειών και ειδών, ανάλογα με το βαθμό προσαρμογής σε μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες. Υπάρχουν πολλά φαινολογικά μοντέλα που περιγράφουν την αλληλουχία ψύξης και θέρμανσης, επηρεάζοντας και άλλα περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά με διαφορετικούς τρόπους. Επειδή φαινολογικά γεγονότα συντελούνται μόνο μία φορά το χρόνο, χρειάζονται δεδομένα δεκαετιών για αξιόπιστες φαινολογικές αναλύσεις. Υπάρχουν εκατοντάδες φαινολογικά μοντέλα που λειτουργούν είτε ως μεμονωμένα μοντέλα είτε ως συστατικά άλλων μοντέλων, όπως τα DSSAT, WOFOST, CERES, EPIC. Σε παράρτημα παρατίθεται λίστα μοντέλων που αντιπροσωπεύουν ένα σημαντικό μέρος των υπαρχόντων μοντέλων, πολλά από τα οποία βρίσκονται σε πρακτική χρήση. Στον Πίνακα 12.6 καταγράφονται οι κυριότερες ιστοσελίδες φαινολογικών μοντέλων.

1.	http://www.degreedays.net/
2.	http://fruitsandnuts.ucdavis.edu/Weather_Services/chilling_accumulation_models/
3.	http://ippc2.orst.edu/wea/ddmodeldocs.html
4.	http://www2.geog.ucl.ac.uk/~plewis/geogg124/phenology.html
5.	http://www.ipm.ucdavis.edu/MODELS/index.html
6.	http://www.ipm.ucdavis.edu/WEATHER/ddconcepts.html
7.	http://www.ntsg.umt.edu/project/biome-bgc

Πίνακας 12.6. *Λίστα χρήσιμων ιστοσελίδων φαινολογικών μοντέλων.*

12.6.1. Κατηγορίες φαινολογικών μοντέλων

Τα φαινολογικκά μοντέλα χρησιμοποιούν ως βασική παράμετρο τη θερμοκρασία ή δείκτες που προέρχονται από τη θερμοκρασία. Περιγράφονται μερικοί τύποι παραδοσιακών μοντέλων, όπως τα μοντέλα θερμικού χρόνου, τα διαδοχικά μοντέλα, τα παράλληλα μοντέλα και τα ευέλικτα μοντέλα (Linkosalo et al., 2008), τα οποία παρουσιάζουν ομοιότητες, αλλά και διαφορές, κατά περίπτωση:

12.6.1.1. Μοντέλα θερμικού χρόνου

Διαθέτουν κατά μέγιστο τρεις παραμέτρους: την ημερομηνία έναρξης συσσώρευσης της αθροιστικής θερμοκρασίας, ένα κρίσιμο κατώφλι θερμοκρασίας T_{crit}, για την αποτελεσματική θερμοκρασία, και ένα κρίσιμο κατώφλι αθροιστικής θερμοκρασίας, για το φαινολογικό γεγονός. Ο ρυθμός ανάπτυξης βλαστού, r(T), είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας, T, και δίνεται από τη σχέση:

$$r(T) = \begin{cases} T - T_{crit} & T \geq T_{crit} \\ 0 & T < T_{crit} \end{cases} . (12.30)$$

Η παράμετρος r(T) ολοκληρώνεται στο χρόνο από την ημερομηνία έναρξης t_0, για τον υπολογισμό της αθροιστικής θερμοκρασίας, η οποία θεωρείται ότι αντιπροσωπεύει το στάδιο ανάπτυξης βλαστού, S(t), που δίνεται από τη σχέση:

$$S(t) = \int_0^t r(T)\, dt = \sum_{t_0} r(T)\, \Delta t \ . (12.31)$$

12.6.1.2. Διαδοχικά μοντέλα

Τα διαδοχικά μοντέλα περιγράφουν τη συσσώρευση αθροιστικής θερμοκρασίας με παρόμοιο τρόπο όπως τα μοντέλα θερμικού χρόνου, ωστόσο χρησιμοποιώντας τη σιγμοειδή εξάρτηση του ρυθμού ανάπτυξης στη θερμοκρασία, r(T) (Kramer, 1994). Η συσσώρευση αθροιστικής θερμοκρασίας δεν ξεκινά ορισμένη ημερομηνία, όπως στα μοντέλα θερμικού χρόνου, αλλά όταν έχει εμφανιστεί επαρκής ποσότητα ψύξης, C_{crit}. Η πρόγνωση ενός φαινολογικού γεγονότος γίνεται όταν η τιμή της αθροιστικής θερμοκρασίας φτάσει σε ένα προκαθορισμένο κατώφλι, S_{crit}. Η εξάρτηση του ρυθμού ψύξης από τη θερμοκρασία δίνεται με τη μορφή συνάρτησης (Kramer, 1994) από τη σχέση:

$$rc_s(T) = \begin{cases} (T - T_{min})/(T_{opt} - T_{min}) & T_{min} < T < T_{opt} \\ (T_{max} - T)/(T_{max} - T_{opt}) & T_{opt} < T < T_{max} \\ 0 & T < T_{min} \text{ ή } T > T_{max} \end{cases} (12.32)$$

Επίσης, η σιγμοειδής συνάρτηση της συσσώρευσης αθροιστικής θερμοκρασίας, r_{ts} (T), δίνεται από τη σχέση:

r_{ts} (T) = 27 / [1 + exp (- b (T – c))], (12.33)

όπου T είναι η θερμοκρασία και b και c οι παράμετροι του μοντέλου.

12.6.1.3. Παράλληλα μοντέλα

Στα παράλληλα μοντέλα, η ψύξη και η θέρμανση γίνονται με εναλλασσόμενο τρόπο, και ο ρυθμός ανάπτυξης βλαστών σχετίζεται όχι μόνο με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, αλλά και με το στάδιο ψύξης (Cannell & Smith,1983). Το κρίσιμο κατώφλι θερμοκρασίας για την καταστροφή βλαστών εξαρτάται από τη συσσωρευμένη αθροιστική ψύξη, ώστε, αν συνεχίζεται η ψύξη, χρειάζεται λιγότερη αθροιστική θερμοκρασία. Η εξίσωση γι' αυτό το κατώτατο κατώφλι είναι:

S_{crit} (t) = a + b exp (c n_c (t)), (12.34)

όπου n_c είναι ο αριθμός των ημερών συσσωρευμένης ψύξης μέχρι την ημέρα t, και a, b και c οι παράμετροι του μοντέλου.
Το μοντέλο έχει συνολικά πέντε παραμέτρους, τις τρεις παραπάνω, καθώς και τις δύο ημερομηνίες έναρξης.

12.6.1.4. Ευέλικτα μοντέλα

Εξετάζονται δύο τύποι ευέλικτων μοντέλων. Ο πρώτος τύπος είναι το ενοποιημένο μοντέλο (Chuine, 2000), που συνδυάζει χαρακτηριστικά των διαδοχικών και παράλληλων μοντέλων. Όταν ικανοποιηθεί το κρίσιμο κατώφλι της αθροιστικής ψύξης, C*, τότε επιπλέον ψύξη μπορεί να επηρεάσει το κρίσιμο κατώφλι για καταστροφή βλαστών, όπως και στα παράλληλα μοντέλα:

$F^* = w \exp [k C_{tot}]$ (12.35)

όπου F* είναι το κατώφλι για καταστροφή βλαστών, C_{tot} η συσσωρευμένη ψύξη, ενώ w και k οι παράμετροι του μοντέλου. Υπάρχει ένα ανώτατο όριο για το μέγιστο αριθμό ημερών ψύξης, που μπορεί να λάβει χώρα, t_c. Η εξίσωση για το F* είναι παρόμοια με την αντίστοιχη εξίσωση των παράλληλων μοντέλων, αλλά με a = 0.
Ο δεύτερος τύπος είναι το μοντέλο προώθηση/αναστολή (Schaber & Badeck, 2003). Το πλήρες μοντέλο είναι πολύ ευέλικτο, λόγω των πολλών παραμέτρων, οι οποίες μπορεί στην εφαρμογή να δημιουργούν δυσκολίες. Σε πιο απλοποιημένη μορφή, ο ρυθμός αναστολής δίνεται ως συνάρτηση της θερμοκρασίας αέρα T:

$\Delta I = a_2 f_2 (T) I$, (12.36)

όπου ΔI είναι η μεταβολή στην κατάσταση της αναστολής I, a_2 μια σταθερά ρυθμού και f2 μια βήμα προς βήμα (stepwise) γραμμική συνάρτηση, που εξαρτάται από τη θερμοκρασία και ορίζεται από τη σχέση:

$$rc_s(T) = \begin{cases} (T - T^I{}_{min})/(T^I{}_{opt} - T^I{}_{min}) & T^I{}_{min} < T < T^I{}_{opt} \\ (T^I{}_{max} - T)/(T^I{}_{max} - T^I{}_{opt}) & T^I{}_{opt} < T < T^I{}_{max} \\ 0 & T < T^I{}_{min} \text{ ή } T > T^I{}_{max} \end{cases} \quad (12.37)$$

Ο παράγοντας αναστολής I ξεκινά με την τιμή 1 και μειώνεται προς το 0. Ο παράγοντας προώθησης εξαρτάται από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος, T, το μήκος της ημέρας, L, καθώς και την κατάσταση του παράγοντα αναστολής, I:

$\Delta P = a_3 f_3(T) (1 - I) - a_4 P [(24 - L)/24]$, (12.38)

όπου a_3 και a_4 είναι οι σταθερές ρυθμού, ενώ η τριγωνική συνάρτηση f_3 εξαρτάται από τη θερμοκρασία και έχει την ίδια μορφή με την f_2, ωστόσο οι παράμετροι T^I έχουν αντικατασταθεί με τις αντίστοιχες τιμές του T^P. Ο παράγοντας προώθησης P ξεκινά με την τιμή 0 και στο μοντέλο η καταστροφή βλαστών γίνεται όταν το P φτάσει την τιμή 1.
Με τρεις παραμέτρους θερμοκρασίας για τους δύο παράγοντες αναστολής και προώθησης και την ίδια ημερομηνία έναρξης και για τις δύο διαδικασίες προώθησης και αναστολής, το μοντέλο προώθηση/αναστολή διαθέτει συνολικά 10 παραμέτρους.

12.6.2 Αγρομετεωρολογικοί δείκτες

Παρουσιάζονται μερικοί αγρομετεωρολογικοί δείκτες που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση, εκτίμηση και πρόγνωση φαινολογικών σταδίων καλλιεργειών (Dalezios et al., 2002a, 2002b: η ημέρα ξήρανσης της καλλιέργειας (c_1, c_2), το έλλειμμα πίεσης υδρατμών (d), η φωτοθερμική μονάδα (PTU:PhotoThermal Unit), η αθροιστική βροχόπτωση (rr), η φωτοθερμοκρασία (T_p),η νυχτοθερμοκρασία (T_n) και η θερμική μονάδα (T_t). Επίσης, γίνεται αναφορά στο δείκτη βλάστησης NDVI, που παρουσιάζει εκτεταμένες εφαορμογές. Ο υπολογισμός των δεικτών αυτών βασίζεται σε συμβατικά μετεωρολογικά στοιχεία. Ειδικότερα:

Ημέρα ξήρανσης καλλιέργειας (c_1, c_2): Ο δείκτης αυτός ορίζεται ως ο αριθμός των ημερών με συνολικό ύψος βροχής ίσο ή μικρότερο μιας κρίσιμης τιμής κατωφλίου. Συνήθως, επιλέγονται δύο τιμές κατωφλίου, c_1 = 5 mm και c_2 = 10 mm.

Έλλειμμα πίεσης υδρατμών (d): Ο δείκτης αυτός, που λέγεται και κοροπλήρωμα, εκφράζεται ως η διαφορά μεταξύ κορεσμένης πίεσης υδρατμών (e_s) και πραγματικής πίεσης υδρατμών (e) από τη σχέση:

$d = e - e_s = e_s (100 - RH)$, (12.39)

όπου RH είναι η σχετική υγρασία (%). Η e_s δίνεται από την εμπειρική σχέση:

$e_s = 6.11 \times 10^{[(7.11\ Tmean\ /\ (237.3 + Tmean)]}$. (12.40)

Είναι φανερό ότι το έλλειμμα πίεσης υδρατμών συνδέεται στενά με τη σχετική υγρασία, η οποία είναι μια πολύ κρίσιμη παράμετρος για την ανάπτυξη των καλλιεργειών, λόγω της σημασίας στην ενυδάτωση των φύλλων και την αναπνοή. Επίσης, η υγρασία φύλλου μπορεί να συνδέεται με την εμφάνιση θανάτου στα φυτά, που ενδέχεται να επηρεάσει τη φαινολογία και την απόδοση της παραγωγής.

Φωτοθερμική μονάδα (Photothermal Unit/PTU): Ο δείκτης αυτός εκφράζεται ως το άθροισμα των γινομένων της διάρκειας ημέρας, D, σε ώρες και της θερμοκρασίας πάνω από μια τιμή κατωφλίου, T_c, για ένα χρονικό διάστημα συνήθως 10 ημερών, και δίνεται από τη σχέση:

$PTU = \sum (T_{mean} - T_c)\ D$, (12.41)

όπου T_{mean} είναι η μέση ημερήσια θερμοκρασία.
Ο δείκτης PTU έχει κρίσιμο ρόλο στη φαινολογία φυτών, παρόμοιο με αυτόν της θερμικής μονάδας. Ως τιμή κατωφλίου χρησιμοποιούνται, συνήθως, οι 10^o C.

Αθροιστική βροχόπτωση (Cprec): Αυτή η παράμετρος χρησιμοποιείται συχνά σε διάφορες αγρομετεωρολογικές μελέτες, δεδομένου ότι συνδέεται έντονα με την υγρασία του εδάφους. Η βροχόπτωση είναι μία από τις πιο κρίσιμες παραμέτρους για την ανάπτυξη των φυτών. Η αθροιστική βροχόπτωση υπολογίζεται από ωριαίες τιμές, σωρευτικά, για διαστήματα 10 ημερών στη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου.

Φωτοθερμοκρασία (Phototemperature, T_p): Η αποτελεσματική θερμοκρασία φωτός μπορεί να οριστεί από τη σχέση:

$T_p = T_{max} - 1/4\ (T_{max} - T_{min})$, (12.42)

όπου Tmax και Tmin είναι η ημερήσια μέγιστη και η ελάχιστη θερμοκρασία σε C, αντίστοιχα.
Η φωτοθερμοκρασία υπολογίζεται αθροιστικά, για διαστήματα 10 ημερών, για κάθε σταθμό, και αντικατοπτρίζει τη σημασία της μέσης θερμοκρασίας στη διάρκεια της ημέρας, όταν τα επίπεδα της ηλιακής ακτινοβολίας είναι ικανοποιητικά.

Νυχτοθερμοκρασία (Nyctotemperature, T_n): Όπως η φωτοθερμοκρασία, έτσι και η νυχτοθερμοκρασία αντιστοιχεί σε μια μέση θερμοκρασία στη διάρκεια της νύχτας, όταν τα επίπεδα φωτισμού είναι περιορισμένα ή ανύπαρκτα. Ο δείκτης T_n, με T_{max} και T_{min} ημερήσιες μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες σε ^{o}C, αντίστοιχα, δίνεται από τη σχέση:

$T_n = T_{min} + 1/4\ (T_{max} - T_{min})$. (12.43)

Θερμική μονάδα (Heat Unit/HU, T_t): Ο δείκτης αυτός εκφράζεται ως η συσσωρευμένη θερμοκρασία πάνω από μια ορισμένη τιμή κατωφλίου για κάθε καλλιέργεια, ως εξής:

$HU = \sum (T_{mean} - T_c)$, (12.44)

όπου Tmean και Tc έχουν οριστεί προηγουμένως.
Το όριο των 10^o C χρησιμοποιείται επίσης για τον υπολογισμό της HU.

Δείκτης βλάστησης (NDVI): Ο δείκτης αυτός θεωρείται πολύ σημαντικός, όχι μόνο στη φαινολογία, αλλά και σε πολλά άλλα θέματα της αγρομετεωρολογικής ανάλυσης, και αναφέρεται σε πολλά σημεία του βιβλίου, όπως στη φαινολογία, στην περιοχική εκτίμηση καλλιεργειών, σε εφαρμογές τηλεπισκόπησης και σε φυσικούς κινδύνους. Χρονοσειρές του NDVI χρησιμοποιούνται ήδη σε μοντέλα στα παραπάνω θέματα.

12.7. Μοντέλα αξιολόγησης των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής

Η αξιολόγηση από πάνω προς τα κάτω των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής (Σχήμα 12.8) μπορεί να πραγματοποιηθεί με τρεις προσεγγίσεις:

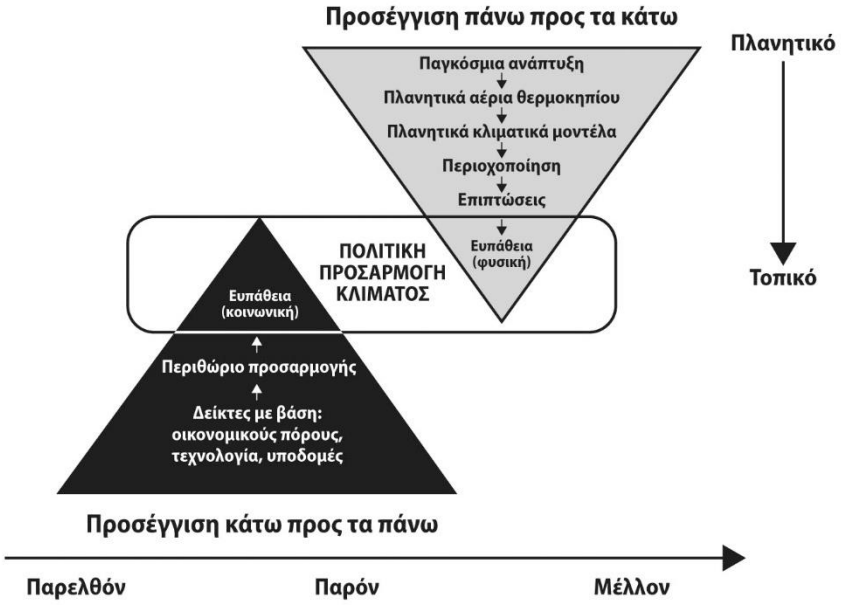
- Με την εννοιολογική προσέγγιση για την ποιοτική αξιολόγηση, σύμφωνα με την οποία η κλιματική αλλαγή θα μπορούσε να επηρεάσει τη γεωργία. Για παράδειγμα, αν απαιτείται μια ορισμένη ελάχιστη ποσότητα βροχοπτώσεων σε μια συγκεκριμένη περίοδο, για την αύξηση της καλλιέργειας, η έννοια αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αξιολογήσει εάν, με βάση τις προβλέψεις των ΜΓΚ, η καλλιέργεια θα εξακολουθεί να είναι βιώσιμη.
- Με τη χρήση ποσοτικών μοντέλων προσομοίωσης μικρής κλίμακας, που μπορεί να είναι είτε στατιστικά ή αιτιοκρατικά, για την πρόβλεψη της αντίδρασης των καλλιεργειών στην αλλαγή του κλίματος. Στην περίπτωση αυτή, μπορεί να καθοριστεί ένα εννοιολογικό μοντέλο αλληλεπίδρασης με τον καιρό και το έδαφος, και ανάπτυξης καλλιέργειας, και στη συνέχεια θα μπορούσε να σχεδιαστεί μια σειρά μαθηματικών/στατιστικών εξισώσεων, που να περιγράφουν εννοιολογικές διαδικασίες. Αυτή η προσέγγιση λειτουργεί καλά για την εξέταση πρωτογενών αλληλεπιδράσεων με το κλίμα, που αφορούν, σε μεγάλο βαθμό, θέματα βιοφυσικής, όπως η απόδοση των καλλιεργειών (Rosenzweig & Iglesias, 1998).
- Με τη χρήση συστημικής κλίμακας ποσοτικής μοντελοποίησης, που μπορεί να είναι αιτιοκρατική, εμπειρική, στατιστική ή, πιθανότερα, συνδυασμός και των τριών. Μια τέτοια προσέγγιση για την εκτίμηση των επιπτώσεων της αλλαγής του κλίματος έχει το πλεονέκτημα ότι εξετάζει πλήρως τις αλληλεπιδράσεις των επιχειρησιακών κλιμάκων, αλλά το μέγεθος των απαιτούμενων δεδομένων και η ορθότητα των παραδοχών μπορεί να είναι περιορισμένα. Σε γενικές γραμμές, όταν χρησιμοποιείται ένα σύστημα μοντέλων, κάποια τμήματά του θα διαμορφωθούν με λεπτομέρεια, συχνά μηχανιστικά, και άλλα θα είναι πολύ απλά, όπως συμβαίνει στα μοντέλα CERES (Jones & Kiniry, 1986) και CENTURY (Parton et al., 1992).

Ένα καταστατικό μοντέλο Πίεση-Επίπτωση-Απόκριση-Προσαρμογή (State-Pressure-Impact-Response-Adaptation/SPIRA) (IPCC, 2001) είναι, πραγματικά, μια από πάνω προς τα κάτω προσέγγιση και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση των επιπτώσεων με βάση τις τρεις παραπάνω προσεγγίσεις. Για την αξιολόγηση σε παγκόσμια κλίμακα, χρησιμοποιείται μια τεχνική για την ανάπτυξη στατιστικής συνάρτησης μεταφοράς που προβλέπει τις αποδόσεις χρησιμοποιώντας ως ανεξάρτητες μεταβλητές τη θερμοκρασία και το διαθέσιμο νερό. Αυτό επιτεύχθηκε με τη χρήση βαθμονομημένων μοντέλων προσομοίωσης, για την αξιολόγηση της απόκρισης της απόδοσης στις παραμέτρους του κλίματος. Οι προκύπτουσες συναρτήσεις μεταφοράς μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη χωρική ανάλυση της απόδοσης, όταν είναι διαθέσιμα χωρικά κλιματικά δεδομένα. Τα αποτελέσματα της απόδοσης καλλιεργειών έχουν ερμηνευθεί με ένα παγκόσμιο οικονομικό μοντέλο (Parry et al., 2004).

12.7.1. Μοντέλα καλλιεργειών

Σε αναπτυγμένες κυρίως χώρες έχουν εφαρμοστεί το μοντέλο CROPGRO (Hoogenboom et al., 1992), το μοντέλο CERES (Jones & Kiniry, 1986) και το μοντέλο SUBSTOR (Singh et al., 1998). Οι εκτιμήσεις επιπτώσεων επικεντρώνονται κυρίως στις συνέπειες των αυξημένων εκπομπών CO_2, της θερμοκρασίας, της βροχόπτωσης και της ακτινοβολίας στην απόδοση, ενώ εξετάζεται, επίσης, η επίδραση των παραγόντων που επηρεάζουν την καταλληλότητα των καλλιεργειών και τις αλλαγές της χωρικής κατανομής τους. Άλλα μοντέλα καλλιεργειών έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση των επιπτώσεων της αλλαγής του κλίματος, όπως το EuroWheat (Harrison & Butterfield, 1996· Hulme et al., 1999), για την καλλιέργεια σιταριού, το Hurley (Thornley & Cannell, 1997), για το γρασίδι, το GLYCIM (Haskett et al., 1997), για τη σόγια, και το CropSyst, για διάφορες C3 και C4 καλλιέργειες, κυρίως για σιτηρά (Stöckle et al., 1994). Τα περισσότερα μοντέλα δεν

είναι καλά προσαρμοσμένα σε συστήματα παραγωγής χαμηλών εισροών και, ως εκ τούτου, οι εφαρμογές επικεντρώνονται στην παραγωγή αγροτικών προϊόντων σε αναπτυγμένες χώρες, όπου η μηχανοποίηση και οι κτηνοτροφικές εισροές αποτελούν σημαντικό μέρος των συστημάτων παραγωγής.



Σχήμα 12.8. *Προσέγγιση της κλιματικής αλλαγής από πάνω προς τα κάτω και από κάτω προς τα πάνω.*

12.7.2. Ζωικά μοντέλα

Λίγα ζωικά μοντέλα έχουν χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στα ζώα. Οι περισσότερες εργασίες εστιάζονται στην επίδραση της κλιματικής αλλαγής στα συστήματα ζωικής παραγωγής, με ιδιαίτερη έμφαση στην παροχή των θρεπτικών συστατικών στο ζώο, δηλαδή στην παραγωγή του χόρτου, καθώς και στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, δηλαδή στα μοντέλα εδάφους-νερού. Αναφέρονται δύο παραδείγματα:

- Προσομοίωση της παραγωγής και της χρήσης των λιβαδιών (Simulation of Production and Utilization of Rangelands/SPUR) (Wight & Skiles, 1987): Πρόκειται για ένα μοντέλο οικολογικά σχεδιασμένο, για τη βελτιστοποίηση των συστημάτων διαχείρισης των βοσκοτόπων. Με την εξέταση του υδατικού ισοζυγίου, της ανάπτυξης των φυτών, της φυσιολογίας των ζώων και της συγκομιδής, το μοντέλο μπορεί να προβλέπει τις συνέπειες των περιβαλλοντικών συνθηκών στα οικοσυστήματα και να προσομοιώνει παραγωγή βοοειδών του Κολοράντο.
- Μοντέλο NRC (National Research Council) του Εθνικού Συμβουλίου Έρευνας για τις θρεπτικές ανάγκες της εκτροφής βοοειδών (NRC, 1996): Πρόκειται για ένα μοντέλο που χρησιμοποιεί πληροφορίες σχετικά με τον τύπο και τις τροφοδοσίες διατροφής, την κατάσταση των ζώων, τη διαχείριση και το περιβάλλον. Επίσης, χρησιμοποιεί τη μέση ημερήσια θερμοκρασία, για την εκτίμηση της καθημερινής εκούσιας πρόσληψης τροφής (VFI: Voluntary Food Intake). Με βάση την ημερήσια VFI, μπορούν στη συνέχεια να εξαχθούν εκτιμήσεις όγκου παραγωγής, δηλαδή ημερήσια αύξηση βάρους σώματος (Frank et al., 1999).

Ο έλεγχος της εγκυρότητας των υποθέσεων, της παραμετροποίησης και της βαθμονόμησης των ζωικών μοντέλων για τις λιγότερο αναπτυγμένες χώρες έχει ιδιαίτερη σημασία, με βάση τις προβλέψεις ξηρασίας και θερμικής καταπόνησης των ζώων στις τροπικές, ημίξηρες και μεσογειακές περιοχές, καθώς και τις πιθανές δυσκολίες προσαρμογής στις συνθήκες αυτές.

12.7.3. Συστημικά μοντέλα

Το σύστημα υποστήριξης αποφάσεων για τη μεταφορά αγροτεχνολογίας (Decision Support System for Agrotechnology Transfer/DSSAT) αποτελεί ευέλικτο και καλό παράδειγμα εργαλείου μοντελοποίησης. Έχει χρησιμοποιηθεί τα τελευταία 20 χρόνια στη μοντελοποίηση αλληλεπιδράσεων μεταξύ των καλλιεργειών (τύπος και φαινότυπος), του εδάφους, του καιρού, της διαχείρισης ή της κτηνοτροφίας (ICASA, 2006). Έχει επίσης χρησιμοποιηθεί για να αξιολογήσει τις επιπτώσεις της αλλαγής του κλίματος (Holden et al, 2003). Το ελάχιστο σύνολο δεδομένων που απαιτούνται για το DSSAT περιλαμβάνουν μετεωρολογικά δεδομένα, όπως μέγιστη και ελάχιστη ατμοσφαιρική θερμοκρασία, βροχοπτώσεις και ακτινοβολία με χρήση ημερήσιων στοχαστικών γεννητριών καιρού (weather generators), εδαφικά στοιχεία του ριζικού συστήματος και καλλιεργητικές πρακτικές. Στη συνέχεια, το σύστημα επιτρέπει στο χρήστη να ορίσει ένα σενάριο καλλιέργειας/διαχείρισης χρησιμοποιώντας μια σειρά από ενότητες, όπως διαχείριση, έδαφος, υδατικό και εδαφικό ισοζύγιο, καιρός, έδαφος-φυτό-ατμόσφαιρα και προσομοίωση της ανάπτυξης καλλιεργειών

Υπάρχει μια σειρά άλλων συστημικών μοντέλων που έχουν αναπτυχθεί, πολλά εκ των οποίων με σκοπό την κατανόηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής. Συνήθως, τα μοντέλα αυτά επικεντρώνονται σε ένα συνδυασμό της γεωργικής παραγωγής και του βιογεωχημικού κύκλου. Τα παραδείγματα περιλαμβάνουν:

- Μοντέλο προσομοίωσης βοσκοτόπων (Pasture Simulation model/PaSim) (Riedo et al., 1998). Είναι ένα αιτιοκρατικό (μηχανιστικό) μοντέλο οικοσυστήματος, που προσομοιώνει την παραγωγή ξηράς ουσίας και τις ροές του άνθρακα (C), του αζώτου (N), του νερού και της ενέργειας σε μόνιμα λιβάδια με υψηλή χρονική ανάλυση.
- Προσομοιωτής Γαλακτοκομικών (DairySim:Dairy Simulator) (Fitzgerald et al., 2005). Έχει σχεδιαστεί για την αξιολόγηση αλληλεπιδράσεων μεταξύ κλίματος και διαχείρισης γαλακτοπαραγωγών συστημάτων που γεννούν την άνοιξη, με βάση τη βοσκή.
- CENTURY (Parton et al., 1992). Προσομοιώνει τη δυναμική του άνθρακα, των θρεπτικών συστατικών και του νερού, για χορτολιβαδικές εκτάσεις και δασικά οικοσυστήματα. Περιλαμβάνει υποσύστηματα για το έδαφος, την οργανική ύλη, την αποσύνθεση, το υδατικό ισοζύγιο, τα λιβάδια και τα δάση, τα συστήματα παραγωγής και λειτουργίες για τον προγραμματισμό ενεργειών.
- Υπολογιστής επιπτώσεων της διάβρωσης στην παραγωγικότητα (Erosion Productivity Impact Calculator/EPIC) (Williams et al., 1990). Γνωστό και ως ολοκληρωμένη κλιματική περιβαλλοντική πολιτική, το μοντέλο αυτό έχει σχεδιαστεί για να εξετάσει τις επιπτώσεις των αποφάσεων διαχείρισης του εδάφους, του νερού, των θρεπτικών συστατικών, της κίνησης φυτοφαρμάκων, καθώς και τις συνδυασμένες επιπτώσεις στην απώλεια εδάφους, την ποιότητα του νερού και των καλλιεργειών, και τις αποδόσεις για περιοχές με ομοιογενή εδάφη. Τρέχει σε ημερήσιο βήμα και μπορεί να προσομοιώσει μέχρι 4,000 χρόνια, ενώ έχει χρησιμοποιηθεί και για την εκτίμηση της ξηρασίας, την αξιολόγηση της ανοχής στις απώλειες εδάφους, την προσομοίωση ανάπτυξης, την ανάλυση της κλιματικής αλλαγής, το σχεδιασμό σε επίπεδο γεωργικής εκμετάλλευσης και την ανάλυση της ποιότητας νερού (Brown & Rosenberg, 1999).
- Μοντέλο απονιτροποίησης-διάσπασης (Denitrification Decomposition/DNDC) (Zhang et al., 2002). Επικεντρώνεται στον εδαφικό άνθρακα και τη βιοχημεία του αζώτου. Αποτελείται από δύο μέρη, εκ των οποίων το πρώτο θεωρεί το έδαφος, το κλίμα, την ανάπτυξη των καλλιεργειών και την αποσύνθεση υπομοντέλα, για την πρόβλεψη της θερμοκρασίας του εδάφους, της υγρασίας, του pH, του δυναμικού οξειδοαναγωγής και της συγκέντρωσης του προφίλ υποστρώματος, που παρουσιάζουν οικολογικά αίτια, όπως το κλίμα, το έδαφος, η βλάστηση και ανθρωπογενείς δραστηριότητες, ενώ το δεύτερο θεωρεί τη νιτροποίηση, την απονιτροποίηση και τη ζύμωση υπομοντέλα, για την πρόβλεψη των ροών NO, N_2O, N_2, CH_4 και NH_3, με βάση τους μοντελοποιημένους περιβαλλοντικούς παράγοντες.

12.7.4. Μοντέλα βιολογικών πόρων

Υπάρχουν διαθέσιμα μοντέλα τα οποία επικεντρώνονται σε ευρύτερα περιβαλλοντικά θέματα που συμπίπτουν με τη γεωργική δραστηριότητα. Ένα τέτοιο μοντέλο είναι η Χωρική αξιολόγηση των επιπτώσεων του κλίματος στο σύνολο των ειδών Spatial Evaluation of Climate Impacts on the Envelope of Species/SPECIES) (Pearson et al., 2002). Το SPECIES είναι ένα μοντέλο ανεξάρτητο κλίμακας, που χρησιμοποιεί ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο (ANN:Artificial Neuronic Network). Σε συνδυασμό με ένα μοντέλο κλίματος-υδρολογίας για την προσομοίωση της σχέσης μεταξύ των ζώντων οργανισμών και του περιβάλλοντος, είναι χρήσιμο για την εξέταση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στην κατανομή των ειδών και των μεθόδων αλλαγής. Η

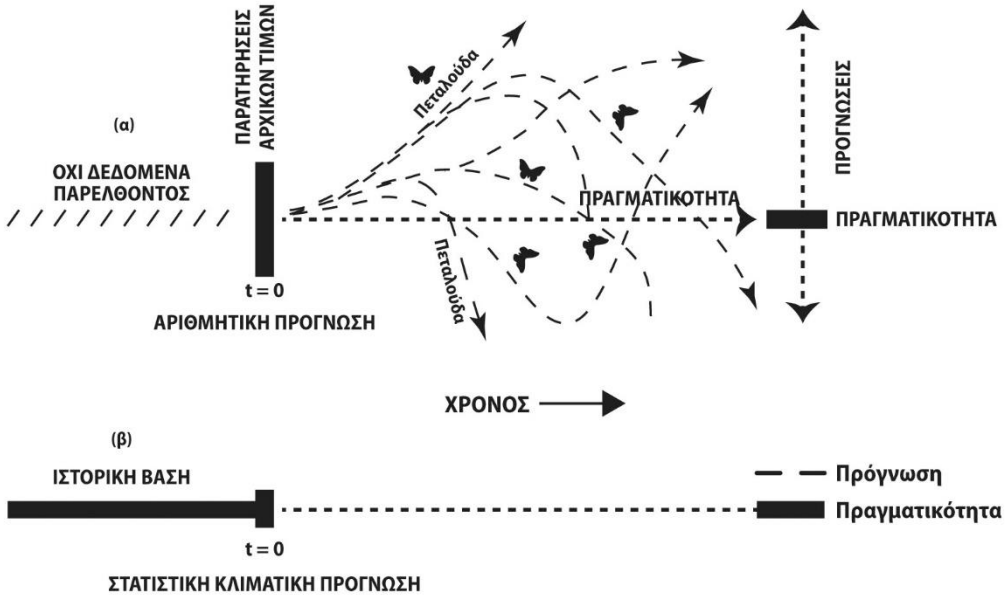
προσέγγιση απαιτεί εντατικές παρατηρήσεις στην εξεταζόμενη περιοχή και, ως εκ τούτου, είναι πιο χρήσιμη όταν υπάρχει ένα καλά οργανωμένο και πυκνό δίκτυο μετεωρολογικών παρατηρήσεων. Το SPECIES έχει επίσης χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση των δασικών αποκρίσεων στην κλιματική αλλαγή.

12.8. Εποχική κλιματική πρόγνωση

Προγνώσεις μεγάλου βεληνεκούς (Long-Range Forecasting/LRF) αφορούν προβλέψεις για περιόδους μεγαλύτερες από ένα μήνα. Παρά τη χαοτική φύση της ατμόσφαιρας, μακροπρόθεσμες προβλέψεις είναι δυνατές, σε κάποιο βαθμό, χάρη σε έναν αριθμό συνιστωσών, που είναι ως ένα σημείο προβλέψιμες, αν και παρουσιάζουν διακυμάνσεις σε μεγάλες χρονικές κλίμακες, όπως εποχές και χρόνια (ECMWF, 2005). Από τις συνιστώσες αυτές, η πιο σημαντική πηγή μεταβλητότητας του κλίματος είναι ο κύκλος El Nino Southern Oscillation (ENSO), που αναφέρεται στη συνεκτική, μεγάλης κλίμακας διακύμανση της θερμοκρασίας των ωκεανών, των βροχοπτώσεων, της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας, της κατακόρυφης κίνησης και της ατμοσφαιρικής πίεσης κατά μήκος του τροπικού Ειρηνικού. Επίσης, είναι και ο δείκτης νότιας ταλάντωσης (Southern Oscillation Index/SOI), που χρησιμοποιείται κυρίως στην Αυστραλία και σε γειτονικές περιοχές, για εποχικές προγνώσεις διάρκειας τριών μηνών. Υπάρχουν και άλλες αιτίες της εποχικής μεταβλητότητας του κλίματος. Για παράδειγμα, ασυνήθιστα ζεστές ή κρύες θερμοκρασίες της επιφάνειας της θάλασσας στον τροπικό Ατλαντικό και στον Ινδικό Ωκεανό μπορεί να προκαλέσουν σημαντικές αλλαγές στο εποχικό κλίμα των γειτονικών ηπείρων.
Συνοψίζοντας, οι εποχικές προγνώσεις παρέχουν μια σειρά πιθανών αλλαγών που ενδέχεται να παρατηρηθούν κατά την προσεχή περίοδο. Επισημαίνεται ότι, εξαιτίας της χαοτικής φύσης της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας, δεν είναι δυνατόν να προβλεφθούν οι ημερήσιες διακυμάνσεις του καιρού σε συγκεκριμένη τοποθεσία μήνες πριν. Επίσης, δεν είναι δυνατόν να προβλεφθούν με ακρίβεια οι μέσες καιρικές συνθήκες, όπως μέση θερμοκρασία, για δεδομένο μήνα (ECMWF, 2005). Οι συνήθεις μετεωρολογικές προγνώσεις καιρού βασίζονται στη γνώση των ακριβών συνθηκών της ατμόσφαιρας κατά τη στιγμή που αρχίζει η πρόβλεψη (αρχικές συνθήκες), προκειμένου να γίνουν προβλέψεις για μία έως δύο εβδομάδες στο μέλλον. Ωστόσο, δεδομένης της έντονα χαοτικής φύσης της ατμόσφαιρας, οι μετεωρολογικές προβλέψεις δεν έχουν σχεδόν καμία αξιοπιστία έπειτα από δύο εβδομάδες ή λίγο περισσότερο. Οι προβλέψεις πέρα από το όριο των δύο εβδομάδων στηρίζονται στο γεγονός ότι οι θερμοκρασίες της επιφάνειας της θάλασσας (SST) αλλάζουν σιγά σιγά ή οι επιδράσεις της επιφάνειας της Γης (οριακές συνθήκες) καθοδηγούν την ατμοσφαιρική κυκλοφορία και επηρεάζουν ορισμένες περιοχές του κόσμου. Η εποχική πρόγνωση, ως εκ τούτου, μπορεί να γίνει σε περιοχές του πλανήτη όπου η ατμόσφαιρα καθοδηγείται από την τοπική ή απομακρυσμένη επίδραση της θερμοκρασίας στην επιφάνεια της θάλασσας ή στην επιφάνεια της Γης. Εμπειρικά και δυναμικά μοντέλα χρησιμοποιούνται για τις εποχικές προβλέψεις. Τα στατιστικά μοντέλα εμπίπτουν στην κατηγορία των εμπειρικών και έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε διάφορα μέρη του κόσμου. Τα μοντέλα γενικής κυκλοφορίας ωκεανών-γης-ατμόσφαιρας εμπίπτουν στην κατηγορία των δυναμικών μοντέλων. Ενδεικτικά, στο Σχήμα 12.9 απεικονίζονται η αριθμητική και η στατιστική κλιματική πρόγνωση.

12.8.1. Στατιστική προσέγγιση

Μια πιθανή αφετηρία για την εποχική πρόβλεψη είναι η καλή γνώση του κλίματος, δηλαδή το εύρος των καιρικών συνθηκών που αναμένεται σε συγκεκριμένη χώρα και σε συγκεκριμένη εποχή του χρόνου. Πέρα από την απλή γνώση της κλιματολογίας, η στατιστική ανάλυση του παρελθόντος καιρού και του κλίματος μπορεί να είναι μια αξιόπιστη βάση για μακροπρόθεσμες προβλέψεις. Υπάρχουν ορισμένες περιοχές του κόσμου και μερικές περίοδοι κατά τις οποίες οι στατιστικές προβλέψεις είναι αρκετά επιτυχείς. Θεωρητικά, μια πολύ μεγάλη και ακριβής καταγραφή του κλίματος της Γης θα μπορούσε να αποκαλύψει τη συνδυασμένη και μη γραμμική επίδραση των διαφόρων παραγόντων στις καιρικές συνθήκες, ενώ η ανάλυση πολλών προηγούμενων γεγονότων θα μπορούσε να δώσει έναν μέσο όρο για τις περιοχές χωρίς προβλέψεις. Στην πράξη, δεδομένα για 50-100 χρόνια, που είναι συνήθως διαθέσιμα, δίνουν μια ελλιπή εκτίμηση του κλίματος της Γης. Επιπλέον, η εποχικές προβλέψεις, που βασίζονται σε προηγούμενο κλίμα, δεν λαμβάνουν υπόψη τις ανθρωπογενείς ή άλλες μακροπρόθεσμες αλλαγές στο κλιματικό σύστημα της Γης (ECMWF, 2005).



Σχήμα 12.9. *Αριθμητική και στατιστική κλιματική πρόγνωση.*

Στη στατιστική προσέγγιση ανήκουν και οι μέθοδοι και τα συστήματα που χρησιμοποιούν τον SOI (ή φάσεις του SOI), και παραμένουν δημοφιλείς στην ανατολική Αυστραλία, όπου υπάρχουν υψηλές συσχετίσεις μεταξύ του SOI και των βασικών περιόδων βροχόπτωσης για τη γεωργία και μεταβλητών όπως η έναρξη και το τέλος της περιόδου παγετού. Ο SOI βασίζεται στη μακροπρόθεσμη τάση διαφοροποίησης της ατμοσφαιρικής πίεσης στην περιοχή μεταξύ Ντάργουιν και Ταϊτή, ενώ έχει αποδειχθεί ένας αρκετά αξιόπιστος δείκτης για μεγάλο μέρος της ανατολικής Αυστραλίας, αλλά και αλλού, για τις χειμωνιάτικες, ανοιξιάτικες και καλοκαιρινές βροχοπτώσεις (Stone et al, 1996). Επιπλέον, οι μέθοδοι που βασίζονται στον SOI έχουν αποδειχθεί πιο εύκολες στην ενσωμάτωσή τους σε μοντέλα προσομοίωσης καλλιεργειών και βοσκοτόπων, παρέχοντας έτσι αυξημένη ικανότητα χρήσης από τους γεωργικούς σχεδιαστές.

12.8.2. Προσέγγιση αριθμητικής πρόγνωσης καιρού

Αριθμητική πρόγνωση του καιρού (Numerical Weather Prediction/NWP). Μια εναλλακτική προσέγγιση εποχικής πρόγνωσης είναι η χρήση της NWP, μέσω της επίλυσης ενός πολύπλοκου συνόλου υδροδυναμικών εξισώσεων, που περιγράφουν την εξέλιξη του κλιματικού συστήματος της Γης. Για εποχικές προβλέψεις μέσω της NWP, είναι σημαντικό να λαμβάνονται υπόψη τόσο οι ατμοσφαιρικές όσο και οι θαλάσσιες συνιστώσες του συστήματος της Γης. Στην πραγματικότητα, οι διαδικασίες αλληλεπίδρασης αέρα και θάλασσας, που περιγράφουν την πολύπλοκη ανταλλαγή μεταξύ της ατμόσφαιρας και των ωκεανών, είναι απαραίτητες για την περιγραφή του κύκλου ENSO. Ακριβώς όπως και για τις προβλέψεις NWP συνοπτικής κλίμακας, ο υπολογισμός εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις αρχικές συνθήκες του κλιματικού συστήματος, ιδίως τον τροπικό Ειρηνικό Ωκεανό, για τον κύκλο ENSO. Εξαιτίας της χαοτικής φύσης της ατμόσφαιρας, πραγματοποιείται ένας μεγάλος αριθμός χωριστών προσομοιώσεων, καθεμία εκ των οποίων παρέχει διαφορετικές απαντήσεις σχετικά με τις λεπτομέρειες του καιρού, αλλά και σχετικά με το εύρος των πιθανών αποτελεσμάτων και των πιθανοτήτων εμφάνισης των διαφορετικών καιρικών φαινομένων (ECMWF, 2005). Αν τα αριθμητικά μοντέλα ήταν πολύ ρεαλιστικά και αν μπορούσε να πραγματοποιηθεί πολύ μεγάλος αριθμός υπολογισμών, θα μπορούσε να γίνει με ακρίβεια η περιγραφή του καιρού για τους προσεχείς μήνες, κάτι που μελλοντικά μπορεί να το επιτρέψει η συνεχής αύξηση της υπολογιστικής ισχύος των υπολογιστών. Στο βαθμό που η προβλεπόμενη κατανομή διαφέρει από το σύνηθες λόγω των αρχικών συνθηκών του ωκεανού, της ατμόσφαιρας και της επιφάνειας της Γης, το σύνολο των υπολογισμών θα μπορούσε να προβλέψει τη σωστή εποχική πρόγνωση του «σήματος». Ωστόσο, υπάρχουν ορισμένα προβλήματα που περιορίζουν τη δυνατότητα εποχικής πρόβλεψης. Πιο συγκεκριμένα, τα αριθμητικά μοντέλα του ωκεανού και της ατμόσφαιρας επηρεάζονται από σφάλματα, οι παρατηρήσεις του ωκεανού είναι αραιές και οι τεχνικές για την εκτίμηση της επιπλέον αβεβαιότητας που εισάγεται δεν έχουν ακόμη αναπτυχθεί επαρκώς (ECMWF, 2005).

Μοντέλα Γενικής Κυκλοφορίας (ΜΓΚ) και Περιοχικά Κλιματικά Μοντέλα (ΠΚΜ). Υπάρχει πλέον συνείδηση ότι στατιστικές μέθοδοι εποχικής πρόγνωσης βασισμένες στον κύκλο ENSO και SOI πλησιάζουν στα όρια της προγνωστικότητας. Επομένως, υπάρχει αυξανόμενη έμφαση στην ανάπτυξη και εφαρμογή ΜΓΚ και ΠΚΜ. Η πρόβλεψη αναδρομικού χρόνου με έτη και όχι μήνες είναι απαραίτητη για την επίτευξη σημαντικού οικονομικού οφέλους σε πολλά ποιμενικά συστήματα. Ο συνδυασμός ΜΓΚ και αγρομετεωρολογικών μοντέλων προσομοίωσης αποτελεί δυνητικά μια ισχυρή προσέγγιση για κλιματικές εφαρμογές. Επίσης, τα συνδυασμένα μοντέλα ΜΓΚ ωκεανού-ατμόσφαιρας του παγκόσμιου κλίματος έχει αποδειχθεί ότι προσφέρουν περισσότερη αξιοπιστία, για επέκταση της πρόβλεψης από 3-12 μήνες σε σχέση με τις στατιστικές μεθόδους SOI, κυρίως επειδή προβλέπουν τις αλλαγές των SST στον κεντρικό και ανατολικό τροπικό Ειρηνικό. Αυτό το μεγαλύτερο περιθώριο είναι σίγουρα πολύ χρήσιμο στην κτηνοτροφία. Τα ΜΓΚ πρέπει να δοκιμαστούν επίσης στην πρόβλεψη των βροχοπτώσεων, αν και οι προβλέψεις SST μπορούν να χρησιμοποιηθούν με ικανοποιητική επιτυχία για τη στατιστική εκτίμηση των αλλαγών στον SOI και στη βροχόπτωση.

Όπως επισημάνθηκε, οι στατιστικές προσεγγίσεις παρουσιάζουν σημαντικούς περιορισμούς και αναμένεται ότι τα δυναμικά κλιματικά μοντέλα θα παρέχουν βελτιωμένες προγνωστικές δυνατότητες στο άμεσο μέλλον. Αυτό απαιτεί κατάλληλες λύσεις για το συνδυαστικό πρόβλημα. Ειδικότερα, είναι απαραίτητο να βρεθούν τρόποι μετατροπής εξαγόμενων ΜΓΚ από μορφή πλέγματος σε σημειακή κλίμακα ημερήσιων μετεωρολογικών δεδομένων. Η χρήση ΠΚΜ καλύτερης διακριτικής ικανότητας, που απορρέουν από δεδομένα ΜΓΚ, θεωρείται μια εναλλακτική λύση, ωστόσο οι στατιστικές ιδιότητες των δεδομένων αυτών διαφέρουν σημαντικά από τα ιστορικά κλιματικά στοιχεία, απαιτώντας παραπέρα επεξεργασία. Άλλη προσέγγιση μπορεί να είναι η εφαρμογή μιας διαδικασίας στατιστικής συστάδας (clustering) σε εξαγόμενα από ΜΓΚ, για να παραχθούν ανάλογα χρόνια ή εποχές κατάλληλα για εισαγόμενα σε αγρομετεωρολογικά μοντέλα προσομοίωσης. Εναλλακτικά, εξαγόμενα από ΜΓΚ μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την ανάπτυξη κλιματικών τάσεων, που μπορούν στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν προκειμένου να τροποποιήσουν ιστορικά κλιματικά στοιχεία για χρήση σε βιολογικά μοντέλα. Η προσέγγιση αυτή συχνά επιλέγεται όταν εκτιμώνται επιπτώσεις κλιματικής αλλαγής σε γεωργικά συστήματα. Υπάρχει επίσης το θέμα της διαφορετικής κλίμακας μεταξύ ΜΓΚ και βιολογικών μοντέλων. Τέλος, υπάρχουν υποσχόμενες προσεγγίσεις με χρήση άλλων μορφών και τύπων προγνώσεις με μοντέλα καλλιεργειών, που δεν έχουν αξιοποιηθεί ακόμη επαρκώς, ενώ αποτελούν προτεραιότητα στην προσομοίωση καλλιεργειών για προγνωστικές εφαρμογές.

Σε γενικές γραμμές, οι δυναμικές εποχικές προβλέψεις απαιτούν τη χρήση ενός μεγάλου συνόλου προσομοιώσεων ΜΓΚ, καθώς και μια ανάλυση των αποτελεσμάτων, για να αναζητηθούν περιοχές όπου οι περισσότερες προσομοιώσεις παράγουν παρόμοια αποτελέσματα. Σε αυτές τις περιοχές, η κυκλοφορία της ατμόσφαιρας μπορεί να οφείλεται περισσότερο στις αργές μεταβολές των επιπτώσεων των ωκεανών και της Γης, και, ως εκ τούτου, το ενδεχόμενο ικανοποιητικής εποχικής πρόγνωσης μπορεί να βελτιώνεται. Η εμπειρία με την εποχική πρόγνωση έχει δείξει ότι, σε γενικές γραμμές, οι τροπικές περιοχές του κόσμου είναι περισσότερο υποσχόμενες για εποχική πρόγνωση από τις υπερτροπικές περιοχές. Επίσης, όταν εποχικά κλιματικά συστήματα πρόγνωσης μπορούν να ενσωματωθούν σε γεωργικά μοντέλα προσομοίωσης, τότε αυξάνονται οι εφαρμογές των εποχικών συστημάτων πρόγνωσης στις έξτρα τροπικές περιοχές και σε ορισμένες περιοχές υψηλού γεωγραφικού πλάτους (Meinke και Stone, 2005).

12.8.3. Ποιοτικός έλεγχος προγνώσεων

Ο έλεγχος της ποιότητας των προβλέψεων μπορεί να εφαρμοστεί από τις υπηρεσίες και τους τελικούς χρήστες. Ειδικότερα, οι τελικοί χρήστες μπορούν να επιλέξουν προϊόντα και υπηρεσίες που δίνουν την καλύτερη πρόβλεψη. Παρουσιάζονται έξι χαρακτηριστικά μιας καιρικής πρόγνωσης, που συνθέτουν τη συνολική ποιότητα: η αξιοπιστία, η ακρίβεια, η δεξιότητα, η ανάλυση, η ευκρίνεια και η αβεβαιότητα (Thornes & Stephenson, 2001). Η αξιοπιστία της πρόβλεψης μπορεί να μετρηθεί με τον υπολογισμό της στατιστικής μεροληψίας. Αυτό θα δείξει αν οι μετεωρολόγοι υπερεκτιμούν σταθερά τον αριθμό συγκεκριμένων γεγονότων (για παράδειγμα, παγετό ή χιόνι). Το ποσοστό των σωστών προβλέψεων είναι ένα πολύ απλό μέτρο της ακρίβειας της πρόβλεψης. Υπάρχουν πολλές διαφορετικές βαθμολογίες της δεξιότητας, όπως η βαθμολογία δεξιότητας Pierce και ο λόγος πιθανοτήτων δεξιοτήτων, με τις οποίες γίνεται προσπάθεια να αξιολογηθούν πόσο καλύτερες είναι οι προβλέψεις από εκείνες που θα μπορούσαν να δημιουργηθούν από την κλιματολογία, τη στατιστική εμμονή ή την τύχη. Η ανάλυση είναι σημαντική για την πρόβλεψη των βροχοπτώσεων (π.χ. να μπορεί να γίνει διάκριση μεταξύ διαφόρων τύπων υετού). Η ευκρίνεια είναι ένα μέτρο της διασποράς των

προβλέψεων μακριά από την κλιματολογία. Για παράδειγμα, μια μέθοδος πρόβλεψης για παγετούς την άνοιξη, καθώς και το χειμώνα, δείχνει υψηλή ευκρίνεια, ενώ μια μέθοδος πρόβλεψης μόνο για παγετούς το χειμώνα έχει χαμηλή ευκρίνεια. Η αβεβαιότητα σχετίζεται με το κλίμα. Για παράδειγμα, ορισμένες περιοχές έχουν συγκριτικά λιγότερους παγετούς από άλλες. Συνεπώς, απαιτούνται μέτρα αξιολόγησης της ποιότητας των προβλέψεων, αλλά, προκειμένου να αποφευχθεί οποιαδήποτε σύγχυση, πρέπει να είναι εύκολα υπολογίσιμα, ενώ η στατιστική σημαντικότητά τους θα πρέπει να είναι ελέγξιμη.
Η ανάπτυξη και η δημοσιοποίηση δεδομένων ποιοτικού ελέγχου είναι σημαντικές, προκειμένου να καθοδηγηθούν οι αγρότες στην επιλογή της κατάλληλης πρόγνωσης καιρού. Εάν δεν είναι διαθέσιμα δεδομένα ποιότητας, οι αγρομετεωρολόγοι ή οι αγρότες μπορούν να χρησιμοποιήσουν δεδομένα άμεσων παρατηρήσεων, προκειμένου να αξιολογήσουν την αξιοπιστία των προβλέψεων. Η στατιστική ανάλυση μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη βοήθεια μη παραμετρικών μεθόδων. Η ανταπόκριση των τελικών χρηστών είναι σημαντική, προκειμένου να βελτιωθούν οι επιδόσεις πρόβλεψης των υπηρεσιών.

12.8.4. Σημασία εποχικών προγνώσεων

Τα οφέλη από τις εποχικές προγνώσεις είναι πιθανόν πιο εμφανή στις προβλέψεις για τις τροπικές περιοχές. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι τροπικές περιοχές έχουν μια μέτρια ποσότητα προβλέψιμου σήματος. Αντίθετα, στα μέσα γεωγραφικά πλάτη, οι τυχαίες διακυμάνσεις του καιρού είναι συνήθως μεγαλύτερες από την προβλέψιμη συνιστώσα του καιρού. Κατά συνέπεια, απαιτείται πρόσθετη έρευνα, για να συσχετιστούν οι πιθανότητες καιρικών συνθηκών μεγάλης κλίμακας με λεπτομερείς επιπτώσεις και εφαρμογές. Ωστόσο, υπάρχουν αυστηρά όρια για τη φυσική δυνατότητα μιας εποχικής πρόγνωσης του συστήματος. Είναι δυνατή μόνο η πρόβλεψη μιας σειράς από πιθανά αποτελέσματα. Σε πολλές περιπτώσεις, αυτό το εύρος είναι σχετικά μεγάλο. Ωστόσο, σε πολλές περιοχές του κόσμου, το μεγαλύτερο μέρος της μεταβλητότητας του καιρού παραμένει απρόβλεπτο (ECMWF, 2005). Μοντέλα που μετατρέπουν τα προβλεπόμενα σήματα ENSO απευθείας σε δείκτες γεωργικής καταπόνησης έχουν επίσης αναπτυχθεί για γεωργικές εφαρμογές (ECMWF, 2005). Κάποιες εποχικές προβλέψεις που διατίθενται σήμερα έχουν εκδοθεί με πιθανότητες (ράβδους σφάλματος) οι οποίες έχουν βαθμονομηθεί κατάλληλα με βάση παρελθούσες περιπτώσεις.
Τα κλιματικά δεδομένα είναι εδώ και καιρό ανεκτίμητα για τη λήψη αποφάσεων σχετικά με τη διαχείριση των γεωργικών εκμεταλλεύσεων, ακόμα και σε περιοχές όπου αυτές οι εποχικές προγνώσεις έχουν αποδειχθεί αναξιόπιστες. Ιστορικά στοιχεία βροχόπτωσης, θερμοκρασίας και ταχύτητας ανέμου έχουν χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό του βέλτιστου χρόνου σποράς και συγκομιδής των καλλιεργειών, για τη διαχείριση κτηνοτροφικών μονάδων πάχυνσης και γαλακτοπαραγωγής, καθώς και για το σχεδιασμό της άρδευσης. Επικουρικές πληροφορίες, που μπορεί να βοηθήσουν έναν παραγωγό να αξιολογήσει την τρέχουσα βλαστική περίοδο και να αποφασίσει σχετικά με διάφορες τακτικές, περιλαμβάνουν τις βροχοπτώσεις μέχρι σήμερα, δηλαδή στο πλαίσιο μιας καλλιεργητικής περιόδου, το ποσό της λιβαδικής βλάστησης ή της ανάπτυξης των καλλιεργειών, το βάρος του ζωικού κεφαλαίου, το ποσό των αποθηκευμένων προϊόντων και την ικανότητα να αντιμετωπίσουν δυσμενείς εποχές. Οι προγνώσεις καιρού (<10 ημέρες) έχουν ιδιαίτερη αξία στη λήψη αποφάσεων. Επίσης, και συστήματα υποστήριξης αποφάσεων (DSS) είναι διαθέσιμα στην ανάλυση των ιστορικών δεδομένων για τον προσδιορισμό της πιθανότητας βροχής, παγετού, της αρχής και του τέλους της καλλιεργητικής περιόδου.
Γενικά, η αξία των εποχικών προγνώσεων μπορεί να είναι σημαντική για τους παραγωγούς, αλλά αυτό ποικίλλει, ανάλογα με τη διαχείριση και τις αρχικές συνθήκες, καθώς και με τα συστήματα καλλιέργειας και τη θέση (Hammer et al, 2000). Προκαταρκτικές μελέτες για την αξία των εποχικών προγνώσεων που χρησιμοποιούν μοντέλα χορτολιβαδικών συστημάτων έχουν δείξει ότι τα οικονομικά οφέλη δεν είναι πάντα σημαντικά, με βάση τα υπάρχοντα επίπεδα πρόγνωσης. Αυτό τονίζει την ανάγκη για περαιτέρω έρευνα, προκειμένου να καθοριστεί η βέλτιστη διαχείριση πολλών συστημάτων και να προσαρμοστεί ο χρόνος λήψης αποφάσεων για την αξιοποίηση των προγνώσεων.

Επιλογικά

Τα μοντέλα καλλιεργειών θεωρούν τα φυτά συστήματα, που συμπεριφέρονται σαν ενιαία μονάδα. Προσπαθούν να περιγράψουν τη δομή και τη λειτουργία ενός συστήματος. Το σύνολο των διασυνδέσεων μεταξύ των συνιστωσών του συστήματος, δηλαδή του μοντέλου καλλιέργειας, αποτελεί τη δομή του. Επίσης, τα μοντέλα καιρού-καλλιέργειας περιλαμβάνουν τουλάχιστον μια εδαφική συνιστώσα, που καλύπτει τη

συμπεριφορά του νερού και, πιθανώς, των θρεπτικών και οργανικών ουσιών. Κατά συνέπεια, το σύστημα, δηλαδή το μοντέλο καιρού-καλλιέργειας, αφορά ένα ευρύτερο σύνολο συνιστωσών και όχι απλώς ένα φυτό.

Βιβλιογραφικές αναφορές

Baier, W. (1973). Crop weather analysis models. Review and model development. *Journal of Applied Meteorology*. 12:937-947.

Baker, R.H.A. (1996). Developing a European pest risk mapping system. *Bulletin OEPP*, 26(3-4):485-494.

Box, G.E.P. & G.M. Jenkins (1976). *Time series analysis: forecasting and control*. Revised edition, Holden Day, Inc., San Francisco, Ca., 532.

Botta, A., Viovy, N., Ciais, P., Friedlingstein, P. and Monfray, P. (2000). A global prognostic scheme of leaf onset using satellite data. *Global Change Biology*. 6:709-725. doi: 10.1046/j.1365-2486.2000.00362.x

Brown, R.A. & RosenbergN.J. (1999). Climate change impacts on the potential productivity of corn and winter wheat in their primary United States growing regions. *Climate Change*, 41:73-107.

Cannell, M.G.R. & Smith, R.I. (1983). Thermal time, chill days and prediction of budburst in *Picea sitchensis*. *Journal of Applied Ecolology*. 20:951-963.

Cao, W. & Moss, D.N. (1997). Modelling phasic development in wheat: a conceptual integration of physiological components. *Journal of Agricultural Science*. 129(2):163-172.

Chang, J.H. (1974). *Climate and Agriculture, an Ecological Survey*. Aldine Publ. Company, Chicago. 304.

Chmielewski, F.M., Blümel, K., Scherbaum-Heberer, C., Koppmann-Rumpf, B. and Schmidt, K.-H. (2013). A model approach to project the start of egg laying of Great Tit (Parus majorL.) *International Journal of Biometeorology*. 57:287-297, doi: 10.1007/s00484-012-0553-7.

Chuine I., Kramer, K. and Hanninen, H. (2003). Plant development models. In: *Phenology: An Integrative Environmental Science* (ed. Schwartz M.D.), 217-235. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

Chuine, I. (2000). A unified model for budburst of trees. *Journal of Theoritical Biology*. 207:337-347.

Dalezios, N.R., Loukas, A. and Bampzelis, D. (2002a). Assessment of NDVI and Agrometeorological Indices for Major Crops in Central Greece. *Physics and Chemistry of the Earth*, 27(23-24):1025-1029.

Dalezios, N.R., Loukas, A. and Bampzelis, D. (2002b). The role of Agrometeorological and Hydrometeorological Indices in the Phenology of Wheat in Central Greece. *Physics and Chemistry of the Earth*, 27(23-24):1019-1023.

Δαλέζιος, Ν.Ρ. (2005). *Αγρομετεωρολογία. Πανεπιστημιακές παραδόσεις*. 5η έκδοση. Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 681.

Demaree, G. (2009). The phenological observations and networking of Adolphe Quetelet at Royal Observatory of Brussels. *Italian Journal of Agrometeorology*. 22-24(1). ISSN 1824-8705.

European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) (2005). The basis of seasonal forecasting from: http://www.ecmwf.int/products/forecasts/seasonal/

Fitzgerald, J.B., Brereton, A.J. and Holden, N.M. (2005). Assessment of regional climate variation effects on the management of dairy cow systems in Ireland using a simulation model. *Grass Forage Sci*., 60(3):283-296.

Frank, K.L, Mader, T.L., Harrington Jr, J.A., Hahn, G.L. and Davis, M.S. (1999). Climate change effects on livestock production in the Great Plains. In: *Livestock Environment IV*. *Proceedings of the Sixth International Livestock Environment Symposium*, Louisville, Kentucky, 21-23 May 2001. ASAE Publ. 701P0201. St Joseph, ASAE.

Fu, Y., Zhang, H., Dong, W. and Yuan, W. (2014). Comparison of Phenology Models for Predicting the Onset of Growing Season over the Northern Hemisphere. *PLoS ONE*. 9(10):e109544. doi: 10.1371 / journal.pone.0109544.

Gommes, R. (1998). *Roving Seminar on crop-yield weather modelling*; lecture notes and exercises. WMO. Geneva, 153. Also available from: ftp://ext-ftp.fao.org/sd/sdr/Agromet/Documents/agro003a.pdf

Hammer, G.L., Nicholls, N. and Mitchell, C. (Eds.) (2000). *Applications of Seasonal Climate Forecasting in Agricultural and Natural Ecosystems: The Australian Experience*. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers.

Hänninen, H. (1995). Effects of climatic change on trees from cool and temperate regions: an ecophysiological approach to modeling of bud burst phenology. *Canadian Journal of Botany*. 73:183-199.
Harrison, P.A. & Butterfield R.E. (1996). Effects of climate change on Europe-wide winter wheat and sunflower productivity. *Climate Research*, 7:225-241.
Haskett, J.D., Pachepsky, Y.A. and Acock B. (1997). Increase of CO2 and climate change effects on Iowa soybean yield, simulated using GLYCIM. *Agronomy Journal*. 89:167-176.
Holden, N.M., Brereton, A.J., Fealy, R. and Sweeney, J. (2003). Possible change in Irish climate and its impact on barley and potato yields. *Agricultural and Forest Meteorology*. 116:181-196.
Hoogenboom, J.G.W., Jones, J.W. and Boote K.J. (1992). Modelling growth and development and yield of grain legumes using SOYGRO, PNUTGRO and BEANGRO: A review. *Trans*. *ASAE*, 35:2043-2056.
Hulme, M., Barrow, E.M., Arnell, N.W., Harrison, P.A., Johns, T.C. and Downing T.A. (1999). Relative impacts of human-induced climate change and natural climate variability. *Nature*, 397:688-691.
IPCC (2001). *Climate Change 2001*: *The scientific basis*, In: J.H.Y. Houghton. *International Consortium for Agricultural Systems Applications (ICASA)* from: http://www.icasa.net/dssat
Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC). (2007). *Impacts, Adaptation and Vulnerability*. *Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report to the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
Jones, C. and Kiniry J. (1986). *Ceres-N Maize: A Simulation Model of Maize Growth and Development*. College Station, Texas A&M University Press.
Kendal, M.G. & Stuart A. (1968). *The Advanced Theory of Statistics*. 3, 2nd Edition. Hafner Publishing Co., New York, 557.
Kiniry, J.R., Williams, J.R., Gassman, P.W. and Debaeke, P. (1992). A general process-oriented model for two competing plant species. *Transactions, ASAE*, 35(3):801-810.
Kumar, L. & Monteith, J.L. (1981). Remote Sensing of crop growth, In: M. Smith (Ed.). *Plants and daylight spectrum*. Academic Press, London, 133-144.
Kramer, K. (1994). A modeling analysis of the effects of climatic warming on the probability of spring frost damage to tree species in The Netherlands and Germany. *Plant Cell Environment*. 17:367-377.
Lieth, H. (1975). *Modelling the primary productivity of the world*. *Primary Productivity of the biosphere*. Springer Verlag, Berlin, 237-263.
Linkosalo, T., Lappalainen, H.K. and Hari, P. (2008). A comparison of phonological models of leaf bud burst and flowering of boreal trees using independent observations. *Tree Physiololgy*. 28:1873-1882.
Meinke, H. & Stone, R.C. (2005). Seasonal and inter-annual climate forecasting: the new tool for increasing preparedness to climate variability and change in agricultural planning and operations. *Climatic Change*, 70:221-253.
Menzel, A. et al. (2006). European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Global Change Biology*. 12:1-8.
Mitchell, G., Griggs, R.H., Benson, V., Williams, J., Vanicek, B. and Dumesnil, D. (1995). *EPIC User's guide*, Texas Agricultural research center (Blackand Research Center), USDA-ARS (Grassland, Soil and water Research Laboratory), USDA (Natural Resource Conservation Service), Temple, Texas, USA. About 200.
National Research Council (NRC). (1996). *Nutrient Requirements of Beef Cattle*. Seventh edition. Washington, DC, National Academy Press.
Παπαμιχαήλ, Δ. Μ. (2004). *Τεχνική Υδρολογία Επιφανειακών Υδάτων*. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 394.
Parry, M., Rosenzweig, M., Iglesias, A., Livermore, C. and Fischer, C. (2004). Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios. *Global Environ*. *Change*, 14:53-67.
Parton, W.J., McKeown, R., Kirchner, V. and Ojima, D. (1992). *CENTURY Users' Manual*. Ft Collins, Natural Resource Ecology Laboratory, Colorado State University.
Pearson, R.G., Dawson, T.P., Berry, P.M. and Harrison, P.A. (2002). SPECIES: A spatial evaluation of climate impact on the envelope of species. *Ecological Modelling*, 154:289-300.
Riedo, M., Grub, A., Rosset, M. and Fuhrer, M. (1998). A pasture simulation model for dry matter production and fluxes of carbon, nitrogen, water and energy. *Ecological Modelling*, 105:141-183.

Rosenzweig, C. & Iglesias, A. (1998). The use of crop models for international climate change impact assessment. In: *Understanding Options for Agricultural Production*. (G.Y. Tsuj i , G. Hoogenboom and P.K. Thornton, eds). Dordrecht, Kluwer Academic Publishers.

Schaber J. & Badeck, F.-W. (2003). Physiology-based phenology models for forest tree species in Germany. *International Journal of Biometeorology*. 47:193-201.

Shaw, E.M. (1999). Hydrology in Practice. 3rd Edition. Stanley Thornes (Publ. Ltd), UK, 569.

Singh, V., Matthews, R.B., Griffin, T.S., Ritchie, J.T., Hand, L.A. and Goenage, R. (1998). Modelling growth and development of root and tuber crops. In: *Understanding Options for Agricultural Production* (G.Y. Tsuji, G. Hoogenboom & P.K. Thornton, eds). Dordrecht, Kluwer Academic Publishers.

Sirotenko, O.D. & Abashina, E.V. (1985). Mathematical model for growth and development of plants at the level of phytomers. *Physiol Biochem Cult*. *Plant* 2:166-174.

Σταμπουλής, Δ.Θ. (2001). *Ανασκόπηση μεθοδολογιών αγρομετεωρολογικής προσομοίωσης*. Διπλωματική εργασία. Τμήμα Γεωπονίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας. 312.

Stockle, C.O., Martin, S. and Campbell, G.S. (1994). CropSyst, a cropping systems model: water/nitrogen budgets and crop yield. *Agric*. *Syst*., 46:335-359.

Stone, R.C., Hammer, G. and Marcussen, T. (1996). Prediction of global rainfall probabilities using phases of the Southern Oscillation Index. *Nature*, 384:252-255.

Thornley, J.H.M. & Cannell, M.G.R. (1997). Temperate grassland responses to climate change: An analysis using the Hurley pasture model. *Annals of Botany*. 80:205-221.

Van Diepen, C.A., Wolf, J., Van Keulen, H. and Rappoldt, C. (1989). WOFOST: a simulation model of crop production. *Soil Use and Management*, 5(1):16-24.

Vossen, P. & Rijks, D. (Eds.) (1995). *Early crop yield assessment of the EU countries: the system implemented by the Joint Research Centre*. Office for Official Publications of the EU, Luxembourg, EUR 16318EN, 182.

White, I.D., Mottershead, D.N. and Harrison, S.J. (1992). *Environmental Systems: An introduction text*. Chapman & Hall, London, 616.

Wight, J.R. & Skiles, J.W. (1987). *SPUR: Simulation of Production and Utilization of Rangelands: Documentation and User Guide*. ARS 63. Washington, DC, USDA Agricultural Research Service.

Williams, J.R., Dyke, P.T., Fuchs, W.W., Benson, V.W., Rice, O.W. and Taylor, E.D. (1990). *EPIC - Erosion/Productivity Impact Calculator: 2. User Manual*. USDA Technical Bulletin No. 1768. Washington, DC, USDA.

WMO (1983). *Guidelines on Crop-weather models*, prepared by a task-force on crop-weather models, edited by G.W. Robertson. WCP-50, 115.

WMO. (2010). *Guide to Agricultural Meteorological Practices*. WMO - No134.

Zhang, Y., Li, C., Zhou, X. and Moore III, B. (2002). A simulation model linking crop growth and soil biogeochemistry for sustainable agriculture. *Ecological Modelling*, 151:75-108.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 13
ΑΓΡΟΫΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Σύνοψη
Στο κεφάλαιο αυτό επιχειρείται η ανάδειξη του ρόλου και της σημασίας του νερού στη γεωργία και τη γεωργική παραγωγή. Αρχικά, εξετάζεται το θέμα της υγρασίας του εδάφους και γίνεται στατιστική ανάλυση των βασικών αγροϋδρολογικών μεταβλητών. Κατόπιν, περιγράφεται το πλαίσιο των μοντέλων βροχόπτωσης-απορροής και παρουσιάζονται τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται ευρέως. Τέλος, μελετώνται η διαχείριση υδατικών πόρων στη γεωργία και η διαχείριση ελλειμματικού νερού.

Προαπαιτούμενη γνώση
Ο αναγνώστης απαιτείται να έχει βασικές γνώσεις φυσικής και μαθηματικών.
https://www.youtube.com/watch?v=rVf4Dlw7_6M

13.1 Υγρασία εδάφους

13.1.1 Έδαφος και νερό

Το νερό αποτελεί βασικό στοιχείο για την ανάπτυξη και απόδοση των καλλιεργειών. Τα φυτά λαμβάνουν το νερό από το έδαφος. Το έδαφος θεωρείται ένα πολύπλοκο σύστημα, δηλαδή είναι συγχρόνως μια αποθήκη θρεπτικών στοιχείων, ένα περιβάλλον ανάπτυξης μικροοργανισμών, ένα μέσο διακίνησης του νερού, ένα μέσο στερέωσης των φυτών και μια αποθήκη νερού, απαραίτητη για την άντληση της υγρασίας των φυτών. Τα βασικά φυσικά χαρακτηριστικά ενός εδάφους είναι η υφή και η δομή. Εδαφική υφή είναι η ποσοστιαία αναλογία των ορυκτών σωματιδίων διαφόρου μεγέθους, που συνθέτουν το έδαφος. Αντίστοιχα, εδαφική δομή είναι ο τρόπος διάταξης των σωματιδίων αυτών, για το σχηματισμό ομάδων ή συσσωματωμάτων. Η υφή του εδάφους δεν μεταβάλλεται πρακτικά. Αντίθετα, η δομή του εδάφους, κυρίως στο επιφανειακό στρώμα, μπορεί να αλλάξει με διάφορες επεμβάσεις σε σχέση με τη διακίνηση του νερού.

13.1.1.1. Πυκνότητα εδάφους

Στο έδαφος διακρίνονται δύο πυκνότητες, αυτή που αφορά τα στερεά σωματίδια και αυτή που αφορά το έδαφος ως σύνολο. Η πυκνότητα των εδαφικών σωματιδίων ονομάζεται πραγματική πυκνότητα ή πραγματικό ειδικό βάρος, ρ_p. Ορίζεται ως η μάζα ή το βάρος της μονάδας όγκου των στερεών του εδάφους και εκφράζεται σε Mg m^{-3}. Παραμένει σταθερή, ανεξάρτητα αν το έδαφος είναι χαλαρό ή συμπαγές. Οι πυκνότητες των ορυκτών σωματιδίων παρουσιάζουν σημαντική διακύμανση. Ωστόσο, η αντιπροσωπευτική τιμή της πραγματικής πυκνότητας των επιφανειακών στρώσεων των γεωργικών εδαφών είναι 2,65 Mg m^{-3}. Η πυκνότητα του εδάφους προκύπτει αν θεώρηθεί το έδαγος στο σύνολό του και ονομάζεται χονδρική ή φαινομένη πυκνότητα ή/και φαινόμενο ειδικό βάρος, ρ_b, ορίζεται δε σαν η μάζα ή το βάρος της μονάδας όγκου του ξερού εδάφους, στον οποίο όγκο περιλαμβάνονται τόσο τα στερεά, όσο και οι πόροι του εδάφους, και εκφράζεται σε Mg m^{-3}. Η φαινομένη πυκνότητα είναι πάντα μικρότερη από την πραγματική. Όταν ένα έδαφος συμπιεστεί, τότε η φαινομένη πυκνότητα αυξάνεται, αφού η συμπίεση έχει αποτέλεσμα ο ίδιος ο όγκος εδάφους να έχει περισσότερα στερεά. Η φαινομένη πυκνότητα κάθε εδάφους καθορίζεται από την πυκνότητα των στερεών του, καθώς και από τον τρόπο με τον οποίο είναι διευθετημένα, δηλαδή από την εδαφική δομή.

