



Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά
Συγγράμματα και Βοηθήματα
www.kallipos.gr

HEALLINK
Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο

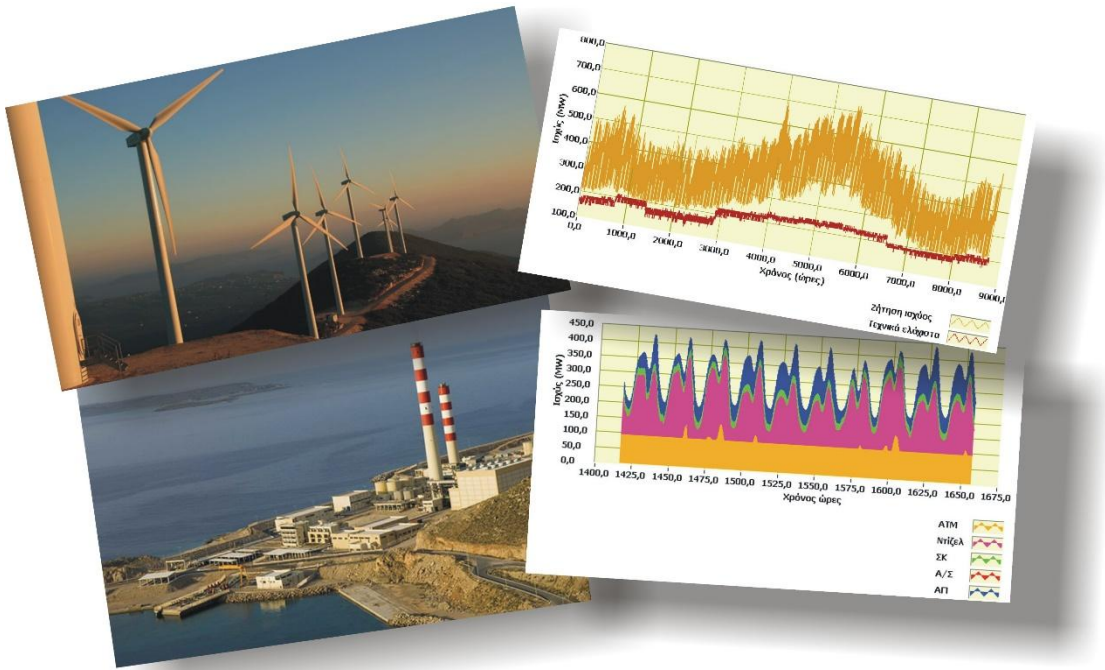


Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

Σύνθεση Ενεργειακών Συστημάτων



Δημήτρης Αλ. Κατσαπρακάκης
Εργαστήριο Αιολικής Ενέργειας & Σύνθεσης Ενεργειακών Συστημάτων
Τ.Ε.Ι. Κρήτης
Ηράκλειο Κρήτης
2015

*Δημήτρης Αλ. Κατσαπρακάκης
Επίκουρος Καθηγητής Τ.Ε.Ι. Κρήτης*

Σύνθεση Ενεργειακών Συστημάτων



Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά
Συγγράμματα και Βοηθήματα
www.kallipos.gr

Σύνθεση Ενεργειακών Συστημάτων

Συγγραφή

Δημήτρης Αλ. Κατσαπρακάκης

Κριτικός αναγνώστης

Σταμάτης Καλλίγερος

Συντελεστές έκδοσης

Γλωσσική Επιμέλεια: Ελένη Νίκα

Γραφιστική Επιμέλεια: Δημήτρης Αλ. Κατσαπρακάκης

Τεχνική Επεξεργασία: Δημήτρης Αλ. Κατσαπρακάκης

ISBN: 978-960-603-338-4

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/>



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

(Επιλέξτε την άδεια που επιθυμείτε για το Σύγγραμμά σας και διαγράψτε αυτή που δεν συμβαδίζει)

ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΩΝ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΩΝ

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 15780 Ζωγράφου

www.kallipos.gr

*Αφιερώνεται στο γιο μου και στα ανίψια μου
που με γεμίζουν φως και δύναμη,
στους γονείς και στα αδέρφια μου
ακλόνητα στηρίγματα στη διαδρομή μου.*

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγικές έννοιες	1
1.1. Ενέργεια και ισχύς	1
1.1.1. Ενέργεια	1
1.1.2. Ισχύς.....	3
1.1.3. Χρονική εξέλιξη ενέργειας και ισχύος	5
1.1.4. Μονάδες ενέργειας και ισχύος.....	8
1.2. Ταξινόμηση των μορφών ενέργειας	12
1.2.1. Ιστορική αναδρομή.....	12
1.2.2. Ταξινόμηση και ρόλος των μορφών ενέργειας.....	13
1.2.3. Οι μετατροπές μορφών ενέργειας.....	15
1.3. Πηγές ενέργειας	17
1.3.1. Μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.....	17
1.3.2. Διαθέσιμα αποθέματα μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας	19
1.3.3. Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας	21
1.3.4. Πυκνότητα ισχύος πηγών ενέργειας	23
1.4. Μορφοτροπή ενέργειας και βαθμός απόδοσης.....	24
1.4.1. Βαθμός απόδοσης	24
1.4.2. Ενεργειακές μορφοτροπές και βαθμός απόδοσης.....	25
1.4.3. Μέσος και στιγμιαίος βαθμός απόδοσης	27
1.5. Βαθμός απόδοσης μορφοτροπέων σε σειρά και παράλληλα.....	29
1.5.1. Σύνδεση μορφοτροπέων σε σειρά	30
1.5.2. Σύνδεση μορφοτροπέων παράλληλα	31
1.6. Συμβατικά και «υβριδικά» ενεργειακά συστήματα	33
1.6.1. Συμβατικά ενεργειακά συστήματα	33
1.6.2. «Υβριδικά» ενεργειακά συστήματα.....	34
1.7. Δομή του βιβλίου	36
Αναφορές Κεφαλαίου	40
Κεφάλαιο 2: Συμβατικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας	41
2.1. Συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας	41
2.1.1. Δομή συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.....	41
2.1.2. Απομονωμένα και διασυνδεδεμένα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.....	44
2.1.3. Διατήρηση ασφάλειας ενεργειακών συστημάτων	47
2.1.4. Στρεφόμενη εφεδρεία	49
2.1.5. Μονάδες Α.Π.Ε. και ασφάλεια ηλεκτρικών συστημάτων	51
2.1.6. Ζήτηση ισχύος σε Σ.Η.Ε.	54
2.2. Μονάδες παραγωγής.....	57
2.2.1. Ατμοστρόβιλοι.....	58
2.2.2. Ντιζελογεννήτριες.....	61
2.2.3. Αεριοστρόβιλοι.....	64

2.2.4. Συνδυασμένοι κύκλοι.....	66
2.2.4. Τεχνικό ελάχιστο, ονομαστική ισχύς και απόδοση θερμοηλεκτρικής μονάδας.....	67
2.2.5. Υδροστρόβιλοι.....	70
2.2.6. Μονάδες μη εγγυημένης παραγωγής.....	78
2.2.7. Ένταξη των μονάδων παραγωγής σε Σ.Η.Ε.	80
2.2.8. Διατήρηση στρεφόμενης εφεδρείας.....	85
2.3. Παραδείγματα σύνθεσης παραγωγής.....	87
2.4. Ωριαίος ενεργειακός υπολογισμός συστήματος.....	94
2.4.1. Περίπτωση λειτουργίας με αιολικά πάρκα.....	94
2.4.2. Περίπτωση λειτουργίας χωρίς αιολικά πάρκα.....	98
2.5. Αριθμητική προσομοίωση ετήσιας λειτουργίας Σ.Η.Ε.....	102
2.6. Ετήσια προσομοίωση Σ.Η.Ε. Κρήτης.....	103
2.6.1. Ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος.....	103
2.6.2. Το θερμοηλεκτρικό σύστημα Κρήτης.....	104
2.6.3. Οι μονάδες μη εγγυημένης ισχύος του συστήματος Κρήτης.....	107
2.6.4. Καύσιμα.....	108
2.6.5. Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	108
Αναφορές Κεφαλαίου.....	114
Κεφάλαιο 3: Υβριδικοί σταθμοί ηλεκτρικής ενέργειας.....	115
3.1. Η έννοια του υβριδικού σταθμού.....	115
3.2. Κατηγοριοποίηση υβριδικών σταθμών ηλεκτρικής ενέργειας.....	117
3.3. Τεχνολογίες συνιστωσών υβριδικών σταθμών μεγάλου μεγέθους.....	118
3.3.1. Μονάδες βάσης.....	119
3.3.2. Μονάδες αποθήκευσης.....	120
3.3.2.α. Συστήματα αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα.....	121
3.3.2.β. Αναστρέψιμα υδροηλεκτρικά.....	125
3.4. Τεχνολογίες συνιστωσών υβριδικών σταθμών μικρού μεγέθους.....	131
3.4.1. Μονάδες βάσης.....	131
3.4.2. Μονάδες αποθήκευσης.....	133
3.4.2.α. Ηλεκτροχημικοί συσσωρευτές.....	134
3.4.2.β. Κυψέλες καυσίμου (fuel cells).....	141
3.4.3. Επιλογή μονάδας αποθήκευσης σε μικρούς υβριδικούς σταθμούς.....	147
3.5. Αλγόριθμοι λειτουργίας υβριδικών σταθμών μεγάλου μεγέθους.....	148
3.5.1. Υβριδικοί σταθμοί για 100% κάλυψη ισχύος.....	149
3.5.1.α. Αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό ως μονάδα αποθήκευσης.....	149
3.5.1.β. Σταθμός συμπιεσμένου αέρα ως μονάδα αποθήκευσης.....	156
3.5.2. Υβριδικοί σταθμοί για απαλοιφή αιχμών ισχύος.....	164
3.6. Αλγόριθμοι λειτουργίας υβριδικών σταθμών μικρού μεγέθους.....	168
3.6.1. Υβριδικοί σταθμοί μικρού μεγέθους.....	168
3.6.2. Προσομοίωση μονάδας ηλεκτρόλυσης και κυψέλης καυσίμου.....	174
3.6.3. Υβριδικοί σταθμοί πολύ μικρού μεγέθους.....	179
3.7. Κριτήρια βελτιστοποίησης διαστασιολόγησης υβριδικών σταθμών.....	184
3.7.1. Ενεργειακή βελτιστοποίηση διαστασιολόγησης υβριδικών σταθμών.....	184

3.7.2. Οικονομική βελτιστοποίηση διαστασιολόγησης υβριδικών σταθμών	185
3.8. Παραδείγματα διαστασιολόγησης υβριδικών σταθμών	191
3.8.1. Διαστασιολόγηση υβριδικού σταθμού Ρόδου.....	191
3.8.1.α. Σκοπός της διαστασιολόγησης	191
3.8.1.β. Ανεξάρτητη παράμετρος διαστασιολόγησης.....	191
3.8.1.γ. Δεδομένα.....	192
3.8.1.δ. Υπολογιστική διαδικασία.....	193
3.8.1.ε. Αποτελέσματα.....	194
3.8.1.στ. Οικονομικές παραδοχές	197
3.8.2. Διαστασιολόγηση υβριδικού σταθμού Αγίου Ευστρατίου	198
3.8.2.α. Σκοπός της διαστασιολόγησης	198
3.8.2.β. Συνιστώσες του υβριδικού σταθμού.....	198
3.8.2.γ. Δεδομένα.....	199
3.8.2.β. Διαστασιολόγηση υβριδικού σταθμού.....	199
Αναφορές Κεφαλαίου	204
Κεφάλαιο 4: Συμπαγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας.....	207
4.1. Εισαγωγή	207
4.2. Δείκτες απόδοσης των συστημάτων Σ.Η.Θ.	210
4.3. Συστήματα Σ.Η.Θ.	212
4.3.1. Συστήματα αμμοστροβίλου.....	215
4.3.1.α. Συστήματα συμπαγωγής με αμμοστρόβιλο αντιθλίψεως.....	215
4.3.1.β. Συστήματα συμπαγωγής με αμμοστρόβιλο απομαστεύσεως.....	216
4.3.1.γ. Συστήματα συμπαγωγής με αμμοστρόβιλο σε κύκλο βάσεως.....	217
4.3.2. Συστήματα αεριοστροβίλου.....	218
4.3.2.α. Συστήματα συμπαγωγής με αεριοστρόβιλο ανοιχτού κύκλου	218
4.3.2.β. Συστήματα συμπαγωγής με αεριοστρόβιλο κλειστού κύκλου	219
4.3.3. Συστήματα με εμβολοφόρες μηχανές εσωτερικής καύσεως	220
4.3.3.α. Βενζινοκινητήρες Otto αυτοκινήτων που έχουν μετατραπεί σε αεριομηχανές.....	220
4.3.3.β. Κινητήρες Diesel αυτοκινήτων που έχουν μετατραπεί σε αεριομηχανές.....	221
4.3.3.γ. Μηχανές Diesel παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας	221
4.3.4. Συστήματα συνδυασμένου κύκλου.....	222
4.3.5. Τυποποιημένες μικρές μονάδες συμπαγωγής.....	223
4.3.6. Άλλα συστήματα συμπαγωγής	224
4.3.6.α. Κύκλοι βάσεως με οργανικά ρευστά	224
4.3.6.β. Κυψέλες καυσίμου (fuel cells).....	225
4.3.6.γ. Μηχανές Stirling	226
4.4. Αποκεντρωμένα συστήματα Σ.Η.Θ.	227
4.4.1. Εναλλακτικοί αλγόριθμοι λειτουργίας αποκεντρωμένων συστημάτων Σ.Η.Θ.	227
4.5. Διασυνδεδεμένα συστήματα Σ.Η.Θ.	230
4.6. Παράδειγμα υπολογισμού: διασυνδεδεμένο σύστημα Σ.Η.Θ.	231
4.6.1. Απορριπτόμενη θερμότητα από τις θερμοηλεκτρικές μονάδες.....	231
4.6.2. Υπολογισμός εναλλακτών θερμότητας.....	237
4.6.3. Υπολογισμός δικτύου μεταφοράς.....	240
4.6.4. Τελική διάθεση θερμότητας.....	243

4.7. Συστήματα τριπαραγωγής.....	243
4.7.1. Εισαγωγή	243
4.7.2. Βασικές αρχές ψύξης με απορρόφηση.....	244
4.7.3. Ψύξη με απορρόφηση με συστήματα νερού – διαλύματος βρωμιούχου λιθίου (LiBr).....	247
4.7.4. Ψύξη με απορρόφηση με συστήματα Αμμωνίας - Νερού (NH ₃ - H ₂ O)	249
4.7.5. Λοιπός εξοπλισμός συστημάτων ψύξης απορρόφησης.....	250
4.7.6. Σύνοψη τεχνολογιών ψύξης με απορρόφηση	251
Αναφορές Κεφαλαίου	252
Κεφάλαιο 5: Υβριδικοί σταθμοί παραγωγής θερμικής ισχύος.....	253
5.1. Εισαγωγή	253
5.2. Ηλιακοί συλλέκτες.....	254
5.2.1. Ηλιακοί συλλέκτες χωρίς κάλυμμα	254
5.2.2. Επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες	256
5.2.3. Συλλέκτες κενού	259
5.2.4. Συγκεντρωτικοί συλλέκτες	260
5.2.4.α. Συγκεντρωτικοί συλλέκτες εστιακής γραμμής	262
5.2.4.β. Συγκεντρωτικοί συλλέκτες εστιακού σημείου.....	263
5.2.4.γ. Σύνθετοι παραβολικοί συλλέκτες (CPC)	263
5.3. Ενεργειακή ανάλυση επίπεδου ηλιακού συλλέκτη.....	265
5.3.1. Ο συντελεστής απωλειών θερμικής ισχύος F _R	266
5.3.2. Ο συντελεστής θερμικής διαπερατότητας U _L	268
5.3.3. Το γινόμενο διαπερατότητας – απορροφητικότητας (τα).....	270
5.3.4. Βαθμός απόδοσης ηλιακού συλλέκτη.....	274
5.3.4.α. Συντελεστής τροποποίησης γωνίας πρόσπτωσης	275
5.3.4.β. Σταθερά χρόνου συλλέκτη.....	277
5.3.5. Διαδικασία υπολογισμού θερμικής ισχύος ηλιακού συλλέκτη.....	278
5.3.6. Χαρακτηριστικά λειτουργίας ηλιακών συλλεκτών	289
5.3.7. Βέλτιστη κλίση ηλιακών συλλεκτών	293
5.4. Ενεργειακή ανάλυση συγκεντρωτικού ηλιακού συλλέκτη.....	297
5.4.1. Ολικός συντελεστής θερμικής διαπερατότητας U _L θερμικών απωλειών δέκτη.....	297
5.4.2. Παραγωγή ισχύος από συγκεντρωτικούς ηλιακούς συλλέκτες	302
5.4.3. Απορροφούμενη ακτινοβολία από συγκεντρωτικό ηλιακό συλλέκτη.....	305
5.4.4. Απορροφούμενη ακτινοβολία από σύνθετο συγκεντρωτικό ηλιακό συλλέκτη (CPC)	306
5.5. Αποθήκευση θερμικής ενέργειας.....	313
5.5.1. Αποθήκευση θερμότητας σε δεξαμενές νερού	314
5.5.2. Διαστρωματική αποθήκευση θερμότητας σε δεξαμενές νερού	318
5.6. Προσομοίωση λειτουργίας υβριδικών σταθμών θερμικής ισχύος.....	321
5.6.1. Συντελεστής εναλλάκτη θερμότητας	324
5.6.2. Απώλειες θερμότητας στα δίκτυα μεταφοράς	326
5.6.3. Διασύνδεση ηλιακών συλλεκτών.....	329
5.6.4. Αποθήκευση θερμότητας σε πολλαπλά θερμοδοχεία.....	332
Αναφορές Κεφαλαίου	335

Κεφάλαιο 6: Η ενέργεια ως καταναλωτικό αγαθό.....	336
6.1. Εισαγωγή	336
6.2. Πετρέλαιο και ανάπτυξη.....	338
6.2.1. Η πετρελαϊκή κρίση του 1973	338
6.2.2. Η κρατικοποίηση – εθνικοποίηση των αποθεμάτων πετρελαίου	339
6.2.2.α. Πολιτικό υπόβαθρο.....	339
6.2.2.β. Ιστορικό υπόβαθρο	340
6.2.3.γ. Οι αιτίες των εθνικοποιήσεων.....	341
6.2.3.δ. Οι συνέπειες των εθνικοποιήσεων	342
6.2.3.ε. Πετρέλαιο και ανάπτυξη ανά πετρελαιοπαραγωγό κράτος	343
6.3. Αναπτυξιακές προοπτικές μέσω της πυρηνικής ενέργειας.....	349
6.4. Α.Π.Ε. και ανάπτυξη.....	353
6.4.1. Η ανάπτυξη των Α.Π.Ε. στην Ελλάδα.....	354
6.4.1.α. Οι Α.Π.Ε. ως μοχλός ανάπτυξης	354
6.4.1.β. Η υφιστάμενη κατάσταση στην Ελλάδα.....	354
6.4.1.γ. Προτάσεις προς μεγιστοποίησης συμβολής Α.Π.Ε. στην εθνική ανάπτυξη.....	359
6.4.2. Το Σκανδιναβικό πρότυπο	361
6.5. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις θερμοηλεκτρικών σταθμών.....	366
6.6. Επιπτώσεις πυρηνικής ενέργειας	370
6.6.1. Πυρηνικά Απόβλητα.....	370
6.7.Επιπτώσεις αιολικών και φωτοβολταϊκών πάρκων	373
6.8. Επιπτώσεις υδροηλεκτρικών σταθμών	381
Αναφορές Κεφαλαίου	387

Πρόλογος

Από τη βιομηχανική επανάσταση και μετά, η ενέργεια υπήρξε, πέρα από φυσικό μέγεθος, εμπορεύσιμο αγαθό, βασικό για την ευημερία και την αρμονική συνύπαρξη των ανθρωπίνων κοινωνιών. Με την εξέλιξη της τεχνικής και τεχνολογικής προόδου, η εξάρτηση από τις ενεργειακές πηγές της υλοποίησης πλήθους δραστηριοτήτων, από τις πιο απλές καθημερινές εντός ενός νοικοκυριού, έως και την εκτέλεση διαστημικών επιχειρήσεων, έβαινε συνεχώς αυξανόμενη, οδηγώντας ταχέως στην εξάντληση των μη ανανεώσιμων ενεργειακών πόρων και στην , άνευ προηγουμένου, επιβάρυνση του περιβάλλοντος του πλανήτη. Οι δύο τελευταίες αρνητικές συνέπειες και η διαγραφόμενη αδυναμία ικανοποίησης των αυξανόμενων ενεργειακών αναγκών από τις «παραδοσιακές» ενεργειακές πηγές στο άμεσο μέλλον, αποτέλεσαν τα αναγκαία προαπαιτούμενα για την αναζήτηση εναλλακτικών τεχνολογιών παραγωγής των βασικών τελικών μορφών ενέργειας προς χρήση, δηλαδή της ηλεκτρικής, της μηχανικής και της θερμότητας. Οι τεχνολογίες αυτές σχεδόν στο σύνολό τους εμπίπτουν στην κατηγορία των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, με τις βασικότερες από αυτές, την αιολική ενέργεια και την ηλιακή ακτινοβολία, να χαρακτηρίζονται από ένα βασικό και σημαντικό μειονέκτημα: τη στοχαστική (τυχαία) διαθεσιμότητά τους. Προς άρση του μειονεκτήματος αυτού, αναπτύχθηκαν και αναπτύσσονται ακόμα διάφορες σχεδιαστικές λύσεις, με τις οποίες επιχειρείται η παραγωγή εγγυημένης ισχύος από την αρχική ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, μέσω της συνδυασμένης λειτουργίας της με μονάδες αποθήκευσης ενέργειας. Για τα νέα αυτά ενεργειακά συστήματα έχει επικρατήσει η ονομασία «υβριδικοί σταθμοί».

Στο παρόν σύγγραμμα παρουσιάζονται συμβατικά και «υβριδικά» συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας. Παρόλο που ο αρχικός σκοπός συγγραφής του ήταν να αποτελέσει βοήθημα για τη διδασκαλία του ομώνυμου μαθήματος, που διδάσκεται στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Τ.Ε.Ι. Κρήτης, η ύλη που τελικά ενσωματώθηκε υπερβαίνει κατά πολύ τις απαιτήσεις και τις προδιαγραφές ενός προπτυχιακού μαθήματος. Καθώς σε πολλά σημεία, ειδικά στα Κεφάλαια όπου παρουσιάζονται οι υβριδικοί σταθμοί ηλεκτρικής και θερμικής ισχύος, η παρουσιαζόμενη ύλη αποτελεί εξειδικευμένο αντικείμενο σύγχρονης έρευνας, η συγκεκριμένη ύλη σαφέστατα καλύπτει τις ανάγκες ενός εξειδικευμένου μαθήματος μεταπτυχιακού επιπέδου. Επίσης, καθώς η εν λόγω έρευνα συνεχώς εξελίσσεται, ακολουθώντας τα αποτελέσματα της τεχνολογικής προόδου σχετικά με τα διαθέσιμα μέσα παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές και αποθήκευσής της, η ύλη των συγκεκριμένων Κεφαλαίων θα χρειάζεται τακτικές αναβαθμίσεις. Τέλος, καθώς τα ερευνητικά αποτελέσματα που συνθέτουν το μεγαλύτερο μέρος του συγγράμματος είναι σύγχρονα, το σύγγραμμα δύναται να αποτελέσει σημείο αναφοράς για παλαιότερους αποφοίτους των Σχολών Μηχανολογίας και Ηλεκτρολογίας, προκειμένου να εμπλουτίσουν τις γνώσεις τους πάνω στο συγκεκριμένο γνωστικό αντικείμενο, αλλά και για εν ενεργεία ερευνητές, προκειμένου να εξελίξουν ακόμα περισσότερο τη μέχρι τώρα ερευνητική προσπάθεια και πρόδό τους..