13.1.1.2. Πορώδες εδάφους

Το ποσοστό του όγκου ενός εδάφους που καλύπτεται από τους πόρους λέγεται πορώδες. Οι εδαφικοί πόροι, δηλαδή τα διαστήματα που μένουν ανάμεσα στα στερεά μόρια του εδάφους, σχηματίζουν ένα πολύπλοκο δίκτυο από διασυνδεδεμένους αγωγούς κάθε σχήματος, διαμέτρου και μεγέθους. Αν όλοι οι πόροι του εδάφους, μικροί και μεγάλοι, γεμίσουν με νερό, τότε το έδαφος λέγεται κορεσμένο. Ο κορεσμός αντιπροσωπεύει τη μέγιστη ποσότητα νερού που μπορεί να χωρέσει ένα έδαφος. Αν μέρος μόνο των πόρων καλύπτεται με νερό, ενώ το υπόλοιπο περιέχει αέρα, τότε το έδαφος λέγεται ακόρεστο.

13.1.2. Ορισμοί υγρασίας εδάφους και χαρακτηριστικές καμπύλες

Ο όρος «εδαφική υγρασία» αναφέρεται στην ποσότητα νερού που υπάρχει στο εδαφικό σύστημα και μπορεί να εκφραστεί με διάφορους τρόπους. Ο πιο κοινός τρόπος είναι ο λόγος της μάζας του νερού που περιέχεται σε

ένα συγκεκριμένο όγκο εδάφους προς την ξερή μάζα του εδάφους του όγκου αυτού, που συμβολίζεται με θ_m και αναφέρεται ως «βαρυμετρική εδαφική υγρασία». Στον δεύτερο, πιο κοινό τρόπο έκφρασης, η εδαφική υγρασία ορίζεται ως ο όγκος του νερού σε ένα εδαφικό δείγμα προς τον φαινόμενο όγκο του δείγματος, συμβολίζεται με θ_v και αναφέρεται ως «ογκομετρική εδαφική υγρασία». Τα θ_v και θ_m συνδέονται με τη σχέση:

$\theta_v = (\rho_b/\rho_w)\, \theta_m$, (13.1)

όπου ρ_w είναι η πυκνότητα του νερού. Μια άλλη έκφραση της υγρασίας του εδάφους είναι ο «βαθμός κορεσμού», W, που δίνεται από τη σχέση:

$W = (\theta_v - \theta_r)/(\theta_s - \theta_r)$, (13.2)

όπου το θ_s είναι ο όγκος που καταλαμβάνουν οι πόροι του εδάφους και θ_r η «υπολειμματική υγρασία», δηλαδή το νερό που συγκρατείται μόνιμα από το έδαφος. Τέλος, η εδαφική υγρασία μπορεί να εκφραστεί ως ισοδύναμο πάχος νερού, d, που δίνεται από τη σχέση:

$d = \theta_v D$, (13.3)

όπου το D είναι κάποιο βάθος εδάφους και το d δίνεται συνήθως σε mm.

13.1.2.1. Δυναμικό εδαφικού νερού

Το εδαφικό νερό διαθέτει ενέργεια, που διακρίνεται σε κινητική και δυναμική. Η κινητική ενέργεια εκφράζεται από τη σχέση:

$E_a = m V^2 / 2$, (13.4)

όπου m είναι η μάζα του νερού και V η ταχύτητα κίνησης μέσα στο έδαφος.
Αν διαιρεθεί το δεξί μέρος της εξίσωσης (13.1) με το βάρος, B, του νερού, όπου B = mg, τότε εξάγεται η κινητική ενέργεια ανά μονάδα βάρους νερού, που δίνεται από τη σχέση:

$E_V = V^2 / 2g$, (13.5)

Η ποσότητα αυτή έχει διαστάσεις μήκους (L) και συνήθως λέγεται ύψος ταχύτητας. Η δυναμική ενέργεια του εδαφικού νερού οφείλεται στη βαρύτητα και τις άλλες δυνάμεις που ενεργούν πάνω στο νερό και αναφέρονται ως πιέσεις. Η ενέργεια που οφείλεται στη βαρύτητα δίνεται από τη σχέση:

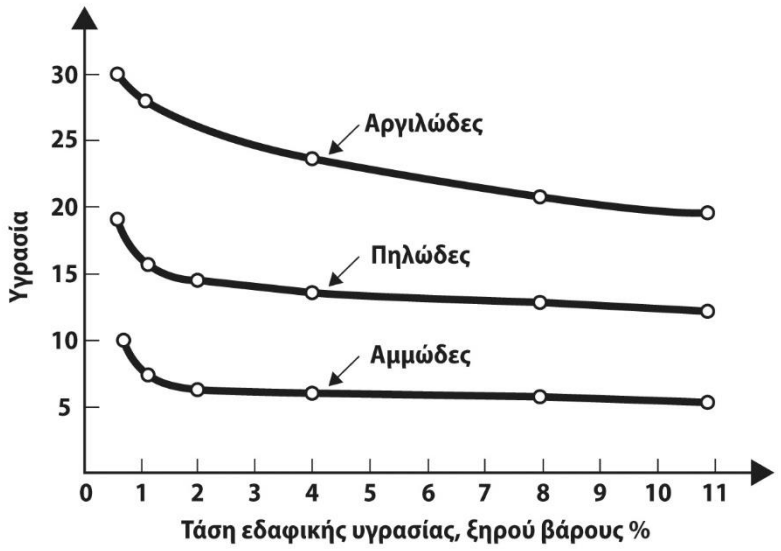
$E_h = m g z$, (13.6)

όπου z είναι η απόσταση από κάποιο επίπεδο αναφοράς.
Η συγκεκριμένη ενέργεια είναι σε μέγεθος ίση και αντίθετη με αυτήν που χρειάζεται το νερό για να ανυψωθεί από το επίπεδο αναφοράς μέχρι τη θέση στην οποία βρίσκεται.
Αν ένα κορεσμένο με νερό έδαφος αφεθεί να στραγγίσει, τότε μια ποσότητα νερού που βρίσκεται στους μεγάλους πόρους θα κινηθεί σχετικά εύκολα προς τα κάτω, υπό την επίδραση της βαρύτητας. Αυτή η ποσότητα νερού ονομάζεται «νερό βαρύτητας» ή «ελεύθερο νερό», μετά την απομάκρυνση του οποίου, τη θέση ξαναπαίρνει ο αέρας. Το νερό που παραμένει στο έδαφος μετά την απομάκρυνση του ελεύθερου νερού λέγεται «τριχοειδές νερό». Οι δυνάμεις που συγκρατούν το νερό στο έδαφος εκφράζονται με τους ισοδύναμους όρους «αρνητική πίεση» ή «τάση», είναι ανάλογες προς την περιεχόμενη στο έδαφος υγρασία και σχετίζονται με τα φαινόμενα της συνάφειας και της συνοχής. Όσο το νερό στο έδαφος λιγοστεύει, τόσο μεγαλύτερο έργο χρειάζεται, για την απομάκρυνσή του. Η αρνητική πίεση ή τάση της εδαφικής υγρασίας είναι το μέτρο που δείχνει πόσο ισχυρά συγκρατείται το νερό στο έδαφος. Η ύπαρξη αλάτων στο εδαφικό νερό συνεπάγεται την αύξηση της απαιτούμενης δύναμης, για την απομάκρυνσή τους. Αυτό οφείλεται στην ώσμωση. Η δύναμη πουπροκαλεί την κίνηση του νερού μέσα από τη μεμβράνη διαχωρισμού δύο διαλυμάτων διαφορετικής συγκέντρωσης αλάτων λέγεται ωσμωτική πίεση. Αν το εδαφικό νερό περιέχει σημαντική ποσότητα αλάτων, τότε η δύναμη που πρέπει να ασκηθεί για την απομάκρυνσή τους από το έδαφος είναι ίση με το άθροισμα της

τάσης και της ωσμωτικής πίεσης.

13.1.2.2. Χαρακτηριστικές καμπύλες

Για την εκτίμηση της ποσότητας νερού που μπορεί να συγκρατήσει ένα έδαφος κάτω από διαφορετικές τάσεις δημιουργούνται καμπύλες οι οποίες συνδέουν την υγρασία εδάφους με τις αντίστοιχες τάσεις ή πιέσεις. Οι καμπύλες αυτές είναι αντιπροσωπευτικές κάθε εδαφικού τύπου υφής και λέγονται χαρακτηριστικές καμπύλες (Σχήμα 13.1).



Σχήμα 13.1. *Χαρακτηριστικές καμπύλες υγρασίας των τριών βασικών εδαφικών τύπων υφής.*

13.1.2.3. Μέτρηση υγρασίας εδάφους

Η μέτρηση της εδαφικής υγρασίας είναι σημαντικό θέμα, που ακόμα αποτελεί αντικείμενο τρέχουσας έρευνας (Παπαζαφειρίου, 1999). Εδώ καταγράφονται η ταξινόμηση και οι τίτλοι μόνο των χρησιμοποιούμενων μεθόδων, καθόσον η περιγραφή μεθόδων είναι έξω από το αντικείμενο του βιβλίου.
Ειδικότερα:

- **Μέθοδοι μέτρησης εδαφικής υγρασίας.** Αναφέρονται η βαρυμετρική μέθοδος, η μέθοδος διάχυσης νετρονίων, η μέθοδος εξασθένισης της γ-ακτινοβολίας και η μέθοδος των μικροκυμάτων.
- **Μέθοδοι μέτρησης του δυναμικού της εδαφικής υγρασίας**. Αναφέρονται η μέθοδος του τενσιόμετρου, η τράπεζα πίεσης, η μέθοδος της θερμικής αγωγιμότητας, η μέθοδος της ηλεκτρικής αντίστασης, η μέθοδος του φίλτρου χάρτου και η μέθοδος του ψυχρόμετρου.
- **Μέθοδοι τηλεπισκόπησης**. Περιγράφονται στο Κεφάλαιο 11.

13.1.3. Παράμετροι υγρασίας εδάφους

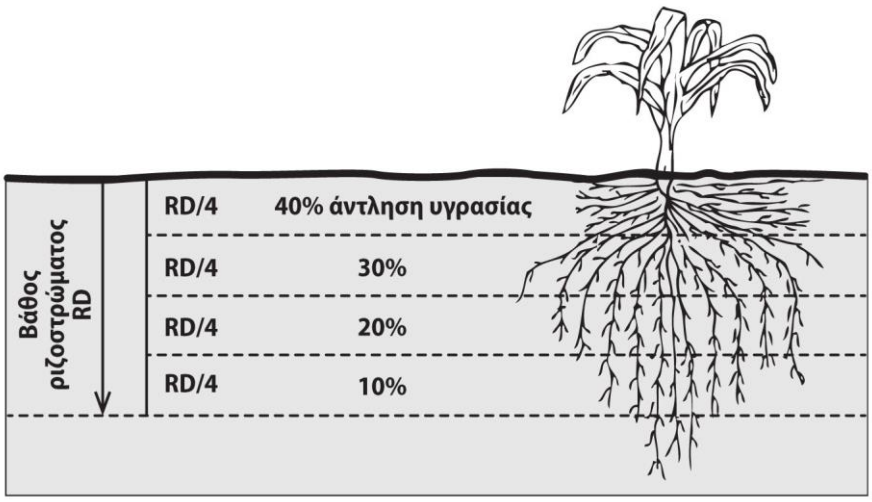
Παρουσιάζονται επιγραμματικά βασικοί παράμετροι και μεταβλητές της υγρασίας εδάφους, όπως υδατοϊκανότητα, σημείο μόνιμης μάρανσης, ριζικό σύστημα καλλιεργειών, διαθέσιμη υγρασία εδάφους και διηθητικότητα εδάφους.
Αναλυτικότερα:
α. Υδατοϊκανότητα εδάφους: Ορίζεται η υγρασία που συγκρατεί ένα βαθύ, ομοιόμορφο και καλά στραγγιζόμενο έδαφος μετά την απομάκρυνση του ελεύθερου νερού. Στην ουσία, είναι το όριο εκείνο της εδαφικής υγρασίας στο οποίο η τιμή της ακόρεστης υδραυλικής αγωγιμότητας που αντιστοιχεί είναι τόσο μικρή, ώστε πρακτικά έχει πάψει κάθε ουσιαστική κίνηση νερού στο έδαφος, ανεξάρτητα από τις υφιστάμενες υδραυλικές κλίσεις. Η υδατοϊκανότητα αποτελεί το πάνω όριο της χρήσιμης στα φυτά εδαφικής υγρασίας. Από πειραματικούς προσδιορισμούς, προκύπτει ο Πίνακας 13.1, για κάποιους τύπους υφής εδαφών, ενώ οι άλλοι τύποι έχουν ενδιάμεσες τιμές από αυτές.

Τύποι υφής εδάφους	Τάση στην υδατοϊκανότητα (cm)
Αμμώδες (χονδρόκοκκο)	60
Αμμοπηλώδες	100
Ιλιοπηλώδες	300
Αργιλώδες	600

Πίνακας 13.1. *Τύποι υφής εδάφους και υδατοϊκανότητα.*

β. Σημείο μόνιμης μάρανσης: Σε αντίθεση με την υδατοϊκανότητα, το σημείο μόνιμης μάρανσης αποτελεί το κάτω όριο της χρήσιμης για τα φυτά εδαφικής υγρασίας. Σε αυτό, τα φυτά δεν μπορούν να πάρουν από το έδαφος όλο το νερό που χρειάζονται για την κάλυψη των αναγκών τους, οπότε σταματά η ανάπτυξή τους και αρχίζουν να μαραίνονται. Το σημείο μόνιμης μάρανσης δεν είναι σταθερό, αλλά εξαρτάται από την υφή και τη δομή του εδάφους, το είδος και την κατάσταση στην οποία βρίσκονται τα φυτά, τη συγκέντρωση αλάτων στο έδαφος και τις μικροκλιματικές συνθήκες της περιοχής. Το όριο της εδαφικής υγρασίας κάτω από το οποίο τα φυτά ξεραίνονται λέγεται έσχατο σημείο μάρανσης.

γ. Ριζικό σύστημα καλλιεργειών: Για την ποσοτική εκτίμηση του χρήσιμου στα φυτά νερού, είναι απαραίτητη η γνώση της πυκνότητας και του βάθους του κύριου όγκου των ριζών τους, που αναφέρονται ως ζώνη του ριζοστρώματος ή ριζόστρωμα. Η επιφάνεια των ριζών των περισσοτέρων φυτών, συγκριτικά με τα άλλα μεγέθη τους, είναι πολύ μεγάλη. Στα περισσότερα φυτά, οι ρίζες είναι συγκεντρωμένες στο πάνω μέρος της ζώνης του ριζοστρώματος, κοντά στη βάση του φυτού. Αν το έδαφος είναι ομοιογενές σε όλη τη ζώνη του ριζοστρώματος και έχει επαρκή υγρασία σε όλο το βάθος του, τα φυτά αντλούν το μεγαλύτερο μέρος της υγρασίας από την επιφανειακή περιοχή και λιγότερο από τις υποκείμενες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 13.2, που αποτελεί τυπικό παράδειγμα άντλησης υγρασίας από το ριζόστρωμα των φυτών. Συμπερασματικά, τα φυτά αντλούν με έντονο ρυθμό την υγρασία από το πάνω μέρος της ζώνης του ριζοστρώματος, με συνέπεια την ταχεία εξάντλησή της. Με τον τρόπο αυτό, για να αναπτυχθούν τα φυτά, αναγκάζονται να στείλουν ρίζες προς τα βαθύτερα στρώματα, με αποτέλεσμα να υπάρχει μια σχεδόν ομοιόμορφη άντληση από όλη τη ζώνη του ριζοστρώματος. Στην πραγματικότητα, ο ρυθμός άντλησης και το βάθος της ζώνης του ριζοστρώματος διαμορφώνονται από την κατανομή της υγρασίας στο έδαφος, το είδος της καλλιέργειας και τις εδαφικές και μικροκλιματικές συνθήκες της περιοχής. Στον Πίνακα 13.2 παρουσιάζονται τυπικά βάθη ριζοστρώματος διαφόρων καλλιεργειών, που αναπτύσσονται σε αρδευόμενα, βαθιά, ομοιογενή, μέσης σύστασης εδάφη.



Σχήμα 13.2. *Άντληση υγρασίας από το ριζόστρωμα φυτού.*

δ. Διαθέσιμη υγρασία εδάφους: Στην άρδευση ενδιαφέρει η υγρασία μεταξύ της υδατοϊκανότητας και του σημείου μόνιμης μάρανσης στο βάθος του ριζοστρώματος. Η υγρασία αυτή αποτελεί τη διαθέσιμη υγρασία εδάφους και υπολογίζεται από τη σχέση:

ASM = [(FC – PWP)/100] x ASW x RD mm, (13.7)

όπου ASM (Available Soil Moisture) είναι η διαθέσιμη υγρασία σε mm πάχους υδάτινου στρώματος, FC (Field Capacity) η υδατοϊκανότητα, PWP (Permanent Wilting Point) το σημείο μόνιμης μάρανσης, ως ποσοστό % ξηρού βάρους, ASW (Available Soil Weight) το φαινόμενο ειδικό βάρος, που είναι αδιάστατο, και RD (Root Depth) το βάρος του ριζοστρώματος σε mm.
Η σχέση (13.7) ισχύει εάν το έδαφος είναι ομογενές σε όλο το βάθος του ριζοστρώματος. Εάν το έδαφος αποτελείται από στρώσεις, η διαθέσιμη υγρασία υπολογίζεται για κάθε στρώση χωριστά και μετά αθροίζεται για όλο το βάθος του ριζοστρώματος. Η διαθέσιμη υγρασία διαμορφώνεται ανάλογα με την υφή και τη δομή των εδαφών. Γενικά, αμμώδη εδάφη, που είναι ελαφρά και στραγγίζονται καλά, έχουν μικρή διαθέσιμη υγρασία. Ακολουθούν τα ιλυώδη και μετά τα αργιλώδη, που έχουν πολύ μεγάλη διαθέσιμη υγρασία.

α/α	Καλλιέργεια	Βάθος ριζοστρώματος, m	
		κανονικό	μέγιστο
1	Καλαμπόκι	0,90	1,80
2	Σιτηρά	0,90	1,80
3	Βαμβάκι	1,20	2,00
4	Μηδική	1,50	2,40
5	Χόρτο σε λιβάδια	0,60	1,20
6	Φυλλοβόλα οπωροφόρα	1,50	2,40
7	Εσπεριδοειδή	1,50	-
8	Αμπέλια	1,50	-
9	Ζαχαρότευτλα	0,90	1,50
10	Πατάτες	0,60	0,90
11	Ντομάτες	1,20	1,50
12	Σπανάκι	0,30	0,60
13	Σέλινο	0,30	0,60
14	Αγγούρια	0,30	0,45
15	Καπνός	0,90	-
16	Ρύζι	0,60	-

Πίνακας 13.2. *Βάθος ριζοστρώματος διαφόρων καλλιεργειών.*

Η υγρασία που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κανονική ανάπτυξη και απόδοση των καλλιεργειών είναι κλάσμα της διαθέσιμης υγρασίας, το μέγεθος του οποίου εξαρτάται από το συνδυασμό των φυτικών, εδαφικών και κλιματικών συνθηκών μιας περιοχής, που διαμορφώνουν ένα συντελεστή ωφελιμότητας F. Το κλάσμα αυτό της διαθέσιμης υγρασίας λέγεται ωφέλιμη υγρασία (USM: Useful Soil Moisture) και δίνεται από τη σχέση:

USM = F x ASM. (13.8)

ε. Διηθητικότητα εδάφους: Διήθηση ορίζεται η διείσδυση του νερού στο έδαφος από την επιφάνειά του. Η διηθητική ικανότητα του εδάφους καθορίζει το ρυθμό με τον οποίο το νερό πρέπει να εφαρμόζεται κατά την άρδευση χωραφιών. Στο Σχήμα 13.3 παρουσιάζεται η στιγμιαία και αθροιστική διηθητικότητα ομογενών εδαφών, όπου διαπιστώνεται ότι η ταχύτητα διήθησης νερού στο έδαφος, δηλαδή η διηθητικότητα, f, ελαττώνεται συνεχώς με την πάροδο του χρόνου. Η ταχύτητα διήθησης αμέσως μετά την εφαρμογή του νερού στην επιφάνεια του εδάφους λέγεται αρχική διηθητικότητα, η σταθερή τιμή που παίρνει μετά την παρέλευση αρκετού χρόνου λέγεται τελική ή βασική διηθητικότητα, f_c, ενώ η τιμή της σε οποιοδήποτε στάδιο της διαδικασίας λέγεται στιγμιαία διηθητικότητα. Η τελική διηθητικότητα, f_c, θεωρείται ότι είναι ίση με την κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα του εδάφους, K_0. Η ολική ποσότητα του νερού που διηθείται στο έδαφος στη διάρκεια μιας χρονικής περιόδου, t, λέγεται αθροιστική διηθητικότητα και δίνεται από τη σχέση:

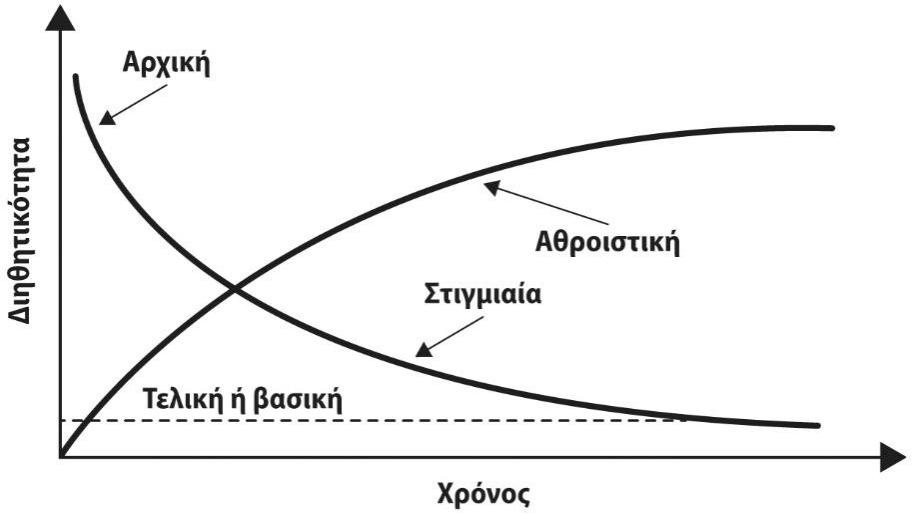
$$F(t) = \int_0^t f dt, \quad (13.9)$$

όπου F(t) είναι η αθροιστική και f η στιγμιαία διηθητικότητα, αντίστοιχα.

Από τη σχέση αυτή, συνεπάγεται ότι:

f = dF/dt, (13.10)

δηλαδή η στιγμιαία διηθητικότητα είναι η παράγωγος της αθροιστικής διηθητικότητας ως προς το χρόνο.



Σχήμα 13.3. *Στιγμιαία και αθροιστική διηθητικότητα ομογενών εδαφών.*

13.2. Στατιστική ανάλυση αγροϋδρολογικών μεταβλητών

Με τον όρο «αγροϋδρολογικές μεταβλητές» εννοούνται οι βασικές αγρομετεωρολογικές και υδρολογικές μεταβλητές, κυρίως η βροχόπτωση, η απορροή και η θερμοκρασία. Η στατιστική ανάλυση των μεταβλητών αυτών είναι απαραίτητη στην υδρολογική και αγρομετεωρολογική σχεδίαση, καθόσον απαιτούνται πληροφορίες για φαινόμενα που δεν ακολουθούν τους φυσικούς νόμους, αλλά τους νόμους των πιθανοτήτων. Η συγκεκριμένη διαπίστωση έχει αποτέλεσμα την αναγκαιότητα χρησιμοποίησης της στατιστικής και πιθανολογικής ανάλυσης των μεταβλητών αυτών. Οι στατιστικές αναλύσεις στηρίζονται στην υπόθεση ότι οι πραγματοποιήσεις μιας μεταβλητής παρουσιάζουν χρονική ανεξαρτησία και, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η χρονική τους ακολουθία, κατατάσσονται με βάση την τάξη μεγέθους. Η κατάταξη αυτή δίνει και τη βασική ιστορική πληροφορία από το δείγμα των πραγματοποιήσεων της μεταβλητής, που είναι η σχετική συχνότητα ή η πιθανότητα υπέρβασης μιας συγκεκριμένης τιμής της μεταβλητής. Η κατανομή των τιμών της μεταβλητής στο πεδίο της συχνότητας ή η κατανομή πιθανότητας ρυθμίζεται με βάση τα στατιστικά χαρακτηριστικά του δείγματος και αποτελεί την ταυτότητα της μεταβλητής, αλλά και της διαδικασίας την οποία ορίζει κάθε μεταβλητή.

13.2.1. Κατανομές πιθανοτήτων και ανάλυση χρονοσειρών

Οι κατανομές πιθανοτήτων και η ανάλυση συχνοτήτων των μεταβλητών αποτελούν μέρος της στατιστικής ανάλυσης και συμβάλλουν σημαντικά στην αγρομετεωρολογική και υδρολογική σχεδίαση και ανάλυση. Αντίστοιχα, η ανάλυση χρονοσειρών αποτελεί πολύ χρήσιμη επεξεργασία και διαδικασία της αγρομετεωρολογικής και υδρολογικής ανάλυσης. Ειδικότερα, η ανάλυση χρονοσειρών περιλαμβάνει, μεταξύ άλλων, στοχαστικές διαδικασίες, όπως ανάλυση τάσεων, ανάλυση περιοδικότητας, ανάλυση τυχαιότητας, που περιγράφονται επιγραμματικά στη συνέχεια.

13.2.1.1. Κατανομές πιθανοτήτων

Ο αριθμός των θεωρητικών κατανομών που η μαθηματική ανάλυση έχει προσφέρει στη διεθνή βιβλιογραφία, είναι πολύ μεγάλος και εγείρεται ζήτημα για την επιλογή της πιο κατάλληλης από αυτές (Chow, 1964·

Yevjevich, 1972· Clarke, 1994). Ωστόσο, η πολύχρονη προσπάθεια προσαρμογής διαφόρων κατανομών πιθανοτήτων στις αγροϋδρολογικές μεταβλητές έχει οδηγήσει σε κάποιες γενικές παραδοχές, που περιορίζουν τις προς επιλογή κατανομές (Παπαμιχαήλ, 2004). Οι γενικές παραδοχές αφορούν χαρακτηριστικές ιδιότητες των κατανομών μηνιαίων ή ετήσιων παροχών ή βροχών και είναι οι εξής:

- Η κατανομή είναι συνεχής και ορισμένη για όλες τις θετικές τιμές της μεταβλητής.
- Ο άνω κλάδος της κατανομής δεν έχει όριο.
- Ο κάτω κλάδος έχει όριο το μηδέν ή μια θετική τιμή.
- Η καμπύλη κατανομής πιθανοτήτων είναι ασυμπτωτική για μεγάλες θετικές τιμές της μεταβλητής.

Ο μέγιστος αριθμός των στατιστικών παραμέτρων που περιγράφουν θεωρητικές κατανομές περιορίζεται στις τρεις, ωστόσο, στις περισσότερες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται τα μέτρα θέσης, δηλαδή δύο στατιστικές παράμετροι. Η μελέτη και η κατανόηση μερικών θεωρητικών κατανομών που έχουν άμεση σχέση με την αγρομετεωρολογική και υδρολογική ανάλυση κρίνεται απαραίτητη, για την προσαρμογή τους στις εμπειρικές κατανομές από τα ιστορικά δεδομένα. Επισημαίνεται ότι αποτελεί προϋπόθεση να έχουν τα μελλοντικά δεδομένα τις ίδιες ή παρόμοιες ιδιότητες με το δείγμα των ιστορικών δεδομένων. Αναφέρονται απλά, χωρίς να παρουσιάζονται η κανονική κατανομή ή κατανομή Gauss, που είναι μια συμμετρική κωδωνοειδής καμπύλη, και η λογαριθμοκανονική κατανομή, δηλαδή οι λογάριθμοι της μεταβλητής ακολουθούν την κανονική κατανομή (Παπαμιχαήλ, 2004).

13.2.1.2. Ανάλυση συχνοτήτων βροχοπτώσεων

Η ανάλυση της εμφάνισης βροχόπτωσης εξαρτάται βασικά από το μήκος της διάρκειας της βροχόπτωσης για την οποία απαιτείται η πληροφορία. Παρατηρούνται αξιοσημείωτες διαφορές στα μεγέθη και τα πρότυπα εμφάνισης βροχόπτωσης σε διαφορετικές κλιματικές ζώνες. Γενικά, όσο μεγαλύτερο είναι το ύψος της ετήσιας βροχόπτωσης, τόσο μικρότερη είναι η μεταβολή από χρόνο σε χρόνο. Σε ημίξηρες περιοχές του κόσμου, με πολύ περιορισμένα ύψη βροχής, η βροχόπτωση θεωρείται ακανόνιστη και αναξιόπιστη. Επίσης, τα εποχικά πρότυπα βροχόπτωσης παρουσιάζουν σημαντικές επιπτώσεις στην ανάλυση συχνοτήτων. Σε υψηλές εποχικές βροχοπτώσεις, στην τροπική ζώνη ή σε περιοχές της Μεσογείου, συνιστάται να παραλείπονται από την ανάλυση οι ξηροί μήνες. Όταν η βροχή εμφανίζεται όλο το χρόνο, τότε η ανάλυση συχνοτήτων είναι πιο ξεκάθαρη, οπότε έμφαση μπορεί να δοθεί στις διαφορές συχνότητας μεταξύ μετρήσεων βροχόπτωσης διαφορετικών χρονικών περιόδων. Στο Σχήμα 13.4 παρουσιάζονται τα πρότυπα εμφάνισης υψών βροχόπτωσης για ημέρα, μήνα και έτος, αντίστοιχα, ενός ενδεικτικού βροχομετρικού σταθμού στην Αγγλία (Shaw, 1999). Επισημαίνεται ότι στην ανάλυση συχνοτήτων βροχοπτώσεων απαιτούνται μεγάλες χρονοσειρές. Για παράδειγμα, 20 χρόνια μετρήσεων θεωρούνται ανεπαρκή για την ανάλυση των συχνοτήτων ετήσιων βροχοπτώσεων. Επίσης, η ανάλυση συχνοτήτων ημερήσιων βροχοπτώσεων δείχνει μια εκθετική συνάρτηση (Σχήμα 13.4α), δηλαδή κατανομή-J, καθόσον υπάρχει μεγάλος αριθμός ημερών χωρίς βροχή μέσα στο έτος. Τέλος, στην ανάλυση συχνοτήτων των διαφόρων διαρκειών βροχόπτωσης, πρέπει η ταξινόμηση των βροχοπτώσεων να περιλαμβάνει 15-20 τάξεις, όχι όμως λιγότερες από 10 τάξεις.

13.2.1.3. Ανάλυση χρονοσειρών

Χρονική σειρά ή χρονοσειρά χαρακτηρίζεται μια αλληλοδιαδοχή τιμών, δηλαδή πραγματοποιήσεων, μιας μεταβλητής, όπως αυτές έχουν εμφανιστεί με αυστηρή χρονική ακολουθία. Με τον τρόπο αυτό, σε αντίθεση με την απλή κατάταξη δεδομένων μιας μεταβλητής, οι χρονοσειρές διαθέτουν ένα παραπάνω φυσικό μέγεθος, το χρόνο, που καθιστά την επεξεργασία τους ακόμα πιο πολύπλοκη. Σε πολλές περιπτώσεις, το πρότυπο αλλαγών στο χρόνο μιας μεταβλητής μπορεί να αποδοθεί σε μια προφανή αιτία, και είναι άμεσα κατανοητό και εξηγήσιμο. Ωστόσο, αν υπάρχουν πολλές αιτίες για τη μεταβλητότητα στις τιμές μιας χρονοσειράς, τότε καθίσταται δύσκολος ο προσδιορισμός των διαφόρων μεμονωμένων επιδράσεων.

Στο Σχήμα 13.5 απεικονίζεται μια χρονοσειρά μεταβλητής, y(t), καθώς και οι διάφορες συνιστώσες ανάλυσης της χρονοσειράς. Ειδικότερα, από το Σχήμα 13.5α φαίνεται ότι το πρότυπο των παρατηρήσεων της χρονοσειράς παρουσιάζει τρία ευδιάκριτα χαρακτηριστικά, που απεικονίζονται στα επόμενα γραφήματα (β, γ και δ) του Σχήματος 13.5, δηλαδή τις συνιστώσες ανάλυσης της χρονοσειράς, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Αρχικά, παρατηρείται μια συνήθης βαθμιαία συνολική αύξηση των τιμών της μεταβλητής, δηλαδή μια αυξητική τάση, που αποτελεί την πρώτη συνιστώσα ανάλυσης της χρονοσειράς, $y_1(t)$, και απεικονίζεται σαν γραμμικό μοντέλο στο Σχήμα 13.5β. Το δεύτερο προφανές σύνηθες πρότυπο στη χρονοσειρά είναι μια κυκλική μεταβλητότητα, που αποτελεί την περιοδική συνιστώσα ανάλυσης της χρονοσειράς, $y_2(t)$, και απεικονίζεται στο Σχήμα 13.5γ.

Τονίζεται ότι η περιοδικότητα μιας χρονοσειράς αποτελεί αντικείμενο μοντελοποίησης (Chow, 1964· Yevjevich, 1972). Το τρίτο αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό της χρονοσειράς είναι μια αιχμή που αποδίδεται σε ένα καταστροφικό γεγονός και αποτελεί μια άλλη συνιστώσα, $y_3(t)$, της χρονοσειράς. Το τέταρτο κρυμμένο χαρακτηριστικό στης χρονοσειράς αποδίδεται στη μερικώς τυχαία στοχαστική συνιστώσα, $y_4(t)$, που προέρχεται από μια ακανόνιστη, αλλά συνεχή μεταβλητότητα των μετρήσεων και μπορεί να παρουσιάζει επίσης κάποια εμμονή. Ειδικότερα, μπορεί να αποδίδεται είτε σε σφάλματα οργάνων ή δειγματοληψίας είτε σε τυχαίες, μη εξηγήσιμες διακυμάνσεις στη φυσική διαδικασία.
Η πλήρης σειρά, y(t), μπορεί εκφραστεί από τη σχέση:

$$y(t) = y_1(t) + y_2(t) + y_3(t) + y_4(t). \quad (13.11)$$

Οι πρώτοι δύο όροι της εξίσωσης (13.11) είναι αιτιοκρατικοί ή ντετερμινιστικοί και μπορούν να προσδιοριστούν και να ποσοτικοποιηθούν σχετικά εύκολα. Οι άλλοι δύο όροι είναι στοχαστικοί, με σημαντικά τυχαία στοιχεία και κάποιες μικρές επιπτώσεις εμμονής, που δεν είναι εύκολο να προσδιοριστούν και να ποσοτικοποιηθούν.

13.2.1.4. Γεννήτριες τυχαίου καιρού (RWG: Random Weather Generators).

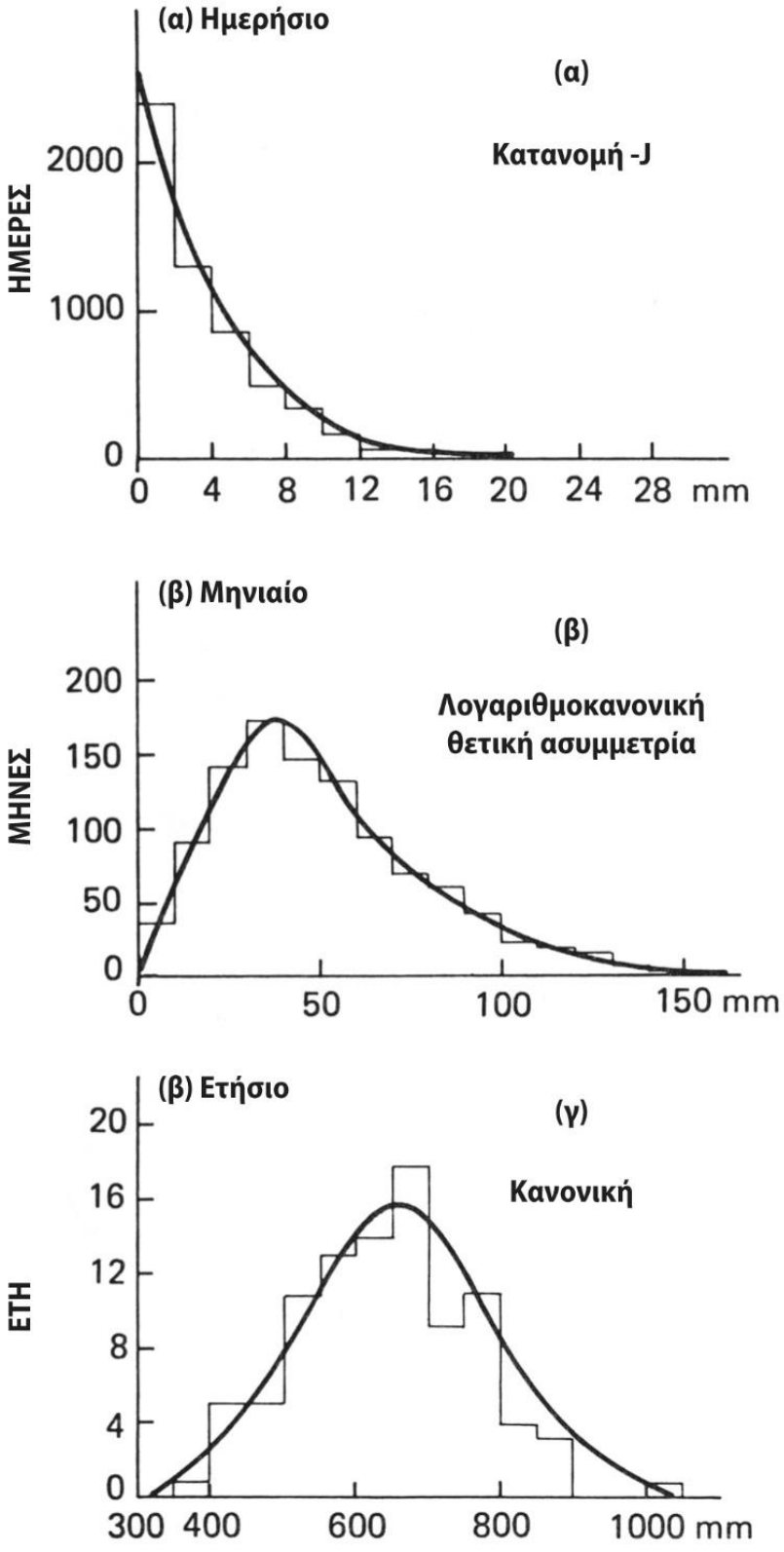
Είναι αλγόριθμοι και προγράμματα υπολογιστών που παράγουν συνθετικές χρονοσειρές καιρού, με βάση τα ιστορικά στοιχεία του εξεταζόμενου σταθμού. Οι συνθετικές σειρές δεν είναι προγνώσεις τού τι θα συμβεί στο μέλλον, αλλά μάλλον δείγματα ακολουθίας γεγονότων που μπορεί να συμβούν με αυτόν τον τρόπο (Gobel, 1995). Τέτοιες σειρές χρησιμοποιούνται συχνά σε Monte Carlo προσομοίωση ρίσκου, καθώς και σε πρόγνωση σοδειάς. Οι RWG προσομοιώνουν τις συσχετίσεις και τις στοχαστικές διαδικασίες (μαρκοβιανές αλυσίδες), που υπάρχουν στα ιστορικά δεδομένα. Οι διαδικασίες ελέγχονται από συντελεστές, που είναι χαρακτηριστικοί του κάθε σταθμού. Οι συντελεστές μπορεί να κατευθύνουν μια γεννήτρια σε χαρτογράφηση με χωρική παρεμβολή, όπως σε κάθε μεταβλητή, παρέχοντας έτσι τη δυνατότητα δημιουργίας συνθετικού καιρού, που καλύπτει μεγάλες περιοχές. Τονίζεται ότι στις περισσότερες περιπτώσεις δεν υπάρχει χωρική συνοχή στα πεδία που δημιουργούνται με αυτόν τον τρόπο. Αναμένεται ότι η περιοχή των χωροχρονικών μοντέλων συνθετικού καιρού (Hutchinson, 1994) θα κερδίσει δημοσιότητα, με την αύξηση της υπολογιστικής ισχύος των προσωπικών υπολογιστών.

13.2.2. Ανάλυση συχνότητας ακραίων τιμών

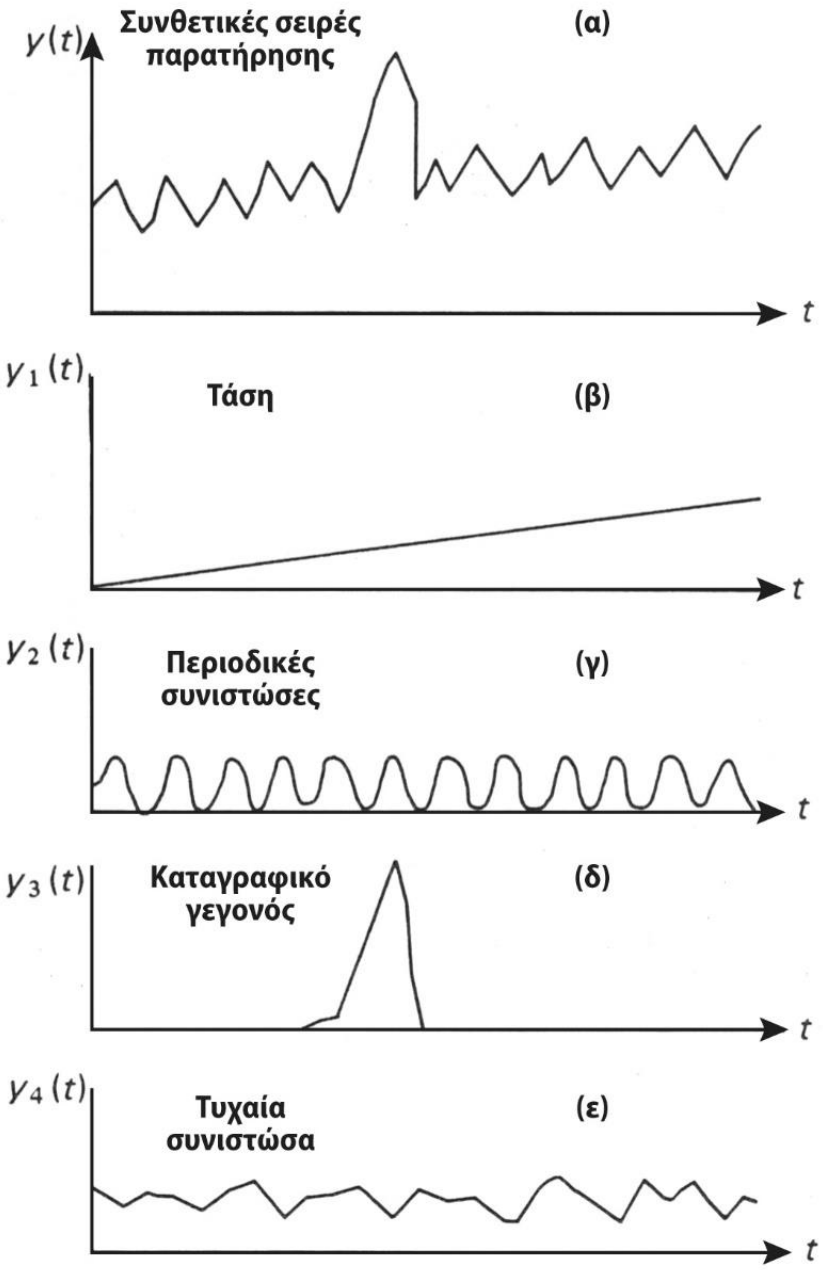
Ακραίες τιμές υψών βροχής διαφόρων διαρκειών χρησιμοποιούνται εκτεταμένα στην αγρομετεωρολογική και υδρολογική σχεδίαση. Η στατιστική ανάλυση εφαρμόζεται τόσο για τη βροχή, όσο και για άλλες μεταβλητές, όπως είναι η παροχή. Η ανάλυση συχνότητας ακραίων συμβάντων βροχής και παροχών αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για την εκτίμηση της μελλοντικής διακύμανσής τους, που καθορίζει και τη διαστασιοποίηση διαφόρων μέσης κλίμακας έργων αξιοποίησης των υδατικών πόρων. Στην ανάλυση συχνότητας ακραίων τιμών, χρησιμοποιείται η περίοδος επαναφοράς ή επανάληψης, που είναι η περίοδος σε χρόνια ανάμεσα σε συμβάντα των οποίων το μέγεθος είναι ίσο ή μεγαλύτερο από το εξεταζόμενο. Η περίοδος επαναφοράς είναι το αντίστροφο της πιθανότητας εμφάνισης ενός συμβάντος ορισμένου μεγέθους και δίνεται από τη σχέση:

$$T = 1/P,$$

όπου T είναι η περίοδος επαναφοράς ενός συμβάντος και P η πιθανότητα εμφάνισης σε συγκεκριμένο χρόνο ενός συμβάντος που θα ισούται με αυτό ή θα το υπερβαίνει σε μέγεθος.
Στην ανάλυση συχνότητας ακραίων τιμών, χρησιμοποιούνται οι παρατηρήσεις των ακραίων τιμών συμβάντων με τη μορφή χρονοσειρών, που μπορεί να είναι δύο ειδών: οι ετήσιες χρονοσειρές, οι οποίες αποτελούνται από τις μέγιστες ακραίες τιμές, μία για κάθε χρόνο, μιας περιόδου πολλών ετών, και οι χρονοσειρές μερικής διάρκειας, οι οποίες αποτελούνται από όλες τις τιμές που είναι ίσες ή μεγαλύτερες μιας επιλεγμένης τιμής, ανεξάρτητα από το έτος εμφάνισης, διαταγμένες κατά φθίνουσα τάξη μεγέθους.



Σχήμα 13.4. *Ανάλυση συχνοτήτων βροχόπτωσης διαφόρων διαρκειών.*



Σχήμα 13.5. *Συνιστώσες ανάλυσης χρονοσειράς.*

Η εκτίμηση ακραίων συμβάντων, όπως οι ακραίες βροχές, όπου απαιτούνται περίοδοι επαναφοράς, εφόσον είναι γνωστά τα ύψη και οι διάρκειες, προϋποθέτει τη θεώρηση μιας μαθηματικής φόρμουλας για την κατανομή συχνότητας. Διάφορες κατανομές χρησιμοποιούνται εκτεταμένα διεθνώς, στην υδρολογική κυρίως ανάλυση, για να περιγράψουν στατιστικές παραμέτρους βροχής και παροχής. Αναφέρονται, ενδεικτικά, η ακραία τιμή I (EVI: Extreme Value I), δηλαδή η κατανομή Gumbel (Gumberl, 1958), η λογαριθμοκανονική (lognormal) κατανομή δύο παραμέτρων (LN2: Lognormal 2-parameter), η λογαριθμοκανονική (lognormal) κατανομή τριών παραμέτρων (LN3: Lorgnormal 3-parameter) ή η λογαριθμική κατανομή Pearson τύπου III (LP3: Log Pearson Type III). Για πολλές από αυτές τις κατανομές, δεν υπάρχει αιτιολόγηση της χρήσης τους εκτός της προσαρμογής τους σε εμπειρικές κατανομές. Ωστόσο, υπάρχει μια ιδιαίτερη οικογένεια κατανομών, η γενικευμένη κατανομή ακραίων τιμών (GEV: Generalized Extreme Value), που θεωρείται η πιο κατάλληλη για αναλύσεις ακραίων τιμών, έχοντας και μια θεωρητική αιτιολόγηση (Kotz & Nadarajah, 2000). Η GEV

λειτουργεί ως γενική κατανομή, με εκτενείς επιτυχημένες εφαρμογές σε υδρολογικά ακραία φαινόμενα. Τονίζεται ότι και η EVI, δηλαδή η κατανομή Gumbel, ανήκει στην ίδια οικογένεια της GEV και αποτελεί απλοποιημένη περίπτωσή της. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται μια εφαρμογή των σχέσεων ύψους-διάρκειας-συχνότητας βροχής στην Ελλάδα (Dalezios & Eslamian, 2015· Dalezios et al., 2013· Loukas et al., 2001).

13.2.2.1. Σχέσεις ύψους-διάρκειας-συχνότητας (ΥΔΣ) βροχής

Για την ανάπτυξη των σχέσεων ΥΔΣ χρησιμοποιούνται ημερήσια βροχομετρικά ύψη από 24 σταθμούς στην Ελλάδα, για την περίοδο 1950-1981. Όσον αφορά τα στοιχεία αυτά, υπολογίζονται τα ετήσια μέγιστα ύψη βροχής για διάρκειες από 1 έως 7 ημέρες. Τονίζεται ότι οι σταθμοί κατανέμονται ομοιόμορφα στις υπάρχουσες κλιματικές ζώνες της Ελλάδας. Ακολουθεί σύντομη περιγραφή των τριών βημάτων ανάπτυξης των σχέσεων ΥΔΣ βροχόπτωσης.

Βήμα 1: Πίνακες πιθανοτήτων. Από τα ημερήσια στοιχεία βροχής, αναπτύσσονται διάφοροι πίνακες για κάθε σταθμό, ένας για κάθε επιλεγμένη διάρκεια σε ημέρες. Πιο συγκεκριμένα, για κάθε σταθμό υπολογίζονται αθροιστικά ύψη βροχόπτωσης από διαδοχικές τιμές ημερήσιων χρονοσειρών βροχόπτωσης και πινακοποιούνται κατ' ανιούσα τάξη, μαζί με την αντίστοιχη διάρκεια βροχής σε ημέρες, δηλαδή από 1 έως 7 μέρες. Με τον τρόπο αυτό, πολλαπλά συμβάντα μέσα στο χρόνο λαμβάνονται υπόψη στην ανάλυση ΥΔΣ. Επομένως, δημιουργούνται διάφοροι πίνακες ανά σταθμό, ένας για κάθε διάρκεια σε ημέρες. Ο συνολικός αριθμός πινάκων ισούται με τον αριθμό των τάξεων-διαρκειών, δηλαδή 7 τάξεις, για καθέναν από τους 24 σταθμούς.

Βήμα 2: Εφαρμογή κατανομής Gumbel. Για κάθε διάρκεια βροχής, τα αθροιστικά ύψη βροχόπτωσης απεικονίζονται σε σχέση με την περίοδο επαναφοράς και εφαρμόζεται μια στατιστική κατανομή στα σημεία του γραφήματος. Εξετάζονται διάφορες κατανομές, όπως οι EVI, LN2, LN3, LP3 και GEV. Τελικά, εφαρμόζεται η EVI (Gumberl, 1958) στα βροχομετρικά ύψη (Σχήμα 13.6). Η αντίστοιχη πιθανότητα (P) υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τον τύπο Weibull: $P = m / (n+1)$

όπου m είναι ο αύξων αριθμός και n ο συνολικός αριθμός των παρατηρήσεων.

Η αντίστοιχη περίοδος επαναφοράς, T, για διάρκεια μιας ημέρας δίνεται από τη σχέση: $T= 1/P$ που έχει οριστεί παραπάνω. Η κατανομή EVI εφαρμόζεται σε κάθε διάρκεια, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των ροπών στα σημεία του γραφήματος. Η αθροιστική συνάρτηση κατανομής (Cumulative Distribution Function/CDF), F(x), δίνεται από τη σχέση:

$$F(x) = \exp\{-\exp[-A - (x - U)]\}, \quad (13.12)$$

όπου A και U είναι οι παράμετροι που υπολογίζονται για κάθε διάρκεια και δίνονται από τις σχέσεις:

$$A = 1{,}283 / \sigma, \quad (13.13)$$

$$U = x + 0.45\,\sigma, \quad (13.14)$$

όπου x και σ είναι η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση των δεδομένων, αντίστοιχα.

Στο Σχήμα 13.7 απεικονίζεται η εφαρμογή των διαφόρων κατανομών στο σταθμό της Μήλου (ML), από τις οποίες έχει επιλεγεί η EVI.

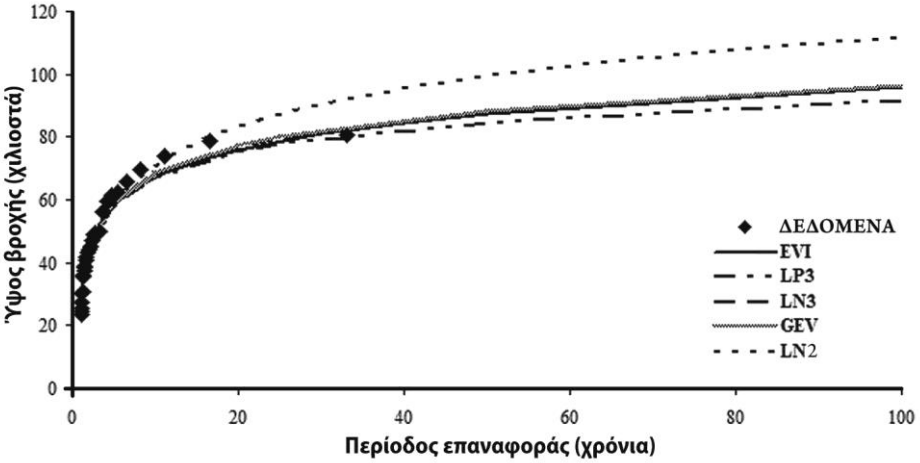
Βήμα 3: Καμπύλες ΥΔΣ. Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (13.12), υπολογίζονται τα ύψη βροχής που αντιστοιχούν σε περιόδους επαναφοράς 2, 5, 10, 20, 50 και 100 ετών, αντίστοιχα, για κάθε επιλεγμένη διάρκεια βροχόπτωσης (Σχήμα 13.6). Η διαδικασία εφαρμόζεται σε καθέναν από τους 24 σταθμούς, για όλες τις διάρκειες. Επισημαίνεται ότι χαμηλής συχνότητας συμβάντα, δηλαδή συμβάντα με περιόδους επαναφοράς 50 και 100 ετών, παρουσιάζουν μεγαλύτερη αβεβαιότητα από τα πιο συχνά συμβάντα. Αυτό οφείλεται, συνήθως, στα μικρά δείγματα και στην επέκταση του χρόνου επαναφοράς. Ωστόσο, στην παρούσα εφαρμογή, το δείγμα είναι 32 χρόνια, που θεωρείται ικανοποιητικό. Τα 95% διαστήματα εμπιστοσύνης για την κατανομή EVI υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$X_{Tmax,\,Tmin} = X_T \pm 1.96\,S_T, \quad (13.15)$$

$$S_T = \left(\frac{\sigma}{\sqrt{N}} \sqrt{1 + 1{,}3K_T + 1{,}10K_T^2} \right), \quad (13.16)$$

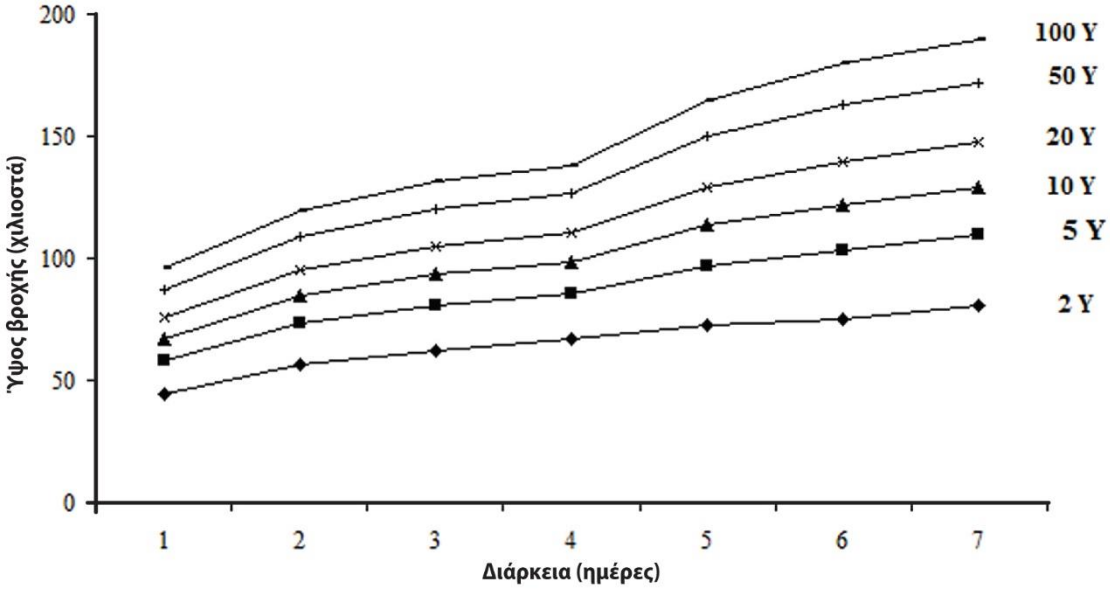
όπου X_{Tmax} και X_{Tmin} είναι, αντίστοιχα, τα άνω και τα κάτω όρια της βροχόπτωσης, X_T, με περίοδο επαναφοράς, T, S_T η τυπική απόκλιση για περίοδο επαναφοράς, T και σ η τυπική απόκλιση του δείγματος. Ο παράγοντας συχνότητας, K_T, δίνεται από τη σχέση:

$$K_T = 0{,}7797 \{0{,}5772 + \ln [\ln (T / (T - 1))]\}. \quad (13.17)$$



Σχήμα 13.6. *Εφαρμογή θεωρητικών κατανομών συχνότητας σε ετήσια μέγιστα βροχής διάρκειας μιας μέρας στη Μήλο.*

Τελικά, οι σχέσεις ΥΔΣ αναπτύσσονται χρησιμοποιώντας εκτιμήσεις των περιόδων επαναφοράς και τα αντίστοιχα διαγράμματα δημιουργούνται για κάθε σταθμό. Στο Σχήμα 13.7 απεικονίζονται οι σχέσεις ΥΔΣ βροχής για τη Μήλο (ML), με κάθε καμπύλη να αναφέρεται σε μία από τις παραπάνω περιόδους επαναφοράς.



Σχήμα 13.7. *Καμπύλες ΥΔΣ για διάφορες περιόδους επαναφοράς (σε χρόνια) για τη Μήλο.*

13.3. Μοντέλα βροχόπτωσης-απορροής

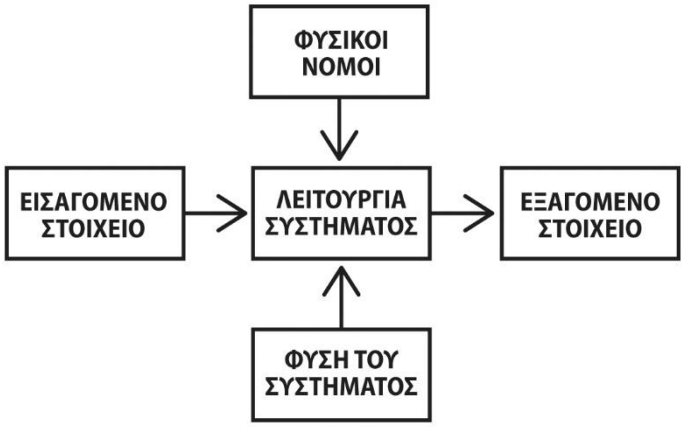
Η ορθολογική διαχείριση των υδατικών πόρων προϋποθέτει την ποσοτική εκτίμηση των διαφόρων φάσεων του υδρολογικού κύκλου, που αποτυπώνεται στις σχέσεις βροχόπτωσης-απορροής. Τα μοντέλα βροχόπτωσης-απορροής είναι ένα σύνολο μαθηματικών εξισώσεων, που αναπαριστάνουν τις διάφορες φάσεις του υδρολογικού κύκλου, κυρίως την εδαφική φάση, δηλαδή τις διαδικασίες του νερού από τη στιγμή που φτάνει στο έδαφος. Είναι μοντέλα προσομοίωσης και πρόγνωσης υδρολογικών μεταβλητών, που αποτελούν τις εισόδους ή εξόδους υδρολογικών συστημάτων, αλλά και μοντέλα της συμπεριφοράς των συστημάτων. Θεωρούνται σημαντικά για τη γεωργία, καθόσον καλύπτουν κυρίως διαδικασίες νερού στην ακόρεστη ζώνη, δηλαδή στη ζών ριζοστρώματος. Στο Σχήμα 13.8 απεικονίζεται ένα υδρολογικό σύστημα. Εισαγόμενα στοιχεία θεωρούνται οι κλιματικές μεταβλητές, όπως η βροχόπτωση, η ηλιακή ακτινοβολία, η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία, η ταχύτητα του ανέμου και άλλα συναφή. Η λειτουργία του συστήματος εξαρτάται από τη φύση του συστήματος και ακολουθεί φυσικούς νόμους. Το ίδιο το σύστημα είναι ένα σύνολο μαθηματικών εξισώσεων που αναπαριστάνουν τις φυσικές διαδικασίες μετατροπής της βροχόπτωσης σε απορροή. Βασικά, απεικονίζουν την εδαφική φάση του υδρολογικού κύκλου, που περιλαμβάνει συγκράτηση από τη φυτοκάλυψη, εξατμισοδιαπνοή, διήθηση, επιφανειακή απορροή, ενδορροή, εδαφική υγρασία, βασική απορροή και άλλα συναφή. Τέλος, εξαγόμενο στοιχείο του συστήματος είναι η απορροή.

13.3.1. Ταξινόμηση μοντέλων βροχόπτωσης-απορροής

Τα μοντέλα βροχόπτωσης-απορροής ταξινομούνται σε διάφορες κατηγορίες, ανάλογα με το είδος των εξισώσεων, για την απεικόνιση των φυσικών διεργασιών, το χρονικό βήμα και τη λειτουργία του μοντέλου σε σχέση με το χρόνο, δηλαδή συνεχή ή όχι, τη χωρική κατανομή των φυσικών διεργασιών μετασχηματισμού της βροχόπτωσης σε απορροή και τον τρόπο χειρισμού της αβεβαιότητας των υδρολογικών μεγεθών.

13.3.1.1. Κύρια ταξινόμηση

Η πιο συνήθης ταξινόμηση των μοντέλων αφορά μοντέλα προσομοίωσης συμβάντος (event simulation models) ή μοντέλα μεμονωμένου υδρολογικού γεγονότος και μοντέλα συνεχούς προσομοίωσης (sequential models). Τα μοντέλα που ανήκουν σε μία από τις δύο προηγούμενες κύριες κατηγορίες ταξινομούνται επιπλέον σε ενιαία ή αδρομερή (lumped) και σε κατανεμημένα (distributed). Ακολουθεί σύντομη περιγραφή τους.



Σχήμα 13.8. *Σχηματική περιγραφή υδρολογικού συστήματος*

- **Μοντέλα προσομοίωσης συμβάντος:** Περιλαμβάνουν σαν είσοδο ένα μεμονωμένο επεισόδιο βροχής και σαν έξοδο το αντίστοιχο υδρογράφημα πλημμύρας. Στην κατηγορία αυτή ανήκει η σειρά των μοντέλων HEC (Hydrologic Engineering Center).
- **Μοντέλα συνεχούς προσομοίωσης:** Περιλαμβάνουν σαν είσοδο μία ή περισσότερες χρονοσειρές παρατηρήσεων μιας ή περισσότερων μετεωρολογικών μεταβλητών και σαν έξοδο το υδρογράφημα της

αντίστοιχης χρονικής περιόδου. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν μοντέλα όπως τα SWRRB, SLURP, SHE, Stanford IV και άλλα.

- **Ενιαία ή αδρομερή μοντέλα:** Βασίζονται στην υπόθεση της ομοιόμορφης κατανομής των μεγεθών εισόδου και εξόδου στην επιφάνεια της λεκάνης απορροής, δηλαδή δεν λαμβάνουν υπόψη τις διαφορές των μεταβλητών στο χώρο και δέχονται μια μέση τιμή.
- **Κατανεμημένα μοντέλα:** Σε αντίθεση με τα ενιαία μοντέλα, αυτά βασίζονται στην υπόθεση της χωρικής κατανομής των μεταβλητών εισόδου και εξόδου στη λεκάνη απορροής. Περιλαμβάνουν το διαχωρισμό της λεκάνης σε ομοιόμορφα τμήματα, με βάση χρήσεις γης ή άλλα τοπογραφικά χαρακτηριστικά, ή σε διακριτοποίηση της λεκάνης σε πλέγμα μοναδιαίας επιφάνειας.

13.3.1.2. Δευτερεύουσα ταξινόμηση

Τα μοντέλα συνεχούς προσομοίωσης μπορούν να ταξινομηθούν περαιτέρω, με βάση το κριτήριο που αφορά το είδος των εξισώσεων, δηλαδή με βάση φυσικά ή φυσικής βάσης (physically based), παραμετρικά ή εννοιολογικά (conceptual) μοντέλα και μοντέλα μαύρου κουτιού (black box), και το κριτήριο που αφορά τον τρόπο αντιμετώπισης της τυχαιότητας των φαινομένων, δηλαδή με βάση προσδιοριστικά ή αιτιοκρατικά (deterministic) και στοχαστικά (stochastic) μοντέλα. Ειδικότερα:

- **Προσδιοριστικά φυσικά μοντέλα:** Έχουν ένα σύνολο περίπλοκων εξισώσεων, που περιλαμβάνουν, συνήθως, μεγάλο αριθμό παραμέτρων και βασίζονται στις εξισώσεις της φυσικής, δηλαδή στις εξισώσεις συνέχειας και κίνησης. Επίσης, απαιτούνται πολλά δεδομένα εισόδου, που συνήθως δεν είναι διαθέσιμα, και οι εφαρμογές τους περιορίζονται σε μικρές πειραματικές λεκάνες απορροής, για τις οποίες υπάρχουν δεδομένα εισόδου, όπως το μοντέλο SHE (Systeme Hydrologique Europeen) και το MIKE-SHE.
- **Προσδιοριστικά παραμετρικά μοντέλα:** Προσομοιώνουν τη σχέση βροχόπτωσης-απορροής, στη βάση ενός συνόλου απλουστευμένων παραδοχών του φυσικού συστήματος. Είναι πολύ διαδεδομένα και συνήθως περιλαμβάνουν σχετικά μεγάλο αριθμό παραμέτρων, που καθορίζονται από τη διαδικασία ρύθμισης (calibration) του μοντέλου. Ενδεικτικά, επισημαίνεται ότι στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα μοντέλα SLURP (Semi-distributed Land Use-based Runoff Processes) και Stanford IV.
- **Προσδιοριστικά μοντέλα «μαύρου κουτιού»:** Βασίζονται σε απλές μαθηματικές εξισώσεις, που προσομοιώνουν ικανοποιητικά το υδρογράφημα της μετρημένης παροχής. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν το μοναδιαίο υδρογράφημα και το συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα.
- **Στοχαστικά μοντέλα:** Επισημαίνεται ότι το θέμα των στοχαστικών διαδικασιών και των αντίστοιχων στοχαστικών μοντέλων είναι ένα τεράστιο πεδίο γενικά στις φυσικές επιστήμες. Γίνεται αναφορά στα μοντέλα χρονοσειρών ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average), που περιγράφονται στο Κεφάλαιο 12 και μπορούν να χρησιμοποιηθούν επίσης για τη δημιουργία συνθετικών σειρών απορροής.

Στον Πίνακα 13.3 παρουσιάζεται ενδεικτικός κατάλογος μοντέλων βροχόπτωσης-απορροής και στον Πίνακα 13.4 ενδεικτικά μοντέλα βροχόπτωσης-απορροής συνεχούς προσομοίωσης.

13.3.2. Σχέσεις βροχόπτωσης-απορροής

Οι σχέσεις βροχόπτωσης-απορροής χρησιμοποιούνται για σχεδίαση, πρόγνωση και αξιολόγηση. Αν δεν διατίθενται στοιχεία παροχών ή εάν αυτά είναι πολύ περιορισμένα για αξιόπιστη ερμηνεία, τότε οι σχέσεις βροχόπτωσης-απορροής είναι πολύ χρήσιμες, λόγω της ικανότητάς τους να εξάγουν πληροφορίες παροχής από στοιχεία βροχής. Αν μπορεί να αναπτυχθεί ισχυρή σχέση μεταξύ βροχόπτωσης και απορροής σε μια λεκάνη απορροής, τότε ο συνδυασμός των σχέσεων βροχόπτωσης-απορροής και στοιχείων βροχόπτωσης μπορεί να δώσει πιο αξιόπιστες εκτιμήσεις της συχνότητας υψηλών παροχών απ' ό,τι μια περιοχική σχέση πλημμύρας. Γενικά, οι σχέσεις βροχόπτωσης-απορροής αναπτύσσονται σε δύο διακριτά βήματα: τον υπολογισμό του όγκου απορροής που προέρχεται από δεδομένο όγκο βροχόπτωσης σε μια δεδομένη χρονική περίοδο και την κατανομή του όγκου απορροής στο χρόνο. Το πρώτο βήμα θεωρείται απαραίτητο, λόγω του επιμερισμού της βροχόπτωσης σε εξατμισοδιαπνοή, διείσδυση και απορροή. Το δεύτερο βήμα είναι απαραίτητο για τη θεώρηση του χρόνου μεταφοράς και της εξασθένησης του κύματος απορροής, ως αποτέλεσμα της βροχόπτωσης.

13.3.2.1. Δείκτης προηγούμενης βροχής (API: Antecedent Precipitation Index)

Ο API έχει αναπτυχθεί βασικά για πρόγνωση σε ποτάμια και εφαρμόζεται σε μεγάλο εύρος λεκανών απορροής και συνθηκών. Υπολογίζεται για λεκάνη απορροής από παρατηρήσεις βροχόπτωσης και στοιχεία απορροής για κάποιο χρονικό διάστημα από τη σχέση:

$I_t = I_o k^t + \sum P_i k^{t(i)}$, (13.18)

όπου I_o είναι η αρχική τιμή του δείκτη, k ο παράγοντας αποχώρησης (recession), t το χρονικό διάστημα υπολογισμών, P_i ο αριθμός των ημερήσιων βροχοπτώσεων που έχουν συμβεί στο χρονικό διάστημα t και t(i) ο αριθμός ημερών βροχής από κάθε μέρα έναρξης βροχής.
Γενικά, χρησιμοποιούνται απλές μορφές του API. Μερικές μεταβλητές μπορεί να έχουν αμελητέα επίπτωση σε κάποιες λεκάνες απορροής και να εξαιρούνται από τους υπολογισμούς. Επίσης, η βλάστηση, ο τύποστου εδάφους και άλλα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής έχουν είπτωση στη λεκάνη, καθώς και η εποχή του έτους και ενσωματώνονται στον παράγοντα αποχώρησης. Η εποχή του έτους εκφράζεται από μια οικογένεια καμπύλων, οι οποίες αντανακλούν τις εποχικές τάσεις ηλιακής ενέργειας, βλάστησης και άλλων παραγόντων που επηρεάζουν την εξάτμιση και τη διαπνοή της υγρασίας στη λεκάνη απορροής. Τελικά, ο API αποτελεί έκφραση της υγρασίας στη λεκάνη και της συγκράτησης υγρασίας στο έδαφος. Στο Σχήμα 13.9 παρουσιάζεται η συμπεριφορά του API για ημερήσιο παράγοντα αποχώρησης k = 0,9 και μπορεί να υπολογιστεί από τα ημερήσια ύψη βροχής του σταθμού. Στη συνέχεια, από τη βροχόπτωση και τον υπολογισμένο API, και με τη βοήθεια νομογραμμάτων, μπορεί να υπολογιστεί ο όγκος απορροής της λεκάνης.

Όνομα	**Χώρα**	**Τύπος**	**Αριθ. Παραμέτρων**	**Βιβλιογραφία**
UBC	Καναδάς	Αδρομερές	35	Quick & Pipes
CEQUEAU	Καναδάς	Κατανεμημένο	33	Charbonneau, Morin και άλλοι (1977)
ERM	Τσεχοσλαβακία	Αδρομερές	9	Turcan (1981)
GAPI	Ουγγαρία	Αδρομερές	10	Pinter & Szabo
SMAR	Ιρλανδία	Αδρομερές	5	Maneville και άλλοι (1970)
CLS	Ιταλία	Αδρομερές	ποικίλος	Natale & Todini (1976)
HBV	Σουηδία	Αδρομερές	23	Bergstrom & Forsm (1973)
SRM	Ελβετία, ΗΠΑ	Αδρομερές	7	Martinec (1975)
HFS	ΗΠΑ		16	
SSARR	ΗΠΑ	Αδρομερές	12	U.S. Army Crops of Engineers (1975), Rocwood & Nelson (1966)
NAMSII	Δανία	Ημικατανεμημένο	13	Nielsen & Hansen (1973)
NAMKAL	Δανία	Αδρομερές	13	Nielsen & Hansen (1973)
SHE	Δανία, Γαλλία, Αγγλία	Κατανεμημένο	-	Abbott και άλλοι (1986)
ILWAS	ΗΠΑ	Ημικατανεμημένο	-	Chen et al (1982)

Πίνακα 13.3. *Ενδεικτικός κατάλογος μοντέλων βροχόπτωσης-απορροής.*

Όνομα	**Αναφορά**	**Κατάταξη**
Οικογένεια ARIMA	Box και Jenkins (1970)	Αδρομερή, Μαύρου κουτιού, Στοχαστικά
SHE	Abbott κ.α. (1986)	Κατανεμημένο, Φυσικής βάσης, Αιτιοκρατικό
SWAT	Neitsch κ.α. (2002)	Κατανεμημένο, Φυσικής βάσης Αιτιοκρατικό
NAM	Nielsen και Hansen (1973)	Ημικατανεμημένο, Εννοιολογικό, Αιτιοκρατικό
SACRAMENTO	Burnash κ.α. (1973)	Αδρομερές ή Ημικατανεμημένο, Εννοιολογικό, Αιτιοκρατικό

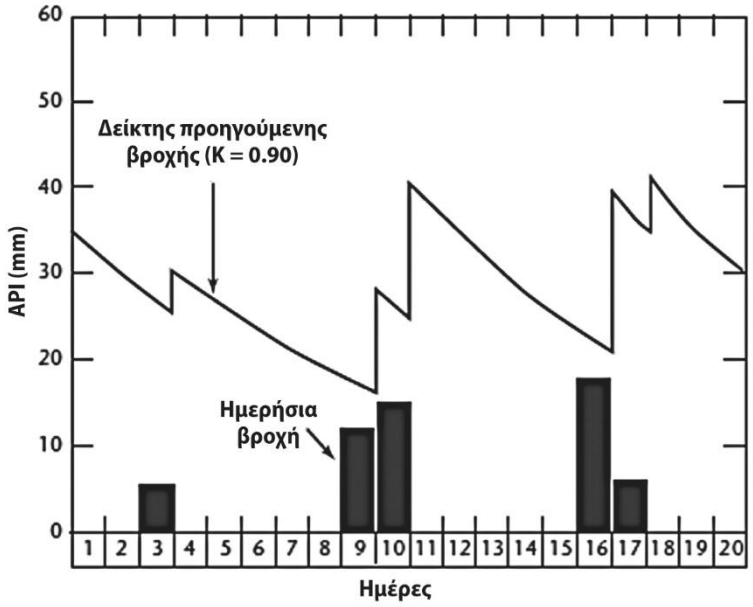
Πίνακα 13.4. *Ενδεικτικά μοντέλα βροχόπτωσης-απορροής συνεχούς προσομοίωσης.*

13.3.2.2. Αρχική ροή βάσης ως δείκτης όγκου απορροής

Σε υγρές περιοχές χρησιμοποιείται συνήθως η βασική ροή, ως υπόγεια παροχή, και στην έναρξη μιας καταιγίδας, ως δείκτης των αρχικών συνθηκών της λεκάνης. Επειδή η παροχή βασικής ροής αντανακλά συνθήκες για ολόκληρη την περιοχή, συνήθως οι σχέσεις αυτές διαφοροποιούνται εποχικά και αναπτύσσονται καμπύλες του δείκτη για τις κύριες εποχές καταιγίδων. Η χρήση της αρχικής υπόγειας παροχής ως δείκτης των συνθηκών απορροής περιορίζονται, συνήθως, σε μικρές λεκάνες, με σύντομο χρόνο συγκέντρωσης.

13.3.2.3. Τεχνικές ελλείμματος εδαφικής υγρασίας

Το έλλειμμα εδαφικής υγρασίας είναι ίσως ο πιο σημαντικός παράγοντας στη σχέση βροχόπτωσης και απορροής. Η εκτίμηση αρχικών ελλειμμάτων εδαφικής υγρασίας έχει πρακτική σημασία και παρέχει μια πολύ χρήσιμη μεταβλητή στη διαδικασία συσχέτισης της βροχόπτωσης καταιγίδας με την απορροή. Υπάρχει ανάγκη χρήσης περιοχικής μεθόδου, που οδηγεί στην υγρασία του εδάφους για ολόκληρη την περιοχή. Σε μια τέτοια προσέγγιση, η βροχόπτωση είναι το εισαγόμενο στοιχείο, ενώ το εξαγόμενο στοιχείο αποτελείται από την απορροή των καναλιών ποταμών, καθώς και από την εξατμισοδιαπνοή στην ατμόσφαιρα από το έδαφος και τα φυτά. Υπάρχει, βέβαια, δυσκολία στην εκτίμηση της περιοχικής βροχόπτωσης. Επίσης, η απορροή υπολογίζεται από μετρήσεις παροχής. Η διαφορά (βροχόπτωση μείον απορροή) είναι το νερό που παραμένει στην περιοχή και αναφέρεται ως ανατροφοδότηση.



Σχήμα 13.9. *Υπολογισμός του API.*

13.3.3. Περιγραφή μοντέλων βροχόπτωσης - απορροής

Περιγράφονται μερικά μοντέλα βροχόπτωσης-απορροής με εκτεταμένη χρήση, που θεωρούνται αντιπροσωπευτικά. Ειδικότερα, παρουσιάζονται το κλασικό μοντέλο Stanford IV, το μοντέλο MIKE-SHE, ένα εννοιολογικό μοντέλο υδατικού ισοζυγίου, το μοντέλο SWAT, τρία μοντέλα μιας ενότητας, το μοντέλο SPAW και ένα μοντέλο συστημικής προσέγγισης αγροτικών λεκανών απορροής. Ειδικότερα:

- **Μοντέλο Stanford Watershed IV (SWM):** Πρόκειται για ένα προσδιοριστικό, αδρομερές παραμετρικό μοντέλο (Crawford & Linsley, 1966), του οποίου το διάγραμμα ροής απεικονίζεται στο Σχήμα 13.10. Τα εισαγόμενα στοιχεία είναι η ωριαία βροχόπτωση, η ημερήσια δυναμική εξατμισοδιαπνοή, η ημερήσια θερμοκρασία και η ακτινοβολία για τη διαδικασία τήξης χιονιού. Για την προσομοίωση της σχέσης βροχόπτωσης-απορροής, η λεκάνη απορροής διαιρείται σε ομογενείς υπολεκάνες σε σχέση με τον τύπο εδάφους, τη βλάστηση, το ανάγλυφο και άλλα χαρακτηριστικά. Για κάθε υπολεκάνη, προσδιορίζεται ένα σύνολο παραμέτρων. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 13.10, η

συγκράτηση από τη φυτοκάλυψη προσομοιώνεται και κυμαίνεται από 0 έως 5 mm. Η αδιαπέραστη περιοχή της λεκάνης προσομοιώνεται με εκτροπή ενός σταθερού ποσοστού της βροχόπτωσης προς το υδατόρευμα. Η επιφανειακή απορροή είτε αποθηκεύεται στην άνω εδαφική ζώνη είτε μετατρέπεται σε ροή στην επιφάνεια του εδάφους, μέσω μιας εξίσωσης συνέχειας. Τέλος, για τη διόδευση της απορροής και τον υπολογισμό του υδρογραφήματος εξόδου, χρησιμοποιούνται είτε η κινηματική μέθοδος είτε η μέθοδος Muskingum.

- **Μοντέλο MIKE-SHE (Systeme Hydrologique Europeen):** Πρόκειται για ένα κατανεμημένο φυσικό υδρολογικό μοντέλο (Abbott et al., 1986), που προσομοιώνει όλες τις κύριες φάσεις του υδρολογικού κύκλου (Σχήμα 13.11). Προσομοιώνεται η συγκράτηση από τη φυτοκάλυψη και υπολογίζεται η καθαρή βροχή που φτάνει στο έδαφος. Η προσομοίωση της δυναμικής εξατμισοδιαπνοής γίνεται με τη μέθοδο Penman-Monteith (Monteith, 1965). Η επιφανειακή απορροή υπολογίζεται με τις εξισώσεις Saint Venant. Για την ακόρεστη ροή, υπολογίζονται η εδαφική υγρασία και η κατανομή πίεσης στην ακόρεστη ζώνη. Οι περισσότερες παράμετροι του μοντέλου προέρχονται από φυσικές μετρήσεις και παρατηρήσεις, που μειώνουν σημαντικά τον αριθμό των παραμέτρων για ρύθμιση και βελτιστοποίηση.

- **Εννοιολογικό μοντέλο υδατικού ισοζυγίου:** Πρόκειται για ένα εννοιολογικό μοντέλο απλού υδατικού ισοζυγίου (Thorthwaite, 1948), το οποίο έχει αποτελέσει τη βάση για πολλά μοντέλα που αναπτύχθηκαν στη συνέχεια. Διαθέτει μία και μοναδική παράμετρο, τη μέγιστη αποθηκευτικότητα του εδάφους, S_{max}. Το υδατικό ισοζύγιο της λεκάνης για το χρονικό διάστημα, Δt, μεταξύ t και t + Δt, γράφεται:

$$S_{t+\Delta t} - S_t = P_t - E_t - Q_t, \quad (13.19)$$

όπου S_t και $S_{t+\Delta t}$ είναι το απόθεμα εδαφικής υγρασίας στους χρόνους t και t+Δt, αντίστοιχα, P_t η χωρικά μέση βροχόπτωση στο διάστημα αυτό, E_t η χωρικά μέση πραγματική εξατμισοδιαπνοή και Q_t η απορροή στην έξοδο. Αν στο διάστημα Δt η βροχόπτωση υπερβαίνει τη δυναμική εξατμισοδιαπνοή, E_{pt}, τότε $E_t = E_{pt}$. Αν $P_t > E_{pt}$, τότε $S_{t+\Delta t} = \min (S_t + P_t - E_{pt}, S_{max})$ και $Q_t = \max (S_t + P_t - E_{pt} - S_{max}, 0)$. Αν $P_t < E_{pt}$, τότε θεωρείται ότι όλη η βροχόπτωση εξατμίζεται και η κατάληξη είναι:

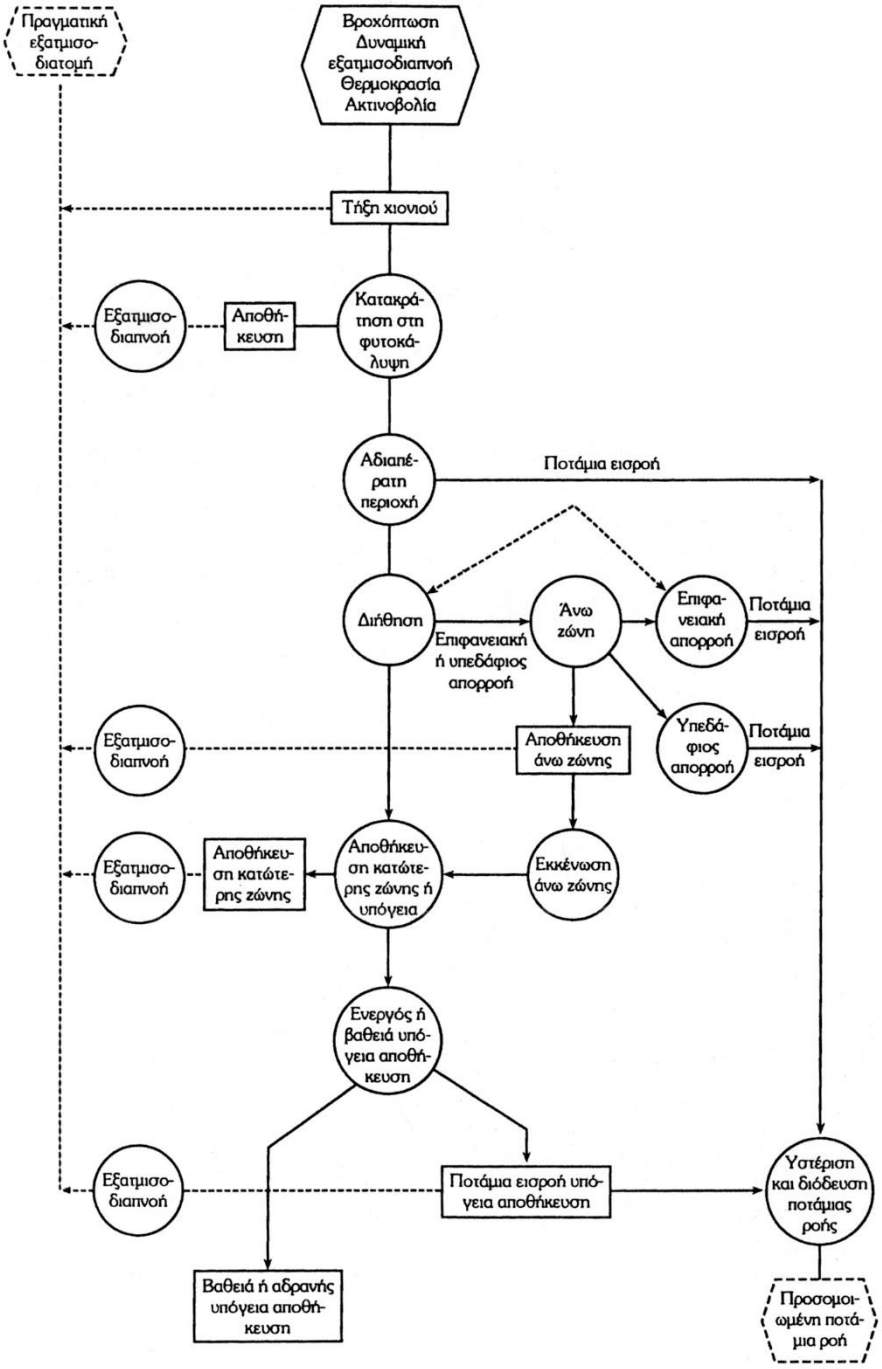
$$S_{t+\Delta t} = S_t \exp [(P_t - E_{pt})/S_{max}]. \quad (13.20)$$

Μοντέλο SWAT (Soil and Water Assessment Tool): Πρόκειται για ένα σύνολο επιμέρους φυσικών ή εννοιολογικών μοντέλων (Neitsch et al., 2002), που αναπτύχθηκε αρχικά από το υπουργείο Γεωργίας των ΗΠΑ (USDA). Προσομοιώνει μια σειρά φυσικοχημικών διεργασιών στη λεκάνη, που είναι οι εξής, μαζί με τις αντίστοιχες μεταβλητές:

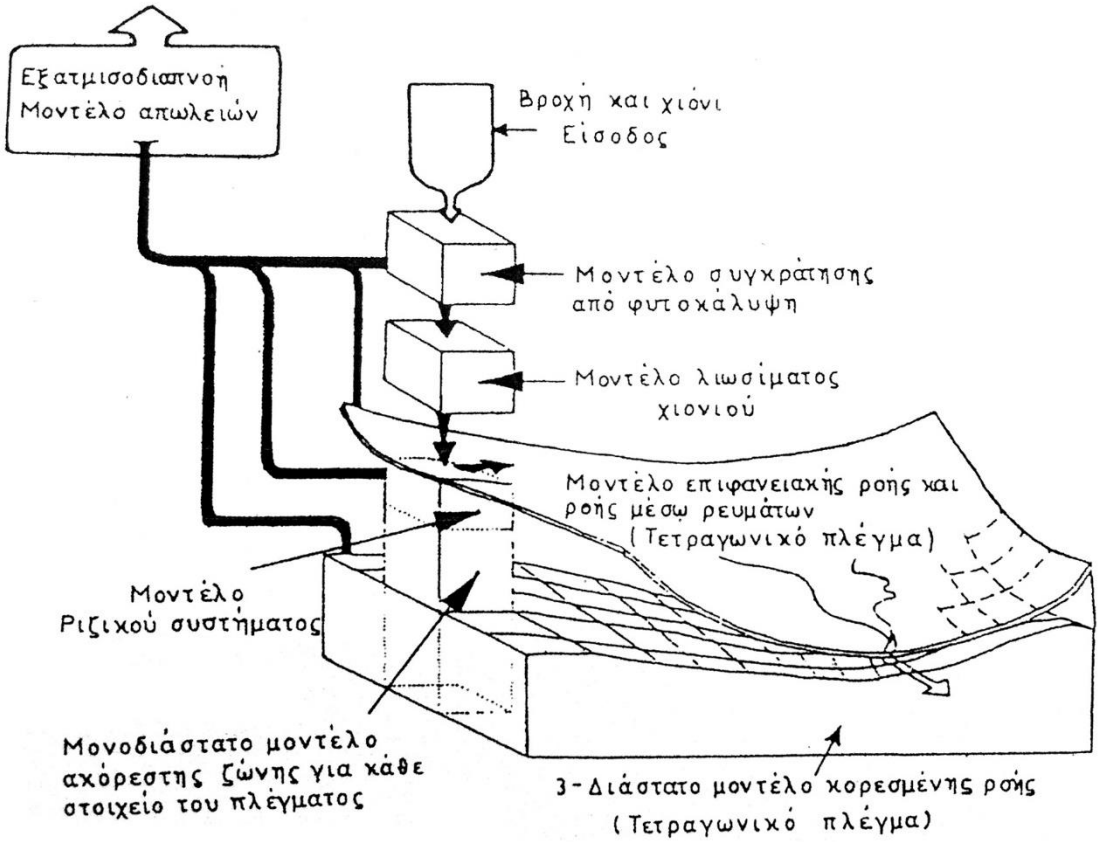
- Προσομοίωση κλίματος: θερμοκρασία αέρα, εδάφους και νερού, ηλιακή ακτινοβολία, ταχύτητα ανέμου, βροχόπτωση, τήξη χιονιού, υδρατμοί, σχετική υγρασία, καιρικές συνθήκες και κλιματική αλλαγή.
- Προσομοίωση υδρολογικών διεργασιών: υπολογισμός παροχής, με τη μέθοδο SCS, εξατμισοδιαπνοή, με τη μέθοδο Penman-Monteith, πραγματική εξατμισοδιαπνοή, κίνηση νερού στην ακόρεστη και κορεσμένη ζώνη.
- Προσομοίωση φερτών υλών, για διάβρωση και στερεοπαροχή.
- Προσομοίωση ανάπτυξης καλλιεργειών και καλλιεργητικών μεθόδων και πρακτικών.
- Προσομοίωση κίνησης νερού και ρύπων σε υδάτινα σώματα.

Σαν χωρική κλίμακα χρησιμοποιείται η λεκάνη απορροής, ενώ χρονική κλίμακα είναι η ημέρα, με δυνατότητα για μηνιαία ή ετήσια εξαγόμενα. Τα απαιτούμενα δεδομένα του μοντέλου για τις υδρολογικές διεργασίες περιλαμβάνουν γεωγραφικά δεδομένα, ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου, χρήσεις γης, υδρογραφικό δίκτυο, χρονοσειρές μεταβλητών και διάφορα κλιματικά χαρακτηριστικά. Πληροφορίες για το SWAT στην ιστοσελίδα http://bresun0.tamu.edu/swat/swat.

- **Μοντέλο υδατικού ισοζυγίου 5 παραμέτρων:** Πρόκειται για σχετικά πρόσφατο μοντέλο (Abulohom et al., 2001· Hondronikou et al., 2007), με πέντε παραμέτρους. Η απορροή χωρίζεται σε δύο συνιστώσες, την άμεση απορροή και τη βασική απορροή, χρησιμοποιώντας βροχόπτωση και δυναμική εξατμισοδιαπνοή. Οι παράμετροι του μοντέλου εξετάζονται σε κάθε συνιστώσα και απεικονίζουν έμμεσα τα χαρακτηριστικά της λεκάνης, δηλαδή τύπο εδάφους, βλάστηση και γεωλογία. Στο μοντέλο αυτό, οι τρεις παράμετροι προσδιορίζονται μέσω βαθμονόμησης, ενώ οι άλλες δύο παίρνουν διακριτές τιμές για κάθε λεκάνη, μία για κάθε παράμετρο.



Σχήμα 13.10. *Διάγραμμα ροής μοντέλου Stanford IV*.



Σχήμα 13.11. *Σχηματική απεικόνιση του μοντέλου MIKE-SHE*.

- **Μοντέλο GR2M:** Συνίσταται από δύο ταμιευτήρες για αποθήκευση νερού (Makhouf & Michel, 1994). Τα εισαγόμενα στοιχεία για κάθε μήνα είναι η βροχόπτωση και η δυναμική εξατμισοδιαπνοή. Το εξαγόμενο του μοντέλου είναι η συνολική μηνιαία απορροή. Το μοντέλο GR2M έχει πέντε παραμέτρους, από τις οποίες οι δύο παίρνουν διακριτές τιμές. Έχει εφαρμοστεί σε πολλές λεκάνες στη Γαλλία και έχει βρεθεί ότι η ελάχιστη χωρητικότητα είναι A = 200 mm και η άλλη παράμετρος, που αφορά την υπόγεια απορροή, είναι το 20% της συνολικής εισροής. Οι τιμές αυτές μπορεί να διαφοροποιούνται ανάλογα με τα τοπογραφικά, γεωλογικά και κλιματικά χαρακτηριστικά της λεκάνης.

- **Μοντέλο υδατικού ισοζυγίου 2 παραμέτρων:** Πρόκειται για ένα απλό μοντέλο, με δύο μόνο παραμέτρους (Xiong & Guo, 1999). Έχει εφαρμοστεί σε μεγάλο αριθμό λεκανών απορροής στη Νότια Κίνα. Χρησιμοποιεί την πραγματική εξατμισοδιαπνοή. Τα αποτελέσματα έχουν δείξει ότι το μοντέλο προσομοιώνει ικανοποιητικά υγρές και ημίυγρες λεκάνες απορροής.

- **Μοντέλο SPAW:** Πρόκειται για προσδιοριστικό μοντέλο υδατικού ισοζυγίου, που προσομοιώνει πολύ ικανοποιητικά το σύστημα έδαφος-νερό-βλάστηση (Saxton et al., 2006). Στο Σχήμα 13.12 απεικονίζεται το διάγραμμα ροής των διεργασιών λειτουργίας του μοντέλου SPAW. Το μοντέλο SPAW βασίζεται στην αρχή διατήρησης της μάζας, που παίρνει τη μορφή:

$$[d(SM)/dt] = P - R - T + E + L + C - Q, \quad (13.21)$$

όπου SM είναι η διαθέσιμη υγρασία του εδάφους, P η βροχόπτωση, R η απορροή, T η διαπνοή, E η δυναμική εξάτμιση, L και C οι συνιστώσες της ενέργειας στο σύστημα και Q η υπόγεια απορροή. Η διαθέσιμη υγρασία

στο έδαφος είναι σημαντική, διότι διαχωρίζει τη βροχόπτωση στις συνιστώσες της απορροής και διείσδυσης. Επίσης, η ζώνη του ριζοστρώματος των φυτών είναι το στρώμα εδάφους, που αλληλοεπιδρά με την ατμόσφαιρα μέσω της εξατμισοδιαπνοής. Η διαθέσιμη υγρασία εδάφους στο στρώμα αυτό υφίσταται διακυμάνσεις σε σχέση με τη βροχόπτωση, που είναι εισαγόμενο στοιχείο, όσο και με την εξατμισοδιαπνοή, που είναι εξαγόμενο στοιχείο του μοντέλου SPAW. Το μοντέλο έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία κυρίως στις ΗΠΑ και εξακολουθεί να θεωρείται ικανοποιητικό για γεωργικές λεκάνες απορροής. Επίσης, έχει εξεταστεί η δυνατότητα χρησιμοποίησης μεθόδων και δεδομένων τηλεπισκόπησης στη λειτουργία του.

- **Μοντέλο συστημικής προσέγγισης:** Ως γνωστόν, η αποτελεσματική λειτουργία υδρολογικών συστημάτων λεκανών απορροής απαιτεί πρόγνωση ροής μικρής διάρκειας σε πραγματικές ή σχεδόν πραγματικές χρονικές συνθήκες. Η συστημική προσέγγιση (Dooge, 1973) ή τα φίλτρα Kalman (Chiu, 1978) και, γενικότερα, η θεωρία εκτιμητικής και ελέγχου (Gelb, 1974), που χρησιμοποιούνται ήδη με σχετική επιτυχία σε υδρολογικές εφαρμογές, παρέχουν μια θετική υπόσχεση στην κατεύθυνση αυτή. Αναπτύσσεται ένα υδρολογικό μοντέλο, που μπορεί, με την προσθήκη ενός φίλτρου Kalman, να χρησιμοποιηθεί σε υδρολογικές προγνώσεις. Το προτεινόμενο σύστημα είναι μη γραμμικό και ανήκει στην κατηγορία των αδρομερών, προσδιοριστικών, υδρολογικών μοντέλων λεκανών απορροής (Dalezios, 1988). Η έμφαση δίνεται στην επιφανειακή απορροή και διείσδυση, για την πρόγνωση της ροής μικρής διάρκειας σε σχεδόν πραγματικές συνθήκες, ενώ η εξατμισοδιαπνοή και η διήθηση δεν παίζουν σημαντικό ρόλο. Το σύστημα αυτό θεωρείται κατάλληλο για γεωργικές ή δασώσεις λεκάνες.

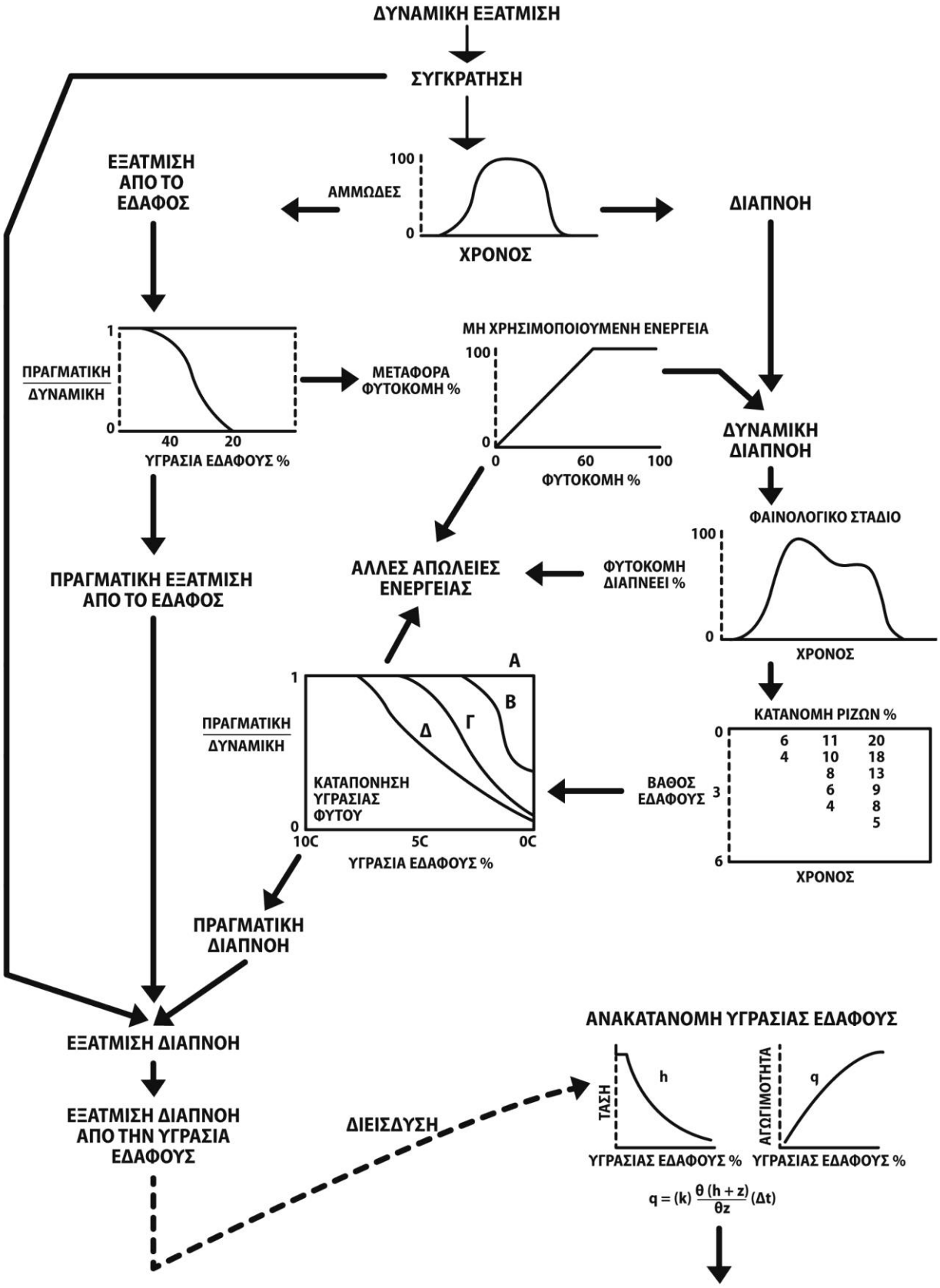
Η λεκάνη απορροής θεωρείται ότι αποτελείται από επιφανειακά και υπόγεια στρώματα ή ζώνες, που παίζουν το ρόλο ταμιευτήρων, για την αποθήκευση της υγρασίας. Επειδή η έμφαση είναι στη μετατροπή της βροχόπτωσης καταιγίδων σε επιφανειακή απορροή, δεν λαμβάνονται υπόψη στρώματα στη ζώνη κορεσμού. Στο Σχήμα 13.13 απεικονίζονται η δομή και το διάγραμμα ροής του υδρολογικού συστήματος. Στη συστημική προσέγγιση, η μοντελοποίηση περιλαμβάνει τις καταστατικές εξισώσεις του συστήματος, που είναι οι εξισώσεις συνέχειας για κάθε θεωρούμενο στρώμα ή ζώνη, καθώς και το μοντέλο μέτρησης, που αναφέρεται στη σχέση εισαγόμενου, δηλαδή βροχόπτωσης και εξαγόμενου, δηλαδή απορροής. Καταστάσεις του συστήματος θεωρούνται τα ποσά της αποθήκευσης υγρασίας στα αντίστοιχα στρώματα. Η ροή της υγρασίας εδάφους από τον ένα ταμιευτήρα στον άλλον εξαρτάται από την οριακή τιμή της συνάρτησης μοναδιαίου βήματος (Σχήμα 13.14), την υδραυλική αγωγιμότητα και το βαθμό ανεπάρκειας αποθηκευμένου νερού.
Πρώτο στρώμα θεωρείται η συγκράτηση της βροχόπτωσης από το φύλλωμα των δένδρων και τη βλάστηση. Η καταστατική εξίσωση είναι:

$$(dx_1/dt) = D_c R (1 - a_1 \; n (x_1 - k_1) \; n (D_c R)), \quad (13.22)$$

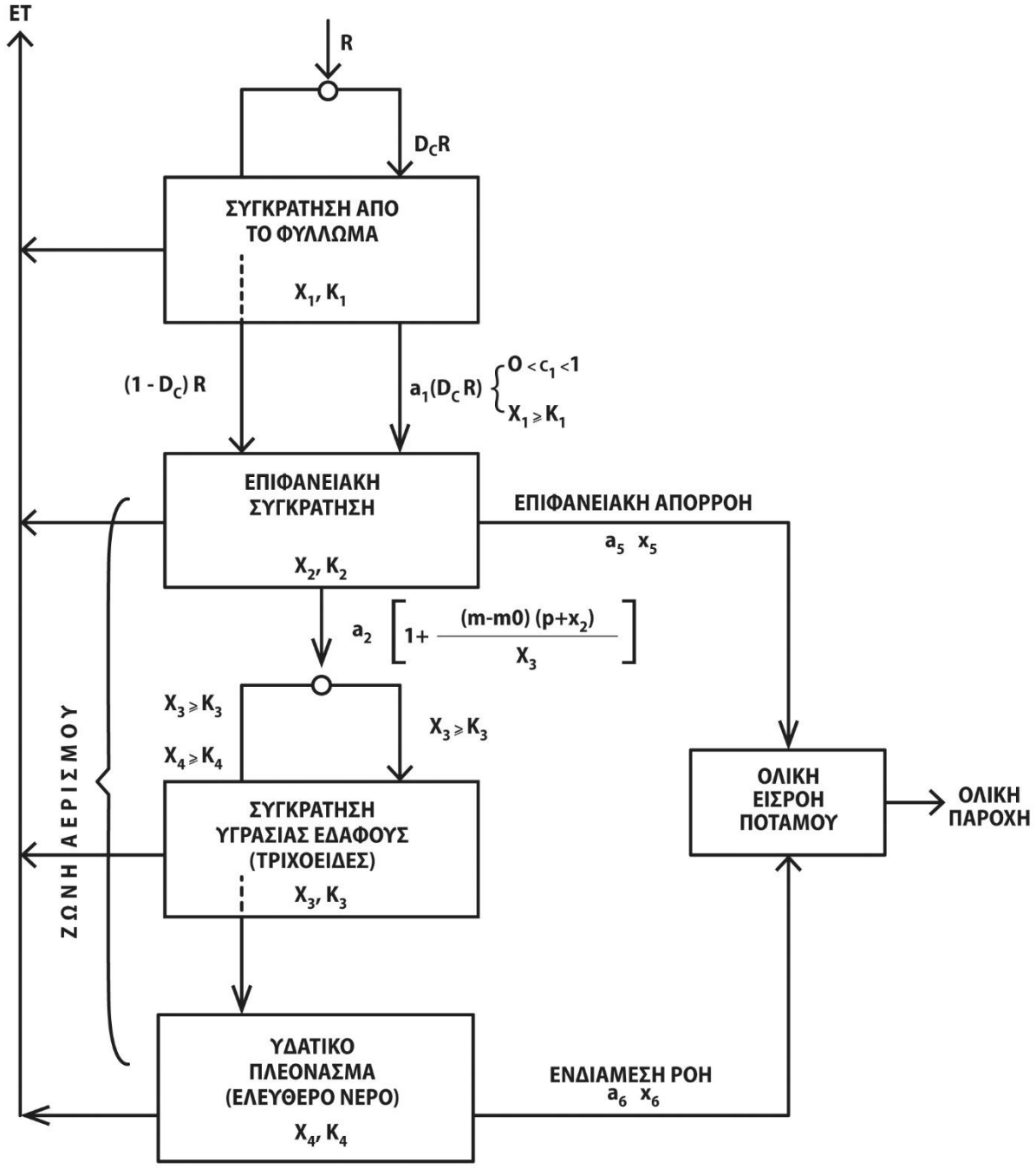
όπου x_1 είναι το ποσό του αποθηκευμένου νερού, $D_c = (A_v/A_1) \leq 1$ η πυκνότητα φυλλώματος, A_v η οριζόντια προβολή της επιφανειακής έκτασης της βλάστησης, A_1 η επιφάνεια του εδάφους που περιέχει την A_v, R η προσπίπτουσα βροχόπτωση, a_1 ο συντελεστής που παριστάνει τη ροή νερού από το φύλλωμα στην επιφάνεια του εδάφους ($0 < a_1 < 1$), k_1 η παράμετρος, τιμή βήματος για x_1, δηλαδή η μέγιστη χωρητικότητα του στρώματος ή η μέγιστη τιμή του x_1, n(.) η συνάρτηση μοναδιαίου βήματος (Σχήμα 13.14) και D_c R το ποσοστό βροχόπτωσης που συγκρατείται από το φύλλωμα.
Το δεύτερο στρώμα είναι η επιφανειακή συγκράτηση. Η καταστατική εξίσωση είναι:

$$(dx_2/dt) = [(1 - D_c)R + a_1(D_cR)n(x_1 - k_1)n(D_cR) - a_2(1 + ((m - m_o)(p + x_2)/x_3))n(x_2)(1 - n(x_4 - k_4))](1 - n(x_2 - k_2)), \quad (13.23)$$

όπου x_2 είναι το ποσό του νερού που συγκρατείται στην επιφάνεια, $(1 - D_c)R$ το ποσό της βροχόπτωσης κατευθείαν στο έδαφος, $a_1(D_cR)$ το ποσοστό της βροχόπτωσης που πέφτει από το φύλλωμα στο έδαφος, $a_2(1+((m - m_o)(p+x_2)/x_3))$ η ικανότητα διείσδυσης από την εξίσωση του Phillips, a_2 ο συντελεστής των εδαφικών χαρακτηριστικών της ζώνης αερισμού ($0 < a_2 < 1$), m_o η αρχική περιεχόμενη υγρασία στο έδαφος (%), m η μέση περιεχόμενη υγρασία στην υγρή μετωπική ζώνη, p η δυναμική του τριχοειδούς στην υγρή μετωπική ζώνη σε εκατοστά και k_2 η παράμετρος, τιμή βήματος για x_2, δηλαδή η μέγιστη χωρητικότητα του στρώματος ή η μέγιστη τιμή του χ_2.



Σχήμα 13.12. *Σχηματική απεικόνιση του προσδιοριστικού μοντέλου SPAW.*



Σχήμα 13.13. *Δομή και διάγραμμα ροής του υδρολογικού συστήματος.*

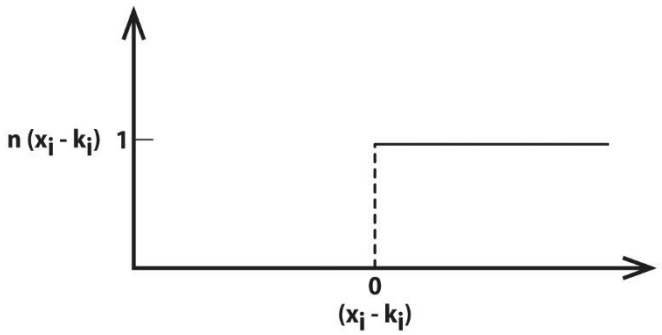
Το τρίτο στρώμα είναι η συγκράτηση της υγρασίας εδάφους από το τριχοειδές. Η καταστατική εξίσωση είναι:

$$(dx_3/dt) = a_2 (1 + ((m - m_o)(p + x_2)/x_3))n(x_2).(1 - n(x_3 - k_3)), \quad (13.24)$$

όπου x_3 είναι το ποσό υγρασίας που συγκρατείται από το τριχοειδές και k_3 η παράμετρος, τιμή βήματος για το x_3, δηλαδή η μέγιστη χωρητικότητα του στρώματος ή η μέγιστη τιμή του x_3.
Το τέταρτο και τελευταίο στρώμα είναι το στρώμα του υδατικού πλεονάσματος. Η καταστατική εξίσωση είναι:

$(dx_4/dt) = a_2\,(1+((m - m_o)(p+x_2)/x_3))n(x_2))\,(n(x_3 - k_3))\,.(1 - n(x_4 - k_4))$ (13.25)

όπου x_4 είναι το ποσό του ελεύθερου νερού και k_4 η παράμετρος, τιμή βήματος για το x_4, δηλαδή η μέγιστη χωρητικότητα του στρώματος ή η μέγιστη τιμή του x_4.



Σχήμα 13.14. *Σχηματική απεικόνιση της συνάρτησης μοναδιαίου βήματος.*

Πρέπει να επισημανθεί ότι η τιμή της παραμέτρου k_4 λαμβάνεται αρκετά μεγάλη, καθόσον στο μοντέλο αυτό δεν χρησιμοποιούνται στρώματα στη ζώνη κορεσμού.
Η επιφανειακή και η ενδιάμεση ροή θεωρείται ότι ακολουθούν συγκεκριμένο τρόπο εκκένωσης, Κατά συνέπεια, μπορούν να αποδοθούν από τις εξής δυναμικές εξισώσεις, αντίστοιχα, έχοντας υπόψη το διαθέσιμο νερό για κάθε τύπο ροής:

$(dx_5/dt) = [(1 - D_c)R + a_1(D_cR)n(x_1 - k_1)n(D_cR) - a_2(1 + ((m - m_o)(p + x_2)/x_3))n(x_2)(1 - n(x_4 - k_4))](n(x_2 - k_2)) - a_5\,k_5$ (13.26)

$(dx_6/dt) = a_2(1 + ((m - m_o)(p + x_2)/x_3))n(x_2)(1 - n(x_4 - k_4)) - a_6\,k_6$, (13.27)

όπου x_5 είναι το ποσό νερού διαθέσιμο για επιφανειακή απορροή, a_5 ο συντελεστής επιφανειακής απορροής, x_6 το ποσό υγρασίας διαθέσιμο για ενδιάμεση ροή και a_5 ο συντελεστής ενδιάμεσης ροής.
Η ολική εισροή στο ποτάμι, z, δηλαδή η έξοδος του συστήματος, δίνεται από το άθροισμα των παραπάνω όρων:

$z = a_5\,k_5 + a_6\,k_6$. (13.28)

Οι εξισώσεις (13.22)-(13.27) αποτελούν τις καταστατικές εξισώσεις του συστήματος. Η εξίσωση (13.28) είναι η εξίσωση μέτρησης του συστήματος. Κρίνεται σκόπιμο να επισημανθεί ότι, τόσο στις καταστατικές εξισώσεις του συστήματος, όσο και στην εξίσωση μέτρησης, μπορεί να προστεθεί ένας όρος σφάλματος. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να υπάρχουν σφάλματα τόσο στο σύστημα, όσο και στις παρατηρήσεις. Οπότε, το σύστημα θεωρείται στοχαστικό και το θέμα της επίλυσης του γίνεται θέμα βελτιστοποίησης, δηλαδή ελαχιστοποίησης του πίνακα σφάλματος συνδιακύμανσης (error covariance matrix).

13.4 Νερό για τη γεωργική παραγωγή

Η βροχόπτωση συνεισφέρει περίπου 65% στην παγκόσμια παραγωγή τροφίμων, ενώ η άρδευση συνεισφέρει στο υπόλοιπο 35% της παγκόσμιας παραγωγής τροφίμων. Στις περισσότερες χώρες, το 60-80% του συνολικού όγκου υδατικών πόρων χρησιμοποιείται για τη γεωργία και μπορεί να ξεπεράσει το 80% για χώρες σε ξηρές και ημίξηρες περιοχές (Smith, 2000). Η άρδευση αποτελεί προφανή επιλογή για αύξηση και σταθεροποίηση της γεωργικής παραγωγής. Οι αρδευόμενες περιοχές στον κόσμο αυξήθηκαν τα τελευταία τριάντα χρόνια του 20ού αιώνα κατά 25% (FAO, 1993). Με τους υδατικούς πόρους να καθίστανται ελλειμματικοί, αυξάνεται η χρήση νερών υποδεέστερης ποιότητας. Υπερβολική χρήση και ανεπαρκής διαχείριση τέτοιου αρδευτικού νερού

έχουν, σε αρκετές περιπτώσεις, επιβλαβείς επιπτώσεις στην ποιότητα του εδάφους, προκαλώντας απώλεια παραγωγής ή κατασκευή δαπανηρών αποστραγγιστικών έργων. Εκτιμάται ότι ο προσδιορισμός στρατηγικών για τη σχεδίαση και τη διαχείριση διαθέσιμων υδατικών πόρων στον γεωργικό τομέα αναμένεται να αποτελέσει εθνική και παγκόσμια προτεραιότητα.

13.4.1. Αποτελεσματική χρήση βροχόπτωσης στη γεωργία

Επισημαίνεται ότι δεν χρησιμοποιείται αποτελεσματικά στην ανάπτυξη καλλιεργειών όλη η βροχόπτωση που πέφτει σε ένα χωράφι, εξαιτίας διαφόρων απωλειών. Μόνο ένα ποσοστό μιας ισχυρής και έντονης βροχόπτωσης μπορεί να εισέλθει και να αποθηκευτεί στο ριζόστρωμα. Συνεπώς, θεωρείται χαμηλή η αποτελεσματικότητα αυτού του τύπου βροχόπτωσης. Για παράδειγμα, σε ξηρό έδαφος και με επιφάνεια χωρίς βλαστική κάλυψη, βροχόπτωση μέχρι 8 mm/μέρα χάνεται, λόγω εξάτμισης. Επίσης, βροχόπτωση 25-30 mm και με χαμηλό ποσοστό βλαστικής κάλυψης μπορεί να είναι μόνο 60% αποτελεσματική. Επιπλέον, η γνώση των πιθανών ημερομηνιών έναρξης και λήξης της περιόδου βροχών, καθώς και η διάρκεια και συχνότητα των ενδιάμεσων ξηρών και υγρών περιόδων, μπορεί να είναι πολύ σημαντικές για τη σχεδίαση διαφόρων γεωργικών εργασιών, καθώς και για τη βελτίωση της επάρκειας των αρδεύσεων.

13.4.1.1. Εκτίμηση της αποτελεσματικής βροχόπτωσης

Έχουν πραγματοποιηθεί πολλές μελέτες σε αρκετές χώρες, για τον προσδιορισμό των προτύπων και των χαρακτηριστικών της βροχόπτωσης που μπορεί να συμβάλουν στη σχεδίαση γεωργικών εργασιών, όπως όργωμα, συγκομιδή, καθώς και περίοδοι και συχνότητα αρδεύσεων. Πολλές από τις μελέτες αυτές βασίζονται σε αναλύσεις ιστορικών βροχομετρικών δεδομένων. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται εφαρμοζόμενα διεθνή παραδείγματα εμπειρικών δεικτών ή αλγόριθμων εκτίμησης αποτελεσματικής βροχόπτωσης (Mavi & Tupper, 2004):

- Η έναρξη των βροχών στη Νιγηρία θεωρείται το πρώτο δεκαήμερο, με περισσότερο από 25 mm βροχής, υπό την προϋπόθεση ότι η βροχή το επόμενο δεκαήμερο θα υπερβαίνει το μισό της δυναμικής εξατμισοδιαπνοής (Kowal & Krabe, 1972).
- Το κριτήριο βροχόπτωσης για την έναρξη του οργώματος είναι, τουλάχιστον, 25 mm βροχής σε περίοδο επτά ημερών, με 1 mm ή περισσότερο για οποιεσδήποτε πέντε από τις επτά ημέρες, θεωρώντας μια απώλεια εξάτμισης 18 mm στο τέλος των πέντε ημερών (Raman, 1974).
- Δύο μέθοδοι: Στην πρώτη μέθοδο, το 50-80% της βροχόπτωσης θεωρείται αποτελεσματικό. Στη δεύτερη μέθοδο, βροχόπτωση λιγότερη από 6,25 mm ή περισσότερη από 75 mm, οποιαδήποτε μέρα, ή βροχόπτωση περισσότερη από 125 mm σε 10 μέρες θεωρείται αναποτελεσματική (Dastane, 1974).
- Η μέθοδος USDA/SCS (FAO, 1977) υπολογίζει την αποτελεσματική βροχόπτωση από το κλάσμα εξάτμιση/υετός.
- Έναρξη της βλαστικής περιόδου στη Νιγηρία θεωρείται η μέρα κατά την οποία η βροχόπτωση υπερβαίνει την εξάτμιση και παραμένει μεγαλύτερη του μηδενός, υπό την προϋπόθεση ότι μια ξηρή περίοδος πέντε ημερών ή περισσότερο δεν αρχίζει την εβδομάδα μετά την ημέρα έναρξης (Benoit, 1977).
- Μέθοδος για την πρόγνωση των χαρακτηριστικών της βροχόπτωσης, έτσι ώστε η έναρξη ενός αποτελεσματικού μουσώνα να βασίζεται στα εξής κριτήρια: i) η πρώτη μέρα βροχής σε περίοδο επτά ημερών να μην είναι μικρότερη από τη μέση ημερήσια εξάτμιση, e, β) η συνολική βροχή του επταημέρου να μην είναι λιγότερη από 5e + 10 mm και γ) τουλάχιστον οι τέσσερις από τις επτά ημέρες να έχουν βροχόπτωση όχι λιγότερη από 2,5 mm κάθε μέρα (Ashok Raj, 1979).
- Μοντέλο υδατικού ισοζυγίου, όπου η αποτελεσματική βροχόπτωση ορίζεται ως το ποσοστό της βροχόπτωσης που διεισδύει στο έδαφος, αλλά δεν συνεισφέρει στη βαθιά διήθηση και δίνεται από τη σχέση:

$$EP = (P - RN - R), \quad (13.29)$$

όπου EP είναι η αποτελεσματική βροχόπτωση, P η βροχόπτωση, R η απορροή και RN η συγκράτηση της βροχόπτωσης από το φύλλωμα (Patwardhan & Nieher, 1987).

- Διάφορα μοντέλα υδατικού ισοζυγίου σε ορυζώνες (Mizutani et al., 1991).

- Μοντέλο αριθμητικής προσομοίωσης (E – RAIN) έχει χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση μέσων και ακραίων μηνιαίων και ετήσιων τιμών αποτελεσματικής βροχόπτωσης (Smajstrla et al., 1997). Το μοντέλο αυτό υπολογίζει την αποτελεσματική βροχόπτωση ως τη διαφορά μεταξύ βροχόπτωσης (Rainfall) και απορροής (Runoff):

E – Rain = Rainfall – Runoff, (13.30)

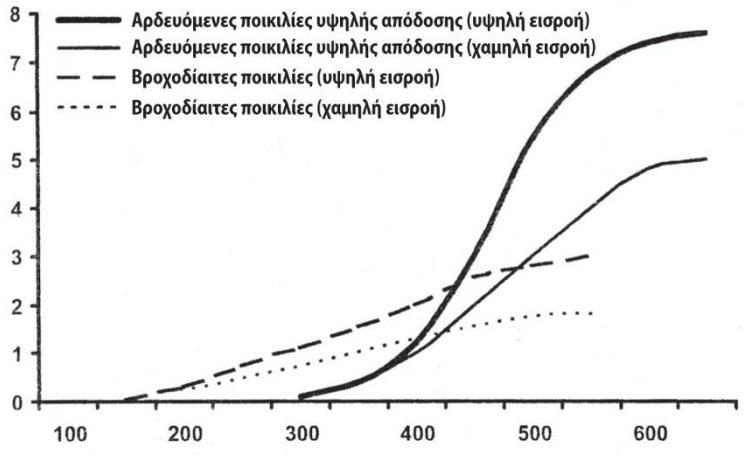
όπου E – Rain είναι η αποτελεσματική βροχόπτωση σε mm.
Η απορροή δίνεται ως:

$$Runoff = (Rainfall - 0{,}2\ S)^2 / (Rainfall + 0{,}8\ S), \quad (13.31)$$

όπου S είναι ένας συντελεστής αποθήκευσης στη λεκάνη απορροής.

13.4.2 Βελτίωση επάρκειας χρήσης νερού (Water Use Efficiency/WUE)

Ως γνωστόν, η επιφανειακή και η στάγδην (sprinkler) άρδευση είναι τα κύρια συστήματα άρδευσης που εφαρμόζονται στον κόσμο. Η τελευταία προσθήκη είναι το σύστημα μικροάρδευσης, που μέχρι τώρα περιορίζεται σε εντατικές οπωροκηπευτικές καλλιέργειες (Pereira, 1999). Τα συστήματα στάγδην και μικροάρδευσης είναι πολύ καλύτερα και πιο επαρκή από τα συστήματα επιφανειακής άρδευσης (Ramalan & Hill, 2000). Ωστόσο, το κόστος εγκατάστασης και συντήρησής τους περιορίζει τη χρήση τους, με αποτέλεσμα η επιφανειακή άρδευση να παραμένει το κύριο σύστημα (Heermann, 1996). Επίσης, σύμφωνα με εκτιμήσεις (FAO, 1994), κατά μέσον όρο μόνο το 45% χρησιμοποιείται από την καλλιέργεια, με απώλειες 15% στη μεταφορά νερού, 15% στα αρδευτικά κανάλια και 25% σε ανεπαρκή εφαρμογή. Υπάρχουν σημαντικά περιθώρια για περισσότερο ακριβή και επαρκή εφαρμογή νερού στις καλλιέργειες, με βελτιωμένες μεθόδους άρδευσης και καλύτερες τεχνικές διαχείρισης του νερού καλλιεργειών, μέσω της σχεδίασης των αρδεύσεων και του ελέγχου της παροχής νερού (Goussard, 1996). Αναγνωρίζεται ότι η υιοθέτηση κατάλληλων πρακτικών σχεδίασης αρδεύσεων θα οδηγήσει σε αύξηση της παραγωγής και του εισοδήματος του αγρότη, σημαντική αποταμίευση νερού, περιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και βελτιωμένη αειφορία της αρδευόμενης γεωργίας (Smith et al., 1996), όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στο Σχήμα 13.15. Επισημαίνεται ότι τα προαπαιτούμενα για τον έλεγχο παροχής νερού και την εισαγωγή στρατηγικών σχεδίασης των αρδεύσεων είναι η ανάλυση των κλιματικών συνθηκών της περιοχής, η αξιοποίηση της πρόγνωσης καιρού, καθώς και η στοχαστική μεταβλητότητα της βροχόπτωσης και της εξατμισοδιαπνοής, για προσομοίωση της παραγωγής, που περιγράφονται επιγραμματικά στη συνέχεια. Ειδικότερα:



Σχήμα 13.15. *Επάρκεια χρήσης νερού σε αρδευόμενα και βροχοδίαιτα δημητριακά.*

- **Κλιματολογικά μοντέλα για σχεδίαση αρδεύσεων**. Το μοντέλο CROPWAT (Crop Water) (Smith, 1992) συνδυάζει εξατμισοδιαπνοή αναφοράς και ανάγκες σε νερό των καλλιεργειών, και επιτρέπει την προσομοίωση της χρήσης νερού καλλιεργειών σε διαφορετικές κλιματικές, εδαφικές και καλλιεργητικές συνθήκες. Αποτελεί εργαλείο στήριξης αποφάσεων με λειτουργίες, όπως: (α) υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς με την εξίσωση Penman-Monteith, (β) ανάγκες σε νερό των καλλιεργειών με χρήση του συντελεστή καλλιέργειας, K_c, και βλαστικών σταδίων ανάπτυξης, (γ) αποτελεσματικές απαιτήσεις βροχόπτωσης και άρδευσης, (δ) σχέδιο παροχής άρδευσης σε δεδομένο καλλιεργητικό πρότυπο και (ε) καθημερινός υπολογισμός χρήσης νερού. Επίσης, η διαδικασία υδατικού ισοζυγίου του μοντέλου επιτρέπει την ανάπτυξη σχεδίων άρδευσης και την αξιολόγηση αρδευτικών πρακτικών σχετικά με την επάρκεια χρήσης νερού και την επίπτωση της υδατικής καταπόνησης στη σοδειά. Τέλος, το σύστημα επιτρέπει την εκτίμηση των επιπτώσεων βροχόπτωσης, ξηρών περιόδων και ξηρασίας στη γεωργική παραγωγή.
- **Προγνώσεις καιρού βραχείας διάρκειας**. Οι προγνώσεις καιρού μέχρι πέντε ημερών έχουν σημαντική αξία για τους αγρότες, ιδιαίτερα στην επιφανειακή άρδευση, καθόσον επιτρέπουν καλύτερη δυνατότητα διαχείρισης υπερεπάρκειας νερού, καταπόνηση εδαφικής υγρασίας και φυτού, χρόνο ψεκασμών για εχθρούς και ασθένειες, καθώς και εξοικονόμηση χρήσης νερού με την αντίστοιχη μείωση του κόστους.
- **Απώλειες νερού από το έδαφος**. Υπάρχουν διαφορετικές στρατηγικές στην επάρκεια χρήσης νερού στην αρδευόμενη και βροχοδίαιτη γεωργία. Η βροχοδίαιτη γεωργική παραγωγή υπόκειται σε συχνές διακυμάνσεις στον υετό. Ειδικότερα, μείωση βροχών οδηγεί σε ξηρασίες και ελλειμματικές σοδειές, ενώ πλεονάζουσες βροχές προκαλούν πλημμύρες και απώλεια σοδειάς. Το αποτέλεσμα και στις δύο περιπτώσεις είναι οι σοδειές και η επάρκεια χρήσης νερού να παραμένουν χαμηλά. Κατά συνέπεια, η χρήση νερού των καλλιεργειών χρειάζεται βελτιστοποίηση, μέσω πιο αποτελεσματικής χρήσης και συντήρησης του νερού της βροχής. Ωστόσο, υπάρχουν διαθέσιμες επιτυχημένες τεχνολογίες και εκτεταμένη βιβλιογραφία, που βοηθούν στη διατήρηση της υγρασίας του εδάφους και τη μείωση της εξατμισοδιαπνοής (Boldt et al., 1999).
- **Χρήση πετροχημικών**. Τα πετροχημικά δίνουν υποσχόμενα αποτελέσματα στη μείωση της κίνησης του νερού και την εξάτμιση από γυμνό έδαφος. Για παράδειγμα, στη Σαουδική Αραβία, πετροχημικός συντηρητής εδάφους (Hydrogrow 400) έχει χρησιμοποιηθεί σε αμμώδη εδάφη. Το αποτέλεσμα είναι η αύξηση του αποθηκευμένου νερού σε συνθήκες κορεσμού, λόγω ελαχιστοποίησης των απωλειών της κίνησης του νερού και της εξάτμισης, που οδηγεί σε επαρκή παροχή νερού, για ανάπτυξη των φυτών (Sabrah, 1994).
- **Αγρονομικές πρακτικές**. Αγρονομικές και καλλιεργητικές πρακτικές εφαρμόζονται για τη μείωση της απορροής, με αποτέλεσμα τη σημαντική αύξηση της διαθέσιμης υγρασίας του εδάφους. Η προστασία που παρέχει η βλάστηση είναι επίσης σημαντικός παράγοντας. Αλλά, και το όργωμα συμβάλλει στην αποθήκευση υγρασίας εδάφους, που ευνοεί την ανάπτυξη ριζών, τη βελτίωση διείσδυσης νερού στο έδαφος και τη μείωση της επιφανειακής απορροής, αν ακολουθούνται οι πρακτικές συντήρησης εδαφών.
- **Χωροχρονική διαχείριση εδαφικού νερού**. Εξετάζονται τέσσερα θέματα: (α) η αναπροσαρμογή των δομών των καλλιεργειών, ώστε να συμβαδίζουν με τις αλλαγές στο εδαφικό νερό, (β) η αύξηση των πόρων σε εδαφικό νερό, (γ) η μείωση της εξάτμισης εδαφικού νερού και (δ) η διαχείριση του εδαφικού νερού, ώστε να καλύπτονται οι χρονικές και χωρικές απαιτήσεις του νερού καλλιεργειών (Jin et al., 1999).

13.5. Διαχείριση υδατικών πόρων στη γεωργία

Η διαχείριση των υδατικών πόρων είναι μια ιδιαίτερα πολύπλοκη διαδικασία, καθώς περιλαμβάνει πληθώρα διαφορετικών χρηστών και αντιμαχόμενων στόχων. Επομένως, η εφαρμογή των αρχών της ολοκληρωμένης διαχείρισης των υδατικών πόρων απαιτεί τόσο την ύπαρξη ενός ολιστικού πλαισίου υποστήριξης της εφαρμογής των συγκεκριμένων αρχών, όσο και την ύπαρξη ενός ελεγκτικού μηχανισμού, ο οποίος να αναγνωρίζει τους βαθμούς ελευθερίας της εφαρμογής των αρχών διαχείρισης, να παρακολουθεί την αποτελεσματικότητα της εφαρμογής και να επιβάλλει τα απαραίτητα μέτρα και τις απαιτούμενες δράσεις, σύμφωνα με τις διεθνείς και εθνικές συνθήκες και οδηγίες (π.χ. 2000/60). Επομένως, κρίνεται σκόπιμη η

ανάλυση της υφιστάμενης κατάστασης στην Ελλάδα γενικότερα και στις περιοχές μελέτης ειδικότερα, ως προς τη δυνατότητα να χαρακτηριστεί η χρήση των διαθέσιμων υδατικών πόρων ορθολογική ή μη αειφόρος. Τμήμα της ανάλυσης αποτελούν ο έλεγχος της απόδοσης των συστημάτων άρδευσης, η κάλυψη των αναγκών των καλλιεργειών σε νερό και η κατανομή των υδατικών πόρων για την κάλυψη των διάφορων αναγκών σε επίπεδο ζώνης παραγωγής και λεκάνης απορροής. Επίσης, πρέπει να εξεταστεί η υφιστάμενη κατάσταση και η αποτελεσματικότητα τόσο του θεσμικού πλαισίου διαχείρισης των υδατικών πόρων, όσο και των εθνικών μηχανισμών παρακολούθησης και ελέγχου της υφιστάμενης διαχείρισης. Η ανάλυση πρέπει να εστιάζεται στην αλληλοεπικάλυψη και τη σύγκρουση των αρμοδιοτήτων, τόσο σε περιφερειακό, όσο και σε εθνικό επίπεδο, και στην ενεργό συμμετοχή όλων όσων έχουν εμπλοκή (stakeholders), καθώς και κατάλληλων μεθόδων αξιολόγησης των απόψεών τους. Στόχος όλης της διαδικασίας είναι η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου διαχειριστικού πλαισίου παροχής σχετικών επιλογών και λύσεων, ως προς την αποτελεσματική λειτουργία των διάφορων εμπλεκόμενων μηχανισμών χρήσης, παρακολούθησης και ελέγχου των υδατικών πόρων, και της συμμόρφωσης και προσαρμογής στις εθνικές και διεθνείς οδηγίες, καθώς και στις διάφορες προκλήσεις, με την ενσωμάτωση και των πλέον προηγμένων τεχνολογιών της μηχανικής συστημάτων.

13.5.1. Υδατικό δυναμικό για τη γεωργία

Εξετάζονται και αρχικά αναλύονται οι υδρολογικές συνθήκες των λεκανών απορροής με τη χρήση υδρολογικών μοντέλων και σχετικών δεικτών. Η ανάλυση περιλαμβάνει το υδατικό δυναμικό, τις ανάγκες της γεωργίας σε νερό, την αναγνώριση του διαθέσιμου όγκου νερού, για την κάλυψη των διάφορων αναγκών εντός της λεκάνης απορροής, την εμφάνιση ακραίων φαινομένων και διαταραχών, όπως λειψυδρίες, καύσωνες, χαλάζι και παγετός, δασικές πυρκαγιές και ερημοποίηση, της συμβολής του χιονιού στο υδατικό δυναμικό και άλλα συναφή. Τέλος, αναλύονται η χωρική και χρονική κατανομή και η μεταβολή των διαθέσιμων υδατικών πόρων, η ικανοποίηση των κοινωνικών αναγκών και ο τρόπος χρήσης τους, ως προς τη συμμόρφωση με την εθνική νομοθεσία και τις διεθνείς οδηγίες. Η λήψη των αποφάσεων και η εφαρμογή συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων για την ολοκληρωμένη διαχείριση υδατικών πόρων αποτελούν το επόμενο βήμα. Τέλος, εξετάζονται οι προοπτικές ανάπτυξης βάσης δεδομένων και παρεμφερών εργαλείων, με στόχο την παρακολούθηση (monitoring) των διαφόρων υδρολογικών και γεωργικών παραμέτρων των υπό εξέταση ζωνών παραγωγής. Όλα αυτά οδηγούν σε ένα κατάλληλο σύστημα υποστήριξης αποφάσεων, με την ενσωμάτωση των πλέον προηγμένων τεχνολογιών και στόχο την ενίσχυση των επιλογών, που περιλαμβάνουν την επαναχρησιμοποίηση και την ανακύκλωση των υδάτων με την ταυτόχρονη εφαρμογή των αρχών της ολοκληρωμένης διαχείρισης των υδατικών πόρων στον γεωργικό τομέα, σε επίπεδο λεκάνης απορροής.

Η γεωργία καταλαμβάνει το 40% της ελληνικής επικράτειας και αποτελεί τον μεγαλύτερο καταναλωτή νερού στη χώρα – σε ποσοστό που ξεπερνά το 80%. Η υπερβολική άντληση των περιορισμένων υπόγειων υδάτων έχει προκαλέσει την πτώση της στάθμης τους σε ορισμένες αγροτικές περιοχές, καθώς και την εισροή του θαλασσινού νερού σε ορισμένους παράκτιους υδροφορείς. Παρά την εφαρμογή των κανονισμών και των όρων αδειοδότησης υδροληψίας για άρδευση, που βελτίωσαν σημαντικά τις υφιστάμενες συνθήκες των διαθέσιμων υδατικών πόρων, εξακολουθεί να υπάρχει σημαντικό περιθώριο για περαιτέρω βελτίωση, ιδιαίτερα με την ανάπτυξη της χρήσης και των επιφανειακών υδάτων.

Τα αποτελέσματα αναμένεται να παρέχουν εκτενή ανάλυση τόσο των υδρολογικών συνθηκών των λεκανών απορροής ή των ζωνών παραγωγής, όσο και των συνθηκών ζήτησης και εφοδιασμού νερού, και της αποτελεσματικότητας της χρήσης των υδατικών πόρων. Επίσης, συνιστώσα της ολοκληρωμένης διαχείρισης αποτελεί επίσης η ανάπτυξη βάσης δεδομένων και παρεμφερών εργαλείων, με στόχο την παρακολούθηση (monitoring) των διαφόρων υδρολογικών και γεωργικών παραμέτρων των λεκανών απορροής. Τέλος, στο σύστημα διαχείρισης περιλαμβάνεται και η ανάπτυξη ενός κατάλληλου συστήματος υποστήριξης αποφάσεων, με την ενσωμάτωση των πλέον προηγμένων τεχνολογιών και στόχο την ενίσχυση των επιλογών και της ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης των υδάτων, με ταυτόχρονη εφαρμογή των αρχών της ολοκληρωμένης διαχείρισης των υδατικών πόρων στον γεωργικό τομέα.

13.5.2. Διαχείριση αρδευτικού νερού

Η γεωργία είναι ο μεγάλος χρήστης νερού στις χώρες γύρω από τη Μεσόγειο. Στην Ελλάδα, το αγροτικό νερό αντιπροσωπεύει το 80-85% της συνολικής κατανάλωσης. Οι αρδευόμενες εκτάσεις είναι περίπου 14.500.000 στρέμματα σε σύνολο περίπου 35.000.000 στρεμμάτων καλλιεργούμενης γης. Από τα 14.500.000 στρέμματα, τα 6.000.000 αρδεύονται στο πλαίσιο συλλογικών αρδευτικών δικτύων, ενώ τα υπόλοιπα 8.500.000 από ιδιωτικά έργα, κυρίως γεωτρήσεις. Μελέτες έχουν δείξει ότι η αποτελεσματικότητα χρήσης του νερού στην

γεωργία είναι ιδιαίτερα χαμηλή, ιδίως μέσα στα συλλογικά έργα. Επίσης, είναι γνωστό ότι η αποτελεσματικότητα χρήσης του νερού διαφέρει από καλλιέργεια σε καλλιέργεια, ενώ και μέσα στην ίδια καλλιεργητική περίοδο, η ευαισθησία των καλλιεργειών στην υδατική καταπόνηση μεταβάλλεται από στάδιο σε στάδιο ανάπτυξης.
Οι περιορισμένοι υδατικοί πόροι, σε συνδυασμό με τις αυξημένες ανάγκες τη θερινή περίοδο και τις περιορισμένες δυνατότητες των υποδομών να ανταποκριθούν στην υψηλή ζήτηση, οδηγούν στην ανάγκη βελτίωσης της διαχείρισης του αρδευτικού νερού, χρησιμοποιώντας πιο αποτελεσματικές μεθόδους εφαρμογής, συστήματα νέων τεχνολογιών, καθώς και εισαγωγή της ελλειμματικής άρδευσης. Η βελτίωση της διαχείρισης του αρδευτικού νερού μπορεί να επιτευχθεί και με την εισαγωγή συστημάτων υποστήριξης αγροτών. Ειδικότερα, αναπτύσσονται καινοτόμες λύσεις, για την υποστήριξη των αγροτών, ανάλογα με την καλλιέργεια, τις εδαφικές και κλιματικές συνθήκες, καθώς και τον υφιστάμενο εξοπλισμό. Οι λύσεις που διατίθενται και προτείνονται μπορούν να αποτελούν μια ολοκληρωμένη προσέγγιση, που συνδυάζει γεωσκοπικές (Earth Observation/EO) παρατηρήσεις, καθώς και εφαρμογές των τεχνολογιών πληροφόρησης και επικοινωνίας (Information and Communication Technologies/ICT). Επισημαίνεται ότι τα συστήματα που μπορεί να προκύψουν πρέπει να επιτρέπουν και να υποστηρίζουν την ολοκληρωμένη διαχείριση του αρδευτικού νερού, σε επίπεδο αρδευτικών δικτύων, καθώς και σε επίπεδο αγροτεμαχίου.
Είναι γνωστό ότι τα συλλογικά έργα που έχουν κατασκευαστεί για να καλύψουν ανάγκες καλλιεργειών παρουσιάζουν σχεδιαστικά και κατασκευαστικά προβλήματα. Επίσης, η συντήρησή τους είναι πλημμελής, με συνέπεια να βρίσκονται, συνήθως, σε κατάσταση απλώς λειτουργικής επιβίωσης. Επισημαίνεται ακόμα ότι, σε επιχειρησιακό επίπεδο, οι οργανισμοί διαχείρισης μπορούν να βελτιώσουν τη διαχείριση αρδευτικού νερού, γεγονός που θα έχει θετικές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Οι παραγωγοί μπορούν να αρδεύουν με πιο ορθολογικό τρόπο και το κόστος άρδευσης αναμένεται ότι θα μειωθεί. Η μείωση της κατανάλωσης αρδευτικού νερού θα οδηγήσει σε καλύτερη λειτουργία των υποδομών και το κοινωνικό σύνολο θα ωφεληθεί, λόγω της καλύτερης αξιοποίησης του αρδευτικού νερού.

13.5.2.1. Βάση δεδομένων αρδευτικών υποδομών

Γνωρίζουμε ότι υπάρχει μεγάλη σπατάλη νερού στο χώρο της γεωργίας, και γι' αυτό πρέπει να ληφθούν μέτρα βελτίωσης της κατάστασης. Κάτι τέτοιο αναμένεται να έχει θετική επίπτωση στους οργανισμούς διαχείρισης, που θα αποκτήσουν ένα πολύτιμο εργαλείο για τη βελτίωση του τρόπου αντιμετώπισης των προβλημάτων. Υπάρχουν αξιόπιστες λύσεις ορθολογισμού, όπως χρέωση με τον όγκο, χρήση νέου τύπου υδροληψιών, αξιόπιστη μεθοδολογία κοστολόγησης αρδευτικού νερού, καθώς και δίκτυα προσαρμοσμένα στις ανάγκες των χρηστών. Επισημαίνεται επίσης ότι τα προβλήματα λειτουργικότητας των συλλογικών δικτύων της χώρας συνδέονται με υπερβολικές αντλήσεις νερού, για κατανάλωση και ενέργεια. Δεν είναι γνωστά το ακριβές μέγεθος της κατανάλωσης νερού ανά καλλιέργεια, η ενδεχόμενη υπερκατανάλωση, το επίπεδο λειτουργίας των δικτύων, δηλαδή ενδεχόμενες πτώσεις πίεσης, καθώς και το επίπεδο ομοιομορφίας. Στην άλλη μεγάλη ομάδα χρηστών του αρδευτικού νερού, που αφορά την ιδιωτική πρωτοβουλία και τις γεωτρήσεις, η υπερκατανάλωση είναι περιορισμένη συγκριτικά, καθόσον υπάρχει κοστολόγηση των παραγωγών για την άντληση νερού, ωστόσο παρατηρείται υπεράντληση, καθώς και προβλήματα πτώσης της στάθμης και υφαλμύρωσης σε παράκτιες περιοχές. Επίσης, πρόβλημα συνιστά ο μεγάλος αριθμός παράνομων γεωτρήσεων. Κατά συνέπεια, κρίνεται απαραίτητο να δημιουργηθεί μια εθνική βάση δεδομένων υψηλής ποιότητας, για τα έργα διαχείρισης νερού στη γεωργία, ώστε να καταγραφεί η υπάρχουσα κατάσταση και η ανάγκη βελτίωσης. Η βάση αυτή θα πρέπει να είναι προσβάσιμη στους οργανισμούς διαχείρισης και στο ευρύ κοινό, παρέχοντας διάφορα επίπεδα πληροφοριών. Επισημαίνονται επιγραμματικά κάποια βασικά χαρακτηριστικά των προς συλλογή και ανάλυση δεδομένων:

- Αποτύπωση καλλιεργειών που αρδεύονται από τα υφιστάμενα συλλογικά αρδευτικά δίκτυα της χώρας. Οι καλλιέργειες θα πρέπει να ενταχθούν σε γεωχωρική βάση δεδομένων. Η αποτύπωση γίνεται με γεωσκοπικές παρατηρήσεις και παρατηρήσεις πεδίου. Γίνεται εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής, ώστε να υπολογίζονται οι υδατικές ανάγκες των καλλιεργειών.
- Δημιουργία βάσης δεδομένων με τους καταναλισκόμενους όγκους ανά αντλιοστάστιο συλλογικού αρδευτικού δικτύου.
- Αποτύπωση του σημείου υδροληψίας κάθε αγροτεμαχίου.
- Ανάπτυξη μεθοδολογίας υπολογισμού αξιόπιστων δεικτών αποτελεσματικότητας της άρδευσης. Οι δείκτες αυτοί θα πρέπει να ενσωματώνουν την έννοια του υδατικού αποτυπώματος (water footprint) σε επίπεδο καλλιέργειας.

13.5.2.2. Βελτίωση της λειτουργίας αρδευτικών δικτύων

Γνωρίζουμε ότι το νερό είναι ο βασικότερος συντελεστής παραγωγής σε περιοχές με ξηροθερμικές κλιματικές συνθήκες, όπως στη Μεσόγειο και την Ελλάδα. Ωστόσο, οι υδατικοί πόροι υπόκεινται σε διαρκείς πιέσεις, εξαιτίας της αλλαγής χρήσεων γης, της αστικοποίησης, της υπερεκμετάλευσης, της ρύπανσης, καθώς και της αύξησης του ανταγωνισμού μεταξύ των διαφόρων χρηστών, μεταξύ των άλλων. Ο στόχος για τα προσεχή χρόνια είναι η Ευρώπη να τεθεί στην πρώτη γραμμή των καινοτομιών και της τεχνολογίας, που σχετίζεται με τους υδατικούς πόρους. Τα συλλογικά αρδευτικά δίκτυα στην Ελλάδα, στα οποία χρησιμοποιούνται πολύ μεγάλες ποσότητες υδατικών πόρων, αντιμετωπίζουν σημαντικά προβλήματα. Εξαιτίας αστοχιών σε επίπεδο αρχικής σχεδίασης και κατασκευής, όπως επίσης κακής διαχείρισης και ελλιπούς συντήρησης, πολλά αρδευτικά δίκτυα της χώρας δεν προσφέρουν την αναμενόμενη απόδοση στους χρήστες, ενώ συγχρόνως κάθε χρόνο ένα μεγάλο ποσοστό του αρδευτικού νερού χάνεται. Είναι απαραίτητο να αναπτυχθούν εργαλεία και μεθοδολογίες, για τον εντοπισμό και την αντιμετώπιση των προβλημάτων που προκύπτουν από την κακή λειτουργική κατάσταση των έργων αυτών. Συγχρόνως, είναι σκόπιμο να αναπτυχθούν στρατηγικές μετριασμού των συνεπειών και προσαρμογής σε νέες συνθήκες, όπως κλιματική αλλαγή και αναδιάρθρωση των καλλιεργειών. Αναμένεται βελτίωση του ελέγχου των συλλογικών αρδευτικών έργων, με αποτέλεσμα την καλύτερη και πιο αποτελεσματική διαχείρισή τους. Επίσης, αναμένονται πιο εστιασμένες και πιο αποτελεσματικές επεμβάσεις ανάταξης εκσυγχρονισμού των έργων, καθώς και εισαγωγή νέας τεχνολογίας στα συλλογικά αρδευτικά έργα

13.5.2.3. Βελτίωση των τεχνολογιών άρδευσης

Από τα βασικά προβλήματα στην ελληνική αρδευόμενη γεωργία είναι η έλλειψη τεχνικής υποστήριξης σε θέματα αρδεύσεων, με συνέπεια τη χαμηλή αποτελεσματικότητα. Συγχρόνως, οι κακές πολιτικές νερού οδηγούν σε μεγάλες σπατάλες νερού και ενέργειας όταν υπάρχει άντληση, καθώς και σε βαθιά κατείσδυση λιπασμάτων, με συνέπεια τη ρύπανση των υδροφόρων οριζόντων. Επίσης, δεν υπάρχει έλεγχος στον αρδευτικό εξοπλισμό που χρησιμοποιείται. Κρίνεται απαραίτητη η αξιολόγηση των αρδευτικών συστημάτων στον αγρό, για να υπάρξει βελτίωση. Η αξιολόγηση περιλαμβάνει την ανάπτυξη πρότυπων αρδευτικών συστημάτων σε διάφορες περιοχές της χώρας και τη δημιουργία αποδεικτικών αγρών με τα πρότυπα αυτά αρδευτικά συστήματα, για να διαπιστώνεται η βελτίωση που μπορεί να επιτευχθεί, στην εφαρμογή αρδευτικού νερού και τελικά στην αποδοτικότητα των καλλιεργειών. Η βασική επίπτωση της αξιολόγησης είναι η βελτίωση της αρδευτικής τεχνικής σε επίπεδο αγροτεμαχίου.

13.6. Διαχείριση ελλειμματικού νερού και ακραίων συνθηκών

Πολλά μέρη του κόσμου αντιμετωπίζουν πρόβλημα λειψυδρίας. Ειδικά σε ημιάνυδρες και ξηρές χώρες και περιοχές, όπως η περιοχή της Μεσογείου, αυτό το πρόβλημα έχει ανησυχητικές διαστάσεις. Η λειψυδρία και η διαθεσιμότητα νερού θέτουν σημαντικούς περιορισμούς στην κοινωνική και οικονομική ανάπτυξη των εν λόγω περιοχών και χωρών, ενώ υποβαθμίζουν και την ποιότητα ζωής. Ο πρωτογενής τομέας αποτελεί τη σημαντικότερη οικονομική δραστηριότητα των περισσότερων αυτών χωρών. Η γεωργία αντιπροσωπεύει πάνω από το 80% της συνολικής κατανάλωσης νερού και η έλλειψη νερού έχει άμεση επίδραση στην ποσότητα και την ποιότητα των γεωργικών προϊόντων και, επομένως, στην οικονομία των χωρών αυτών. Επιπλέον, η κατανάλωση νερού για οικιακή χρήση αυξάνεται, λόγω της αύξησης του πληθυσμού, η οποία πιέζει για υψηλή ποιότητα νερού. Αντίθετα, η διαθεσιμότητα νερού μειώνεται, λόγω φυσικής κλιματικής μεταβλητότητας και κλιματικής αλλαγής, μεταξύ άλλων παραγόντων.