Θερμές ευχαριστίες οφείλω να αποδώσω στον Καθηγητή του Τ.Ε.Ι. Κρήτης Χρηστάκη Δημήτρη, ο οποίος, πέρα της υλοκοτεχνικής υποδομής που μου παρείχε μέσω του Εργαστηρίου Αιολικής Ενέργειας του Τ.Ε.Ι. Κρήτης, ενίοτε αποτέλεσε πηγή έμπνευσης στις ερευνητικές και ακαδημαϊκές δραστηριότητές μου.

Ελπίδα και ευχή μου είναι το παρόν σύγγραμμα να ανταποκριθεί στις προσδοκίες των αναγνωστών του και να τους προσφέρει πολύτιμες γνώσεις. Τέλος θα γίνονταν ευπρόσδεκτες όποιες τυχόν υποδείξεις, διορθώσεις και παρατηρήσεις, αφού στόχος μου είναι η συνεχής αναβάθμιση της προσφερόμενης γνώσης και η προσφορά του καλύτερου δυνατού γνωστικού υλικού στους αναγνώστες αυτού του συγγράμματος.

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγικές έννοιες

1.1. Ενέργεια και ισχύς

1.1.1. Ενέργεια

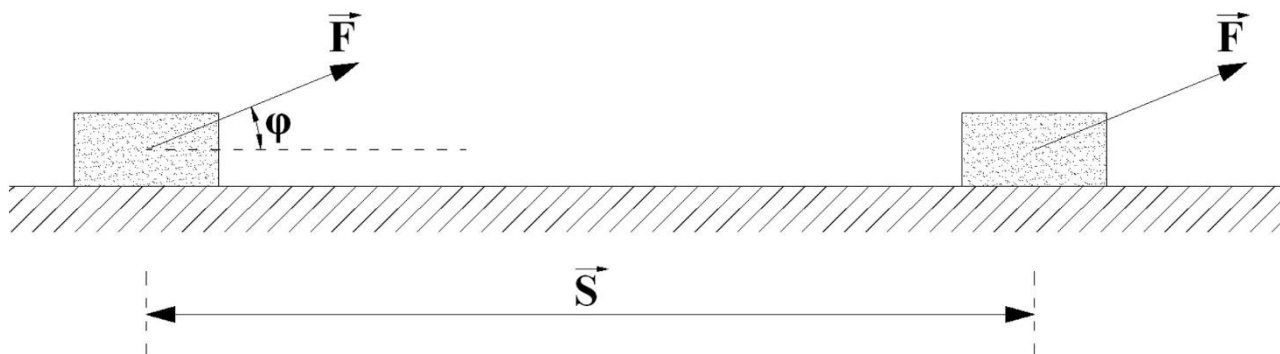
Η Ενέργεια είναι ένα από τα πιο διαδεδομένα φυσικά μεγέθη, ταυτόχρονα όμως και από τα πλέον απρόσιτα στις αισθήσεις μας και στην αντίληψή μας. Είναι το φυσικό μέγεθος που συνοδεύει απαραίτητα κάθε μεταβολή στο φυσικό κόσμο, από την πιο απλή, όπως το ρίξιμο μιας πέτρας, μέχρι τις πιο πολύπλοκες, όπως τα διάφορα βιολογικά φαινόμενα. Εντούτοις, είναι ένα μέγεθος που δε γίνεται αντιληπτό από τις αισθήσεις μας, όπως άλλα φυσικά μεγέθη, και συγκεκριμένα όπως η θερμοκρασία, ο όγκος ή το μήκος ενός σώματος. Αντίθετα με αυτά τα μεγέθη την ενέργεια δεν την βλέπουμε, δεν μπορούμε να την πιάσουμε, να την ακούσουμε ή να τη γευθούμε. Ο μόνος τρόπος με τον οποίο μπορεί να γίνει αντιληπτή η Ενέργεια είναι από τα αποτελέσματά της.

Τι είναι όμως Ενέργεια; Ποιον ορισμό θα μπορούσαμε να δώσουμε; Ένας ορισμός που καλύπτει σε μεγάλο ποσοστό την έννοια της Ενέργειας είναι ο ακόλουθος:

«Ενέργεια είναι η ικανότητα ενός σώματος ή συστήματος να παράγει έργο».

Αυτός είναι ο ορισμός της ενέργειας που, συνήθως, αναφέρεται στα κάθε είδους επιστημονικά ή εκπαιδευτικά συγγράμματα, στο διαδίκτυο κλπ. Πώς ακριβώς όμως αντιλαμβανόμαστε τον ορισμό της ενέργειας; Πριν επιχειρήσουμε να δώσουμε απάντηση στο ερώτημα αυτό, ας θυμηθούμε τι είναι έργο. Με βάση τη Μηχανική, που διδαχτήκαμε στις τάξεις του Γυμνασίου και του Λυκείου, όταν σε ένα σώμα ασκηθεί δύναμη \vec{F} και το μετατοπίσει κατά διάστημα \vec{S} , του οποίου η διεύθυνση σχηματίζει γωνία φ με τη διεύθυνση του διανύσματος \vec{F} , τότε παράγεται έργο που ισούται με το εσωτερικό γινόμενο των διανυσμάτων \vec{F} και \vec{S} (σχήμα 1.1):

$$W = |\vec{F}| \cdot |\vec{S}| \cdot \cos \varphi \quad (1.1)$$



Σχήμα 1.1: Παραγωγή έργου σε σώμα.

Οι μονάδες του έργου προκύπτουν από το αποτέλεσμα των πράξεων των μονάδων των μεγεθών στη σχέση ορισμού του, δηλαδή:

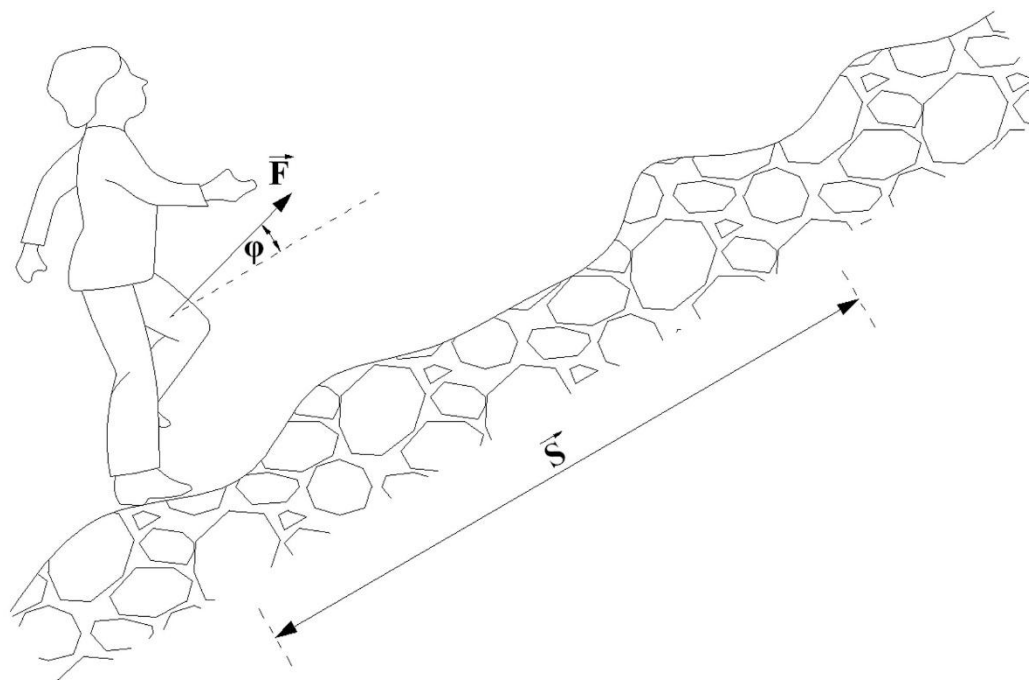
$$[W] = [F] \cdot [S] \Leftrightarrow [W] = \text{Nt} \cdot \text{m} = \text{Joule} \quad (1.2)$$

Συνεπώς το έργο μετράται σε μονάδες ενέργειας. Άρα έργο και ενέργεια είναι μεγέθη ισοδύναμα. Για την ακρίβεια, κάθε παραγωγή έργου από ένα σώμα προϋποθέτει τη διάθεση και την κατανάλωση ισόποσης τουλάχιστον ενέργειας στο σώμα.

Έχοντας πλέον θυμηθεί τον ορισμό του έργου και έχοντας ξεκαθαρίσει ότι η παραγωγή έργου από ένα σώμα συνεπάγεται τουλάχιστον ισόποση κατανάλωση ενέργειας, μπορούμε να επιχειρήσουμε να δώσουμε μία φυσική εξήγηση στον ορισμό της ενέργειας, που δόθηκε παραπάνω.

Ένα σώμα λοιπόν που κινείται παράγει έργο, και άρα πρέπει να διαθέτει, ή να του διατεθεί, τουλάχιστον ισόποση ενέργεια. Επομένως ένας άνθρωπος που περπατάει και διανύει ένα συγκεκριμένο διάστημα παράγει έργο, το οποίο σαφώς ισούται με το εσωτερικό γινόμενο του διαστήματος που διανύει επί μία συνισταμένη δύναμη που ασκείται πάνω στο ανθρώπινο σώμα. Στην προκειμένη περίπτωση, η δύναμη αυτή παράγεται από το μυϊκό σύστημα του ανθρώπου, κυρίως από τους μύες των ποδιών του, και είναι τόση, όση απαιτείται, για να υπερνικηθούν οι αντιστάσεις του εδάφους, της συνισταμένης του βάρους του σώματος στη διεύθυνση κίνησης, καθώς και οι αντιστάσεις του αέρα (σχήμα 1.2).

Πού βρέθηκε αυτή η ενέργεια; Προφανώς πρόκειται για ενέργεια που είτε έχει αποθηκεύσει ο ανθρώπινος οργανισμός με τη μορφή λίπους είτε έχει λάβει πρόσφατα από τροφές. Υπάρχει άρα περίπτωση ένα ανθρώπινο σώμα να μην μπορεί να παράγει έργο λόγω του ότι δεν έχει ικανή ποσότητα ενέργειας για το σκοπό αυτό; Σαφέστατα υπάρχει, αν και αυτές οι συνθήκες, η κατάσταση δηλαδή στην οποία ένα ανθρώπινο σώμα βρίσκεται σε τόσο υποβαθμισμένο ενεργειακό επίπεδο, ώστε να μην μπορεί να κινηθεί, στις ημέρες μας και στο γεωγραφικό χώρο στον οποίο ζούμε και δραστηριοποιούμαστε, δε μας είναι οικείες. Ωστόσο είναι σαφές ότι ένας ανθρώπινος οργανισμός που δεν τροφοδοτείται ενεργειακά για μεγάλο χρονικό διάστημα (ασιτία) κάποια στιγμή δε θα έχει ικανότητα εκτέλεσης οποιασδήποτε κίνησης, δηλαδή δε θα έχει την ικανότητα παραγωγής έργου. Άρα δε θα έχει ενέργεια.



Σχήμα 1.2: Παραγωγή έργου από ανθρώπινο σώμα σε κίνηση.

Κατά τρόπο ανάλογο με το ανθρώπινο σώμα, ένα αυτοκίνητο, που κινείται και διανύει μια απόσταση, παράγει έργο, που και πάλι προκύπτει από το εσωτερικό γινόμενο του διανύσματος που διήνυσε και της

συνισταμένης δύναμης που ασκείται σε αυτό (και πάλι για να υπερνικηθούν οι αντιστάσεις με το έδαφος, της συνισταμένης του βάρους και του αέρα). Στην περίπτωση του αυτοκινήτου η δύναμη που ασκείται σε αυτό προκύπτει από τον κινητήρα του. Το έργο παράγεται ως αποτελέσματα του ενεργειακού περιεχομένου που έχει διαθέσιμο το αυτοκίνητο, πρακτικά δηλαδή της ποσότητας και της θερμογόνου ικανότητας του καυσίμου στο ρεζερβουάρ του οχήματος. Προφανώς αυτοκίνητο με άδειο ρεζερβουάρ δεν μπορεί να κινηθεί, και άρα δεν έχει ικανότητα να παράγει έργο, ακριβώς επειδή δε διαθέτει καθόλου ενέργεια.

Ένα σώμα, που αφήνεται (χωρίς αρχική ώθηση) από το δώμα ενός κτηρίου να εκτελέσει ελεύθερη πτώση έως το επίπεδο του εδάφους, διανύει απόσταση ίση με το ύψος h του κτηρίου. Η δύναμη που θα ασκηθεί πάνω στο σώμα κατά την ελεύθερη πτώση είναι το βάρος \vec{B} του σώματος, και η δύναμη αυτή θα έχει την ίδια κατεύθυνση με το διάνυσμα της μετατόπισης (η γωνία φ θα ισούται με 0°). Αφού το σώμα μετακινείται παράγει έργο, που στην περίπτωση αυτή θα ισούται με:

$$W = |\vec{B}| \cdot |\vec{h}| \cdot \cos \varphi \Leftrightarrow W = m \cdot g \cdot h \cdot \cos 0^\circ \Leftrightarrow W = m \cdot g \cdot h \quad (1.3)$$

όπου m η μάζα του σώματος και g η επιτάχυνση της βαρύτητας. Στο σώμα αυτό δε δόθηκε αρχική ώθηση, ούτε κινήθηκε με τη βοήθεια κάποιου καυσίμου. Ποια ήταν λοιπόν η πηγή από την οποία διατέθηκε η απαιτούμενη ενέργεια για την παραγωγή του ανωτέρω έργου; Η απάντηση δίνεται από την ίδια τη σχέση 1.3 και δεν είναι άλλη από τη δυναμική ενέργεια λόγω του βαρυτικού πεδίου της γης, την οποία ενέργεια διαθέτει το σώμα που βρίσκεται στο δώμα του κτηρίου ως προς το επίπεδο του εδάφους. Πράγματι, το έργο που παράγεται ισούται ποσοτικά με τη δυναμική ενέργεια σώματος μάζας m που βρίσκεται σε ύψος h ως προς επίπεδο αναφοράς. Συνεπώς το έργο που παρήχθη στην προκειμένη περίπτωση οφείλεται σε αυτή ακριβώς τη δυναμική ενέργεια, και ισούται ποσοτικά με αυτή. Αυτή η δυναμική ενέργεια καταναλώθηκε όλη προς την παραγωγή ισόποσου έργου.

Η ενέργεια λοιπόν είναι ένα φυσικό μέγεθος που το αντιλαμβανόμαστε κυρίως από τα αποτελέσματά της. Θα μπορούσαμε να πούμε ότι είναι πολύ καλά κρυμμένη στα διάφορα σώματα, όπως ακριβώς το καύσιμο στο ρεζερβουάρ ενός αυτοκινήτου, και φανερώνεται, μόνο όταν τα σώματα αυτά μετέχουν σε διάφορες φυσικές ή χημικές μεταβολές. Κατά τις μεταβολές αυτές η ενέργεια μετατρέπεται συνήθως από μία μορφή σε άλλη, προκαλώντας αποτελέσματα αντιληπτά στο περιβάλλον. Κανένας δεν αντιλαμβάνεται, π.χ. τη δυναμική ενέργεια που περικλείει μια γλάστρα στο περβάζι ενός μπαλκονιού. Όταν όμως κάποιο αδέξιο χέρι την αναγκάσει να αλλάξει θέση και να προσγειωθεί στην οροφή ενός αυτοκινήτου, προκαλώντας σε αυτή βαθούλωμα, τότε η ενέργεια της γλάστρας γίνεται σίγουρα αντιληπτή από το αποτέλεσμα της.

1.1.2. Ισχύς

Ισχύς είναι ο ρυθμός μεταβολής της ενέργειας, δηλαδή ο ρυθμός με τον οποίο ένα σώμα, ή ένα σύστημα, παράγει, ή καταναλώνει ενέργεια:

$$P = \frac{dE}{dt} \quad (1.4)$$

Έχοντας εμπεδώσει την έννοια την ενέργειας, η έννοια της ισχύος φαίνεται περισσότερο προφανής, και μπορεί να αποδοθεί με σειρά παραδειγμάτων. Συγκεκριμένα δύο δρομείς με την ίδια ακριβώς σωματική διάπλαση και την ίδια μάζα που τρέχουν έναν αγώνα ταχύτητας, απόστασης π.χ. 100m, στο τέλος της διαδρομής θα έχουν διανύσει την ίδια ακριβώς απόσταση και, μέσω του μυϊκού συστήματός τους, θα έχουν ασκήσει στο σώμα τους την ίδια δύναμη (δεδομένου του ότι έχουν ίδια διάπλαση και μάζα). Συνεπώς θα παράγουν και οι δύο το ίδιο έργο, και άρα θα έχουν καταναλώσει την ίδια ακριβώς ενέργεια E , η οποία θα έχει μετατραπεί σε μηχανική ενέργεια E_m . Αν ο ένας από τους δύο έτρεξε την απόσταση γρηγορότερα, παρήγαγε τη μηχανική ενέργεια που απαιτήθηκε για τον αγώνα ταχύτητας σε λιγότερο χρόνο, έστω $t_1 < t_2$. Η μέση ισχύς, με την οποία έτρεξαν την απόσταση οι δύο δρομείς κατά τη διάρκεια του αγωνίσματος, θα δίνεται από τις σχέσεις:

$$P_1 = \frac{E_m}{t_1}$$

$$P_2 = \frac{E_m}{t_2}$$
(1.5)

Παίρνουμε ως δεδομένο ότι, όπως υποθέσαμε, $t_1 < t_2$, θα είναι $P_1 > P_2$. Δηλαδή ο ρυθμός (ισχύς) με τον οποίο ο γρηγορότερος δρομέας παράγαγε τη μηχανική ενέργεια E_m είναι μεγαλύτερος, κάτι που οφείλεται στην ικανότητα του μυϊκού συστήματός του. Για αυτό ακριβώς το λόγο διήνυσε πρώτος τη διαδρομή. Από το παράδειγμα αυτό εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι αγώνες ταχύτητας τελικά ανάγονται σε συναγωνισμό ισχύος των μυϊκών συστημάτων των αθλητών, δηλαδή ο αθλητής που θα κερδίσει θα είναι αυτός που διαθέτει το μυϊκό σύστημα με τη μεγαλύτερη ισχύ, δηλαδή με την ικανότητα να παράγει μηχανική ενέργεια σε συντομότερο χρόνο, δηλαδή με το μεγαλύτερο ρυθμό.

Σε ένα άλλο σχετικό παράδειγμα, έστω ότι θέλουμε να ζεστάνουμε μία συγκεκριμένη μάζα m νερού από αρχική θερμοκρασία T_1 (π.χ. θερμοκρασία νερού δικτύου ύδρευσης) σε τελική θερμοκρασία T_2 (π.χ. 80°C). Η ενέργεια Q που θα χρειαστεί για το σκοπό αυτό είναι ίση με:

$$Q = m \cdot c \cdot (T_2 - T_1)$$
(1.6)

όπου $c = 4,184\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ η ειδική θερμότητα του νερού.

Η ανωτέρω μάζα m νερού ζεσταίνεται δύο φορές εναλλακτικά με ίδια μαγειρικά σκεύη σε μία πηγή θερμικής ισχύος, π.χ. μία ηλεκτρική εστία, ξεκινώντας και τις δύο φορές από αρχική θερμοκρασία T_1 και καταλήγοντας σε τελική θερμοκρασία T_2 . Ωστόσο, την πρώτη φορά η πηγή θερμικής ισχύος χρησιμοποιείται στη μισή ένταση θέρμανσης και τη δεύτερη σε πλήρη ένταση θέρμανσης. Αγνοώντας, για χάρη του παραδείγματος, τις απώλειες θερμότητας προς τον περιβάλλοντα αέρα και προς το ίδιο το μαγειρικό σκεύος, η ενέργεια που θα χρειαστεί το νερό, για να ζεσταθεί και στις δύο περιπτώσεις, δίνεται από τη σχέση 1.6 και είναι η ίδια, αφού εξαρτάται από τις ιδιότητες του σώματος, στο οποίο θέλουμε να προσδώσουμε τη θερμότητα, από τη θερμοκρασιακή διαφορά ζεστού και κρύου νερού και από την ποσότητά του, δεδομένα, για τα οποία θα πρέπει να σημειωθεί ότι δεν αλλάζουν.

Είναι, ωστόσο, προφανές ότι στην πρώτη περίπτωση θα χρειαστεί περισσότερος χρόνος, για να ζεσταθεί το νερό από ό,τι στη δεύτερη, δηλαδή θα είναι $t_1 > t_2$. Τι αλλάζει λοιπόν μεταξύ των δύο περιπτώσεων, με δεδομένο ότι η συνολική ποσότητα ενέργειας που μεταφέρεται στο νερό είναι σταθερή; Προφανώς αλλάζει ο ρυθμός πρόσδοσης της ενέργειας αυτής, αφού στην πρώτη περίπτωση αυτός είναι πιο αργός από ό,τι στη δεύτερη, δηλαδή αλλάζει η θερμική ισχύς με την οποία η ενέργεια μεταφέρεται από την πηγή θέρμανσης προς το νερό. Στη δεύτερη μάλιστα περίπτωση είναι μεγαλύτερη.

Η ισχύς ενός σώματος, μίας μηχανής ή ενός συστήματος εκφράζει την ικανότητά του να μετατρέπει ενέργεια από μία μορφή σε μία άλλη με γρήγορο ή αργό ρυθμό. Στο παράδειγμα με τους δρομείς καταλήξαμε στο εύλογο συμπέρασμα ότι τελικά οι αγώνες ταχύτητας ανάγονται σε σύγκριση της ισχύος των μυϊκών συστημάτων των αθλητών. Άρα το μέγεθος που χαρακτηρίζει και κρίνει τον αθλητή είναι η ισχύς του μυϊκού συστήματός του και όχι η ενέργεια που θα καταναλώσει, τρέχοντας μία συγκεκριμένη απόσταση. Με την ίδια ακριβώς λογική, όλες οι μηχανές και τα ενεργειακά συστήματα χαρακτηρίζονται και ταξινομούνται με βάση το μέγιστο δυνατό ρυθμό με τον οποίο μπορούν να μετατρέπουν ενέργεια από τη μία μορφή στην άλλη, δηλαδή με βάση τη μέγιστη ισχύ τους, η οποία ονομάζεται *ονομαστική ισχύς*. Είναι δηλαδή η ισχύς αυτή που χαρακτηρίζει την ενεργειακή ιδιότητα ενός σώματος, και όχι η ενέργεια που μπορεί συνολικά να μετατρέψει.

Τούτο είναι εύλογο αν συγκρίνουμε ένα αυτοκίνητο με έναν άνθρωπο. Και οι δύο μπορούν να διανύσουν μία απόσταση 1.000m, είναι όμως σίγουρο ότι το αυτοκίνητο, παρόλο που είναι βαρύτερο, θα τη διανύσει πολύ πιο γρήγορα, δηλαδή θα παράγει περισσότερη μηχανική ενέργεια σε μικρότερο χρόνο. Είναι δεδομένο ότι άνθρωπος και αυτοκίνητο μπορούν να παράγουν τη μηχανική ενέργεια που απαιτείται για να καλύψουν το διάστημα των 1.000m. Δεν είναι όμως αυτή που χαρακτηρίζει την ικανότητά τους και την ταξινόμησή τους ως ενεργειακές μηχανές. Αντίθετα το μέγεθος αυτό θα είναι το πόσο γρήγορα μπορούν να διαθέσουν την ενέργεια αυτή, δηλαδή η ισχύς τους.

Η ικανότητα λοιπόν μίας ενεργειακής μηχανής εκφράζεται πάντα μέσω της ισχύος της και ποτέ μέσω της ενέργειας. Λέμε λοιπόν ότι ένα αυτοκίνητο έχει ισχύ 100HP, μία ντιζελογεννήτρια ισχύ 50MW και ένας καυστήρας κεντρικής θέρμανσης ισχύ 50.000kcal/h. Οι τιμές αυτές χαρακτηρίζουν τις μηχανές και τις συνοδεύουν ως ονομαστικά μεγέθη.