13.6.1. Διαχείριση ελλειμματικού νερού

Το σημερινό πρόβλημα της λειψυδρίας και της σπανιότητας νερού (water scarcity) είναι το δυσμενές αποτέλεσμα τόσο της μειωμένης διαθεσιμότητας νερού, όσο και της αναποτελεσματικής διαχείρισης και πολιτικής των υδάτινων πόρων στις περιοχές και χώρες αυτές. Έτσι, οι αιτίες για την έλλειψη νερού μπορεί να είναι θεσμικές, κοινωνικοοικονομικές και φυσικές κλιματικές. Οι θεσμικές αιτίες οδηγούν σε αναποτελεσματική διαχείριση των υδάτινων πόρων και των πολιτικών, και μπορούν να συνοψιστούν σε αναποτελεσματική οργανωτική δομή, νομοθετικό έλλειμμα, επιστημονική και τεχνική ανεπάρκεια και έλλειψη υποδομών. Οι κοινωνικοοικονομικές αιτίες οδηγούν σε κακή χρήση και υπερεκμετάλλευση του νερού, λόγω της έλλειψης ενημέρωσης και ευαισθητοποίησης του ευρύτερου κοινού και των χρηστών, αναποτελεσματικές

πρακτικές χρήσης νερού και κακή διαχείριση των χρήσεων γης. Επίσης, η έλλειψη στοιχείων δεν επιτρέπει την επιστημονική ανάλυση της διαθεσιμότητας νερού. Συνεπώς, αναποτελεσματική διαχείριση των υδάτινων πόρων και έλλειψη αναλύσεων διαθεσιμότητας νερού, σε συνδυασμό με παρατεταμένες περιόδους ξηρασίας, που προκαλούνται από την κλιματική μεταβλητότητα και αλλαγή, την υπερκατανάλωση και την κακή χρήση νερού, καθώς και την προσθήκη νέων αναγκών σε νερό, μπορεί να οδηγήσουν σε ελλείμματα, ακόμα δε και σε σπανιότητα νερού. Για την αντιμετώπιση και την επίλυση των παραπάνω αιτίων της λειψυδρίας, είναι απαραίτητες η αποτελεσματική και βέλτιστη διαχείριση του συστήματος και η αναδιάρθρωση των δομών των υδάτινων πόρων σε υδρολογικές λεκάνες απορροής.

Κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστεί επιγραμματικά μια επισκόπηση της μεθοδολογίας, στο πλαίσιο της βιώσιμης διαχείρισης των υδάτινων πόρων, μέσω τεχνικών και επιστημονικών αναλύσεων της ξηρασίας και της διαχείρισης λειψυδρίας και ελλειμματικού νερού σε περιοχές και χώρες ευάλωτες στην ξηρασία και τη λειψυδρία. Οι αναλύσεις αυτές καλούνται να διερευνήσουν εναλλακτικές λύσεις διαχείρισης των υδάτινων πόρων, όπως είναι τα μη συμβατικά μέτρα, που σχετίζονται με τα περιθωριακά νερά, συμπεριλαμβανομένης της αύξησης της βροχής, της αφαλάτωσης, της συγκομιδής νερού, της επεξεργασίας και επαναχρησιμοποίησης νερού, που αποτελούν τάσεις και πρακτικές στο πλαίσιο συνθηκών ξηρασίας και λειψυδρίας. Επισημαίνεται ότι η θεματική προσέγγιση της διαχείρισης της σπανιότητας υδάτινων πόρων παρέχει την επιστημονική βάση για την εφαρμογή βέλτιστων πρακτικών διαχείρισης των υδάτινων πόρων στις πληγείσες περιοχές. Η εφαρμογή του πλαισίου διαχείρισης λειψυδρίας αποτελείται από αλληλουχία διαδικασιών και μεθοδολογιών, που παρουσιάζονται στη συνέχεια. Ειδικότερα:

- **Κλιματική μεταβλητότητα και κλιματικά μοντέλα**. Αρχή γίνεται με την ανάπτυξη βάσης δεδομένων, όπου καταγράφονται και ψηφιοποιούνται όλες οι υφιστάμενες μελέτες, τα διαθέσιμα ιστορικά στοιχεία, τα τεκμηριωμένα περιβαλλοντικά δεδομένα και οι βάσεις GIS. Έχοντας καταγράψει και τεκμηριώσει τα μετεωρολογικά και κλιματολογικά στοιχεία, εφαρμόζεται ανάλυση ιστορικών χρονοσειρών για την κλιματική μεταβλητότητα, καθώς και κλιματική μοντελοποίηση και προγνώσεις κλιματικών σεναρίων.
- **Μοντελοποίηση ποσότητας και ποιότητας νερού**. Αναπτύσσονται υδρολογικά μοντέλα ποσότητας νερού, καθώς και μοντέλα ποιότητας νερού. Επίσης, αναπτύσσονται υδρογεωλογικά μοντέλα για το υπόγειο νερό. Με την αξιοποίηση των ιστορικών μετεωρολογικών και κλιματικών δεδομένων, τα μοντέλα χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση της ποσότητας και της ποιότητας του νερού.
- **Ανάλυση ξηρασίας**. Επιχειρείται ιεραρχική ανάλυση της ξηρασίας, με την ανάλυση των διαφόρων τύπων ξηρασίας διαδοχικά, με βάση δείκτες και μοντέλα, δηλαδή μετεωρολογική, γεωργική, υδρολογική και κοινωνικοοικονομική ξηρασία. Η ανάλυση της ξηρασίας οδηγεί στη διάγνωση των χαρακτηριστικών της ξηρασίας σε μια περιοχή, καθώς και στην εκτίμηση των σεναρίων και παρεμβάσεων που είναι απαραίτητες για την άμβλυνση των συνεπειών της ξηρασίας. Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων, μπορεί να αναπτυχθούν συστήματα έγκαιρων προειδοποιήσεων ξηρασίας, ενώ υπάρχουν ήδη μερικά τέτοια συστήματα που λειτουργούν διεθνώς.
- **Ζήτηση νερού και ισοζύγιο νερού**. Η μεθοδολογική διαδικασία συνεχίζεται με την εκτίμηση της ζήτησης νερού. Πράγματι, θεωρείται απαραίτητη η λεπτομερής ανάλυση των αναγκών σε νερό των καλλιεργειών, καθώς και το ισοζύγιο νερού στο εσωτερικό της λεκάνης απορροής, ώστε να βοηθηθεί η διαχείριση υδάτινων πόρων στη γεωργία.
- **Περιθωριακά νερά**. Εάν η διαθεσιμότητα νερού μειώνεται σημαντικά, είναι σκόπιμο να εξετάζεται η εφαρμογή μη συμβατικών μέτρων, όπως η χρήση περιθωριακών νερών, δηλαδή αύξηση της βροχής, αφαλάτωση, συγκομιδή νερού, επεξεργασία και επαναχρησιμοποίηση νερού, για την αύξηση της ποσότητάς του, που πρέπει να αναλυθούν και σε σχέση με την ποιότητα νερού.
- **Διαχείριση ελλειμματικού νερού**. Μετά την ανάλυση των ποσοτικών και ποιοτικών απαιτήσεων νερού σχετικά με τις διάφορες χρήσεις εντός της λεκάνης απορροής, αναπτύσσεται ένα μοντέλο διαχείρισης των υδατικών πόρων για να εφαρμοστεί σε τοπική και περιφερειακή κλίμακα. Επιπλέον, αναπτύσσεται ένα οικονομικό μοντέλο για την αξιολόγηση της οικονομικής σκοπιμότητας των σεναρίων διαχείρισης, τα οποία αφορούν τις μελλοντικές συνθήκες και ακολουθούν συγκεκριμένα κριτήρια οικονομικής ανάπτυξης, που προέρχονται τόσο από εθνικά σχέδια ανάπτυξης, όσο και από ανάλυση των οικονομικών τάσεων. Με την αλλαγή των συνιστωσών διαχείρισης των υδατικών πόρων για το μέλλον, καθίσταται αναγκαίο να επαναληφθεί η όλη διαδικασία με βάση τις προγνώσεις ή τα αναμενόμενα φυσικά και οικονομικά δεδομένα. Με

τον τρόπο αυτό, διάφορα μελλοντικά σενάρια σχετικά με το κλίμα και τη διαχείριση των υδάτινων πόρων μπορεί να ελεγχθούν και αξιολογηθούν ως προς την οικονομική εφικτότητα και αειφορία των υδάτινων πόρων. Αυτή η διαδικασία βοηθά στη βέλτιστη αξιοποίηση και χρήση των υδάτινων πόρων και συμβάλλει μακροπρόθεσμα σε πρακτικές διαχείρισης.

13.6.2. Διαχείριση ακραίων αγροϋδρολογικών κινδύνων

Η εμφάνιση ακραίων φαινομένων, όπως είναι κυρίως οι πλημμύρες, οι ξηρασίες, οι λειψυδρίες και οι καύσωνες, καθώς και άλλων διαταραχών, όπως είναι η έλλειψη και η σπανιότητα νερού, η υδατοπόνηση, ή ελλείμματα νερού, μπορεί να προκαλέσουν μεγάλες οικονομικές απώλειες και επιπτώσεις στον παραγωγικό τομέα της γεωργίας ειδικότερα και της κοινωνίας γενικότερα. Σε τέτοιες συνθήκες, ως μέρος του ευρύτερου πλαισίου ολοκληρωμένης διαχείρισης των υδατικών πόρων (Integrated Water Resources Management), κρίνεται απαραίτητη η ανάλυση τόσο της κλιματικής μεταβλητότητας και αλλαγής, όσο και των υδρολογικών συνθηκών και των συνθηκών χρήσης του νερού των περιοχών μελέτης, ως προς τη συχνότητα εμφάνισης ακραίων φαινομένων και διαταραχών. Σκοπός της ανάλυσης είναι η ανάπτυξη ευέλικτων πολιτικών και στρατηγικών δράσεων και εργαλείων, που θα έχουν στόχο την αναγνώριση τόσο των δυνατών σημείων (strengths) και των αδυνάτων σημείων (weaknesses), όσο και των απειλών (threats) και των ευκαιριών (opportunities) που εμφανίζονται στις υπό μελέτη περιοχές. Επίσης, η ανάλυση στοχεύει στην αύξηση της προσαρμοστικής ικανότητας (adaptive capacity) και της αντοχής (resilience) των περιοχών μελέτης, την αντιμετώπιση και την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων (impacts) που προκαλούνται στη γεωργία, καθώς και την αύξηση της ικανότητας πρόγνωσης της εμφάνισης ακραίων φαινομένων και διαταραχών, με τη χρήση συστημάτων πραγματικού χρόνου (real time systems). Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων, κρίνεται σκόπιμη η ανάπτυξη τόσο της απαραίτητης μεθοδολογίας πρόγνωσης, όσο και ενός ολοκληρωμένου συστήματος έγκαιρων προειδοποιήσεων (Early Warning System) κατά των επικείμενων φαινομένων και διαταραχών, με την ενσωμάτωση των πλέον προηγμένων τεχνολογιών στα συστήματα υποστήριξης αποφάσεων.

Επιλογικά

Η ανεπαρκής και μεταβαλλόμενη παροχή νερού, καθώς και οι ακραίες θερμοκρασίες είναι δύο καθολικοί περιβαλλοντικοί κίνδυνοι για τη γεωργική παραγωγή. Στα περισσότερα μέρη του κόσμου, η βροχόπτωση, τουλάχιστον για μέρος του έτους, είναι ανεπαρκής για την ανάπτυξη των καλλιεργειών και η βροχοδίαιτη παραγωγή τροφίμων επηρεάζεται σημαντικά από την ετήσια μεταβλητότητα και διακύμανση του υετού. Οι απώλειες νερού έχουν αρνητική επίπτωση στη γεωργική παραγωγή σε κάθε κλιματική ζώνη και περιοχή. Το πρόβλημα είναι πιο οξύ σε τροπικά και υποτροπικά ημίξηρα και ξηρά κλίματα, όπου οι απώλειες νερού λόγω εξάτμισης και εξατμισοδιαπνοής είναι πολύ υψηλές σε όλη τη διάρκεια του έτους. Κατά συνέπεια, η διαχείριση υδατικών πόρων είναι πολύ μεγαλύτερο και περισσότερο καθολικό πρόβλημα από κάθε άλλον περιβαλλοντικό παράγοντα.

Βιβλιογραφικές αναφορές

Abott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E., and Rasmussen, J. (1986). An introduction to European hydrological systems-systeme hydrologique Europeen (SHE) Part II: Structure of physically based distributing modeling system. *JOurnal of Hydrology*, 87:61-77.

Abulohom, M.S., Shah, M.S. and Ghumman, A.R. (2001). Development of a Rainfall-Runoff Model, its Calibration and Validation. *Journal of Water Resources Management*, 15:149-163.

Ashok Raj, P.C. (1979). Onset of Effective Monsoon and Critical Dry Spells. *IARI Research Bulletin*. No. 11. New Delhi: Indian Agricultural Research Institute.

Benoit, P. (1977). The start of growing season in Northern Nigeria. *Agricultural Meteorology* 18:91-99.

Bergstrom, S. & Forsman, A. (1973). Development of a Conceptual Deterministic Rainfall-Runoff Model. *Nordic Hydrology*, 4(3):147-170.

Boldt, A.L., Eisenhauer, D.E., Martin, D.L. and Wilmes, G.J. (1999). Water conservation practices for a river valley irrigated with groundwater. *Agricultural Water Management*. 38:235-256.

Δαλέζιος, Ν.Ρ. (2005). *Αγρομετεωρολογία. Πανεπιστημιακές παραδόσεις*, 5η έκδοση, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

Box, G.E.P. & Jenkins, G.M. (1976). *Time series analysis: Forecasting and control*. Revised edition, Holden Day, Inc., San Francisco, Ca., 532p.

Charbonneau, P., Fortin, J.P. and Morin, G. (1977). The CEQUEAU Model: Description and Examples of its use in problems related to water resources management. *Bulletin of the Association of Hydrological Sciences, AIHS*, 22(1):193-203.

Chen, C.W., Dean, J.D., Gherini, S.A. and Godstein, R.A. (1982). Acid rain model- Hydrologic module. *Journal of Environmental Engineering*, *ASCE*, 108:455-472.

Chiu, C.L., (ed.) (1978). Application of Kalman Filter to Hydrology, Hydraulics and Water Resources. *Proceedings, AGU Chapman Conference*, May 22-24, University of Pittsburgh, Pittsburgh, Penna.

Chow, V.T. (1964). *Handbook of applied hydrology*. McGraw-Hill, NY, USA.

Clarke, R.T. (1994). *Statistical modeling in hydrology*. J. Wiley & Sons Ltd, NY.

Crawford, N.H. & Linsley, R.K. (1966). *Digital simulation in hydrology: Stanford Watershed model IV*. *T.R. 39*, Department of Civil Engineering, Stanford University, Stanford, CA.

Dalezios, N.R. & Eslamian, S. (2015). Regional Design Storm for Greece within the Flood Risk Management Framework. *International Journal of Hydrology Science and Technology* (in press).

Dalezios, N.R., Blanta, A., Loukas, A. and Vasiliades, L. (2013). Extreme Rainfall Analysis in Flood Risk Assessment of Greece. *Proceedings, International Conference on Advanced Methods for Flood Estimation in a Variable and Changing Environment*. *FLOODFREQ, UTH and EC*, 24-26 October 2012, Volos, Greece, 103-109.

Dalezios, N.R. (1987). Development of a Watershed System Using Estimation Theory. *Proceedings, 3rd Greek Hydrotechnical Conference*, Greek Hydrot. Union, Thessaloniki, 7-9 October, 621-630.

Dastane, N.G. (1974). *Effective Rainfall in Irrigated Agriculture*. FAO Irrigation and Drainage Paper 25. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Dooge, J.C.I. (1973). Linear Theory of Hydrological Systems. *Technical Bulletin*. No. 1488, ARS, USDA, October, 327.

Food and Agriculture Organization (FAO) (1977). *Crop Water Requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 24. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Food and Agriculture Organization (FAO) (1993). *AGROSTAT. PC, Computerized Information Series*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Food and Agriculture Organization (FAO) (1994). *Water for Life*. World Food Day 1994. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Gelb, A. (ed.) (1974). *Applied Optimal Estimation*. MIT Press. Boston, USA.

Georgakakos, K.P. (1986). A generalized stochastic hydrometeorological model for flood and flash-flood forecasting, 2: case studies, *WRR*, 22(13):2096-2106.

Gobel, W. (1995). Adding stochasticity to GIS: stochastic regional models. FAO, 225-242.

Goussard, J. (1996). Interaction between water delivery and irrigation scheduling. In M. Smith (ed.). (1996). *Irrigation Scheduling*. *From Theory to Practice*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 263-272.

Gumbel, E.J. (1958). *Statistics of Extremes*. Columbia University Press, New York, N.Y., USA.

Heermann, D.F. (1996). Irrigation scheduling. In L.S.Pereira, R.A. Feddes, J.R. Gilley and B, Lesaffre (eds.), *Sustainability of Irrigated Agriculture*. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Acad. Publishers, 233-249.

Hondronikou, E., Domenikiotis, C. and Dalezios, N.R. (2007). The role of remote sensing in water balance modelling in small basins. *Proceedings of the EWRA Symposium on Water Resources Management: New Approaches and Technologies*, Published by EWRA , Edited by G.P. Karatzas, M.P. Papadopoulou and K. P. Tsagarakis (eds.), 14-16 June 2007, Chania, Crete, Greece, 167-174.

Hutchinson, M.F. (1994). Stochastic space-time weather models from ground-based data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 73:237-264.

Jin M.G., Zhang, R.Q., Sun, L.F., and Gao, Y.F. (1999). Temporal and spatial soil water management: A case study in the Heilonggang region, PR China. *Agricultural Water Management* 42:173-187.

Kotz, S. & Nadarajah, S. (2000). *Extreme Value Distributions, Theory and Applications*. Imperial College Press.London, UK.

Kowal, J.M. & Krabe, D.T. (1972). *An Agroclimatalogical Atlas of the Northem States of Nigeria*. Zaria, Nigeria: Ahmadu Bello University Press.

Loukas, A., Vasiliades, L., Dalezios, N.R. and Domenikiotis, C. (2001). Rainfall-Frequency Mapping for Greece. *PhysiCs and Chemistry of Earth* (B), 26(9):669-674.

Makhouf, Z. & Mitchel, C. (1994). A two-parameter monthly water balance model for French watersheds. *Journal of Hydrology*, 162:299-318.

Maneville, A.N., O'Connell, P.E., Sutcliffe, J.V. and Nash, J.E. (1970). River flow forecasting through conceptual models. Part III-the Ray catchment at Grendon Unerwood. *J. of Hydrology*, 11(2):109-128.

Martinec, J. (1975). Snowmelt runoff model for streamflow forecasts. *Nordic Hydrology*, 6(3):145-154.

Mavi, H.S. & Tupper, G.J. (2004). *Agrometeorology: Principles and Applications of Climate Studies in Agriculture*. Food Products Press. Australia.

Mizutani, M., Rath, B., Mohanty, B.P. and Kalita, P.K. (1991). Estimation of effective rainfall in wet season paddy—Observational studies on water requirement of lowland rice in Thailand (II). *Journal of Irrigation Engineering and Rural Planning* 21:15-28.

Monteith, J.L. (1965). Evaporation and Environment. *Symposia of the Society for Experimental Biology Journal*. 19:205-234.

Natale, L. & Todini, E. (1976). A stable estimator for linear models: 1. Theoretical developments and Monte Carlo experiments. *WRR*, 12(4):667-671.

Neitsch, S.L., J.G. Arnold, J.R. Kiniry, J.R. Williams and K.W. King, 2002: Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Theoretical Documentation. Version 2000. Texas Water Resources Institute, College Station, Texas TWRI Report TR-191, 506p.

Nielsen, S.A. & Hansen, E. (1973). Numerical simulation of the rainfall-runoff process on a daily basis. *Nordic Hydrology*, 4:171-190.

Παπαζαφειρίου, Ζ.Γ. (1999). *Οι ανάγκες σε νερό των καλλιεργειών*. Ζήτης, Θεσσαλονίκη.

Παπαμιχαήλ, Δ.Μ. (2004). *Τεχνική Υδρολογία Επιφανειακών Υδάτων*. Ζήτης, Θεσσαλονίκη.

Patwardhan, A.S. & Nieber, J.L. (1987). Effective rainfall in agriculture. Report No. 87-2018. St. Paul, MN. American Society of Agricultural Engineers.

Pereira, S.L. (1999). Higher performance through combined improvements in irrigation methods and scheduling: A discussion. *Agricultural Water Management* 40:153-169.

Pinter, J. & Szabo, J. (1985). Multi-external (Global) optimization algorithms for engineering applications. *Proceedings 4th International Conference*, Kesington Exhibition Centre, London, UK.

Quick, M.C. & Pipes, A. (1977). UBC Watershed model. *Hydrological Sciences Bulletin*, 22(1):153-161.

Ramalan, A.A. & Hill, R.W. (2000). Strategies for water management in gravity sprinkler irrigation system. *Agricultural Water Management* 43:51-74.

Rockwood, D.M. & Nelson, M.L. (1966). Computer application streamflow synthesis and reservoir regulation. *IV International Conference Irrigation and Drainage*.

Sabrah, R.E.A. (1994). Water movement in a conditioner-treated sandy soil in Saudi Arabia. *Journal of Arid Environment* 27:363-373.

Saxton, K.E., Wiley, P.H. and Rawl, W.J. (2006). Field and Pond Hydrologic Analyses with the SPAW Model. *ASABE Annual International Meeting*, Portland, Oregon, 9-12 July, Paper no. 062108, 14.

Shaw, E.M. (1999). *Hydrology in Practice*. 3rd edition, Stanley Thornes (Publishers Ltd), UK.

Smajstrla A.G., Stanley, C.D. and Clark, G.A. (1997). Estimating runoff and effective rainfall for high water-table soils in south-west Florida. *Soil and Crop Science Society of Florida Proceedings*, 56:94-98.

Smith, M. (1992). *CROPWAT, A Computer Program for Irrigation Planning and Management*. FAO Irrigation and Drainage Paper 26. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Smith, M. (2000). The application of climatic data for planning and management of sustainable rainfed and irrigated crop production. *Agricultural and Forest Meteorology*, 103:99-108.

Smith, M., Pereira, L.S., Beregena, J., Itier, B., Goussard, J., Ragab, R., Tollefson, L. and Van Hoffwegen, P. (Eds.) (1996). *Irrigation Scheduling: From Theory to Practice*. FAO Water Report 8. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Τερζίδης, Γ.Α. και Παπαζαφειρίου, Ζ.Γ. (1997). *Γεωργική Υδραυλική*, Ζήτης, Θεσσαλονίκη, 501σ.

Thornthwaite, C.W. (1948). An Approach Toward a Rational Classification of Climate, *Geographical Review.iew* 38:55-94.

Turcan, J. (1981). Empirical-Regressive model for runoff forecast in the Bodrog System. *Vodohospdarsky Casopis*. 3/19 (in Slovak).

US Corps of Engineers (1975). Program description and users manual for the SSARR model. *North Pacific Division*, Portland, Oregon.
WMO (2010). Guide to Agricultural Meteorological Practices. WMO - No134.
Xiong, L. & Guo, S. (1999). A two-parameter monthly water balance model and its application. *Journal of Hydrology*, 216:111-123.
Yevjevich, V. (1972). *Probability and Statistics in Hydrology*. Water Resources Publications, Fort Collins, Colorado, USA.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 14
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΙ ΚΙΝΔΥΝΟΙ

Σύνοψη
Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζονται οι κύριοι περιβαλλοντικοί κίνδυνοι που επηρεάζουν τη γεωργία, την αγροτική παραγωγή και τα αγροτικά οικοσυστήματα. Αρχικά, παρουσιάζεται η διασύνδεση της κλιματικής αλλαγής με τους περιβαλλοντικούς κινδύνους. Έπειτα, αναλύονται οι πλημμύρες και η πλεονάζουσα βροχή, το χαλάζι, η ξηρασία, η ερημοποίηση, ο παγετός, ο καύσωνας και οι δασικές πυρκαγιές. Τέλος, επισημαίνονται τα χαρακτηριστικά του κάθε κινδύνου, οι μέθοδοι εκτίμησής του, καθώς και η σημασία τους για τη γεωργία.

Προαπαιτούμενη γνώση
Ο αναγνώστης απαιτείται να έχει βασικές γνώσεις φυσικής και μαθηματικών.
https://www.youtube.com/watch?v=rFQnDF7eMKk

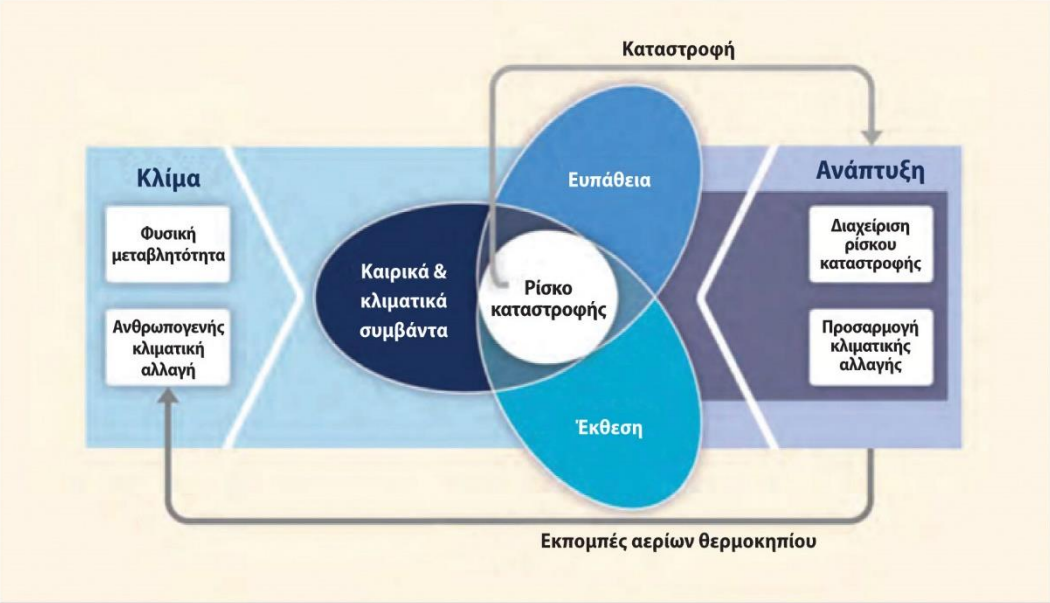
14.1. Κλιματική αλλαγή και περιβαλλοντικοί κίνδυνοι

Τα ακραία καιρικά φαινόμενα μπορεί να κυμαίνονται από επεισόδια μικρής διάρκειας, έντονα φαινόμενα περιορισμένης έκτασης, όπως ανεμοστρόβιλοι, στιγμιαίες πλημμύρες (flash floods) και ισχυρές καταιγίδες, μέχρι επιπτώσεις μεγάλων συστημάτων, όπως τροπικοί και εξωτροπικοί κυκλώνες, καθώς και επιπτώσεις παρατεταμένων ξηρασιών και πλημμυρών. Ξηρασίες και πλημμύρες είναι υπεύθυνες για τις πιο σημαντικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη ζωή και τις ιδιοκτησίες, οι οποίες μπορεί σε μια περιοχή να διαρκέσουν μήνες έως και χρόνια. Περίπου το % της εκτιμώμενης παγκόσμιας ζημιάς από φυσικές καταστροφές έχει μετεωρολογική προέλευση. Επίσης, μετεωρολογικοί παράγοντες συνεισφέρουν στο 87% των ανθρώπων που έχουν πληγεί από φυσικές καταστροφές και στο 85% των σχετικών θανάτων (WMO, 2004). Τα στατιστικά δεδομένα του ΕΛΓΑ για τις φυσικές καταστροφές και αποζημιώσεις του φυτικού τομέα για το έτος 2007 αφορούν κατ' εξαίρεση καλύψεις σε ποσοστό σχεδόν 34%, ζημιές από καύσωνα σε ποσοστό 33% και ακολουθούν η βροχόπτωση με 14% και το χαλάζι με 11%. Οι κατηγορίες των καλλιεργειών που επλήγησαν σημαντικά ήταν τα εσπεριδοειδή (22%), τα πυρηνόκαρπα (13%) και η άμπελος (11%). Τα καιρικά φαινόμενα εκδηλώθηκαν κυρίως την περίοδο Μαρτίου-Ιουλίου, οι δε αποζημιώσεις για τη συγκεκριμένη περίοδο αντιστοιχούν στο 75% του συνόλου τους. Όσον αφορά το ζωικό κεφάλαιο, οι αποζημιώσεις κατανέμονται ως εξής: 43% παθήσεις, 29% άγρια ζώα και 18% φυσικά αίτια. Το μεγαλύτερο ποσοστό των αποζημιώσεων (53%) δόθηκε για τα βοοειδή και έπειτα στα προβατοειδή (21%) και τα αιγοειδή (9,7%). Στην παράγραφο αυτή, ξετάζεται επιγραμματικά το πλαίσιο των σχέσεων μεταξύ κλιματικής αλλαγής και περιβαλλοντικών κινδύνων. Παρουσιάζονται, αρχικά, η διαχείριση διακινδύνευσης (ρίσκου) περιβαλλοντικών κινδύνων και, στη συνέχεια, οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στους περιβαλλοντικούς κινδύνους.

14.1.1. Διαχείριση διακινδύνευσης (ρίσκου) περιβαλλοντικών κινδύνων

Φυσικός περιβαλλοντικός κίνδυνος (hazard) θεωρείται μια φυσικά εμφανιζόμενη ή προκαλούμενη από τον άνθρωπο διαδικασία (ή συμβάν) που μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια, δηλαδή μια γενική πηγή μελλοντικού κινδύνου (Smith, 2013). Φυσική καταστροφή (disaster) θεωρείται ένα πραγματικό συμβάν ή γεγονός, παρά μια δυνητική απειλή. Έτσι, μια καταστροφή μπορεί να είναι απλώς η υλοποίηση ή η πραγματοποίηση του κινδύνου. Επίσης, διακινδύνευση ή ρίσκο (risk) είναι το μέγεθος της δυνητικής απώλειας σε ανθρώπινες ζωές, τραυματισμούς ατόμων, ζημιές σε ιδιοκτησίες και της διακοπή της οικονομικής δραστηριότητας σε μια περιοχή που βρίσκεται σε κίνδυνο, σε συγκεκριμένη τοποθεσία και περίοδο αναφοράς. Επιπλέον, ευπάθεια (vulnerability) είναι οι συνθήκες που προσδιορίζονται από φυσικούς, περιβαλλοντικούς, οικονομικούς και κοινωνικούς παράγοντες ή διαδικασίες, και αυξάνουν την τρωτότητα μιας κοινότητας στις επιπτώσεις των κινδύνων (UN/IDRS, 2005). Τέλος, ανωμαλία θεωρείται η απόκλιση της τιμής μιας μετεωρολογικής μεταβλητής από την κανονική τιμή (μέση) για την ίδια περίοδο.
Τις τελευταίες δεκαετίες, αυξανόμενη είναι η συνειδητοποίηση της διακινδύνευσης ή του ρίσκου για το περιβάλλον, όπως και η ανησυχία για τις συνεχιζόμενες πιθανές ζημιές που προκαλούνται από καταστροφές, όπως η ξηρασία. Πράγματι, η πρόσφατη ειδική έκθεση σχετικά με τη διαχείριση των κινδύνων από ακραία φαινόμενα και καταστροφές για προσαρμογές στην αλλαγή του κλίματος (SREX: Special Report on Risk of Extreme Events) (IPCC, 2012) εστιάζεται στη σχέση μεταξύ της κλιματικής αλλαγής και των ακραίων καιρικών

και κλιματικών φαινομένων, τις επιπτώσεις τους και τις στρατηγικές διαχείρισης. Η κατανόηση των ακραίων φαινομένων και καταστροφών είναι προϋπόθεση για την ανάπτυξη στρατηγικών προσαρμογής στο πλαίσιο της κλιματικής αλλαγής και τη μείωση των καταστροφών στο πλαίσιο της διαχείρισης ρίσκου. Τα ακραία φαινόμενα και οι περιβαλλοντικοί κίνδυνοι, όπως η ξηρασία, αναμένεται να έχουν μεγαλύτερες επιπτώσεις σε τομείς συνδεόμενους με το κλίμα, όπως η γεωργία και η επισιτιστική ασφάλεια.
Στο Σχήμα 14.1 παρουσιάζεται το πλαίσιο των διασυνδέσεων μεταξύ κλιματικής αλλαγής και περιβαλλοντικών καταστροφών. Ειδικότερα, περιγράφεται η επίδραση της φυσικής κλιματικής μεταβλητότητας και της ανθρωπογενούς κλιματικής αλλαγής στα κλιματικά ακραία φαινόμενα και καιρικά συμβάντα που μπορεί να συνεισφέρουν σε καταστροφές, καθώς και στην έκθεση και ευπάθεια της κοινωνίας και των φυσικών οικοσυστημάτων. Επίσης, παρουσιάζεται ο ρόλος της ανάπτυξης σε τάσεις έκθεσης και ευπάθειας, σε επιπλοκές διακινδύνευσης καταστροφών και αλληλοεπιδράσεις μεταξύ καταστροφών και ανάπτυξης.



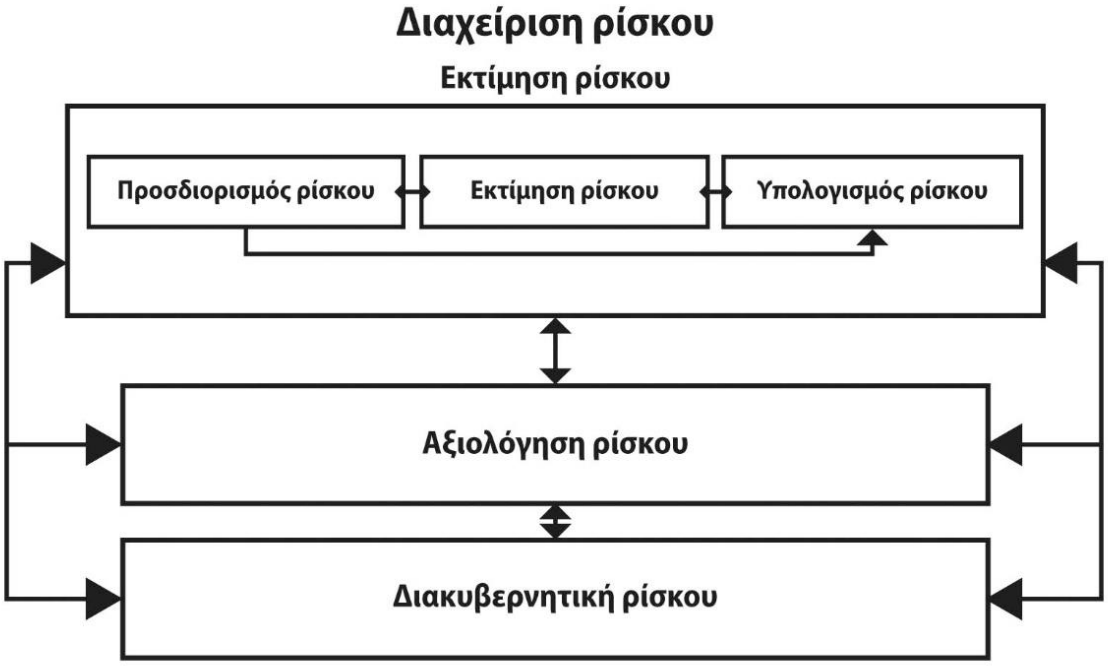
Σχήμα 14.1. *Πλαίσιο διασυνδέσεων κλιματικής αλλαγής και περιβαλλοντικών κινδύνων.*

Μια ολιστική και ολοκληρωμένη προσέγγιση περιβαλλοντικών κινδύνων έχει σταδιακά εξετάσει τη χρήση κοινών μεθοδολογιών, όπως η ανάλυση ρίσκου, που περιλαμβάνει την εκτίμηση και διαχείριση των κινδύνων. Πράγματι, μέσω της ανάλυσης ρίσκου, γίνονται προσπάθειες ανάπτυξης προληπτικών μέτρων και διαδικασιών ξηρασίας πριν από την κρίση. Γενικά, οι μεθοδολογίες εκτίμησης κινδύνων περιλαμβάνουν τρία στάδια ή τομείς: πρόγνωση και έγκαιρες προειδοποιήσεις (πριν εκδηλωθεί το φαινόμενο), παρακολούθηση (στη διάρκεια εκδήλωσης μιας φυσικής καταστροφής) και εκτίμηση της ζημιάς (μετά το τέλος μιας καταστροφής), όπως φαίνεται στο Σχήμα 14.2. Επιπλέον, ο προσδιορισμός των κινδύνων συνεπάγεται την ποσοτικοποίηση, παρακολούθηση και επικινδυνότητα της εκδήλωσης, τη στατιστική συμπερασματολογία, καθώς και την ανάπτυξη βάσης δεδομένων που να περιλαμβάνει καταγραφές και ιστορικές πληροφορίες για την ξηρασία και τις επιπτώσεις της. Επίσης, η εκτίμηση ρίσκου συνεπάγεται τον κίνδυνο αυτών των γεγονότων, δηλαδή τις πιθανότητες εκδήλωσης, καθώς και τη σχέση μεγέθους-διάρκειας-συχνότητας και περιοχικής έκτασης, για την αξιολόγηση της επικινδυνότητας. Τέλος, η αξιολόγηση ρίσκου περιλαμβάνει εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων και ανάλυση κόστους-οφέλους των επιλογών προσαρμογής, για την ανάπτυξη μέτρων αντιμετώπισης. Επισημαίνεται ότι οι σημερινές επιστημονικές και τεχνολογικές δυνατότητες της τηλεπισκόπησης καλύπτουν και τους τρεις τομείς.

14.1.2. Επιπτώσεις κλιματικής αλλαγής σε περιβαλλοντικούς κινδύνους

Επισημαίνονται μερικές σημαντικές πλανητικές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στα ακραία φαινόμενα μέχρι σήμερα (IPCC, 2007). Παρουσιάζονται επιγραμματικά οι αλλαγές που έχουν παρατηρηθεί, καθώς και οι προβαλλόμενες μέχρι το 2100, λόγω κλιματικής αλλαγής, σε βασικές μετεωρολογικές μεταβλητές και περιβαλλοντικούς κινδύνους (IPCC, 2012):

- **Θερμοκρασία**. Πρόσφατες έρευνες δείχνουν ότι ο αριθμός και η ένταση των ακραίων φαινομένων μπορεί να αυξάνονται όσο η πλανητική θερμοκρασία αυξάνεται εξαιτίας της κλιματικής αλλαγής (IPCC, 2012). Είναι πολύ πιθανή η μείωση του αριθμού των ασυνήθιστα ψυχρών ημερών και νυχτών σε πλανητική κλίμακα. Επίσης, είναι πολύ πιθανή η αύξηση του αριθμού των ασυνήθιστα θερμών ημερών και νυχτών σε πλανητική κλίμακα. Υπάρχει μεσαία εμπιστοσύνη στην αύξηση της διάρκειας ή του αριθμού των θερμών διαστημάτων ή κυμάτων καύσωνα σε πολλές περιοχές. Ακόμα, υπάρχει χαμηλή ή μεσαία εμπιστοσύνη σε τάσεις ακραίων θερμοκρασιών σε μερικές μικρές περιοχές. Οι αιτίες των τάσεων για θερμές και ψυχρές ημέρες και νύχτες σε πλανητική κλίμακα είναι, πιθανώς, ανθρωπογενείς. Ωστόσο, σε περιοχικό επίπεδο, δεν υπάρχουν σαφείς αιτίες των τάσεων. Όσον αφορά την προβολή των αλλαγών μέχρι το 2100, εκτιμάται ουσιαστικά μια βέβαιη μείωση της συχνότητας και του μεγέθους των ασυνήθιστα ψυχρών ημερών και νυχτών σε πλανητική κλίμακα. Αντίθετα, εκτιμάται ουσιαστικά μια βέβαιη αύξηση της συχνότητας και του μεγέθους των ασυνήθιστα θερμών ημερών και νυχτών σε πλανητική κλίμακα. Επίσης, εκτιμάται ως πολύ πιθανή μια αύξηση της διάρκειας, της συχνότητας ή/και της έντασης θερμών διαστημάτων ή κυμάτων καύσωνα, κυρίως το καλοκαίρι, στις περισσότερες ηπειρωτικές περιοχές.



Σχήμα 14.2. *Εκτίμηση και διαχείριση ρίσκου.*

- **Βροχή**. Είναι πιθανές οι στατιστικά σημαντικές αυξήσεις του αριθμού των επεισοδίων έντονων βροχοπτώσεων σε περισσότερες περιοχές απ' ό,τι οι αντίστοιχες μειώσεις, αλλά με έντονες διαφοροποιήσεις των τάσεων σε περιοχική κλίμακα. Επίσης, υπάρχει μεσαία εμπιστοσύνη ότι ανθρωπογενείς αιτίες έχουν συνεισφέρει στην εντατικοποίηση των ακραίων βροχοπτώσεων σε πλανητική κλίμακα. Επιπλέον, σχετικά με τις μεταβολές στην κυκλοφορία της ατμόσφαιρας, φαίνεται ότι η οφειλόμενη σε ανθρωπογενή αίτια κλιματική αλλαγή επηρεάζει την ιχνηλάτηση των καταιγίδων, όπως επίσης τη θερμοκρασία και τον άνεμο. Ακόμα, εκτιμάται πιθανή αύξηση της συχνότητας ισχυρών

επεισοδίων βροχής ή αύξηση του συνολικού ποσοστού των ισχυρών βροχοπτώσεων σε πολλές περιοχές του πλανήτη, ιδιαίτερα στα υψηλά πλάτη και στις τροπικές περιοχές, και το χειμώνα στα βόρεια μέσα πλάτη.

- **Άνεμος**. Υπάρχει χαμηλή εμπιστοσύνη στις τάσεις λόγω ανεπαρκών ενδείξεων, καθώς και στις αιτίες των τάσεων. Επίσης, υπάρχει χαμηλή εμπιστοσύνη στις προβολές των ακραίων ανέμων μέχρι το 2100, εκτός από τις περιπτώσεις τροπικών κυκλώνων.
- **Πλημμύρες**. Υπάρχει διαθέσιμη περιορισμένη, προς μεσαία διαπίστωση για την εκτίμηση κλιματικών αλλαγών που έχουν παρατηρηθεί στο μέγεθος και τη συχνότητα πλημμυρών σε περιοχική κλίμακα. Επιπλέον, υπάρχει χαμηλή εμπιστοσύνη σε πλανητική κλίμακα ακόμα και στις ενδείξεις τέτοιων αλλαγών. Επίσης, υπάρχει υψηλή εμπιστοσύνη στην τάση για πρόωρη εμφάνιση εαρινών πλημμυρικών αιχμών λόγω τήξης χιονιού. Επισημαίνεται ότι υπάρχει χαμηλή εμπιστοσύνη ότι η ανθρωπογενής θέρμανση έχει επηρεάσει το μέγεθος ή τη συχνότητα πλημμυρών σε πλανητική κλίμακα. Επίσης, υπάρχει μεσαία, προς υψηλή εμπιστοσύνη στα ανθρωπογενή αίτια των αλλαγών σε κάποιες συνιστώσες του κύκλου του νερού, όπως ο υετός και η τήξη του χιονιού, που οδηγούν σε πλημμύρες. Επιπλέον, εκτιμάται ότι οι πλανητικές προβολές μέχρι το 2100 αλλαγών στο μέγεθος και τη συχνότητα πλημμυρών έχουν χαμηλή εμπιστοσύνη, λόγω ανεπαρκών ενδείξεων. Ακόμα, υπάρχει μεσαία εμπιστοσύνη ότι οι προβαλλόμενες μέχρι το 2100 αλλαγές σε ισχυρές βροχοπτώσεις συνεισφέρουν σε τοπικές πλημμύρες, σε κάποιες λεκάνες απορροής ή περιοχές. Τέλος, εκτιμώνται ως πολύ πιθανές οι πρόωρες εαρινές πλημμυρικές αιχμές λόγω τήξης του χιονιού.
- **Ξηρασία**. Γενικά, παρατηρείται αύξηση των ξηρασιών από το 1970 μέχρι σήμερα στις περισσότερες περιοχές του πλανήτη. Επιπλέον, υπάρχει μεσαία εμπιστοσύνη ότι κάποιες περιοχές του κόσμου έχουν δεχθεί περισσότερο έντονες και μεγαλύτερης διάρκειας ξηρασίες, κυρίως στη νότια Ευρώπη και τη δυτική Αφρική, ωστόσο υπάρχουν και αντίθετες τάσεις. Επίσης, υπάρχει μεσαία εμπιστοσύνη ότι ανθρωπογενή αίτια έχουν συνεισφέρει σε κάποιες αλλαγές που έχουν παρατηρηθεί σε πεδία ξηρασιών. Ακόμα, υπάρχει χαμηλή εμπιστοσύνη σε αλλαγές στην ξηρασία μεμονωμένων περιοχών λόγω ανεπαρκών ενδείξεων. Επιπλέον, υπάρχει μεσαία εμπιστοσύνη στην εκτιμώμενη μέχρι το 2100 αύξηση της δριμύτητας και διάρκειας των ξηρασιών σε κάποιες περιοχές του κόσμου, όπως στη νότια Ευρώπη και τη Μεσόγειο, την κεντρική Ευρώπη, την κεντρική βόρεια Αμερική, την κεντρική Αμερική και το Μεξικό, τη νοτιοανατολική Βραζιλία και τη νότια Αφρική. Γενικά, υπάρχει χαμηλή εμπιστοσύνη για άλλες περιοχές λόγω διαφορετικών μελλοντικών εκτιμήσεων.

14.2. Πλημμύρες και πλεονάζουσα βροχή

Η διάρκεια και η συχνότητα των ακραίων βροχοπτώσεων αποτελούν σημαντικά κλιματολογικά στοιχεία, που πρέπει να εξετάζονται στη μετεωρολογία, τη γεωργία, την υδρολογία και τα δημόσια έργα. Η γνώση τους είναι απαραίτητη για το σχεδιασμό υδραυλικών έργων, δρόμων και συστημάτων αποχέτευσης, καθώς και δικτύων αποχέτευσης ομβρίων υδάτων σε μεγάλες υποδομές. Επιπλέον, οι εντάσεις των βροχοπτώσεων θα μπορούσαν να είναι μια πολύ χρήσιμη μετεωρολογική παράμετρος, για την εκτίμηση της κλιματικής αλλαγής και την αξιολόγηση των πιθανών επιπτώσεων σε συγκεκριμένες γεωργικές περιοχές. Έντονες βροχοπτώσεις στον πλανήτη έχουν προκαλέσει μεγάλες ζημιές στη γεωργική παραγωγή. Το κόστος των ζημιών των καλλιεργειών κατά τις επόμενες δεκαετίες θα μπορούσε να αυξηθεί δραματικά. Ωστόσο, οι τρέχουσες εκτιμήσεις των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στη γεωργία δεν έχουν ποσοτικοποιήσει τις αρνητικές επιπτώσεις στη φυτική παραγωγή από τις αυξημένες ισχυρές βροχοπτώσεις και πλημμύρες.

Οι καταστροφικές πλημμύρες είναι το κοινό αποτέλεσμα κοινωνικών και κλιματικών παραγόντων, καθώς και οικολογικών και γεωλογικών. Όπως οι κοινωνικές επιπτώσεις που σχετίζονται με το κλίμα έχουν αυξηθεί, έτσι και η μεταβλητότητα του κλίματος προκαλεί όλο και μεγαλύτερη ανησυχία στους υπεύθυνους για τη λήψη αποφάσεων. Σύμφωνα με τη Διακυβερνητική Επιτροπή για την Αλλαγή του Κλίματος (Intergovernmental Panel on Climate Change/IPCC): «Υπάρχουν τώρα όλο και περισσότερες αποδείξεις υποδηλώνουν ότι ένα θερμότερο κλίμα θα οδηγήσει σε εντονότερο υδρολογικό κύκλο, οδηγώντας σε πιο έντονες βροχοπτώσεις»'. Σε πιο πρόσφατη θεωρητική ανάπτυξη και μοντελοποίηση έχει υποστηριχθεί ή υπόθεση αυτή, που έχει επιβεβαιωθεί και από παρατηρήσεις (Karl και Knight, 1998).

Με βάση αυτές τις μελέτες, εκτιμάται ότι ο ενισχυμένος υδρολογικός κύκλος ευθύνεται για την αύξηση των ζημιών από πρόσφατες πλημμύρες. Πρακτικά, αυτό σημαίνει ότι όσο περισσότερη βροχόπτωση, τόσο περισσότερες ζημιές αναμένονται από τις πλημμύρες. Επισημαίνεται ο σημαντικός ρόλος της βροχόπτωσης

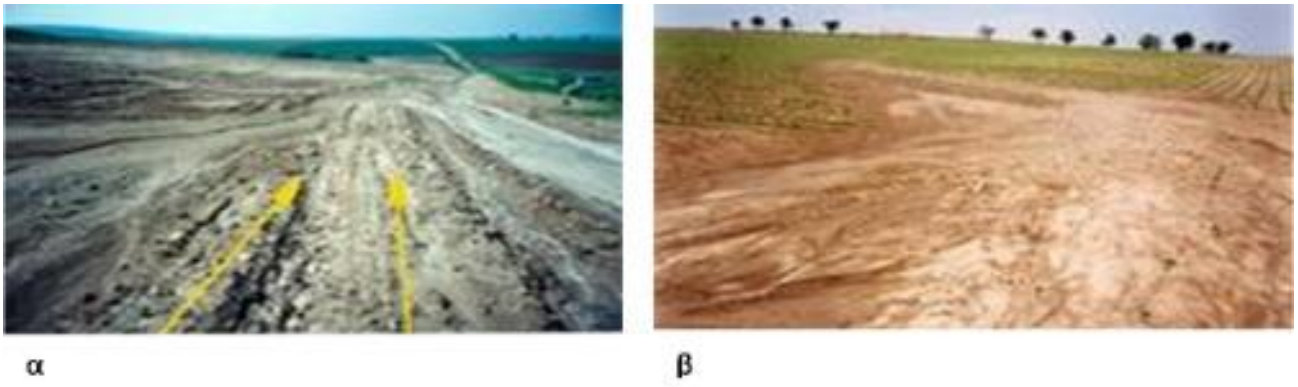
στην έρευνα της πλημμύρας. Αναφέρονται τα εξής δέκα μέτρα για τη βροχόπτωση, που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των επιπτώσεων από πλημμύρες (Pielke & Downton, 2002):

(1) συνολική βροχόπτωση,
(2) αριθμός ημερών με βροχή,
(3) αριθμός ημερών ακραίων βροχοπτώσεων (>2 ίντσες),
(4) αριθμός ισχυρών βροχοπτώσεων διάρκειας 2 ημερών,
(5) αριθμός ισχυρών βροχοπτώσεων διάρκειας 3 ημερών,
(6) αριθμός ισχυρών βροχοπτώσεων διάρκειας 5 ημερών,
(7) αριθμός ισχυρών βροχοπτώσεων διάρκειας 7 ημερών,
(8) ποσοστό βροχοπτώσεων μιας περιοχής πολύ πάνω από το κανονικό τη χειμερινή περίοδο (Οκτώβριος-Απρίλιος),
(9) ποσοστό μιας περιοχής με αριθμό υγρών ημερών πολύ πάνω από το φυσιολογικό,
(10) ποσοστό μιας περιοχής με πολύ πάνω από το κανονικό της συνολικής ετήσιας βροχόπτωσης από μιας ημέρας ακραία γεγονότα.

Πρόσφατα στοιχεία δείχνουν ότι οι συνολικές ετήσιες βροχοπτώσεις και οι έντονες βροχοπτώσεις αυξήθηκαν σε πολλά μέρη του κόσμου στη διάρκεια του περασμένου αιώνα, ιδιαίτερα τις δύο τελευταίες δεκαετίες (Milly et al., 2002), με συνέπεια να παρατηρούνται πολύ συχνά μεγάλες απώλειες στη συγκομιδή και άλλες ζημίες λόγω πλημμυρών (Chagnon et al., 1997). Ο προσδιορισμός αιτίου και αιτιατού μεταξύ των αυξήσεων των βροχοπτώσεων και των ζημιών από τις πλημμύρες είναι δύσκολος, λόγω των ταυτόχρονων αλλαγών στην αύξηση του πληθυσμού, την οικονομική ανάπτυξη και τις υποδομές, μεταξύ άλλων. Ωστόσο, ο έλεγχος των πλημμυρών και προσπάθειες έγκαιρης προειδοποίησης τη στιγμή που παρατηρούνται τάσεις για αυξημένες βροχοπτώσεις και πιο ακραία φαινόμενα αναμένεται να εντείνει τη μελλοντική αλλαγή του κλίματος, γεγονός που θα οδηγήσει σε μεγαλύτερη πιθανότητα πλημμύρας και, ως εκ τούτου, σε αυξημένες εκτιμώμενες ζημιές στη γεωργική παραγωγή (Reilly et al., 2001). Σκοπός των κλιματολογικών ερευνών είναι η ελάττωση των αβεβαιοτήτων που υπάρχουν σε προβλέψεις για τοπικές διαφοροποιήσεις στο κλίμα και επιπτώσεις αυτών στο υδάτινο ισοζύγιο των περιοχών, δηλαδή η καλύτερη πρόβλεψη του υδρολογικού κύκλου και της κλιματικής αλλαγής σε νέφη, ωκεανούς και στρώματα πάγου.

14.2.1. Ζημιές ακραίων βροχοπτώσεων

Στις υπάρχουσες κλιματικές συνθήκες, οι ζημιές στη γεωργική παραγωγή λόγω υπερβολικής βροχόπτωσης μπορεί να είναι σημαντικές. Για παράδειγμα, οι πλημμύρες στις μεσοδυτικές πολιτείες των ΗΠΑ το 1993 προκάλεσαν ζημιές στους αγρότες που έφτασαν περίπου τα 6-8 δισεκατομμύρια δολάρια, περίπου το 50% των συνολικών απωλειών από τις πλημμύρες (FEMA, 1995). Επίσης, η γεωργική παραγωγή επηρεάστηκε αρνητικά από τις πλημμύρες στη Βόρεια Ντακότα των ΗΠΑ το 1997, που προκάλεσε συνολικές ζημιές περίπου 1 δισεκατομμυρίου δολαρίων. Ακόμα, οι πλημμύρες στο Μισισιπή των ΗΠΑ το 2001 καθυστέρησαν τη φύτευση. Έντονες βροχοπτώσεις, σε συνδυασμό με πλημμύρες, θα μπορούσαν να προκαλέσουν επίσης διάβρωση του εδάφους σε γεωργικές εκτάσεις. Παραδείγματα της διάβρωσης του εδάφους ύστερα από έντονες βροχοπτώσεις παρουσιάζονται στο Σχήμα 14.3.



Σχήμα 14.3. *Διάβρωση εδάφους ύστερα από έντονες βροχοπτώσεις.*

Όχι μόνο οι άμεσες ζημιές από πλημμύρες, αλλά και η πλεονάζουσα υγρασία του εδάφους είναι ένα σημαντικό στοιχείο των ζημιών στις καλλιέργειες, μαζί με τις ακραίες βροχοπτώσεις. Υπερβολικά υγρά εδάφη βλάπτουν άμεσα τις καλλιέργειες, τόσο πάνω, όσο και κάτω από το έδαφος, λόγω των ανοξικών συνθηκών, του αυξημένου κινδύνου ασθενειών των φυτών και προσβολής εντόμων (Ashraf και Habib-ur-Rehman, 1999), καθώς και καθυστερημένης φύτευσης ή συγκομιδής, εξαιτίας τεχνικών δυσκολιών. Στη διάρκεια των πλημμυρών του Μισισιπή το 1993, περίπου το 70% των συνολικών απωλειών συγκομιδής σημειώθηκαν σε ορεινές περιοχές, εξαιτίας του κορεσμού των εδαφών από τις σφοδρές βροχοπτώσεις. Τα τελευταία είκοσι χρόνια, η υπερβολική υγρασία του εδάφους στοιχίζει στους αγρότες της Ιόβα των ΗΠΑ πέντε φορές περισσότερο σε σύγκριση με τις άμεσες ζημιές από πλημμύρες, σύμφωνα με τα στοιχεία ασφάλισης των καλλιεργειών. Παρά τον κίνδυνο αύξησης των απωλειών των καλλιεργειών λόγω πλημμυρών και υπερβολικής βροχόπτωσης στο πλαίσιο της κλιματικής αλλαγής, η πιθανή ζημιά στη γεωργική παραγωγή δεν έχει ποσοτικοποιηθεί με επικαιροποιημένες εκτιμήσεις της γεωργικής παραγωγής. Προκειμένου να ποσοτικοποιηθεί η σημασία των επιπτώσεων της υπερβολικής υγρασίας του εδάφους στις τρέχουσες και προβλεπόμενες μελλοντικές εκτιμήσεις φυτικής παραγωγής, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ένα απλουστευμένο μοντέλο (Rosenzweig et al., 2002).

14.2.2. Πλημμυρικές απορροές

Ο υπολογισμός των εισροών και εκροών του νερού που απεικονίζεται στον υδρολογικό κύκλο ονομάζεται ισοζύγιο νερού. Ειδικότερα, στις τρεις φάσεις, δηλαδή εξάτμιση, βροχόπτωση και απορροή, μπορεί να παρατηρηθούν μεταφορά νερού, καθώς και προσωρινή αποθήκευση και μεταβολή της κατάστασής του. Η μεταβολή της ποσότητας του νερού, που αναφέρεται σε μια φάση ή και σε ένα στάδιο της φάσης, μπορεί να εκτιμηθεί με τη γνωστή εξίσωση υδρολογικού ισοζυγίου:

$$\Delta S = I - O \quad (14.1)$$

όπου I είναι η εισροή νερού σε δεδομένη περιοχή στη διάρκεια ορισμένου χρόνου, O η εκροή νερού από την περιοχή στον ίδιο χρόνο και ΔS η μεταβολή του όγκου του νερού στην ίδια περιοχή και στον ίδιο χρόνο.

Όπως έχει ήδη επισημανθεί, η φύση της γήινης επιφάνειας επηρεάζει τη ροή του νερού. Από τα κατακρημνίσματα που πέφτουν στην επιφάνεια της Γης, ένα μέρος συγκρατείται στην επιφάνεια της βλάστησης, και κυρίως στις κόμες των δένδρων και των θάμνων, ενώ το υπόλοιπο επηρεάζεται από τη σύσταση του εδάφους. Είναι προφανές ότι μια γυμνή σε βλάστηση έκταση και με μεγάλη κλίση θα δώσει μια τελείως διαφορετική απορροή σε δοσμένη βροχόπτωση συγκρινόμενη με μια επιφάνεια με μεγάλη φυτοβλάστηση και μικρές κλίσεις. Καθώς η αστικοποίηση και η ανάπτυξη της γεωργίας ενισχύονται, οι διαφοροποιήσεις στα χαρακτηριστικά του εδάφους επηρεάζουν τη διασύνδεση της βροχόπτωσης με την απορροή. Επίσης, άλλα υδρολογικά χαρακτηριστικά, όπως οι υπόγειοι υδροφόροι ορίζοντες και τα οργανικά φορτία, επηρεάζουν εξίσου την απορροή.

Η έννοια της υδρολογικής λεκάνης περιλαμβάνει τη διαδικασία σύνθεσης των ιδιοτήτων της λεκάνης που επηρεάζουν την υδρολογική συμπεριφορά. Σχετικά με το νερό στην επιφάνεια της Γης, εξετάζονται δύο άξονες, ο ένας αντιπροσωπεύει το σύστημα της ξηράς και ο άλλος το σύστημα του νερού (Σχήμα 14.4).

Στο Σχήμα 14.4 απεικονίζεται η διασύνδεση της ξηράς και του νερού. Ειδικότερα, ο κατακόρυφος άξονας περιλαμβάνει τα χαρακτηριστικά της ξηράς και του εδάφους, όπως η χρήση γης, ο τύπος του εδάφους και του κλίματος, το εύρος της κλίσης και ο άξονας της γήινης επιφάνειας. Πράγματι, ο άξονας της ξηράς μπορεί να χαρακτηριστεί χωρικά έντονος, αλλά χρονικά μεταβαλλόμενος πολύ αργά. Αντίστοιχα, ο οριζόντιος άξονας (Σχήμα 14.4) περιλαμβάνει τα χαρακτηριστικά του νερού. Όπως έχει ήδη επισημανθεί, ο τύπος και οι συνθήκες που επικρατούν στη γήινη επιφάνεια επηρεάζουν τη ροή και την ποιότητα του νερού. Οι επιδράσεις αυτές μπορούν να μετρηθούν από τη μέση ετήσια ροή (water yield), τις πλημμύρες ή τις πλημμυρικές αιχμές, την επανατροφοδότηση και την άντληση των υπόγειων νερών, καθώς και τις συγκεντρώσεις των ρυπαντών και τη μεταφορά ιζημάτων, δηλαδή το βαθμό διάβρωσης και τη μεταφορά και εναπόθεση ιζημάτων. Κατά συνέπεια, ο άξονας του νερού θεωρείται χωρικά μη μεταβαλλόμενος ή έντονος, αλλά χρονικά πολύ μεταβαλλόμενος. Η μεγάλη πρόκληση της χωρικής υδρολογίας είναι η σχέση μεταξύ της ξηράς και του νερού, δηλαδή η σύνδεση του χωρικά μεταβαλλόμενου χαρακτήρα της γήινης επιφάνειας με τα χρονικά μεταβαλλόμενα χαρακτηριστικά της απορροής και της μεταφοράς συστατικών από το νερό.



Σχήμα 14.4. *Αλληλοεπίδραση ξηράς και νερού.*

Οι σχέσεις μεταξύ των χερσαίων και των υδάτινων πόρων μπορούν να εκφραστούν από δείκτες ή συντελεστές, που ονομάζονται συντελεστές μετατροπής, επειδή περιγράφουν το χερσαίο σύστημα κατά τέτοιο τρόπο ώστε να μεταβάλλει την ποσότητα και την ποιότητα του νερού. Ειδικότερα, ο λόγος του ύψους απορροής (mm) προς το ύψος της αντίστοιχης βροχόπτωσης (mm), που ισούται με τον όγκο απορροής προς τον όγκο της βροχής, αποτελεί το συντελεστή απορροής C και εκφράζει το ποσοστό (%) της βροχής που απορρέει στην επιφάνεια του εδάφους. Συνεπώς, ο συντελεστής απορροής εκφράζει τις απώλειες που μεσολαβούν μεταξύ βροχόπτωσης και απορροής, από εξατμισοδιαπνοή, συγκράτηση σε κοιλότητες, διείσδυση στο έδαφος και συγκράτηση από τη φυτοβλάστηση. Για μια ορισμένη καταιγίδα, ο συντελεστής απορροής,C, μπορεί να οριστεί ως η τιμή της αιχμής της απορροής προς τη μέση ένταση της βροχόπτωσης ή, ακόμα, ως ο συνολικός όγκος της απορροής προς τον συνολικό όγκο της βροχόπτωσης, οπότε και αποτελεί τον στιγμιαίο συντελεστή απορροής. Αν όμως ο συντελεστής απορροής ορισθεί ως η τιμή της αιχμής απορροής με ορισμένη συχνότητα προς τη μέση ένταση της βροχόπτωσης της ίδιας συχνότητας, τότε παραμένει σταθερός για τη συγκεκριμένη λεκάνη απορροής. Συμπερασματικά, ο στιγμιαίος συντελεστής απορροής δεν μπορεί να συγχέεται με τον μηνιαίο ή τον μέσο ετήσιο συντελεστή, που χρησιμοποιείται κατά τον υπολογισμό του υδρολογικού ισοζυγίου της λεκάνης.

14.2.3. Αίτια πλημμυρών

Η απορροή είναι ένα φυσικό μέγεθος που μεταβάλλεται συνεχώς με την πάροδο του χρόνου. Αιφνίδιες ή έντονες βροχοπτώσεις ή ξηρές περίοδοι με σημαντική διάρκεια προκαλούν έντονες μεταβολές στη δίαιτα των ρευμάτων, που συχνά ασκούν δυσμενείς επιδράσεις ή οδηγούν σε καταστροφές. Για το λόγο αυτό, οι ακραίες τιμές της απορροής αποτελούν τη βάση κατά τον υπολογισμό των διαστάσεων των διαφόρων έργων και κατασκευών, για την αντιμετώπιση πολλών προβλημάτων της υδατικής οικονομίας.

Ακραίες τιμές της απορροής χαρακτηρίζονται οι στιγμιαίες απορροές με πολύ μεγάλο μέγεθος, δηλαδή οι πλημμυρικές αιχμές, που σχηματίζονται, κατά κανόνα, απότομα έπειτα από μια αντίστοιχη ξαφνική βροχόπτωση. Σε αυτές συμπεριλαμβάνονται επίσης οι ογκώδεις υδάτινες μάζες, που, παρότι δεν περιέχουν πλημμυρικές αιχμές, δηλαδή απόλυτα μέγιστες παροχές, σχηματίζουν εξαιρετικές και, γι' αυτό, πλημμυρογενείς απορροές. Για παράδειγμα, κατά τον υπολογισμό των διαστάσεων μιας ρυθμιστικής δεξαμενής, η απορροή με τον πιο μεγάλο όγκο έχει μεγαλύτερη σημασία, ενώ για τα αντιπλημμυρικά έργα στην κοίτη ενός ποταμού, καθοριστικός είναι ο ρόλος της αιχμής της πλημμυρικής παροχής. Βασική σημασία από υδρολογική άποψη έχει η πρόγνωση των ακραίων συμβάντων. Πρόγνωση δεν εννοείται μόνο η εκτίμηση της συχνότητας ενός υδρολογικού επεισοδίου με ορισμένο μέγεθος, αλλά και η πρόγνωση του μεγέθους και του χρόνου εμφάνισης μιας πλημμυρικής αιχμής.

Τα αίτια των πλημμυρικών αιχμών είναι πολλά. Τα σπουδαιότερα από αυτά είναι οι βροχοπτώσεις μεγάλης έντασης και διάρκειας, το λιώσιμο του χιονιού και των πάγων, και οι αιφνίδιες καταστροφές τεχνικών έργων αποταμίευσης νερού.

Γενικά, όπως και οι βροχοπτώσεις, οι απορροές ακολουθούν ανάλογες διακυμάνσεις σε σχέση και με το κλίμα μιας περιοχής. Στην Ελλάδα, που έχει ημίξηρο μεσογειακό κλίμα, μεγάλες απορροές παρατηρούνται το χειμώνα

και την άνοιξη, λόγω των βροχών και της τήξης του χιονιού, ενώ η απορροή διακόπτεται στα περισσότερα υδατορεύματα κατά το καλοκαίρι. Εκτός της εποχικής διακύμανσης, σε πολλές περιπτώσεις παρατηρούνται μόνιμες μεταβολές της απορροής, που συνήθως προέρχονται, μεταξύ άλλων, από τις ακόλουθες αιτίες: αστικοποίηση τμημάτων της υδρολογικής λεκάνης, εγκατάλειψη της υπαίθρου και ανάπτυξη αυτοφυούς βλάστησης στη λεκάνη απορροής, φυσικές καταστροφές, με κυριότερες το κάψιμο και η καταστροφή των δασών, αλλαγές στη χρήση γης, κατασκευή μεγάλων έργων αποθήκευσης και αξιοποίησης των υδατικών πόρων, όπως ταμιευτήρες, κατασκευή μεγάλων αναπτυξιακών έργων και άλλα συναφή. Μεταβολές στην απορροή αναμένονται, επίσης, από τις πιθανολογούμενες αλλαγές στη βροχόπτωση και τη θερμοκρασία, που αναμένεται να προκύψουν από την ενδεχόμενη κλιματική αλλαγή. Ως γνωστόν, το θέμα αυτό αποτελεί αντικείμενο τρέχουσας έρευνας, ωστόσο έχει ήδη αποδειχθεί ότι η απορροή είναι ένα υδρολογικό μέγεθος ιδιαίτερα ευαίσθητο στις κλιματικές αλλαγές ή την κλιματική αβεβαιότητα. Συνεπώς, αν πράγματι εξελίσσεται μια σταδιακή αλλαγή του κλίματος, η απορροή είναι η μεταβλητή που θα υποστεί σημαντικές μεταβολές στο μέγεθος και στη χρονική κατανομή της.

14.3. Χαλάζι

Το χαλάζι αποτελεί έναν φυσικό περιβαλλοντικό κίνδυνο και μπορεί μέσα σε ελάχιστα λεπτά της ώρας να καταστρέψει στη γεωργία ολόκληρες παραγωγές. Επειδή η ανάγκη για καταπολέμηση των καταστροφικών συνεπειών του χαλαζιού στη γεωργική παραγωγή ήταν πάντα επιτακτική, έχουν γίνει προσπάθειες για την αντιμετώπιση του πολύ πριν από την επαρκή κατανόηση και γνώση του φαινομένου.

14.3.1. Σχηματισμός χαλαζιού

Το χαλάζι σχηματίζεται πάντοτε μέσα σε καταιγιδοφόρα νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης (σωρείτες Cu, σωρειτομελανίες Cb) και κυρίως σε σωρειτομελανίες Cb. Τα νέφη αυτά σχηματίζονται μέσα σε ασταθείς συνθήκες στην ατμόσφαιρα και έχουν διάμετρο που μπορεί να κυμαίνεται από 0,1 έως 10 ή/και 30 km. Στα νέφη αυτά δημιουργούνται ισχυρά ανοδικά και καθοδικά ρεύματα, με ταχύτητες δεκάδων μέτρων ανά δευτερόλεπτο.

Τα ισχυρά ανοδικά ρεύματα δημιουργούν, με συμπύκνωση, περιεκτικότητες σε νερό (σε υγρή ή στερεά μορφή) της κλίμακας των ενός γραμμαρίου ανά κυβικό μέτρο αέρα ή/και περισσότερο. Τα νέφη αυτά είναι **ψυχρά** και εκτείνονται σε ύψος αρκετών χιλιομέτρων στην ατμόσφαιρα, φτάνοντας έως και την τροπόπαυση. Ένα νέφος καλείται **ψυχρό** όταν εκτείνεται στην ατμόσφαιρα σε ύψος πάνω από την ισόθερμη του μηδενός. Η διαφορά θερμοκρασίας μέσα σ' αυτά είναι μεγάλη, ξεκινώντας από αρκετούς βαθμούς πάνω από το μηδέν και φτάνοντας αρκετές δεκάδες κάτω από το μηδέν.

Στο Σχήμα 14.5 δίνεται η σχηματική παράσταση μιας καταιγίδας (α) σε κάτοψη και (β) σε κάθετη τομή. Τα βέλη παριστάνουν υποθετικές τροχιές σωματιδίων, που εισέρχονται στο νέφος από τα κατώτερα στρώματα. Λόγω των ισχυρών ανοδικών ρευμάτων στα νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης, τα υδροσταγονίδια, που βρίσκονται σε **υπέρτηξη,** είναι κυρίαρχα μέσα σ' αυτά. Ένα υγρό υδροσταγονίδιο λέγεται ότι είναι σε **υπέρτηξη** όταν εξακολουθεί να υπάρχει σε υγρή μορφή σε θερμοκρασία μικρότερη από το σημείο πήξης του. Παρ' όλο που η κατάσταση της υπέρτηξης ενός υγρού είναι γενικά ασταθής και η επίτευξη αυτής στο εργαστήριο περιλαμβάνει προσεκτικούς χειρισμούς, είναι πολύ συνηθισμένη σε υδροσταγονίδια που βρίσκονται μέσα στα νέφη στην ατμόσφαιρα.

Η πιθανότητα ύπαρξης παγοκρυστάλλων στο νέφος αυξάνεται όσο μειώνεται η θερμοκρασία κάτω από τους 0^{o} C με το ύψος. Έχει παρατηρηθεί ότι νέφη που έχουν κορυφές με θερμοκρασία από 0 έως -4^{o} C αποτελούνται πλήρως από υδροσταγονίδια σε υπέρτηξη. Αντίθετα, σε νέφη που έχουν κορυφές με θερμοκρασία -10^{o} C υπάρχει 50% πιθανότητα να ανιχνευτούν παγοκρύσταλλοι, ενώ σε νέφη με θερμοκρασία -20^{o} C η πιθανότητα ξεπερνά το 95%. Στις ανώτερες περιοχές του νέφους, η θερμοκρασία είναι πολύ κάτω από το 0, με αποτέλεσμα την αυτόματη πήξη των υδροσταγονιδίων του νέφους που βρίσκονται σε υπέρτηξη. Εξαιτίας των έντονων ανοδικών και καθοδικών κινήσεων που επικρατούν μέσα στα νέφη αυτού του τύπου, οι αρχικοί παγοκρύσταλλοι συγκρούονται με άλλα υδροσταγονίδια ή μεταξύ τους και αυξάνουν έτσι το μέγεθός τους. Εάν οι χαλαζόκοκκοι αποκτήσουν τέτοιο μέγεθος, ώστε τα ανοδικά ρεύματα να μην μπορούν να τους συγκρατήσουν, εγκαταλείπουν το νέφος και, πριν λιώσουν, πέφτουν στο έδαφος, δίνοντας έτσι το φαινόμενο του χαλαζιού.

Το χαλάζι χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή και μελέτη, εξαιτίας των καταστροφών που προκαλεί στη γεωργία και στην οικονομία γενικότερα. Η χαλαζόπτωση είναι συνήθως μικρής διάρκειας, λίγων λεπτών της ώρας, ενώ σπανιότατα φτάνει τη μία ώρα. Είναι φαινόμενο με αυστηρά τοπικό χαρακτήρα και παρακολουθεί την κίνηση του καταιγιδοφόρου νέφους.

14.3.2. Χωροχρονικά χαρακτηριστικά χαλαζιού

Υπό ακραίες συνθήκες, έχουν παρατηρηθεί χαλαζόκοκκοι με διάμετρο έως και 13 εκατοστά, ζυγίζοντας πάνω από μισό κιλό. Ωστόσο, χαλαζόκοκκοι με διάμετρο ενός εκατοστού είναι αρκετά συνηθισμένοι. Αν ένας χαλαζόκοκκος συγκεντρώσει στην πορεία του υδροσταγονίδια που βρίσκονται σε υπέρτηξη σε μεγάλο βαθμό, τότε μπορεί είτε να λιώσει πλήρως είτε να σχηματίσει ένα μείγμα από πάγο και νερό, οπότε το χαλάζι που πέφτει λέγεται υγρό χαλάζι. Η λεπτομερής εξέταση των κρυστάλλων που αποτελούν κάθε χαλαζόκοκκο, μέσα από διάφορα φίλτρα στο εργαστήριο, μπορεί να αποκαλύψει τον ακριβή τρόπο σχηματισμού του. Η επιφάνεια ενός χαλαζόκοκκου παρουσιάζει πολλές φορές εξογκώματα (λοβούς). Τα εξογκώματα αυτά οφείλονται στον τρόπο σχηματισμού του χαλαζόκοκκου, καθώς επικολλώνται σε αυτόν σταγόνες βροχής ή υγρού πάγου.

Η μέγιστη συχνότητα εμφάνισης του φαινομένου σημειώνεται στις περιοχές των μέσων γεωγραφικών πλατών, γιατί στις ισημερινές περιοχές το χαλάζι λιώνει, καθώς εγκαταλείπει το νέφος πριν προλάβει να φτάσει στο έδαφος. Κατά την **ψυχρή περίοδο**, στον ελληνικό χώρο η δημιουργία του χαλαζιού ευνοείται ιδιαίτερα όταν ψυχρές αέριες μάζες, κινούμενες γενικά από δυτικές προς ανατολικές διευθύνσεις, περνούν πάνω από το Ιόνιο πέλαγος και, μετά τον εμπλουτισμό τους με υδρατμούς, δίνουν χαλάζι στο τόξο δυτικής Ελλάδας-Κρήτης. Στη διάρκεια της **θερμής περιόδου**, πάνω από την ξηρά δημιουργούνται έντονες ανοδικές κινήσεις, λόγω της έντονης θέρμανσης του εδάφους, με συνέπεια την επικράτηση έντονης θερμικής ατμοσφαιρικής αστάθειας, προκαλώντας καταιγίδες, που συνοδεύονται από χαλάζι.