Είναι ευνόητο ότι δε θα είχε καμία λογική, αν αποδίδαμε την ενεργειακή ικανότητα μιας ντιζελογεννήτριας, λέγοντας, για παράδειγμα, ότι παράγει ηλεκτρική ενέργεια 100MWh. Τούτο δε θα έδινε ποτέ εικόνα για την ενεργειακή ικανότητα της μηχανής, αφού το ζητούμενο θα ήταν το χρονικό διάστημα που χρειάζεται η μηχανή, για να παράγει την ενέργεια αυτή. Αν, για παράδειγμα, η ονομαστική ισχύς της μηχανής είναι 50MW, τότε, για να παράγει τις 100MWh, θα χρειαστεί χρόνο ίσο με:

$$P_{el} = \frac{E_{el}}{t_1} \Leftrightarrow t_1 = \frac{E_{el}}{P_{el}} = \frac{100MWh}{50MW} \Leftrightarrow t_1 = 2h \quad (1.7)$$

Αν όμως η ισχύς της μηχανής ήταν 100kW, τότε, για να παραχθούν οι 100MWh, θα χρειαζόταν χρόνος ίσος με:

$$P_{el} = \frac{E_{el}}{t_2} \Leftrightarrow t_2 = \frac{E_{el}}{P_{el}} = \frac{100MWh}{100kW} \Leftrightarrow t_2 = 1.000h \quad (1.8)$$

Κάθε ενεργειακό σύστημα λοιπόν, τεχνητό ή φυσικό, χαρακτηρίζεται από την ισχύ του, δηλαδή την ικανότητα που έχει να μετατρέπει ενέργεια στη μονάδα του χρόνου. Μερικές ενδεικτικές τιμές ισχύος (βιολογικής, μηχανικής, ηλεκτρικής) παρουσιάζονται στον πίνακα 1.1:

Πίνακας 1.1: Τυπικές τιμές ισχύος βιολογικών και τεχνητών ενεργειακών συστημάτων.	
Έντομο που πετάει	0,001 W
Καρδιά του ανθρώπου	1 W
Άνθρωπος που εργάζεται	75 W
Ηλεκτρικός λαμπτήρας πυράκτωσης	100 W
Ηλεκτρικό ψυγείο	150 W
Άλογο που καλπάζει	1.000 W
Θερμοσίφωνας	3 kW
Κινητήρας αυτοκινήτου	75 kW
Κινητήρας αεροπλάνου Boeing 707	21 MW
Σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας Δ.Ε.Η. Πτολεμαΐδας	1.200 MW

1.1.3. Χρονική εξέλιξη ενέργειας και ισχύος

Κατά την εξέλιξη ενός φαινομένου μετατροπής ενέργειας, η ισχύς (ρυθμός μετατροπής) και η ενέργεια μεταβάλλονται. Ο ρυθμός μετατροπής της ενέργειας, δηλαδή η ισχύς, μπορεί να αυξομειώνεται. Άλλοτε η ενέργεια μπορεί να μετατρέπεται με γρηγορότερο και άλλοτε με πιο αργό ρυθμό, δηλαδή με υψηλότερη ή χαμηλότερη ισχύ. Ωστόσο, η ενέργεια, που μετατρέπεται από τη μία μορφή στην άλλη, πάντα θα αυξάνει, όσο το φαινόμενο εξελίσσεται. Άλλοτε θα αυξάνει γρηγορότερα και άλλοτε πιο αργά, ανάλογα με την ισχύ μετατροπής.

Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα ενός ποδηλάτου γυμναστικής, ή παρεμφερούς οργάνου, σε ένα γυμναστήριο. Όσοι έχουν γυμναστεί, χρησιμοποιώντας ένα τέτοιο όργανο, θα έχουν ασφαλώς παρατηρήσει ότι το όργανο αυτό παρέχει ένα σύνολο από ηλεκτρονικές ενδείξεις που δίνουν πληροφορίες για το πρόγραμμα εκγύμνασης. Ανάμεσα σε αυτές, σε ένα πεδίο, παρέχεται ενίοτε πληροφορία με το σύμβολο «W», ενώ σε ένα άλλο πεδίο παρέχεται πληροφορία με το σύμβολο «kcal». Όπως θα δούμε στην επόμενη ενότητα, το σύμβολο «W» συμβολίζει τη γνωστή μονάδα μέτρησης ισχύος, το Watt, ενώ το σύμβολο kcal συμβολίζει μια μονάδα μέτρησης ενέργειας, τη χιλιοθερμίδα. Προφανώς στα πεδία αυτά παρουσιάζεται η τρέχουσα ισχύς με την οποία γυμνάζεται ο χρήστης του οργάνου, η οποία δεν είναι άλλη από την

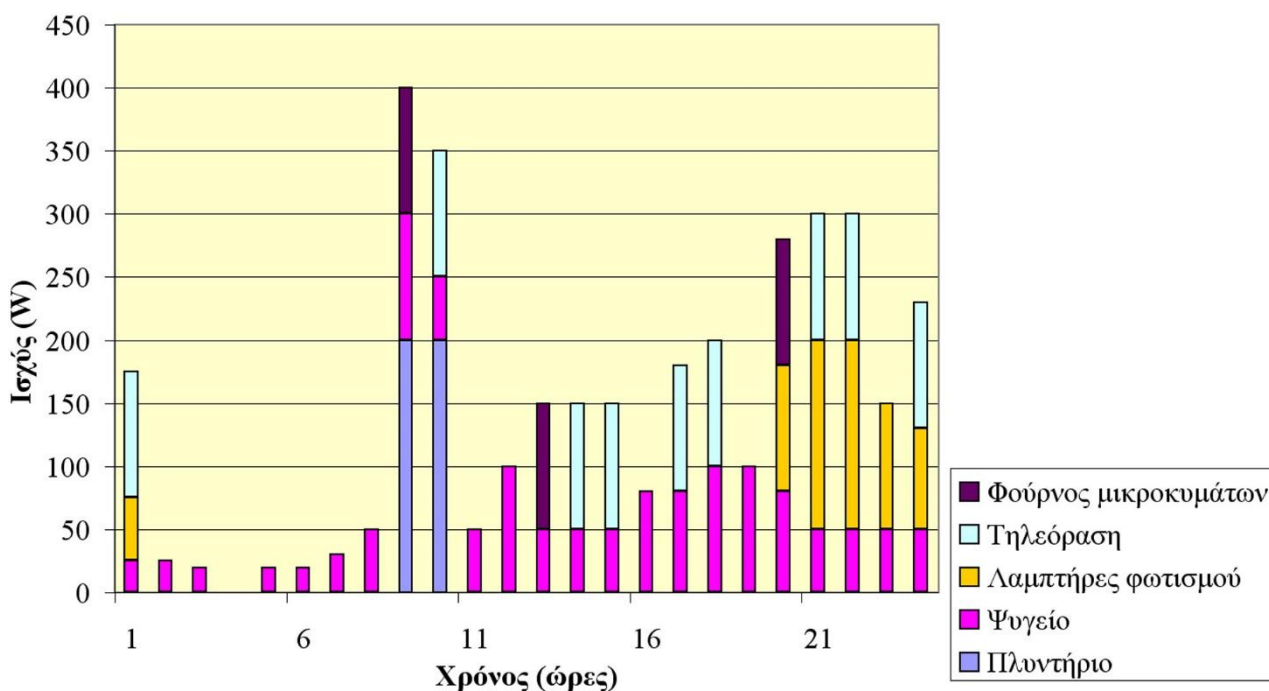
αποδιδόμενη μηχανική ισχύ του μυϊκού συστήματός του, κυρίως των μυών των ποδιών του, καθώς και η συνολική ενέργεια, που, στην εκάστοτε χρονική στιγμή, έχει καταναλώσει ο χρήστης από την αρχή του χρόνου εκγύμνασης. Κατά τη διάρκεια της εκγύμνασης η ένδειξη στο πεδίο με το σύμβολο «W», δηλαδή η ισχύς με την οποία γυμνάζεται ο χρήστης, μπορεί να αυξάνεται ή να μειώνεται, ανάλογα με την ένταση εκγύμνασης. Αύξηση της μηχανικής ισχύος του χρήστη συνεπάγεται αύξηση των παλμών της καρδιάς του, όπως ακριβώς η αύξηση της ισχύος σε ένα αυτοκίνητο συνεπάγεται την αύξηση των στροφών του κινητήρα. Αντίθετα η ένδειξη στο πεδίο με το σύμβολο «kcal», δηλαδή η συνολική ενέργεια που έχει καταναλώσει ο χρήστης από την αρχή του χρόνου εκγύμνασης, συνεχώς θα αυξάνεται. Όταν η ισχύς εκγύμνασης είναι υψηλή, η ένδειξη της καταναλωθείσας ενέργειας θα αυξάνεται γρηγορότερα, και αντίστροφα. Αν ο χρήστης ολοκληρώσει το πρόγραμμά του, η ένδειξη ισχύος θα μηδενιστεί, ενώ η ένδειξη της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας θα παραμείνει σταθερή και θα παρουσιάσει τη συνολική ενέργεια που καταναλώθηκε καθ' όλη τη διάρκεια εκγύμνασης.

Στο σχήμα 1.3 παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας σε μία οικιακή και για ένα εικοσιτετράωρο. Οι τιμές της ισχύος αντιστοιχούν σε ωριαία χρονικά διαστήματα και παρουσιάζουν τις μέσες τιμές με τις οποίες οι ηλεκτρικές συσκευές λειτούργησαν την εκάστοτε ώρα του εικοσιτετράωρου.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.3, η ισχύς κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας αυξομειώνεται κατά τη διάρκεια του εικοσιτετράωρου, παρουσιάζοντας ελάχιστη τιμή (0W) την τέταρτη πρωινή ώρα και φτάνοντας στη μέγιστη τιμή της (450W) τη δέκατη πρωινή ώρα. Την πρώτη ώρα του εικοσιτετράωρου η κατανάλωση ηλεκτρικής ισχύος καταγράφηκε ίση με 275W. Η ενέργεια που καταναλώθηκε την ώρα αυτή θα ισούται με:

$$P_{el} = \frac{E_{el}}{t} \Leftrightarrow E_{el} = P_{el} \cdot t \Leftrightarrow E_{el} = 275W \cdot 1h = 275Wh \quad (1.9)$$

Η ενέργεια αυτή παριστάνεται γραφικά με το εμβαδό της πρώτης στήλης στο διάγραμμα, ύψους 275W και πλάτους 1h. Αντίστοιχα υπολογίζεται η ηλεκτρική ενέργεια που θα καταναλωθεί τη δεύτερη, την τρίτη ώρα κλπ, η οποία θα παριστάνεται γραφικά από το εμβαδό της δεύτερης, τρίτης στήλης κλπ. Το εμβαδό της κάθε στήλης, προστιθέμενο στο συνολικό εμβαδό των προηγούμενων στηλών, θα δίνει τη συνολική ενέργεια που έχει καταναλωθεί έως την αντίστοιχη ώρα του εικοσιτετράωρου, η οποία, προϊόντος του χρόνου, θα αυξάνεται διαρκώς, ανεξάρτητα από το αν η ισχύς κατανάλωσης μειώνεται ή αυξάνεται.



Σχήμα 1.3: Διακύμανση κατανάλωσης ηλεκτρικής ισχύος σε ένα εικοσιτετράωρο σε μία οικιακή.

Η συνολική ενέργεια που καταναλώθηκε σε όλο το εικοσιτετράωρο θα προκύπτει από το άθροισμα των γινομένων ισχύος και χρόνου σε όλες τις ώρες του εικοσιτετράωρου, και θα παριστάνεται γραφικά από το συνολικό εμβαδό των στηλών του διαγράμματος:

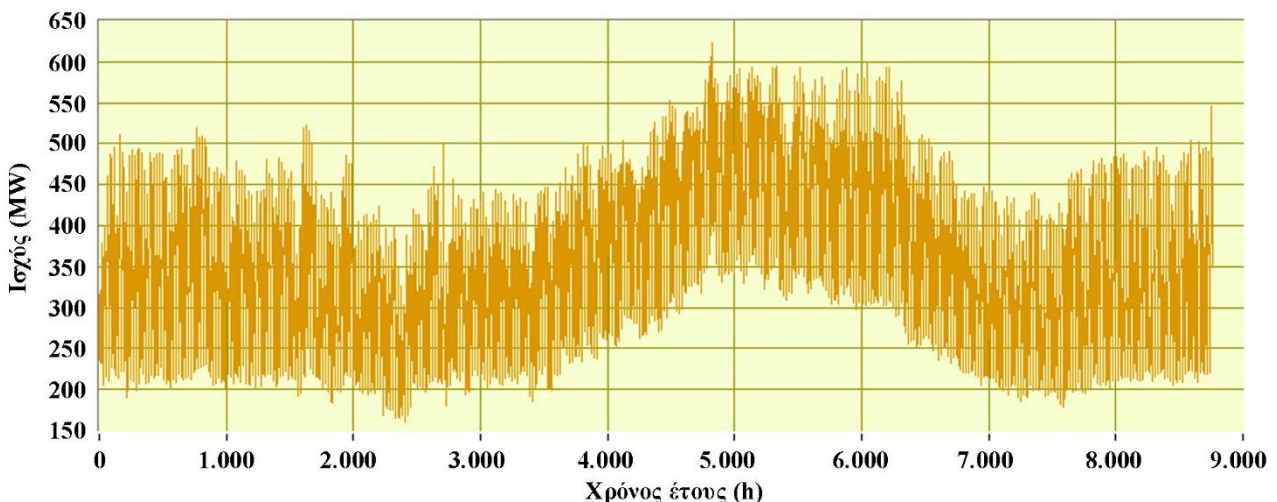
$$E_{24h} = \sum_{i=1}^{24} P_i \cdot t \Leftrightarrow E_{24h} = t \cdot \sum_{i=1}^{24} P_i, \text{ όπου } t = \text{const.} = 1h \quad (1.10)$$

Η τελευταία σχέση αποτελεί την αριθμητική έκφραση της γνωστής αναλυτικής σχέσης:

$$E_{24h} = \int_{t=0}^{24h} P(t) \cdot dt \quad (1.11)$$

σύμφωνα με την οποία η συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στο εικοσιτετράωρο αποτελεί το ολοκλήρωμα της συνάρτησης μεταβολής κατανάλωσης ηλεκτρικής ισχύος $P(t)$ συναρτήσεως του χρόνου, ως προς το χρόνο. Η ενέργεια αυτή θα παριστάνεται γραφικά στο διάγραμμα $P(t) - t$ με το συνολικό εμβαδό που περικλείεται μεταξύ των χρονικών ορίων ολοκλήρωσης $t=0$ και $t=24h$, του άξονα των x και της καμπύλης $P(t)$.

Στο σχήμα 1.4 παρουσιάζεται η διακύμανση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ισχύος στο μη διασυνδεδεμένο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας της Κρήτης το 2011.



Σχήμα 1.4: Διακύμανση κατανάλωσης ηλεκτρικής ισχύος κατά τη διάρκεια του 2011 στην Κρήτη.

Από το σχήμα αυτό μπορούμε να παρατηρήσουμε το πώς οι ανθρώπινες δραστηριότητες, και κατ' επέκταση οι οικιακές και επαγγελματικές δραστηριότητες στο νησί, καθορίζονται σε μεγάλο βαθμό από τα κλιματικά δεδομένα στην κάθε εποχή του έτους, επιδρούν στη διαμόρφωση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ισχύος. Είναι λοιπόν ευδιάκριτη η αύξηση στην κατανάλωση ηλεκτρικής ισχύος που σημειώνεται κατά τη θερινή περίοδο, λόγω, προφανώς, της ενεργοποίησης της τουριστικής δραστηριότητας στο νησί. Την περίοδο αυτή η ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος παρουσιάζει τη μέγιστη ετήσια τιμή της, η οποία κατά το μελετούμενο έτος διαμορφώθηκε στα 559,30MW. Οι ήπιες καιρικές συνθήκες, που καταγράφονται την άνοιξη και το φθινόπωρο, προκαλούν την ελαχιστοποίηση στη ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος. Η ετήσια ελάχιστη τιμή ζήτησης ηλεκτρικής ισχύος τη συγκεκριμένη χρονιά διαμορφώθηκε στα 143,80MW. Τέλος, κατά τη χειμερινή περίοδο, η χρήση κλιματιστικών συσκευών για θέρμανση χώρων, καθώς και η γεωργική δραστηριότητα παραγωγής ελαιολάδου, που συνεπάγεται τη λειτουργία των εργοστασίων άλεσης με σημαντική εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύ μηχανημάτων, προκαλεί αύξηση στη ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος σε σχέση με την άνοιξη και το φθινόπωρο. Όπως και στο προηγούμενο παράδειγμα, το συνολικό εμβαδό κάτω από την καμπύλη της διακύμανσης ηλεκτρικής ισχύος παριστάνει γραφικά τη συνολική ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώθηκε όλο το έτος στο νησί, η οποία έφτασε στις 2.757.804,25MWh.

1.1.4. Μονάδες ενέργειας και ισχύος

Η μονάδα της ενέργειας στο διεθνές σύστημα είναι το Joule ,και προκύπτει από τον ορισμό του έργου, δεδομένης της ισοδυναμίας έργου και ενέργειας. Ένα Joule ισούται με το έργο που παράγεται, ή με την ενέργεια που πρέπει να δαπανηθεί για την παραγωγή του έργου αυτού, όταν δύναμη 1Nt ασκείται πάνω σε σώμα και το μετακινεί κατά απόσταση 1m. Είναι λοιπόν:

$$1 \text{ Joule} = 1 \text{ Nt} \cdot 1 \text{ m} \Leftrightarrow 1 \text{ Joule} = 1 \text{ kg} \cdot 1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 1 \text{ m} \Leftrightarrow 1 \text{ Joule} = 1 \text{ kg} \cdot 1 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \quad (1.12)$$

Η μονάδα της ισχύος στο διεθνές σύστημα είναι το Watt, και προκύπτει από τη σχέση μεταξύ ισχύος και ενέργειας. Έτσι 1 Watt είναι η ισχύς με την οποία ενέργεια μετατρέπεται με ρυθμό 1Joule/s:

$$1 \text{ Watt} = \frac{1 \text{ Joule}}{1 \text{ s}} \quad (1.13)$$

Το πλήθος και η ποικιλία των ενεργειακών συστημάτων στον τεχνητό και φυσικό κόσμο και τα διαφορετικά μεγέθη τους επιβάλλουν τη χρήση διαφορετικών μονάδων ενέργειας, προκειμένου η μέτρηση των εμφανιζόμενων μεγεθών να αποδίδεται αριθμητικά με νούμερα, που είναι εύληπτα στην ανθρώπινη αντίληψη.

Η πιο διαδεδομένη, ίσως, μορφή ενέργειας είναι η ηλεκτρική. Η μονάδα που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της ηλεκτρικής ενέργειας είναι η Wh (βατώρα) και τα πολλαπλάσια αυτής. Η ισοδυναμία Wh και Joule προκύπτει ως εξής:

$$1 \text{ Joule} = 1 \text{ Watt} \cdot 1 \text{ s} \Leftrightarrow 1 \text{ Joule} = 1 \text{ Watt} \cdot \frac{1}{3.600} \text{ h} \Leftrightarrow \quad (1.14)$$

$$3.600 \text{ Joule} = 1 \text{ Watt} \cdot 1 \text{ h} \Leftrightarrow 1 \text{ Wh} = 3.600 \text{ Joule}$$

Από την ανωτέρω σχέση προκύπτουν τα πολλαπλάσια της Wh, που συνήθως χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της ηλεκτρικής ενέργειας:

1 kWh (κιλοβατώρα)	: $10^3 \text{ Wh} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Joule}$
1 MWh (μεγαβατώρα)	: $10^6 \text{ Wh} = 3,6 \cdot 10^9 \text{ Joule}$
1 TWh (τετραβατώρα)	: $10^9 \text{ Wh} = 3,6 \cdot 10^{12} \text{ Joule}$

Η εισαγωγή της kWh για τη μέτρηση της ηλεκτρικής ενέργειας είναι εύλογη, και προκύπτει από την ισχύ των ηλεκτρικών συσκευών, που, συνήθως, χρησιμοποιούνται από τους καταναλωτές, και από το μέγεθος της καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας που αυτή συνεπάγεται. Για παράδειγμα, ένα μέσο ελληνικό νοικοκυριό μπορεί να καταναλώσει κάποιο μήνα 300kWh. Αν για τη μέτρηση της ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούσαμε το Joule, η ίδια ποσότητα ενέργειας θα μετρούταν ίση με $1.080 \cdot 10^6 \text{ Joule}$, δηλαδή περίπου 1 δις Joule, νούμερο που είναι πολύ πιο δύσκολο να εκφραστεί και να γίνει αντιληπτό από την ανθρώπινη νου. Το γεγονός ότι η kWh είναι πιο κοντά στα ανθρώπινα μέτρα έχει να κάνει με το ότι αποτελεί το γινόμενο του kW, μονάδας ισχύος δηλαδή που προσεγγίζει περισσότερο την εγκατεστημένη ισχύ σε μια οικιακή, με την h, χρονικού διαστήματος που προσεγγίζει περισσότερο το ανθρώπινο χρονικό μέτρο (λέμε π.χ. ότι ένα ακαδημαϊκό μάθημα διαρκεί δύο ώρες). Σε αντίθεση το Joule, γινόμενο του Watt με το sec, αποτελεί μικρή μονάδα, για να περιγράψει το μέγεθος των καταναλώσεων ηλεκτρικής ενέργειας από τις ανθρώπινες δραστηριότητες.

Αυτό που θα πρέπει να σημειωθεί εδώ, παρατηρώντας τις σχέσεις 1.14, είναι ότι το Joule αποτελεί το γινόμενο Watt επί sec, ενώ η kWh αποτελεί το γινόμενο kW επί h. Δηλαδή και στις δύο περιπτώσεις η εκάστοτε μονάδα ενέργειας αποτελεί το γινόμενο κάποιας μονάδας ισχύος (W ή kW) και κάποιας μονάδας χρόνου (sec ή h).

Αυτός είναι ένας γενικός κανόνας, που θα πρέπει να γίνει κατανοητός:

το γινόμενο μονάδας ισχύος επί μονάδα χρόνου δίνει πάντα μονάδα ενέργειας.

Μία άλλη σημαντική μονάδα ενέργειας, που συνεχίζει να χρησιμοποιείται σε αρκετές περιπτώσεις, είναι η θερμίδα (cal), ή το πολλαπλάσιό της, η χιλιοθερμίδα (kcal). Η θερμίδα είναι μία μονάδα μέτρησης ενέργειας (διεθνώς *calorie*, από το γαλλικό όρο, που προέρχεται από τη λατινική λέξη *calor*, που σημαίνει θερμότητα και αυτή από το ρήμα *calere*, που σημαίνει ζεσταίνω). Η θερμίδα (ή μικρή θερμίδα) είναι η ενέργεια που απαιτείται, για να αυξηθεί η θερμοκρασία 1gr καθαρού και αποσταγμένου νερού κατά 1°C, με τη σημείωση ότι η μεταβολή αυτή πρέπει να γίνει μεταξύ των 15 και 16°C. Η θερμότητα αυτή ισούται περίπου με 4,184Joule, δηλαδή:

$$1\text{cal} = 4,184\text{Joule} \quad (1.15)$$

Στις ανθρώπινες εφαρμογές και δραστηριότητες συνήθως χρησιμοποιείται η χιλιοθερμίδα (ή μεγάλη θερμίδα), η οποία είναι η ενέργεια που απαιτείται, για να αυξηθεί η θερμοκρασία ενός kg νερού κατά 1°C. Οι σχέσεις (1.16) είναι άμεση συνέπεια της ισοδυναμίας της σχέσης 1.15:

$$\begin{aligned} 1\text{kcal} &= 1.000\text{cal} \\ 1\text{kcal} &= 4,184\text{kJoule} \end{aligned} \quad (1.16)$$

Η kcal χρησιμοποιείται για τη μέτρηση θερμότητας που απαιτείται για θέρμανση χώρων, για παραγωγή ζεστού νερού κλπ. Επίσης είναι η μονάδα που χρησιμοποιείται, για να περιγράψει την κατανάλωση ενέργειας από το ανθρώπινο σώμα, καθώς και την ενέργεια που ο ανθρώπινος οργανισμός προσλαμβάνει με τις τροφές. Ένας άνθρωπος ηλικίας περίπου 40 ετών, με βάρος γύρω στα 80kg και με μία μέση ημερήσια αστική δραστηριότητα (καθιστική εργασία, χωρίς ιδιαίτερη σωματική δραστηριότητα) καταναλώνει ημερησίως ενέργεια περίπου ίση με 2.000kcal. Σε αντιδιαστολή, ένας άνθρωπος που αθλείται, τρέχοντας με μέση ένταση επί μία ώρα μπορεί να καταναλώσει 500 – 1.000kcal, ενώ κατά τη διάρκεια ενός ποδοσφαιρικού αγώνα, ένας ποδοσφαιριστής θα καταναλώσει περίπου 1.500kcal – 2.000kcal. Από τα νούμερα αυτά γίνεται κατανοητό το πόσο σημαντική είναι η σωματική δραστηριότητα στην απόκτηση αλλά και στη διατήρηση καλής φυσικής κατάστασης.

Πέρα από τις ανωτέρω μονάδες ενέργειας, που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση δύο χαρακτηριστικών μορφών ενέργειας που απαντώνται στις ανθρώπινες δραστηριότητες (ηλεκτρική και θερμική), το πλήθος των ενεργειακών φαινομένων μεταφοράς στον πλανήτη επιβάλλει τον ορισμό πρόσθετων μονάδων ενέργειας.

Έτσι στο μικρόκοσμο της πυρηνικής σχάσης η μονάδα ενέργειας που χρησιμοποιείται, για να περιγράψει τη θερμότητα που απελευθερώνεται κατά τη σχέση ενός πυρήνα πυρηνικού καυσίμου είναι το ηλεκτρονιοβόλτ (eV), το οποίο γενικά χρησιμοποιείται, κυρίως, σε ατομικό και υποατομικό επίπεδο. Ένα eV εκφράζει το ποσό της κινητικής ενέργειας που αποκτά ένα μη δεσμικό ηλεκτρόνιο, καθώς περνά από ηλεκτροστατική διαφορά δυναμικού ενός volt στο κενό. Η ισοδυναμία του με το Joule είναι:

$$1\text{eV} = 1,6021765314 \cdot 10^{-19}\text{Joule} \quad (1.17)$$

Κατά τη σχάση ενός πυρήνα U235, απελευθερώνεται ενέργεια με τη μορφή θερμότητας ίση με 180MeV.

Δύο ακόμα μονάδες ενέργειας, που θα συναντήσουμε, είναι οι εξής:

- Btu (British thermal units): Πρόκειται για παραδοσιακή μονάδα μέτρησης του αγγλοσαξονικού συστήματος, η οποία ισούται με 1.054,35Joule. Είναι η ποσότητα ενέργειας που απαιτείται, για να ψυχθεί ή να ζεσταθεί ποσότητα μάζας νερού ίση με μία λίβρα (pound) κατά ένα βαθμό Fahrenheit.
- Τόνος Ισοδύναμος Πετρελαίου (T.I.P.) (Tonne of Oil Equivalent – toe): Η ποσότητα της ενέργειας που απελευθερώνεται κατά την καύση ενός τόνου αργού πετρελαίου. $1\text{toe} = 41,86 \cdot 10^9\text{Joule}$.

Στον πίνακα 1.2 συνοψίζονται οι μονάδες ενέργειας, που παρουσιάστηκαν ανωτέρω, και οι ισοδυναμίες τους με το Joule.

Πίνακας 1.2: Μονάδες ενέργειας και ισοδυναμίες με το Joule.	
Μονάδες μέτρησης ενέργειας	Ισοδυναμία με Joule
Joule	-
cal / kcal	1cal = 4,184Joules / 1kcal = 4,184kJoules
kWh	1kWh = 3.600.000Joules
Btu	1Btu = 1.054,35Joules
toe	1toe = 41,86·10 ⁹ Joules
eV	1 eV = 1,6021765314·10 ⁻¹⁹ Joules

Από τις ανωτέρω μονάδες ενέργειας προκύπτουν και οι βασικές μονάδες ισχύος. Στον τομέα της παραγωγής και κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται, ανάλογα με το μέγεθος του ηλεκτρικού συστήματος, τα πολλαπλάσια του Watt:

- 1 kW = 10³Watt
- 1 MW = 10⁶Watt
- 1 GW = 10⁹Watt
- 1 TW = 10¹²Watt.

Επίσης, από τις μονάδες Btu και kcal προκύπτουν αντίστοιχες μονάδες ισχύος:

- Btu/h = 0,293071 Watt
- kcal/h = 1,16222 Watt.

Οι ανωτέρω ισοδυναμίες προκύπτουν εύκολα, αν γνωρίζουμε τις αντίστοιχες ισοδυναμίες των εμφανιζόμενων μονάδων ενέργειας. Για παράδειγμα:

$$1 \frac{\text{kcal}}{\text{h}} = \frac{4,184\text{kJoule}}{3.600\text{s}} = 1,162222 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kJoule}}{\text{s}} \Leftrightarrow \quad (1.18)$$

$$1 \frac{\text{kcal}}{\text{h}} = 1,162222 \cdot 10^{-3} \text{kW} = 1,162222 \text{W}$$

Από τις ανωτέρω σχέσεις παρατηρούμε ότι οι διάφορες μονάδες ισχύος προκύπτουν ως το πηλίκο μιας μονάδας ενέργειας (Joule ή Btu ή kcal) με μία μονάδα χρόνου (h ή sec). Αυτός είναι, επίσης, ένας κανόνας, ο οποίος θα πρέπει να γίνει κατανοητός, δηλαδή:

το πηλίκο μονάδας ενέργειας προς μονάδα χρόνου δίνει πάντα μονάδα ισχύος.

Για την ισχύ χρησιμοποιείται ακόμα μία μονάδα, που στην ελληνική γλώσσα μεταφράζεται ως «ίππος». Η μονάδα αυτή δεν προκύπτει από το πηλίκο κάποιων από τις ανωτέρω μονάδες ενέργειας με κάποια μονάδα χρόνου, αλλά έχει προκύψει κυρίως ως κληρονομιά παλαιότερων μεθόδων μέτρησης ισχύος.

Η μονάδα «ίππος» συμβολίζεται με HP από τα αρχικά των λέξεων «Horse Power». Η ισοδυναμία της με το Watt είναι 1 HP = 746 Watts. Ο όρος εισήχθη στα τέλη του 18^{ου} αιώνα από το σκοτσέζο μηχανικό James Watt, προκειμένου να συγκρίνει την εξερχόμενη ισχύ από μία ατμομηχανή με την ισχύ ενός αλόγου. Αργότερα η μονάδα αυτή χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση ισχύος σε άλλες εμβολοφόρες μηχανές ή στροβιλομηχανές. Ο ορισμός της μονάδας αυτής μπορεί να διαφέρει ανά γεωγραφική περιοχή. Έτσι ο γερμανικός ορισμός της μονάδας χρησιμοποιεί το συμβολισμό PS από τη λέξη Pferdestärke (ιπποδύναμη). Οι μονάδες HP και PS δεν είναι ακριβώς ίσες μεταξύ τους. Συγκεκριμένα 1 PS = 736 Watts, οπότε 1 HP = 1,015 PS.

Στον πίνακα 1.3 συνοψίζονται οι βασικές μονάδες ισχύος, που παρουσιάστηκαν ανωτέρω, και οι ισοδυναμίες τους με το Watt.

<i>Πίνακας 1.3: Μονάδες ισχύος και ισοδυναμίες με το Watt.</i>	
Μονάδες μέτρησης ισχύος	Ισοδυναμία με Watt
Watt	-
kcal/h	1kcal/h = 1,16222Watts
Btu/h	1Btu/h = 0,293071Watts
HP	1 HP = 746 Watts
PS	1 PS = 736 Watts

1.2. Ταξινόμηση των μορφών ενέργειας

1.2.1. Ιστορική αναδρομή

Η ανάγκη για την ταξινόμηση των μορφών ενέργειας προέκυψε από τις αρχές του 19^{ου} αιώνα, όταν διακεκριμένοι φυσικοί συνειδητοποίησαν ότι η κατηγοριοποίηση των φαινομένων και η οργάνωσή τους σε τάξεις είναι δυνατό να επιτρέψουν την ανακάλυψη νέων αντικειμένων και φαινομένων στη φύση. Έτσι το 1842 ο Βρετανός φυσικός Sir William Grove (1811 – 1896) ήταν από τους πρώτους που ταξινόμησε τις δυνάμεις σε κίνηση (motion), θερμότητα (heat), φως (light), ηλεκτρισμό (electricity), μαγνητισμό (magnetism) και χημική αλληλεπίδραση (chemical affinity), η οποία αναφέρεται στην τάση που αναπτύσσεται μεταξύ των χημικών στοιχείων και τα οδηγεί σε μεταξύ τους αντιδράσεις.

Οι Helmholtz και Gibbs απέδειξαν αργότερα ότι η χημική αλληλεπίδραση καθορίζεται και προκύπτει από την «ελεύθερη ενέργεια» ενός συστήματος, δηλαδή από το ποσοστό της ελεύθερης ενέργειας ενός συστήματος, που μπορεί να μετατραπεί σε έργο κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες.

Ο Helmholtz, επίσης, ταξινόμησε τις δυνάμεις του Mayer (βαρυτική, μηχανική, θερμική, μαγνητική, ηλεκτρική και χημική) σε τάσεις (tension) και δυνάμεις κίνησης (animate forces).

Ο Σκοτσέζος μηχανικός και φυσικός William Rankine (1820 – 1872) χρησιμοποίησε άλλη ορολογία. Διαίρεσε την ενέργεια σε δυναμική (potential) και πραγματική (actual), και πρόσθεσε τη θερμότητα ακτινοβολίας (radiant heat), το φως (light) και το στατικό ηλεκτρισμό (static electricity) στην ταξινόμηση του Helmholtz. Αξίζει να σημειωθεί ότι 100 χρόνια αργότερα, οι περίφημες διαλέξεις του Feynman προσέθεσαν μόνο την πυρηνική (nuclear) ενέργεια και την ενέργεια της μάζας (energy of the mass) στην τελευταία ταξινόμηση.

Όλες αυτές οι προσπάθειες ταξινόμησης έγιναν σε ένα ερευνητικό περιβάλλον ραγδαία αναπτυσσόμενο και εξελισσόμενο. Πλήθος σπουδαίων επιστημόνων, κυρίως φυσικών και μηχανικών, των οποίων τα ονόματα έμειναν στην ιστορία της επιστήμης, συνέδραμε στην ανακάλυψη σημαντικών φαινομένων και στην ανάπτυξη νέων θεμελιωδών θεωριών στον τομέα της ενέργειας. Ενδεικτικά αναφέρονται οι παρακάτω επιστημονικές εξελίξεις που καταγράφηκαν από το 19^ο αιώνα και έπειτα:

- Ο Maxwell διαμόρφωσε τις περίφημες εξισώσεις του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και ανακάλυψε την ηλεκτρομαγνητική φύση του φωτός.
- Ο Maxwell επίσης, μαζί με τους Thomson, Boltzmann, Clausius, ανακάλυψαν τη μοριοκινητική θεωρία.
- Οι Carnot, Mayer, Helmholtz, Clausius, Thomson, Planck, Gibbs έθεσαν τις βάσεις της θερμοδυναμικής.
- Ο Umov ανέπτυξε θεωρίες σχετικά με την τοπολογία της ενέργειας (localization of energy) και την ταχύτητα κίνησής της στο χώρο.
- Το 1896 ο A. Becquerel παρατήρησε ότι άλατα ουρανίου είχαν στιγματίσει μία φωτογραφική πλάκα μέσα από μαύρο χαρτί, ανακαλύπτοντας έτσι τη φυσική ραδιοακτινοβολία.
- Δύο χρόνια αργότερα οι Γάλλοι Pierre Curie (1859 – 1906) και Marie Curie (1867 – 1934) ανακάλυψαν δύο νέα ραδιοενεργά στοιχεία, το πολώνιο και το ράδιο.
- Το 1900 ο Γερμανός φυσικός Max Planck (1858 – 1947) έθεσε τις βάσεις της κβαντομηχανικής.

- Το 1905 ο Αμερικανός φυσικός Albert Einstein (1879 – 1955) εισήγαγε τις βασικές έννοιες της θεωρίας της σχετικότητας και κατέδειξε ότι η ενέργεια είναι ευθέως ανάλογη της μάζας σύμφωνα με τη σχέση:

$$E = m \cdot c^2 \quad (1.19)$$

- Το 1911 ο Βρετανός φυσικός Ernest Rutherford (1871 – 1937) πρότεινε το πλανητικό μοντέλο για τη δομή του ατόμου και απέδειξε ότι όλη η μάζα του είναι συγκεντρωμένη στον πυρήνα.
- Δύο χρόνια αργότερα ο Δανός φυσικός Niels Bohr (1885 – 1965) δημιούργησε ένα μοντέλο για το άτομο του υδρογόνου και εξέλιξε μία θεωρία για τη δομή του ατόμου.
- Αυτές οι τελευταίες εργασίες των Rutherford και Bohr σηματοδότησαν την αρχή μιας ραγδαίας προόδου της κβαντομηχανικής και της πυρηνικής φυσικής. Ωστόσο κανένας δε στόχευε, ούτε είχε συλλάβει τη δυνατότητα της πυρηνικής σχάσης. Μάλιστα ο Rutherford αρνήθηκε ότι υπάρχει κάποια πιθανότητα για την επίτευξή της.
- Το 1930 οι Γερμανοί φυσικοί Walther Bothe (1891 – 1957) και H. Becker και το 1932 οι Γάλλοι ερευνητές Irène Joliot-Curie (1897 – 1956) και Frédéric Joliot-Curie (1900 – 1958) βομβάρδισαν ελαφρά στοιχεία (βορόνιο και βηρύλλιο) με σωματίδια Α (πυρήνες ηλίου).
- Το 1933 οι Joliot-Curies ανακάλυψαν την τεχνητή ραδιενέργεια, βομβαρδίζοντας βορόνιο και αλουμίνιο με σωματίδια Α και παράγοντας έτσι νέα τεχνητά ραδιοενεργά στοιχεία: ισότοπα του φωσφόρου και του αζώτου.
- Το 1934 ο Ιταλός φυσικός Enrico Fermi (1901 – 1954) ξεκίνησε να βομβαρδίζει πυρήνες ουρανίου με νετρόνια, παίρνοντας ως προϊόντα νέους πυρήνες, που στην αρχή πίστευε ότι ήταν βαρύτεροι, δηλαδή με ατομικό αριθμό μεγαλύτερο από αυτόν του ουρανίου (92).
- Το 1938 διάφορα πειράματα από τους Otto Hahn (1879 – 1968) και Fritz Strassmann (1902 – 1980) στη Γερμανία, από τους Irène Joliot-Curie και Pavle Savić (1909 – 1994) στη Γαλλία και από τους Lise Meitner (1878 – 1968) και Niels Bohr στη Δανία κατέδειξαν ότι τα νέα στοιχεία που προέκυψαν από τα πειράματα του Fermi δεν ήταν βαρύτερα από το ουράνιο, αντιθέτως ήταν ελαφρύτεροι, καθώς αποτελούσαν τα προϊόντα της διάσπασής του. Επίσης ανακαλύφθηκε ότι παράγονται δύο με τρία νετρόνια για κάθε ένα νετρόνιο που χρησιμοποιείται για τη διάσπαση του ουρανίου. Τέλος εκτιμήθηκε ότι κατά τη διάσπαση του ουρανίου απελευθερώνεται ενέργεια μεγαλύτερη περίπου κατά 2,5 εκατομμύρια φορές από την ενέργεια που απελευθερώνεται από την καύση αντίστοιχης μάζας άνθρακα.
- Το 1942 ο πρώτος πυρηνικός αντιδραστήρας εγκαταστάθηκε στο Σικάγο υπό την καθοδήγηση του Enrico Fermi, ο οποίος είχε διαφύγει από τη φασιστική Ιταλία στις Η.Π.Α. μαζί με μία ομάδα Ευρωπαίων φυσικών.
- Τον Ιούλιο του 1945 πραγματοποιήθηκε η πρώτη δοκιμή ατομικής βόμβας στις Η.Π.Α. και ένα μήνα αργότερα, τον Αύγουστο του 1945, πέφτουν οι πρώτες, και μοναδικές έως τώρα, ατομικές βόμβες εν καιρώ πολέμου σε ανθρώπινους στόχους, στη Χιροσίμα και στο Ναγκασάκι.
- Η εποχή της πυρηνικής ενέργειας ξεκινάει ουσιαστικά το 1954, όταν μπαίνει σε κανονική λειτουργία ο πρώτος πυρηνοληκτρικός σταθμός στο Ομπνίσκ της πρώην Σοβιετικής Ένωσης.

1.2.2. Ταξινόμηση και ρόλος των μορφών ενέργειας

Προκειμένου να προχωρήσουμε σε μία τεκμηριωμένη ταξινόμηση μορφών ενέργειας, ας υποθέσουμε και ας συμφωνήσουμε ότι η ενέργεια που αντιστοιχεί στην ελεύθερη κίνηση ενός σώματος, ή ενός στοιχείου, θα ονομάζεται *μηχανική ενέργεια* (mechanical energy). Η ενέργεια που αντιστοιχεί στη χαοτική κίνηση και στην αλληλεπίδραση των στοιχείων σε υλικά μακροσυστήματα θα ονομάζεται θερμότητα (heat). Το ποσοστό της θερμότητας που μπορεί να απελευθερωθεί και να μετατραπεί σε άλλες μορφές ενέργειας, δίνοντας θερμοκρασιακές μεταβολές, θα το ονομάσουμε *θερμική ενέργεια* (thermal energy). Η ενέργεια κάθε μορφής τακτικής κίνησης των ηλεκτρονίων στην ύλη θα ονομαστεί *ηλεκτρική ενέργεια* (electric energy), ή *ηλεκτροδυναμική ενέργεια* (electrodynamical energy), ένας όρος που, αν και ασυνήθιστος, ίσως είναι ακριβέστερος.

Αν θεωρήσουμε «εντατικές καταστάσεις» που προκύπτουν από τις δυνάμεις αλληλεπίδρασης μεταξύ σωμάτων, τότε θα λάβουμε τις διάφορες μορφές δυναμικής ενέργειας (potential forms of energy). Η συνολική ενέργεια ενός συστήματος ύλη – αντιύλης, η οποία ισούται με τη συνολική ενέργεια ακινησίας και κίνησης που απελευθερώνεται κατά τη διάρκεια της εξάλειψης μάζας (εξαύλωση), ονομάζεται *ενέργεια εξαύλωσης* (annihilation energy). Η εξαύλωση μπορεί να προκύψει από μία πυρηνική αντίδραση ή ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση. Η ενέργεια δεσμών πρωτονίων στον πυρήνα ενός στοιχείου, που απελευθερώνεται κατά τη σχάση πυρήνων βαρέων στοιχείων και τη δημιουργία νέων ελαφρύτερων πυρήνων, θα ονομαστεί *πυρηνική ενέργεια* (nuclear energy).

Η ενέργεια, που απελευθερώνεται κατά τις χημικές αντιδράσεις και προκύπτει ως αποτέλεσμα της αναδιάταξης των ηλεκτρονίων των εξωτερικών στοιβάδων των μορίων των στοιχείων, ονομάζεται *χημική ενέργεια* (chemical energy). Η ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση καθορίζει τη δυναμική ενέργεια σωμάτων σε ηλεκτρικά ή μαγνητικά πεδία, η οποία θα ονομάζεται αντίστοιχα *ενέργεια ηλεκτροστατικού ή μαγνητικού πεδίου* (electrostatic & magnetic energy). Μία ειδική περίπτωση ενέργειας μαγνητικού πεδίου είναι η *βαρυτική ενέργεια* (gravitational energy), που αποτελεί την ενέργεια του μαγνητικού πεδίου της γης. Άλλη μία ειδική περίπτωση ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας είναι η *φωτεινή ενέργεια* (light energy), η οποία αποτελείται από το μέρος της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας που μεταφέρεται ως ορατό ηλεκτρομαγνητικό κύμα, δηλαδή φως.

Αν ένα μεταλλικό ελατήριο, ή ένα αέριο, συμπιεστεί σε σταθερή θερμοκρασία, τότε στο συμπιεσμένο ελατήριο, ή αέριο, θα συσσωρευτεί ενέργεια, η οποία μπορεί να ονομαστεί *ελαστική ενέργεια* (elastic energy). Η ελαστική ενέργεια είναι η συνισταμένη ηλεκτρομαγνητικών και βαρυτικών αλληλεπιδράσεων καθώς και θερμικής ενέργειας.

Στη συνέχεια παρέχεται μία ανακεφαλαίωση των βασικών μορφών ενέργειας, με βάση την ανωτέρω ταξινόμηση:

1. Μηχανική (mechanical): η ενέργεια της ελεύθερης κίνησης ενός σωματιδίου ή ενός σώματος σε ένα σύστημα.
2. Θερμότητα (heat): η ενέργεια της χαοτικής κίνησης και της αλληλεπίδρασης σωματιδίων σε μακροσυστήματα.
3. Θερμική (thermal): το ποσοστό της θερμότητας που μπορεί να απελευθερωθεί και να μετατραπεί σε άλλες μορφές ενέργειας, δίνοντας θερμοκρασιακές μεταβολές.
4. Ηλεκτρική ή ηλεκτροδυναμική (electric or electrodynamic): η ενέργεια κάθε μορφής τακτικής κίνησης των ηλεκτρονίων στην ύλη.
5. Βαρυτική (gravitational): η δυναμική ενέργεια εντατικών καταστάσεων, που προκύπτει από δυνάμεις αλληλεπίδρασης ανάμεσα στα υλικά σώματα, οι οποίες οφείλονται στο μαγνητικό πεδίο της γης.
6. Πυρηνική (nuclear): η δεσμευμένη ενέργεια των πυρήνων που απελευθερώνεται κατά τη σχάση βαρέων πυρήνων και τη σύνθεση ελαφρότερων.
7. Χημική (chemical): η ενέργεια που εκλύεται κατά τις χημικές αντιδράσεις, σαν αποτέλεσμα της ανακατανομής των στοιβάδων ηλεκτρονίων στα μόρια.
8. Ηλεκτροστατική-μαγνητική (electrostatic-magnetic): η δυναμική ενέργεια ηλεκτρικά φορτισμένων ή μαγνητισμένων σωμάτων σε ηλεκτρικό ή μαγνητικό πεδίο.
9. Ελαστική (elastic): η ενέργεια ενός εντεταμένου ελατηρίου ή ενός συμπιεσμένου ρευστού σε σταθερή θερμοκρασία που οδηγεί σε αποθήκευση ενέργειας. Η ενέργεια αυτή απορρέει από ηλεκτρομαγνητικές, θερμικές και βαρυτικές αλληλεπιδράσεις.
10. Ηλεκτρομαγνητική (electromagnetic): η ενέργεια που μεταφέρεται μέσω ηλεκτρομαγνητικών ακτινοβολιών.

Συνεπώς καταλήξαμε στην ανωτέρω κατηγοριοποίηση των μορφών ενέργειας. Ποιος όμως είναι ο ρόλος της κάθε μίας από αυτές; Το κριτήριο, προφανώς, για να απαντήσουμε είναι το πώς μπορούν να συνεισφέρουν στις ανθρώπινες δραστηριότητες. Η πρακτική αξία των ανωτέρω μορφών ενέργειας ποικίλλει, εξαρτώμενη από τους ακόλουθους παράγοντες:

- τη διαθεσιμότητα και τα αποθέματά τους στη γη,
- την ικανότητα των αποθεμάτων αυτών να ανανεώνονται,
- τη συγκέντρωση των πρωτογενών πηγών στη γη,
- τη δυνατότητα που έχει η κάθε μορφή να χρησιμοποιείται άμεσα,
- την ικανότητα των αποθεμάτων αυτών (πρώτων υλών) να παράγουν ενέργεια (συγκέντρωση ισχύος),
- τη δυνατότητα να συσσωρευτούν (αποθηκευτούν) και να διατηρηθούν ,
- την ικανότητα να μεταφερθούν αποδοτικά σε μεγάλες αποστάσεις,
- τη δυνατότητα να μετατραπούν σε μορφές που πρακτικά χρησιμοποιούνται,
- τις κάθε είδους επιπτώσεις από τη χρήση τους.