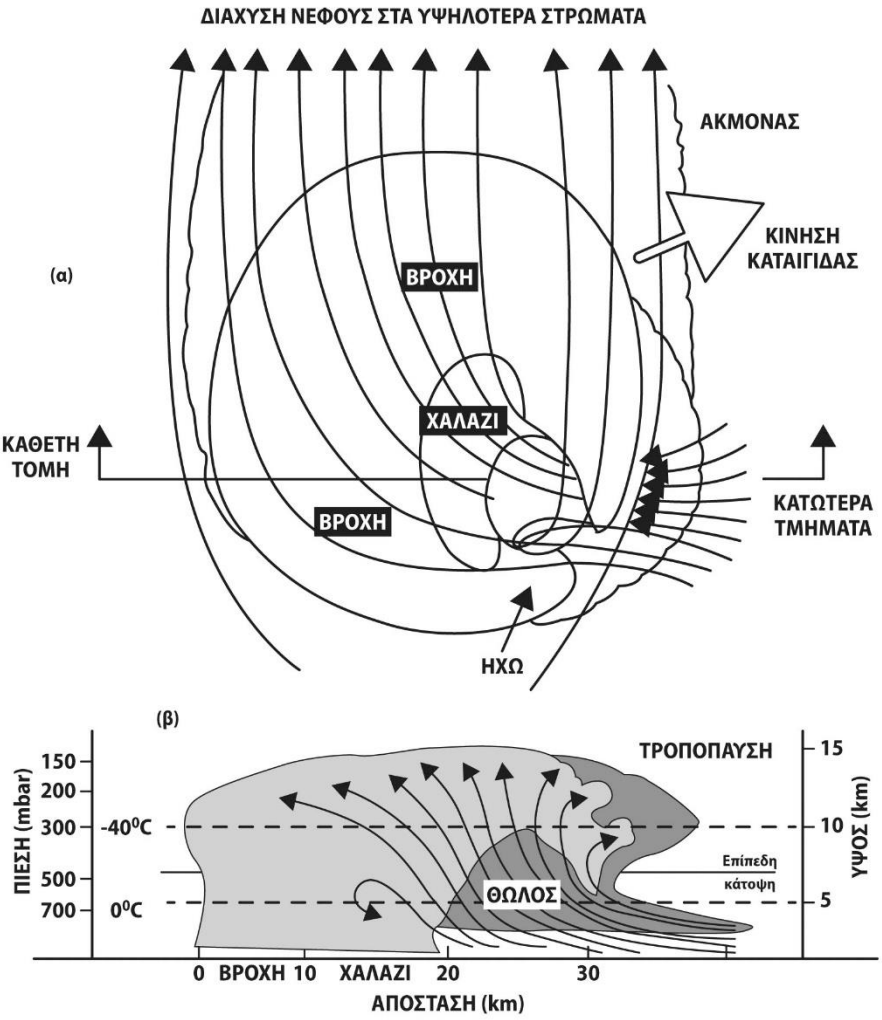
Κατά τους τρεις καλοκαιρινούς μήνες, καθώς και κατά τον Μάιο και τον Σεπτέμβριο, σημειώνονται οι μεγαλύτερες τιμές της συχνότητας εμφάνισης χαλαζιού κυρίως στην ηπειρωτική Ελλάδα, ενώ κατά τους υπόλοιπους μήνες, οι μεγαλύτερες τιμές της συχνότητάς του εμφανίζονται κυρίως στα νησιωτικά και παραλιακά τμήματα της χώρας. Ειδικότερα, αναλύοντας την περίοδο 1976-83, προκύπτει ότι ο Ιούνιος, ο Ιούλιος και ο Αύγουστος είναι οι πιο χαλαζόπληκτοι μήνες του έτους. Το ποσοστό του αριθμού των χαλαζοπτώσεων φαίνεται στον Πίνακα 14.1. Κατά τον Απρίλιο και τον Σεπτέμβριο, οι επιπτώσεις στις γεωργικές καλλιέργειες είναι ουσιαστικά ασήμαντες. Ο Ιούνιος και ο Ιούλιος είναι οι μήνες με τις μεγαλύτερες ζημιές στις γεωργικές καλλιέργειες από το χαλάζι.

14.3.3. Μεθοδολογίες πρόγνωσης και εκτίμησης χαλαζιού

Όπως σε κάθε περιβαλλοντικό κίνδυνο, οι μεθοδολογίες εκτίμησης χαλαζιού καλύπτουν τα τρία στάδια: πρόγνωση (πριν), παρακολούθηση (στη διάρκεια) και εκτίμηση της ζημιάς (μετά).

Περιοχή	Ποσοστό (%) αριθμού χαλαζοπτώσεων
Κεντρική και Ανατολική Μακεδονία	78,1
Θεσσαλία και Φθιώτιδα	82,3
Ημαθία-Πέλλα	82,5
Σέρρες	86,3
Καρδίτσα	89,7

Πίνακας 14.1. *Ποσοστό (%) θερινών χαλαζοπτώσεων σε περιοχές της Ελλάδας.*



Σχήμα 14.5. *Σχηματική παράσταση χαλαζοφόρου καταιγίδας.*

14.3.3.1. Ποσοτική πρόγνωση χαλαζιού

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι πρόγνωσης του χαλαζιού, της βραχείας διάρκειας (now-casting), καθώς και της ιχνηλάτησης καταιγίδων (storm tracking). Ενδεικτικά, αναφέρονται οι μέθοδοι πρόγνωσης συνοπτικής μετεωρολογίας, η αριθμητική πρόγνωση του καιρού, μέχρι μοντέλα νεφών μονοδιάστατα (1-D), δύο διαστάσεων ((2-D) και τριών διαστάσεων (3-D). Επίσης, επισημαίνεται η χρήση συστημάτων όπως είναι τα ραντάρ καιρού και οι δορυφόροι. Ωστόσο, για την ποσοτική πρόγνωση του χαλαζιού, επικρατέστερη μεθοδολογία θεωρείται εκείνη που συνδυάζει αποτελεσματικά μερικές ή όλες τις παραπάνω μεθόδους.

Παρουσιάζεται επιγραμματικά ο συνδυασμός μεθόδων που έχει εφαρμοστεί στο εθνικό πρόγραμμα αντιχαλαζικής προστασίας της Ελλάδας, στο οποίο περιλαμβάνονται ο συνοπτικός δείκτης μεταγωγής, η συνοπτική κλίμακα ταξινόμησης και ο υπολογισμός διαφόρων δεικτών ατμοσφαιρικής αστάθειας (Dalezios & Papamanolis, 1991). Η βάση είναι ένας συνοπτικός δείκτης μεταγωγής, που έχει προέλθει από μεταφορά τεχνολογίας και τεχνογνωσίας από Καναδά (Strong & Wilson, 1983). Ο συνοπτικός δείκτης CDC (Convective Day Category) συνδυάζει μεθόδους της θεωρίας αστάθειας υδροσταγονιδίων και μεταβλητές συνοπτικής κλίμακας, για την εκτίμηση του δυνητικού εύρους μεταγωγής μέσω αντικειμενικής πρόγνωσης. Ο δείκτης CDC προέρχεται από στατιστική γραμμική παλινδρόμηση, στην οποία συνδυάζονται διάφορες ανεξάρτητες μεταβλητές, βάσει της συσχέτισής τους με την εξαρτημένη μεταβλητή, που είναι ο δείκτης CDC. Πιο συγκεκριμένα, ο δείκτης CDC ονομάζεται Κατηγορία Ημέρας Μεταγωγής (CDC: Convective Day Category) και κάθε μέρα ορίζεται ως ο μέγιστος βαθμός έντασης μεταγωγής για μια περιοχή σε διακριτές κλάσεις. Οι κλάσεις περιλαμβάνουν όλους τους τύπους μεταγωγής, όπως είναι οι όμβροι, οι καταιγίδες και το χαλάζι διαφόρου μέγιστου μεγέθους. Επίσης, έχουν επιλεγεί 10 διεθνώς γνωστοί δείκτες ατμοσφαιρικής αστάθειας,

που αξιοποιούνται μαζί με τον CDC, για τη βέλτιστη ποσοτική πρόγνωση του χαλαζιού (Dalezios & Papamanolis, 1991).

14.3.3.2. Παρακολούθηση χαλαζιού και εκτίμηση ζημιάς

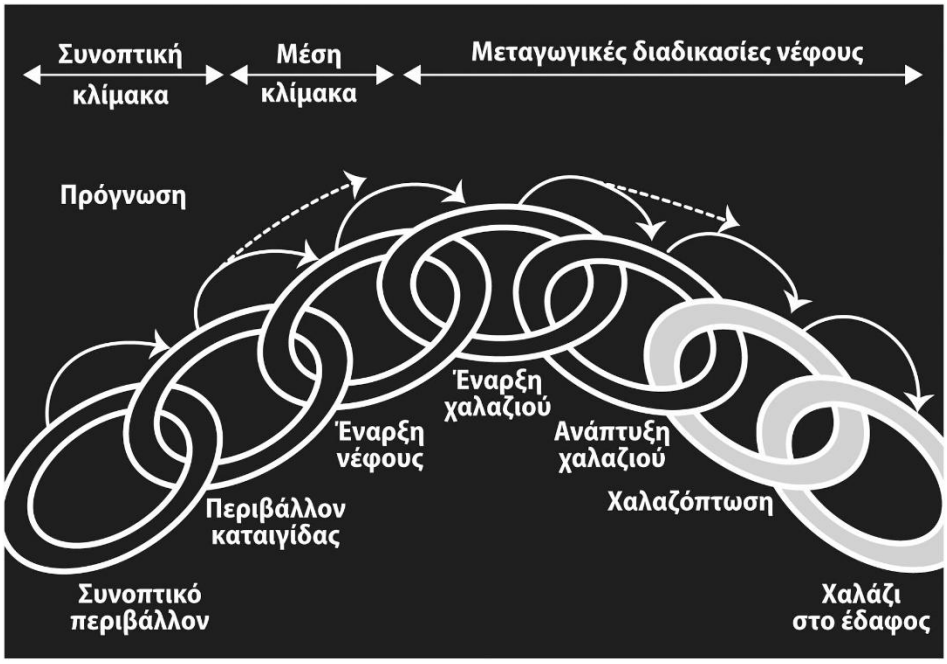
Στη διάρκεια της εξέλιξης μιας χαλαζοφόρου καταιγίδας, καθώς και στην εκτίμηση της ζημιάς μετά τη χαλαζόπτωση, χρησιμοποιούνται κυρίως δορυφορικά συστήματα, αλλά και συστήματα ραντάρ καιρού, που έχουν περιγραφεί στο Κεφάλαιο 4. Κρίνεται σκόπιμο να τονιστεί η μεγάλη σημασία των νέου τύπου ραντάρ, όπως είναι το ραντάρ πολικότητας, το ογκομετρικό ραντάρ, καθώς και το Doppler, που διαθέτουν πλέον την τεχνική δυνατότητα του άμεσου εντοπισμού και της διάκρισης μεταξύ χαλαζιού και βροχής, μέσω της λεγόμενης διαφορικής ανακλαστικότητας (differential reflectivity).

14.3.4. Μέθοδοι αντιχαλαζικής προστασίας

Η καταστρεπτικότητα του φαινομένου κάθε φορά ποικίλλει και σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να φτάσει έως και την ολική καταστροφή της γεωργικής παραγωγής. Η καταστρεπτικότητα εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, οι κυριότεροι εκ των οποίων είναι:

- τα χαρακτηριστικά της χαλαζόπτωσης, όπως είναι η διάρκεια, η πυκνότητα και η οριζόντια συνιστώσα του ανέμου κατά τη χαλαζόπτωση,
- τα χαρακτηριστικά των χαλαζοκόκκων, όπως είναι η μάζα (διάμετρος, κινητική ενέργεια), το σχήμα και η σκληρότητα, και
- τα χαρακτηριστικά του φυτού, όπως είναι το είδος, το στάδιο ανάπτυξης και η σφριγηλότητα του φυτού.

Οι κυριότεροι μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί για την αντιμετώπιση του φαινομένου περιλαμβάνουν: σπορά νεφών με χρήση αεροσκαφών και ραντάρ καιρού, σπορά νεφών με χρήση ρουκετών, γεννήτριες εδάφους, αντιχαλαζικά κανόνια ηχοβολής και αντιχαλαζικά δίχτυα προστασίας. Στο Σχήμα 14.6 απεικονίζεται η αλληλουχία της διαδικασίας ανάπτυξης υετού, η οποία καταγράφει την ακολουθία των καιρικών συμβάντων στις διάφορες κλίμακες, που οδηγούν στο χαλάζι. Ειδικότερα, ο συνοπτικός καιρός υπολογίζει το περιβάλλον καταιγίδας στη μέση κλίμακα, και στη συνέχεια στη μικροκλίμακα εξετάζεται η δημιουργία, ανάπτυξη και εξέλιξη του νέφους. Με τη σειρά του, το νέφος υπολογίζει αν και πότε θα αρχίσει να αναπτύσσεται χαλάζι, πόσο γρήγορα και μέχρι πότε θα αναπτύσσεται. Οι παράγοντες αυτοί καθορίζουν τον αριθμό και το μέγεθος των χαλαζόκοκκων που πέφτουν στο έδαφος.



Σχήμα 14.6. *Αλληλουχία κλιμάκων στη διαδικασία δημιουργίας και ανάπτυξης χαλαζιού*.

14.3.4.1. Σχεδίαση πειράματος αντιχαλαζικής προστασίας

Τα πειράματα ή τα προγράμματα αντιχαλαζικής προστασίας με σπορά νεφών μέσω της χρήσης αεροσκαφών βασίζονται στη θεωρία του πλεονεκτικού ανταγωνισμού (beneficial competition). Δηλαδή, χρησιμοποιείται ως υλικό σποράς ιωδιούχος άργυρος (AgI), που έχει την ιδιότητα να δημιουγεί πολλαπλάσιους πυρήνες συμπύκνωσης υδροσταγονιδίων μέσα στο νέφος. Συγκεκριμένα, ένα γραμμάριο AgI δημιουργεί δέκα χιλιάδες πυρήνες συμπύκνωσης. Επειδή η ενέργεια στο νέφος είναι δοσμένη κάθε χρονική στιγμή, με τη σπορά AgI στο νέφος από αεροσκάφη, αυξάνεται ο ανταγωνισμός μεταξύ των υδροσταγονιδίων του νέφους, ώστε να αποκτήσουν την ενέργεια αυτή. Αποτέλεσμα του ανταγωνισμού αυτού είναι η δημιουργία πολύ περισσότερων χαλαζόκοκκων, αλλά μικρότερης διαμέτρου απ' ό,τι με τη φυσική εξέλιξη του νέφους, ώστε, όταν πέφτουν το έδαφος, να προκαλούν μικρότερη ζημιά στη γεωργία.

Στην Ελλάδα, χρειάζεται καλή πρόγνωση του καιρού, γιατί η ανάπτυξη και ο κύκλος ζωής των καταιγίδων είναι σχετικά σύντομος. Επειδή δεν υπάρχουν μεγάλα δείγματα, δηλαδή 10-15 περιπτώσεις ανά έτος, η σχεδίαση ενός πειράματος χρειάζεται πολλά χρόνια (τουλάχιστον 5-7 χρόνια), για να προκύψουν ικανοποιητικά δείγματα, ώστε να δοθούν αξιόπιστες απαντήσεις. Κάθε πείραμα τροποποίησης του καιρού ταξινομείται σε τρεις επιμέρους ενότητες. Συγκεκριμένα:

- Η πρώτη ενότητα περιλαμβάνει τη γενική θεώρηση. Δίνεται ο ορισμός του φαινομένου, δηλαδή της καταπολέμησης του χαλαζιού, προσδιορίζονται οι οικονομικές ζημιές εξαιτίας του, εκτιμάται το αναμενόμενο όφελος από την αντιμετώπιση του φαινομένου και περιγράφεται η ακολουθούμενη πειραματική μεθοδολογία τροποποίησης καιρού, δηλαδή η μέθοδος που βασίζεται στη θεωρία του πλεονεκτικού ανταγωνισμού.
- Η δεύτερη ενότητα περιλαμβάνει τα ακολουθούμενα **στάδια**, δηλαδή τον τρόπο με τον οποίο δομείται το πρόγραμμα, τις συνιστώσες, δηλαδή τα στοιχεία που συνθέτουν το πρόγραμμα, και τις κλάσεις, δηλαδή τις ταξινομήσεις των διαφόρων ενεργειών για την εκτέλεση του προγράμματος.
- Η τρίτη ενότητα αφορά τη βελτίωση του πειράματος, δηλαδή την αξιολόγηση του πειράματος στα μέσα της χρονικής λειτουργίας του προγράμματος, και την αποδοχή των αναγκαίων διορθωτικών παρεμβάσεων, για την ορθολογικότερη αντιμετώπιση τόσο του επιχειρησιακού μέρους, όσο και της στατιστικής αξιολόγησης του προγράμματος.

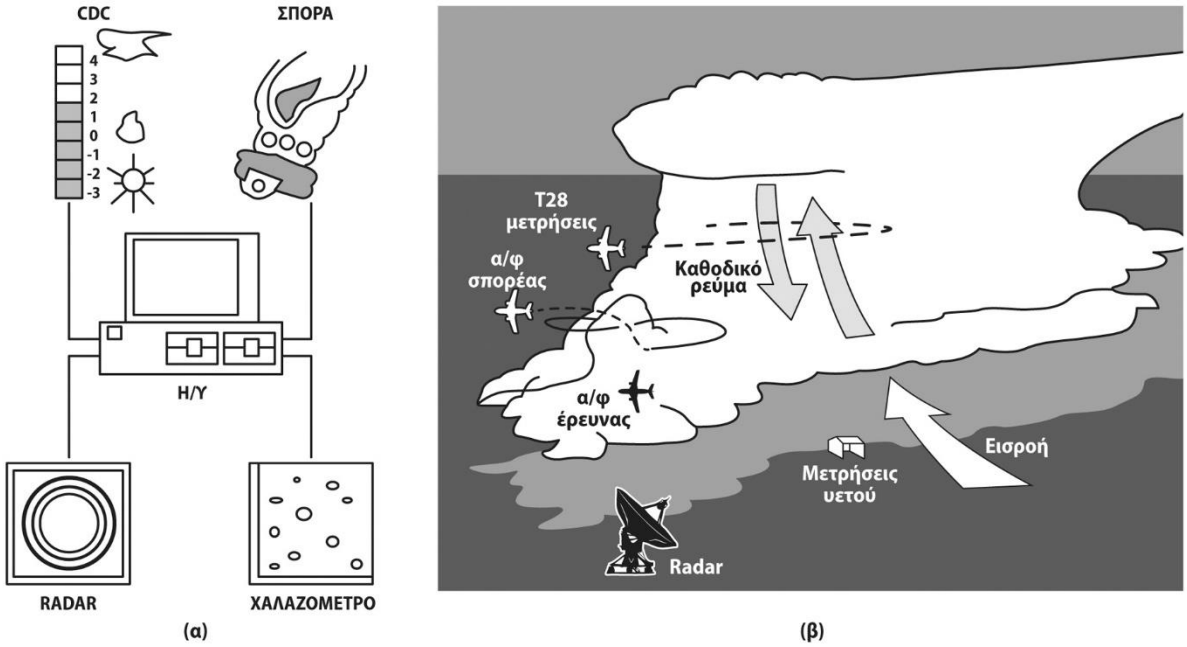
Στο Σχήμα 14.7α παρουσιάζεται το επιχειρησιακό μέρος ενός προγράμματος αντιχαλαζικής προστασίας. Πιο συγκεκριμένα, με επίκεντρο μια μονάδα Η/Υ, η έναρξη γίνεται από την ποσοτική πρόγνωση του χαλαζιού (πάνω αριστερά), στη συνέχεια γίνεται η παρακολούθηση της ανάπτυξης καταιγίδων μέσω ραντάρ (κάτω αριστερά), κατόπιν εκτελούνται επιχειρήσεις σποράς νεφών με αεροσκάφη (πάνω δεξιά) και τέλος καταγράφεται το χαλάζι στο έδαφος (κάτω δεξιά). Τέλος, στο Σχήμα 12.7β απεικονίζεται το πλαίσιο της επιχείρησης σποράς νεφών.

14.4. Ξηρασία

Η ξηρασία είναι ένα φυσικό φαινόμενο επαναλαμβανόμενο διαχρονικά σε περιφερειακή κλίμακα. Η ξηρασία αναφέρεται ως «'μη γεγονός'», δεδομένου ότι βασική αιτία της είναι η έλλειψη βροχοπτώσεων σε μια περιοχή για μια χρονική περίοδο. Επιπλέον, είναι ένας φυσικός κίνδυνος με αργή έναρξη, που συχνά θεωρείται υφέρπον φαινόμενο. Χαρακτηρίζεται, ουσιαστικά, από μια συσσωρευμένη απόκλιση της βροχόπτωσης από την κανονική ή την αναμενόμενη τιμή, που μπορεί να συμβεί σε μάλλον σύντομο χρονικό διάστημα ή μπορεί να διαρκέσει μήνες. Ξηρασίες μπορεί να εμφανιστούν σε περιοχές τόσο υψηλών όσο και χαμηλών βροχοπτώσεων, και σχεδόν σε όλες τις κλιματικές συνθήκες.

Είναι δύσκολο να προσδιοριστούν οι επιπτώσεις της ξηρασίας, καθώς αποτελεί ένα πολύπλοκο φαινόμενο, που εξελίσσεται σταδιακά σε κάθε μεμονωμένη περιοχή. Οι επιπτώσεις της ξηρασίας είναι πολύ κρίσιμες και ιδιαίτερα δαπανηρές, καθώς επηρεάζει περισσότερους ανθρώπους από οποιαδήποτε άλλη φυσική καταστροφή παγκοσμίως (Keyantash & Dracup, 2002). Πράγματι, η ξηρασία θεωρείται από τους σημαντικότερους φυσικούς κινδύνους, με σημαντικό αντίκτυπο στο περιβάλλον, την κοινωνία, τη γεωργία και την οικονομία. Λόγω της υφέρπουσας φύσης της, οι επιπτώσεις της αργούν, συχνά, να εμφανιστούν. Δεδομένου ότι τα ελλείμματα βροχόπτωσης εμφανίζονται συνήθως πρώτα ως ελλείμματα στο νερό του εδάφους, η γεωργία είναι συχνά ο πρώτος τομέας που επηρεάζεται από την ξηρασία. Για παράδειγμα, μπορεί να αναφέρονται οι επιπτώσεις της

ξηρασίας στην απόδοση των καλλιεργειών, καθόσον μπορεί να διαφέρουν σημαντικά σε διάφορες καλλιέργειες, λόγω των διαφορετικών χρόνων φύτευσης στη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου, καθώς επίσης και των διαφορετικών απαιτήσεων σε νερό και των διαφορετικών ευαισθησιών στην καταπόνηση σε νερό και θερμοκρασία.



Σχήμα 14.7. *(α) Επιχειρησιακό πλαίσιο προγράμματος αντιχαλαζικής προστασίας. (β) Πλαίσιο επιχείρησης σποράς νεφών.*

14.4.1. Είδη και ορισμοί ξηρασίας

Είναι γνωστό ότι δεν υπάρχει ακριβής και καθολικά αποδεκτός ορισμός της ξηρασίας, καθόσον οι τομείς που πλήττονται από την ξηρασία έχουν μεγάλο εύρος, ενώ παρατηρείται, επίσης, αποκλίνουσα χωρική και χρονική κατανομή και ζήτηση νερού για διαφορετικές χρήσεις (Heim, 2002). Οι ορισμοί της ξηρασίας πρέπει να αναφέρονται στην περιοχή, στη χρήση ή στις επιπτώσεις. Πράγματι, οι ξηρασίες είναι περιοχικές όσον αφορά την έκταση και κάθε περιοχή έχει ιδιαίτερα κλιματικά χαρακτηριστικά. Με τη θεώρηση της ξηρασίας ως κινδύνου, υπάρχει η τάση να ταξινομούνται οι ξηρασίες σε διαφορετικά είδη ή σε διαφορετικούς τύπους. Στη διεθνή βιβλιογραφία, έχουν καθιερωθεί τρεις λειτουργικοί ορισμοί, σε μετεωρολογική ή κλιματολογική, γεωργική ή αγρομετεωρολογική και υδρολογική ξηρασία (Wilhite et al., 2000). Ένα τέταρτο είδος ξηρασίας μπορούν, επίσης, να θεωρηθούν οι κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις της. Με εξαίρεση τη μετεωρολογική ξηρασία, οι άλλοι τύποι, όπως η γεωργική και η υδρολογική, δίνουν έμφαση στις ανθρώπινες ή κοινωνικές πτυχές της, δηλαδή την αλληλεπίδραση μεταξύ των φυσικών χαρακτηριστικών της μετεωρολογικής ξηρασίας και των ανθρώπινων δραστηριοτήτων που εξαρτώνται από τη βροχόπτωση (Keyantash & Dracup, 2002). Περιττό να λεχθεί ότι η σχέση μεταξύ των διαφόρων τύπων ξηρασίας είναι πολύπλοκη. Ακολουθεί σύντομη περιγραφή των τύπων ξηρασίας:

- Η **μετεωρολογική ή κλιματολογική ξηρασία** είναι ένα φυσικό συμβάν περιοχικής κλίμακας, λόγω της περιφερειακής φύσης των ατμοσφαιρικών φαινομένων που προκύπτουν από πολλαπλές αιτίες. Ορίζεται ως ο βαθμός ξήρανσης από ελλείψεις βροχής και στη διάρκεια της ξηρής περιόδου. Χαρακτηρίζεται γενικά από την ανωμαλία της βροχόπτωσης να είναι χαμηλότερη από τον μέσο όρο της περιοχής για κάποιο χρονικό διάστημα και από την παρατεταμένη και μη κανονική έλλειψη υγρασίας.
- Η **γεωργική ή αγρομετεωρολογική ξηρασία** αναφέρεται στις γεωργικές επιπτώσεις που προκύπτουν από τις ελλείψεις σχετικά με τη διαθεσιμότητα νερού για γεωργική χρήση. Πράγματι, αφορά την αποτυχία των καλλιεργειών και παρατηρείται όταν η υγρασία του εδάφους έχει εξαντληθεί, έτσι ώστε

η απόδοση των καλλιεργειών να μειωθεί σημαντικά. Συγκεκριμένα, ορίζεται από τη διαθεσιμότητα νερού στο έδαφος, για να υποστηρίξει την ανάπτυξη των καλλιεργειών και της κτηνοτροφίας, και δεν υπάρχει άμεση σχέση μεταξύ των βροχοπτώσεων και της διείσδυσης στο έδαφος. Στην πραγματικότητα, η διείσδυση εξαρτάται από προγενέστερες συνθήκες υγρασίας, από τον τύπο και την κλίση του εδάφους, και από την ένταση της βροχόπτωσης. Εδάφη με χαμηλή ικανότητα συγκράτησης νερού θεωρούνται τυπικές επιρρεπείς στην ξηρασία περιοχές, που είναι πιο ευάλωτες και ευπαθείς στη γεωργική ξηρασία.

- Η **υδρολογική ξηρασία** καθορίζεται συνήθως από την απόκλιση των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων από ορισμένες μέσες συνθήκες για μεγάλο χρονικό διάστημα, ως συνέπεια της μετεωρολογικής ξηρασίας. Θεωρείται μια περίοδος στη διάρκεια της οποίας η πραγματική παροχή νερού, είτε επιφανειακά είτε στα υπόγεια ύδατα, είναι μικρότερη από την ελάχιστη παροχή που απαιτείται για την κανονική λειτουργία σε μια λεκάνη απορροής. Όπως και στη γεωργική ξηρασία, δεν υπάρχει άμεση σχέση μεταξύ της βροχόπτωσης και της κατάστασης των επιφανειακών και των υπόγειων αποθεμάτων νερού. Υπάρχει επίσης σημαντική χρονική υστέρηση μεταξύ των αποκλίσεων των βροχοπτώσεων και της εμφάνισης αυτών των ελλείψεων στις επιφανειακές και τις υπόγειες συνιστώσες του υδρολογικού συστήματος.

Τέλος, οι **κοινωνικοοικονομικές** επιπτώσεις της ξηρασίας ορίζονται ως απώλεια από το μέσο ή αναμενόμενο έσοδο και μπορούν να μετρηθούν με κοινωνικούς και οικονομικούς δείκτες (McVicar & Jupp, 1998). Πράγματι, η κοινωνικοοικονομική ξηρασία αναφέρεται στο χάσμα μεταξύ προσφοράς και ζήτησης των οικονομικών αγαθών, που προκύπτει από τους τρεις άλλους τύπους ξηρασίας, όπως σε νερό, τρόφιμα, πρώτες ύλες, μεταφορές, υδροηλεκτρική ενέργεια, ως συνέπεια της συνολικής μείωσης στην παροχή νερού λόγω καιρικών συνθηκών. Η κοινωνικοοικονομική ξηρασία είναι διαφορετική από τα άλλα είδη ξηρασίας, καθώς η εμφάνισή της εξαρτάται από τις χωροχρονικές διαδικασίες της προσφοράς και της ζήτησης. Οι τύποι ξηρασίας, μαζί με τη χρονική ακολουθία των διαδικασιών, παρουσιάζονται στο Σχήμα 14.8.



Σχήμα 14.8 *Είδη ξηρασίας και διαδικασία χρονικής ακολουθίας.*

14.4.2. Ποσοτικά χαρακτηριστικά ξηρασίας

Για την εκτίμηση και την παρακολούθηση της ξηρασίας, εξετάζονται αρκετά χαρακτηριστικά. Πράγματι, συμβατικά ή δεδομένα και μέθοδοι τηλεπισκόπησης χρησιμοποιούνται για να προσδιορίσουν τη χωρική και χρονική μεταβλητότητα των διαφόρων χαρακτηριστικών της ξηρασίας (Dalezios et al., 2012). Ειδικότερα, αυτά είναι:

- **Δριμύτητα:** Ορίζεται η κλιμάκωση του φαινομένου σε κατηγορίες από ήπια, μέτρια, ισχυρή και ακραία. Προσδιορίζεται συνήθως μέσω δεικτών ξηρασίας. Οι περιοχές που πλήττονται από ισχυρή ξηρασία εξελίσσονται σταδιακά, και υπάρχει μια εποχική και ετήσια μετατόπιση του λεγόμενου επίκεντρου, που είναι η περιοχή της μέγιστης δριμύτητας.
- **Περιοδικότητα:** Θεωρείται η επανεμφάνιση της ξηρασίας.
- **Διάρκεια:** Ορίζεται ως το χρονικό διάστημα από την αρχή μέχρι το τέλος ενός επεισοδίου ξηρασίας, συνήθως σε μήνες. Δεδομένου ότι η ξηρασία αποτελεί ένα σύνθετο φαινόμενο, η εκτίμηση του χρόνου έναρξης και λήξης είναι ένα περίπλοκο τεχνικό θέμα.
- **Έναρξη:** Θεωρείται η αρχή ενός επεισοδίου ξηρασίας, η οποία προσδιορίζεται με ενδείξεις ή δείκτες που ξεπερνούν μια τιμή κατωφλίου.
- **Λήξη:** Σηματοδοτεί τον τερματισμό ενός επεισοδίου ξηρασίας, με βάση και πάλι τις τιμές κατωφλίου των ενδείξεων ή των δεικτών. Είναι συχνά δύσκολο να προσδιοριστεί η έναρξη και το τέλος της ξηρασίας, και να οριστούν τα αντίστοιχα κριτήρια.
- **Περιοχική έκταση:** Θεωρείται η χωρική κάλυψη του φαινομένου, όπως ποσοτικοποιείται σε τάξεις με ενδείξεις ή δείκτες.

14.4.3. Ποσοτική εκτίμηση της ξηρασίας

Η ποσοτικοποίηση και η εκτίμηση της ξηρασίας δεν είναι εύκολα θέματα. Μπορούν, ωστόσο, να υλοποιηθούν με τη χρήση ενδείξεων ή δεικτών. Πράγματι, οι ενδείξεις ξηρασίας είναι μεταβλητές που περιγράφουν τα χαρακτηριστικά της ξηρασίας. Αρκετές ενδείξεις μπορεί επίσης να συνθέσουν έναν μόνο δείκτη, το δείκτη ξηρασίας. Επιπλέον, είναι αναγκαίος ο υπολογισμός διαφόρων χαρακτηριστικών της ξηρασίας, όπως είναι η δριμύτητα, η διάρκεια, η περιοδικότητα, η περιοχική έκταση, η έναρξη και το τέλος της ξηρασίας. Επιπλέον, η παρακολούθηση της εξέλιξης της ξηρασίας είναι ζωτικής σημασίας για τις οικονομικά και περιβαλλοντικά ευαίσθητες περιοχές, και αποτελούν πολύ σημαντικές εισροές σε κάθε σχέδιο ετοιμότητας και περιορισμού της ξηρασίας. Πρωτογενή δεδομένα για τη μετεωρολογική, γεωργική και υδρολογική ξηρασία θεωρούνται οι κλιματικές μεταβλητές, όπως η θερμοκρασία, οι βροχοπτώσεις, οι απορροές, η υγρασία του εδάφους, η αποθήκευση του ταμιευτήρα, τα επίπεδα των υπόγειων υδάτων, το χιόνι και η βλάστηση. Η ανάλυση, η ερμηνεία και η σύνθεση δεδομένων οδηγούν σε ενδείξεις ή δείκτες ξηρασίας. Υπάρχει πληθώρα μελετών ανασκόπησης για τη χρήση των δεικτών ξηρασίας, με βάση τα συμβατικά ή τηλεπισκοπικά δεδομένα (Heim, 2002). Συμπερασματικά, οι δείκτες ξηρασίας παρέχουν ευκολία εφαρμογής και χρησιμοποιούνται εκτενώς στην ποσοτικοποίηση ξηρασίας και την εκτίμηση περιβαλλοντικών κινδύνων. Στον Πίνακα 14.2 παρουσιάζεται μια ενδεικτική λίστα δεικτών γεωργικής ξηρασίας. Κατά την αξιολόγηση της συνολικής χρησιμότητας δεικτών, ένα σύνολο σταθμισμένων κριτηρίων λήψης αποφάσεων αποδίδεται συνήθως σε κάθε δείκτη. Τα κριτήρια αυτά βασίζονται στις επιθυμητές ιδιότητες κάθε δείκτη, όπως είναι η αξιοπιστία, η ανιχνευσιμότητα, η διαφάνεια, η επιστημοσύνη, η επεκτασιμότητα και το μέγεθος (Keyantash και Dracup, 2002). Είναι σαφές ότι τα παραπάνω κριτήρια βαρύτητας, που αντανακλούν τη σχετική σημασία των κριτηρίων αξιολόγησης, είναι δύσκολο να αιτιολογηθούν ακριβώς. Ο κατάλογος μπορεί να επεκταθεί ή να συμπυκνωθεί.

Σύστημα έγκαιρων προειδοποιήσεων ξηρασίας (Drought Early Warning System/DEWS)

Το DEWS επικεντρώνεται στην παρακολούθηση των συνθηκών ξηρασίας (Wilhite, 2009) στη βάση δεικτών ξηρασίας. Ειδικότερα, το σύστημα παρακολούθησης ξηρασίας των ΗΠΑ (United States Drought Monitor/USDM) χρησιμοποιεί μια σύνθεση πολλαπλών δεικτών, που καλύπτουν διάφορες βραχυπρόθεσμες και μακροπρόθεσμες χρονικά εκτιμήσεις, με στόχο μια ιεραρχημένη μεθοδολογία, για την ανάλυση της ξηρασίας, που οδηγεί σε ένα ενιαίο προϊόν (Wilhite, 2009). Το USDM παρουσιάζει ευελιξία στην ενσωμάτωση νέων εργαλείων, πληροφοριών και δεδομένων, προκειμένου να ενισχυθεί το επίπεδο της ακρίβειας. Ανάλογα με τη διαθεσιμότητα και την ποιότητα των δεδομένων κάθε περιοχής, είναι δυνατόν να χρησιμοποιούνται

πολλοί δείκτες ξηρασίας και να καθορίζεται η πιο κατάλληλη σύνθεση δεικτών για κάθε περιοχή ή εποχή με το σύστημα DEWS. Επισημαίνεται ότι έχουν εφαρμοστεί συστήματα DEWS στην Ελλάδα τόσο για μετεωρολογική ξηρασία, με βάση το δείκτη RDI (Dalezios et al., 2012), όσο και για γεωργική ξηρασία, με βάση το δείκτη VHI (Dalezios et al., 2014), αντίστοιχα. Τέλος, επισημαίνεται ότι υπάρχει διεθνής ανάγκη για νέους και δυνητικά καλύτερους δείκτες ξηρασίας, που μπορεί επίσης να λαμβάνουν υπόψη και την αλλαγή του κλίματος, αξιοποιώντας συγχρόνως θερμοκρασία και βροχόπτωση.

Συμβατικοί δείκτες γεωργικής ξηρασίας	
1. Agricultural Drought Index (DTx)	
2. Bhalme-Mooley Drought Index (BMDI)	Bhalme & Mooley, 1980
3. Corn Drought Index	Meyer et al., 1993
4. Crop Moisture Index (CMI)	Palmer, 1968
5. Crop Specific Drought Index.	
6. Evapotranspiration Deficit Index (ETDI)	
7. Global Vegetation Water Moisture Index (GVWI)	
8. Leaf Water Content Index (LWCI)	
9. Moisture Availability Index (MAI)	
10. Reclamation Drought Index (RDI)	
11. Soil Moisture Anomaly Index (SMAI)	Bergman et al., 1988
12. Soil Moisture Deficit Index (SMDI)	Narasimhan & Srimivasan, 2005
13. Soil Moisture Drought Index (SMDI)	Hollinger et al., 1993
14. Standardized Vegetation Index (SVI)	
15. Computed Soil Moisture.	
16. Agro-Hydro Potential	
Δορυφορικοί δείκτες γεωργικής ξηρασίας	
1. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	Tucker, 1979
2. Deviation NDVI index	
3. Enhanced Vegetation Index (EVI)	Huete et al., 2002
4. Vegetation Condition Index (VCI)	Kogan, 1995
5. Monthly Vegetation Condition Index	Kogan, 1995
6. Temperature Condition Index (TCI)	Kogan, 1995
7. Vegetation Health Index (VHI)	Kogan, 2001
8. Normalised Difference Temperature Index (NDTI)	McVicar et al., 1992
9. Crop Water Stress Index (CWSI)	Idso et al., 1981
10. Drought Severity Index (DSI)	Bayarjargal et al., 2006
11. Temperature- Vegetation Dryness Index	
12. Normalized Difference Water Index (NDWI)	
13. Remote Sensing Drought Risk Index (RDRI)	
14. Vegetation Drought Response Index (VegDRI)	Brown et al., 2008

Πίνακας 14.2. *Δείκτες γεωργικής ξηρασίας.*

14.5. Ερημοποίηση

Το έδαφος είναι ένα ανοικτό φυσικό σύστημα, που αλληλοεπιδρά με το περιβάλλον και παρουσιάζει συνεχείς μεταβολές των διαφόρων συντελεστών, με βάση την ένταση των εισροών και των εκροών προς το περιβάλλον. Ωστόσο, είναι ένας μη ανανεώσιμος πόρος, που μπορεί να καταστραφεί εύκολα εάν αντιμετωπίζει διαρκώς αυξανόμενη πίεση. Η υποβάθμιση του εδάφους χαρακτηρίζεται από αλλαγές στις φυσικές, χημικές και βιολογικές ιδιότητές του, που οδηγούν σε διάβρωση, απώλεια της ικανότητας παραγωγικότητας και, συνήθως,

ερημοποίηση. Σύμφωνα με τον τρέχων ορισμό (UNCED: Agenda 21), ερημοποίηση είναι η «υποβάθμιση της γης σε άνυδρες, ημιάνυδρες και ξηρές υποϋγρές περιοχές, που προκύπτει από διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων των κλιματικών μεταβολών και των ανθρώπινων δραστηριοτήτων» (ΟΗΕ, 1992). Πράγματι, υπάρχουν πολλοί παράγοντες που συμβάλλουν στην απερήμωση, όπως το κλίμα, η γεωλογία, το έδαφος, η υδρολογία, η φυσιογραφία, η βιολογία, καθώς και οι ανθρώπινες δραστηριότητες (ΟΗΕ, 2005). Επιπλέον, η απειλή της κλιματικής αλλαγής εντείνει το πρόβλημα, δεδομένου ότι η έλλειψη βροχής είναι το χαρακτηριστικό της ξηρασίας. Όσον αφορά την υποβάθμιση του εδάφους, οι περισσότερες ανησυχίες σχετίζονται με την επιτάχυνση της διάβρωσης, της οποίας το φυσικό ποσοστό έχει αυξηθεί σημαντικά από ανθρώπινες δραστηριότητες. Επίσης, φυσική αποδόμηση παρουσιάζεται σε επικλινή εδάφη και είναι πολύ εκτεταμένη, ενώ η κυρίαρχη διαδικασία της χημικής ερημοποίησης είναι η υφαλμύρωση των εδαφών, μέσω της μη ορθολογικής διαχείρισης αρδευτικού νερού. Τέλος, επισημαίνεται ότι η χρήση γης των άνυδρων περιοχών αφορά κυρίως τη γεωργία, την κτηνοτροφία και, ειδικότερα, την παραγωγή τροφίμων διαβίωσης.

14.5.1. Αιτίες και Παράγοντες Ερημοποίησης

Είναι σημαντικό να προσδιοριστούν οι περιοχές υψηλού κινδύνου για την ποσοτική κατάταξη της ερημοποίησης. Τα χαρακτηριστικά των περιοχών αυτών περιλαμβάνουν χαμηλή ετήσια βροχόπτωση, υψηλή ετήσια δυνητική εξατμισοδιαπνοή, άνιση κατανομή βροχοπτώσεων στο χώρο και το χρόνο, αυξημένη ένταση και υψηλή διάβρωση λόγω βροχοπτώσεων, έλλειμμα υγρασίας εδάφους και υψηλές θερμοκρασίες στη διάρκεια της βλαστικής περιόδου. Οι φυσικές αιτίες περιλαμβάνουν ξηρό κλίμα, γεωμορφολογία των διαδικασιών διάβρωσης του εδάφους, ποσοτική και ποιοτική αλλοίωση του υδατικού ισοζυγίου, καθώς και ιστορικά στοιχεία μιας περιοχής. Αντίστοιχα, οι ανθρωπογενείς αιτίες περιλαμβάνουν αστικοποίηση, δασικές πυρκαγιές, υπερεκμετάλλευση επιφανειακών και υπόγειων πόρων, εντατικοποίηση της γεωργίας, υπερβόσκηση, ανεπαρκή γεωργική και δασική διαχείριση, τουρισμό, καθώς και κοινωνικοοικονομικούς παράγοντες. Οι παράγοντες ερημοποίησης ταξινομούνται και περιγράφονται στη συνέχεια (Sheikh & Soomro, 2006).

14.5.1.1. Κλίμα

Κλίμα και απερήμωση αλληλοεπιδρούν σε διάφορες κλίμακες και επηρεάζουν τις διεργασίες ερημοποίησης, μέσω της επίδρασής τους στις ξηρές περιοχές και στη βλάστηση, καθώς και στον υδρολογικό κύκλο άνυδρων περιοχών (FAO, 2004). Σε αντίθεση με υγρές περιοχές πλούσιες σε οργανικά εδάφη, οι ξηρές περιοχές έχουν, συχνά, χαμηλό περιεχόμενο οργανικής ουσίας. Η ερημοποίηση επηρεάζει την παγκόσμια κλιματική αλλαγή μέσω του εδάφους και της απώλειας βλάστησης. Πράγματι, ξηρά εδάφη περιέχουν πολύ άνθρακα, που θα μπορούσε να απελευθερωθεί στην ατμόσφαιρα, ως αποτέλεσμα της ερημοποίησης, με σημαντικές συνέπειες στο παγκόσμιο κλιματικό σύστημα. Αντίθετα, η επίδραση της παγκόσμιας κλιματικής αλλαγής στην ερημοποίηση είναι πολύπλοκη και δεν έχει ακόμη επαρκώς κατανοηθεί. Υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να έχουν αρνητική επίπτωση σε ξηρά εδάφη, εξαιτίας αυξημένης απώλειας νερού από το έδαφος και μείωσης των βροχοπτώσεων. Αντίστοιχα, η αύξηση του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα μπορεί να τονώσει την ανάπτυξη ορισμένων φυτών. Η απώλεια βιοποικιλότητας λόγω ερημοποίησης είναι δύσκολο να εκτιμηθεί (ΟΗΕ, 1992). Στον Πίνακα 14.3 παρουσιάζονται οι αντιστοιχίες μεταξύ του δείκτη ξηρότητας (aridity index), της βροχόπτωσης και της κλιματικής κατηγορίας. Ως γνωστόν, ο δείκτης ξηρότητας είναι το κλάσμα της ετήσιας βροχόπτωσης (P) προς τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή (PET). Γενικά, όταν το κλάσμα είναι μικρότερο από 0,03, υπάρχει μόνιμα ερημοποίηση, ενώ όταν είναι μεγαλύτερο από 0,65, δεν υπάρχει ερημοποίηση.

Aridity Index:P/PET PET>P	**Rainfall(mm)**	**Classification** Desert Climate
< 0,03	< 200	Hyper – arid
0,03-< 0,20	< 200 (winter) < 400 (summer)	Arid
0,20-< 0,50	200-500 (winter) 400-600 (summer)	Semi- arid
0,50-< 0,65	500-700 (winter) 600-800 (summer)	Dry sub-humid
>0,65		No Desertification

Πίνακας 14.3. *Κατηγορίες ξηρότοπων.*

14.5.1.2. Γεωλογία – Εδάφη

Οι ιδιότητες των πετρωμάτων μπορεί να επηρεάσουν τη διαδικασία ερημοποίησης, λόγω της διαπερατότητας, του ποσοστού αποσάθρωσης πετρωμάτων και της διάβρωσης του εδάφους. Αυτά τα πετρώματα είναι ασβεστόλιθοι και μάργες σε λοφώδεις εκτάσεις, όπου το έδαφος είναι ρηχό και ευαίσθητο στην ξηρασία. Άλλα πετρώματα που σχηματίζουν εδάφη με βραδύτητα και έχουν τραχεία σύνθεση είναι τα όξινα και τα ηφαιστειακά πετρώματα. Τα χαρακτηριστικά του εδάφους που επηρεάζουν το ρυθμό και τις διεργασίες ερημοποίησης είναι το βάθος, η υφή, η υγρασία, η γονιμότητα, η οργανική ύλη, η επιφάνεια φιλτραρίσματος, η υδραυλική αγωγιμότητα και η υδατοϊκανότητα. Η απόδοση εδαφών συνδέεται με την ερημοποίηση μέσω του ρυθμού σχηματισμού εδάφους, της ικανότητας συγκράτησης νερού, της διαθεσιμότητας θρεπτικών ουσιών των φυτών και της επιφανειακής απορροής. Επιπλέον, η φυσιογραφία επηρεάζει σημαντικά τις τρεις διεργασίες ερημοποίησης, δηλαδή τη διάβρωση, την αλατότητα και την ξηρασία, που ευνοούν τα παραπάνω χαρακτηριστικά. Επίσης, η ερημοποίηση εξαρτάται από την κλίση, την όψη και το σχήμα της ξηράς. Παρουσιάζονται δύο εξισώσεις, ο ρυθμός απώλειας εδάφους [εξίσωση (14.2)] και η διάβρωση [εξίσωση (14.3)]:

$$E1 = c\, S^{a} \quad (14.2)$$

$$E2 = b\, L^{m} \quad (14.3)$$

όπου E1 είναι η απώλεια εδάφους, S η κλίση, E2 η διάβρωση, L το μήκος της κλίσης και c, a, b, m οι εμπειρικοί συντελεστές. Με την αφαίρεση του πιο γόνιμου επιφανειακού εδάφους, η διάβρωση μειώνει την παραγωγικότητα του εδάφους και, όπου τα εδάφη είναι αβαθή, μπορεί να οδηγήσει σε μόνιμη απώλεια της φυσικής γεωργικής γης. Τέλος, ο ρυθμός διάβρωσης είναι πολύ ευαίσθητος στο κλίμα και τις χρήσεις γης.

14.5.1.3. Υδρολογία

Η εδαφική φάση του υδρολογικού κύκλου, δηλαδή το ισοζύγιο νερού, σηματοδοτεί την κινητήρια δύναμη επιπτώσεων στην ερημοποίηση. Η διαδικασία αυτή επεκτείνεται έως ότου δεν επαρκούν τα διαθέσιμα αποθέματα νερού να καλύψουν τις ανάγκες των ζωντανών οργανισμών, όπως τα φυτά και τα ζώα. Υπάρχουν απώλειες νερού, όπως επιφανειακή απορροή, διείσδυση, βαθιά διήθηση στα υπόγεια ύδατα, καθώς και ροή υπογείων υδάτων στη θάλασσα, που είναι πολύ κρίσιμες για την απερήμωση, ιδιαίτερα σε ευπαθείς και ευαίσθητες περιοχές. Επιπλέον, απώλειες νερού μπορεί να προκύψουν από αραιή φυτοκάλυψη, διαπερατότητα των ασβεστολιθικών πετρωμάτων, βιομηχανική και αστική ζήτηση, ρύπανση περιβάλλοντος και εκμετάλλευση υπόγειων υδάτων. Μια πιθανή λύση για την πρόληψη των περιοχών από την ερημοποίηση μπορεί να είναι η άρδευση, που αναπληρώνει την υγρασία του εδάφους για την ανάπτυξη των φυτών.

14.5.1.4. Βιολογία

Η πιο κυρίαρχη βιοτική συνιστώσα της γης είναι η φυτική κάλυψη, που είναι και η καλύτερη δυνατή ένδειξη ερημοποίησης, όπως όταν παρατηρούνται μόνιμες αλλαγές στη φυτοκάλυψη και περισσότερες περιοχές γίνονται άγονες. Ωστόσο, η εποχικότητα και η μεταβλητότητα των βροχοπτώσεων σε άνυδρες περιοχές μπορεί να επιφέρουν μόνο αυξημένη μεταβλητότητα της φυτοκάλυψης. Επισημαίνεται ότι η κάλυψη της βλάστησης σε μια περιοχή εξαρτάται από τις υπάρχουσες σχέσεις μεταξύ του κλίματος εδάφους και της βλάστησης. Στην ουσία, περιοχές με βροχή P < 280 χιλιοστά και υψηλό ρυθμό εξατμισοδιαπνοής οδηγούνται σε μείωση του διαθέσιμου νερού, με συνέπεια σταδιακά γυμνό έδαφος. Επιπλέον, περιοχές με ξηρικές καλλιέργειες (FAO, 2004) είναι πολύ ευαίσθητες στη διάβρωση και την απερήμωση, δεδομένου ότι η μειωμένη προστασία από φυτοκάλυψη δεν μπορεί να αποτρέψει αποτελεσματικά την ένταση της βροχής στην επιφάνεια του εδάφους (Πίνακας 14.4).

Classification	Growing season(days)	Typical crops
Hyper-arid	0	No crop, no pasture
Arid	1-59	No crops, marginal pasture
Semi-arid	60-119	Bulrush millet, sorghum, sesame
Dry sub-humid	120-179	Maize, beans, groundnut, peas, barley, wheat

Πίνακας 14.4. *Τυπικές βροχοδίαιτες καλλιέργειες σε ξηρόποπους.*

14.5.1.5. Ανθρώπινες δραστηριότητες

Οι κύριοι ανθρωπογενείς παράγοντες θεωρούνται ότι είναι κοινωνικοοικονομικής φύσης. Τέτοιοι παράγοντες είναι η αύξηση του πληθυσμού, η συνεχής αύξηση στην κατανάλωση νερού, με συνέπεια τη ρύπανση του περιβάλλοντος, καθώς και η εντατικοποίηση της γεωργίας με ανθρώπινη παρέμβαση, καθόσον η υπερεκμετάλλευση της φυτικής βιομάζας και η αλόγιστη καλλιέργεια σε λοφώδη εδάφη οδηγούν σε διάβρωση του εδάφους. Επιπλέον, παράγοντες θεωρούνται η αποψίλωση των δασών και η μείωση της φυτοκάλυψης, εξαιτίας δασικών πυρκαγιών, η υπερβόσκηση ευαίσθητων περιοχών, η εγκατάλειψη της γης και η αλόγιστη ανάπτυξη γης και τουρισμού, που οδηγούν σε υποβάθμιση της γης. Επιπρόσθετα, αύξηση της επιφανειακής απορροής προς τη θάλασσα, λόγω αποψίλωσης των δασών, και υπερεκμετάλλευση των υδάτινων πόρων οδηγούν σε μείωση των διαθέσιμων πόρων, με συνέπεια την υφαλμύρωση υπόγειων υδροφορέων και τη διείσδυση θαλασσινού νερού σε παράκτιους υδροφορείς. Ακόμα, αναποτελεσματικός σχεδιασμός αρδεύσεων οδηγεί σε απώλειες αρδευτικού νερού, με συνέπεια την αλατότητα του εδάφους. Τέλος, προβλήματα έλλειψης νερού, εξάντληση των υπόγειων υδάτων, διάβρωση του εδάφους και υφαλμύρωση, θεωρούνται συνέπειες θεσμικών αποτυχιών και πολιτικών.

14.5.2. Μεθοδολογίες και μοντελοποίηση

Υπάρχει πλήθος μεθοδολογιών και προσπαθειών μοντελοποίησης που έχουν υλοποιηθεί για την ερημοποίηση. Οι μέθοδοι περιλαμβάνουν ανάπτυξη αριθμητικών μοντέλων για μελλοντικά κλιματικά σενάρια, προσομοίωση της δυναμικής της ατμόσφαιρας, των ωκεανών και της ανταλλαγής ενέργειας μεταξύ ατμόσφαιρας, ξηράς και ωκεανών, πρόγνωση βραχείας διάρκειας, πρόγνωση μακροπρόθεσμων αλλαγών στις κλιματικές παραμέτρους σε συγκεκριμένες συνθήκες, όπως αλλαγές στη χρήση της γης και στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, χρήση των κλιματικών σεναρίων, για την κατανόηση μελλοντικών συνθηκών απερήμωσης, προσομοίωση της μεταβλητότητας του κλίματος και των ακραίων φαινομένων, με έμφαση στις επιπτώσεις μικρής κλίμακας, και χρήση πολλαπλών δεικτών, για την αξιολόγηση συνθηκών ερημοποίησης σε περιοχές με μεγάλα ελλείμματα νερού (PET > P). Επιπλέον, οι υπάρχουσες μεθοδολογίες απερήμωσης ενσωματώνουν Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών/ΓΣΠ (Geographical Information Systems/GIS) και τηλεπισκόπησης, χωρική μοντελοποίηση του κινδύνου ερημοποίησης σε ευπαθείς περιοχές και παραγωγή χαρτών επικινδυνότητας και ταξινόμησης ερημοποίησης.

Σήμερα, ένας στους έξι ανθρώπους διεθνώς υφίσταται τις επιπτώσεις της υποβάθμισης του εδάφους. Τρέχουσες έρευνες περιλαμβάνουν παρακολούθηση και πρόληψη της απερήμωσης, κατανόηση των διεργασιών ερημοποίησης και των αλληλεπιδράσεων με το περιβάλλον, καθώς και ανάπτυξη θεσμικών συστημάτων αξιολόγησης και μηχανισμών ανατροφοδότησης. Υπάρχει ανάγκη για δεδομένα υψηλής ποιότητας, όπως δεδομένα απόδοσης καλλιεργειών, φαινολογικές παρατηρήσεις, δεδομένα τηλεπισκόπησης, χαρακτηριστικά αναγλύφου, υποβάθμισης του εδάφους, πρότυπα υφαλμύρωσης σε συστήματα άρδευσης, χαρακτηριστικά υπερβόσκησης, μεγάλα σχέδια διάβρωσης νερού, καθώς και καμένες εκτάσεις από πυρκαγιές.

14.5.3. Στάδια και διαδικασίες ερημοποίησης

Παρουσιάζονται συνοπτικά στάδια και διαδικασίες που οδηγούν στην ερημοποίηση. Ειδικότερα:

Στάδιο 1. Υποβάθμιση του εδάφους: Σε αυτό το στάδιο, το κύριο ζήτημα είναι η μείωση της κάλυψης της βλάστησης σε μια περιοχή, που έχει αποτέλεσμα οι σταγόνες της βροχής, όπως πέφτουν στο έδαφος, να φτάνουν στην επιφάνεια.

Στάδιο 2. Μείωση της οργανικής ύλης και υποβάθμιση της δομής του εδάφους: Η οργανική ύλη είναι το συνδετικό στοιχείο μεταξύ των σωματιδίων του εδάφους. Η μείωση και, τελικά, η έλλειψη οργανικής ύλης μπορεί να προκαλέσουν αποδυνάμωση των συσσωματωμάτων του εδάφους, με συνέπεια τη μείωση της παραγωγής βιομάζας.

Στάδιο 3. Διασπορά των συσσωματωμάτων του εδάφους: Τα σωματίδια χώματος χωρίζονται σε μικρότερα, ως αποτέλεσμα των σταγόνων βροχής. Η υποβάθμιση της επιφανειακής δομής του εδάφους παράγει μια αλυσίδα αρνητικών επιπτώσεων, ξεκινώντας από τη μείωση της παραγωγής βιομάζας και την επακόλουθη απώλεια μιας σημαντικής ποσότητας νερού για τα φυτά.

Στάδιο 4. Απορροή και μεταφορά ιζημάτων: Αυτή η διαδικασία εξαρτάται βασικά από τις βροχοπτώσεις, αλλά μπορεί επίσης να συμβεί και λόγω του ανέμου. Όσον αφορά στις βροχοπτώσεις, η διαδικασία μπορεί να οδηγήσει σε επιφανειακή απορροή. Πράγματι, η διάβρωση μπορεί να οδηγήσει στη μείωση της παραγωγής

βιομάζας και τη μείωση του διαθέσιμου βάθους στην ζώνη ριζών, καθώς υπάρχει εξάντληση της οργανικής ύλης και των θρεπτικών συστατικών.
Στάδιο 5. Υποβάθμιση του εδάφους και ερημοποίηση: Απώλεια του όγκου του εδάφους και μείωση της υγρασίας εδάφους σε βαθμό, ώστε κάθε μορφή ζωής του οργανισμού που είναι χρήσιμη για τον άνθρωπο και το περιβάλλον να μπορεί να επιβιώσει.

14.5.4. Αντιμετώπιση της ερημοποίησης

Η ερημοποίηση πρέπει να αντιμετωπιστεί ως παγκόσμιο πρόβλημα και απαιτεί άμεσες ενέργειες και μέτρα. Ένα ολοκληρωμένο σχέδιο χρήσεων γης, εναλλακτικά συστήματα εκμετάλλευσης φυσικών πόρων, ορθολογική χρήση και διαχείριση υδάτινων πόρων, προστασία από διάβρωση του εδάφους, καθώς και προστασία δασών, αποτελούν ορισμένες απαραίτητες ενέργειες. Η βιώσιμη χρήση γης μπορεί να αντιμετωπίσει ανθρώπινες δραστηριότητες, όπως υπερβόσκηση, υπερεκμετάλλευση των φυτών και των μη βιώσιμων πρακτικών άρδευσης.
Οι στρατηγικές διαχείρισης περιλαμβάνουν μέτρα για τη διάδοση των πιέσεων των ανθρώπινων δραστηριοτήτων, όπως η εκ περιτροπής χρήση λιβαδιών, συντελεστές πυκνότητας συμβατούς με τη φέρουσα ικανότητα των οικοσυστημάτων, καθώς και ποικίλη σύνθεση των ειδών. Επίσης, η διατήρηση πρακτικών διαχείρισης για τη συλλογή νερού στη διάρκεια έντονων βροχοπτώσεων συμβάλλει στην πρόληψη της επιφανειακής απορροής να παρασύρει το λεπτό και γόνιμο έδαφος για τα φυτά. Επιπλέον, ημιεπαναφόρτιση των υπόγειων υδάτων μπορεί να παρέχει αποθέματα νερού για χρήση στη διάρκεια περιόδων ξηρασίας. Επίσης, η προστασία της φυτικής κάλυψης μπορεί να είναι ένα σημαντικό εργαλείο για την πρόληψη της απερήμωσης. Ειδικότερα, η διατήρηση της φυτοκάλυψης, για την προστασία του εδάφους από τον άνεμο και τη διάβρωση του νερού, αποτελεί βασικό προληπτικό μέτρο κατά της ερημοποίησης και της ξηρασίας. Η μείωση των βροχοπτώσεων μπορεί να προκληθεί εάν η κάλυψη της βλάστησης χάνεται, εξαιτίας υπερβόσκησης, υπερσυγκομιδής φαρμακευτικών φυτών, υλοτομίας ή μεταλλευτικών δραστηριοτήτων.

14.6. Παγετός

Παγετός ορίζεται μετεωρολογικά η πτώση της θερμοκρασίας του αέρα στην τιμή των 0^{o} C ή/και χαμηλότερα.τους τομείς που επηρεάζονται άμεσα από τον παγετό, με καταστροφικά αποτελέσματα, είναι η γεωργία. Όταν ο παγετός εμφανίζεται στην ενεργό περίοδο βλάστησης, προκαλεί μεγάλες ζημιές, που μπορεί να φτάσουν μέχρι και την ολοκληρωτική καταστροφή της παραγωγής. Ανάλογα με την εποχή κατά την οποία εκδηλώνεται, διαχωρίζεται σε τρία είδη, τον φθινοπωρινό, τον χειμερινό και τον εαρινό παγετό. Οι εαρινοί παγετοί δεν έχουν την ένταση και τη συχνότητα των χειμερινών, είναι όμως οι περισσότερο βλαβεροί για τη γεωργία, διότι την εποχή της άνοιξης τα περισσότερα φυτά είναι στο στάδιο της άνθισης ή των μικρών πράσινων καρπών και είναι ευπαθή ακόμα και σε ασθενείς παγετούς.

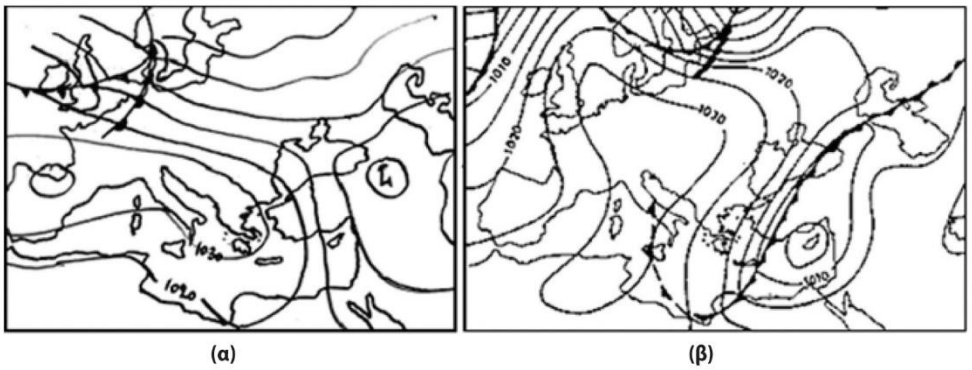
14.6.1. Είδη και χαρακτηριστικά παγετού

Ο παγετός παρουσιάζει διάφορα χαρακτηριστικά, όπως είναι η περίοδος επανεμφάνισης, η χωροχρονική ανάλυση συχνοτήτων, καθώς και η εμμονή του παγετού. Η περίοδος επανεμφάνισης είναι εξαιρετικά χρήσιμη, διότι μας επιτρέπει τον προσδιορισμό της αναμενόμενης ακραίας τιμής ενός μεγέθους, με βάση τον μέσο όρο των ακραίων τιμών του ίδιου μεγέθους σε συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Ως συχνότητα εμφάνισης παγετού ορίζεται η πιθανότητα εμφάνισης διαδοχικών ημερών μερικού παγετού, ενώ ένταση παγετού ορίζεται η απόλυτη ελάχιστη θερμοκρασία που παρατηρείται σε διαδοχικές ημέρες παγετού. Διάρκεια παγετού ορίζεται ο αριθμός διαδοχικών ημερών κατά τις οποίες παρατηρείται μερικός παγετός. Εξετάζεται επίσης η διάρκεια ελεύθερης από παγετό περιόδου εντός του έτους, καθώς και οι σχέσεις έντασης, διάρκειας και συχνότητας παγετού. Επίσης, το φαινόμενο του παγετού παρουσιάζει ποικίλη ένταση και έκταση. Οι ατμοσφαιρικοί μηχανισμοί δημιουργίας ποικίλλουν όσον αφορά την κλίμακα του φαινομένου. Ο παγετός γενικά ταξινομείται σε διάφορα είδη, που περιγράφονται στη συνέχεια:

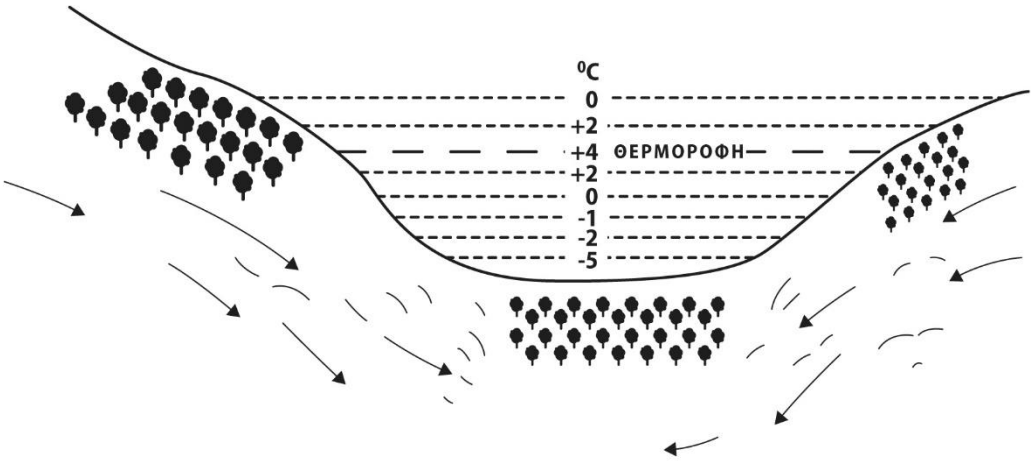
14.6.1.1. Είδη παγετού ως προς το αίτιο της γένεσής του

Ο παγετός διαχωρίζεται ως προς το αίτιο της γένεσής του σε παγετό μεταφοράς και παγετό ακτινοβολίας, πουοφείλονται σε συνοπτικούς παράγοντες. Ο παγετός ακτινοβολίας οφείλεται στην έντονη νυχτερινή ακτινοβολία του εδάφους, που αναπτύσσεται κάτω από συνθήκες ανέφελης νύχτας και συνοδεύεται από

αντικυκλωνικές καταστάσεις και άπνοια (Σχήμα 14.9α). Αντίθετα, ο παγετός μεταφοράς οφείλεται σε έντονη εισβολή ψυχρών αερίων μαζών, που συνήθως ακολουθούν τη διέλευση ενός ψυχρού μετώπου (Σχήμα 14.9β). Στον παγετό ακτινοβολίας υπάρχει θερμοκρασιακή αναστροφή και η θερμοκρασία σ' ένα μέσο ύψος 15 m από το έδαφος είναι μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία της εδαφικής επιφάνειας, συνήθως κατά 4-5° C (Σχήμα 14.10). Ειδικότερα, στο Σχήμα 14.10 απεικονίζεται ο σχηματισμός θύλακα παγετού σε μια κοιλάδα με δέντρα φυτεμένα στις πλαγιές και στο βάθος της. Κατά τη νύχτα παγετού, το έδαφος χάνει θερμότητα με ακτινοβολία. Ο ψυχρός αέρας κατέρχεται προς το κάτω μέρος της κοιλάδας, ενώ παράλληλα αναγκάζει τον θερμό αέρα να ανέβει προς τα πάνω. Οι συνθήκες αυτές ευνοούν τη θερμοκρασιακή αναστροφή και το σχηματισμό θερμοροφής.



Σχήμα 14.9. *(α) Συνοπτικός χάρτης επιφανείας, όπου επικρατούν αντικυκλωνικές συνθήκες, ευνοώντας παγετό ακτινοβολίας πάνω από την Ελλάδα. (β) Συνοπτικός χάρτες επιφάνειας 8:00 GMT της 27/12, όπου φαίνεται η έντονη εισβολή ψυχρών αερίων μαζών, που ακολουθούν το πέρασμα ψυχρού μετώπου, προκαλώντας παγετό μεταφοράς.*



Σχήμα 14.10. *Σχηματισμός θύλακα παγετού σε μια κοιλάδα.*

Συνοψίζοντας, μπορεί να λεχθεί ότι οι μηχανισμοί δημιουργίας παγετών ακτινοβολίας είναι οι ακόλουθοι: αντικυκλωνικά κέντρα, έλλειψη βαρομετρικού πεδίου, άπνοια ή ταχύτητα ανέμου έως 5m/sec, απουσία νέφωσης και χαμηλή ή μέτρια σχετική υγρασία. Για τους παγετούς μεταφοράς, οι μηχανισμοί είναι: ισχυρή βαροβαθμίδα μετά το πέρασμα ψυχρού μετώπου, υψηλή ταχύτητα ανέμου και χαμηλή κατά κανόνα σχετική υγρασία.

14.6.1.2. Είδη παγετού ως προς τη διάρκειά του

Με βάση τη διάρκεια του φαινομένου, ο παγετός ορίζεται ως **ολικός** όταν η μέγιστη θερμοκρασία του 24ώρου είναι μικρότερη ή ίση των 0° C και **μερικός** παγετός όταν η ελάχιστη θερμοκρασία του 24ώρου είναι μικρότερη ή ίση των 0° C. Ο **ολικός** παγετός, όταν διαρκεί για διαδοχικές ημέρες, μπορεί να έχει καταστροφικές επιπτώσεις, κυρίως γιατί σε αυτή την περίπτωση εισχωρεί ο παγετός εντός του εδάφους, με συνέπεια την καταστροφή σπόρων και ριζών που βρίσκονται εντός του. Το συνηθέστερο είδος παγετού στην Ελλάδα είναι ο

μερικός παγετός, εξίσου καταστροφικός, κυρίως την άνοιξη, όταν τα φυτά βρίσκονται στο στάδιο της ενεργού βλάστησης.

14.6.1.3. Είδη παγετού ως προς την υγρασία

Ο παγετός διαχωρίζεται, επίσης, ως προς την υγρασία που υπάρχει στην ατμόσφαιρα. Όταν υπάρχει συμπύκνωση υδρατμών και παραγωγή παγοκρυστάλλων (πάχνη), παράλληλα με την πτώση της θερμοκρασίας σε αρνητικές τιμές, τότε ονομάζεται λευκός παγετός. Στην αντίθετη περίπτωση, όταν δεν υπάρχει συμπύκνωση ταυτόχρονα με την πτώση της θερμοκρασίας κάτω των 0^o C, τότε ονομάζεται μαύρος παγετός.

14.6.1.4. Είδη παγετού ως προς την έντασή του

Ο παγετός τέλος διαχωρίζεται ανάλογα με την έντασή του σε ασθενή όταν η θερμοκρασία κυμαίνεται από 0^o C έως -4^o C, μέτριο όταν η θερμοκρασία κυμαίνεται από $-4{,}1^o$ C έως -10^o C και ισχυρό όταν η θερμοκρασία κυμαίνεται από -10^o C και πιο κάτω.

14.6.2. Μέθοδοι εκτίμησης παγετού

Η συμβολή της μετεωρολογίας στο πρόβλημα του παγετού μπορεί να συνοψιστεί τόσο στην έγκαιρη πρόγνωση του φαινομένου, όσο και στη μελέτη των κλιματολογικών συνθηκών, για την εκτίμηση της πιθανότητας συχνότητας εμφάνισης του φαινομένου σε κάποια περιοχή. Στη συνέχεια, περιγράφονται η ετήσια μεταβολή θερμοκρασίας, οι μέθοδοι πρόγνωσης, καθώς και οι σύγχρονοι μέθοδοι εκτίμησης του παγετού:

14.6.2.1. Ετήσια θερμοκρασιακή μεταβολή

Οι ετήσιες μεταβολές των θερμοκρασιών προσεγγίζονται με ικανοποιητική ακρίβεια από ημιτονοειδείς συναρτήσεις της μορφής:

$$\mathrm{T}_i(D) = A_i + B_i \sin(\tfrac{360}{365} D - F_i). \quad (14.4)$$

όπου οι ποσότητες A_i (σε ^{o}C), B_i (σε ^{o}C) και F_i (σε μοίρες) είναι σταθερές για κάθε θέση. Το μέγεθος D παριστάνει την ημέρα του έτους (D = 1, ..., 365) και ο δείκτης i δηλώνει μέση (mean), μέση μεγίστη (mean-max), μέση ελαχίστη (mean-min), μεγίστη μεγίστων (max-max) και ελαχίστη ελαχίστων (min-min) θερμοκρασία ημέρας.

14.6.2.2. Μέθοδοι πρόγνωσης του παγετού

Η πρόγνωση του παγετού έχει μεγάλη σημασία, κυρίως για την πρόληψη καταστροφών στη γεωργία και στις καλλιέργειες. Η πρόγνωση γίνεται με την ανάλυση ημερήσιων συνοπτικών χαρτών καιρού, καθώς και με την εφαρμογή εμπειρικών μοντέλων. Εφαρμόζονται θεωρητικές και τεχνικές μέθοδοι, που συνδυάζουν τη θερμοκρασία του αέρα, τη θερμοκρασία του σημείου δρόσου και τη θερμοκρασία της επιφάνειας του εδάφους, μέσω της μεταφοράς θερμότητας. Επίσης, εφαρμόζονται τύποι που μελετούν τη συμπεριφορά της μεταβολής της θερμοκρασίας με το ύψος στο κατώτερο στρώμα της ατμόσφαιρας (1,5-24 m). Τα στάδια της πρόγνωσης παγετού είναι δύο: γενική και τοπική πρόγνωση. Γενική πρόγνωση είναι ο καθορισμός των ιδιοτήτων της αέριας μάζας που καλύπτει την περιοχή κατά τη νύχτα και νωρίς το πρωί. Στην τοπική πρόγνωση επιλέγονται ορισμένες αντιπροσωπευτικές θέσεις της περιοχής, όπως μια κοιλάδα, οι παρυφές ή η κορυφή ενός λόφου. Η νυχτερινή πτώση της θερμοκρασίας εξαρτάται από τη διάρκεια της νύχτας, καθώς, όσο μεγαλύτερη είναι η διάρκεια της νύχτας, τόσο μεγαλύτερη είναι και η πτώση της θερμοκρασίας, και από τη θερμότητα που χάνει το έδαφος. Το ποσό της θερμότητας που χάνει το έδαφος είναι συνάρτηση της υγρασίας και θερμοκρασίας του εδάφους, της νεφοκάλυψης, της φυτοκάλυψης, της θερμοκρασίας αέρα και άλλων παραγόντων.
Για την πρόγνωση, χρησιμοποιούνται διάφοροι μέθοδοι (Bagdonas et al., 1978), μερικές από τις οποίες παρουσιάζονται παρακάτω:

- **Κανόνας μεγίστης-ελαχίστης:** Έχει αποδειχτεί ότι η ελάχιστη θερμοκρασία ($T_{ελ}$) της επόμενης ημέρας (N+1) συνδέεται με γραμμική σχέση με τη μέγιστη θερμοκρασία ($T_{μεγ}$) της ημέρας (N) κατά την οποία γίνεται η πρόγνωση, δηλαδή:

$T_{ελ} = αT_{μεγ} - β$, όπου α, β σταθερές. (14.4)

- **Κανόνας του υγρού θερμομέτρου:** Στη μέθοδο αυτή λαμβάνεται υπόψη η επίδραση των υδρατμών της ατμόσφαιρας, που παρεμποδίζει την απώλεια θερμότητας από την επιφάνεια του εδάφους:

$$T_{ελ} = \alpha T_w - \beta T_{\xi} - \gamma \text{ , (14.5)}$$

όπου T_W η θερμοκρασία υγρού θερμομέτρου τη στιγμή της δύσης του ήλιου της ημέρας N, $T_ξ$ η θερμοκρασία ξηρού θερμομέτρου την ίδια ημέρα και ώρα και α, β, γ οι σταθερές, που εξαρτώνται από την τοποθεσία. Πολλές φορές τα α, β είναι πολύ μικρά, οπότε ο τύπος απλοποιείται σε: $T_{ελ} = T_W - γ$ και ονομάζεται τύπος του Kammerman.