Ο παραγωγός των διαφόρων μορφών ενέργειας είναι η φύση, η οποία περιορίζει τις διαθέσιμες επιλογές πηγών ενέργειας σε ανανεώσιμες και μη. Από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, η μορφή εκείνη που αξιοποιείται άμεσα είναι η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία του ήλιου, η οποία, μετατρεπόμενη σε θερμότητα και σε χημική ενέργεια στα φυτά και στα δέντρα, δημιουργεί τις βασικές προϋποθέσεις για την ανάπτυξη του όποιου είδους ζωής στον πλανήτη. Από τις άλλες πρωτογενείς και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ενέργεια των ποταμών, θερμική ενέργεια του εσωτερικού της γης, αιολική ενέργεια) μόνο ένα μικρό ποσοστό αξιοποιείται στην πρωτογενή μορφή του, δηλαδή όπως ακριβώς διατίθεται από τη φύση. Το μεγαλύτερο μέρος μετατρέπεται σε άλλες μορφές ενέργειας που συνήθως χρησιμοποιούνται στην καθημερινή ζωή, τις οποίες θα ονομάσουμε «χρήσιμες μορφές ενέργειας». Οι μορφές αυτές είναι μόνο τέσσερις και είναι οι εξής:

- θερμική ενέργεια, που αντιστοιχεί περίπου στο 75% της ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας στον πλανήτη
- μηχανική ενέργεια, που αντιστοιχεί στο 24% της ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας
- ηλεκτρική και φωτεινή ενέργεια, που αντιστοιχεί στο υπόλοιπο 1% της παγκόσμιας ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας.

Η ζήτηση θερμικής ενέργειας προκύπτει τόσο από το βιομηχανικό τομέα (τήξη, ξήρανση κλπ), όσο και από τον κτηριακό τομέα (θέρμανση χώρων). Η ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται, για παράδειγμα, στην παραγωγή του αλουμινίου. Ωστόσο η βασική χρήση της είναι η μεταφορά της σε μεγάλες αποστάσεις.

Από την ανωτέρω ανάλυση, μπορούμε να καταλήξουμε στους ακόλουθους ρόλους για τις μορφές ενέργειας:

- Η πυρηνική, χημική, μηχανική, θερμική και ηλεκτρομαγνητική ενέργεια απαντώνται ως φυσικές πηγές πρωτογενούς ενέργειας στη γη. Είναι, δηλαδή, η πρώτη ακατέργαστη μορφή ενέργειας , με την οποία διατίθενται από τη φύση.
- Οι χρήσιμες μορφές ενέργειας, που πρακτικά χρησιμοποιούνται, είναι η θερμική, η μηχανική, η ηλεκτρομαγνητική και η ηλεκτρική.
- Τέλος οι υπόλοιπες μορφές ενέργειας, δηλαδή η βαρυτική, η ηλεκτροστατική, η μαγνητική και η ελαστική ενέργεια, είναι μορφές συσσωρευσης ενέργειας, δηλαδή είναι μορφές με τις οποίες η ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί.

1.2.3. Οι μετατροπές μορφών ενέργειας

Η μελέτη των φαινομένων μεταφοράς ισχύος οδηγεί στο συμπέρασμα ότι για τη μετατροπή μορφών ενέργειας πρέπει να ικανοποιούνται τουλάχιστον δύο προϋποθέσεις:

1. Πρέπει να εξασφαλιστεί ένα ικανό επίπεδο συγκέντρωσης ισχύος (προς μετατροπή).
2. Πρέπει να διατεθεί ένα εργαζόμενο μέσο για τη μετατροπή ενέργειας, που να ικανοποιεί ορισμένες βασικές ιδιότητες.

Για παράδειγμα, πεπιεσμένος αέρας χαμηλής θερμοκρασίας, δηλαδή χαμηλής ειδικής ενθαλπίας, άρα με μικρή συγκέντρωση θερμικής ισχύος, δεν μπορεί να αξιοποιηθεί προς παραγωγή μηχανικής ισχύος σε ένα στρόβιλο. Επιπλέον, όσο και αν μεταβάλλεται η μαγνητική ροή σε ένα μαγνητικό πεδίο, για να προκύψει μετατροπή της μαγνητικής ενέργειας σε ηλεκτρική, θα πρέπει να εισαχθεί εντός του πεδίου ένας αγωγός (μέσο).

Ακόμα κι αν ικανοποιηθούν οι ανωτέρω απαιτήσεις, η απευθείας μετατροπή των περισσότερων μορφών ενέργειας (από την μία στην άλλη) δεν είναι δυνατή. Για παράδειγμα, ένας πυρήνας ουρανίου, με συνολική μάζα μεγαλύτερη από την κρίσιμη μάζα, θα υποστεί πυρηνική σχάση, όταν βομβαρδιστεί με νετρόνια. Ωστόσο, δεν υπάρχει κανένας τρόπος, να μετατρέψουμε αυτό τον πυρήνα ουρανίου, που ως στερεό καύσιμο έχει αποθηκευμένη μία ποσότητα χημικής ενέργειας, σε ένα υγρό ή αέριο καύσιμο, το οποίο, αναμειγνυόμενο με το οξυγόνο, μπορεί να καεί σε ένα κινητήρα αυτοκινήτου, και να απελευθερώσει έτσι την πυρηνική ενέργεια. Η απευθείας αυτή μετατροπή σε χημική ενέργεια δεν είναι δυνατή. Ο μόνος τρόπος, για να συμβεί αυτό, είναι να εισαγάγουμε ένα ενδιάμεσο στάδιο μετατροπής, κατά το οποίο η πυρηνική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Αυτή η ηλεκτρική ενέργεια στη συνέχεια χρησιμοποιείται, για να διαχωρίσει νερό σε υδρογόνο και οξυγόνο (μέσω ηλεκτρόλυσης) και να παραχθεί έτσι μία ποσότητα αποθηκευμένης ενέργειας με τη μορφή χημικής ενέργειας.

Διατηρώντας μόνο τις βασικές μορφές ενέργειας από την ταξινόμηση που προηγήθηκε στην προηγούμενη ενότητα, μπορούμε να συντάξουμε τον πίνακα 1.4, στον οποίο παρουσιάζονται οι βασικές απευθείας μετατροπές των διαφόρων μορφών ενέργειας.

Ως καταληκτικά συμπεράσματα από τις μετατροπές, που παρουσιάζονται στον πίνακα 1.4, και από την ανάλυση που προηγήθηκε μπορούμε να πούμε τα εξής:





1. Οι δυνατότητες για μετατροπές ενέργειας έχουν εξαντληθεί. Δεν είναι εύκολο να φανταστούμε άλλες μετατροπές από αυτές που παρουσιάζονται στον πίνακα 1.4.

2. Οι βασικότερες, απλούστερες, ασφαλέστερες και πιο αποδοτικές μέθοδοι μετατροπής μορφών ενέργειας έχουν ήδη δοκιμαστεί. Περαιτέρω έρευνα ή βελτιώσεις αποσκοπούν μόνο στην αύξηση της ικανότητας μετατροπής και παραγωγής ισχύος των ήδη γνωστών μετατροπών.

Πίνακας 1.4: Πίνακας δυνατών και πρόσφορων μετατροπών ενέργειας.

A/A	Μορφή ενέργειας	Ρόλος	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Πυρηνική	ΦΠΕ & ΤΠΕ				+			+			
2	Χημική	ΦΠΕ & ΤΠΕ, ΣΕ	-		+	+		+	-			
3	Ηλεκτρομαγνητική	ΜΕ, ΦΠΕ	-			+	+	-	-			+
4	Βαρυτική	ΦΠΕ	-	-	-			-	-		+	
5	Ελαστική	ΤΠΕ, ΣΕ	-	-	-		+	+	+	+	+	
6	Ηλεκτροστατική	ΤΠΕ, ΣΕ	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+
7	Μαγνητική	ΤΠΕ, ΣΕ	-	-	-	+	+	+	+	+	+	
8	Ηλεκτρική	ΜΕ	-		+	+	+	+	+			+
9	Θερμική	ΦΠΕ & ΤΠΕ, ΣΕ	-	+		-		-	-	+		
10	Μηχανική	ΦΠΕ & ΤΠΕ, ΣΕ	-	-	-			+	+		+	

Συμβολισμοί:

- αδύνατη η απευθείας μετατροπή
- + δυνατή η απευθείας μετατροπή, δεν έχει όμως πρακτική αξία
-  δυνατή η απευθείας μετατροπή και έχει πρακτική αξία, όχι όμως για την παραγωγή ενέργειας
-  δυνατή η απευθείας μετατροπή, έχει πρακτική αξία, δεν έχει όμως χρησιμοποιηθεί ακόμα
-  δυνατή η απευθείας μετατροπή, έχει πρακτική αξία, έχει όμως μερικώς χρησιμοποιηθεί
-  δυνατή η απευθείας μετατροπή, έχει πρακτική αξία, έχει όμως ευρύτατα χρησιμοποιηθεί

ΦΠΕ: Φυσική Πηγή Ενέργειας

ΤΠΕ: Τεχνητή Πηγή Ενέργειας

ΣΕ: Συσσωρευτής Ενέργειας

ΜΕ: Μεταφοράς Ενέργειας.

1.3. Πηγές ενέργειας

Ο συχνά χρησιμοποιούμενος όρος «Πηγές Ενέργειας» δεν ευσταθεί από επιστημονικής σκοπιάς, διότι, σύμφωνα με το νόμο διατήρησης της ενέργειας, η ενέργεια ούτε δημιουργείται αλλά ούτε και καταστρέφεται. Απλά αλλάζει μορφές. Γενικά όμως ο όρος Πηγές Ενέργειας περιγράφει τη δυνατότητα μετατροπής κάποιας αρχικής διαθέσιμης μορφής ενέργειας σε κάποια άλλη τελική ενέργεια χρήσης.

Διατηρώντας λοιπόν καταχρηστικά τον όρο αυτό, μπορούμε να πούμε ότι κάποιες από τις ανωτέρω μορφές ενέργειας απαντώνται στη φύση ως φυσικές πηγές ενέργειας. Με την ανάπτυξη διαφόρων τεχνολογιών είναι δυνατή η συλλογή, η αποθήκευση ή και η απευθείας μετατροπή των μορφών ενέργειας που απαντώνται στις φυσικές πηγές ενέργειας, σε μορφές ενέργειας που είναι χρήσιμες για τον άνθρωπο (κινητική, ηλεκτρική, θερμική). Έτσι, για παράδειγμα, το πανί ενός ιστιοφόρου σκάφους μεταφέρει την κινητική ενέργεια του ανέμου (αιολική ενέργεια) σε άμεσα αξιοποιήσιμη κινητική ενέργεια τους σκάφους. Ένας ηλιακός συλλέκτης μετατρέπει την ηλιακή ακτινοβολία σε θερμότητα αξιοποιήσιμη για τη θέρμανση χώρων ή νερού. Τέλος η εξόρυξη των λεγόμενων ορυκτών καυσίμων (λιγνίτης, γαιάνθρακες, πετρέλαιο, φυσικό αέριο και πυρηνικά καύσιμα) καθιστά δυνατή τη μεταφορά και την αποθήκευσή τους, προκειμένου να χρησιμοποιηθούν με βάση τις ανάγκες σε ηλεκτρική ή θερμική ενέργεια μιας κοινότητας.

Οι πηγές ενέργειας ταξινομούνται γενικά σε δύο βασικές κατηγορίες:

- μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας
- ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

1.3.1. Μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας χαρακτηρίζονται οι πηγές οι οποίες δεν αναπληρώνονται από φυσικές διαδικασίες, ή αναπληρώνονται εξαιρετικά αργά για τα ανθρώπινα μέτρα. Στις μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας περιλαμβάνονται κυρίως ο άνθρακας, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, γνωστά και ως ορυκτά καύσιμα. Βέβαια, η φύση δεν, σταματά να δημιουργεί ούτε άνθρακα, ούτε πετρέλαιο. Αν αναλογισθούμε όμως ότι η ανθρωπότητα καταναλώνει ημερησίως τόση ποσότητα ορυκτών καυσίμων, όση μπορεί η φύση να

δημιουργήσει σε χίλια περίπου χρόνια, αντιλαμβανόμαστε πλέον την έννοια της ανανεωσιμότητας. Στη συνέχεια, ακολουθεί μία σύντομη περιγραφή των βασικών ορυκτών καυσίμων:

- Γαιάνθρακες

Ο όρος «γαιάνθρακες» χαρακτηρίζει τα οργανικά ιζήματα που προήλθαν από φυτικά υπολείμματα μέσω μιας σειράς διεργασιών ενανθράκωσης. Οι διεργασίες αυτές είχαν ως αποτέλεσμα τον εμπλουτισμό των φυτικών υπολειμμάτων σε άνθρακα. Η μετατροπή των φυτών σε τύρφη και η μετάβαση από την τύρφη (αρχικό στάδιο ενανθράκωσης) στον ανθρακίτη (τελικό στάδιο ενανθράκωσης) είναι συνάρτηση της επίδρασης του χρόνου, της θερμοκρασίας και της πίεσης. Η μετατροπή της φυτικής ύλης σε άνθρακα ξεκίνησε πριν 400 περίπου εκατομμύρια χρόνια και, βεβαίως, συνεχίζεται μέχρι σήμερα. Εκτιμάται ότι απαιτείται στρώμα 2,5 μέτρων φυτικής ύλης για τη δημιουργία άνθρακα στρώματος 30 εκατοστών.

Η κατάταξη των γαιανθράκων καθορίζεται από τη θερμογόνο δύναμή τους, σε συνδυασμό με τη χημική ανάλυση της οργανικής ύλης. Γαιάνθρακες με υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα και χαμηλή περιεκτικότητα σε υδρογόνο και οξυγόνο χαρακτηρίζονται ως υψηλής ποιότητας, ενώ με τη μείωση της περιεκτικότητας σε άνθρακα μειώνεται και η ποιότητα των γαιανθράκων. Ανάλογα με το βαθμό ενανθράκωσης, οι γαιάνθρακες διακρίνονται σε τύρφη, λιγνίτες, υποπισσούχοι γαιάνθρακες, πισσούχοι γαιάνθρακες και ανθρακίτης.

Με τη μετάβαση από την τύρφη στον ανθρακίτη αυξάνεται η θερμογόνο ικανότητα των ανθράκων και, βεβαίως, η ποιότητά τους ως πηγή ενέργειας.

- Πετρέλαιο

Το πετρέλαιο βρίσκεται στο υπέδαφος σε υγρή μορφή, μέσα σε κοιλότητες, σχηματίστηκε εκεί από ζωικούς και φυτικούς μικροοργανισμούς, κυρίως θαλάσσιους, οι οποίοι συγκεντρώθηκαν από τα θαλάσσια ρεύματα στο βάθος λεκανών, όπου και καταπλακώθηκαν λόγω επιχωματώσεων, ή άλλων διαδικασιών. Εκεί, χωρίς την παρουσία αέρα, μετατράπηκαν σε πετρέλαιο κατά τη διάρκεια χιλιάδων ετών. Η ενέργεια του πετρελαίου προέρχεται από την ενέργεια που είχαν συγκεντρώσει από τον ήλιο και την τροφή τους οι μικροοργανισμοί που το δημιούργησαν. Σήμερα αντλούμε το πετρέλαιο από τα υπόγεια κοιτάσματά του. Τα κύρια συστατικά του είναι αλκάνια (παραφίνες), κυκλοεξάνια (ναφθένια) και αρωματικοί υδρογονάνθρακες και, σε μικρότερες ποσότητες, οξυγονούχες, αζωτούχες και θειούχες ενώσεις. Το πετρέλαιο αποτελεί το σημαντικότερο ορυκτό για την παγκόσμια οικονομία, καθώς αποτελεί την κύρια πρωτογενή πηγή ενέργειας και την πρώτη ύλη από την οποία παράγεται ένας τεράστιος αριθμός προϊόντων (πλαστικά, φάρμακα, καλλυντικά, απορρυπαντικά, φιλμ, μαγνητοταινίες, εκρηκτικά κλπ).

- Φυσικό αέριο

Το φυσικό αέριο είναι μίγμα υδρογονανθράκων, και αποτελείται κυρίως από μεθάνιο και, σε πολύ μικρότερη αναλογία, από αιθάνιο, προπάνιο, βουτάνιο και πεντάνιο. Καθοριστικός παράγοντας για τη σύστασή του αποτελεί η προέλευσή του, και ιδιαίτερα εάν πρόκειται για αμιγώς κοιτάσμα φυσικού αερίου ή προκύπτει από κοιτάσματα πετρελαίου. Η εμπορική αξιοποίησή του ξεκίνησε περίπου το 1810 ως καύσιμο σε λάμπες φωτισμού, ενώ μετά το τέλος του Β' Παγκοσμίου Πολέμου κατασκευάστηκαν τα πρώτα δίκτυα μεταφοράς και διανομής φυσικού αερίου. Στα πλεονεκτήματά του ως πηγή ενέργειας συγκαταλέγονται η δυνατότητα μεταφοράς του σε μεγάλες αποστάσεις μέσω αγωγών και, βεβαίως, η φιλική προς το περιβάλλον καύση του, συγκριτικά με τα υπόλοιπα ορυκτά καύσιμα.

- Πυρηνικά καύσιμα

Στην πράξη ο όρος πυρηνική ενέργεια χρησιμοποιείται, για να υποδηλώσει την ενέργεια που απελευθερώνεται σε τεράστιες ποσότητες κατά την πυρηνική σχάση, δηλαδή τη διάσπαση ατομικών πυρήνων προς ελαφρότερους, και κατά την πυρηνική σύντηξη, δηλαδή την ένωση πυρήνων για το σχηματισμό βαρύτερων. Μη ελεγχόμενες πυρηνικές αντιδράσεις λαμβάνουν χώρα κατά την έκρηξη της ατομικής βόμβας,

ή της βόμβας υδρογόνου. Ελεγχόμενες πυρηνικές αντιδράσεις χρησιμοποιούνται ως πρωτογενής ενεργειακή πηγή για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και για την παραγωγή μηχανικής ενέργειας μέσω πυρηνικών κινητήρων. Έως το 1995 οι εφαρμογές των κινητήρων, που χρησιμοποιούσαν πυρηνικά καύσιμα, περιορίζονταν στη ναυσιπλοΐα (πολεμικά πλοία, υποβρύχια, παγοθραυστικά, εμπορικά πλοία σε μικρή όμως κλίμακα), ενώ διεξάγονταν προσπάθειες και για την κατασκευή πυρηνικών πυραυλοκινητήρων. Ωστόσο, πολύ σπουδαιότερη για την παγκόσμια οικονομία είναι η χρήση της πυρηνικής ενέργειας ως πρωτογενούς ενεργειακής πηγής με τη βοήθεια ειδικών διατάξεων, που ονομάζονται *πυρηνικοί αντιδραστήρες*.

1.3.2. Διαθέσιμα αποθέματα μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

Βάσει των στοιχείων της BP Statistical Review of World Energy 2007 [1] και των στοιχείων του World Energy Council (W.E.C.) [2], τα παγκόσμια αποθέματα των μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας το 2007 ανέρχονταν στις τιμές που παρουσιάζονται στον πίνακα 1.5. Στον ίδιο πίνακα παρουσιάζονται τα αρχικά συνολικά αποθέματα πρωτογενών πηγών ενέργειας:

Πίνακας 1.5: Ενεργειακά αποθέματα πρωτογενών μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.			
	Αρχικό απόθεμα (ισοδύναμα βαρέλια αργού πετρελαίου)	Απόθεμα 2007 (ισοδύναμα βαρέλια αργού πετρελαίου)	Ποσοστιαία μείωση αποθέματος (%)
Αργό πετρέλαιο	2.200	1.208	45,09
Φυσικό αέριο	1.831	1.141	37,68
Λιθάνθρακας	4.084	2.958	27,57
Ουράνιο	519	339	34,68

Στον πίνακα 1.6 παρουσιάζεται μία απλουστευμένη εκτίμηση των χρονικών διαστημάτων εξάντλησης των αποθεμάτων των πρωτογενών μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, με βάση τις ετήσιες καταναλώσεις πρωτογενών πηγών το 2006 και τα εναπομείναντα αποθέματα.

Πίνακας 1.6: Εκτίμηση χρονικών διαστημάτων εξάντλησης μη ανανεώσιμων ενεργειακών πηγών.			
	Ετήσια κατανάλωση 2006 (ισοδύναμα βαρέλια αργού πετρελαίου)	Απόθεμα 2007 (ισοδύναμα βαρέλια αργού πετρελαίου)	Χρονικό διάστημα εξάντλησης (έτη)
Αργό πετρέλαιο	31	1.208	39
Φυσικό αέριο	18	1.141	63
Λιθάνθρακας	23	2.958	129
Ουράνιο	5	339	68

Η διάρκεια ζωής των ενεργειακών αποθεμάτων καθορίζεται από την προσφορά και τη ζήτηση. Αν η παραγωγή δεν ανταποκρίνεται στη ζήτηση, τότε οι τιμές ανεβαίνουν, για να μειωθεί η ζήτηση, και, ως εκ τούτου, η διάρκεια ζωής των εκμεταλλεύσιμων αποθεμάτων αυξάνεται.

Χρονικά η κορύφωση της παραγωγής (peak production) μιας ενεργειακής πρώτης ύλης εικάζεται ότι προκύπτει με την κατανάλωση του 50% ή του 70% του αρχικού αποθέματος. Η κορύφωση της παραγωγής συνεπάγεται ότι, από εκείνο το χρονικό σημείο και έπειτα, η παραγωγή δε θα δύναται να ικανοποιήσει τη ζήτηση. Η κατανάλωση του 50% των μη ανανεώσιμων ενεργειακών αποθεμάτων εκτιμάται ότι θα προκύψει σύμφωνα με τα στοιχεία του πίνακα 1.7.

Πίνακας 1.7: Εκτίμηση χρόνου εξάντλησης του 50% του αρχικού ενεργειακού αποθέματος.	
	Χρονικό σημείο
Αργό πετρέλαιο	2015 – 2020
Φυσικό αέριο	2020 – 2030
Λιθάνθρακας	2025 – 2035
Ουράνιο	> 2035

Η κορύφωση της παραγωγής συνοδεύεται πάντα με την κατακόρυφη αύξηση των τιμών. Με βάση τα στοιχεία του πίνακα 1.7, και εφόσον δεν αλλάξει κάτι, προκύπτει ότι πριν το 2025 η ανθρωπότητα θα αντιμετωπίσει μεγάλη ενεργειακή κρίση, λόγω έλλειψης φθηνών ενεργειακών πρώτων υλών. Στον πίνακα 1.8 παρουσιάζονται οι αυξήσεις στις τιμές διαφόρων πρωτογενών πηγών ενέργειας από το 2000 έως το 2008.

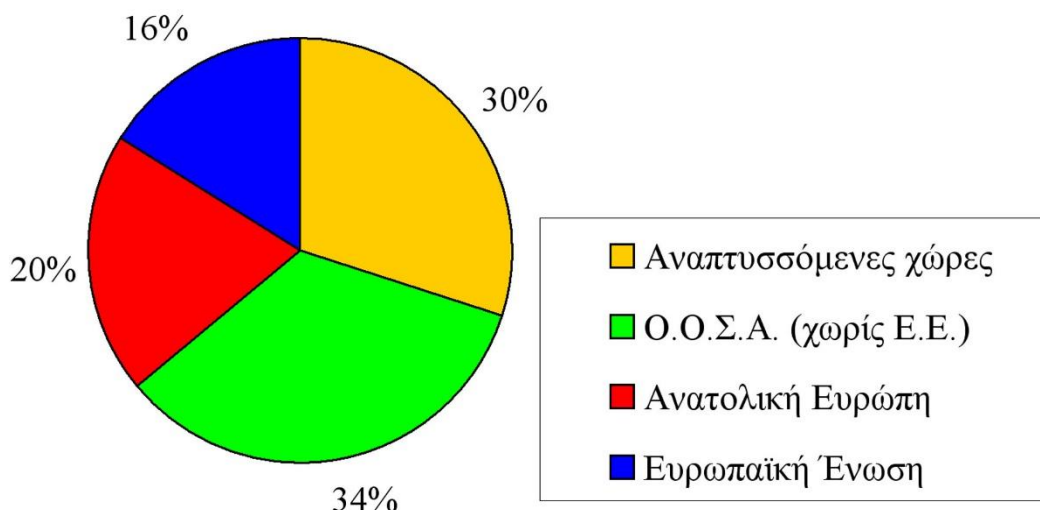
Πίνακας 1.8: Αυξήσεις στις τιμές των πρωτογενών πηγών ενέργειας.				
Πηγή ενέργειας	Κόστος	Έτος	Κόστος	Έτος
Αργό πετρέλαιο	11\$/βαρέλι	2000	>100\$/βαρέλι	2008
Φυσικό αέριο	1,5\$/GJ	1997	9,15\$/GJ	2008
Λιθάνθρακας	55\$/τόνο	2006	116\$/τόνο	2008
Ουράνιο	15\$/kg	2005	190\$/kg	2008

Ένα πιο αισιόδοξο σενάριο σταθεροποίησης, ή και μείωσης του ρυθμού κατανάλωσης των μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, μέσω υποκατάστασης μέρους της παραγωγής από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Α.Π.Ε.), μπορεί να οδηγήσει σε παράταση του χρονικού σημείου εξάντλησης των κοιτασμάτων ως τις αρχές του 22^{ου} αιώνα. Η σημαντική αυτή παράταση οφείλεται στον περιορισμό της ζήτησης από πλευράς των μεγάλων καταναλωτών, που θα επιβραδύνει την εξάντληση των κοιτασμάτων της Νοτίου Αμερικής, των Αραβικών χωρών και της Δυτικής Αφρικής, και που εκτιμάται ότι θα συμβεί στα τέλη του 21^{ου} αιώνα. Ανάλογα παρατείνεται και η διάρκεια ζωής των αποθεμάτων άνθρακα και φυσικού αερίου. Όπως προκύπτει από αυτά τα στοιχεία, τα βεβαιωμένα παγκόσμια αποθέματα πετρελαίου, άνθρακα και φυσικού αερίου επαρκούν για τουλάχιστον μερικές δεκαετίες, ενώ, με μία ορθολογική διαχείριση, το όριο εξάντλησής τους παρατείνεται σημαντικά έως το τέλος του 21^{ου} αιώνα.

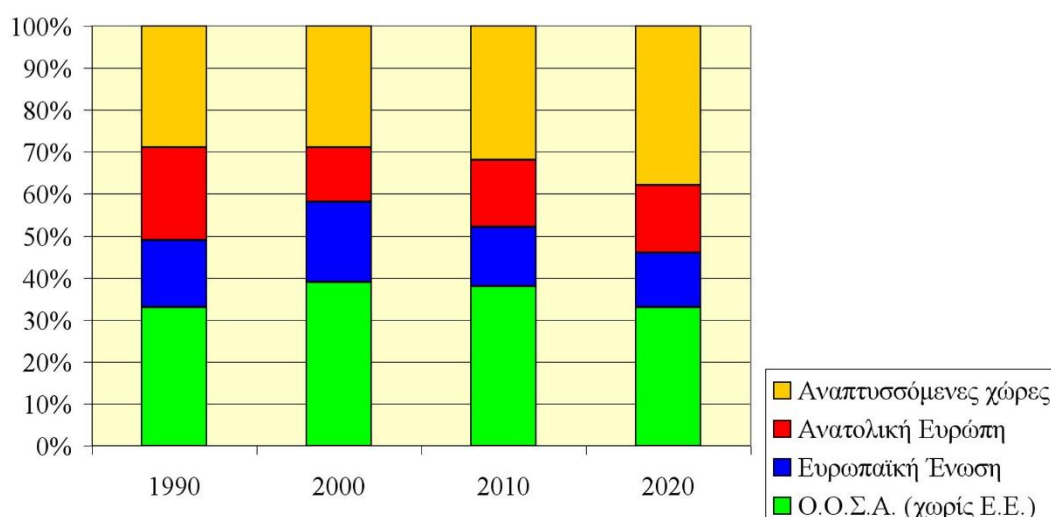
Τέλος δεν πρέπει να παραβλέπεται το γεγονός ότι οι διαρκείς βελτιώσεις των τεχνολογιών εντοπισμού και άντλησης του πετρελαίου και του φυσικού αερίου καθιστούν εκμεταλλεύσιμα τα κοιτάσματα, τα οποία μέχρι σήμερα θεωρούνταν αντικοινωνικά. Τέτοιες τεχνολογίες αφορούν, μεταξύ άλλων, στο δορυφορικό εντοπισμό κοιτασμάτων με ακρίβεια ή στην οριζόντια διάτρηση της υφαλοκρηπίδας, που καθιστά περιττή την ανάγκη μίας νέας, δαπανηρής γεώτρησης.

Ωστόσο, οι προβλέψεις τείνουν μάλλον προς την απαισιόδοξη εκδοχή εξάντλησης των αποθεμάτων μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, λόγω της αύξησης της ενεργειακής κατανάλωσης από τις σημερινές υποανάπτυκτες και αναπτυσσόμενες χώρες. Οι αναπτυσσόμενες χώρες, με τη συντριπτική πλειοψηφία του πληθυσμού της γης να ζει σε αυτές, κατανάλωναν το 2007 το 30% της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας (σχήμα 1.5). Η κατανομή αυτή αναμένεται να ανατραπεί μέσα στην επόμενη εικοσαετία με τον τρόπο που παρουσιάζεται στο σχήμα 1.6.

Με τις προβλέψεις για την αύξηση της συμμετοχής στην παγκόσμια ενεργειακή κατανάλωση των αναπτυσσόμενων χωρών, όπως αυτή προκύπτει από τα σχήματα 1.5 και 1.6, είναι αναμενόμενο ότι το χρονικό σημείο εξάντλησης των παγκόσμιων αποθεμάτων των μη ανανεώσιμων ενεργειακών πηγών μάλλον θα εμφανιστεί πολύ νωρίτερα από ότι μπορεί σήμερα να προβλεφθεί. Η προοπτική αυτή κάνει την ανάγκη αναζήτησης εναλλακτικών πηγών ενέργειας ιδιαίτερα επιτακτική.



Σχήμα 1.5: Ποσοστιαία κατανομή κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας το 2007 ανά κατηγορία προέλευσης χώρας.



Σχήμα 1.6: Πρόβλεψη διαμόρφωσης της ετήσιας ποσοστιαίας κατανομής κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας ανά κατηγορία προέλευσης χώρας.

1.3.3. Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Ως *Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας* (Α.Π.Ε.) έχουν οριστεί οι ενεργειακές πηγές, οι οποίες υπάρχουν σε αφθονία στο φυσικό περιβάλλον και ανανεώνονται ετησίως με ρυθμούς υψηλότερους από την κατανάλωση ενέργειας από τον άνθρωπο. Είναι οι πρώτες μορφές ενέργειας που χρησιμοποίησε ο άνθρωπος, πριν στραφεί με εντατικούς ρυθμούς στη χρήση των ορυκτών καυσίμων. Οι Α.Π.Ε. πρακτικά είναι ανεξάντλητες, η χρήση τους δε ρυπαίνει το περιβάλλον, ενώ η αξιοποίησή τους περιορίζεται μόνον από την ανάπτυξη αξιόπιστων και οικονομικά αποδεκτών τεχνολογιών, που θα έχουν σκοπό τη δέσμευση του δυναμικού τους. Το ενδιαφέρον για την ανάπτυξη των τεχνολογιών αυτών εμφανίσθηκε αρχικά μετά την πρώτη πετρελαϊκή κρίση του 1974 και παγιώθηκε μετά τη συνειδητοποίηση των παγκόσμιων και σοβαρών περιβαλλοντικών προβλημάτων την τελευταία δεκαετία, προβλήματα που έχουν προκληθεί από τη χρήση των ορυκτών καυσίμων. Για πολλές χώρες, οι Α.Π.Ε. αποτελούν μια εγχώρια πηγή ενέργειας με ευνοϊκές προοπτικές συνεισφοράς στο ενεργειακό ισοζύγιο τους, συμβάλλοντας στη μείωση της εξάρτησης από ακριβές εισαγόμενες ενεργειακές ύλες και στην ενίσχυση της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού τους. Παράλληλα συμβάλλουν στη βελτίωση της ποιότητας του περιβάλλοντος, καθώς έχει πλέον διαπιστωθεί ότι ο ενεργειακός τομέας είναι αυτός που ευθύνεται, κατά κύριο λόγο, για τη ρύπανση του περιβάλλοντος.

Οι μορφές των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι:

- ο ήλιος – ηλιακή ακτινοβολία,
- ο άνεμος – αιολική ενέργεια,
- οι υδατοπτώσεις – υδραυλική ενέργεια,
- η γεωθερμία – γεωθερμική ενέργεια,
- η βιομάζα: θερμική ή χημική ενέργεια με την παραγωγή βιοκαυσίμων, τη χρήση υπολειμμάτων δασικών εκμεταλλεύσεων και την αξιοποίηση βιομηχανικών αγροτικών (φυτικών και ζωικών) και αστικών αποβλήτων,
- οι θάλασσες: ενέργεια κυμάτων, παλιρροϊκή ενέργεια και ενέργεια των ωκεανών από τη διαφορά θερμοκρασίας των νερών στην επιφάνεια και σε μεγάλο βάθος.

Τα κύρια πλεονεκτήματα των Α.Π.Ε. είναι τα εξής:

- Είναι πρακτικά ανεξάντλητες πηγές ενέργειας και συμβάλλουν στη μείωση της εξάρτησης του ανθρώπου από τους συμβατικούς ενεργειακούς πόρους, οι οποίοι, με το πέρασμα του χρόνου, εξαντλούνται. Χαρακτηριστικά παρατίθεται ο πίνακας 1.9, στον οποίο παρουσιάζονται οι ετήσιες ποσότητες διαφόρων μορφών Α.Π.Ε. που διατίθενται στον πλανήτη.

Μορφή ενέργειας	Ετήσια διαθέσιμη ποσότητα (kWh)
Ηλιακή ενέργεια	$580.000 \cdot 10^{12}$
Ενέργεια κυμάτων	$70.000 \cdot 10^{12}$
Αιολική ενέργεια	$1.700 \cdot 10^{12}$
Υδραυλική ενέργεια	$18 \cdot 10^{12}$

Αν λάβουμε υπόψη ότι το 2010 η παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας εκτιμήθηκε στους 12.717Mtoe = $147.870,45 \cdot 10^9$ kWh, γίνεται αντιληπτό ότι οι ποσότητες Α.Π.Ε. που δέχεται ο πλανήτης κάθε χρόνο είναι πολλαπλάσια περισσότερες από τις παγκόσμιες απαιτήσεις της ανθρωπότητας σε ενέργεια.

- Είναι εγχώριες πηγές ενέργειας και συνεισφέρουν στην ενίσχυση της ενεργειακής ανεξαρτησίας και της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού σε εθνικό επίπεδο.
- Είναι γεωγραφικά διεσπαρμένες και οδηγούν στην αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος.
- Έχουν, συνήθως, χαμηλό λειτουργικό κόστος, το οποίο, επιπλέον, δεν επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις της διεθνούς οικονομίας και, ειδικότερα, των τιμών των συμβατικών καυσίμων.
- Μπορούν να αποτελέσουν σε πολλές περιπτώσεις πυρήνα για την αναζωογόνηση υποβαθμισμένων, οικονομικά και κοινωνικά, περιοχών και πόλο για την τοπική ανάπτυξη, με την προώθηση επενδύσεων που στηρίζονται στην ηλεκτροπαραγωγή από τεχνολογίες Α.Π.Ε.
- Είναι φιλικές προς το περιβάλλον και τον άνθρωπο.

Ωστόσο, οι περισσότερες Α.Π.Ε. παρουσιάζουν, δυστυχώς, και αρνητικά χαρακτηριστικά, που δεν επιτρέπουν την υψηλή ποσοστιαία διείσδυσή τους σε ενεργειακά συστήματα. Τέτοια είναι τα ακόλουθα:

- Το διεσπαρμένο δυναμικό τους είναι δύσκολο να συγκεντρωθεί σε μεγάλα μεγέθη ισχύος, ώστε να μεταφερθεί και να αποθηκευθεί.
- Έχουν χαμηλή πυκνότητα ισχύος και ενέργειας και, συνεπώς, για μεγάλη παραγωγή, απαιτούνται συχνά εκτεταμένες εγκαταστάσεις.
- Παρουσιάζουν συχνά διακυμάνσεις στη διαθεσιμότητά τους που μπορεί να είναι μεγάλης διάρκειας, απαιτώντας την εφεδρεία άλλων ενεργειακών πηγών ή, γενικά, δαπανηρές μεθόδους αποθήκευσης και προκαλώντας, σε περιπτώσεις υψηλής συμμετοχής στο ισοζύγιο παραγωγής ισχύος, προβλήματα ασφάλειας και ευστάθειας των ηλεκτρικών συστημάτων.
- Η χαμηλή διαθεσιμότητά τους συνήθως οδηγεί σε χαμηλό συντελεστή απασχόλησης των εγκαταστάσεων εκμετάλλευσής τους.

1.3.4. Πυκνότητα ισχύος πηγών ενέργειας

Ο όρος «πυκνότητα ισχύος» εκφράζει την πυκνότητα του ενεργειακού περιεχόμενου μιας πηγής ενέργειας. Στα στερεά, υγρά και αέρια ορυκτά καύσιμα το ενεργειακό περιεχόμενό τους εκφράζεται ανά μονάδα μάζας ή όγκου και ορίζεται ως θερμογόνος δύναμη. Πιο συγκεκριμένα, για τα ορυκτά καύσιμα η θερμογόνος δύναμη ορίζεται ως η θερμική ενέργεια που εκλύεται κατά την καύση της μονάδας μάζας ή όγκου του καυσίμου που βρίσκεται σε κανονικές συνθήκες. Διακρίνεται σε κατώτερα και ανώτερα θερμογόνο δύναμη.

- Ανώτερα θερμογόνος δύναμη

Όταν στα προϊόντα καύσης το νερό, ως προϊόν καύσης, βρίσκεται σε υγρή κατάσταση, δεν έχει απορροφήσει δηλαδή μέρος από την εκλυόμενη θερμότητα καύσης ως λανθάνουσα θερμότητα, για να εξατμιστεί, η θερμογόνος δύναμη ονομάζεται ανώτερα.

- Κατώτερα θερμογόνος δύναμη

Όταν στα προϊόντα καύσης το νερό βρίσκεται σε αέρια κατάσταση (υδρατμοί), τότε έχει απορροφήσει μέρος από την εκλυόμενη θερμότητα καύσης και η θερμογόνος δύναμη, που έχει, κατά συνέπεια, μικρότερη τιμή από αυτή της ανωτέρας, ονομάζεται κατώτερα θερμογόνος δύναμη.

Συνήθως στους ενεργειακούς υπολογισμούς χρησιμοποιείται η κατώτερη θερμογόνος δύναμη. Στον πίνακα 1.10 παρουσιάζεται η θερμογόνος δύναμη μερικών βασικών καυσίμων, ορυκτών και μη.

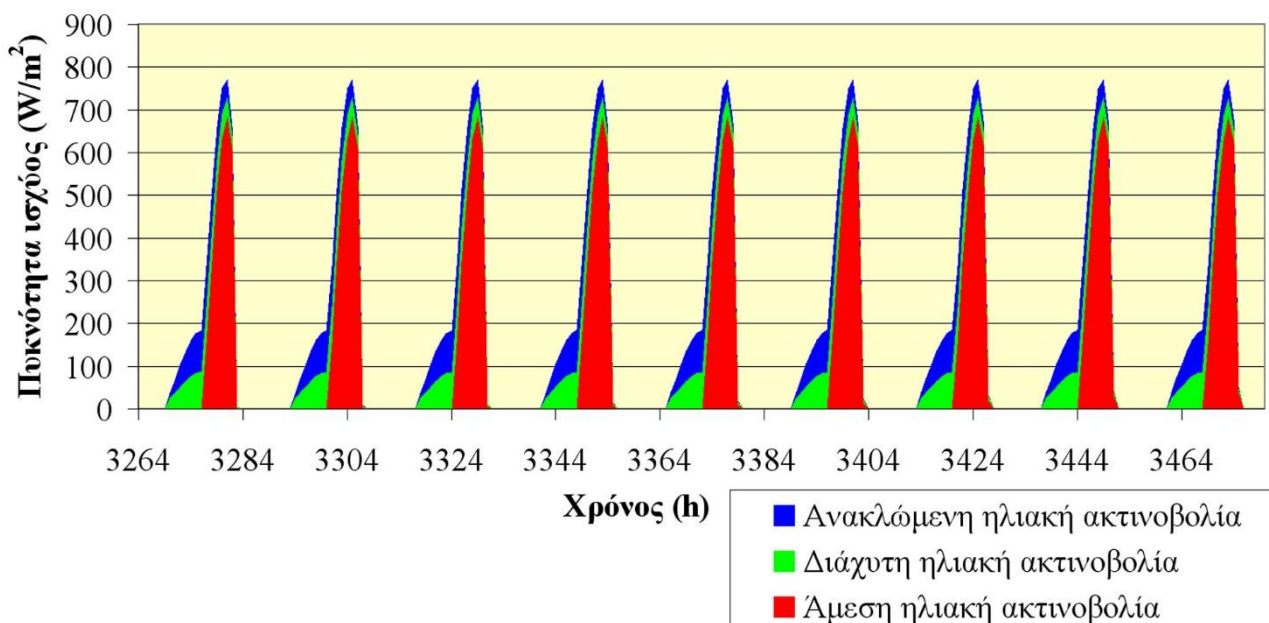
Πίνακας 1.10: Θερμογόνος δύναμη καυσίμων.

Καύσιμο	Κατώτερη θερμογόνος ικανότητα		Κατώτερη θερμογόνος ικανότητα	
λιγνίτης	19.700	kJ/kg	5,47	kWh/kg
μαζούτ	40.600	kJ/kg	11,28	kWh/kg
ντίζελ ηλεκτρικής ενέργειας	35.200	kJ/lt	9,78	kWh/lt
ντίζελ θέρμανσης	36.250	kJ/lt	10,07	kWh/lt
βενζίνη	29.900	kJ/lt	8,31	kWh/lt
υγραέριο (60% C ₃ H ₈ - 40% C ₄ H ₁₀)	26.800	kJ/lt	7,44	kWh/lt
φυσικό αέριο (με 93% CH ₄)	40.200	kJ/m ³	11,17	kWh/m ³
ξύλο (με 0% υγρασία)	18.800	kJ/kg	5,22	kWh/kg
συσσωματώματα βιομάζας (pellets)	20.900	kJ/kg	5,79	kWh/kg

Πυκνότητα ισχύος, ωστόσο, δεν ορίζεται μόνο για τα στερεά, υγρά ή αέρια καύσιμα. Ορίζεται σαφώς και για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Στην περίπτωση αυτή η πυκνότητα ισχύος είναι δυνατό να οριστεί με δύο διαφορετικούς τρόπους:

- Με την πυκνότητα της διαθέσιμης ισχύος της πρωτογενούς πηγής ενέργειας ως προς μονάδα επιφάνειας. Έτσι η πυκνότητα της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας (άμεση, διάχυτη και ανακλώμενη) μιας συγκεκριμένης γεωγραφικής περιοχής μετράται ανά μονάδα επιφάνειας στο οριζόντιο επίπεδο. Για παράδειγμα, η πυκνότητα ηλιακής ακτινοβολίας στο Ηράκλειο Κρήτης στο οριζόντιο επίπεδο, μεταβάλλεται από 17/5 έως 25/5 σύμφωνα με το σχήμα 1.7. Αντίστοιχα, η μέση ετήσια πυκνότητα της αιολικής ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας κάθετης στη διεύθυνση πνοής του ανέμου σε μία συγκεκριμένη περιοχή μπορεί να είναι, π.χ., 800W/m².
- Με την απαιτούμενη έκταση ανά μονάδα ισχύος για την εγκατάσταση συγκεκριμένης τεχνολογίας αξιοποίησης Α.Π.Ε. Για παράδειγμα, για την εγκατάσταση 1MW φωτοβολταϊκού σταθμού απαιτούνται περίπου 20 – 25 στρέμματα γης. Αντίστοιχα, για την εγκατάσταση μίας ανεμογεννήτριας 3MW απαιτούνται περίπου 2 στρέμματα γης. Είναι προφανές ότι η δεύτερη αυτή προσέγγιση δεν αναφέρεται στην πυκνότητα ισχύος της πρωτογενούς πηγής ενέργειας, αλλά στην πυκνότητα ισχύος συγκεκριμένης τεχνολογίας για την αξιοποίηση της πρωτογενούς πηγής. Έτσι θα ήταν πιο σωστό να την ορίσουμε ως πυκνότητα, π.χ., φωτοβολταϊκής ισχύος ή ισχύος αιολικού πάρκου, αντί πυκνότητα ηλιακής

ακτινοβολίας ή αιολικής ισχύος αντίστοιχα. Παρόλο που η προσέγγιση αυτή δεν αφορά στην πρωτογενή πηγή ενέργειας, ενίοτε χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις ανάπτυξης έργων Α.Π.Ε., ειδικά όταν ενδιαφέρει περισσότερο η δέσμευση γης και οι απαιτούμενες εκτάσεις για την εγκατάσταση συγκεκριμένης ισχύος τεχνολογίας Α.Π.Ε.



Σχήμα 1.7: Διακύμανση συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας στο Ηράκλειο Κρήτης από 17/5 έως 25/5 σε οριζόντια επιφάνεια.

Κλείνοντας την ενότητα αυτή, θα πρέπει να παρατηρήσουμε τη σημαντικά υψηλότερη πυκνότητα ισχύος που παρουσιάζουν τα ορυκτά καύσιμα από τις μονάδες Α.Π.Ε. Το χαρακτηριστικό αυτό, σε συνδυασμό με την ευκολία στην αποθήκευση και στη μεταφορά τους, οδήγησαν στην επικράτησή τους στον ενεργειακό τομέα. Ωστόσο, από την άλλη μεριά, τα στενά περιθώρια εξάντλησής τους και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τη χρήση τους, επιβάλλουν τον περιορισμό της χρήσης τους και την αντικατάστασή τους με τεχνολογίες αξιοποίησης Α.Π.Ε.

1.4. Μορφοτροπή ενέργειας και βαθμός απόδοσης

1.4.1. Βαθμός απόδοσης

Όπως ήδη αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, οι διάφορες φυσικές πηγές ενέργειας σπάνια χρησιμοποιούνται στη μορφή στην οποία διατίθενται από τη φύση. Τούτο προκύπτει εξαιτίας του ότι συνήθως χρειαζόμαστε ενέργεια είτε σε διαφορετική μορφή από τη φυσική διαθέσιμη είτε σε διαφορετικό σημείο από το σημείο διάθεσής της. Ως αποτέλεσμα τούτου, η διαθέσιμη φυσική πηγή ενέργειας απαιτείται να μετατραπεί είτε στην επιθυμητή μορφή για κατανάλωση είτε σε μορφή κατάλληλη, για να μεταφερθεί στο σημείο κατανάλωσης, στο οποίο θα μετατραπεί στην τελική επιθυμητή μορφή.

Κάθε μετατροπή ενέργειας από τη μία μορφή στην άλλη συνεπάγεται απώλειες ενέργειας. Δηλαδή, στη διάρκεια κάθε μετατροπής ενέργειας δεν επιτυγχάνεται απόλυτη μετατροπή σε ποσοστό 100% από τη μία μορφή στην άλλη. Ένα ποσό ενέργειας διαφεύγει της μετατροπής, δηλαδή είτε παραμένει στην αρχική μορφή ενέργειας είτε μετατρέπεται σε κάποια άλλη μορφή ενέργειας, διαφορετική από την επιθυμητή, που δεν είναι δυνατό να αξιοποιηθεί, και συνεπώς απορρίπτεται στο περιβάλλον.