- **Τύπος του Craddock:** Είναι εμπειρικός τύπος με βάση τις τιμές της θερμοκρασίας του ξηρού θερμομέτρου T_{1200Z} και του σημείου δρόσου D_{1200Z} στις 12:00Z:

$$T_E = \alpha T_{1200Z} + \beta D_{1200Z} + 2{,}12 + \gamma \text{ . (14.6)}$$

Οι τιμές των θερμοκρασιών δίνονται σε βαθμούς F. Οι α, β είναι σταθερές. Η σταθερά γ δίνεται ως συνάρτηση της μέσης νέφωσης στις προγνωστικές ώρες 1800Z, 2400Z και 600Z, και της μέσης έντασης του ανέμου σε κόμβους (Knots) τις ίδιες ώρες. Ο τύπος δεν εφαρμόζεται όταν τη νύχτα υπάρχει ομίχλη.

- **Τύπος του Gold:** Δίνεται από τη σχέση:

$$T_E = aT_{1500Z} + \beta D_{1500Z} - \gamma \text{ , (14.7)}$$

όπου T_{1500Z} είναι η θερμοκρασία και D_{1500Z} η θερμοκρασία σημείου δρόσου στις 1500Z.

- **Τύπος του Faust για παγετό εδάφους:** Ο Faust διατύπωσε έναν εμπειρικό τύπο με βάση τον οποίο, αν το ποσό της νέφωσης τη νύχτα είναι μικρότερο από 2/8 και η μέση ταχύτητα του ανέμου μικρότερη από 2 κόμβους, τότε θα συμβεί παγετός εδάφους, όταν το άθροισμα T + 1/2D στις 14:00 τοπική ώρα είναι μικρότερο από 79° F.

- **Γραμμική Παλινδρόμηση πολλών μεταβλητών:** Για την πρόγνωση της ελάχιστης θερμοκρασίας του 24ώρου, έχει ήδη χρησιμοποιηθεί γραμμική παλινδρόμηση πολλών μεταβλητών, σύμφωνα με τον τύπο:

$$Y = a_o + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + a_4 X_4 + a_5 X_5 \text{ , (14.8)}$$

όπου X_1 είναι η θερμοκρασία ξηρού θερμομέτρου, X_2 η συνάρτηση της νεφοκάλυψης: $X_2 = 0{,}9m + 0{,}5k$, όπου m το ποσό χαμηλών νεφών και k το ποσό μεσαίων νεφών σε όγδοα, X_3 η συνάρτηση της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου, X_4 η θερμοκρασία του σημείου δρόσου και X_5 η συνάρτηση που εξαρτάται από την ύπαρξη παγετού την προηγούμενη ημέρα, 1 αν υπήρξε και 0 αν όχι. Οι μεταβλητές $α_o$, ..., $α_5$ υπολογίζονται με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων για συγκεκριμένη περιοχή.

- **Μοντέλο ANGELA:** Το φυσικό μοντέλο του συστήματος ANGELA (WMO, 2010) αναφέρεται στην πτώση της θερμοκρασίας κατά τη νύχτα. Στο μοντέλο αυτό, η θερμοκρασία της επιφάνειας του εδάφους είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας κατά τη δύση του ήλιου και του χρόνου μετά τη δύση, και δίνεται από τη σχέση:

$T_n = T_s - K \text{ x } n^{1/2}$, (14.9)

όπου T_n είναι η θερμοκρασία n ώρες μετά τη δύση του ήλιου σε °C, T_s η θερμοκρασία κατά τη δύση του ήλιου σε °C, K ο συντελεστής πτώσης της θερμοκρασίας και n ο αριθμός των ωρών μετά τη δύση του ήλιου.

- **Μέθοδοι τηλεπισκόπησης:** Η εκτίμηση παγετού με τη χρήση τηλεπισκόπησης καλύπτεται στο Κεφάλαιο 9 και συγκεκριμένα στην εκτίμηση θερμοκρασίας ξηράς.

14.6.3. Επιπτώσεις και προστασία από τον παγετό

14.6.3.1. Επιπτώσεις

Ένας από τους τομείς που επηρεάζεται άμεσα, με καταστροφικά συνήθως αποτελέσματα, είναι η γεωργία. Οι ζημιές που υφίσταται η γεωργία από τους παγετούς είναι πάρα πολύ μεγάλες και μερικές φορές αγγίζουν και την ολοκληρωτική καταστροφή της παραγωγής. Η κρίσιμη θερμοκρασία κάτω από την οποία υπάρχουν ζημιές στα φυτά εξαρτάται κυρίως από το στάδιο ανάπτυξης του φυτικού ιστού. Δύο είναι οι τρόποι με τους οποίους το φαινόμενο του παγετού επιδρά καταστρεπτικά στα φυτά, ωστόσο και οι δύο αφορούν τη δράση σε κυτταρική κλίμακα. Ο Πίνακας 14.5 έχει μεγάλη σημασία, διότι, όταν είναι γνωστή η αντοχή του δένδρου στα διάφορα βλαστικά στάδια, καθώς και οι ελάχιστες θερμοκρασίες μιας περιοχής, γίνεται καλύτερη επιλογή της κατάλληλης ποικιλίας.

Παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται το μέγεθος των ζημιών (π.χ. στα εσπεριδοειδή) είναι το μέγεθος και η ταχύτητα πτώσης της θερμοκρασίας, η διάρκεια του παγετού, η ταχύτητα ανόδου της θερμοκρασίας, η εποχή του παγετού, η σκληραγώγηση, το βοτανικό είδος και ποικιλία, το βλαστικό μέρος του φυτού, το βλαστικό στάδιο του φυτού, καθώς και η ηλικία του φυτού.

14.6.3.2. Προστασία από τον παγετό

Αρκετές τεχνικές έχουν αναπτυχθεί για την πρόληψη καταστροφών από παγετό. Οι τεχνικές που εφαρμόζονται στη γεωργία περιλαμβάνουν τόσο την αντιμετώπιση του φαινομένου, όσο και την ανάπτυξη έρευνας σε επίπεδο αντοχής των καλλιεργούμενων φυτών. Έχει παρατηρηθεί ότι ο καλύτερος χρόνος για την προστασία μιας περιοχής από τον παγετό είναι πριν ακόμα γίνει το φύτεμα. Αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να επιλεγούν το φυτικό είδος, η περιοχή, καθώς και ο χρόνος φυτέματος. Για τον περιορισμό των ζημιών στη γεωργία από παγετούς, εφαρμόζονται διάφορα μέτρα παθητικής ή ενεργητικής προστασίας. Τα μέτρα παθητικής προστασίας περιλαμβάνουν μικροκλιματολογική έρευνα πριν από την οποιαδήποτε χρήση ενός αγρού και την επιλογή της καταλληλότερης καλλιέργειας για την κάθε περιοχή. Αντίθετα, με τα μέτρα της ενεργητικής προστασίας επιδιώκεται να τροποποιηθεί το μικροκλίμα του αγρού, ώστε να αποφευχθούν οι χαμηλές θερμοκρασίες που δημιουργεί ο παγετός σε μια καλλιέργεια. Οι περισσότερες από τις πρακτικές τεχνικές, που απαριθμούνται παρακάτω, για την καταπολέμηση του φαινομένου του παγετού είναι αποτελεσματικές μόνο για παγετούς ακτινοβολίας, αν και μερικές μπορούν να εφαρμοστούν και σε παγετούς μεταφοράς. Οι βασικές αρχές στις οποίες βασίζονται είναι η εκλογή κατάλληλης θέσης, η παρεμπόδιση ανακλώμενης ακτινοβολίας, η θερμική μόνωση, η ανάμειξη αέρα, η θέρμανση του αγρού, η χρήση νερού, η παράταση του χειμερινού λήθαργου και η αναμόχλευση του εδάφους.

Οπωροφόρα δένδρα	**Φάση βλάστησης**		
	Κάλυκες κλειστοί με ορατό το άκρο των έγχρωμων πετάλων	**Πλήρης άνθιση**	**Μικροί πράσινοι καρποί**
Μηλιά	-3,9	-2,2	-1,7
Ροδακινιά	-3,9	-2,8	-1,1
Κερασιά	-2,2	-2,2	-1,1
Δαμασκηνιά	-3,9	-2,2	-1,1
Βερικοκιά	-3,9	-2,2	-0,6
Αμυγδαλιά	-4,4	-3,3	-1,1
Αχλαδιά	-3,9	-2,2	-1,1
Άμπελος	-1,1	-0,6	-0,6
Καρυδιά	-1,0	-1,1	-1,1

Πίνακας 14.5. *Θερμοκρασίες ζημιάς παγετού στα φυλλοβόλα οπωροφόρα δέντρα.*

14.7. Καύσωνας

Ο όρος «καύσωνας» χρησιμοποιείται για να δηλώσει ασυνήθιστα υψηλές θερμοκρασίες. Αν και μπορεί να γίνει εύκολα κατανοητός ως όρος, επικρατεί σύγχυση μεταξύ των μετεωρολόγων για τα όρια και τα κατώφλια του όρου. Οι καύσωνες χαρακτηρίζονται από υψηλότερες των συνηθισμένων θερμοκρασίες, ασθενείς ανέμους και γενικά καλοκαιρία. Επιπλέον, η ζέστη και ο καύσωνας προκαλούν ένα αίσθημα δυσφορίας. Συνεχιζόμενη ζέστη αυξάνει τη δυσφορία και μπορεί να προκαλέσει δυσμενείς επιδράσεις στην υγεία, ιδιαίτερα σε συνδυασμό με υψηλά επίπεδα υγρασίας ή με επιδείνωση της φυσικής κατάστασης ενός ατόμου. Το αίσθημα δυσφορίας όχι μόνο αυξάνει με την αύξηση της απόκλισης από άνετες συνθήκες, αλλά και με το χρόνο διάρκειας τέτοιων συνθηκών. Αν η ζέστη διαρκεί για περισσότερο από μερικές ημέρες, τότε το φαινόμενο ονομάζεται κύμα καύσωνα. Στα μέσα και υψηλά γεωγραφικά πλάτη, τα κύματα καύσωνα εμφανίζονται το καλοκαίρι, ενώ στους τροπικούς είναι ενδημικά.

14.7.1. Μετεωρολογικά χαρακτηριστικά του καύσωνα

Η θερμοκρασία σώματος των 37° C θεωρείται, συνήθως, η βάση για συνθήκες θερμικής άνεσης, ενώ υψηλότερες θερμοκρασίες δημιουργούν, σταδιακά, συνθήκες δυσφορίας. Εκτός από τη θερμοκρασία, εξετάζονται και άλλες παράμετροι, όπως η διάρκεια του καύσωνα, η ένταση και η συχνότητα εμφάνισης του φαινομένου. Καιρικές και περιβαλλοντικές συνθήκες είναι, συνήθως, ασταθείς και σχεδόν μόνιμα ενεργοποιούν το σύστημα ρύθμισης θερμοκρασίας του σώματος ζώντων οργανισμών. Η ενεργοποίηση των μηχανισμών ελέγχου της θερμοκρασίας εξαρτάται από το ενεργειακό ισοζύγιο του σώματος. Η πηγή ενέργειας είναι τα τρόφιμα, που μετασχηματίζονται από το μεταβολισμό του σώματος. Σε συνθήκες ζέστης, υπάρχει μια απόκλιση από τις συνθήκες θερμικής άνεσης, επιφέροντας ανισορροπίες στο ενεργειακό ισοζύγιο και στη θερμορύθμιση των δραστηριοτήτων του οργανισμού. Το αποτέλεσμα είναι η ενισχυμένη μεταφορά ενέργειας από τον πυρήνα του σώματος στην επιφάνεια, με επιβολή αυξημένης κυκλοφορίας του αίματος, για τη διατήρηση της θερμικής άνεσης. Ωστόσο, η θερμοκρασία της επιφάνειας και οι επιφανειακές ροές ενέργειας επηρεάζονται κυρίως από το πολύπλοκο σύνολο περιβαλλοντικών παραμέτρων. Η ποσοτικοποίηση της ζέστης είναι συνάρτηση της συνολικής εκτίμησης του ισοζυγίου ενέργειας του σώματος ζώντων οργανισμών. Επισημαίνεται ότι παράγοντες του ισοζυγίου ενέργειας είναι η θερμοκρασία του αέρα, η υγρασία, ο αερισμός, η ακτινοβολία, η σωματική δραστηριότητα, τα είδη ένδυσης, η μάζα και το σχήμα του σώματος, η κατάσταση της υγείας, η ηλικία, καθώς και η ατομική προδιάθεση. Σε περίπτωση υπερθέρμανσης, το σύστημα ρύθμισης θερμοκρασίας του σώματος δεν μπορεί να διατηρήσει ένα ανεκτό εύρος θερμοκρασίας στα βασικά μέρη του.
Οι βασικές παράμετροι είναι η θερμοκρασία του αέρα, η υγρασία, η ηλιακή ακτινοβολία, η ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος, η ταχύτητα του ανέμου και η ποιότητα του αέρα. Συνήθως, η ποσοτική εκτίμηση του καύσωνα γίνεται μέσω δεικτών, οι οποίοι επιτρέπουν μια απλουστευμένη περιγραφή του ισοζυγίου ενέργειας του σώματος. Επίσης, ταξινομούν τις περιβαλλοντικές συνθήκες, είτε συνιστώντας εφικτή τη σωματική δραστηριότητα είτε απαιτώντας την ψύξη του σώματος, έτσι ώστε να αποφεύγονται οι βλάβες στην υγεία από την υπερθέρμανση. Αν οι μηχανισμοί ψύξης δεν είναι αρκετά αποτελεσματικοί, ώστε να διατηρηθεί η θερμοκρασία του πυρήνα σε σταθερό βέλτιστο επίπεδο, προκύπτει κατάσταση θερμοπληξίας. Συνήθως, η θερμοκρασία χρησιμοποιείται ως βασική παράμετρος στους δείκτες, αν και οι ενεργειακές ροές από την επιφάνεια του σώματος εξαρτώνται από τη συνδυασμένη επίδραση των παραμέτρων αυτών. Ορισμένοι συνδυασμοί παραμέτρων έχουν οδηγήσει σε αποθήκευση αισθητής ενέργειας στον πυρήνα του σώματος, με συνέπεια η υπερθέρμανση να προκαλεί δυσμενείς επιπτώσεις σε οποιοδήποτε προσβεβλημένο άτομο ή ζώντα οργανισμό. Απόκλιση από τις αισθητές συνθήκες θερμικής άνεσης οδηγεί σε ανισορροπία του ισοζυγίου ενέργειας του σώματος και της θερμορυθμιστικής δραστηριότητας.

14.7.2. Κλιματική ανασκόπηση του καύσωνα

Υπάρχουν διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες ανά κλιματική ζώνη στον πλανήτη. Οι κλιματολογικές συνθήκες δείχνουν ότι, στις υγρές τροπικές περιοχές, θερμική καταπόνηση εμφανίζεται σε περισσότερες από 300 ημέρες το χρόνο, όταν οι μόνιμοι πληθυσμοί έχουν εγκλιματιστεί και είναι προετοιμασμένοι σε ενδημικές συνθήκες καύσωνα. Αντίθετα, στα μέσα γεωγραφικά πλάτη, η θερμική καταπόνηση παρουσιάζει ένα εύρος εμφάνισης περίπου από 20 έως 100 ημέρες το χρόνο. Στα μέσα γεωγραφικά πλάτη, οι μέρες με θερμική καταπόνηση εμφανίζονται κυρίως τη θερινή περίοδο και στη συνέχεια ομαδοποιούνται σε κύματα καύσωνα, υπερβαίνοντας συνήθως τις κλιματικές μέσες θερμοκρασίες με διάρκεια συνήθως από 2 έως 5 ημέρες. Η ένταση

ή η δριμύτητα κάθε καύσωνα εξαρτάται από τις χρονικές και τοπικές ιδιαιτερότητες των συστημάτων πίεσης, που επιτρέπουν, σε σπάνιες περιπτώσεις, κύματα καύσωνα διάρκειας εβδομάδων, με ιδιαίτερα θερμές συνθήκες.
Τον τελευταίο αιώνα, περίπου 150 κύματα καύσωνα έχουν καταγραφεί (EM-DAT, 2012). Ειδικότερα, τα θανατηφόρα κύματα καύσωνα έχουν σημειωθεί στην Ευρώπη το 2003 και το 2010, οπότε και ο αριθμός των θανάτων ξεπέρασε τους 66.000 και τους 55.000, αντίστοιχα (EM-DAT, 2012). Επίσης, οι δύο αυτοί καύσωνες προκάλεσαν υλικές ζημιές, κυρίως σε δασοκομία και γεωργία. Και τα δύο κύματα καύσωνα προκλήθηκαν από ένα μακράς διάρκειας μέσου πλάτους πεδίο ροής αέρα, γνωστό διεθνώς ως σύστημα «μπλοκ». Ωστόσο, υπάρχουν δύο επιπρόσθετοι επιβαρυντικοί παράγοντες, η υψηλή θερμοκρασία και η χαμηλή βροχόπτωση. Ειδικότερα, η μέση μηνιαία μέγιστη θερμοκρασία και στις δύο περιπτώσεις, δηλαδή τον Ιούλιο του 2010 στη Ρωσία και τον Αύγουστο του 2003 στη Γαλλία, ήταν περίπου 10^{o} C υψηλότερη από τον κλιματικό μέσο όρο. Και στις δύο περιπτώσεις, ο αριθμός των ημερών με εξαιρετικά υψηλή μέγιστη ημερήσια θερμοκρασία ήταν πρωτοφανής, όπου τα κατώτατα όρια ήταν 36^{o} C στη Δυτική Ευρώπη το 2003 και 30^{o} C στη Ρωσία το 2010.
Κατά τα τελευταία χρόνια, ο αριθμός των ημερών θερμικής καταπόνησης και κυμάτων καύσωνα έχει αυξηθεί στα μέσα γεωγραφικά πλάτη. Υπάρχουν στατιστικά παραμέτρων που συμβάλλουν στη διαμόρφωση της θερμικής καταπόνησης (Jendritzky & Binz, Με τιμ2009). Παρατηρήσεις για την Κεντρική Ευρώπη δείχνουν ήδη μια δραστική αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας (> 30^{o} C) (Schar et al., 2004). Τις τελευταίες δεκαετίες, ο αριθμός ημερών με υψηλή θερμοκρασία υπερδιπλασιάστηκε, ενώ η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας ήταν περίπου 1^{o} C. Οι μελλοντικές εκτιμήσεις της κλιματικής αλλαγής επισημαίνουν την περαιτέρω αύξηση της θερμικής καταπόνησης σε πολλά μέρη του κόσμου. Η συχνότητα των κυμάτων καύσωνα αναμένεται να αλλάξει στο μέλλον.

14.7.3. Παραδείγματα - Εφαρμογές.

Παρουσιάζονται δύο παραδείγματα ή εφαρμογές εκτίμησης καύσωνα:

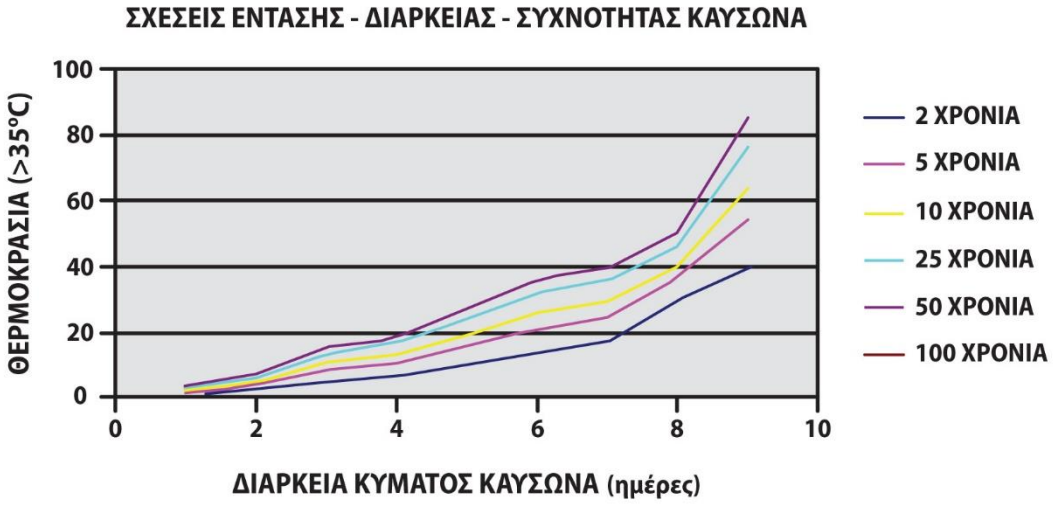
14.7.3.1. Σχέσεις έντασης-διάρκειας-συχνότητας καύσωνα

Αναπτύσσονται οι σχέσεις έντασης-διάρκειας-συχνότητας καύσωνα για κάθε σταθμό και χαρτογραφούνται για όλη την Ελλάδα. Η μεθοδολογία για κάθε σταθμό περιλαμβάνει τα ακόλουθα. Με τιμή κατωφλίου τη μέγιστη ημερήσια θερμοκρασία πάνω από 35^{o} C προσδιορίζεται ο αριθμός ημερών με τέτοιες θερμοκρασίες για κάθε σταθμό. Τονίζεται ότι χρησιμοποιείται το όριο των 35^{o} C προκειμένου να υπάρχει ένα διάστημα επαγρύπνησης για ενδεχόμενο επερχόμενο καύσωνα με θερμοκρασίες ίσες ή μεγαλύτερες των 37^{o} C, που αποτελεί και το όριο θερμικής άνεσης του σώματος. Αν υπάρχουν διαδοχικές μέρες με μέγιστη θερμοκρασία πάνω από 35^{o} C, χαρακτηρίζονται ως ένα επεισόδιο καύσωνα με διάρκεια τον αριθμό των διαδοχικών ημερών και ένταση την αντίστοιχη αθροιστική θερμοκρασία πάνω από 35^{o} C για την περίοδο αυτή. Διάφορα επεισόδια ομαδοποιούνται ανάλογα με τη διάρκεια για όλη την περίοδο μελέτης και ιεραρχούνται ποσοτικά ανάλογα με την ένταση κάθε σταθμού. Η συχνότητα ενός ακραίου συμβάντος εκφράζεται συνήθως με την περίοδο επαναφοράς ή το διάστημα επανεμφάνισης, που μπορεί να οριστεί ως το μέσο χρονικό διάστημα στο οποίο το μέγεθος του συμβάντος γίνεται ίσο ή το υπερβαίνει μια φορά. Το μέγεθος ενός ακραίου συμβάντος δίνεται από την απόλυτη μέγιστη θερμοκρασία, που εμφανίζεται με συγκεκριμένη διάρκεια. Τα δεδομένα ακραίων συμβάντων μπορούν να απεικονιστούν με γραφήματα έντασης-διάρκειας-συχνότητας για κάθε σταθμό. Η μεθοδολογία των σχέσεων αυτών περιγράφεται αναλυτικά σε άλλες δημοσιεύσεις και έχει εφαρμοστεί σε διάφορους κινδύνους, εκτός από καύσωνα (Babzelis et al., 2006). Στο Σχήμα 14.11 παρουσιάζονται οι σχέσεις έντασης-διάρκειας-συχνότητας για καύσωνα στο σταθμό της Λάρισας.

14.7.3.2. Χρονικό καύσωνα και δασικών πυρκαγιών

Υψηλές θερμοκρασίες σε συνδυασμό με ξηρασία είναι πολύ επικίνδυνες για την έναρξη και διάδοση δασικών πυρκαγιών. Θερμοί και ξηροί άνεμοι ευνοούν την επέκταση και διάδοσή τους. Στην Ελλάδα, η έναρξη των περισσότερων πυρκαγιών σημειώνεται στη διάρκεια του μεσημεριού, όταν παρουσιάζονται οι μέγιστες ημερήσιες θερμοκρασίες, ενώ παράλληλα σημειώνεται η ελάχιστη σχετική υγρασία. Είναι γεγονός ότι οι δασικές πυρκαγιές αποτελούν από τους πιο διαδεδομένους περιβαλλοντικούς κινδύνους. Αυτός ο κίνδυνος συμβάλλει σημαντικά στις αλλαγές κλίματος και την εδαφική υποβάθμιση (Domenikiotis et al., 2002). Η καταστροφή της βλάστησης από τις δασικές πυρκαγιές μπορεί να έχει επιπτώσεις στην επιφάνεια του εδάφους και τον υδρολογικό κύκλο, μέσω της αύξησης της λευκάγειας (albedo), της επιφανειακής απορροής, της μείωσης της εξατμισοδιαπνοής, της αύξησης της διάβρωσης, της εμφάνισης πλημμυρικών φαινομένων και της

ερημοποίησης. Επιπλέον, τα αέρια που εκλύονται από το κάψιμο βιομάζας μπορεί να συμβάλουν στην επιδείνωση του φαινομένου του θερμοκηπίου.



Σχήμα 14.11. *Σχέσεις έντασης-διάρκειας-συχνότητας καύσωνα.*

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται το χρονικό του καύσωνα που σημειώθηκε στα τέλη Ιουνίου του 2007 στη Θεσσαλία, με συνέπεια το ξέσπασμα δασικών πυρκαγιών. Γίνεται έλεγχος της συνοπτικής κατάστασης που επικρατούσε στη διάρκεια του καύσωνα και παρουσιάζεται η συχνότητα εμφάνισης τέτοιων περιστατικών με τη χρήση καμπυλών έντασης-διάρκειας-συχνότητας (Intensity-Duration-Frequency/IDF) του σταθμού της Λάρισας. Ακολουθεί η παρακολούθηση της πυρκαγιάς στην περιοχή του Πηλίου στις 27 Ιουνίου 2007. Ελέγχονται οι μετεωρολογικές παράμετροι που επικράτησαν κατά την έναρξη της πυρκαγιάς, καθώς και η επιβεβαίωση της επικινδυνότητας έναρξης με τη χρήση του δείκτη Angstrom (I). Τέλος, γίνεται αποτίμηση της καμένης έκτασης, με τη χρήση δορυφορικών δεδομένων (Tsiros et al., 2008).

14.8. Δασικές πυρκαγιές

Η σημασία των δασών στο περιβάλλον και στον άνθρωπο είναι πολύ μεγάλη. Επισημαίνεται κυρίως ότι επιδρούν στη διαμόρφωση κλιματικών συνθηκών, καθώς και ότι αποτελούν προσφορά της φύσης στον άνθρωπο. Για τους λόγους αυτούς, είναι απαραίτητη η προστασία τους για τη συνέχεια κάθε μορφής ζωής στον πλανήτη. Η συμβολή του δάσους, που είναι το κυρίαρχο οικοσύστημα μέσα στο φυσικό περιβάλλον, δεν περιορίζεται μόνο στην παραγωγή προϊόντων, όπως το ξύλο, η ρητίνη, οι δεψικές ύλες και η τροφή για τα έντομα, αλλά εκτείνεται και στην παραγωγή οξυγόνου, στη δράση του για το φιλτράρισμα του αέρα και του νερού, στον περιορισμό της μετακίνησης της ραδιενεργούς σκόνης, στην αποταμίευση νερού και στην προστασία και βελτίωση του εδάφους και γενικότερα του φυσικού περιβάλλοντος. Τα δάση, με τις διάφορες παραγωγικές, περιβαλλοντικές, κοινωνικές και πολιτιστικές λειτουργίες τους, αποτελούν πολύτιμο ανανεώσιμο φυσικό πόρο, με τεράστιες δυνατότητες, οι οποίες, εάν αξιοποιηθούν κατάλληλα, μπορούν να συμβάλουν ουσιαστικά και σημαντικά στη δημιουργία καλύτερων συνθηκών διαβίωσης. Ειδικότερα, οι υπηρεσίες που προσφέρονται από το δάσος και επιβεβαιώνουν την αξία και τη σημασία του για τη βελτίωση των συνθηκών ζωής αφορούν κυρίως τις επιδράσεις του δάσους στην παραγωγή οξυγόνου, στο κλίμα, στο υδατικό ισοζύγιο, με τη δυνατότητα αποταμίευσης ποσοτήτων νερού και δημιουργίας υδροφόρων στρωμάτων, στην καταπολέμηση της ρύπανσης της ατμόσφαιρας και του περιβάλλοντος, στην προστασία έναντι της ακτινοβολίας και του θορύβου, στη διαμόρφωση χώρων αναψυχής, στην προστασία του εδάφους και στη μείωση και αποτροπή των διαβρώσεων.

14.8.1. Δασική μετεωρολογία

Μετεωρολογικοί παράγοντες όπως η βροχή, και ιδιαίτερα η ποσότητα και η συχνότητα επανεμφάνισής της, η υψηλή θερμοκρασία, η χαμηλή σχετική υγρασία και ο άνεμος επιδρούν σημαντικά στην έναρξη και διάδοση

των δασικών πυρκαγιών. Ο σπουδαιότερος από αυτούς τους παράγοντες είναι το ποσό της περιεχόμενης υγρασίας της καύσιμης δασικής ύλης. Επισημαίνεται ότι πολύ ευνοϊκή κατάσταση για την έναρξη και διάδοση της πυρκαγιάς θεωρείται η ξηρότητα της καύσιμης δασικής ύλης. Πιο συγκεκριμένα, εκτεταμένες πυρκαγιές μπορεί να προκληθούν σε περιόδους ξηρασίας ή μετά το τέλος μιας ξηρασίας, καθώς και από αστραπές και κεραυνούς ή από ανθρώπινες δραστηριότητες σχεδόν σε κάθε μέρος του κόσμου. Οι πυρκαγιές αυτές καταστρέφουν δάση, θαμνώδεις εκτάσεις και καλλιέργειες, ενώ επιφέρουν επίσης θανάτους στο ζωικό κεφάλαιο και στα άγρια ζώα ή καταστρέφουν εγκαταστάσεις και υποδομές.

- **Βροχή.** Οι βροχές που διαρκούν μεγάλο χρονικό διάστημα και είναι έντονες αποθέτουν μεγάλες ποσότητες νερού, διαβρέχουν καλά την εύφλεκτη δασική ύλη και την καθιστούν ανθεκτική στην έναρξη και επέκταση των πυρκαγιών. Αντίθετα, ασθενείς βροχές, μικρής διάρκειας έχουν μικρότερη επίδραση. Όμως, όχι μόνο η ποσότητα και η διάρκεια της βροχής παίζουν ρόλο, αλλά και η εποχή του έτους, ο καιρός που ακολουθεί τη βροχή, η τοπογραφία, καθώς και η ποσότητα και το είδος της καύσιμης δασικής ύλης. Στη χώρα μας, όπου εμφανίζεται ξηρασία και υψηλές θερμοκρασίες το καλοκαίρι και το φθινόπωρο, η άφθονη ποώδης βλάστηση που υπάρχει στα διάκενα των φωτοφύτων, δηλαδή των αραιών δασών χαλεπίου, τραχείας πεύκης, καθώς και στα αείφυλλα πλατύφυλλα και λιγότερο στη δρυ, ξηραίνεται αμέσως, οπότε εμφανίζονται πυρκαγιές δασών και βοσκοτόπων.
- **Άνεμος.** Η επίδραση του ανέμου στις δασικές πυρκαγιές εξαρτάται από την ταχύτητα και τη διεύθυνση του ανέμου. Η ταχύτητα του ανέμου είναι σημαντικός παράγοντας, που επιδρά στην ταχύτητα εξάπλωσης της πυρκαγιάς. Όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα του ανέμου, τόσο μεγαλύτερη είναι η προσφορά οξυγόνου που θεωρείται απαραίτητη για την καύση, καθώς οι φλόγες σπρώχνονται πιο μπροστά, προς τη γειτονική καύσιμη ύλη, την οποία θερμαίνουν και ξεραίνουν, ενώ συγχρόνως πετιούνται και μεταφέρονται μπροστά από τη φωτιά αναμμένα χόρτα, κλαδάκια και άλλα υλικά, που δημιουργούν νέες εστίες. Ο άνεμος είναι πιο επικίνδυνος όταν είναι ξηρός. Η διεύθυνσή του είναι επίσης σημαντικός παράγοντας, γιατί καθορίζει τη φύση του (ξηρός ή υγρός), καθώς και τη διεύθυνση επέκτασης της φωτιάς.
- **Θερμοκρασία.** Υψηλές θερμοκρασίες, σε συνδυασμό με ξηρασία, είναι πολύ επικίνδυνες για την έναρξη και διάδοση των δασικών πυρκαγιών. Θερμοί και ξηροί άνεμοι ευνοούν την επέκταση και διάδοση των δασικών πυρκαγιών. Στην Ελλάδα, στη διάρκεια του μεσημεριού, με τις μέγιστες θερμοκρασίες, σημειώνεται ταυτόχρονα η ελάχιστη σχετική υγρασία, οπότε εκδηλώνεται η έναρξη των περισσότερων πυρκαγιών. Επίσης, την περίοδο του καλοκαιριού και στην αρχή του φθινοπώρου, που χαρακτηρίζεται ως ξηρή και θερμή περίοδος, εκδηλώνονται οι περισσότερες πυρκαγιές. Στη χώρα μας, μεγάλες πυρκαγιές πάνω από 5.000 στρεμμάτων εκδηλώνονται κυρίως σε θερμοκρασίες πάνω από 30^{o} C.
- **Ατμοσφαιρική υγρασία.** Η ατμοσφαιρική υγρασία είναι σημαντικός παράγοντας για τη συχνότητα των δασικών πυρκαγιών, επειδή επιδρά στην περιεχόμενη υγρασία της καύσιμης δασικής ύλης. Η σχετική υγρασία επιδρά στο μέγεθος τους και κυρίως στον αριθμό τους. Αυτό οφείλεται στην επίδραση του ατμοσφαιρικού αέρα και κυρίως του ξηρού αέρα, που ξηραίνει την εύφλεκτη δασική ύλη. Στον Πίνακα 14.6 φαίνεται η επίδραση του μεγέθους της σχετικής υγρασίας στη συχνότητα των πυρκαγιών. Είναι γνωστό στην πράξη ότι τη νύχτα με υψηλή σχετική υγρασία είναι πιο εύκολη η απόσβεση πυρκαγιών και μάλιστα, όταν δεν πνέει άνεμος, οι πυρκαγιές σβήνουν μόνες τους.

Σχετική υγρασία (%)	**Συχνότητα πυρκαγιών**
>50-60	Λίγες πυρκαγιές, που δεν επεκτείνονται με μικρή ταχύτητα του αέρα.
40-50	Έχουμε μικρή ταχύτητα, σε λεπτό καύσιμο υλικό.
31-40	Η ταχύτητα αυτή αυξάνεται 1,5 φορά.
26-30	Η ταχύτητα διπλασιάζεται.
16-25	Η ταχύτητα τριπλασιάζεται, δημιουργώντας επικίνδυνες καταστάσεις.

Πίνακας 14.6. *Σχέση σχετικής υγρασίας και συχνότητας πυρκαγιών.*

14.8.2. Αίτια δασικών πυρκαγιών

Η καλή γνώση των αιτίων των δασικών πυρκαγιών είναι ένας εξαιρετικά σημαντικός παράγοντας για τον αποτελεσματικό σχεδιασμό της πρόληψής τους. Τα αίτια των πυρκαγιών είναι δυνατόν να διαφέρουν σημαντικά από μια περιοχή της χώρας σε μια άλλη, τόσο λόγω περιβαλλοντικών παραγόντων, όπως τύπος βλάστησης, συχνότητα κεραυνών, κλιματικές συνθήκες και άλλα συναφή, όσο και ανθρωπογενών, όπως πολιτιστική παράδοση και χρήσεις γης. Σαφώς, είναι απαραίτητη η συγκέντρωση αξιόπιστων στατιστικών στοιχείων για την αναγνώριση και κατανόηση των αιτίων ανά περιοχή, ώστε να ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα πρόβλεψης. Τα πιο συνηθισμένα αίτια πυρκαγιών διεθνώς αναφέρονται στον Πίνακα 14.7.

ΑΙΤΙΕΣ	ΕΛΛΑΔΑ	ΤΟΥΡΚΙΑ	ΙΤΑΛΙΑ	ΙΣΠΑΝΙΑ	Ν. ΓΑΛΛΙΑ	ΗΠΑ	ΚΑΝΑΔΑΣ
1. Αμέλειες							
1.1 Τσιγάρα/Σπίρτα	14,0	6,7			12,0	19	
1.2 Καύση καλαμιάς, κλαδιών ξερών χόρτων κτλ.	21,1				10,0	18	
1.3 Βλήματα πυροβολικού	0,6				13,0		
1.4 ΟΣΕ, ΔΕΗ	0,4	0.4					5
1.5 Σπινθήρες μηχανών	2,7					8	
1.6 Θέρμανση στο ύπαιθρο	2,5						
1.7 Κάπνισμα μελισσών	0,6						
1.8 Εκδρομείς	1,5					6	23
1.9 Κάψιμο σκουπιδιών – Άλλες αιτίες	5						21
1. ΣΥΝΟΛΟ	48,4	35,9	35,0		35,0	51	49
2. ΠΡΟΘΕΣΕΙΣ	27,2	21,6	11,5		30,0	26	4
3. ΚΕΡΑΥΝΟΙ	2,1	0,3	1,0	7,0	10,0	9	26
4. ΑΓΝΩΣΤΕΣ ΑΙΤΙΕΣ	22,5	43	52,5		25,0	14	21

Πίνακας 14.7. *Αίτια δασικών πυρκαγιών σε ποσοστά (%) σε διάφορες χώρες.*

Τα αίτια των δασικών πυρκαγιών κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες:
(α) Πυρκαγιές που οφείλονται σε φυσικές αιτίες, όπως κεραυνοί, ηφαίστεια, αυταναφλέξεις, καθώς και στη μεγάλης διάρκειας ξηρασία τους θερινούς μήνες.
(β) Πυρκαγιές που οφείλονται σε ανθρώπινες δραστηριότητες.
(γ) Πυρκαγιές που οφείλονται σε άγνωστες αιτίες.

14.8.3. Χαρακτηριστικά και είδη δασικών πυρκαγιών

Σε μια δασική πυρκαγιά διακρίνονται το κεφάλι της, δηλαδή το μπροστινό μέρος στο οποίο κατευθύνεται η πυρκαγιά, τα πλάγια και το οπίσθιο ή πίσω μέρος της. Επίσης, ένας άλλος ορισμός θεωρείται η πορεία επέκτασης, που μπορεί να είναι γραμμική, δηλαδή επέκταση από ένα σημείο σε ένα άλλο, ή αύξηση της περιμέτρου. Τα χαρακτηριστικά είναι η ένταση της πυρκαγιάς και η πορεία επέκτασης, που αποτελούν συνιστώσες της διαχείρισης πυρκαγιών.
Οι δασικές πυρκαγιές κατατάσσονται σε τρία είδη: τις πυρκαγιές εδάφους ή υπόγειες, τις πυρκαγιές επιφάνειας ή έρπουσες και τις πυρκαγιές κόμης ή επικόρυφες. Συγκεκριμένα:

- **Πυρκαγιές εδάφους ή υπόγειες:** Καίνε την οργανική ύλη που σωρεύεται σε δάση βορείων περιοχών. Τις ακολουθούν συνήθως πυρκαγιές επιφάνειας, επειδή, όταν υπάρχει βλάστηση, οι πυρκαγιές εδάφους μετατρέπονται σε πυρκαγιές επιφάνειας.
- **Πυρκαγιές επιφάνειας ή έρπουσες:** Καίνε τη ζωντανή βλάστηση, τους παρακείμενους ξηρούς κλάδους, τις αναγεννήσεις, τα υπολείμματα των υλοτομιών ή και συνδυασμό των προηγούμενων. Βλάπτουν το κατώτερο μέρος των δέντρων και συνήθως τα νεκρώνουν, πχ. τα αείφυλλα και τη χαλέπιο, επειδή, με την υπερθέρμανση, νεκρώνεται το κάμβιο των δέντρων. Το κάμβιο νεκρώνεται ευκολότερα στα λεπτόφλοια είδη.
- **Πυρκαγιές κόμης ή επικόρυφες:** Καίγεται η κόμη των δέντρων ή θάμνων. Τα δέντρα νεκρώνονται από την υπερθέρμανση του καμβίου. Οι πυρκαγιές του είδους αυτού γίνονται σε φυτικά είδη, των

οποίων η κόμη είναι εύφλεκτη, δηλαδή σε αείφυλλα πλατύφυλλα, πουρνάρι, κωνοφόρα, κυρίως χαλέπιος και τραχεία πεύκη. Οι πυρκαγιές κόμης είναι πιο επικίνδυνες, γιατί από αυτές καταστρέφονται μεγάλα δάση.

14.8.4. Μεθοδολογίες αντιμετώπισης δασικών πυρκαγιών

Γενικά, η μεθοδολογία προσέγγισης των φυσικών κινδύνων περιλαμβάνει τρεις κύριες φάσεις: προγνώσεις και έγκαιρες προειδοποιήσεις, παρακολούθηση και διαχείριση κινδύνων, καθώς και εκτίμηση και αποκατάσταση ζημιών. Η δυνατότητα προσομοίωσης και πρόβλεψης της εξέλιξης της πυρκαγιάς μπορεί να βοηθήσει αποφασιστικά στην αποτελεσματικότητα των προσπαθειών κατάσβεσης. Ειδικότερα, η επιτυχής καταπολέμηση των δασικών πυρκαγιών βασίζεται στην ύπαρξη και καλή λειτουργία ενός καλά οργανωμένου και εξοπλισμένου μηχανισμού πρόγνωσης και καταστολής. Τα χρησιμοποιούμενα συστήματα και μοντέλα προσομοίωσης δασικών πυρκαγιών μπορούν να καταταγούν σε δύο κατηγορίες, στα εμπειρικά και στα θεωρητικά-μαθηματικά μοντέλα.

14.8.4.1. Προγνώσεις και έγκαιρες προειδοποιήσεις

Υπάρχει μια σειρά από πρόδρομους δείκτες επικινδυνότητας που έχουν στόχο την επιχειρησιακή ετοιμότητα και την έγκαιρη προειδοποίηση. Στους δείκτες αυτούς περιλαμβάνεται ο καναδικός συσσωρευτικός δείκτης καιρού πυρκαγιάς (Fire Weather Index/FWI), που λαμβάνει υπόψη τις επιδράσεις της υγρασίας της καύσιμης ύλης και την ταχύτητα του ανέμου (Dimitrakopoulos & Bemmerzouk, 1996). Ακόμα, στην κατηγορία αυτή ανήκει και ο δείκτης κατωφλίου θερμοκρασίας λαμπρότητας (ΘΛ):

$$\Theta\Lambda = 10 + \frac{pixel\ value - 50}{10}. \quad (14.10)$$

Ο δείκτης αυτός χρησιμοποιείται ήδη για τον εντοπισμό επικίνδυνων περιοχών ή περιοχών, όπου ήδη έχει εκδηλωθεί πυρκαγιά, και βασίζεται στη ΘΛ πάνω από κρίσιμες τιμές κατωφλίου. Υπολογίζεται από ψηφιακά στοιχεία του δορυφόρου NOAA/AVHRR, μερικές φορές κάθε μέρα, με διακριτική ικανότητα 1×1 km^2. Σε συνδυασμό με τα παραπάνω, χρησιμοποιούνται και τα ψηφιακά στοιχεία του δορυφορικού METEOSAT, που παρέχει πρώτες ενδείξεις του δείκτη, δεδομένου ότι δεν διαθέτει πολύ καλή διακριτική ικανότητα (5×5 km^2), αλλά η πληροφορία για όλη την Ευρώπη διατίθεται κάθε 30 λεπτά. Επίσης, για την εκτίμηση της επικινδυνότητας, χρησιμοποιείται και ο δείκτης Angstrom:

$$I = \frac{RH}{20} - \frac{27 - T}{10} \quad (14.11)$$

όπου Τ και RH είναι η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία, αντίστοιχα (Spanos et al., 1996· Tsiros et al., 2008). Όταν το Ι είναι μεγαλύτερο από το 4, τότε δεν αναμένεται πυρκαγιά, και όταν το Ι είναι μικρότερο από το 2, τότε οι συνθήκες είναι ευνοϊκές για την έναρξη πυρκαγιάς. Η παραπάνω κατηγορία περιλαμβάνει και το δείκτη βλάστησης Normalized Difference Vegetation Index (NDVI).

14.8.4.2. Παρακολούθηση και διαχείριση κινδύνων

Τα θεωρητικά-μαθηματικά μοντέλα διάδοσης της φωτιάς βασίζονται σε μια απλούστευση της πραγματικότητας. Προσπαθούν συνήθως να εξηγήσουν τους μηχανισμούς διάδοσης της φωτιάς, με βάση τις αρχές της θερμοδυναμικής. Τα τελευταία τριάντα χρόνια έχουν παρουσιαστεί δεκάδες μοντέλα, αλλά σχεδόν κανένα από αυτά δεν έφτασε σε τέτοια μορφή ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην πράξη. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην πολυπλοκότητάς τους και τις μεγάλες απαιτήσεις δεδομένων που απαιτούνται για τη λύση τους, στην υπεραπλούστευση της πραγματικότητας στην οποία βασίζονται αναγκαστικά, ώστε να μειωθεί κατά το δυνατόν η πολυπλοκότητά τους, καθώς και στη μη αξιοποίηση αρκετά γρήγορων ηλεκτρονικών υπολογιστών, για τη λύση των μοντέλων σε λογικό χρόνο.

Εξαίρεση στον κανόνα της μη πρακτικής εφαρμογής αποτελεί το μαθηματικό μοντέλο διάδοσης της φωτιάς του Rothermel (1972), το οποίο είναι ένα ημιεμπειρικό μοντέλο, που βασίστηκε σε μια θεωρητική ανάλυση της διάδοσης της φωτιάς, αναγνώρισε τις σημαντικότερες μεταβλητές που την επηρεάζουν και, στη συνέχεια, με

προσεκτικά πειράματα κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες, προσδιόρισε την επίδραση κάθε μεταβλητής στη συλλογική συμπεριφορά της φωτιάς. Ιδιαίτερο στοιχείο αυτού του μοντέλου είναι ότι αξιολογήθηκε λεπτομερώς η επίδραση των διαφορετικών χαρακτηριστικών της καύσιμης ύλης, δηλαδή η ποσότητα, οι διαστάσεις, η χημική σύσταση, η τοποθέτηση στο χώρο, η περιεχόμενη ενέργεια και η υγρασία. Το γεγονός αυτό κάνει δυνατή τη χρήση του σε οποιοδήποτε τύπο δασικής καύσιμης ύλης, περιλαμβανομένων θαμνοτόπων και χορτοδοτικών εκτάσεων. Το μοντέλο χρησιμοποιεί την ταχύτητα του ανέμου, την κλίση του εδάφους, την υγρασία της καύσιμης ύλης και ένα «μοντέλο καύσιμης ύλης», για την πρόβλεψη της ταχύτητας διάδοσης της φωτιάς. Το «μοντέλο καύσιμης ύλης» ορίζεται ως ένας προσομοιωμένος τύπος καύσιμης ύλης, για τον οποίο έχουν καθορισθεί οι τιμές όσον αφορά όλες τις μεταβλητές περιγραφής του που απαιτούνται για τη λύση του μαθηματικού μοντέλου διάδοσης της φωτιάς.
Το μοντέλο του Rothermel αποτελεί τον πυρήνα του συστήματος BEHAVE, που από το 1984 είναι το επίσημο σύστημα πρόβλεψης της συμπεριφοράς της φωτιάς στις ΗΠΑ και το πιο ολοκληρωμένο σύστημα διεθνώς. Υπολογίζει τιμές για όλες τις μεταβλητές που χρησιμοποιούνται στην περιγραφή της συμπεριφοράς της φωτιάς. Μερικές από τις πιο συνηθισμένες μεταβλητές που χρησιμοποιούνται στην επιστήμη των δασικών πυρκαγιών για την περιγραφή της συμπεριφοράς της φωτιάς και οι μονάδες που εκφράζονται είναι: η ταχύτητα διάδοσης (m/s), η κατεύθυνση της διάδοσης (0-360^o), το μήκος της φλόγας (σε m), ο ρυθμός έκλυσης ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας (Kjoule/m^2/sec.), ο χρόνος παραμονής της φλόγας σε ένα σημείο (λεπτά), η συνολική εκλυόμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφανείας (Kjoule/m^2) και το μήκος της περιμέτρου της πυρκαγιάς (σε m). Οι υπολογισμοί του βασίζονται σε πληροφορίες για το περιβάλλον, δηλαδή στην ταχύτητα και τη διεύθυνση του ανέμου, στην κλίση του εδάφους, στη σχετική υγρασία και σε άλλα συναφή, και για την καύσιμη ύλη, δηλαδή στο βάρος της βιομάζας κατά κλάση μεγέθους, στο βάθος στρώματος της καύσιμης ύλης, που δίνει ο χρήστης. Για την καύσιμη ύλη, ο χρήστης μπορεί να δώσει πληροφορίες ειδικά για την περιοχή ενδιαφέροντος, αν διαθέτει τις απαραίτητες μετρήσεις ή να διαλέξει ένα από τα 13 γενικά μοντέλα καύσιμης ύλης, που αντιπροσωπεύουν όλους τους τύπους δασικής καύσιμης ύλης στις ΗΠΑ.

14.8.4.3. Εκτίμηση και αποκατάσταση ζημιών

Υπάρχουν σύγχρονες μέθοδοι εκτίμησης καμένων δασικών εκτάσεων με τη χρήση τηλεπισκόπησης. Αναφέρεται μια εφαρμογή που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 9. Ειδικότερα, χρησιμοποιούνται εικόνες NDVI από NOAA με διακριτική ικανότητα περίπου 1 x 1 km^2, για την εκτίμηση της καμένης έκτασης από τη δασική πυρκαγιά που σημειώθηκε στην Πεντέλη Αττικής, στις 21-24 Ιουλίου 1995, που εκτιμήθηκε στα 63 m^2 (Domenikiotis et al., 2002).

14.8.5. Μέτρα προστασίας και επιπτώσεις των δασικών πυρκαγιών

Υπάρχουν δύο κατηγορίες μέτρων προστασίας: τα προληπτικά και τα μέτρα επέμβασης. Ειδικότερα:

14.8.5.1. Προληπτικά μέτρα

Η πρόληψη των δασικών πυρκαγιών περιλαμβάνει:

- Όλα τα μέτρα που αποσκοπούν στη μείωση ή εξάλειψη της έναρξης δασικών πυρκαγιών.
- Όλα τα μέτρα που αποσκοπούν στη μείωση της πιθανότητας μια φωτιά που εκδηλώνεται στο δάσος από οποιαδήποτε αιτία να εξαπλωθεί στα δασικά καύσιμα και να μετατραπεί σε πυρκαγιά μεγάλου μεγέθους. Αφορούν αποκλειστικά επεμβάσεις στη δασική καύσιμη ύλη.
- Όλα τα μέτρα που αποσκοπούν στην ύπαρξη ενός οργανισμού και μηχανισμού έτοιμου και ικανού να εντοπίσει γρήγορα κάθε πυρκαγιά στο ξεκίνημά της και να αποστείλει αμέσως τις κατάλληλες και επαρκείς δυνάμεις για την άμεση καταστολή της. Ονομάζονται και προκατασταλτικά μέτρα.

14.8.5.2. Μέτρα επέμβασης

Οι δασικές πυρκαγιές και, γενικά, η φωτιά είναι το αποτέλεσμα της καύσης, δηλαδή μιας χημικής αντίδρασης, που περιλαμβάνει καύσιμη ύλη, θερμότητα και οξυγόνο. Τα τρία αυτά στοιχεία είναι απαραίτητα για να υπάρχει καύση, ενώ, αντίθετα, η απομάκρυνση ενός μόνο στοιχείου έχει αποτέλεσμα το σβήσιμο της φωτιάς. Η φωτιά σβήνει με την απομάκρυνση της καύσιμης ύλης, μέσω της κατασκευής μιας αντιπυρικής ζώνης ή ζώνης ελέγχου, με την απομάκρυνση της θερμότητας και την κατάβρεξη της φωτιάς με νερό, ψύχοντας έτσι την

καύσιμη δασική ύλη, και τέλος με την απομάκρυνση του αέρα, δηλαδή σκεπάζοντας τη φωτιά με χώμα και νερό.

14.8.5.3. Επιπτώσεις δασικών πυρκαγιών

Η επίδραση και οι επιπτώσεις των πυρκαγιών στο περιβάλλον μπορεί να είναι άμεσες ή/και έμμεσες. Ενδεικτικά, αναφέρεται μια σειρά ζημιών, όπως ζημιές σε ανθρώπους, σπίτια και λοιπά περιουσιακά στοιχεία, ζημιές στη φυτοκοινωνική ένωση, στα ζώα, στην αισθητική και τουριστική όψη, στο νερό, στο έδαφος, στη θερμοκρασία, στις φυσικές ιδιότητες, στους βοσκοτόπους, στη ρύπανση, καθώς και στις γεωργικές καλλιέργειες.

Βιβλιογραφικές αναφορές

Ashraf, M. & K. Habib-ur-Rehman (1999). Interactive effects of nitrate and long-term waterlogging on growth, water relations, and gaseous exchange properties of maize (Zea mays L.). *Plant Science*, 144(1):35-43.

Bayarjargal Y., Karnieli A., Bayasgalan M., Khudulmur S., Gandush C. and Tucker C.J. (2006). A comparative study of NOAA–AVHRR derived drought indices using change vector analysis. *Remote Sensing of Environment*, 105(1):9-22.

Bergman, K. H., Sabol, P. and Miskus, D. (1988). Experimental indices for monitoring global drought conditions. *Proceedings 13th Annual Climate Diagnostics Workshop*, Cambridge, MA, U.S. Dept. of Commerce, 190-197.

Bhalme, H. N., & Mooley, D.A. (1980). Large-scale droughts/floods and monsoon circulation. *Monthly Weather Review*, 108:1197-1211.

Brown, J.F., Wardlow, B.D., Tadesse, T. Hayes, J.J. and Reed, B.C. (2008). The Vegetation Drought Response Index (VegDri): An integrated approach for monitoring drought stress in vegetation. *GIScience and Remote Sensing*, 45(1):16-46.

Bagdonas, A., Georg J.C. and Gerber J.F. (1978). Techniques of frost prediction and methods of frost and cold protection. Tech Note 157, 487, WMO.

Bampzelis D., Dalezios, N.R. and Pikoulas, E. (2006). Severity – Duration – Frequency Relationships of Heatwaves in Greece. *International Conference on: Information Systems in Sustainable Agriculture, Agroenvironment and Food Technology*, University of Thessaly (UTH), 20-23 September 2006, Volos, Greece, sponsored by HAICTA and EC, Dalezios and Tzortzios (eds.), 1055-1061.

Chagnon, S.A., Changnon, D., Fosse, E.R., Hoganson, D.C., Roth, Sr. R.J. and Totsch, J.M. (1997). Effects of recent weather extremes on the insurance industry: major implications for the atmospheric sciences. *Bulletin of the AMS*, 78(3):425–431.

Dalezios, N.R. & Papamanolis, N.K. (1991). Objective Assessment of Instability Indices for Operational Hail Forecasting in Greece. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 45:87-100.

Dalezios, N.R. & Spanos, S.I. (1995). Operational Efficiency Assessment of Hail Suppression for Agriculture in Greece. *Journal of Weather Modification*, 27(1):21-35.

Dalezios, N. R., Blanta, A. and Spyropoulos, N.V. (2012). Assessment of remotely sensed drought features in vulnerable agriculture. *NHESS*, 12:3139-3150.

Dalezios, N.R., Blanta, A. Spyropoulos, N.V. and Tarquis, A.M. (2014). Risk Identification of Agricultural Drought for Sustainable Agroecosystems. *National Hazards and Earth Systems of Science (NHESS)*, 14:2435-2448.

Dimitrakopoulos A.P. & Bemmerzouk, A.M. (1996). Evaluation of the Canadian Forest Danger Rating System (CFFDRS) in the Mediterranean-type environment of Greece. *International Symposium on Applied Agrometeorology and Agroclimatology*, Volos, Greece, 24-26 April 1996 (Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities), 583-588.

Domenikiotis, C., Dalezios, N.R., Loukas, A. and Karteris, M. (2002). Agreement assessment of NOAA/AVHRR NDVI with landsat TM NDVI for mapping burned forested areas. *International Journal of Remote Sensing*, 23(20):4235-4246.

EM-DAT (2012). *The OFDA/CRED International Data Base*, Université catholique de Louvain, Brussels, Belgium, from http://www.emdat.be

FAO (2004). *Definition of drylands*. In: Carbon Sequestration in Dryland Soils. World Soil Resources Report No. 102. Rome, FAO.

Heim, R.R.Jr. (2002). A Review of Twentieth-Century Drought Indices Used in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83(8):1149-1165.

Hollinger, S.E., Isard, S.A. and Welford, M.R. (1993). A new soil moisture drought index for predicting crop yields. *Proceedings, 8th Conference on Applied Climatology*, AMS, Anaheim, CA, 17-22 Jan, AMS, 187-190.

Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E.P., Gao, X. and Ferreira , L.G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*. 83(1-2):195–213.

Idso, S.B., Jackson, R.D., Pinter, Jr. P.J., Reginato, R.J. and Hatfield, J.L.(1981). Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agricultural Meteorology*, 24:45-55.

Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC, (2007). *Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report to the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

Jendritzky, G., & Birger, T. (2009). The thermal environment of the human being on the global scale. Global Health Action 2. Online: globalhealthaction.net. doi:10.3402/ gha.v2/0.2005.

Karl, T .R. & Knight, R. W. (1998). Secular trend of precipitation amount, frequency, and intensity in the United States. *Bulletin of American Meteorology Society*, 79:231-242.

Keyantash, J. & Dracup, J.A. (2002). The Quantification of Drought: An Evaluation of Drought Indices. *Bulletin of American Meteorological Society*, 1167-1180.

Kogan, F.N. (1995). Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection, *Advances in Space Research*, 15:91-100.

Kogan, F.N. (2001). Operational space technology for global vegetation assessment. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 82:1949-1964.

McKee, T.B., Doesken, N.J. and Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to timescales. Preprints, *Eighth Conference on Applied Climatology*, Anaheim, CA, Amer. Meteor. Soc., 179-184.

McVicar, T.R., Jupp, D.L.B., Yang, X. and Tian, G. (1992). Linking regional water balance models with remote sensing. *Proceedings of the 13th Asian Conference on Remote Sensing*, Ulaanbaatar, Mongolia, 7-11 October, B.6.1-B.6.6.

McVicar, T. R. & Jupp, D.L.B. (1998). The current and potential operational uses of remote sensing to aid decisions on drought exceptional circumstances in Australia: A review. *Agricultural Systems*, 57(3):399-468.

Meyer, S.J., Hubbard, K.G. and Wilhite, D.A. (1993). A crop specific drought index for corn: I. Modern development and validation. *Agronomy Journal*, 85(2):388-395.

Milly, P.C.D., Wetherald, R.T., Dunne, K.A. and Delworth, T.L. (2002). Increasing risk of great floods in a changing climate, *Nature*, 415:514-517.

Narasimhan, B. & Srinivasan, R. (2005). Development and evaluation of Soil Moisture Deficit Index (SMDI) and Evapotranspiration Deficit Index (ETDI) for Agricultural Drought Monitoring. *Agricultural and Forest Meteorology*, 133(1-4):69-88.

Palmer W.C. (1968). Keeping track of crop moisture conditions, nationwide: The new Crop Moisture Index. *Weatherwise*, 21(4):156-161.

Pielke, R.A. & Downton, M.W. (2002). Precipitation and damaging floods: Trends in the United States, 1932-1997. *Journal of Climate*. 13(20):3625-3637.

Reilly, J., Tubiello, F.N., McCarl, B. and Melillo, J. (2001). Impacts of climate change and variability on agriculture. In *US National Assessment Foundation Document*. National Assessment Synthesis Team, US Global Change Research Program, Washington DC.

Rosenzweig, C., Tubiello, Fr. N., Golberg, R., Mills, E. and Bloomfield, J, (2002). Increased crop damage in the US from excess precipitation under climate change, *Global Environmental Change*, 12:197-202.

Schär, C., Vidale, P., Lüthi, D., Frei, C., Häberli, C., Liniger, M. and Appenzeller, C. (2004). The role of increasing temperature variability in European summer heat waves. *Nature*, 427:332-336.

Sheikh, B.A. & Soomro, G.H. (2006). Desertification: causes, consequences and remedies. *Pakistan Journal of Agriculture*. 22 (1):44-51.

Smith, K. (2013). *Environmental Hazards: Assessing Risk and Reducing Disaster*. Routledge, 6th Edition, ISBN0-415-22463-2, 478.

Spanos, S.I., Zarpas, C.D. and Dalezios, N.R. (1996). Meteorological and Satellite Indices for the Assessment of Forest Fires. *Proceedings Internnational Symposium on Applied Agrometeorology - Agroclimatology*, European Commission, edited by N.R. Dalezios, 24-26 April, Volos, Greece, 583-588.

Strong, G.S. & Wilson, W.D. (1983). The Synoptic Index of convection, Part 2: Applications to regional forecast of convective complexes. *17 th CMOS Congress*, Banff, Alta, Canada, 3-5 May, 18.

Tsiros E., Bampzelis, D., Domenikiotis, C. and Dalezios, N.R. (2008). The Chronicle of the Heatwave and Forest Fire of Thessaly in June 2007. *9th Hellenic Conference of Meteorology, Climatology and Atmospheric Physics*, Aristotelion University of Thessaloniki (AUTH), sponsored by AUTH and Association, 28-31 May, Thessaloniki, 953-960.

UN (2005). UN Convention to Combat Desertification (UNCCD): What is desertification? (available at http://www.unccd.int/knowledge/faq.php.)

UN/ISDR (2005). Hyogo Framework for Action 2005-2015. *World Conference on Disaster Reduction*. Final Report, 18-20 Jan. 2005, Kobe, Hyogo, Japan, 22 (www.unisdr.org).

Wilhite, D.A., Hayes, M.J., Kinutson, C. and Smith, K.H. (2000). Planning for drought: moving from crisis to risk management. *Journal of American Water Research Association*, 36(4):697-710.

Wilhite, D.A. (2009). The Role of Monitoring as a Component of Preparedness Planning: Delivery of Information and Decision Support Tools. In A. Iglesias, A. Cancelliere, F. Cubillo, L. Garrote and D. Wilhite (eds.). *Coping with Drought Risk in Agriculture and Water Supply Systems: Drought Management and Policy Development in the Mediterranean*. Springer Publishers, Dordrecht, The Netherlands.

WMO (2004). Working Together for a Safer World (WMO-No. 976), Geneva (http://www.wmo.int/pages/prog/drr/publications/drrPublications/0976_Disaster_Prevension_and_Mitigation/WMO976e.pdf).

WMO (2010). Guide to Agricultural Meteorological Practices. WMO - No134, 799.

ΜΕΡΟΣ 6: ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Κεφάλαιο 15: Αγρομετεωρολογική πληροφορία και διαχείριση

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 15
ΑΓΡΟΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ

Σύνοψη
Στο κεφάλαιο αυτό δίνονται, αρχικά, αγρομετεωρολογικές πληροφορίες για μεγάλους οργανισμούς, αλλά και αγροκλιματικές πληροφορίες. Στη συνέχεια, περιγράφεται το πλαίσιο των αγρομετεωρολογικών και αγροκλιματικών υπηρεσιών και γίνεται αναφορά σε συστήματα διάχυσης αγρομετεωρολογικών πληροφοριών, προγνώσεων και προειδοποιήσεων. Τέλος, παρουσιάζονται το πλαίσιο γεωργικής σχεδίασης, με έμφαση στο επίπεδο αγροκτήματος, όπως επίσης το πλαίσιο και η μεθοδολογία αγρομετεωρολογικής διαχείρισης ρίσκου.

Προαπαιτούμενη γνώση
Ο αναγνώστης δεν απαιτείται να έχει ειδικές γνώσεις.

15.1. Αγρομετεωρολογικές πληροφορίες

Η επιτυχής εφαρμογή των καιρικών και κλιματικών πληροφοριών πρέπει να ενσωματώνει τρεις συνιστώσες: τα δεδομένα, την ανάλυση και τους χρήστες. Ως εκ τούτου, απώτερος στόχος οποιασδήποτε εφαρμογής πρέπει να είναι η εξυπηρέτηση των αναγκών των χρηστών. Τα αξιόπιστα δεδομένα αποτελούν προϋπόθεση για επιτυχείς γεωργικές μετεωρολογικές εφαρμογές. Επίσης, είναι αναγκαία η ανάλυση των δεδομένων που επιδιώκουν να αντιμετωπίσουν ένα γεωργικό πρόβλημα. Τελικά, οι χρήστες των αγρομετεωρολογικών πληροφοριών και εφαρμογών πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την ανάπτυξη νέων εφαρμογών. Χρήστης μπορεί να ορίζεται οποιοσδήποτε λαμβάνει αποφάσεις γεωργικού περιεχομένου, όπως ο αγρότης, ο φορέας παροχής υπηρεσιών, το κράτος, τα μέσα ενημέρωσης ή το ευρύ κοινό (Rijks & Baradas, 2000).

15.1.1. Αγρομετεωρολογικές πληροφορίες για μεγάλους οργανισμούς

Οι κυβερνήσεις και οι άλλοι μεγάλοι οργανισμοί χρειάζονται αξιόπιστη και υψηλής ποιότητας πληροφόρηση, για τις λειτουργικές εκτιμήσεις και αξιολογήσεις της γεωργικής παραγωγής. Σχετικά με τον προγραμματισμό, αυτό συνεπάγεται αξιολόγηση των προσοδοφόρων ειδών εγχώριων καλλιεργειών, για την ανάπτυξη μέσω αγροκλιματικών αναλύσεων μέσης και μακράς κλίμακας. Υπάρχουν αρκετές επιχειρησιακές αξιολογήσεις της παραγωγής καλλιεργειών που έχουν πραγματοποιήσει χώρες και διεθνείς οργανισμοί. Τα παραδείγματα αυτά υπογραμμίζουν τη χρησιμότητα της ενσωμάτωσης των δεδομένων, του προσωπικού και των πόρων για την ανάπτυξη αξιόπιστων εκτιμήσεων της φυτικής παραγωγής μεταξύ των διαφόρων φορέων σε επίπεδο χώρας και μεταξύ διαφορετικών χωρών, μη κυβερνητικών οργανώσεων (ΜΚΟ), αλλά και άλλων οργανισμών σε διεθνές επίπεδο (Boken et al., 2005). Στη συνέχεια, δίνονται ενδεικτικές πληροφορίες κατά φορέα και χώρα:

- **WMO:** Ο Παγκόσμιος Μετεωρολογικός Οργανισμός (World Meteorological Organization/WMO) έχει αναπτύξει και λειτουργεί ένα σύστημα αγρομετεωρολογικών πληροφοριών για τη διεθνή κοινότητα (www.wamis.org). Πρόκειται για μια υπηρεσία που παρέχει πληροφορίες για διάφορα αγρομετεωρολογικά θέματα, όπως είναι η διαχείριση δεδομένων, οι χαρτογραφήσεις, οι κλιματικοί δείκτες ξηρασίας, η χρήση δεδομένων και μεθόδων τηλεπισκόπησης, η πρόγνωση σοδειάς και η διαδικτυακή τεχνολογία (Πίνακας 15.1).
- **FAO**. Ο Οργανισμός Τροφίμων και Γεωργίας των Ηνωμένων Εθνών (Food and Agriculture Organization/FAO) δημιούργησε το 1975 το Παγκόσμιο Σύστημα Πληροφορίας και Έγκαιρης Προειδοποίησης (Global Information and Early Warning System/GIEWS), για την αντιμετώπιση της παγκόσμιας επισιτιστικής κρίσης των αρχών της δεκαετίας του 1970. Το GIEWS παρέχει πληροφορίες σχετικά με την παραγωγή τροφίμων και την επισιτιστική ασφάλεια για κάθε χώρα, με βάση τις αξιολογήσεις παρακολούθησης των καλλιεργειών από δεδομένα τηλεπισκόπησης και δεδομένα επίγειων μετεωρολογικών σταθμών (Mukhala, 2005).Οι αξιολογήσεις αυτές βασίζονται στο μοντέλο του FAO, για την ικανοποίηση των απαιτήσεων των καλλιεργειών σε νερό, δηλαδή στο δείκτη Water Requirement Satisfaction Index (WRSI), που καθορίζει ένα σωρευτικό διαθέσιμο νερό ανά δεκαήμερο από τη φύτευση μέχρι την ωρίμανση. Το μοντέλο WRSI είναι ένας συνδυασμός δυναμικού ισοζυγίου

νερού και στατιστικής προσέγγισης, και ο δείκτης εκφράζει σε κάθε στιγμή της καλλιεργητικής περιόδου την αναλογία μεταξύ πραγματικής και δυνητικής εξάτμισης.

- **USDA**. Το Παγκόσμιο Συμβούλιο Γεωργικής Προοπτικής (World Agricultural Outlook Board/WAOB) του υπουργείου Γεωργίας (USDA) των ΗΠΑ δεσμεύεται να παρέχει στην κυβέρνηση της χώρας επίσημες μηνιαίες εκτιμήσεις και προγνώσεις των βασικών γεωργικών προϊόντων, μέσω των δημοσιεύσεων της παγκόσμιας προσφοράς γεωργικών προϊόντων και τις εκτιμήσεις της ζήτησης (World Agricultural Supply and Demand Estimates/WASDE) (Motha & Stefanski, 2006). Αυτές οι εκτιμήσεις της προσφοράς και της ζήτησης γίνονται με βάση τις επίσημες εκθέσεις των χωρών, τις εκθέσεις του USDA, την οικονομική ανάλυση και τις πληροφορίες τηλεπισκόπησης. Αναλύονται οι πλανητικές καιρικές συνθήκες και οι γεωργικές πληροφορίες για τον προσδιορισμό των επιπτώσεων των καιρικών συνθηκών στην περίοδο ανάπτυξης των καλλιεργειών και οι προοπτικές γεωργικής και κτηνοτροφικής παραγωγής.

Ρωσία

Εφαρμόζεται ένα αυτοματοποιημένο ρωσικό σύστημα πρόγνωσης και εκτίμησης, που επιτρέπει την παρουσίαση των πληροφοριών σχετικά με τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες, την κατάσταση των καλλιεργειών, τις προγνώσεις απόδοσης των καλλιεργειών και της συνολικής συγκομιδής σε διάφορες περιοχές της Ρωσίας (Rusakova et al., 2006). Πλήρης εφαρμογή των κλιματικών και καιρικών πληροφοριών σε κυβερνητικό επίπεδο και σε επίπεδο αγροτεμαχίου επιδεικνύεται με το ρωσικό σύστημα πληροφοριών και συμβουλών, που χρησιμοποιείται για την επίλυση πρακτικών θεμάτων σχεδιασμού και οργάνωσης της γεωργικής παραγωγής.

Βραζιλία

Υπάρχουν καθημερινές ενημερώσεις για αγρομετεωρολογικές πληροφορίες, με στόχο την υποστήριξη της λήψης αποφάσεων. Μεταξύ αυτών, είναι το Agritempo, το οποίο παρέχει πληροφορίες για το σύνολο της χώρας, καθώς και περιφερειακά κέντρα, όπως το Cepagri/UNICAMP και το IAC, για την κατάσταση στο Σάο Πάολο, το IAPAR /SIMEPAR, για την κατάσταση στο Παρανά, και το Ciram, για την κατάσταση στη Σάντα Καταρίνα. Οι συνεταιρισμοί αγροτών παρέχουν, επίσης, αγρομετεωρολογικές πληροφορίες για τους αγρότες και τους τεχνίτες.

Διεθνή

Άλλα παραδείγματα περιλαμβάνουν το σύστημα έγκαιρων προειδοποιήσεων για το λιμό (Famine Early Warning System/FEWS) (Rowland et al., 2005), το αγρομετεωρολογικό σύστημα της Ευρωπαϊκής Ένωσης (MARS) (Negre, 2006), το εθνικό σύστημα γεωργικής παρακολούθησης (National Agricultural Monitoring System/NAMS) στην Αυστραλία (Leedman, 2007), τις υπηρεσίες Farmweather (WMO, 2004a) και τις αγρομετεωρολογικές υπηρεσίες στο Καζακστάν (WMO, 2004a).

http://www.agritempo.gov.br
http://www.cpa.unicamp.br
http://www.ciiagro.iac.sp.gov.br
http://www.iapar.br/SMA
http://www.chlimerh.rct.sc.br
http://www.fundacaoabc.org.br
http://www.wamis.org

Πίνακας 15.1. *Ενδεικτική λίστα ιστοσελίδων αγρομετεωρολογικών πληροφοριών.*

15.1.2. Αγροκλιματικές πληροφορίες

Οι αγρομετεωρολογικές πληροφορίες και εφαρμογές μπορούν να θεωρηθούν σε χρονικά και χωρικά πλαίσια. Σε χρονικό πλαίσιο, οι στρατηγικές εφαρμογές βοηθούν σε θέματα και αποφάσεις που αξιολογούνται σε εποχική ή ετήσια βάση ή μόνο μία φορά, όπως είναι μια διαδικασία σχεδιασμού. Επίσης, συμβάλλουν στη διαδικασία σχεδιασμού, αν η απόφαση είναι η επιλογή μιας συγκεκριμένης ποικιλίας για φύτευση, αν μια περιοχή θα πρέπει να αξιοποιηθεί για κτηνοτροφικά προϊόντα και ζωικό κεφάλαιο, για σχεδίαση και εγκατάσταση θερμοκηπίων ή καταφύγιων ζώων, ή στον καθορισμό των τιμών των γεωργικών προϊόντων.

Μπορούν να βασίζονται σε κλιματολογικές αναλύσεις, αγροκλιματικές πληροφορίες, καθώς και μοντέλα εδάφους-φυτού-ατμόσφαιρας. Οι τακτικές εφαρμογές θεωρούνται βραχυπρόθεσμες επιχειρησιακές αποφάσεις, που αφορούν μια περίοδο από μερικές ώρες έως μερικές ημέρες. Περιλαμβάνουν συχνά αποφάσεις, με βάση την κατάσταση της καλλιέργειας και των υφιστάμενων ή μελλοντικών καιρικών συνθηκών, για τις εργασίες του αγροκτήματος, όπως η καλλιέργεια, η άρδευση, ο ψεκασμός και η συγκομιδή.

15.1.2.1. Χρονικές και χωρικές κλίμακες

Οι αγρομετεωρολογικές πτυχές της βιολογικής γεωργίας, της αστικής γεωργίας, της εσωτερικής και της γεωργίας ακριβείας παρέχουν μια καλή περιγραφή του μικροκλίματος και του μεσοκλίματος στο πλαίσιο των αγρομετεωρολογικών εφαρμογών.

Το μακροκλίμα είναι το μεγαλύτερο και καλύπτει μεγάλες περιοχές της ηπείρου, δηλαδή εκατομμύρια τετραγωνικά χιλιόμετρα, ασχολείται με την αλληλεπίδραση της μεγάλης κλίμακας τοπογραφίας, όπως οροσειρές και μεγάλες λίμνες, καθώς και τις αλληλεπιδράσεις των ωκεανών με τις αέριες μάζες. Σε αυτή την κλίμακα, τα χαρακτηριστικά του κλίματος θα πρέπει να παρέχουν πληροφορίες σχετικά με την καταλληλότητα ενός αγροκτήματος και τη δυνατότητα να δεχτεί μια εκμετάλλευση μετεωρολογικούς περιορισμούς λόγω εντόμων, ασθενειών και λειτουργικών προβλημάτων χρονισμού.

Το μεσοκλίμα αντανακλά την άποψη του αγρότη, βάσει της εμπειρίας του από τις καιρικές συνθήκες σε μια περιοχή. Τα τοπικά επιφανειακά χαρακτηριστικά, όπως οι λόφοι, τα μικρά βουνά, τα μεγάλα δάση ή οι εκτεταμένες πεδιάδες, έχουν μια ξεχωριστή δράση σε αυτή την κλίμακα. Μια χώρα μπορεί να έχει μία ή δύο μακροκλιματικές ζώνες, αλλά θα έχει πολλές μεσοκλιματικές. Σε αυτή την κλίμακα, μπορούν να γίνουν ειδικοί υπολογισμοί, για να προσδιοριστούν οι αγροκλιματικές ζώνες.