Το ποσοστό επιτυχούς μετατροπής μιας ποσότητας αρχικής μορφής ενέργειας σε τελική μορφή εκφράζεται μέσω του βαθμού απόδοσης της μετατροπής. Γενικότερα, ο βαθμός απόδοσης της μετατροπής μιας αρχικής μορφής ενέργειας ποσότητας $E_{αρχ}$ σε μια τελική μορφή ενέργειας ποσότητας $E_{τελ}$ ορίζεται από τη σχέση:

$$\eta = \frac{E_{\text{τελ}}}{E_{\text{αρχ}}} \quad (1.20)$$

Δηλαδή ο βαθμός απόδοσης μιας ενεργειακής μετατροπής ορίζεται ως λόγος της ποσότητας ενέργειας $E_{\text{τελ}}$ που μετατρέπεται σε τελική μορφή από συνολική ποσότητα ενέργειας $E_{\text{αρχ}}$ αρχικής μορφής.

1.4.2. Ενεργειακές μορφοτροπές και βαθμός απόδοσης

Κατά μία ενεργειακή μετατροπή η ενέργεια δεν αυξομειώνεται, αλλά, αντιθέτως, παραμένει σταθερή. Δηλαδή η συνολική αρχική ενέργεια $E_{\text{αρχ}}$ μετατρέπεται σε μία επιθυμητή και επιδιωκόμενη τελική μορφή ενέργειας $E_{\text{τελ}}$ και, ενδεχομένως, σε ένα πλήθος n άλλων μορφών ενέργειας E_i , οι οποίες είτε διατίθενται προς το περιβάλλον ή ίσως να αξιοποιούνται παράλληλα με την επιθυμητή μορφή. Καθώς η ενέργεια του συστήματος διατηρείται θα ισχύει:

$$E_{\text{αρχ}} = E_{\text{τελ}} + \sum_{i=1}^n E_i \quad (1.21)$$

Συνεπώς, κατά μία ενεργειακή μετατροπή, η ενέργεια διατηρείται, αλλάζοντας μορφή. Καθώς λοιπόν οι ενεργειακές μετατροπές αφορούν σε αλλαγή μορφής ενέργειας, θα αναφέρονται πλέον στο παρόν σύγγραμμα με τον όρο «μορφοτροπές ενέργειας», ο οποίος περιγράφει με περισσότερη ακρίβεια την αλλαγή (τροπή) μορφής ενέργειας.

Οι ενεργειακές μορφοτροπές επιτελούνται είτε φυσικά είτε τεχνητά. Για παράδειγμα, είδαμε προηγουμένως ότι μία βασική ενεργειακή μορφοτροπή, στην οποία βασίζεται η ύπαρξη ζωής στον πλανήτη, είναι η μορφοτροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε χημική ενέργεια στα φυτά και στα δέντρα. Στην περίπτωση αυτή έχουμε μία φυσική μορφοτροπή ενέργειας. Από την άλλη μεριά, ο άνεμος που προσβάλλει την πτερωτή μιας ανεμογεννήτριας, μεταφέρει την κινητική ενέργειά του στην πτερωτή, η οποία μέσω του κιβωτίου ταχυτήτων και της ηλεκτρογεννήτριας, μορφοτρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Συνεπώς, στην περίπτωση αυτή, συζητάμε για μία τεχνητή μορφοτροπή. Οι φυσικές και τεχνητές ενεργειακές μορφοτροπές λαμβάνουν χώρα σε φυσικούς ή τεχνητούς μηχανισμούς, οι οποίοι θα ονομάζονται στη συνέχεια «μορφοτροπείς ενέργειας». Έτσι τα φυτά και τα δέντρα είναι φυσικοί μορφοτροπείς, ενώ μία ανεμογεννήτρια είναι ένας τεχνητός μορφοτροπέας.

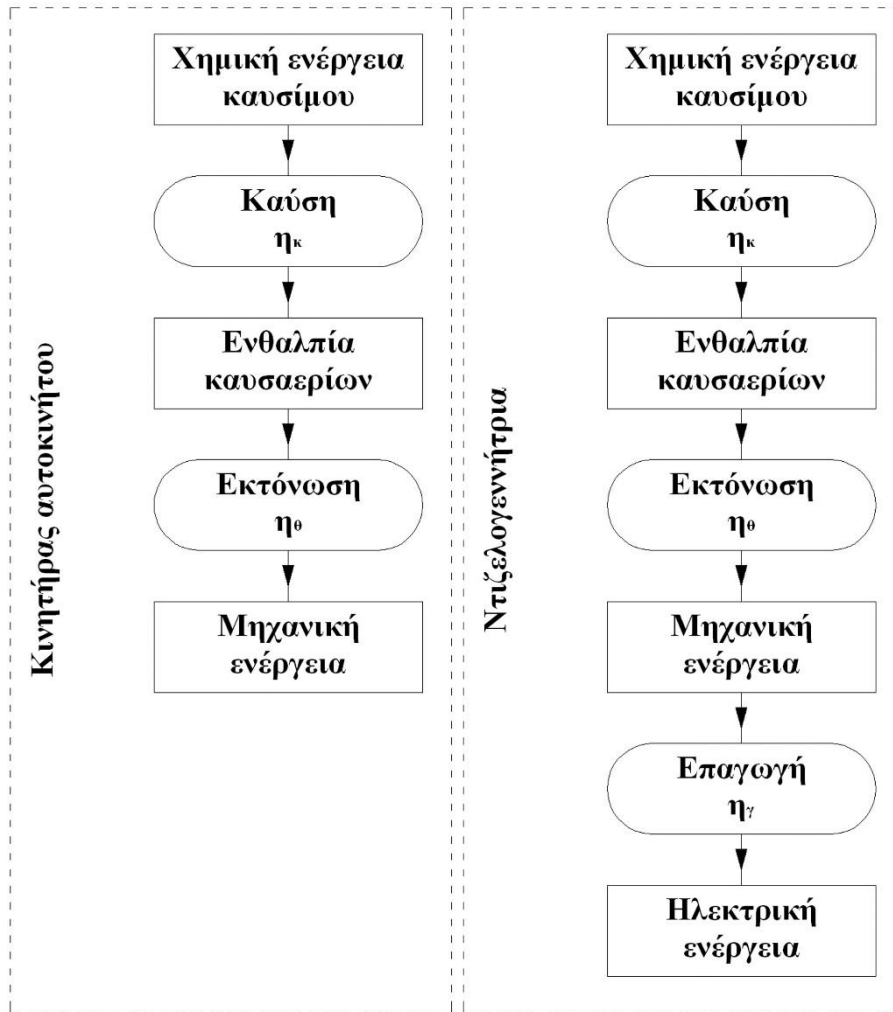
Συνήθως στο φυσικό και τεχνητό κόσμο δεν απαντώνται μεμονωμένες ενεργειακές μορφοτροπές. Αντιθέτως οι τεχνητές και φυσικές ενεργειακές μορφοτροπές συνήθως διαδέχονται η μία την άλλη, ξεκινώντας από μία αρχική μορφή ενέργειας, που μέσω διαδοχικών μορφοτροπών σε αντίστοιχους μορφοτροπείς, καταλήγει τελικά σε μία τελική μορφή ενέργειας. Αυτή η ενέργεια, αν πρόκειται για τεχνητή μορφοτροπή, θα αποτελεί και την τελική επιθυμητή μορφή ενέργειας προς χρήση (κατανάλωση, μεταφορά ή αποθήκευση).

Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα μιας εμβολοφόρου μηχανής εσωτερικής καύσης σε ένα αυτοκίνητο. Η αρχική μορφή ενέργειας που διατίθεται στο μορφοτροπέα (Μ.Ε.Κ.) είναι η χημική ενέργεια του καυσίμου. Η τελική μορφή ενέργειας που αξιοποιείται από το χρήστη είναι η μηχανική ενέργεια στον άξονα του αυτοκινήτου. Όμως η μετατροπή της αρχικής στην τελική μορφή δε γίνεται απευθείας, αλλά, αντιθέτως, μεσολαβούν κάποια ενδιάμεσα στάδια. Συγκεκριμένα, η αρχική χημική ενέργεια μέσω της καύσης στο θάλαμο καύσης μετατρέπεται αρχικά σε θερμότητα που διατίθεται στα θερμά και σε υψηλή πίεση καυσαέρια της καύσης. Το ενεργειακό περιεχόμενο των καυσαερίων της καύσης εκφράζεται μέσω του μεγέθους της ειδικής ενθαλπίας τους. Η ενέργεια των καυσαερίων μετατρέπεται, στη συνέχεια, σε μηχανική ενέργεια, μέσω της εκτόνωσής τους στο έμβολο της Μ.Ε.Κ. Τέλος, η μηχανική ενέργεια του εμβόλου, μέσω του συστήματος διωστήρα – στροφαλοφόρου άξονα, μεταφέρεται στον άξονα του οχήματος.

Αν αντί μίας εμβολοφόρου Μ.Ε.Κ. ενός αυτοκινήτου εξετάσουμε μία εμβολοφόρο Μ.Ε.Κ. για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή μία ντιζελογεννήτρια, τότε η τελική επιθυμητή ενέργεια δεν είναι η

μηχανική ενέργεια στον άξονα της μηχανής, αλλά η ηλεκτρική ενέργεια. Συνεπώς, προκειμένου να φτάσουμε στο τελικό προϊόν, απαιτείται μία ακόμα ενεργειακή μορφοτροπή, αυτή της μετατροπής της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική σε μία επαγωγική γεννήτρια.

Συνεπώς, σε ένα αυτοκίνητο, προκειμένου από το καύσιμο στο ρεζερβουάρ να πάρουμε την επιθυμητή μηχανική ενέργεια στο όχημα μεσολαβούν δύο ενεργειακές μορφοτροπές. Αντιθέτως, σε μία ντιζελογεννήτρια, οι μορφοτροπές ενέργειας που μεσολαβούν από την αρχική χημική ενέργεια στην τελική ηλεκτρική ενέργεια είναι κατά μία περισσότερες, δηλαδή τρεις. Αμφότερες οι ανωτέρω μορφοτροπές παρουσιάζονται στο σχήμα 1.8.



Σχήμα 1.8: Ενεργειακές μορφοτροπές στον κινητήρα ενός αυτοκινήτου και σε μία ντιζελογεννήτρια.

Είναι προφανές ότι κάθε επιμέρους ενεργειακή μορφοτροπή, που αποτελεί μέρος μιας συνολικής μορφοτροπής, συνοδεύεται από ένα βαθμό απόδοσης, ο οποίος σαφώς είναι μικρότερος της μονάδας. Με άλλα λόγια, σε κάθε επιμέρους ενεργειακή μορφοτροπή, ένα ποσό από την αρχική ενέργεια δε μορφοτρέπεται στην τελική, αλλά χάνεται. Οι ενεργειακές απώλειες, που καταγράφονται σε κάθε επιμέρους ενεργειακή μορφοτροπή, αθροίζονται μεταξύ τους και διαμορφώνουν τελικά το συνολικό βαθμό απόδοσης της συνολικής μορφοτροπής.

Στα ανωτέρω παραδείγματα, οι βαθμοί απόδοσης που χαρακτηρίζουν τις ενεργειακές μορφοτροπές είναι ο βαθμός απόδοσης καύσης η_κ, ο θερμοδυναμικός βαθμός απόδοσης η_θ της Μ.Ε.Κ. και, επιπλέον, μόνο για την περίπτωση της ντιζελογεννήτριας, ο επαγωγικός βαθμός απόδοσης η_γ της ηλεκτρικής γεννήτριας. Καθώς οι ενεργειακές μορφοτροπές που λαμβάνουν χώρα σε μία Μ.Ε.Κ. αυτοκινήτου, ή σε μία ντιζελογεννήτρια, είναι σειριακές, δηλαδή η μία έπεται της άλλης, όπως θα αποδειχθεί στην επόμενη

παράγραφο, ο συνολικός βαθμός απόδοσης της συνολικής μορφοτροπής προκύπτει ως το γινόμενο των βαθμών απόδοσης των επιμέρους μορφοτροπών:

$$\begin{aligned}\eta_{\text{αυτ}} &= \eta_{\kappa} \cdot \eta_{\theta} \\ \eta_{\text{ντιζ}} &= \eta_{\kappa} \cdot \eta_{\theta} \cdot \eta_{\gamma}\end{aligned}\quad (1.22)$$

όπου $\eta_{\text{αυτ}}$ και $\eta_{\text{ντιζ}}$ οι συνολικοί βαθμοί απόδοσης της συνολικής μορφοτροπής ενέργειας στον κινητήρα αυτοκινήτου και στη ντιζελογεννήτρια, αντίστοιχα.

Στο ανωτέρω παράδειγμα, στη θεωρητική περίπτωση που θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε την ίδια εμβολοφόρο μηχανή ντιζελ σε ένα όχημα και για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, θα περιμέναμε η συνολική απόδοσή της στην πρώτη περίπτωση να ήταν μεγαλύτερη, λόγω του ότι, κατά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, θα μεσολαβούσε μία ακόμα ενεργειακή μορφοτροπή έως την τελική μορφή ενέργειας, δηλαδή θα εισαγόταν ένας ακόμα βαθμός απόδοσης στο γινόμενο υπολογισμού του συνολικού βαθμού απόδοσης της συνολικής μορφοτροπής.

Μετά τα ανωτέρω καθίσταται προφανές ότι, προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η αξιοποίηση μιας πρωτογενούς μορφής ενέργειας, θα πρέπει να ελαχιστοποιήσουμε τις ενεργειακές μορφοτροπές που θα μεσολαβήσουν από την αρχική έως την τελική αξιοποιήσιμη μορφή. Είναι λοιπόν δόκιμο και εύλογο, αν πρέπει να χρησιμοποιήσουμε ελαφρύ πετρέλαιο (ντιζελ) για παραγωγή θερμότητας (π.χ. θέρμανση χώρων), τούτο να χρησιμοποιηθεί απευθείας προς καύση σε ένα καυστήρα κεντρικής θέρμανσης. Αντιθέτως είναι εντελώς παράλογο και ενεργειακά ανορθολογικό και ασύμφορο το να καταναλώνεται ελαφρύ πετρέλαιο σε μία ντιζελογεννήτρια για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και, στη συνέχεια, να παράγεται θερμότητα, καταναλώνοντας την ηλεκτρική ενέργεια σε ηλεκτρικές αντιστάσεις, ή σε αντλίες θερμότητας. Στην πρώτη περίπτωση (καύση ντιζελ σε καυστήρα θέρμανσης) μεσολαβεί μόνο μία μορφοτροπή (καύση) από την αρχική χημική ενέργεια του καυσίμου έως την παραγωγή θερμότητας, με βαθμό απόδοσης που προσεγγίζει το 90%. Αντιθέτως στη δεύτερη περίπτωση, σύμφωνα με το σχήμα 1.8, από την αρχική χημική ενέργεια μεσολαβούν τρεις μορφοτροπές έως την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, με συνολικό βαθμό απόδοσης που δίνεται από τη σχέση 1.22. Σε αυτό το βαθμό απόδοσης θα πρέπει να συνυπολογιστούν οι απώλειες μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας από το σταθμό παραγωγής έως το σημείο κατανάλωσης, καθώς και η απόδοση παραγωγής θερμότητας από ηλεκτρική ενέργεια μέσω ηλεκτρικών αντιστάσεων ή αντλιών θερμότητας. Η συνολική απόδοση σε αυτή τη δεύτερη περίπτωση αναμένεται να είναι κάτω του 35%.

Από τους μορφοτροπείς που χρησιμοποιούνται για «παραγωγή» ηλεκτρικής ενέργειας είναι πλέον ευνόητο ότι υψηλότερη απόδοση θα παρουσιάζουν εκείνοι με τις λιγότερες μορφοτροπές από την αρχική πρωτογενή μορφή ενέργειας έως την τελική ηλεκτρική ενέργεια. Τέτοιες περιπτώσεις είναι οι υδροστρόβιλοι και οι ανεμογεννήτριες, στις οποίες μεσολαβεί μία μόνο μορφοτροπή, από τη διαθέσιμη πρωτογενή μηχανική ενέργεια (υδραυλική ή αιολική) στην τελική ηλεκτρική. Σε αυτές τις περιπτώσεις, ο συνολικός βαθμός απόδοσης της μορφοτροπής μπορεί να ξεπεράσει το 90% για την περίπτωση των υδροστρόβιλων, ενώ για τις ανεμογεννήτριες κυμαίνεται μεταξύ 40-45%.

Αντίθετα στις θερμοηλεκτρικές γεννήτριες (ατμοστρόβιλοι, ντιζελογεννήτριες, αεριοστρόβιλοι) μεσολαβούν τουλάχιστον τρεις ενδιάμεσες μορφοτροπές ενέργειας κατά τη συνολική μορφοτροπή από την αρχική χημική έως την τελική ηλεκτρική ενέργεια. Οι συνολικοί βαθμοί απόδοσης, που καταγράφονται σε αυτές τις περιπτώσεις, είναι της τάξης του 30-35% για ατμοστρόβιλους και αεριοστρόβιλους και 40-45% για ντιζελογεννήτριες. Οι χαμηλοί βαθμοί απόδοσης στις περιπτώσεις θερμοηλεκτρικών μονάδων διαμορφώνονται, κυρίως, από το θερμοδυναμικό βαθμό απόδοσης ο οποίος, εν γένει, καταγράφεται χαμηλός. Ας θυμηθούμε ότι οι βασικοί θεωρητικοί θερμοδυναμικοί κύκλοι Otto και Diesel που περιγράφουν τη λειτουργία μιας Μ.Ε.Κ. παρουσιάζουν βαθμό απόδοσης που δεν ξεπερνάει το 50-55%.

1.4.3. Μέσος και στιγμιαίος βαθμός απόδοσης

Στη γενική περίπτωση μορφοτροπής ενέργειας, ο ρυθμός με τον οποίο εισέρχεται αρχική και εξέρχεται τελική ενέργεια στο μορφοτροπέα, δηλαδή η εισερχόμενη και εξερχόμενη ισχύς του μορφοτροπέα, δεν είναι σταθερός. Αντιθέτως μεταβάλλεται κατ' επιταγή της ζήτησης ισχύος, που προκύπτει από τις ανάγκες της κατανάλωσης.

Ως στιγμιαίος βαθμός απόδοσης μιας μορφοτροπής ενέργειας, αναφερόμενος σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή, ορίζεται ο λόγος της εξερχόμενης ισχύος $P_{εξ}$ από το μορφοτροπέα ενέργειας, προς την εισερχόμενη ισχύ $P_{εισ}$ σε αυτόν, τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή:

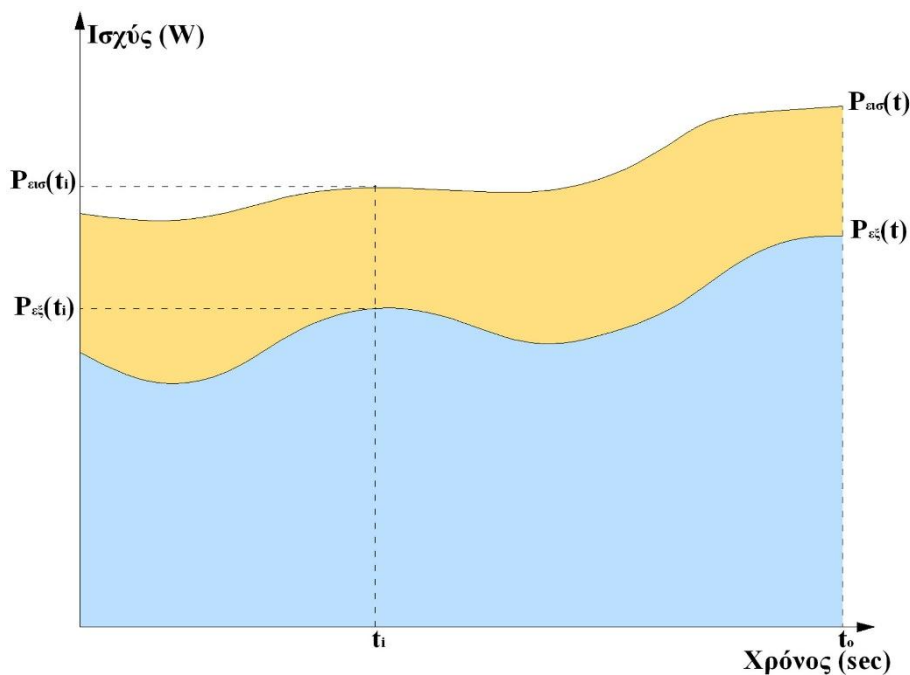
$$\eta = \frac{P_{εξ}}{P_{εισ}} \quad (1.23)$$

Είναι προφανές ότι, στη γενική περίπτωση, ο στιγμιαίος βαθμός απόδοσης μιας μορφοτροπής δεν παραμένει σταθερός. Αντιθέτως μεταβάλλεται όσο μεταβάλλεται το σημείο λειτουργίας του μορφοτροπέα και, φυσικά, υπό την προϋπόθεση ότι η λειτουργία του μορφοτροπέα σε διαφορετικά σημεία λειτουργίας συνεπάγεται διαφορετικό βαθμό απόδοσης. Η τελευταία προϋπόθεση είναι χαρακτηριστική σχεδόν για το σύνολο των μορφοτροπέων ενέργειας (θερμοηλεκτρικές μονάδες, αντλίες, φωτοβολταϊκά πλαίσια κλπ). Ωστόσο, ας μην ξεχνάμε και την περίπτωση μερικών μοντέλων των υδροστροβίλων (Pelton, Kaplan), οι οποίοι έχουν την ικανότητα να διατηρούν σταθερό βαθμό απόδοσης για ένα μεγάλο εύρος σημείων λειτουργίας.

Εκτός του στιγμιαίου βαθμού απόδοσης μιας ενεργειακής μορφοτροπής, μπορούμε να ορίσουμε το μέσο βαθμό απόδοσης της μορφοτροπής για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα από τη σχέση:

$$\bar{\eta} = \frac{E_{εξ}}{E_{εισ}} \quad (1.24)$$

Είναι προφανές ότι ο μέσος βαθμός απόδοσης αναφέρεται σε ένα χρονικό διάστημα, και όχι σε μία μεμονωμένη χρονική στιγμή. Στο χρονικό αυτό διάστημα είναι δυνατό η εισερχόμενη και εξερχόμενη ισχύς στο μορφοτροπέα να μεταβάλλονται, και συνεπώς θα μεταβάλλεται και ο στιγμιαίος βαθμός απόδοσης. Ο μέσος βαθμός απόδοσης της μορφοτροπής στο χρονικό διάστημα εκφράζει τη μέση απόδοση με την οποία υλοποιήθηκε η μορφοτροπή. Προφανώς ένα τέτοιο μέγεθος δεν μπορεί να υπολογιστεί ως λόγος στιγμιαίων ισχύων. Αντιθέτως υπολογίζεται ως ο λόγος της συνολικής εξερχόμενης ενέργειας από το μορφοτροπέα προς τη συνολική εισερχόμενη, στο ίδιο χρονικό διάστημα.



Σχήμα 1.9: Στιγμιαίος και μέσος βαθμός απόδοσης μορφοτροπής ενέργειας.

Στο σχήμα 1.9 παρουσιάζονται σε ένα κοινό διάγραμμα ισχύος – χρόνου οι μεταβολές της εισερχόμενης και της εξερχόμενης ισχύος σε ένα ενεργειακό μορφοτροπέα για ένα συνολικό χρονικό

διάστημα t_0 . Μία τυχαία χρονική στιγμή t_i ο στιγμιαίος βαθμός απόδοσης της μορφοτροπής ενέργειας, σύμφωνα με τα ανωτέρω, θα δίνεται από τη σχέση:

$$\eta(t_i) = \frac{P_{εξ}(t_i)}{P_{εισ}(t_i)} \quad (1.25)$$

Η συνολική εξερχόμενη ενέργεια από τη μορφοτροπή αντιστοιχεί στο εμβαδόν κάτω από την καμπύλη της εξερχόμενης ισχύος και εντός των χρονικών ορίων, που καθορίζουν το υπό μελέτη χρονικό διάστημα (γαλάζια περιοχή). Η συνολική εισερχόμενη ενέργεια στη μορφοτροπή αντιστοιχεί στο εμβαδόν κάτω από την καμπύλη εισερχόμενης ισχύος και εντός των χρονικών ορίων, που καθορίζουν το υπό μελέτη χρονικό διάστημα (μπεζ και γαλάζια περιοχή). Ο λόγος των εμβαδών των δύο περιοχών, δηλαδή το εμβαδόν της γαλάζιας περιοχής προς το συνολικό εμβαδόν και των δύο περιοχών (γαλάζιας και μπεζ), αντιστοιχεί στο μέσο βαθμό απόδοσης της ενεργειακής μορφοτροπής, σύμφωνα με τη σχέση 1.24.