Σε μικρότερη κλίμακα, το μικροκλίμα ορίζεται ως το κλίμα κοντά στο έδαφος ή το κλίμα στο οποίο ζουν τα περισσότερα φυτά και ζώα (Rosenberg et al., 1983). Η μικρομετεωρολογία είναι ο κλάδος ο οποίος ασχολείται με τις φυσικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στα οριακά στρώματα μεταξύ της κορυφής του φυτού, του δέντρο ή του ζώου και το κάτω μέρος των ριζών στο έδαφος.

15.1.2.2. Αγροκλιματικές πληροφορίες μακροκλίμακας

Υπάρχει ένα κοινό πρόγραμμα για την αγροκλιματολογία, που συγχρηματοδοτείται από τον FAO, τον WMO και την UNESCO, και αποτελεί το θεμέλιο των τρεχουσών αγροκλιματικών χωροταξικών αναλύσεων. Οι πιο σημαντικές πρακτικές εφαρμογές του προγράμματος περιλαμβάνουν τη δυνατότητα επιλογής καλλιεργειών, ποικιλιών και οικόσιτων ζώων, τον καθορισμό ευνοϊκών περιόδων για σπορά, την παραγωγή σανού και τη συγκομιδή του, τον προσδιορισμό περιοχών για ανάπτυξη γεωργίας ξηροτόπων με εφαρμογή άρδευσης, το σχεδιασμό της δάσωσης και αναδάσωσης, την εξεύρεση του βέλτιστου φάσματος κλιματικών μεταβλητών, για την αύξηση των αποδόσεων και της γεωργικής παραγωγής, τη θέσπιση δυνατοτήτων για γεωργική χρήση των λιβαδιών, όπως επίσης τον προσδιορισμό των απαιτήσεων και δυνατότητων αποτελεσματικής αποθήκευσης και μεταφοράς καλλιεργειών.

Η αγροκλιματολογία σε ημιάνυδρες και άγονες περιοχές της Εγγύς Ανατολής έχει επικεντρωθεί στην εκτίμηση των συνοριακών περιοχών, όπου η καλλιέργεια ξηρών περιοχών είναι δυνατή και απαιτείται άρδευση. Η αγροκλιματολογία σε ημιάνυδρες περιοχές της Δυτικής Αφρικής έχει ασχοληθεί με τις ξερικές καλλιέργειες και τη διάρκεια των καλλιεργητικών περιόδων, η οποία συνδέεται στενά με την περίοδο των βροχών. Η αγροκλιματολογία σε ορεινές περιοχές της Ανατολικής Αφρικής έχει επικεντρωθεί στις καλλιέργειες με απαιτήσεις σε νερό, που καλύπτονται σε διάφορες τοποθεσίες της περιοχής (WMO, 1973). Η αγροκλιματολογία των Άνδεων έχει εξετάσει τα μοναδικά αποτελέσματα του υψομέτρου και της υψηλής ηλιακής ακτινοβολίας στις καλλιέργειες. Μια αγροκλιματική έρευνα των υγρών τροπικών της Νοτιοανατολικής Ασίας περιγράφει το ρόλο της αγροκλιματολογίας στον καθορισμό στρατηγικών, για την αύξηση της παραγωγής τροφίμων στις υγρές τροπικές περιοχές.

15.1.2.3. Αγροκλιματικές πληροφορίες μεσοκλίμακας

Η τεχνολογική εξέλιξη των προσωπικών υπολογιστών και των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (ΓΣΠ) έχει κάνει ευρέως γνωστή την κλιματική και αγροκλιματική χαρτογράφηση. Για παράδειγμα, το πρόγραμμα COST719 της Ευρωπαϊκής Ένωσης αναφέρεται στη χρήση ΓΣΠ στην κλιματολογία και μετεωρολογία και παρέχει πολλά παραδείγματα μεθόδων αγροκλιματικής χαρτογράφησης, συμπεριλαμβανομένης της χαρτογράφησης θερμοκρασίας, της χαρτογράφησης παραμέτρων του κλίματος σε ορεινές περιοχές, καθώς και του αγροοικολογικού συστήματος λήψης (Dryas et al., 2005). Το Parameter–

Elevation Regressions on Independent Slopes Model (PRISM) έχει χρησιμοποιηθεί για να χαρτογραφήσει τις ημερήσιες καιρικές και κλιματικές παραμέτρους σε ορεινές περιοχές (Hunter & Meentemeyer, 2005). Επίσης, έχει αξιολογηθεί το αγροτικό δυναμικό του κλίματος της Ρωσίας και σε ορισμένες περιοχές για κάθε καλλιέργεια, με βάση γενικούς θερμικούς και υδροκλιματικούς δείκτες, την ακτινοβολία, τα δυσμενή αγροκλιματικά φαινόμενα, τη γονιμότητα του εδάφους, καθώς και τα μέτρα για τη βελτιστοποίηση των περιβαλλοντικών συνθηκών (Zoidze & Ovcharenko (2000). Υπάρχουν εφαρμοσμένες έρευνες αγροκλιματικής ταξινόμησης και δημιουργίας ζωνών παραγωγής με χρήση υδροκλιματικών και αγροκλιματικών δεικτών, καθώς και χρήση στοιχείων και μεθόδων τηλεπισκόπησης (Petr, 1991· Tsiros et al., 2009). Επίσης, έχουν αναπτυχθεί μεθοδολογίες για την εκτίμηση κλιματικών και αγροκλιματικών κινδύνων (Motroni et al.,2002). Ειδικότερα, στη Βραζιλία, υπήρξαν πρόσφατα εθνικές προσπάθειες για τον προσδιορισμό του αγροκλιματικού κινδύνου σε πολλές καλλιέργειες, όπως στον αραβόσιτο, τη σόγια, τα φασόλια, το σιτάρι, το κριθάρι, το ρύζι, το βαμβάκι, τον καφέ, τη μανιόκα και σε διάφορα είδη φρούτων. Οι προσπάθειες αυτές, σε συνδυασμό με τη χρήση από τους αγρότες της βέλτιστης ημερομηνίες φύτευσης, έχουν αυξήσει τη γεωργική παραγωγικότητα στη Βραζιλία.

15.2. Πλαίσιο αγρομετεωρολογικών υπηρεσιών

15.2.1. Αγρομετεωρολογικές υπηρεσίες

Η ανάπτυξη αγρομετεωρολογικών υπηρεσιών για πρόγνωση απαιτεί στενή διασύνδεση των διαφόρων παρόχων δεδομένων και τεχνογνωσίας από διαφορετικά πεδία. Το βασικό ζητούμενο είναι ότι οι προγνώσεις πρέπει να αφορούν την επιθυμητή περίοδο και συγκεκριμένη περιοχή. Για παράδειγμα, δύο φορές την εβδομάδα το Εθνικό Κέντρο Μεσοπρόθεσμων Μετεωρολογικών Προβλέψεων (Center for Medium Range Weather Forecasting/NCMRWF) στην Ινδία, στη βάση ενός μοντέλου γενικής κυκλοφορίας, παρέχει μια ειδική πρόγνωση καιρού για συγκεκριμένη περιοχή με ανάλυση 150 km x 150 km για έξι παραμέτρους: βροχόπτωση, νεφοκάλυψη, διεύθυνση και ταχύτητα ανέμου, ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία. Οι προγνώσεις αυτές υπόκεινται σε περαιτέρω στατιστική και συνοπτική ερμηνεία (Rathore et al., 2006).

Στη συνέχεια, εξετάζεται το προηγούμενο, υφιστάμενο και μελλοντικό καθεστώς του καιρού και των καλλιεργειών και προτείνονται κατάλληλες ενέργειες για την καλύτερη διαχείριση των γεωργικών εκμεταλλεύσεων, με βάση τις προγνώσεις. Η σύγχρονη προσέγγιση γίνεται με την ανάπτυξη συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων. Πρακτικά, προτεραιότητα δίνεται στην κύρια καλλιέργεια κάθε περιοχής και τα πιο γνωστά προβλήματα, λαμβάνοντας υπόψη τη σχετική οικονομική σημασία τους. Εξετάζονται ακόμα πρακτικές διαχείρισης, όπως χρόνος και τρόπος σποράς ή ποτισμάτων. Μέτρα επίσης μπορούν να υιοθετηθούν για την εγκατάσταση και προστασία ζώων εξαιτίας καταπονήσεων που προκαλούνται από παράσιτα και ασθένειες, θερμοκρασία, άνεμο, βροχοπτώσεις και άλλα συναφή. Η στέγαση, η διατροφή και η υγεία των ζώων επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από τις καιρικές συνθήκες και, ως εκ τούτου, θα πρέπει να συμπεριλαμβάνονται στις υπηρεσίες. Με βάση τις τοπικές αγρομετεωρολογικές και γεωργικές πληροφορίες και τις προγνώσεις καιρού, εξετάζονται οι επιλογές και οι επιπτώσεις τους και στη συνέχεια αποφασίζεται το πλαίσιο οδηγιών και γεωργικής συμβουλευτικής για τους αγρότες (Singh et al., 1999).

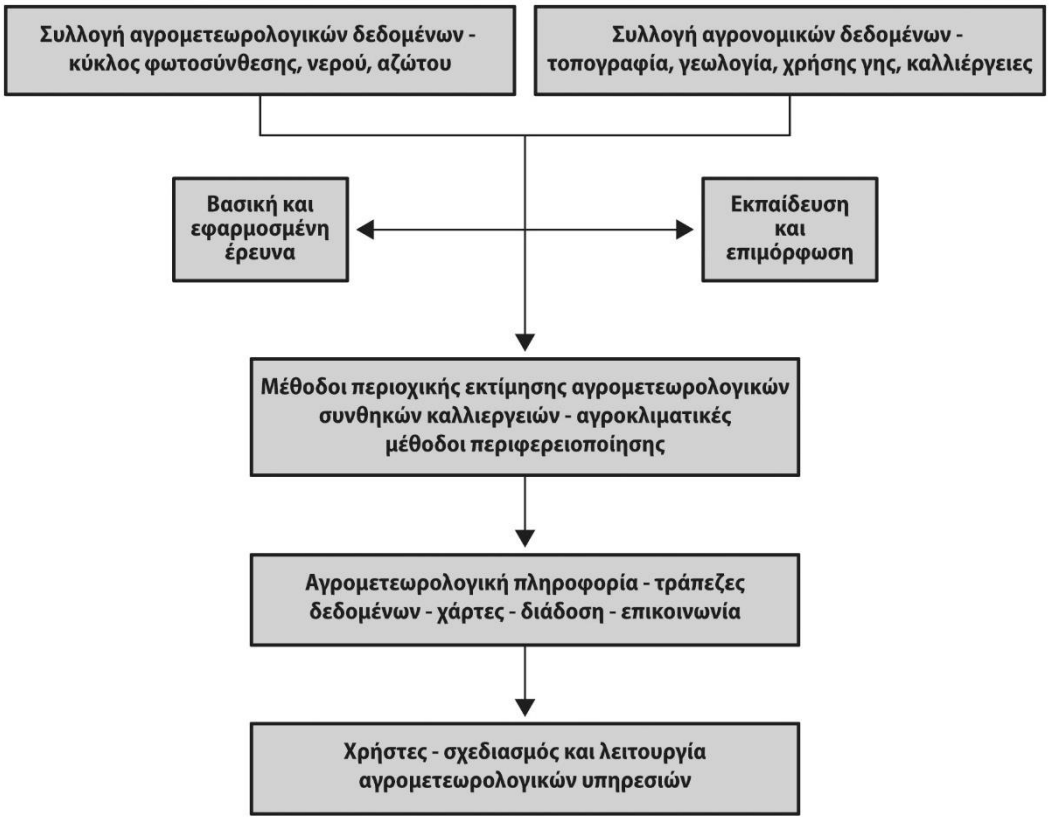
Οι καιρικές πληροφορίες που απαιτούνται για την παροχή υπηρεσιών περιλαμβάνουν τις περιλήψεις του καιρού από το πρόσφατο παρελθόν, όπως την προηγούμενη εβδομάδα, τις φυσιολογικές κλιματικές συνθήκες για την περίοδο παροχής συμβουλών και τις καιρικές προγνώσεις για τη συμβουλευτική περίοδο. Οι απαραίτητες αγρομετεωρολογικές πληροφορίες περιλαμβάνουν δείκτες που έχουν σχέση με τη γεωργική παραγωγή, όπως ο δείκτης υγρασίας των καλλιεργειών και ο δείκτης ξηρασίας για το πρόσφατο παρελθόν. Οι καλλιεργητικές πληροφορίες για την προετοιμασία των προειδοποιήσεων περιλαμβάνουν πληροφορίες για την τρέχουσα κατάσταση των καλλιεργειών, το είδος, την κατάσταση και τα φαινολογικά στάδια των καλλιεργειών, τις προσβολές από εχθρούς και ασθένειες, και τη σοβαρότητά τους, την έλλειψη θρεπτικών στοιχείων, την υδατική και θερμική καταπόνηση. Οι πληροφορίες για το έδαφος χρησιμοποιούνται στην παρασκευή των προειδοποιήσεων, ώστε να περιγράψουν τη χωρική κατανομή των εδαφών. Οι πληροφορίες σχετικά με τους τύπους εδάφους, τις φυσικοχημικές ιδιότητες, τη διατροφική κατάσταση, την κατάσταση υγρασίας, το υψόμετρο, και το περίγραμμα και την κλίση του εδάφους είναι επίσης αναγκαίες για την κατάρτιση των προειδοποιήσεων. Άλλες πληροφορίες σχετικά με την τοπογραφία της περιοχής, την κάλυψη και χρήση γης, τις εγκαταστάσεις άρδευσης, τις αρδευόμενες και ξερικές περιοχές, τη διαθεσιμότητα των γεωργικών εισροών και των τάσεων της αγοράς θεωρούνται επίσης χρήσιμες για την προετοιμασία των προειδοποιήσεων.

Αντίστοιχο πλαίσιο καταγραφών και πληροφοριών περιγράφεται και στο Κεφάλαιο 6. Στο Σχήμα 15.1 παρουσιάζονται το πλαίσιο και οι συνιστώσες ενός βασικού προγράμματος αγρομετεωρολογικών υπηρεσιών.

15.2.2. Υπηρεσίες για το κλίμα στη γεωργία

Είναι ευρέως αποδεκτό ότι τόσο οι ερευνητικοί φορείς, όσο και οι φορείς παροχής υπηρεσιών και οι επαγγελματίες, κυρίως οι αγροτικές επιχειρήσεις, εξετάζουν τα προβλήματα σε διαφορετικό πλαίσιο ο καθένας. Αυτή η προσέγγιση οδηγεί σε διαφορετικούς ορισμούς για κρίσιμα χαρακτηριστικά ενός προβλήματος, διαφορετικές δυνατότητες επίλυσης, αναμφισβήτητα διαφορετικές υπηρεσίες και προτάσεις για δράση και διαφορετικά κριτήρια για αξιολόγηση. Ο βαθμός αποδοχής των διαθέσιμων πληροφοριών και η εμπιστοσύνη στους παρόχους υπαγορεύουν το πλαίσιο επικοινωνίας και υπηρεσιών για το κλίμα. Στο πλαίσιο αποτελεσματικής επικοινωνίας, εξετάζονται θέματα όπως η σχετικότητα των πληροφοριών για τη λήψη αποφάσεων σε συγκεκριμένο γεωργικό σύστημα, η αξιοπιστία των πηγών σχετικά με τις προσδοκίες του χρήστη, η ετοιμότητα των αγροτών για αποδοχή των υπηρεσιών, η εφικτότητα της έρευνας για χάραξη πολιτικής ή λήψη αποφάσεων, η συμβατότητα της πληροφορίας με τη γεωργική πρακτική και τα πρότυπα υπηρεσιών και αποφάσεων και, τέλος, η δυνατότητα πρόσβασης στις πληροφορίες για λήψη αποφάσεων.

Για παράδειγμα, όλες οι μελέτες μέχρι σήμερα δείχνουν ότι η κατανομή των βροχοπτώσεων στη διάρκεια μιας βλαστικής περιόδου είναι η βασική μεταβλητή για τους αγρότες στην τροπική ζώνη (Phillips et al., 2001). Αυτή η πληροφορία μεταφράζεται σε βασικές ανάγκες πληροφόρησης και υπηρεσίες, ανάλογα και με την καλλιέργεια, όπως επάρκεια της βροχόπτωσης, εκτίμηση ελλειμμάτων και πλεονασμάτων, έγκαιρη προειδοποίηση για δυνητικά δυσμενή βλαστική περίοδο, καθώς και προγραμματισμό για φύτευση και άλλες καλλιεργητικές δράσεις. Είναι αυτονόητο ότι κάτι τέτοιο απαιτεί μια πολύ στενή συνεργασία μεταξύ των εμπλεκόμενων φορέων, όπως δημόσιες και ιδιωτικές υπηρεσίες συμβουλευτικής, αναπτυξιακοί φορείς, κοινοτικές οργανώσεις αγροτών και παραγωγών, καθώς και ΜΚΟ.



Σχήμα 15.1. *Πλαίσιο βασικού προγράμματος αγρομετεωρολογικών υπηρεσιών.*

Οι αγρότες και οι φορείς παροχής πληροφοριών και υπηρεσιών πρέπει να είναι σε θέση να αξιολογήσουν τα αποτελέσματα εναλλακτικών δράσεων. Μοντέλα προσομοίωσης καλλιεργειών εκτιμούν την απόδοση, καθώς

και τις εναλλακτικές συνθήκες διαχείρισης, όπως είναι η επιλογή ποικιλίας, η ημερομηνία φύτευσης, η διάταξη των φυτών σε σειρές και η άρδευση, μεταξύ άλλων (Meinke et al., 1996). Μελέτες προσομοίωσης έχουν δείξει συσχετίσεις μεταξύ φάσεων του Ελ Νινιο και αποδόσεων αραχίδων στην Αυστραλία (Meinke et al., 1996), καλαμποκιού στη Ζιμπάμπουε (Phillips et al., 2001) και την Αργεντινή (Ferreyra et al., 2001), καθώς και μεικτές καλλιέργειες (Hansen, 2002). Οι προγνώσεις των παραδοσιακών El Niño Southern Oscillation/ENSO εξακολουθούν να στερούνται της δυνατότητας να προσδιορίσουν την υπερεποχική μεταβλητότητα των βροχοπτώσεων. Για αποτελεσματική αξιολόγηση, οι αγρότες θα πρέπει να έχουν τα κατάλληλα εργαλεία, όπως η πρόσβαση σε υπηρεσίες συμβουλευτικής και σε αγορές, καθώς και οι πιστώσεις για επενδύσεις σε υποδομές και γεωργικές εκμεταλλεύσεις. Επίσης, είναι απαραίτητες οι κατάλληλες προϋποθέσεις δημιουργίας ενός ευνοϊκού περιβάλλοντος για την αποτελεσματική χρήση των πληροφοριών του κλίματος και την αξιοποίηση των υπηρεσιών εποχικής κλιματικής πρόγνωσης (Hansen, 2002). Οφέλη προκύπτουν όταν η πρόγνωση της κλιματικής μεταβλητότητας οδηγεί σε αποφάσεις που μειώνουν την ευπάθεια των επιπτώσεων. Αναγνωρίζεται ότι η βελτίωση των αποφάσεων εξαρτάται από την επικοινωνία και η διαδικασία εξαρτάται από τη θεσμική υποστήριξη. Έχουν προταθεί πέντε προϋποθέσεις για επιτυχή εφαρμογή (Hansen (2002):

(1) *Η ευπάθεια της γεωργίας και το κίνητρο λήψης αποφάσεων.* Οι προγνώσεις είναι χρήσιμες μόνο όταν αντιμετωπίζουν πραγματικές και κατανοητές ανάγκες. Οι υπεύθυνοι λήψης αποφάσεων πρέπει να γνωρίζουν τον κίνδυνο της κλιματικής αλλαγής και τις επιπτώσεις της, και το κίνητρο να χρησιμοποιούνται οι προγνώσεις για τη διαχείριση του κινδύνου.
(2) *Η βιώσιμη πρόγνωση για ευαίσθητες επιλογές αποφάσεων.* Οι παροχές δίνονται υπό την προϋπόθεση της ύπαρξης και κατανόησης των επιλογών αποφάσεων.
(3) *Η προγνωστικότητα των διακυμάνσεων του κλίματος.* Σχετικά συστατικά της κλιματικής μεταβλητότητας είναι η προγνωστικότητα σε κρίσιμες περιόδους, σε κατάλληλη κλίμακα, με επαρκή ικανότητα και χρόνο, για τη λήψη αποφάσεων.
(4) *Η ενημέρωση του κοινού.* Η χρήση των προγνώσεων του κλίματος προϋποθέτει ότι το κοινό λαμβάνει, κατανοεί και ερμηνεύει σωστά τις πληροφορίες στο σωστό χρόνο, σε μια μορφή κατανοητή και εφαρμόσιμη.
(5) *Τα ιδρύματα και οι πολιτικές.* Η συνεχής επιχειρησιακή χρήση των προγνώσεων προϋποθέτει θεσμική δέσμευση για παροχή κλιματικών προγνώσεων και άλλων πληροφοριών υποστήριξης.

15.3. Συστήματα διάχυσης αγρομετεωρολογικής πληροφορίας

Είναι ευρέως αποδεκτό ότι η ύπαρξη προβλέψιμης μεταβλητότητας του κλίματος και των επιπτώσεων είναι αναγκαία, αλλά όχι ικανή, συνθήκη για να επιτευχθεί η αποτελεσματική χρήση των εποχικών προγνώσεων (Podesta et al., 2002). Για την υλοποίηση αυτών των παροχών, έχει αποδειχθεί ότι πρέπει να σχεδιαστούν και να εφαρμοστούν αποτελεσματικοί μηχανισμοί αξιοποίησης των πληροφοριών του κλίματος στην υπηρεσία της κοινωνίας. Πολλές εμπειρικές μελέτες έχουν εντοπίσει θεωρητικά και πρακτικά εμπόδια στη χρήση των πληροφοριών και των προγνώσεων για το κλίμα. Τα εμπόδια είναι ποικίλα, όπως περιορισμοί στη μοντελοποίηση, πολυπλοκότητα του κλιματικού συστήματος, διαδικαστικά θέματα, θεσμικές και γνωστικές δυσκολίες στη λήψη ή την κατανόηση των κλιματικών πληροφοριών. Οι κλιματικές πληροφορίες δεν χρησιμοποιούνται ακόμη ευρέως από τους γεωργούς, οι οποίοι αναλαμβάνουν τη λήψη αποφάσεων ρουτίνας για την παραγωγή σε υφιστάμενα συστήματα γεωργικής εκμετάλλευσης (Jones, 2003). Αυτό οφείλεται εν μέρει στην πολυπλοκότητα των γεωργικών συστημάτων. Επιπλέον, μπορεί να υπάρχει ανεπαρκής εξέταση των πραγματικών συνθηκών διαβίωσης των αγροτών και, συνεπώς, των τοπικών προσαρμοστικών στρατηγικών. Σε αυτές τις περιπτώσεις, το αποτέλεσμα είναι συνήθως ακατάλληλη ανάπτυξη συστημάτων υποστήριξης (WMO, 2004b). Οι αγρότες αντιμετωπίζουν πολλές προκλήσεις, μεταξύ των οποίων αβέβαιες τιμές, πρόσβαση σε εισροές που απαιτούνται, κυβερνητικές πολιτικές, μάρκετινγκ, παράσιτα και ασθένειες, υποβάθμιση του εδάφους και ακραίες καιρικές συνθήκες.
Αρκετές τοποκεντρικές μελέτες έχουν αναδείξει την επικοινωνία ως βασική αδυναμία του συστήματος πληροφοριών για το κλίμα να εξυπηρετήσει τον γεωργικό τομέα. Η αδυναμία αυτή έχει τεκμηριωθεί εδώ και αρκετό καιρό στη βιβλιογραφία, ωστόσο εφαρμοσμένες προγνώσεις παραμένουν ζωτικής σημασίας. Εργαλεία για ενημέρωση και ανακοινώσεις νέων πληροφοριών στον τομέα της γεωργίας περιλαμβάνουν τα μέσα μαζικής ενημέρωσης, τα αγρομετεωρολογικά δελτία, οι υπηρεσίες συμβουλευτικής και άλλα συναφή. Σημαντικό έργο πρέπει ακόμη να γίνει μέχρι την αξιοποίηση των πληροφοριών κλιματικής πρόγνωσης, για τη λήψη αποφάσεων στη γεωργία, με στόχο τη μείωση των κινδύνων που σχετίζονται με το κλίμα.

15.3.1. Μέθοδοι και τρόποι επικοινωνίας

Εκτός από τη φύση των ίδιων των προγνώσεων, η ερευνητική κοινότητα έχει εντοπίσει τρόπους επικοινωνίας για την αντιμετώπιση των επιπτώσεων των προγνώσεων, όπως είναι οι δίαυλοι επικοινωνίας και η ευαισθητοποίηση των ενδιαφερομένων μερών, οι βασικές σχέσεις, η γλώσσα και η ορολογία. Ενώ η επιστημονική κοινότητα δίνει έμφαση στις αναδυόμενες τεχνολογίες επικοινωνιών, για την ανταλλαγή πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο, η τοπική μεταφορά πληροφοριών προς τους αγρότες πρέπει να βασίζεται σε μάλλον συμβατικά μέσα επικοινωνίας. Η έλλειψη τεχνογνωσίας και υποδομών επιβάλλει σοβαρούς περιορισμούς. Σε εθνικό και περιφερειακό επίπεδο, αυτό απαιτεί συνειδητή ενσωμάτωση των αναδυόμενων και των συμβατικών τεχνολογιών επικοινωνίας. Ωστόσο, ενώ υπάρχουν διαφορές στις υποδομές επικοινωνίας, υπάρχουν και σημαντικές τοπικές καινοτομίες, που χρειάζεται να αξιοποιηθούν και να ενσωματωθούν στις νέες τεχνολογίες. Επισημαίνονται ενδεικτικά παραδείγματα, όπως η χρήση της τοπικής καλωδιακής τηλεόρασης για πρόσβαση στο διαδίκτυο, η ασύρματη πρόσβαση και οι τεχνολογίες πληροφοριών και επικοινωνιών για τοπικά δίκτυα.

Αρκετές χώρες έχουν διαπιστώσει ότι οι μονάδες έγκαιρων προειδοποιήσεων, γνωστές διεθνώς ως National Early Warning Units (NEWUs), πρέπει να μετατοπιστούν από το τοπικό στο εθνικό επίπεδο, ανοίγοντας νέες μορφές και διαύλους επικοινωνίας (WMO, 2004b). Οι επιτυχείς αλληλεπιδράσεις βασίζονται σε ανοικτές διαδικασίες λήψης αποφάσεων, που διαπιστώνουν πολλαπλά οφέλη, καθώς και σε θεσμικές πρωτοβουλίες, για ολοκληρωμένες επιστημονικές προσεγγίσεις, εκτός από τις παραδοσιακές επιστημονικές αναλύσεις. Αδυναμίες και ελλείψεις έχουν εντοπιστεί και εξακολουθούν να υφίστανται στις προγνώσεις, στις έγκαιρες προειδοποιήσεις και στα συστήματα πληροφοριών για το κλίμα και τις επιπτώσεις στη γεωργία. Όλα τα παραπάνω θέματα σηματοδοτούν την ανάγκη για αυξημένη κατάρτιση, χρήση και ενσωμάτωση νέων εργαλείων επικοινωνίας και διάδοσης πληροφορίας.

15.3.1.1. Ανάπτυξη αποτελεσματικής επικοινωνίας

Αρκετές χώρες, όπως η Αργεντινή, η Βραζιλία, η Αιθιοπία, το Περού, η Νότια Αφρική και η Ζιμπάμπουε, έχουν σε εξέλιξη προγράμματα είτε σύγχρονων μετεωρολογικών συστημάτων είτε συστημάτων γεωργικής έρευνας, που υποστηρίζουν τη χρήση των προγνώσεων από γεωργικούς φορείς λήψης αποφάσεων. Για παράδειγμα, στην Αυστραλία, υπάρχει ένα ισχυρό δίκτυο ιδρυμάτων που στηρίζουν τη γεωργική εφαρμογή της εποχικής κλιματικής πρόγνωσης. Επίσης, εφαρμόζονται εποχικές κλιματικές προγνώσεις και έγκαιρες προειδοποιήσεις για τη γεωργία (CLIMAG), ως αποτέλεσμα κοινοπραξιών ιδρυμάτων στη Δυτική Αφρική, την Ευρώπη και την Ασία. Στη Βραζιλία, λειτουργεί αγρομετεωρολογικό κέντρο πληροφόρησης (CIIAGRO), με βασική δραστηριότητα την επιχειρησιακή χρήση αγρομετεωρολογικών μοντέλων και στόχο την εκτίμηση των αναγκών σε νερό των βασικών καλλιεργειών, για τη βελτίωση της παραγωγικότητας, καθώς και την εκτίμηση της πιθανής συχνότητας εχθρών και ασθενειών των καλλιεργειών (Fontana και Camargo, 2002). Τέλος, έχουν ξεκινήσει από την National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) των ΗΠΑ και έχουν εξελιχθεί σε διεθνές περιφερειακό επίπεδο τα φόρουμ κλιματικών προοπτικών, τα γνωστά Climatic Outlook Forums (COFs), που εκτιμούν τις βροχοπτώσεις της επερχόμενης βλαστικής περιόδου, μεταξύ άλλων (Buizer et al., 2000).

Υπάρχουν διάφοροι παράγοντες που επηρεάζουν τις ενδεχόμενες αλλαγές αποφάσεων των αγροτών για την αντιμετώπιση των κλιματικών προγνώσεων. Πολλά προφανή εμπόδια μπορούν να ξεπεραστούν με τη λήψη μιας ολιστικής προσέγγισης και με συμμετοχή όλων των σχετικών φορέων στη διαδικασία. Είναι σαφές ότι οι κλιματικές πληροφορίες έχουν μεγαλύτερη αξία για τον αγρότη, εφόσον διαβιβάζονται μέσω συμβούλων, τους οποίους οι αγρότες ήδη γνωρίζουν και εμπιστεύονται. Οι γεωργικές επιπτώσεις της εποχικής κλιματικής πρόγνωσης κινούνται όλο και περισσότερο πέρα από την παραδοσιακή γεωργική έρευνα (Ziervogel, 2004). Τρεις βασικά θέματα που αφορούν την επικοινωνία έχουν εντοπιστεί από αυτές τις προσπάθειες. Πρώτον, η γλώσσα και η ορολογία που χρησιμοποιούνται θεωρούνται πολύ τεχνικές. Δεύτερον, χρειάζεται ενημέρωση και εκπαίδευση των παρόχων πληροφοριών, των χρηστών και των ενδιαφερομένων μερών. Ειδικότερα, οι πάροχοι πρέπει να εκπαιδευτούν σχετικά με τις ανάγκες και τις διαδικασίες λήψης αποφάσεων που χρησιμοποιούν οι αγρότες. Τρίτον, είναι σκόπιμο να εξεταστούν τα χαρακτηριστικά των κλιματικών προγνώσεων. Για παράδειγμα, η χωρική κατανομή των προγνώσεων αποτελεί ιδιαίτερα σημαντικό θέμα για πολλές χώρες και περιοχές.

Είναι σαφές ότι οι ειδικές αγροοικολογικές προγνώσεις θεωρούνται καθοριστικής σημασίας. Επισημαίνονται διάφορες ειδικές κριτικές σχετικά με τις κλιματικές προγνώσεις. Για παράδειγμα, παρέχεται η πιθανότητα εποχικής βροχόπτωσης, αλλά δεν δίνεται η χωρική κατανομή. Επίσης, παρέχεται η πιθανότητα μηνιαίων

βροχοπτώσεων, αλλά είναι πολύ γενική και πιθανολογική. Σχετικά με τις δεκαήμερες βροχοπτώσεις, παρέχεται μόνο μια γενική χωρική κατανομή. Τέλος, δεν παρέχονται ποσοτικές προγνώσεις ημερήσιων βροχοπτώσεων ή προγνώσεις σχετικής υγρασίας. Γενικά, οι εποχικές κλιματικές προγνώσεις θεωρούνται αρκετά γενικές, κυρίως στη χωρική και χρονική κατανομή τους, ώστε να χρησιμοποιούνται επιχειρησιακά στον τομέα της γεωργίας. Επίσης, οι αγρότες και οι πάροχοι συμβουλευτικών υπηρεσιών επισημαίνουν την περιορισμένη χρησιμότητα όρων, όπως πάνω από το κανονικό, φυσιολογικό και κάτω από κανονικές τιμές, για τη λήψη αποφάσεων στη γεωργία. Κατά συνέπεια, αποτελεί κλειδί ο καθορισμός του επιπέδου αποδοχής του κινδύνου για συγκεκριμένα αρνητικά αποτελέσματα. Τέλος, είναι σημαντικό να συνειδητοποιήσουν οι πάροχοι υπηρεσιών και πληροφοριών το ρόλο του κλίματος στη ζωή και τις δραστηριότητες των αγροτών και των γεωργικών επιχειρήσεων.

15.3.2. Διάδοση προγνώσεων και προειδοποιήσεων

Ανεξάρτητα από τη φύση και τη σημασία της, κάθε πληροφορία δεν θεωρείται χρήσιμη αν δε διατίθεται εμπρόθεσμα στους χρήστες. Η αξιοπιστία των προγνώσεων λόγω της πολυπλοκότητας του καιρού και των μετεωρολογικών κινδύνων επηρεάζει τη χρήση τους από τους αγρότες, καθώς και τη στάση των αγροτών έναντι του κινδύνου. Όλοι αυτοί οι παράγοντες μπορούν να αξιολογηθούν μέσω της συμμετοχής των γεωργών. Η ικανότητα ενός αγρότη να αντέχει τον κίνδυνο ενδεχόμενης απώλειας εισοδήματος και περιουσιακών στοιχείων και τα ειδικά χαρακτηριστικά, όπως η ευπάθεια και η ετοιμότητα, καθορίζουν τη στάση και την προσαρμογή του σε σχέση με τον κίνδυνο. Με βάση την εμπειρία ενός αγρότη στην παραδοσιακή πρόγνωση καιρού και τις αναμενόμενες ζημιές λόγω δυσμενών καιρικών συνθηκών σε διαφορετικά στάδια ανάπτυξης των καλλιεργειών, η χρήση των προγνώσεων μπορεί να διαφέρει ανάλογα με την εποχή και το στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας. Έτσι, ιδιαίτερα στις αναπτυσσόμενες χώρες, θα μπορούσε να υπάρχει ένας αριθμός κατηγοριών γεωργών που χρησιμοποιούν προγνώσεις και άλλες πληροφορίες (Rathore et al., 2006). Στην Κίνα, το συμπέρασμα αυτό εξάγεται από τις μεγάλες έρευνες, σύμφωνα με τις οποίες οι αγρότες με διαφορετικό επίπεδο εισοδήματος και ο μη γεωργικός πληθυσμός, που εργάζεται σε διάφορα επαγγέλματα σχετιζόμενα με τη γεωργία, έχουν σαφώς ποικίλες ανάγκες πληροφόρησης, πηγές πληροφόρησης και χρήσεις των πληροφοριών, ανάλογα με το εκπαιδευτικό τους επίπεδο. Στο πλαίσιο αυτό, μπορεί να υπάρχουν διαφορετικές ομάδες-στόχοι των χρηστών των υπηρεσιών γεωργικών καιρικών προγνώσεων και άλλων γεωργικών προειδοποιήσεων.

Οι μετεωρολογικές προγνώσεις γενικά χρησιμοποιούνται από εξειδικευμένους επαγγελματίες, όπως ερευνητές, για τη χάραξη πολιτικής και την πρόοδο των αγροτών. Αντίστοιχα, υπάρχουν οι γεωργικές ενημερώσεις, που χρησιμοποιούνται περισσότερο από τους αγρότες με λιγότερο τυπική εκπαίδευση, για τη διαχείριση των γεωργικών εκμεταλλεύσεων. Υπάρχουν, βέβαια, κάποιες ομοιότητες και διαφορές μεταξύ των δύο αυτών ομάδων-στόχων. Η πρώτη ομάδα χρηστών μπορεί να βασίζεται περισσότερο σε γρήγορα ηλεκτρονικά συστήματα για τη μεταφορά των πληροφοριών, όπως το διαδίκτυο. Οι συμβατικές μέθοδοι επικοινωνίας, όπως δελτία, φυλλάδια, αφίσες, ταχυδρομικές επιστολές, εφημερίδες, ραδιόφωνο, τηλεόραση, (κινητή) τηλεφωνία, συσκευές τηλεειδοποίησης, τοπικές ανακοινώσεις, συναντήσεις, τοπικές αγορές δεσμευτικό χρονοδιάγραμμα και προσωπική επικοινωνία, φτάνουν καλύτερα στη δεύτερη ομάδα χρηστών (Rijks & Baradas, 2000). Με την εξέλιξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών και του διαδικτύου, υπάρχουν πλέον ηλεκτρονικά συστήματα επικοινωνίας. Οι ραδιοτηλεοπτικές υπηρεσίες εξακολουθούν να είναι οι καλύτεροι τρόποι επικοινωνίας για τους ανθρώπους της υπαίθρου, επειδή δεν είναι μόνο ταχείες μέθοδοι, αλλά καθιστούν δυνατή την επικοινωνία με μεγάλες μάζες και αναλφάβητους. Με την τηλεόραση και το ραδιόφωνο, οι πληροφορίες εξακολουθούν να εμφανίζονται μόνο για μικρά χρονικά διαστήματα, εκτός εάν είναι μαγνητοσκοπημένες, ενώ πολλές πληροφορίες που βασίζονται στο διαδίκτυο μπορούν να παραμείνουν διαθέσιμες για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.

15.3.3. Προγνώσεις πιθανοτήτων

Οι γεωργικές προγνώσεις απαιτούν προγνώσεις των μετεωρολογικών μεταβλητών αρκετές ημέρες, εβδομάδες ή ακόμη και μήνες πριν να καταστεί δυνατή η λήψη αποφάσεων διαχείρισης. Ωστόσο, γνωρίζουμε ότι το κλιματικό σύστημα είναι χαοτικό και, ως εκ τούτου, η ακρίβεια των μετεωρολογικών και κλιματικών προγνώσεων είναι αδύνατη, εξαιτίας της αβεβαιότητας στις αρχικές συνθήκες και των διαρθρωτικών ανεπαρκειών των μοντέλων πρόγνωσης (Palmer et al., 2005). Υπάρχει ανάγκη να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της αβεβαιότητας κατά τέτοιον τρόπο ώστε να γίνεται διάκριση μεταξύ των περιπτώσεων στις οποίες οι προγνώσεις επιδεινώνονται μάλλον αργά με το χρόνο, οπότε θεωρούνται σχετικά ικανοποιητικές, και των περιπτώσεων στις οποίες επιδεινώνονται αρκετά γρήγορα με το χρόνο, οπότε θεωρούνται σχετικά μη

ικανοποιητικές. Η απάντηση στο ερώτημα αυτό απαιτεί την εξέταση της ποσοτικοποίησης της αβεβαιότητας στις προγνώσεις με στοχαστικό τρόπο. Το σκεπτικό για τις προγνώσεις πιθανοτήτων έχει τόσο επιστημονική, όσο και οικονομική συνιστώσα (Murphy, 1998). Αρχικά, οι μετεωρολογικές και κλιματικές προγνώσεις πρέπει να εκφράζονται με όρους πιθανοτήτων, για να διατυπώσουν την αβεβαιότητα που ενυπάρχει στις διαδικασίες πρόγνωσης. Δεδομένου ότι το μέγεθος της αβεβαιότητας μπορεί να εξαρτάται από τις συνθήκες, ο βαθμός της αβεβαιότητας που σχετίζεται με μια δεδομένη εκτίμηση μπορεί να μεταφερθεί στοχαστικά με τη χρήση των πιθανοτήτων. Σε γενικές γραμμές, οι προγνώσεις που εκφράζονται με μη πιθανολογική μορφή δεν είναι σε θέση να αντικατοπτρίζουν με ακρίβεια την πραγματική κατάσταση των γνώσεων σχετικά με τις μελλοντικές συνθήκες πρόγνωσης του συστήματος. Οι προγνώσεις καιρού πρέπει να εκφράζονται με όρους πιθανοτήτων, για να μπορούν οι τελικοί χρήστες να παίρνουν τις καλύτερες δυνατές αποφάσεις, όπως αντικατοπτρίζονται από τα επίπεδα της οικονομικής ή/και της κοινωνικής πρόνοιας.
Η πρόγνωση πιθανοτήτων δεν αναμένεται να εξεταστεί μόνο στη διαμόρφωση προγνώσεων του καιρού και του κλίματος για γεωργικούς σκοπούς, αλλά να επεκταθεί και στις ίδιες τις γεωργικές προγνώσεις. Οι προγνώσεις πιθανοτήτων έχει ήδη αποδειχθεί ότι παρουσιάζουν μεγαλύτερα οφέλη σε ορισμένες γεωργικές εφαρμογές, κάνοντας χρήση των μετεωρολογικών και κλιματικών πληροφοριών. Συγκεκριμένα, η πρόγνωση της απόδοσης των καλλιεργειών έχει ωφεληθεί από μια συλλογική προσπάθεια στο πλαίσιο της εποχικής πρόγνωσης του κλίματος μιας περιοχής. Υπάρχουν παραδείγματα προγνώσεων πιθανοτήτων της ετήσιας απόδοσης των καλλιεργειών και συγκρίσεων των πλεονεκτημάτων τους έναντι μη πιθανολογικών προγνώσεων (Challinor et al., 2005).

15.3.3.1. Κατανόηση και εφαρμογή πληροφορίας πιθανοτήτων

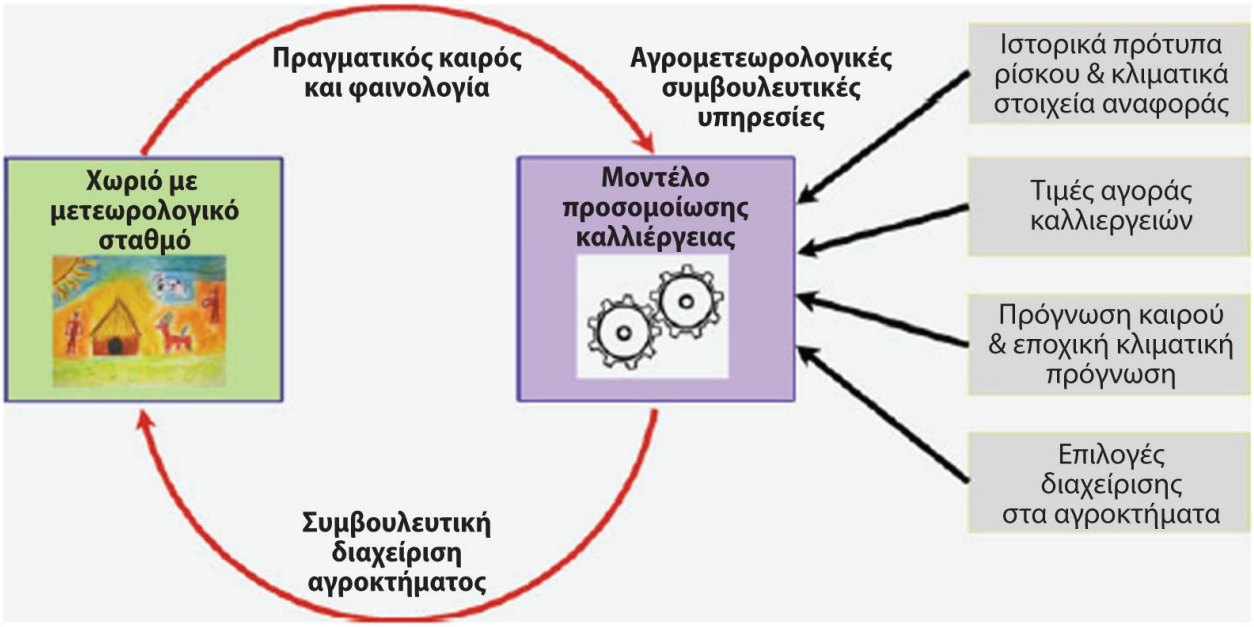
Υπάρχουν θεμελιώδεις δυσκολίες στην κατανόηση και εφαρμογή πληροφοριών πιθανοτήτων για τη λήψη αποφάσεων (Nicholls, 1999). Η επιστημονική αγρομετεωρολογική κοινότητα μπορεί να βοηθήσει τους αγρότες να ξεπεράσουν ορισμένες από αυτές τις δυσκολίες, όμως με ρυθμίσεις που επιτρέπουν την άμεση αλληλεπίδραση. Για παράδειγμα, η παρουσίαση πληροφοριών με τη μορφή των φυσικών συχνοτήτων, όπως «μια περιοχή δέχεται περισσότερα από 160 mm βροχής την περίοδο Ιανουαρίου-Μαρτίου σε περίπου 10 ανά κάθε 20 χρόνια», παρά με την ισοδύναμη, αλλά πιο αφηρημένη έννοια της πιθανότητας μιας μελλοντικής έκβασης, δηλαδή «η πιθανότητα του να δεχθεί μια περιοχή πάνω από 160 mm βροχής την περίοδο Ιανουαρίου-Μαρτίου είναι 50%», τείνει να βελτιώσει την ερμηνεία των πληροφοριών πιθανοτήτων (Gigerenzer & Hoffrage, 1995). Μια άλλη τεχνική είναι η συσχέτιση πληροφοριών με την εμπειρία. Έχει προταθεί ότι οι πληροφορίες πιθανοτήτων που αποκτήθηκαν από προσωπική εμπειρία επεξεργάζονται και εφαρμόζονται πιο αποτελεσματικά από ό,τι οι πληροφορίες που αποκτήθηκαν από στατιστικές περιγραφές (Hansen, 2002). Επειδή ο βιοπορισμός των αγροτών εξαρτάται από τον καιρό, είναι λογικό να αναμένεται οι ίδιοι να κατανοήσουν την αβεβαιότητα από τη δική τους εμπειρία, και όχι απαραίτητα με τη γλώσσα των πιθανοτήτων. Η παροχή βοήθειας στους αγρότες να χαρτογραφήσουν τις πληροφορίες πρόγνωσης πιθανοτήτων στη βάση της δικής τους εμπειρίας μπορεί να ενισχύσει τη χρησιμότητα των πληροφοριών.
Η εμπιστοσύνη και η διαφάνεια είναι επίσης σημαντικά στοιχεία. Η οικοδόμηση της εμπιστοσύνης στην αξιοπιστία των πληροφοριών που παρέχονται απαιτεί χρόνο και συστηματική προσπάθεια. Η επικοινωνία της πληροφορίας πιθανοτήτων με διαφανή τρόπο, και όχι σαν ένα «μαύρο κουτί», είναι ουσιαστικής σημασίας σε αυτή την προσπάθεια, καθώς επιτρέπει στους αγρότες να μετατοπίσουν την εμπιστοσύνη τους από τον πάροχο της πληροφορίας στα ίδια τα δεδομένα και τις διαδικασίες. Παρουσιάζοντας τις προηγούμενες επιδόσεις του συστήματος προγνώσεων και εξηγώντας σε απλουστευμένη μορφή τη διαδικασία που απορρέει από τις προγνώσεις πιθανοτήτων, συμβάλλουν στη διαφάνεια και στην ενίσχυση της εμπιστοσύνης.

15.4. Τύποι και κλίμακες γεωργικής σχεδίασης

15.4.1. Πλαίσιο γεωργικής σχεδίασης

Παραμένει σημαντικό θέμα η αξιολόγηση των κινδύνων για το κλίμα και τον καιρό, και η σημασία τους στον γεωργικό σχεδιασμό, για τον μετριασμό των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής και των ακραίων φαινομένων. Ο όρος «καιρός» χρησιμοποιείται για να περιγράψει *ημέρα προς ημέρα* τις διακυμάνσεις στην ατμόσφαιρα. Περιλαμβάνει, μεταξύ άλλων μεταβλητών, τις βροχοπτώσεις, τη θερμοκρασία, την υγρασία και τη νεφοκάλυψη. Οι προγνώσεις καιρού είναι ουσιαστικά βραχυπρόθεσμες, καθώς η αξιοπιστία τους πέφτει ταχύτατα ύστερα από πέντε ημέρες. Δηλαδή, ο καιρός αποτελεί μια στιγμιαία έννοια. Το κλίμα μιας περιοχής

περιγράφεται από τη συλλογή των στατιστικών στοιχείων του καιρού, για την απόκτηση εκτιμήσεων των ημερήσιων, μηνιαίων και ετήσιων μέσων και των διακυμάνσεων των μετεωρολογικών δεδομένων.
Επομένως, το κλίμα αποτελεί έναν μακροπρόθεσμο μέσο όρο του καιρού. Ο γεωργικός σχεδιασμός, τόσο ο μακροπρόθεσμος στρατηγικός, όσο και ο τακτικός, δηλαδή για λιγότερο από 10 ημέρες, θα πρέπει να σταθμίζει τους κινδύνους που σχετίζονται με το κλίμα και άλλους κινδύνους, για την επίτευξη των στόχων του παραγωγού, και να διευκρινίζει το είδος των πληροφοριών που θα βοηθήσουν τους αγρότες στον προγραμματισμό τους. Για παράδειγμα, σημαντικές είναι οι πληροφορίες για το κλίμα, οι τεχνικές και διαχειριστικές πληροφορίες, καθώς και τα δεδομένα της αγοράς. Μια απαραίτητη βασική πτυχή για τη διασύνδεση του κλίματος και του κινδύνου με τις καιρικές συνθήκες στον γεωργικό σχεδιασμό είναι μια εκτίμηση του συνολικού συστήματος διαχείρισης που προέρχεται από τους φορείς λήψης αποφάσεων. Οι διαχειριστές χρειάζονται πληροφορίες για τη λήψη τακτικών και στρατηγικών αποφάσεων. Για παράδειγμα, σε μια αυστραλιανή έρευνα της γεωργικής σχεδίασης επισημαίνεται η πληθώρα δυνατοτήτων σχεδιασμού και σημαντικών αποφάσεων που θα μπορούσαν να επηρεαστούν από τις καιρικές συνθήκες και την κλιματική μεταβλητότητα σε διαφορετικές χρονικές κλίμακες. Επιπλέον, έχει διαπιστωθεί ότι το σύστημα λήψης αποφάσεων εκτείνεται σε ολόκληρη την αλυσίδα της γεωργικής παραγωγής που επηρεάζεται από τις καιρικές συνθήκες και την κλιματική μεταβλητότητα. Η βιομηχανία ζάχαρης μπορεί να χρησιμεύσει ως ένα παράδειγμα, που έχει σχέση με πολλά συστήματα γεωργικού σχεδιασμού, όπως αποφάσεις στην κλίμακα αγροκτήματος, καθώς και στην κλίμακα μεταφοράς και στην άλεση.
Επίσης, υπάρχουν ζητήματα σε κλίμακα λεκάνης απορροής, όπως διαχείριση εδαφών, υδάτινων πόρων και περιβάλλοντος. Ακόμα, υπάρχουν ζητήματα στην κλίμακα της εμπορίας, όπως εκτιμήσεις για το μέγεθος των καλλιεργειών, προγραμματισμός για υψηλό ασφάλιστρο εφοδιασμού στην αρχή της περιόδου και διαχείριση του εφοδιασμού, καθώς και σχεδιασμός και κατανομή των υδάτινων πόρων μαζί με σχεδιασμό για ακραία φαινόμενα. Διαφορετικά χρονοδιαγράμματα και βασικές γεωργικές αποφάσεις παίζουν, επίσης, σημαντικό ρόλο, ιδίως όσον αφορά την ανάγκη αναγνώρισης του ρόλου των διαφορετικών κλιματικών και των καιρικών συστημάτων να επηρεάζουν τις αποφάσεις στη γεωργία. Στο Σχήμα 15.2 παρουσιάζεται ένα ενδεικτικό παράδειγμα ροής δεδομένων και πληροφοριών, που εντάσσεται σε ένα προσαρμόσιμο δυναμικό σύστημα βελτιστοποίησης αγροκτήματος με εφαρμογή στην Αφρική (Farm Adaptive Dynamic Optimization System/FADO) (www.ec-freinet-acheres.ac-versailles.fr).



Σχήμα 15.2. *Σύστημα ροής πληροφοριών αγροκτήματος.*

15.4.2. Σχεδίαση σε επίπεδο αγροκτήματος

Παρουσιάζονται διάφοροι μέθοδοι που συμβάλλουν στη σχεδίαση σε επίπεδο αγροκτήματος. Ειδικότερα:

15.4.2.1. Επιλογή των καλλιεργειών και καλλιεργητική πρακτική

Η μέθοδος επιλογής ποικιλιών καλλιεργειών με βάση τις αγροκλιματικές απαιτήσεις συνίσταται στη σύγκριση, από τη μια πλευρά, της περιφερειακής διαθεσιμότητας αγροκλιματικών πόρων και, από την άλλη πλευρά, των κλιματικών απαιτήσεων ορισμένων ποικιλιών καλλιεργειών στη βάση των οποίων πρέπει να γίνει η επιλογή. Η επιλογή των ποικιλιών των φυτών σε τοπικό ή περιφερειακό επίπεδο θα πρέπει να βασίζεται σε αγροκλιματικές μελέτες που έχουν διεξαχθεί για να καθορίσουν τις κλιματικές απαιτήσεις των διαφόρων ποικιλιών. Ο αγροκλιματικός χαρακτηρισμός των καλλιεργειών περιλαμβάνει την ηλιακή ακτινοβολία, τη θερμοκρασία, την υγρασία και τη φωτοπερίοδο, μεταξύ των σημαντικότερων κλιματολογικών παραγόντων. Υπάρχουν μεγάλες διαφορές στην ευαισθησία στον παγετό μεταξύ των καλλιεργειών. Σε κλίμακα αγροκτήματος, τα είδη που είναι ευαίσθητα στον παγετό θα πρέπει να φυτευτούν (εάν φυτευτούν) σε μέσες κλίσεις. Θα πρέπει να αποφεύγονται οι επίπεδες θέσεις, όπου μπορεί να υπάρχει ροή κρύου αέρα. Η φύτευση φυλλοβόλων καλλιεργειών σε πλαγιές, χωρίς άμεσο ηλιακό φως, καθυστερεί την άνοιξη την άνθιση και συχνά παρέχει προστασία. Υποτροπικά δέντρα είναι καλύτερο να φυτεύονται σε πλαγιές που εκτίθενται στον ήλιο, όπου το έδαφος των καλλιεργειών μπορεί να λαμβάνει και να αποθηκεύει περισσότερη ενέργεια από την άμεση ηλιακή ακτινοβολία. Τα υποκείμενα συχνά επηρεάζουν το πόσο νωρίς θα ανθίσουν τα φυλλοβόλα οπωροφόρα δέντρα και, ως εκ τούτου, τη δυναμική τους στον παγετό. Στα αειθαλή οπωροφόρα δέντρα, η ρίζα μπορεί να σχετιστεί επίσης με την ανθεκτικότητα στον παγετό.

15.4.2.2. Επιλογή ποικιλιών

Η μεταβλητότητα εντός των ειδών ως προς την αντοχή στην ξηρασία, τον παγετό και τη θερμική καταπόνηση είναι συχνά μεγάλη. Ως εκ τούτου, υπάρχει συχνά χώρος για αναπαραγωγή φυτών με αντοχή σε αυτούς τους κινδύνους. Για παράδειγμα, στην καλλιέργεια εσπεριδοειδών, ο παγετός δεν μπορεί να αποφευχθεί. Ωστόσο, η ανοχή σε θερμοκρασίες υπό το μηδέν είναι μια αξιόλογη επιλογή. Η επιλογή μιας κατάλληλης ποικιλίας για δεδομένη περιοχή θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη την ανθεκτικότητα στον παγετό των ποικιλιών του είδους.

15.4.2.3. Προετοιμασία του εδάφους

Όσον αφορά την προστασία από τον παγετό, ένα βαθύ όργωμα έχει περίπου το ίδιο αποτέλεσμα όπως το ρηχό όργωμα για τη μεταφορά θερμότητας, δεδομένου ότι το στρώμα του εδάφους που εμπλέκεται στη μεταφορά της θερμότητας στην επιφάνεια μέσω αγωγιμότητας, σε καθημερινή βάση, δεν είναι παχύτερο από περίπου 0,3 m. Όσον αφορά τις μεθόδους άροσης, η καλλιέργεια θα πρέπει να αποφεύγεται στη διάρκεια περιόδων που είναι πιθανόν να συμβεί παγετός, διότι αυξάνει το πορώδες του εδάφους και μπορεί να συμβάλει σε μεγαλύτερη εξάτμιση από το άνω στρώμα. Δεδομένου ότι ο αέρας είναι ένας κακός αγωγός θερμότητας, σε σύγκριση με το έδαφος και το νερό, η καλλιέργεια μειώνει την ποσότητα της θερμότητας που αποθηκεύεται στο έδαφος στη διάρκεια της ημέρας και μεταφέρεται στην επιφάνεια στη διάρκεια μιας κρύας νύχτας. Αν δεν μπορεί να αποφευχθεί η καλλιέργεια, τότε πρέπει να χρησιμοποιηθεί συμπιεστής, για να συμπιέσει το χώμα και να αντισταθμίσει την αύξηση του εναέριου χώρου που δημιουργείται από την ανάδευση του εδάφους.

15.4.2.4. Διαχείριση καλλιεργειών

Όσον αφορά τη διαχείριση της άρδευσης για την προστασία από τον παγετό, τα εδάφη θα πρέπει να είναι υγρά πριν από την περίοδο κατά την οποία ενδέχεται να συμβεί παγετός. Ως εκ τούτου, η άρδευση μία ή δύο ημέρες πριν από μια νύχτα παγετού φέρνει το έδαφος κοντά στην υδατοϊκανότητα, γεγονός που οδηγεί σε αυξημένη ροή θερμότητας στο έδαφος στη διάρκεια μιας μεταγενέστερης νύχτας. Διάφορες μέθοδοι άρδευσης χρησιμοποιούνται επίσης στη διάρκεια μιας νύχτας παγετού, ως δραστική μέθοδος, με στόχο τη χρήση της θερμότητας που απελευθερώνεται καθώς το νερό ψύχεται και παγώνει (FAO, 2005).

Όσον αφορά τη διαχείριση λιπασμάτων, η χρήση τους, ιδιαίτερα του αζώτου, επιταχύνει την ανάπτυξη των καλλιεργειών και βοηθά στην ανάπτυξη άφθονου ριζικού συστήματος, καθιστώντας έτσι τα φυτά περισσότερο ικανά να αντέχουν στην ξηρασία. Ο χρόνος και η μέθοδος εφαρμογής είναι σημαντικά. Το άζωτο και τα άλλα θρεπτικά συστατικά είναι γνωστό ότι επηρεάζουν την ευαισθησία παγετού. Σε γενικές γραμμές, το άζωτο μπορεί να μειώσει την αντίσταση στον παγετό, ενώ ο φώσφορος και το κάλιο είναι πιθανόν να την αυξήσουν. Οι νέοι βλαστοί είναι πιο ευαίσθητοι στον παγετό, γιατί τείνουν να έχουν μικρότερη περιεκτικότητα διαλυμένης

ουσίας στους ιστούς. Ως εκ τούτου, η διαχείριση θα πρέπει να ελαχιστοποιεί τη νέα βλάστηση σε περιόδους επιρρεπείς στον παγετό. Το άζωτο μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένη αντοχή στον παγετό.
Όσον αφορά τη διαχείριση των ζιζανίων, στη διάρκεια μιας ξηρασίας ή κάτω από συνθήκες υδατικής καταπόνησης, ο ανταγωνισμός τους είναι ένα πρόβλημα για τις καλλιέργειες, διότι τα ζιζάνια επίσης χρησιμοποιούν την ελάχιστη υγρασία που είναι διαθέσιμη. Σε ξερικές καλλιέργειες που σπέρνονται γραμμικά, ο έλεγχος των ζιζανίων μέσω διακαλλιεργητικών τεχνικών έχει βρεθεί διαπιστωθεί ότι είναι επωφελής σε συνθήκες υδατικής καταπόνησης.
Οι καλλιέργειες κάλυψης και τα ζιζάνια στις καλλιέργειες, τείνουν να παγιδεύουν τον αέρα και έτσι να μειώνουν τη διάχυση της θερμότητας στο έδαφος. Ως εκ τούτου, υπό αυτές τις συνθήκες, η ελάχιστη θερμοκρασία είναι χαμηλότερη και ο κίνδυνος παγετού αυξάνεται. Το κόψιμο των φυτών, χωρίς να τα αφαιρέσει, ή η καλλιέργεια για την εξαφάνισή τους, έχει μικρή, αν όχι καμία, επίδραση στην ελάχιστη θερμοκρασία. Ο ψεκασμός όμως με ζιζανιοκτόνο έχει σημαντικά θετική επίδραση στην ελάχιστη θερμοκρασία. Είναι πιθανόν η παρουσία των καλλιεργειών κάλυψης ή ζιζανίων να έχει αρνητική επίδραση στην αντοχή στον παγετό, γεγονός που προκύπτει από την υψηλότερη συγκέντρωση βακτηρίων INA, που είναι γνωστό ότι υπάρχουν σε καλλιέργειες κάλυψης και στα ζιζάνια. Γνωρίζουμε ότι τα οπωροφόρα δέντρα έχουν χαμηλότερες συγκεντρώσεις βακτηρίων INA (FAO, 2005). Η πρόωρη ή η καθυστερημένη συγκομιδή είναι μια πρακτική μέθοδος για την αποφυγή βλαβών από τον παγετό την οποία υιοθετούν πολλοί αγρότες, προκειμένου να διασφαλίσουν τη σοδειά που μπορεί να συγκομιστεί πριν από τον παγετό. Αυτό είναι, σε γενικές γραμμές, εφικτό για τις μικρές γεωργικές εκμεταλλεύσεις, αλλά συχνά αδύνατο για τις μεγάλες.

15.4.2.5. Προετοιμασία και διαχείριση ξηρασίας

Σε ένα μεταβλητό κλίμα, σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν στη γεωργία η επίσπευση και η προετοιμασία για την επόμενη ξηρασία. Αυτό πρέπει να ενσωματωθεί στη μακροπρόθεσμη στρατηγική διαχείρισης μιας εκμετάλλευσης και πρέπει να είναι γνωστοί οι παράγοντες, που απειλούν τη βιωσιμότητα και τη μακροπρόθεσμη οικονομική βιωσιμότητα του αγροκτήματος. Σε επίπεδο γεωργικής εκμετάλλευσης, είναι απαραίτητο να αναπτυχθούν βιώσιμα συστήματα και να εφαρμοστούν, για την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων της ξηρασίας στα εδάφη και τη βλάστηση, ενώ και τα ζώα πρέπει να φροντίζονται με ανώδυνο τρόπο, για να μπορούν να διατεθούν. Η ευημερία των αγροτικών οικογενειών θα πρέπει επίσης να ενισχυθεί, με τη βελτίωση της χρηματοοικονομικής διαχείρισης των κινδύνων. Παρότι η απειλή της ξηρασίας δεν μπορεί να κατασταλεί, οι επιπτώσεις της στην κοινωνία, τα εδάφη, τη βλάστηση και το ζωικό κεφάλαιο μπορούν να μειωθούν.
Οι συνθήκες που ευνοούν τη διάβρωση του εδάφους από τον άνεμο και το νερό είναι πιο διαδεδομένες σε περιόδους ξηρασίας. Οι εκτάσεις με γυμνό έδαφος μέσα σε ένα λιβάδι αυξάνονται όσο αυξάνεται ο δείκτης πυκνότητας, ιδιαίτερα σε αντίξοες περιόδους (White et al., 1980). Αυτό προκαλείται από τη μείωση της φυτικής κάλυψης και την ξήρανση της επιφάνειας του εδάφους. Η απόφαση για τη διατήρηση των αποθεμάτων στη διάρκεια της ξηρασίας μπορεί, επομένως, να εντείνει την υποβάθμιση της φυτοκάλυψης. Η ταχύτητα του ανέμου κοντά στο έδαφος αυξάνεται σημαντικά όταν η βλάστηση έχει αφαιρεθεί. Κατά συνέπεια, με τη διάβρωση του εδάφους, μπορεί να ακολουθήσει περαιτέρω υποβάθμιση, η οποία επιδεινώνεται από τη δράση του ανέμου ή τη διακύμανση μεταξύ περιόδων έντονης ξηρασίας ή έντονων βροχοπτώσεων στο γυμνό έδαφος. Η αυτοδύναμη διαχείριση της ξηρασίας είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την έννοια της οικονομικής και περιβαλλοντικής βιωσιμότητας. Τα λιβάδια και τα βοσκοτόπια θα πρέπει να διαχειρίζονται έτσι ώστε η υποβάθμιση του εδάφους και της βλάστησης να ελαχιστοποιείται. Αυτό απαιτεί την επιλογή ενός κατάλληλου μακροπρόθεσμου συντελεστή πυκνότητας και της στρατηγικής για τη βόσκηση, τη διαχείριση και τη μείωση των αποθεμάτων στις αρχές της ξηρασίας (Morley & Daniel 1992), και, ενδεχομένως, τη φύτευση αειθαλών ειδών. Οι μη επιτυχείς καλλιέργειες μπορούν να χρησιμοποιούνται για βοσκή, για συλλογή του σπόρου ή για ζωοτροφή.

15.5. Αγρομετεωρολογική διαχείριση διακινδύνευσης (ή ρίσκου)

15.5.1. Πλαίσιο διαχείρισης διακινδύνευσης (ή ρίσκου)

Εδώ παρουσιάζεται το πλαίσιο των συνιστωσών διαχείρισης ρίσκου, στο οποίο περιλαμβάνεται η εξέταση των περιβαλλοντικών κινδύνων που έχουν επίπτωση στη γεωργία, τα οποία έχουν παρουσιαστεί και αναλυθεί στο Κεφάλαιο 14 (Σχήμα 15.3). Αρχικά, εξετάζεται ο προσδιορισμός του ρίσκου, που συνίσταται στην ανάπτυξη

βάσης δεδομένων, στην ποσοτικοποίηση του ρίσκου, στα συστήματα παρακολούθησης και έγκαιρων προειδοποιήσεων, στη στατιστική συμπερασματολογία, καθώς και στις επιπτώσεις λόγω κλιματικής μεταβλητότητας και αλλαγής. Στη συνέχεια, εξετάζεται η συνιστώσα της εκτίμησης ρίσκου, που περιλαμβάνει την πιθανότητα ρίσκου, καθώς και τις σχέσεις μεγέθους-διάρκειας-συχνότητας και έκτασης ρίσκου. Η εκτίμηση ρίσκου περιλαμβάνει επίσης την αξιολόγηση της ευπάθειας και της αβεβαιότητας. Αυτά τα δύο στοιχεία συμβάλλουν στο επόμενο στοιχείο, το οποίο αφορά την ποσοτική εκτίμηση ρίσκου (Quantitative Risk Assessment/QRA). Στην ουσία, ο συνδυασμός όλων των ειδικών ρίσκων, που συνοψίζεται στο συνολικό ρίσκο, για όλες τις εντάσεις και περιόδους επαναφοράς, οδηγεί στο QRA. Η επόμενη συνιστώσα αναφέρεται στην αξιολόγηση επικινδυνότητας και την προσαρμογή στις μελλοντικές αλλαγές και περιλαμβάνει την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων (ΕΠΕ), τη στρατηγική εκτίμηση επιπτώσεων (ΣΕΕ), τα συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης, την ανάλυση κόστους-οφέλους των επιλογών προσαρμογής, για την ανάπτυξη των μέτρων αντιμετώπισης και τα σχέδια ετοιμότητας. Όλες οι επιλογές διαχείρισης ρίσκου και οι αλλαγές μπορούν, ενδεχομένως, να ενσωματωθούν σε ένα σύστημα υποστήριξης αποφάσεων (Decision Support System/DSS). Τέλος, το τελευταίο στοιχείο αναφέρεται στη διακυβέρνηση του ρίσκου, η οποία αφορά την ανάδραση σχετικά με την αποτελεσματικότητα των μέτρων μείωσης του ρίσκου και την πολιτική διάχυσης αποτελεσμάτων. Στο Σχήμα 15.3 παρουσιάζεται ένα αναλυτικό διάγραμμα ροής της μεθοδολογικής διαδικασίας ανάλυσης του ρίσκου. Ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή των συνιστωσών:

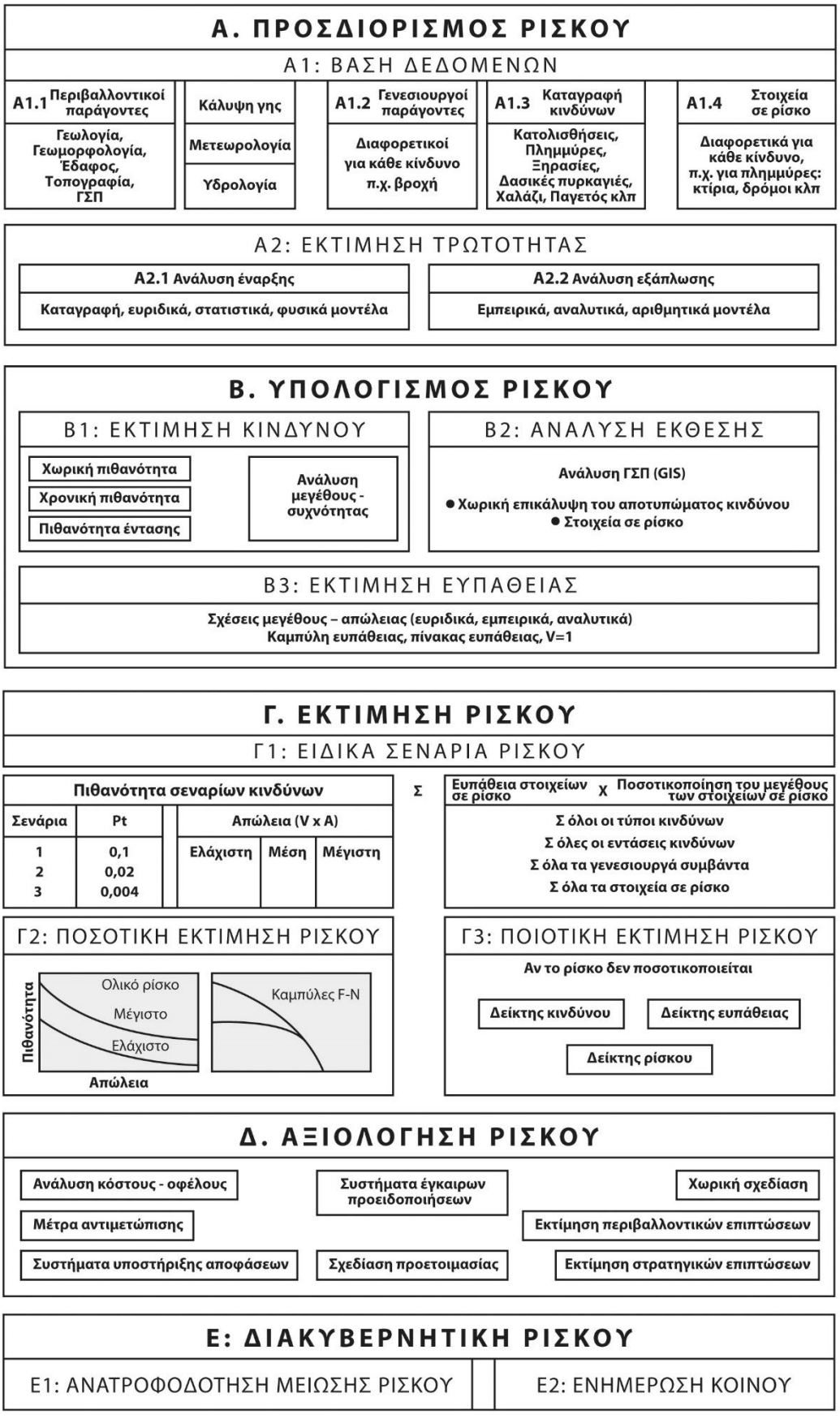
15.5.1.1. Προσδιορισμός ρίσκου

Η αναγνώριση του ρίσκου περιβαλλοντικών κινδύνων, που ενδέχεται να οδηγήσει σε καταστροφές ή ζημιές στη γεωργία, περιλαμβάνει ποσοτικοποίηση, παρακολούθηση συμβάντων, συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης, στατιστική συμπερασματολογία και την ανάπτυξη βάσεων δεδομένων.

- **Ανάπτυξη βάσεων δεδομένων:** Μια βάση δεδομένων περιλαμβάνει τα δεδομένα της ανάλυσης κινδύνων με βάση τις ιστορικές καταγραφές περιβαλλοντικών κινδύνων και άλλων στοιχείων των περιοχών μελέτης. Αρχικά, συλλέγονται ψηφιακές πληροφορίες για περιβαλλοντικούς τομείς, όπως γεωλογία, γεωμορφολογία, έδαφος, τοπογραφία, γεωπονία, χρήσεις και κάλυψη γης ΓΣΠ και άλλα συναφή, που χρησιμοποιούνται στην αξιολόγηση της ευαισθησίας. Η απογραφή κινδύνων χρησιμοποιείται στην εκτίμηση τρωτότητας και επικινδυνότητας. Τέλος, τα στοιχεία που είναι σε ρίσκο μπορεί να προσδιοριστούν και να καταγραφούν, με σκοπό να χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση της έκθεσης σε ρίσκο και την αξιολόγηση της ευπάθειας.
- **Ποσοτικοποίηση ρίσκου:** Γίνεται με μοντελοποίηση για κάθε περιβαλλοντικό κίνδυνο ξεχωριστά, όπως έχει παρουσιαστεί σε προηγούμενα Κεφάλαια.
- **Εκτίμηση τρωτότητας:** Περιλαμβάνει αναλύσεις έναρξης και διάχυσης, τα οποία χρησιμοποιούνται κατά την εκτίμηση των κινδύνων, ξεχωριστά για τον καθένα, καθώς και για την αξιολόγηση της επικινδυνότητας. Η ανάλυση έναρξης περιλαμβάνει απογραφή των κινδύνων, καθώς και ευριστική, στατιστική ή και φυσική μοντελοποίηση της επικινδυνότητας, με βάση περιβαλλοντικούς παράγοντες και παράγοντες ενεργοποίησης. Η ανάλυση διάχυσης περιλαμβάνει εμπειρικά, αναλυτικά ή/και αριθμητικά μοντέλα κινδύνων.

15.5.1.2. Υπολογισμός ρίσκου και εκτίμηση ευπάθειας.

Στόχος είναι να αναπτυχθεί μια μέθοδος πιθανολογικής εκτίμησης κινδύνου σε περιφερειακή και τοπική κλίμακα. Η εκτίμηση των κατανομών πιθανότητας, μαζί με την ποσοτικοποίηση και την ανάλυση των στοιχείων που εκτίθενται σε κίνδυνο, αποτελεί τη βάση του υπολογισμού του ρίσκου. Επιπλέον, εξετάζονται οι σχέσεις μεγέθους-διάρκειας-συχνότητας και περιοχικής έκτασης κινδύνων (Dalezios & Eslamian, 2015). Συνοπτικά:



Σχήμα 15.3. *Πλαίσιο διαχείρισης ρίσκου.*

- **Υπολογισμός ρίσκου για την εκτίμηση κινδύνου:** Περιλαμβάνει το ρίσκο καταστροφικών γεγονότων, δηλαδή την πιθανότητα ενός τέτοιου γεγονότος, όπως επίσης τις σχέσεις μεγέθους-διάρκειας-συχνότητας και έκτασης των κινδύνων, με τις σχετικές δαπάνες, που συνεπάγονται, ενδεχομένως, χρήση τεχνικών και δεδομένων τηλεπισκόπησης, κυρίως για τα χωρικά χαρακτηριστικά των κινδύνων. Ειδικότερα, υπολογίζονται χωρικές και χρονικές πιθανότητες, καθώς και πιθανότητα μεγέθους ή έντασης, που οδηγούν σε εκτίμηση κινδύνων για διάφορες περιόδους επαναφοράς των καταστροφικών γεγονότων. Οι αλλαγές στις συνθήκες περιβάλλοντος αντικατοπτρίζονται στις μεταβολές των προτύπων χρήσης γης και αποτελούν εισαγόμενο στοιχείο στα μοντέλα που χρησιμοποιούνται στην εκτίμηση κινδύνων, με αποτέλεσμα μια σειρά από πιθανά σενάρια κινδύνου, με τις αντίστοιχες πιθανότητες και ενδείξεις μεγέθους, συχνότητας και χωρικής έκτασης. Αυτό συμβάλλει στην ανάλυση της έκθεσης σε ρίσκο.
- **Ανάλυση της έκθεσης σε ρίσκο:** Πρόκειται ουσιαστικά για μια ανάλυση ΓΣΠ, που και περιλαμβάνει χωρική επικάλυψη των αποτυπωμάτων κινδύνου για όσα στοιχεία είναι σε ρίσκο. Τα στοιχεία αυτά εξετάζονται ως προς το είδος, τη χρονική μεταβολή και την ποσοτικοποίηση, δηλαδή το μέγεθος και την οικονομική αξία. Αυτό συμβάλλει στην εκτίμηση του ρίσκου και, ειδικότερα, στην ποσοτικοποίηση του μεγέθους των στοιχείων σε ρίσκο.
- **Εκτίμηση ευπάθειας:** Η απογραφή εκτεθειμένων στοιχείων σε ρίσκο και ο χαρακτηρισμός τους εξετάζονται σε σχέση με τη δυνατότητα χρησιμοποίησής τους στην εκτίμηση της ευπάθειας. Η ευπάθεια στις πλημμύρες είναι γενικά κατανοητή και πρέπει να αξιολογείται. Εξετάζεται επίσης η ανάλυση της αβεβαιότητας της ευπάθειας, η οποία αυξάνεται όταν αξιολογούνται οι μελλοντικές αλλαγές στα εκτεθειμένα στοιχεία σε ρίσκο στη βάση διαφόρων σεναρίων χρήσεων γης. Πράγματι, υπάρχουν διάφοροι παράγοντες, που συμβάλλουν σε μελλοντικά σενάρια κλιματικής αλλαγής, αλλά επίσης και σε μελλοντικές οικονομικές εξελίξεις και στην εφαρμογή πολιτικών για χωροταξικό σχεδιασμό. Η αβεβαιότητα όσον αφορά στις προσεγγίσεις ευπάθειας συνήθως αξιολογείται με βάση την ιστορική καταγραφή ζημιών, τα αποτελέσματα των μοντέλων και τις εκτιμήσεις ειδικών. Τέλος, εξετάζονται δείκτες αξιολόγησης της ευπάθειας που περιλαμβάνουν τα επίπεδα αβεβαιότητας και εντάσσονται σε ένα δυναμικό πλαίσιο.

15.5.1.3. Ποσοτική εκτίμηση ρίσκου

Στόχος είναι η ολοκλήρωση των τεχνικών για την πιθανολογική εκτίμηση κινδύνου, η οποία ενσωματώνει την αβεβαιότητα, που οφείλεται σε μελλοντικές περιβαλλοντικές αλλαγές, με τα αποτελέσματα των αναλύσεων της έκθεσης σε ρίσκο και της ευπάθειας, σε μια πλατφόρμα για την ποσοτική εκτίμηση ρίσκου. Πράγματι, ο συνδυασμός όλων των ειδικών ρίσκων οδηγεί στο συνολικό ρίσκο, για όλες τις εντάσεις και περιόδους επαναφοράς, για όλα τα γενεσιουργά γεγονότα και τα στοιχεία που είναι σε ρίσκο. Συνοπτικά:

- **Ανάλυση ρίσκου:** Περιλαμβάνει ειδικά σενάρια ρίσκου, τα οποία αποτελούνται από συνδυασμό πιθανολογικών σεναρίων κινδύνου με σενάρια στοιχείων σε ρίσκο, με την αντίστοιχη ευπάθειά τους. Ένα πιθανολογικό σενάριο φαίνεται πιο εφικτό, εφόσον μεγάλες αβεβαιότητες περιλαμβάνονται σε προγνώσεις αλλαγών που είναι σε ρίσκο. Εκτίμηση κινδύνου σε διαφορετικές κλίμακες φαίνεται ευέλικτη με τη χρήση διαφόρων στατιστικών ή φυσικής βάσης μοντέλων. Στην ουσία, η εκτίμηση κινδύνου περιλαμβάνει τη χρονική πιθανότητα όσον αφορά τη διάρκεια και το χρόνο έναρξης, την ένταση κινδύνου και τη χωρική έκταση μέσω της ανάλυσης έκθεσης σε ρίσκο. Δεδομένα και μέθοδοι τηλεπισκόπησης μπορούν επίσης να συμβάλουν στην οριοθέτηση των χωρικών χαρακτηριστικών των παραμέτρων και συνιστούν μια καινοτόμο προσέγγιση. Η ευπάθεια αναφέρεται στο βαθμό απώλειας για κάθε τύπο στοιχείων σε ρίσκο, που σχετίζονται με την ένταση κινδύνου. Η έκθεση σε ρίσκο χαρακτηρίζει τη χωρική κάλυψη της καταστροφής καθώς και κάθε στοιχείου που είναι σε ρίσκο. Έμφαση δίνεται στην απόδοση των μοντέλων σε σχέση με τα απαιτούμενα δεδομένα και την αποτελεσματικότητά τους, για την εκτίμηση ρίσκου σε διαφορετικές κλίμακες. Όλα αυτά συμβάλλουν στην ποσοτική εκτίμηση ρίσκου.
- **Ποσοτική εκτίμηση ρίσκου:** Ο συνδυασμός των σεναρίων κινδύνου με τα σενάρια ευπάθειας και την ποσοτικοποίηση των στοιχείων σε ρίσκο αναπτύσσει την ποσοτική εκτίμηση ρίσκου. Ειδικότερα, ο συνδυασμός όλων των ειδικών ρίσκων οδηγεί στο συνολικό ρίσκο, όπως έχει ήδη αναφερθεί, που αποτελεί την ποσοτική εκτίμηση ρίσκου. Αν το ρίσκο δεν μπορεί να ποσοτικοποιηθεί, τότε

χρησιμοποιείται η ποιοτική εκτίμηση ρίσκου, που περιλαμβάνει δείκτες. Η ανάλυση αυτή συμβάλλει στην αξιολόγηση ρίσκου.

15.5.1.4. Αξιολόγηση ρίσκου και προσαρμογή στις μελλοντικές αλλαγές

Σκοπός είναι η ανάλυση όλων των επιλογών διαχείρισης ρίσκου και των βέλτιστων εργαλείων, με βάση τα αποτελέσματα προηγούμενων σεναρίων ρίσκου, προκειμένου να επιτευχθεί, τελικά, η μείωση του ρίσκου. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω τεχνικών αξιολόγησης ρίσκου. Συνοπτικά:

- **Αξιολόγηση ρίσκου:** Αναφέρεται στην απώλεια που συνδέεται με κάθε γεγονός και περιλαμβάνει εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων και στρατηγική εκτίμηση επιπτώσεων, χωροταξικό σχεδιασμό, ανάλυση κόστους-οφέλους των επιλογών προσαρμογής για την ανάπτυξη των μέτρων αντιμετώπισης, έγκαιρες προειδοποιήσεις και σχέδια ετοιμότητας έκτακτης ανάγκης. Αυτό μπορεί να συνδυαστεί στη συνέχεια με δείκτες των επιπτώσεων κλιματικής αλλαγής και ευπάθειας σε διάφορες κλίμακες, συμπεριλαμβανομένης της μεθοδολογίας για τη σχέση κόστους-οφέλους και εκτίμηση της αβεβαιότητας των μέτρων προσαρμογής. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρική πολυκριτηριακή αξιολόγηση, που συνδυάζει ετερογενή δεδομένα διαφορετικών παραγόντων και περιορισμών, τα οποία περιέχουν πληροφορίες ρίσκου και κινδύνων για χωρική σχεδίαση. Όλα αυτά αναμένεται να οδηγήσουν σε μείωση του ρίσκου. Οι συγκεκριμένες προσεγγίσεις μπορούν στη συνέχεια να ενταχθούν σε ένα DSS, για τη διαχείριση ρίσκου.
- **Ανάπτυξη Decision Support System (DSS):** Όλες οι επιλογές διαχείρισης ρίσκου χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση των απαιτούμενων αλλαγών στις προσεγγίσεις διαχείρισης ρίσκου και μπορεί να ενσωματωθούν σε ένα πολλαπλής κλίμακας και διαδραστικό DSS. Για την ανάπτυξη του DSS, υπάρχουν ορισμένα στάδια που ακολουθούνται συνήθως, ξεκινώντας από τη φάση νοημοσύνης, που περιλαμβάνει την ανάλυση του προβλήματος, τη φάση του σχεδιασμού και τη φάση απόφασης. Ειδικότερα, η φάση απόφασης συνίσταται από διάφορες μεθόδους, που περιλαμβάνουν οικονομικές τεχνικές, όπως η ανάλυση κόστους-οφέλους, οι φυσικές προσεγγίσεις σχεδιασμού, η εκτίμηση κοινωνικών επιπτώσεων, η εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων και η πολυκριτηριακή αξιολόγηση (Multi-Criteria Evaluation/MCE). Πράγματι, η MCE αποτελείται από ορισμένα βήματα, όπως η διαμόρφωση στόχων και η ανάπτυξη της διαδικασίας για την αξιολόγηση της ευπάθειας, με χρήση δεικτών για την κοινωνική και φυσική ευπάθεια.

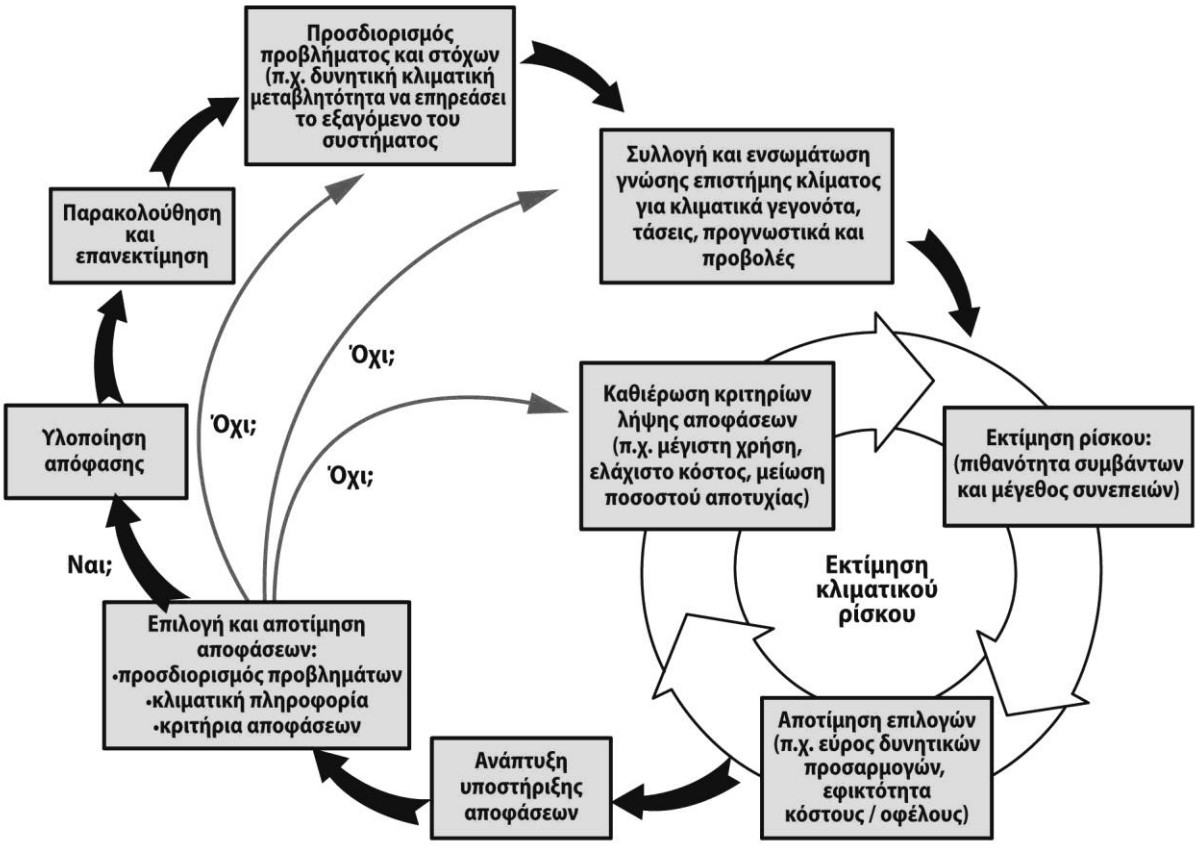
15.5.1.5. Διακυβέρνηση ρίσκου

Η διακυβέρνηση του ρίσκου είναι η ενσωμάτωση όλων των κανόνων, διαδικασιών και μηχανισμών που εφαρμόζονται και γνωστοποιούνται εντός του πλαισίου διαχείρισης ρίσκου για τη μείωση του ρίσκου. Είναι κατανοητό ότι υπάρχει ανάγκη για ανατροφοδότηση από όλες τις εφαρμογές εκτίμησης ρίσκου. Αυτό θα μπορούσε να δικαιολογήσει το επίπεδο της ευαισθητοποίησης του κοινού και την ανταπόκριση από το κράτος. Μπορεί επίσης να εξεταστεί μια πιο ολοκληρωμένη θεώρηση της διαχείρισης ρίσκου από τα ιδρύματα, λόγω της κλιματικής αλλαγής. Συνοπτικά:

- **Μείωση του ρίσκου:** Η αποτελεσματικότητα των μέτρων μείωσης του ρίσκου βασίζεται στην επιτυχημένη διακυβέρνηση του ρίσκου. Είναι απαραίτητο να εξεταστεί τόσο η ποσοτική εκτίμηση ρίσκου, όσο και η σχετική εννοιολογική αντίληψη του ρίσκου. Για την επίτευξη των παραπάνω, οι μέθοδοι εκτίμησης κινδύνου και ρίσκου που αναλύθηκαν προηγουμένως είναι σκόπιμο να παρουσιαστούν στους ενδιαφερόμενους φορείς και στους τελικούς χρήστες, ώστε να επιτευχθεί συμφωνία για τα μέτρα μείωσης του ρίσκου.
- **Διάχυση αποτελεσμάτων και ευαισθητοποίηση του κοινού:** Η αποτελεσματικότητα των στρατηγικών επικοινωνίας ρίσκου πρέπει να αναλυθεί και τα κατάλληλα μέσα πληροφόρησης και κατάρτισης μπορούν να αναπτυχθούν για τα διάφορα ενδιαφερόμενα μέρη. Εργαλεία και δραστηριότητες μετάδοσης μπορεί να χρησιμοποιηθούν για τη βελτίωση του επιπέδου της δημόσιας ευαισθητοποίησης και την έκταση των πληροφοριών που διαχέονται.

15.5.2. Διαχείριση αγρομετεωρολογικού κινδύνου

Ο καιρός και η κλιματική μεταβλητότητα μπορούν να προκύψουν από τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των διαφόρων συνιστωσών του κλιματικού συστήματος, που περιλαμβάνει ατμόσφαιρα, ωκεανούς, βιόσφαιρα, στρώμα πάγου, επιφάνειας της Γης και ανθρώπινη δράση. Στην αρχή της σύμβασης για την κλιματική αλλαγή (United Nations Framework Convention on Climate Change/UNFCCC) των Ηνωμένων Εθνών, ορίζεται η κλιματική αλλαγή ως «μια αλλαγή του κλίματος, η οποία αποδίδεται άμεσα ή έμμεσα σε ανθρώπινη δραστηριότητα που μεταβάλλει τη σύνθεση της ατμόσφαιρας του πλανήτη και προστίθεται στις φυσικές κλιματικές διακυμάνσεις κατά τις αντίστοιχες περιόδους του χρόνου». Η UNFCCC κάνει έτσι μια διάκριση μεταξύ κλιματικής αλλαγής, η οποία οφείλεται σε ανθρώπινες δραστηριότητες που αλλοιώνουν τη σύνθεση της ατμόσφαιρας και κλιματική μεταβλητότητα, η οποία αποδίδεται σε φυσικά αίτια. Κλιματικές καταστροφές μπορούν να χωριστούν σε ακραία φαινόμενα και σε περιφερειακές κλιματικές ανωμαλίες. Η παγκόσμια κλιματική αλλαγή μπορεί να παράγει έναν μεγαλύτερο αριθμό εμφάνισης κλιματικών καταστροφών. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι μια γραμμική αύξηση του μέσου όρου μιας κλιματικής μεταβλητής συνεπάγεται μια μη γραμμική αύξηση της πιθανότητας εμφάνισης ακραίων τιμών των εν λόγω μεταβλητών. Επίσης, η αύξηση της μεταβλητότητας σημαίνει μια αυξητική μεταβολή της πιθανότητας εμφάνισης ακραίων τιμών (Cunha, 2003). Στο Σχήμα 15.4 απεικονίζονται το πλαίσιο και οι συνιστώσες διαχείρισης κλιματικού ρίσκου.



Σχήμα 15.4. *Πλαίσιο και συνιστώσες διαχείρισης κλιματικού ρίσκου.*

Στη μελέτη του WMO (2003) «Agrometeorology Related to Extreme Events» (Αγρομετεωρολογία σχετιζόμενη με ακραία γεγονότα) επισημαίνεται ότι «αν και δεν μπορούν να αποφευχθούν οι φυσικές καταστροφές, οι καταστροφικές επιπτώσεις τους, όσον αφορά την απώλεια ανθρώπων και ζώων, που σχετίζονται με την οικολογική ισορροπία, θα μπορούσαν σίγουρα να ελαχιστοποιηθούν σημαντικά. Ο σχεδιασμός και η διαχείριση για την πρόληψη και το μετριασμό των ακραίων γεγονότων είναι θέματα ζωτικής σημασίας για την ασφάλεια και την ευημερία των εκατομμυρίων ανθρώπων που κατοικούν σε πληγείσες περιοχές. Εκτός από την τοπική και εθνική δράση, η διεθνής και περιφερειακή συνεργασία θα πρέπει να προωθηθεί, για ενισχυμένη πρόληψη

και μετριασμό των επιπτώσεων». Μελέτες σε μικρή και μεγάλη κλίμακα έχουν δείξει ανωμαλίες για απομονωμένα στοιχεία του κλίματος (Chiang & Sobel, 2002). Για το μεγαλύτερο κομμάτι της επιφάνειας της Γης δεν υπάρχουν, ωστόσο, δεδομένα. Επιπλέον, οι βάσεις δεδομένων είναι απαραίτητες για αναλύσεις, υπολογισμό τάσεων και προσδιορισμό των ανωμαλιών στο παγκόσμιο και περιφερειακό κλίμα. Τα κλιματικά δεδομένα είναι απαραίτητα για το σχεδιασμό και τη μείωση των κινδύνων που συνδέονται με ανωμαλίες του κλίματος. Η εκτίμηση και η πρόγνωση των βραχυπρόθεσμων επιπτώσεων της κλιματικής μεταβλητότητας και των κινδύνων από τις καιρικές συνθήκες, καθώς και η σχέση τους με τα ακραία καιρικά φαινόμενα, θα μπορούσαν να συμβάλουν στον μετριασμό των επιπτώσεων της κλιματικής μεταβλητότητας και να διευκολύνουν τον προγραμματισμό γεωργικών δραστηριοτήτων.
Οι επιπτώσεις από τις φυσικές καταστροφές στη γεωργία, τη δασοκομία και τους βοσκότοπους μπορεί να είναι θετικές ή αρνητικές. Ενώ οι επιπτώσεις είναι κυρίως αρνητικές και επηρεάζουν σημαντικά την ανθρώπινη κοινωνία, υπάρχουν και ορισμένες θετικές επιπτώσεις ή οφέλη, που πρέπει να τονιστούν σε οποιαδήποτε συζήτηση των επιπτώσεων των φυσικών καταστροφών. Οι θετικές επιπτώσεις των φυσικών καταστροφών περιλαμβάνουν την αυξημένη βροχόπτωση σε περιοχές της ενδοχώρας από τροπικούς κυκλώνες κατά μήκος των παράκτιων περιοχών (Ryan, 1993), τη σταθεροποίηση του ατμοσφαιρικού αζώτου από καταιγίδες, τη βλαστική ικανότητα πολλών ιθαγενών φυτικών ειδών, ως αποτέλεσμα πυρκαγιών, καθώς και τη διατήρηση της γονιμότητας των εδαφών λόγω πλημμυρών (Blong, 2002). Η εισροή κεφαλαίων στις δραστηριότητες για την ανακούφιση από τις καταστροφές μπορεί επίσης μερικές φορές να είναι θετική για τις τοπικές κοινότητες. Οι αρνητικές επιπτώσεις θα συζητηθούν λεπτομερώς στο παρόν κεφάλαιο.

15.5.2.1. Η διαχείριση του κινδύνου

Οι παραγωγοί αναγνωρίζουν τη διαχείριση των κινδύνων ως μια σημαντική δραστηριότητα στη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Αυτό επιτρέπει τη διαχείριση των επιχειρήσεων πιο αποτελεσματικά σε ένα φυσικό περιβάλλον, όπου η ξηρασία ή άλλα ακραία φαινόμενα είναι συνηθισμένα περιστατικά, αν και απρόβλεπτα. Η διαχείριση του κινδύνου αναγνωρίζει ότι οι παραγωγοί λειτουργούν επίσης σε ένα οικονομικό περιβάλλον ημιμάθειας. Υπάρχουν τρεις τύποι κινδύνων στη γεωργία: ο κίνδυνος παραγωγής, ο χρηματοοικονομικός κίνδυνος και ο εμπορικός κίνδυνος. Ο κίνδυνος παραγωγής επιβάλλεται κυρίως από τις εποχικές διακυμάνσεις. Μπορεί να μειωθεί με την αποφυγή υπερβολικά υψηλής πυκνότητας εκτροφής, την ανάπτυξη στρατηγικών για τη μείωση των αποθεμάτων σε περίπτωση ασυνήθιστα ξηρών συνθηκών, τη σπορά φυτών ανθεκτικών στην ξηρασία, επιλέγοντας κοπάδι και αγέλη και ημερομηνίες τοκετού, που σχετίζονται καλύτερα με τις διατροφικές ανάγκες του ζωικού κεφαλαίου και με τη διαθέσιμη προσφορά ζωοτροφών, παρέχοντας καταφύγιο για ζώα, τη διατήρηση των ζωοτροφών ή την καλλιέργεια κτηνοτροφικών φυτών, την εγκατάσταση άρδευσης και τη διαφοροποίηση των επιχειρήσεων.
Στρατηγικές λιγότερο επικίνδυνες, από την άποψη της παραγωγής, μπορεί να είναι πολύ πιο επιρρεπείς σε χρηματοοικονομικό κίνδυνο. Για παράδειγμα, χαμηλά ποσοστά φόρτωσης μπορεί να μην παρέχουν επαρκή έσοδα, που θα προκύψουν στις καλές εποχές και θα επιτρέψουν στον αγρότη να επιβιώσει και στις φτωχές εποχές (White, 1987). Η αποθήκευση ανάλογα με την εποχή μπορεί να έχει αποτέλεσμα την αγορά μετοχών σε υψηλές τιμές και την πώληση σε χαμηλές τιμές. Ημερομηνίες τοκετού ή τοκετού που ευνοούν την παραγωγή δεν μπορεί να ευνοούν την εμπορία. Ζωοτροφές μπορεί να διατηρηθούν στο αγρόκτημα, για τη στήριξη υψηλής πυκνότητας εκτροφής, αλλά, με το επιπλέον απόθεμα, είναι διαθέσιμο λιγότερο πλεόνασμα, για να διατηρηθεί. Τα αρδευτικά συστήματα συχνά είναι ασύμφορα, ακόμα και αν μειώνουν τον κίνδυνο της παραγωγής. Η διαφοροποίηση στο μαλλί ή την παραγωγή βόειου κρέατος, για παράδειγμα, σε καλλιέργειες ή εξειδικευμένες επιχειρήσεις ζώων, όπως ελαφιών, μπορεί να απαιτήσει σημαντικές επενδύσεις κεφαλαίου, να εγκυμονεί χρηματοοικονομικούς κινδύνους που οι αγρότες δεν μπορούν να καλύψουν από μόνοι τους.
Οι προβλέψεις του κλίματος μπορεί να χρησιμοποιηθούν για τη μείωση του κινδύνου. Για παράδειγμα, οι αγρότες που σχεδιάζουν να προετοιμάσουν τη γη για σπορά χειμερινών καλλιεργειών δεν θα μπορούσαν να το πράξουν αν είχαν αρνητικές καιρικές προγνώσεις για το φθινόπωρο. Ένας αγρότης σε απελπιστική ανάγκη μετρητών θα μπορούσε, για να ανταποκριθεί στις οικονομικές δεσμεύσεις του, να σπείρει μια καλλιέργεια, ούτως ή άλλως, όμως με την ελπίδα ότι η πρόγνωση θα ήταν εσφαλμένη. Ένας αγρότης θα μπορούσε να αποφασίσει να ταΐσει μια αποτυχημένη καλλιέργεια στα ζώα την άνοιξη, με βάση μια δυσμενή πρόγνωση.

15.5.2.2. Μακροπρόθεσμα καιρικά δεδομένα για συγκεκριμένους κινδύνους

Για να εντοπιστεί η εμφάνιση ενός συγκεκριμένου κινδύνου, όπως η υδατική καταπόνηση, η θερμική καταπόνηση, συμπεριλαμβανομένων παγετών, πλημμύρων και τον κίνδυνο ανεξέλεγκτων πυρκαγιών, είναι

απαραίτητο να αναλυθούν μακροχρόνια μετεωρολογικά δεδομένα. Ο FAO (2005) ανέπτυξε εφαρμογές και μοντέλα για τον υπολογισμό της πιθανότητας παγετού και τον κίνδυνο ζημίας (Haan, 1979). Το πρόγραμμα εφαρμογής MS Excel Damage Estimator application program (DEST.xls) χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των αναμενόμενων ζημιών λόγω παγετού και της απόδοσης των καλλιεργειών. Δεδομένα έως και 50 χρόνων μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση. Κρίσιμες θερμοκρασίες που σχετίζονται με το 90% και το 10% της ζημιάς είναι διαθέσιμες στην εφαρμογή και αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες φαινολογικές ημερομηνίες.

15.5.2.3. Ετοιμότητα σε περίπτωση καταστροφών με βάση την πρόγνωση καιρού

Ένα από τα πιο αποτελεσματικά μέτρα στην περίπτωση καταστροφών αποτελεί μια καλή λειτουργία του συστήματος έγκαιρης προειδοποίησης, το οποίο παρέχει ακριβείς πληροφορίες αξιόπιστα και έγκαιρα. Ως εκ τούτου, θα πρέπει να βασίζεται σε:

- προχωρημένες, ακριβείς, λεπτομερείς και κατανοητές προγνώσεις των επικίνδυνων συνθηκών,
- γρήγορο, ανεξάρτητο σύστημα διανομής των προγνώσεων, των ενημερώσεων και των προειδοποιήσεων σε όλα τα ενδιαφερόμενα μέρη και
- άμεση και αποτελεσματική απάντηση στις προειδοποιήσεις σε εθνικό και τοπικό επίπεδο.

Προγράμματα του WMO που σχετίζονται με την παρακολούθηση της ατμόσφαιρας, των ωκεανών και των ποταμών παρέχουν την κρίσιμη χρονική αλληλουχία των πληροφοριών που στηρίζει τις προγνώσεις και τις προειδοποιήσεις των υδρομετεωρολογικών κινδύνων. Το παγκόσμιο δίκτυο του WMO με τα ειδικά περιφερειακά Μετεωρολογικά Κέντρα (Regional Specialized Meteorological Centres/RSMC) και τα Παγκόσμια Κέντρα Δεδομένων (World data center system WDCS) παρέχει κρίσιμα στοιχεία, αναλύσεις και προγνώσεις, που επιτρέπουν στις Εθνικές Μετεωρολογικές και Υδρολογικές Υπηρεσίες (NMHS) να παρέχουν συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης και κατευθυντήριες γραμμές για διάφορους φυσικούς κινδύνους, όπως ανεμοστρόβιλοι, χειμερινές καταιγίδες, τροπικοί κυκλώνες, κύματα ψύχους και κύματα καύσωνα, πλημμύρες και ξηρασίες.

Δεν υπάρχει καμία αμφιβολία ότι πολύ περισσότερα θα μπορούσαν να επιτευχθούν με τη χρήση πόρων, για την περαιτέρω ενίσχυση των συστημάτων έγκαιρης προειδοποίησης. Η πρόκληση είναι να εξασφαλιστεί ότι όλες οι χώρες, ιδίως οι λιγότερο αναπτυγμένες, διαθέτουν τα συστήματα, τις υποδομές, το ανθρώπινο δυναμικό και τις οργανωτικές δομές για την ανάπτυξη και την αξιοποίηση των συστημάτων έγκαιρης προειδοποίησης, με στόχο τη μείωση των κινδύνων από φυσικές καταστροφές.

Βιβλιογραφικές αναφορές

Blong, R. (2002). Estimating residential flood damage. In *Residential Flood Insurance: The Implications for Floodplain Management Policy* (D.I. Smith & J. Handmer, eds.). Canberra, Water Research Foundation.

Boken, V.K, Cracknell, A.P. and Heathcote, R.L. (eds.) (2005). *Monitoring and Predicting Agricultural Drought: A Global Study*. New York, Oxford University Press.

Buizer, J.L., Foster, J. and Lund, D. (2000). Global impacts and regional actions: preparing for the 1997–98 El Niρo. *Bulletin Of American Meteorology Society*, 81:2121-2139.

Challinor, A.J., Slingo, J.M. Wheeler, T.R. and Doblas-Reyes, F.J. (2005). Probabilistic simulations of crop yield over western India using the DEMETER seasonal hindcast ensembles. *Tellus A*, 57:498-512.

Chiang, J.C.H. & Sobel, A.H. (2002). Tropical troposphere temperature variations caused by ENSO and their influence on the remote tropical climate. *Journal of Climate*, 15:2616-2631.

Cunha, R.G. (2003). *Meteorologia: Fatos e Mitos*. Passo Fundo, Embrapa.

Dalezios, N.R. & Eslamian, S. (2015). Regional Design Storm of Greece within the Flood Risk Management Framework. *International Journal of Hydrology Science and Technology* (in press).

Dyras, I., Dobesch, H. Grueter, E. Perdigao, A. Tveito, O.E. Thornes, J.E. van der Wel F. and Bottai, L. (2005). The use of Geographic Information Systems in climatology and meteorology: COST 719. *Meteorology Application*. 12:1-5.

FAO (2005). *Frost Protection: Fundamentals, Practice and Economics* (R.L. Snyder & J.P. de Melo-Abreu). Vols. I & II. Rome.

Ferreyra, R., Podesta, G. Messina, C. Letson, D. Dardanelli, J. Guevara E. and Meira, S. (2001). A linked-modeling framework to estimate maize production risk associated with ENSO-related climate variability in Argentina. *Agricultural and Forest Meteorology*, 107:177-192.

Fontana, D.C. & Camargo, M.B.P. (2002). Agrometeorological models for monitoring and predicting crop yield in Brazil. In *Proceedings of International Workshop on Crop Monitoring and Yield Forecasting: Tools for Food Early Warning*, Cordoba, Argentina, 26-28 November 2002 (A. Ravelo, A. Panchuelo, O. Rojas, T. Negre and M. Cherlet, eds). CD-ROM.

Haan, C.T. (1979). Risk analysis in environmental modifications. In *Modification of the Aerial Environment of Crops* (B.J. Barfield and J.F. Gerber, eds). Monograph No. 2. St Joseph, ASAE.

Gigerenzer, G. & Hoffrage, U. (1995). How to improve Bayesian reasoning without instruction: frequency formats. *Psychological Review*, 102:684-704.

Hansen, J.W. (2002). Realizing the potential benefits of climate prediction to agriculture:
issues, approaches, challenges. *Agricultural System*, 74:309-330.

Hunter, R.D. & Meentemeyer, R.K. (2005). Climatologically aided mapping of daily precipitation and temperature. *Journal of Applied Meteorology*, 44:1501-1510.

Jones, J.W. (2003). Agricultural responses to climate variability and climate change. *Paper presented at Insights and Tools for Adaptation: Learning from Climate Variability NOAA Workshop*, Washington, DC, 18-20 November 2003 (http:// www.climateadaptation.net/docs/ papers / Jones %20draft.pdf).

Leedman, A. (2007). The Australian National Agricultural Monitoring System: A national climate risk management application. In *Management of Natural and Environmental Resources for Sustainable Agriculture* (R. Stefanski & P. Pasteris, eds.). Proceedings of the USDA/WMO Workshop on Management of Natural and Environmental Resources for Sustainable Agricultural Development, Portland, Oregon.13-16 February 2006. Published as Technical Bulletin No.WAOB-2008, NRCS-2008 and AGM-10 (WMO/TD-No.1428). Washington, DC, USDA; Geneva, WMO.

Meinke, H., Stone, R. and Hammer, G. (1996). SOI phases and climatic risk to peanut production: a case study for northern Australia. *International Journal of Climatol*ogy, 16:783-789.

Motroni A., Duce, P. Spano, D. and Canu, S. (2002). Estimation of climatic risk for agriculture in a Mediterranean region. In *Proceedings of the 15th Conference on Biometeorology and Aerobiology Joint with the 16th International Congress on Biometeorology of the International Society of Biometeorology*, Kansas City, Missouri, 28 October-1 November 2002.

Morley, F.H.W. & Daniel, G. (1992). Drought, stocking rate and soil loss. *Proc*. *Australian Society of Animal Production*, 19:323-325.

Motha, R. & Stefanski, R. (2006). United States Department of Agriculture's weather and climate information system for operational applications in agriculture. *Meteorological Applications*. 13(1):31-47.

Mukhala, E. (2005). Food and Agriculture Organization and agricultural drought. In *Monitoring and Predicting Agricultural Drought: A Global Study* (V.K. Boken, A.P. Cracknell and R.L. Heathcote, eds.). New York, Oxford University Press.

Murphy, A.H. (1998). The early history of probability forecasts: some extensions and clarifications. *Weather Forecasting*, 13:5-15.

Negre, T. (2006). EU/JRC Agrometeorological monitoring and national services: opportunities and challenges. In *Strengthening Operational Agrometeorological Services at the National Level*. Proceedings of the Inter-Regional Workshop, Manila, Philippines, 22-26 March 2004. (R. Motha, M.V.K. Sivakumar and M. Bernardi, eds). Technical Bulletin No. WAOB-2006-1 and AGM-9 (WMO/TD-No. 1277). Washington, DC, USDA; Geneva, WMO; Rome, FAO.

Nicholls, N. (1999). Cognitive illusions, heuristics, and climate prediction. *Bulletin of American Meteorology Society*, 80:1385-1397.

Phillips, J., Makaudze, E. and Unganai, L. (2001). Current and potential use of climate forecasts for resource-poor farmers in Zimbabwe. In *2001: Impacts of El Nipo and Climate Variability on Agriculture*. American Society of Agronomy Special Publication, 63:87-100.

Rathore, L.S., Parvinder, M. and Kaushik, S. (2006). *Impact Assessment of the Agro-meteorological Advisory Service of the National Centre for Medium Range Weather Forecasting (NCMRWF)* (http://www.agrometeorology.org / files-folder/ repository/ncmrwf.pdf).

Palmer, T.N., Shutts, G.J. Hagedorn, R. Doblas-Reyes, F.J. Jung, T. and Leutbecher, M. (2005). Representing model uncertainty in weather and climate prediction. *Annual Review of Earth Planetary Sciences*, 33:163-193.

Petr, J. (1991). *Weather and Yield*. Developments in Crop Science 20. Amsterdam, Elsevier.

Podesta, G.P., Letson, D. Messina, C. Royce, F. Ferreyra, R.A. Jones, J.W. Hansen, J.W. Llovet, I. Grondona M. & O'Brien, J.J. (2002). Use of ENSO-related climate information in agricultural decision making in Argentina: a pilot experience. *Agricultural Systems*, 74:371-392.

Rijks, D. & Baradas, M.W. (2000). The clients for agrometeorological information. *Agricultural and Forest Meteorol*ogy, 103:27-42.

Rosenberg, N.J., Blad, B.L. and Verma, S.B. (1983). *Microclimate: The Biological Environment*. Second edition. New York, John Wiley & Sons.

Rowland, J., Verdin, J. Adoum, A. and Senay, G. (2005). Drought monitoring techniques for famine early warning systems in Africa. In *Monitoring and Predicting Agricultural Drought: A Global Study* (V.K. Boken, A.P. Cracknell and R.L. Heathcote, eds). New York, Oxford University Press.

Rusakova, T.I., Lebedeva, V.M. Gringof, I.G. and Shklyaeva, N.M. (2006). Modern technology of stage-by-stage forecasting of crop yield and gross collection. *Meteorology and Hydrology*, 7:101-108.

Ryan, C.J. (1993). Costs and benefits of tropical cyclones, severe thunderstorms and bushfires in Australia. *Climatic Change*, 25:353-367.

Singh, S.V., Rathore, L.S. and Trivedi, H.K.N. (1999). *A Guide for Agrometeorological Advisory Services*. New Delhi, National Centre for Medium Range Weather Forecasting.

Tsiros E., Domenikiotis, C., Dalezios, N.R. (2009). Sustainable production zoning for agroclimatic classification using GIS and remote sensing, *IDOJARAS*, 113(1-2):55-68.

White, D.H., McConchie, B.J. Curnow, B.C. and Ternouth, A.H. (1980). A comparison of levels of production and profit from Merino ewes and wethers grazed at various stocking rates in northern Victoria. *Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry*, 20:296-307.

WMO (1973). *A Study of the Agroclimatology of the Highlands of Eastern Africa* (L.H. Brown & J. Cochemι). FAO/UNESCO/WMO Interagency Project on Agroclimatology. Technical Note No. 125 (WMO-No. 339), Geneva.

WMO (2003). *Agrometeorology Related to Extreme Events* (H.P. Das, T.I. Adamenko, K.A. Anaman, R.G. Gommes & G. Johnson) (WMO-No.943), Geneva.

WMO (2004a). *Experts for Collection of Case Studies of Economically Beneficial Agrometeorological Applications and Services and Other Success Stories in Agrometeorology for Policy Matters* (W. Baier). CAgM Report No. 93 (WMO/TD-No. 1202), Geneva.

WMO (2004b). Operational agrometeorological services for extension needs and the supportive role of agricultural research (V.R.K. Murthy & C.J. Stigter) In *Strengthening Operational Agrometeorological Services at the National Level. Proceedings of a Regional Meeting, Manila, Philippines* (R. Motha, M.V.K. Sivakumar and M. Bernardi, eds). AGM-9 (WMO/TD-No. 1277), Geneva.

WMO (2010). Guide to Agricultural Meteorological Practices. WMO - No134, 799.

White, D.H. (1987). Stocking rate. In *Managed Grasslands*. B. *Analytical Studies* (R.W. Snaydon, ed.). Amsterdam, Elsevier.

Ziervogel, G. (2004). Targeting seasonal climate forecasts for integration into household-level decisions: the case of smallholder farmers in Lesotho. *Geografical Journal*, 170:6-21.

Zoidze, E.K. & Ovcharenko, L.I. (2000). *Comparative Assessment of the Agricultural Potential of Russian Climate and the Degree of Utilization of its Agroclimatic Re15.1*

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

Παράρτημα 1: Ευρετήριο Ελληνικών – Αγγλικών Όρων
Παράρτημα 2: Βραχυγραφίες
Παράρτημα 3: Επιλογή ξενόγλωσσης βιβλιογραφίας στην Αγρομετεωρολογία
Παράρτημα 4: Σύμβολα-Μονάδες-Ορισμοί
Παράρτημα 5: Πίνακες Φαινολογικών μοντέλων

Παράρτημα 1: Ευρετήριο Ελληνικών – Αγγλικών Όρων

Α
αγρογεωγραφία 8,
αγροκλίμα 246,
αγροκλιματική ζωνοποίηση 17,
αγροκλιματολογία 12,
Αγρομετεωρολογία 2,
αγρομετεωρολογικά μοντέλα ασθενειών 219
αγρομετεωρολογικές υπηρεσίες 443,
αγρομετεωρολογική πρόγνωση 174
αγροοικολογία 7,
αγροτοποκλίμα 246,
αγροφαινολογία 7,
αεροβιολογία 138.
αεροπαλυνολογική μέθοδος βαθμιαίας μεταβολής του CO_2 347,
αθροιστική βροχόπτωση 360,
ακάρεα 211,
ανακλαστική ικανότητα 58,
αντικυκλώνας 49,
απόλυτη υγρασία 40,
απορροφητική ικανότητα 58,
απορροφητικότητα 57,
ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα 64
αυτοπαλινδρομούμενη διαδικασία 353,
αφετική ικανότητα 58,
Β
βιοκλιματική ταξινόμηση κλιμάτων 245,
βιοκλιματολογία 123,
βιοκλιματολογία 7,
βιολογικοί κίνδυνοι 124,
βιομετεωρολογία 122,
βιομετεωρολογία 2,
βιομετεωρολογικοί και βιοκλιματικοί δείκτες 128,
βορειοατλαντική ταλάντωση (North Atlantic Oscillation) 283,
βραχυπρόθεσμης διάρκειας προγνώσεις 174,
Γ
γεννήτριες τυχαίου καιρού (Random Weather Generators) 378,
γεωργία ακριβείας 19
γεωργική βιοκλιματική πληροφορία 123,
γεωργική ή αγρομετεωρολογική ξηρασία 417,
γεωργική μετεωρολογία 3,
Δ
δασική μετεωρολογία 431
δείκτες ξηρασίας 130,
δείκτης αποτελεσματικής θερμοκρασίας 137,
δείκτης βλάστησης 361
δείκτης δυσφορίας (humidex) 135,
δείκτης θερμικής άνεσης 137,
δείκτης θερμικής καταπόνησης 131,
δείκτης θερμότητας 131,
δείκτης ύγρανσης 137,
δείκτης ψύχρανσης ανέμου 132,

διαδικασία κινούμενου μέσου 353,
διαθέσιμη υγρασία εδάφους 374,
διακινδύνευση (risk) 405,
διαπνοή 110,
διηθητικότητα εδάφους 375,
δρόσος 52,
δυναμικά μοντέλα 354,
δυναμική εξάτμιση 110,
δυναμική εξατμισοδιαπνοή 111,
δυναμικό εδαφικού νερού 372,
doppler ραντάρ 99,
E
εδαφική υγρασία 371,
ειδική υγρασία 40,
εκτίμηση τρωτότητας 452
ελ νίνιο νότια ταλάντωση (E1 Nino Southern Oscillation) 283,
έλλειμμα κόρου 41,
έλλειμμα πίεσης υδρατμών 359,
ενιαία ή αδρομερή μοντέλα 384,
εξάτμιση 110,
εξατμισοδιαπνοή 110,
εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας 111,
εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας αναφοράς 111,
εξέλιξη (development) 9,
εξώθερμο 185,
εξώσφαιρα 22,
επιβλεπόμενη ταξινόμηση 314,
επιδημιολογία ασθενειών 124,
ερημοποίηση 420,
ετερόθερμο 185,
ετήσιο θερμομετρικό εύρος 25,
ευπάθεια (vulnerability) 405,
εφαρμοσμένη κλιματολογία 240,
Z
ζιζάνια 213,
ζωικό περιβάλλον 182,
H
ημέρα ξήρανσης καλλιέργειας 359,
ημερήσιο θερμομετρικό εύρος 25,
Θ
θερμική διαχυσιμότητα 31,
θερμική μονάδα (Heat Unit) 360,
θερμό μέτωπο 47,
θερμοβαθμίδα 26,
θερμοκρασία σημείου δρόσου 41,
θερμοκρασία υγρού θερμομέτρου 41,
θερμορύθμιση 184,
θερμόσφαιρα 22,
θερμοφυσιολογικοί δείκτες 130,
θεωρητική κλιματολογία 240,
I
ικανότητα εκπομπής 58,
K
καθολικός θερμικός κλιματικός δείκτης 131,

κατανεμημένα μοντέλα 384.
κλίμακα beaufort 36,
κλιματική αλλαγή 17,
κλιματική αλλαγή 269,
κλιματική μεταβλητότητα 16,
κλιματική μεταβλητότητα 269,
κυκλώνας 49,
κυκλωνικός (cyclonic) υετός 90,
Μ
μακροκλιματολογία 240,
μεγέθυνση (growth) 9,
μελανά σώματα 58,
μέσης διάρκειας προγνώσεις 174,
μεσοκλιματολογία 240,
μεσόσφαιρα 22,
μεταβολισμός 186,
μεταγωγικός (convective) υετός 90,
μετεωρολογική ή κλιματολογική ξηρασία 417,
μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση 315,
μικροκλίμα 249,
μικροκλιματολογία 240,
μικρομετεωρολογία 63,
μονάδες αποτελεσματικής θερμότητας (Effective Heat Unit) 152,
μονοχρωματική ένταση της ακτινοβολίας 57,
μοντέλα arima 353,
μοντέλα βιομάζας 343,
μοντέλα βλάστησης 344,
μοντέλα προσομοίωσης συμβάντος 383,
μοντέλα συνεχούς προσομοίωσης 383,
μοντέλο γενικής κυκλοφορίας (General Circulation Model) 272,
μύκητες 212,
Ν
νηματώδεις 212,
νυχτοθερμοκρασία (Nyctotemperature) 360,
Ξ
ξηρή κατακόρυφη αδιαβατική θερμοβαθμίδα 26,
Ο
ογκομετρικό ραντάρ (voluminal radar) 99,
ολοκληρωμένη καταπολέμηση 218,
ομίχλη 52
ομοιογένεια (homogeneity) δεδομένων 270,
ομοιόθερμο 186,
οργανισμός τροφίμων και γεωργίας των ηνωμένων εθνών (Food and Agriculture Organization) 440,
όρια ευαισθησίας (sensitivity limits) 342,
ορογραφικός (orographic) υετός 90,
Π
παγκόσμιο συμβούλιο γεωργικής προοπτικής (World Agricultural Outlook Board) 441,
παγκόσμιος μετεωρολογικός οργανισμός (World Meteorological Organization) 440,
πάχνη 52,
περιβαλλοντική τροποποίηση 190
ποικιλόθερμο 185,
πολύγωνα thiessen 92,
πορώδες εδάφους 371,
ποσοτικοποίηση ρίσκου 452,

πραγματική εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας 111
πυκνότητα εδάφους 371,
P
ραδιομετρική διακριτική ικανότητα 304,
ραντάρ (radar) 92,
ραντάρ πολικότητας (polarimetric radar) 100,
ριζικό σύστημα καλλιεργειών 374,
ρίσκο (risk) 405,
Σ
σημείο μόνιμης μάρανσης 374,
στάσιμο μέτωπο 48,
στρατόσφαιρα 22,
συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας (Probability Density Function) 281,
συνεσφιγμένο μέτωπο 49,
συντελεστής διαφάνειας 58,
συσταδοποίηση 315
συχνότητα επανάληψης παλμών (Pulse Repetition Frequency) 93,
σχετική υγρασία 40,
σωρείτες (Cumulus) 44,
σωρειτομελανίες 45,
T
τάση υδρατμών 39,
τηλεπισκόπηση 301,
τοποκλίμα 247,
τροπόσφαιρα 22,
Y
υγρή κατακόρυφη αδιαβατική θερμοβαθμίδα 26,
υδατοϊκανότητα εδάφους 373,
υδρολογική ξηρασία 418,
υετός 88,
υπερδεκαετής ταλάντωση ειρηνικού (Interdecadal Pacific Oscillation) 283
υποκλιμάκωση (downscaling) 275,
υψιστρώματα 44,
Φ
φαινολογία 155,
φαινολογικά μοντέλα 355,
φαινολογικές φάσεις 165,
φαινολογική κλιματολογία 251
φασματικές υπογραφές 301,
φασματική διακριτική ικανότητα 304,
φυσική καταστροφή (disaster) 405,
φυσικός περιβαλλοντικός κίνδυνος (hazard) 405,
φυσιολογικά ισοδύναμη θερμοκρασία 131,
φυτοκλίμα 249,
φωτοθερμική μονάδα (Photothermal Unit) 360,
φωτοθερμοκρασία (Phototemperature) 360,
φωτοπερίοδος 156,
X
χρονική διακριτική ικανότητα 304,
χωρική διακριτική ικανότητα 304,
Ψ
ψυχρό μέτωπο 48

Παράρτημα 2: Βραχυγραφίες

ΑΟΣ	Ατμοσφαιρικό Οριακό Στρώμα
ΓΣΠ	Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών
ΕΑΘ	Εκπομπών Αερίων του Θερμοκηπίου
ΕΘΕ	Ετήσιο Θερμομετρικό Εύρος
ΕΠΕ	εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων
ΗΜΑ	Ηλεκτρομαγνητικής Ακτινοβολίας
ΗΘΕ	Ημερήσιο Θερμομετρικό Εύρος
ΜΓΚ	Μοντέλο Γενικής Κυκλοφορίας
ΜΓΚ	Μοντέλα Γενικής Κυκλοφορίας
ΞΑΘ	Ξηρή Κατακόρυφη Αδιαβατική Θερμοβαθμίδα
ΠΚΜ	Περιοχικά Κλιματικά Μοντέλα
ΠΟΥ	Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας
ΣΕΕ	στρατηγική εκτίμηση επιπτώσεων
ΣΥ	Σχετική Υγρασία
ΥΑΘ	Υγρή Κατακόρυφη Αδιαβατική Θερμοβαθμίδα
ΥΔΣ	ύψους-διάρκειας-συχνότητας

AMSU-B	Advanced Microwave Sounding Unit
AVHR	Advanced Very High Resolution Radiometer
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
DTx	Agricultural Drought Index
ALMANAC	Agricultural Land Management Alternative Numerical Assessment Criteria
ASR	Agriculturally Significant Rains
API	Antecedent Precipitation Index
AGC	Atmospheric General Circulation Model
ACF	Autocorrelation Function
ARIMA	Autoregressive Integrated Moving Average
BMDI	Bhalme-Mooley Drought Index
BT	Brightness Temperature
BV	Brightness Values
NCMRWF	Center for Medium Range Weather Forecasting
COFs	Climatic Outlook Forums
CCD	Cold Cloud Duration
CAP	Common Agricultural Policy
CAPPI	Constant Altitude Plan Position Indicator
cA	continental Arctic
CDC	Convective Day Category
CST	Convective Stratiform Technique
CERES	Crop Environment Resource Synthesis
CMI	Crop Moisture Index
CWSI	Crop Water Stress Index
DairySim	Dairy Simulator
DSS	Decision Support System
DSS	Decision Support System
DSSAT	Decision Support System for Agrotechnology Transfer
DNDC	Denitrification Decomposition
DP	Dependable Precipitation
DWD	Deutscher Wetterdienst

DN	Digital Numbers
DI	Discomfort Index
DEWS	Drought Early Warning System
DSI	Drought Severity Index
EHU	Effective Heat Unit
ENSO	El Nino Southern Oscillation
EVI	Enhanced Vegetation Index
EPIC	Erosion Productivity Impact Calculator
ETDI	Evapotranspiration Deficit Index
EVI	Extreme Value I
FEWS	Famine Early Warning System
FADO	Farm Adaptive Dynamic Optimization System
FWI	Fire Weather Index
FAO	Food and Agriculture Organization
GCM	General Circulation Model
GCM	General Circulation Model
GEV	Generalized Extreme Value
GHOST	Global Horizontal Sounding Technique
GIEWS	Global Information and Early Warning System
GPM	Global Precipitation Mission
GVWI	Global Vegetation Water Moisture Index
GPI	GOES Precipitation Index
GDD	Growing Degree Days
HCMM	Heat Capacity Mapping Mission
HU	Heat Unit
HYSPLIT	Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory
HEC	Hydrologic Engineering Center
IR	Infrared
IPO	Interdecadal Pacific Oscillation
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LST	Land Surface Temperature
LWCI	Leaf Water Content Index
LWCI	Leaf Water Content Index
LRF	Long-Range Forecasting
mE	maritime Equatorial
MAI	Moisture Availability Index
MSI	Moisture Stress Index
MCE	Multi-Criteria Evaluation
NAMS	National Agricultural Monitoring System
NEWUs	National Early Warning Units
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NPP	Net Primary Productivity
NDTI	Normalised Difference Temperature Index
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NDWI	Normalized Difference Water Index
NAO	North Atlantic Oscillation
NWP	Numerical Weather Prediction
OGCM	Oceanic General Circulation Model
PRISM	Parameter–Elevation Regressions on Independent Slopes Model
PACF	Partial Autocorrelation Function
PaSim	Pasture Simulation model
PAR	Photosynthetically Active Radiation
PTU	Photothermal Unit
PPI	Plan Position Indicator
PLASMO	Plasmopora Simulation Model
PET	Potential Evapotranspiration/

PR	Precipitation Radar
QRA	Quantitative Risk Assessment
RADAR	RAdar Detection And Ranging
RWG	Random Weather Generators
RHI	Range Height Indicator
READY	Real-time Environmental Applications and Display sYstem
RDI	Reclamation Drought Index
RCM	Regional Climate Model
RSMC	Regional Specialized Meteorological Centres
RH	Relative humidity
RWC	Relative Water Content
RDRI	Remote Sensing Drought Risk Index
SD	Saturation Deficit
SI	Scattering Index
SLURP	Semi-distributed Land Use-based Runoff Processes
SPUR	Simulation of Production and Utilization of Rangelands
SWAT	Soil & Water Assessment Tool
SMAI	Soil Moisture Anomaly Index
SMDI	Soil Moisture Deficit Index
SONAR	Sound Navigation and Ranging
SO	Southern Oscillation
SOI	Southern Oscillation Index
SPECIES	Spatial Evaluation of Climate Impacts on the Envelope of Species
SNHT	Standard Normal Homogeneity Test
SVI	Standardized Vegetation Index
SPIRA	State-Pressure-Impact-Response-Adaptation
SDD	Sum of Degree-Days
SDD	Sum of Degree-Days
SAR	Synthetic Apperture Radar
SHE	Systeme Hydrologique Europeen
TCI	Temperature Condition Index
TR	Tenderometer
TOVS	TIROS Operational Vertical Sounder
TRMM	Tropical Rainfall Monitoring Mission
UV	Ultraviolet
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
USDM	United States Drought Monitor
USGS	United States Geological Survey
UAGPI	Universally Adjusted GOES Precipitation Index
USM	Useful Soil Moisture
VCI	Vegetation Condition Index
VCI	Vegetation Condition Index
VegDRI	Vegetation Drought Response Index
VHI	Vegetation Health Index
VHI	Vegetation Health Index
WAOB	World Agricultural Outlook Board
WASDE	*World Agricultural Supply and Demand Estimates*
WOFOST	WOrld FOod Studies
WMO	*World Meteorological Organization*

Παράρτημα 3: Επιλογή ξενόγλωσσης βιβλιογραφίας στην Αγρομετεωρολογία

Παρουσιάζονται επιγραμματικά τα πιο γνωστά βιβλία για την αγρομετεωρολογία από τη διεθνή βιβλιογραφία:

1. WMO. (2010). *Guide to Agricultural Meteorological Practices*. WMO - No134.
Πρόκειται για την πρόσφατη και επικαιροποιημένη έκδοση του Οδηγού Γεωργικής Μετεωρολογίας του Παγκόσμιου Μετεωρολογικού Οργανισμού (ΠΜΟ). Είναι ένα πολύ σημαντικό βιβλίο και βοήθημα, κυρίως για επαγγελματίες του αντικειμένου. Εκτός από τις αναφορές σε κλασικές αναλύσεις και σύγχρονες μεθοδολογίες, περιλαμβάνει σύγχρονα θέματα αγρομετεωρολογικής διαχείρισης, ενώ εστιάζεται στο ρόλο της αγρομετεωρολογίας στην παροχή υπηρεσιών και παρουσιάζει τις σύγχρονες πλατφόρμες πληροφοριών.

2. Stigter, K. (Ed.). (2010). *Applied Agrometeorology*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
Πρόκειται για ένα ογκώδες επιστημονικό έργο, με πολύ μεγάλη πρακτική σημασία, από έναν πολύ διακεκριμένο επιστήμονα του κλάδου διεθνώς. Στην ουσία, συνιστά βιβλίο αναφοράς, γιατί παρουσιάζει ένα πολύ μεγάλο εύρος εφαρμογών αγρομετεωρολογίας, με πρακτικό και κωδικοποιημένο τρόπο.

3. Mavi, H.S. and Tupper, G.J. (2004). *Agrometeorology: Principles and Applications of Climate Studies in Agriculture*. New York: The Haworth Press.
Πρόκειται για ένα από τα καλύτερα σύγχρονα βιβλία αγρομετεωρολογίας, τόσο για εκπαιδευτικούς, όσο και για επαγγελματικούς σκοπούς. Η θεματολογία και η προσέγγισή του είναι κλασικές.

4. Smith, J.W. (2008). *Agricultural Meteorology, the Effect of Weather on Crops*, New York: Macmillan.
Πρόκειται για ένα επίσης σύγχρονο και αξιόλογο επιστημονικό έργο, που ακολουθεί την κλασική προσέγγιση.

5. Seemann, I., Chirkov, Y.I., Lomas, J. and Primault, B. (1979). *Agrometeorology*. Berlin, Heidelberg: Springer.
Πρόκειται για ένα κλασικό επιστημονικό έργο, που θεωρείται ακόμα επίκαιρο και αποτελεί πάντα βιβλίο αναφοράς. Περιλαμβάνει θέματα τόσο αγρομετεωρολογίας, όσο και αγροκλιματολογίας. Το έχουν γράψει μερικοί από τους πιο γνωστούς και αξιόλογους επιστήμονες διεθνώς της εποχής τους.

6. Monteith, J.L. and Unsworth, M.H. (2007). *Principles of Environmental Physics*. 3rd Edition, London: Edward Arnold.
Πρόκειται για την πρόσφατη και επικαιροποιημένη έκδοση του αντίστοιχου βιβλίου. Ως γνωστόν, ο Monteith θεωρείται ένας από τους «πατέρες» της αγρομετεωρολογίας διαχρονικά, το δε βιβλίο είναι ένα κλασικό έργο, που εισάγει τον αναγνώστη στο απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο των θεμάτων και εφαρμογών της αγρομετεωρολογίας. Αποτελεί σημαντικό βοήθημα για κάθε νέο επιστήμονα.

7. Oke, T.R. (1988). *Boundary Layer Climates*. 2nd Edition. New York: Routledge.
Πρόκειται για ένα σημαντικό και ογκώδες επιστημονικό έργο, που αποτελεί βοήθημα τόσο για μεταπτυχιακούς φοιτητές, όσο και για επαγγελματίες. Τα θέματά του ακολουθούν μια επιτυχημένη αλληλουχία και κλιμάκωση, και παρουσιάζονται με επαρκή θεωρητική κάλυψη, ενώ ικανοποιητική είναι η κάλυψη των εφαρμογών.

8. Wang, J.Y. (1972). *Agricultural Meteorology*. 3rd Edition. San Jose, California: Milleu Information Service.
Πρόκειται για ένα ογκώδες και πολύ αξιόλογο βιβλίο για την εποχή του, που παρουσιάζει μια αναλυτική και μεθοδολογική αλληλουχία και κλιμάκωση της αγρομετεωρολογίας. Θεωρείται πολύτιμο βοήθημα για νέους επιστήμονες και μεταπτυχιακούς φοιτητές. Στην ουσία, αποτελεί επέκταση και διεύρυνση της διδακτορικής διατριβής του Wang.

Παράρτημα 4: Σύμβολα-Μονάδες-Ορισμοί

Σύμβολα	Μονάδες	Ορισμοί
ET	mm	Evapotranspiration
ET_a	mm	Actual evapotranspiration
ET_o	mm	Reference evapotranspiration
ET_{inst}	mm	Instantaneous evapotranspiration
ET_{24}	mm	24h evapotranspiration
G	W/m^2	Soil heat flux
H	W/m^2	Sensible heat flux
R_n	W/m^2	Net radiation
λE	W/m^2	Latent heat flux
NDVI	-	Normalized Difference Vegetation Index
LAI	m^2/m^2	Leaf Index Area
SAVI	-	-
L	-	Constant* (for the computation of SAVI)
Λ	-	Evaporative fraction
P	mm	Precipitation
T_s	°C	Land surface temperature
T_a	°C	Air temperature
LST	°C	Land surface temperature
ΔT	°C	Temperature difference
VIS	μm	Visible band
NIR	μm	Near-infrared band
TIR	μm	Thermal infrared band

$K\downarrow$	W/m^2	Incident shortwave radiation
$K\uparrow$	$(W/m^2)\ sr^{-1}\ \mu m^{-1}$	Reflected shortwave radiation
$L\downarrow$	W/m^2	Incident longwave radiation
$L\uparrow$	$(W/m^2)\ sr^{-1}\ \mu m^{-1}$	Outgoing longwave radiation
σ	W/m2 (K-4)	Stefan-Boltzmann constant (5.67×10-8)
c_p	JKg-1 K-1	Air specific heat capacity (1004)
k	-	Von Karman constant (0.41)
G_{sc}	W/m^2	Global solar constant (1367)
r_p	-	Planetary reflectance
r_a	-	Atmospheric reflectance
α	-	Albedo
ρ_λ	-	Reflectivity
d_s	m	Earth-sun distance
d_r	m	Inverse Earth-sun distance
λ	μm	Band wavelength
θ	Rad	Sun zenith angle
JD	days	Julian day (Day of the year)
ε_o	-	Surface emissivity
ε_a	-	Atmospheric emissivity
T_B	K	Brightness temperature
δ	Rad	Solar declination
Lat	Degrees	Latitude
Lon	Degrees	Longitude
τ	-	Transmissivity
e_s	kPa	Saturated vapour pressure
e_a	kPa	Actual vapour pressure
e_d	kPa	Vapour pressure deficit

Δ	kPa	Slope of vapour pressure curve
γ	kPa °C	Psychometric constant
z		Vertical height
zom	m	Roughness length of heat transfer
u*	m/sec	Friction velocity
ρ	kg/ m^2	Density of the air
g	m/sec^2	gravitational constant (9.81)
L	-	Monin-Obukhov length
K_c	-	Crop coefficient
L_λ	Watts/meter squared * ster * μm	Spectral Radiance at the sensor's aperture in watts
"gain"	watts/(meter squared * ster * μm)	
"bias"	$(W/m^2)\ sr^{-1}\ \mu m^{-1}$	
QCAL	DN (digital number)	The quantized calibrated pixel value
$LMIN_\lambda$	$(W/m^2)\ sr^{-1}\ \mu m^{-1}$	The spectral radiance that is scaled to QCALMIN
$LMAX_\lambda$	$(W/m^2)\ sr^{-1}\ \mu m^{-1}$	The spectral radiance that is scaled to QCALMAX
QCALMIN	DN (digital number)	the minimum quantized calibrated pixel value (corresponding to $LMIN_\lambda$) (0)
QCALMAX	DN (digital number)	= the maximum quantized calibrated pixel value (corresponding to $LMAX_\lambda$) (255)

*L for the computation of SAVI is totally different than the other L (Monin-Obukhov length).

Παράρτημα 5: Πίνακες Φαινολογικών μοντέλων

Πίνακας 1

Type of model	Basic principe	Functional dependence on climatic and terrestrial parameters	Principal description of the model(s) (example of use)
GDD models (growing degree day)	Start of the particular phenological phase is related to the sum of temperatures calulated over a certain treshold (base temperature) starting on a defined date. (In some modifications the base temperature depends on other parameters (photoperiod, soil moisture etc.).	R = f(T)	Miller et.al. (2001) Web 1 Web 6
NGD models (number of growing days)	Start of the particular phenological phase is related to the number of days during a certain period when the mean air temperature is over a certain limit (depending on the bionom, frequently used are -5ºC, 0ºC, 5ºC...).	R = f (T)	Botta et all. (2000)
GPT models (genotype x temperature x photoperiod)	Start of the particular phenological phase is constituted mostly by genes other than photoperiod genes and regulated by temperature. Any activity of photoperiod genes delays the process of plant development.	R = f (T,P)	Weikai and Wallace (1998)
NCD-GDD two-phase phenological model (Chilling Days-Growing Degree Day model	Chilling Days represent the dormancy required for the start of a new growing season. After the dormancy demand is met the model works in GDD mode. Many variations of such models assum reduced plant`s GDD demand with the increase of chilling days.	R = f(T)	Fu et. al. (2014)
Parallel model	Start of the particular phenological phase is related to both chilling and thermal forcing acting in the parallel. The time spent in chilling period increases the potential of the plant organs to respond to temperature forcing.	R = f(T)	Landsberg (1974)
Sequential models	The dormancy and the start of active phase of vegetation cycle do not act in parallel but they are in a strict sequence. The periods of rest and quiescence before the start of the vegetation are adopted. The start of quiescence requires a critical state of chilling. The active phase of vegetative process starts just after a critical state of forcing is reached.	R = f(T)	Sarvas (1974)
R-rate of plant development T, P, Pc–external environmental parameters influencing the plant development T-temperature, P-photoperiod, Pc-precipitation			

Type of model	Basic principe	Functional dependence on climatic and terrestrial parameters	Principal description of the model(s) (example of use)
Deepening rest model	This type of model concentrates on the period of dormancy. During the phase of rest a subphases of deepening rest and decreasing rest is distinguished while other models recognize only decreasing rest. During the quiescence phase which comes after the rest the rate of the development increases with the temperature.	R = f(T)	Kobayashi (1982), Kobayashi and Fuchigami 1983
Four phase model	The rest phase of the dormancy is broken into three subphases (pre rest, true rest and post-rest) defined by the rate of receptivness of the plant to start to grow. During the quiescence which follows after the post-rest the plants (buds) already respond to forcing temperature.	R = f(T)	Vegis (1964)
Alternating model	The relation of the state of forcing and chilling is used to predict the start of the particular phenological phase (budburst). It is set after so calld c ritical thermal time is reached. This value is not constant but declines exponentially with the state of chilling. From the state of quiescence the state of chilling increases when the daily mean temperature is below the base temperature or increases if being above.	R = f(T)	Murray et. al. (1989).
BBGC (Biome-BioGeochemical Cycles model)	The model accounts the temperature and precipitation for setting the critical summ of soil temperature and precipitation to start the particular phenological stage. Model distinguishes the processes for woody plants and grasses. Model is process oriented based on modelling the processes that control flux of energy and mass.	R = f(T, Pc)	Fu et. al. (2014) Web 7
R-rate of plant development T, P, Pc–external environmental parameters influencing the plant development T-temperature, P-photoperiod, Pc-precipitation			

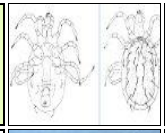
Πίνακας 2 (http://ippc2.orst.edu/wea/ddmodeldocs.html)

	Model/links to general info.	Image	Links to run model & model summary	Type	Model Documentation if avail.	Region of Known Usage	Validation Status
1.	Degree-Day Calculator		run summary	generic	enter your own thresholds	Pacific Northwest	untested
2.	apple scab infection season [apple]		run summary	disease	Gadoury et al. (1995)	Pacific Northwest	untested
3.	downy brome		run summary	weed	Dan Ball et al, 2004 publication (pdf)	inland Pacific NW	validated - see publication
4.	emerald ash borer [ash trees]		run summary	insect	McCullough and Siegert (2006)		in current use in Great Lakes region US
5.	cougarblight (fire blight risk calculator) [apple & pear]		run summary	disease	Smith (1998) Fire Blight model by Tim Smith	Pacific Northwest	Validated & In Use - Contact Ken Johnson at johnsonk@science.oregonstate.edu
6.	Lacanobia fruitworm [apple & pear]		run summary	insect	Brunner (2003) article by Jay Brunner	Washington	partly validated in WA
7.	pecan nut casebearer [pecan]		run summary	insect	Jackman and Harris (1988)	in current use in NM and TX; OK version slightly different	use with caution; requires local validation
8.	fruittree leafroller [tree fruits & ornamentals]		run summary	insect	Judd et al. (1993)	developed in BC, Canada	unknown

	Model/links to general info.	Image	Links to run model & model summary	Type	Model Documentation if avail.	Region of Known Usage	Validation Status
9.	codling moth revised 06 [apple & pear]		run summary	insect	2006 revision by A. L. Knight	used in WA	actively undergoing evaluation
10.	WSU codling moth model 2008 [apple & pear]		run summary	insect	Jones, Doerr & Brunner 2008	support for use in WA only	actively undergoing evaluation
11.	codling moth [apple & pear]		run summary	insect	Brunner and Hoyt (1987)	Pacific Northwest	Fully tested and in use
12.	hop downy mildew season initiation [hop]		run summary	disease	Gent et al.(2010) full pub. Hop IPM (pdf)	Pacific Northwest	supported in Oregon
13.	cereal leaf beetle [grasses and grains]		run summary	insect	Fulton et al. 1975 EE 4:357, OSU1, OSU synthesis	used in USA	requires local validation
14.	european pine shoot moth [nursery crops]		run summary	insect	Regan et al. (1990)	Pacific Northwest	partly validated
15.	peach twig borer [stone fruits]		run summary	insect	2007 USU Extension Fact Sheet WSU IPM info	used in NW USA	requires local validation
16.	spotted wing Drosophila [stone & small fruits]		run summary	insect	OSU vers. 1.5	potential for use in Pacific NW states	unvalidated-actively undergoing evaluation
17.	filbertworm [hazelnut]		run summary	insect	Aliniazee (1983)	Pacific Northwest	partly validated

	Model/links to general info.	Image	Links to run model & model summary	Type	Model Documentation if avail.	Region of Known Usage	Validation Status
18.	strawberry root weevil [peppermint]		run summary	insect	Cacka (1982)	Pacific Northwest	partly validated
19.	sweet corn [Jubilee];		run summary	crop	Coop et al. (1993)	Pacific Northwest	partly validated
20.	strawberry root weevil [strawberry]		run summary	insect	Umble and Fisher (2000,2002)	Pacific Northwest	new and untested
21.	bertha armyworm [vegetables]		run summary	insect	Bailey 1976	Pacific Northwest	untested
22.	black cutworm Mich. State Univ. [vegetables]		run summary	insect	Luckmann et al. 1976 UC Davis	Pacific Northwest	partly validated
23.	cabbage looper U. Minn. [vegetables]		run summary	insect	Toba et al. 1973	Pacific Northwest	untested
24.	corn earworm [sweet corn]		run summary	insect	Hartstack et al. 1976	Pacific Northwest	partly validated
25.	western cherry fruit fly [cherry E. of Cascades]		run summary	insect	Jones et al (1991)	developed in UT, and WA	unknown
26.	western cherry fruit fly [cherry W. of Cascades]		run summary	insect	AliNiazee (1979)	Pacific Northwest-W. of Cascades	fully validated

	Model/links to general info.	Image	Links to run model & model summary	Type	Model Documentation if avail.	Region of Known Usage	Validation Status
27.	variegated cutworm [peppermint]		run summary	insect	Coop & Berry (1987)	Pacific Northwest	partly validated
28.	walnut husk fly [walnut]		run summary	insect	Kasana & AliNiazee (1997)	Pacific Northwest-W. of Cascades	developed but not calibrated or validated
29.	western bean cutworm [corn & dry beans - midwest]		run summary	insect	Neb. IPM	developed in Neb.	unknown
30.	gypsy moth egg hatch [mixed oak forest]		run summary	insect	Russo et al. (1993)	East Coast US	partly validated
31.	gypsy moth larvae & pupae [mixed oak forest]		run summary	insect	Carter et al (1992)	East Coast US	partly validated
32.	gypsy moth model from Jan 1 [oak-maple forest]		run summary	insect	Sheehan-simplified version	Midwest & PNW US	experimental
33.	orange tortrix (cold winter) [small fruit]		run summary	insect	Knight (1988)	Pacific Northwest	partly validated
34.	orange tortrix (mild winter) [small fruit]		run summary	insect	Knight (1988)	Pacific Northwest	partly validated
35.	obliquebanded leafroller [hazelnut]		run summary	insect	Gang. and Ali. (1985)	Pacific Northwest	partly validated

	Model/links to general info.	Image	Links to run model & model summary	Type	Model Documentation if avail.	Region of Known Usage	Validation Status
36.	San Jose Scale [tree fruits]		run summary	insect	Rice et al. (1982)	Pacific Northwest	partly validated
37.	isomate-c+		run summary	insect mating disruption dispenser	Pacific Biocontrol Corporation Data	Pacific Northwest	experimental
38.	Metaseiulus occidentalis		run summary	insect	Tanagoshi et al. 1975	Pacific Northwest	untested
39.	obliquebanded leafroller [tree fruits]		run summary	insect	Brunner et al. (1997)	Pacific Northwest	untested
40.	Pandemis leafroller [tree fruits]		run summary	insect	Brunner (1991)	Pacific Northwest	partly validated
41.	small broomrape (red clover)		run summary	weed	Jed Colquhoun. see Weed Handbook and model summary (publication in press)	Western Oregon	newly validated
42.	winter wheat;		run summary	crop	Karow et al. 1993	Pacific Northwest	new prototype version - Contact Russ Karow at karowr@css.oregonstate.edu
43.	pear scab infection season [pear]		run summary	disease	Hood River Exp. Sta./Bob Spotts	Pacific Northwest	experimental - untested
44.	mint flea beetle		run summary	insect	Berry et al.	Pacific Northwest	partly validated

	Model/links to general info.	Image	Links to run model & model summary	Type	Model Documentation if avail.	Region of Known Usage	Validation Status
45.	mint root borer		run summary	insect	Berry et al.	Pacific Northwest	partly validated
46.	Neoseiulus fallacis		run summary	mite predator	Dover et al. 1979	Pacific Northwest	untested
47.	Barley;		run summary	crop	P. Miller, MSU, Misc. refs	Montana	partly validated
48.	Cabbage Maggot - *Delia radicum* (L.)		run summary	insect	Dreves 2005 newsletter (pdf) info cards (pdf)	Pacific Northwest	partly validated
49.	Sugarbeet Root Maggot		run summary	insect	Bechinski et al. 1990	Pacific Northwest	partly validated
50.	Wheat R;		run summary	crop	P. Miller, MSU, Misc. refs	Montana	partly validated
51.	Apple maggot 1st emerge [cherry & apple]		run summary	insect	Jones et al. 1989 JEE 82:788-792	Utah	testing
52.	Apple maggot percent emergence [cherry & apple]		run summary	insect	Jones et al. 1989	UT and OR	testing
53.	Chick Pea (Desi not Kabuli); intermediate growth chars, requires stress to hasten maturity		run summary	crop	P. Miller, MSU, Misc. refs	Montana	partly validated
54.	Canola (Argentine); indet. growth habit, will cont. to flower until stressed		run summary	crop	P. Miller, MSU, Misc. refs	Montana	partly validated
55.	Canola (Polish); indet. growth habit, will cont. to flower until stressed		run summary	crop	P. Miller, MSU, Misc. refs	Montana	partly validated

	Model/links to general info.	Image	Links to run model & model summary	Type	Model Documentation if avail.	Region of Known Usage	Validation Status
56.	Canary;		run summary	crop	P. Miller, MSU, Misc. refs	Montana	partly validated
57.	Flax; stage flax early in morning before flower petals fall off		run summary	crop	P. Miller, MSU, Misc. refs	Montana	partly validated
58.	Oat;		run summary	crop	P. Miller, MSU, Misc. refs	Montana	partly validated
59.	Mustard J (Brown and Oriental); indet. growth habit, will cont. to flower until stressed		run summary	crop	P. Miller, MSU, Misc. refs	Montana	partly validated
60.	Mustard (Yellow); indet. growth habit, will cont. to flower until stressed		run summary	crop	P. Miller, MSU, Misc. refs	Montana	partly validated
61.	Lentil (intermediate growth chars); will continue to flower until stressed		run summary	crop	P. Miller, MSU, Misc. refs	Montana	partly validated
62.	Lygus bug [alfalfa seed]		run summary	insect	Ben Simko 2000	E. Oregon, SW Idaho	partly validated
63.	Oriental fruit moth [stone fruit]		run summary	insect	CA IPM	California	partly validated
64.	Pea (yellow-determinate or indeterminate growth chars.);		run summary	crop	P. Miller, MSU, Misc. refs	Montana	partly validated
65.	Safflower (Saffire);		run summary	crop	P. Miller, MSU, Misc. refs	Montana	partly validated
66.	Sunflower (depends on maturity class); early maturing, dwarf hybrids, semi dwarfs slightly later		run summary	crop	P. Miller, MSU, Misc. refs	Montana	partly validated