Η αναγκαιότητα γνώσης του στιγμιαίου βαθμού απόδοσης έχει να κάνει με την προσπάθεια βελτιστοποίησης της ενεργειακής μορφοτροπής, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η κατανάλωση εισερχόμενης ενέργειας ανά μονάδα εξερχόμενης ενέργειας. Η γνώση, δηλαδή, του στιγμιαίου βαθμού απόδοσης μας επιτρέπει να εντοπίσουμε ακριβώς το πόσο απέχουμε από τη βέλτιστη απόδοση της μορφοτροπής, και να επιχειρήσουμε τη προσέγγισή της, αλλάζοντας το σημείο λειτουργίας του μορφοτροπέα, εφόσον φυσικά αυτό δεν περιορίζεται από εξωγενείς παραμέτρους.

Η γνώση του μέσου βαθμού απόδοσης για μία ενεργειακή μορφοτροπή, που αναφέρεται σε ένα χρονικό διάστημα, αποτελεί χαρακτηριστικό αποτέλεσμα της διαδικασίας, το οποίο αποτυπώνει χαρακτηριστικά την απόδοση της ενεργειακής μορφοτροπής, επιτρέποντας τον υπολογισμό επιπλέον χαρακτηριστικών μεγεθών κατανάλωσης αρχικής ενέργειας και κόστους μορφοτροπής.

1.5. Βαθμός απόδοσης μορφοτροπέων σε σειρά και παράλληλα

Σε ενεργειακά συστήματα μπορούμε να συναντήσουμε δύο βασικούς τύπους συνδεσμολογίας μορφοτροπέων, τη σύνδεση σε σειρά και τη σύνδεση παράλληλα. Προφανώς είναι δυνατό να προκύψουν και συνδυασμοί των δύο βασικών συνδεσμολογιών. Η σύνδεση των μορφοτροπέων υποβάλλεται από τη μορφοτροπή, το μέγεθος του κάθε μορφοτροπέα και από μία σειρά άλλων παραμέτρων (κόστος μορφοτροπής, μεγιστοποίηση απόδοσης, απαιτήσεις ζήτησης ενέργειας κλπ).

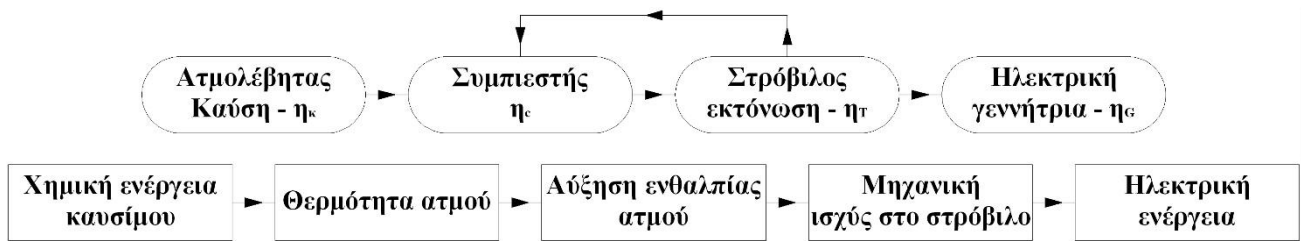
Για παράδειγμα, σε ένα θερμοηλεκτρικό σταθμό έχουμε πολλές θερμοηλεκτρικές μονάδες που λειτουργούν παράλληλα. Οι μονάδες αυτές λειτουργούν όλες συγχρονισμένα στη συχνότητα εναλλασσόμενου ρεύματος του συστήματος και ανεξάρτητα η μία από την άλλη, δηλαδή η λειτουργία μίας μονάδας δεν επηρεάζει τη λειτουργία καμίας άλλης μονάδας. Ωστόσο η εξερχόμενη ισχύς από την κάθε μονάδα, αθροιζόμενη στη συνολική εξερχόμενη ισχύ των υπόλοιπων μονάδων, εξυπηρετεί τη συνολική ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα σύστημα.

Σε κάθε θερμοηλεκτρική μονάδα μπορεί όμως να συνυπάρχουν περισσότεροι του ενός μορφοτροπέις, οι οποίοι, συνδεδεμένοι σε σειρά, έχουν σκοπό τη μορφοτροπή της αρχικής ενέργειας σε τελική. Έτσι, για παράδειγμα, σε έναν ατμοστρόβιλο, οι μορφοτροπέις που συνυπάρχουν συνδεδεμένοι σε σειρά είναι οι εξής:

- ο λέβητας της μονάδας, με σκοπό τη μορφοτροπή της χημικής ενέργειας του καυσίμου σε θερμότητα εργαζόμενου μέσου (ατμού),
- ο συμπιεστής, με σκοπό τη μορφοτροπή μηχανικής ενέργειας σε ενθαλπία εργαζόμενου μέσου,
- ο στρόβιλος, στον οποίο η ενθαλπία του ατμού μορφοτρέπεται σε μηχανική ενέργεια στον άξονα του στρόβιλου,
- η γεννήτρια, στην οποία η μηχανική ενέργεια του στρόβιλου μορφοτρέπεται σε ηλεκτρική.

Οι τέσσερις αυτοί μορφοτροπέις σε ένα ατμοστρόβιλο βρίσκονται σε σειρά συνδεδεμένοι. Η εξερχόμενη ισχύς από τον κάθε μορφοτροπέα αποτελεί εισερχόμενη ισχύ στον επόμενο μορφοτροπέα, και, συνεπώς, η λειτουργία του κάθε μορφοτροπέα καθορίζεται από τη λειτουργία του προηγούμενου, εκτός του συμπιεστή, στον οποίο η εισερχόμενη ισχύς αποτελεί ποσοστό της εξερχόμενης ισχύος του στρόβιλου. Στο

σχήμα 1.10 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής ισχύος σε ένα ατμοστρόβιλο και η σύνδεση των ενδιάμεσων μορφοτροπέων.



Σχήμα 1.10: Σύνδεση μορφοτροπέων και ροή ισχύος σε ένα ατμοστρόβιλο.

Από την ανωτέρω ανάλυση καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι ένας θερμοηλεκτρικός σταθμός αποτελείται από ένα σύνολο μορφοτροπέων που, σε πρώτο επίπεδο, είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους σε σειρά, δημιουργώντας έτσι αυτοτελείς ενεργειακούς μορφοτροπέις, τις θερμοηλεκτρικές μονάδες. Οι μονάδες αυτές, συνδεδεμένες μεταξύ τους παράλληλα, συνεργάζονται για την κάλυψη της συνολικής απαίτησης της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, την οποία ο θερμοηλεκτρικός σταθμός εξυπηρετεί.

Η ανωτέρω περίπτωση συνδεσμολογίας μορφοτροπέων, σε σειρά και παράλληλα, δεν περιορίζεται μόνο σε θερμοηλεκτρικούς σταθμούς. Αντιθέτως απαντάται στα περισσότερα ενεργειακά συστήματα.

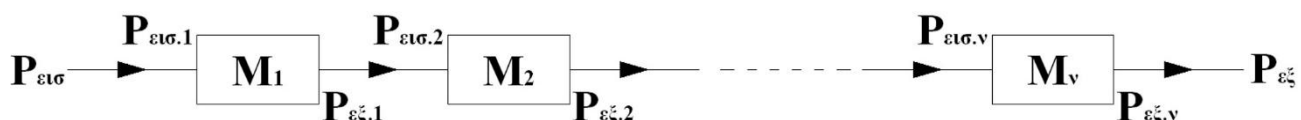
Στις διάφορες περιπτώσεις σύνδεσης μορφοτροπέων, είναι επιθυμητή η γνώση του συνολικού στιγμιαίου βαθμού απόδοσης του συστήματος. Όπως ήδη αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, η γνώση του συνολικού στιγμιαίου βαθμού απόδοσης, παράλληλα με τις δυνατότητες και τις προδιαγραφές των μορφοτροπέων που απαρτίζουν το ενεργειακό σύστημα, επιτρέπει το χειρισμό του συστήματος με σκοπό τη μεγιστοποίηση της απόδοσής του, με άμεσες συνέπειες την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης αρχικής ενέργειας και του κόστους παραγωγής. Στη συνέχεια της παρούσας ενότητας, θα παρουσιαστεί ο αναλυτικός υπολογισμός του συνολικού βαθμού απόδοσης των δύο βασικών συνδεσμολογιών μορφοτροπέων ενέργειας, δηλαδή της σύνδεσης σε σειρά και της σύνδεσης παράλληλα.

1.5.1. Σύνδεση μορφοτροπέων σε σειρά

Για το παρακάτω σύνολο n μορφοτροπέων συνδεδεμένων σε σειρά, θα επιχειρήσουμε να αναπτύξουμε αναλυτική σχέση υπολογισμού του συνολικού στιγμιαίου βαθμού απόδοσης του συστήματος. Θεωρούμε $P_{\text{εισ},i}$ και $P_{\text{εξ},i}$ την εισερχόμενη και εξερχόμενη αντίστοιχα στιγμιαία ισχύ στο M_i μορφοτροπέα και η_i το στιγμιαίο βαθμό απόδοσης του μορφοτροπέα αυτού στο συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας. Είναι προφανές ότι για το στιγμιαίο βαθμό απόδοσης του κάθε μορφοτροπέα M_i θα ισχύει η σχέση:

$$\eta_i = \frac{P_{\text{εξ},i}}{P_{\text{εισ},i}}.$$

Επίσης, έστω $P_{\text{εισ}}$ και $P_{\text{εξ}}$ η εισερχόμενη και η εξερχόμενη ισχύς ολόκληρου του ενεργειακού συστήματος.



Σχήμα 1.11: Σύνδεση μορφοτροπέων ενέργειας σε σειρά.

Ο συνολικός στιγμιαίος βαθμός απόδοσης της συνδεσμολογίας θα δίνεται από τη σχέση:

$$\eta_{\sigma\omega.} = \frac{P_{\epsilon\xi}}{P_{\epsilon\iota\sigma}}$$

Όμως

$$P_{\epsilon\xi} = P_{\epsilon\xi,v} = \eta_v \cdot P_{\epsilon\iota\sigma,v} \Leftrightarrow P_{\epsilon\xi} = \eta_v P_{\epsilon\xi,v-1}$$

επειδή $P_{\epsilon\xi,v-1}=P_{\epsilon\iota\sigma,v}$ (η εξερχόμενη ισχύς από το μορφοτροπέα M_{v-1} ισούται με την εισερχόμενη ισχύ στο μορφοτροπέα M_v).

Είναι όμως

$$P_{\epsilon\xi,v-1} = \eta_{v-1} \cdot P_{\epsilon\iota\sigma,v-1}, \text{ οπότε:}$$

$$P_{\epsilon\xi} = \eta_v \cdot \eta_{v-1} P_{\epsilon\iota\sigma,v-1} \Leftrightarrow \dots \Leftrightarrow P_{\epsilon\xi} = \eta_v \cdot \eta_{v-1} \dots \eta_2 \cdot P_{\epsilon\iota\sigma,2} \Leftrightarrow P_{\epsilon\xi} = \eta_v \cdot \eta_{v-1} \dots \eta_2 \cdot P_{\epsilon\xi,1} \Leftrightarrow$$

$$P_{\epsilon\xi} = \eta_v \cdot \eta_{v-1} \dots \eta_2 \cdot \eta_1 \cdot P_{\epsilon\iota\sigma,1} \Leftrightarrow P_{\epsilon\xi} = \eta_v \cdot \eta_{v-1} \dots \eta_2 \cdot \eta_1 \cdot P_{\epsilon\iota\sigma}$$

επειδή προφανώς είναι $P_{\epsilon\iota\sigma,1}=P_{\epsilon\iota\sigma}$.

Τελικά όμως η τελευταία σχέση μας δίνει:

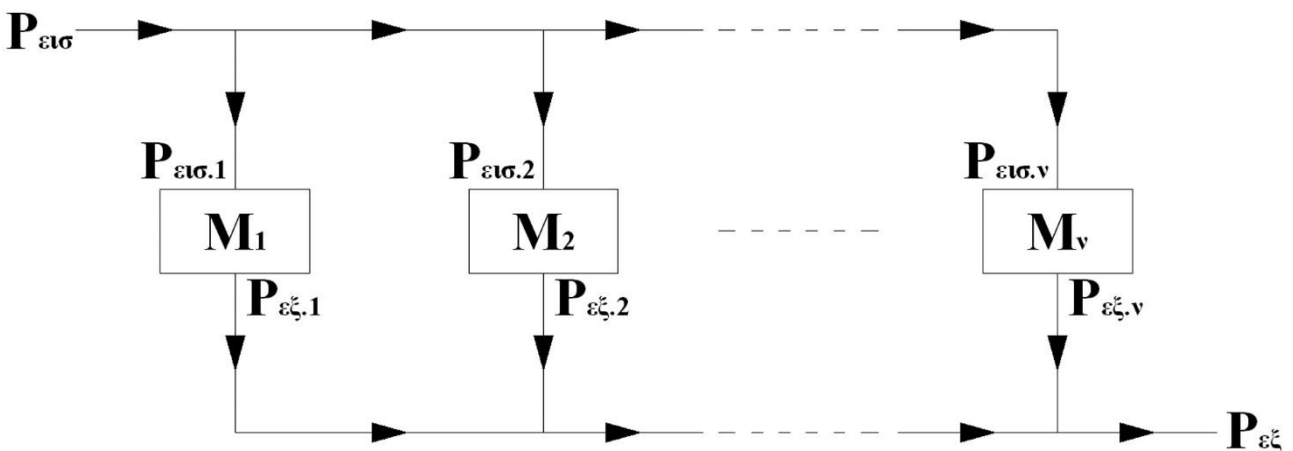
$$P_{\epsilon\xi} = \eta_v \cdot \eta_{v-1} \dots \eta_2 \cdot \eta_1 \cdot P_{\epsilon\iota\sigma} \Leftrightarrow \frac{P_{\epsilon\xi}}{P_{\epsilon\iota\sigma}} = \eta_{\sigma\omega.} = \eta_v \cdot \eta_{v-1} \dots \eta_2 \cdot \eta_1 \Leftrightarrow \tag{1.26}$$

$$\eta_{\sigma\omega.} = \eta_1 \cdot \eta_2 \dots \eta_{v-1} \cdot \eta_v$$

Δηλαδή καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι ο συνολικός στιγμιαίος βαθμός απόδοσης συστήματος μορφοτροπέων συνδεδεμένων σε σειρά ισούται με το γινόμενο των επιμέρους στιγμιαίων βαθμών απόδοσης των μορφοτροπέων.

1.5.2. Σύνδεση μορφοτροπέων παράλληλα

Για το παρακάτω σύνολο μορφοτροπέων συνδεδεμένων παράλληλα, θα επιχειρήσουμε, ομοίως με το προηγούμενο παράδειγμα, να αναπτύξουμε αναλυτική σχέση υπολογισμού του συνολικού στιγμιαίου βαθμού απόδοσης του συστήματος. Θεωρούμε $P_{\epsilon\iota\sigma,i}$ και $P_{\epsilon\xi,i}$ την εισερχόμενη και εξερχόμενη αντίστοιχα ισχύ στον M_i μορφοτροπέα και η_i το στιγμιαίο βαθμό απόδοσης του μορφοτροπέα αυτού για το συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας.



Σχήμα 1.12: Σύνδεση μορφοτροπέων ενέργειας παράλληλα.

Ορίζουμε και πάλι ως $P_{\text{εισ}}$ και $P_{\text{εξ}}$ τη συνολική εισερχόμενη και εξερχόμενη ισχύ του συστήματος αντίστοιχα.

Ορίζουμε ως ξ_i το ποσοστό της εξερχόμενης ισχύος $P_{\text{εξ},i}$ από το μορφοτροπέα M_i ως προς τη συνολική εξερχόμενη ισχύ από όλο το σύστημα $P_{\text{εξ}}$, δηλαδή:

$$\xi_i = \frac{P_{\text{εξ},i}}{P_{\text{εξ}}} = \frac{P_{\text{εξ},i}}{\sum_{i=1}^v P_{\text{εξ},i}}.$$

Κατά τα γνωστά, ο βαθμός απόδοσης η_i του μορφοτροπέα M_i γράφεται:

$$\eta_i = \frac{P_{\text{εξ},i}}{P_{\text{εισ},i}}, \text{ οπότε:}$$

$$\xi_i = \frac{P_{\text{εξ},i}}{\sum_{i=1}^v P_{\text{εξ},i}} = \frac{\eta_i \cdot P_{\text{εισ},i}}{\sum_{i=1}^v P_{\text{εξ},i}} \Leftrightarrow \frac{\xi_i}{\eta_i} = \frac{P_{\text{εισ},i}}{\sum_{i=1}^v P_{\text{εξ},i}}.$$

Ο συνολικός βαθμός απόδοσης όλου του συστήματος, τον οποίο θέλουμε να εκφράσουμε αναλυτικά, θα ισούται με:

$$\eta_{\text{συν.}} = \frac{P_{\text{εξ}}}{P_{\text{εισ}}} = \frac{\sum_{i=1}^v P_{\text{εξ},i}}{\sum_{i=1}^v P_{\text{εισ},i}} \Leftrightarrow \sum_{i=1}^v P_{\text{εξ},i} = \eta_{\text{συν.}} \cdot \sum_{i=1}^v P_{\text{εισ},i}.$$

Συνδυάζοντας τις δύο τελευταίες σχέσεις, γράφουμε:

$$\frac{\xi_i}{\eta_i} = \frac{P_{\text{εισ},i}}{\sum_{i=1}^v P_{\text{εξ},i}} \Leftrightarrow \frac{\xi_i}{\eta_i} = \frac{P_{\text{εισ},i}}{\eta_{\text{συν.}} \cdot \sum_{i=1}^v P_{\text{εξ},i}}.$$

Αν τώρα γράψουμε την τελευταία σχέση v φορές, μία για κάθε μορφοτροπέα και όλες τις προκύπτουσες v σχέσεις τις αθροίσουμε κατά μέλη, θα πάρουμε:

$$\sum_{i=1}^v \frac{\xi_i}{\eta_i} = \sum_{i=1}^v \frac{P_{\text{εισ},i}}{\eta_{\text{συν.}} \cdot \sum_{i=1}^v P_{\text{εξ},i}} \Leftrightarrow \sum_{i=1}^v \frac{\xi_i}{\eta_i} = \frac{\sum_{i=1}^v P_{\text{εισ},i}}{\eta_{\text{συν.}} \cdot \sum_{i=1}^v P_{\text{εξ},i}} \Leftrightarrow \eta_{\text{συν.}} = \left[\sum_{i=1}^v \frac{\xi_i}{\eta_i} \right]^{-1} \quad (1.27)$$

Η τελευταία σχέση δίνει το συνολικό στιγμιαίο βαθμό απόδοσης των v μορφοτροπέων συνδεδεμένων παράλληλα. Όπως φαίνεται από τη σχέση αυτή, ο συνολικός βαθμός απόδοσης εξαρτάται από τους στιγμιαίους βαθμούς απόδοσης, με τους οποίους λειτουργούν οι μορφοτροπέες, και από το ποσοστό συμμετοχής του κάθε μορφοτροπέα στη συνολική εξερχόμενη ισχύ.

1.6. Συμβατικά και «υβριδικά» ενεργειακά συστήματα

Τα τελευταία χρόνια, ιδιαίτερα μετά την εξάπλωση των διαφόρων τεχνολογιών μορφοτροπής ενέργειας από Α.Π.Ε., ενίοτε γίνεται λόγος για «υβριδικά» ενεργειακά συστήματα ή για «υβριδικούς» σταθμούς παραγωγής. Στην παρούσα ενότητα θα δώσουμε το κριτήριο διάκρισης ανάμεσα σε ένα κοινό, ως το ονομάσουμε «συμβατικό», ενεργειακό σύστημα ή σταθμό παραγωγής και σε ένα «υβριδικό» ενεργειακό σύστημα. Καταχρηστικά στις επόμενες παραγράφους και στα επόμενα κεφάλαια, θα χρησιμοποιήσουμε τον όρο «παραγωγή» ενέργειας, ο οποίος έχει επικρατήσει να χρησιμοποιείται, για να περιγράψει τη μορφοτροπή ενέργειας από σταθμούς και μονάδες μορφοτροπής.

1.6.1. Συμβατικά ενεργειακά συστήματα

Ένα συμβατικό ενεργειακό σύστημα είναι το σύστημα το οποίο βασίζει την παραγωγή ενέργειας σε μονάδες εγγυημένης και ελεγχόμενης παραγωγής. Τέτοιες μονάδες είναι εκείνες στις οποίες η τροφοδοσία της αρχικής προς μορφοτροπή ενέργειας μπορεί να ελεγχθεί και να προβλεφθεί. Η δυνατότητα ρύθμισης και ελέγχου της τροφοδοσίας της αρχικής μορφής ενέργειας συνεπάγεται τη μορφοτροπή σε τελική μορφή ενέργειας, κατά βούληση, και, ουσιαστικά, σύμφωνα με τις επιταγές της ζήτησης σε τελική μορφή ενέργειας. Για παράδειγμα, σε μία θερμοηλεκτρική μονάδα, δεδομένης της διαθεσιμότητας του καυσίμου, είναι δυνατό να ρυθμιστεί η λειτουργία της, κατά βούληση, με βάση τα τεχνικά χαρακτηριστικά της μονάδας και τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, που καλείται να εξυπηρετήσει. Αντίστοιχα, για ένα καυστήρα κεντρικής θέρμανσης, δεδομένης πάντα της διαθεσιμότητας του καυσίμου (πετρελαίου θέρμανσης, συσσωματώματα βιομάζας), είναι δυνατό να ρυθμιστεί η λειτουργία του, κατά βούληση, με σκοπό να εξυπηρετήσει συγκεκριμένη ζήτηση θερμικής ισχύος.

Θα ονομάσουμε τους μορφοτροπείς, στους οποίους η μορφοτροπή ενέργειας μπορεί να ελεγχθεί κατά βούληση, δεδομένης της διαθεσιμότητας του καυσίμου, ως *μορφοτροπείς ή μονάδες εγγυημένης παραγωγής*. Συνήθως μονάδες εγγυημένης παραγωγής είναι εκείνες στις οποίες η αρχική μορφή ενέργειας παρέχεται από μη ανανεώσιμες πηγές, κυρίως ορυκτά καύσιμα. Επιπλέον των ορυκτών καυσίμων, μονάδες εγγυημένης παραγωγής δύναται να αποτελούν εκείνες στις οποίες η αρχική μορφή ενέργειας προέρχεται από καύσιμα βιομάζας, υπό την προϋπόθεση ότι η διαθεσιμότητά τους, ικανή ή ανεπαρκής αναφορικά με συγκεκριμένη ζήτηση ενέργειας, είναι γνωστή.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να διευκρινιστεί ότι ο χαρακτηρισμός μιας μονάδας ως εγγυημένης παραγωγής δεν έχει να κάνει με την επάρκεια της αρχικής μορφής ενέργειας αναφορικά με την κάλυψη κάποιας ζήτησης ενέργειας. Αντιθέτως ένα μορφοτροπέας ενέργειας θα είναι εγγυημένης παραγωγής, όταν η μορφοτροπή ενέργειας μπορεί να γίνει με τρόπο ελεγχόμενο από το χρήστη. Για παράδειγμα, μία ντιζελογεννήτρια θα είναι σε κάθε περίπτωση μονάδα εγγυημένης παραγωγής, αφού, δεδομένης της διαθεσιμότητας του καυσίμου (μαζούτ ή ελαφρύ πετρελαίου), η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το χρήστη μπορεί να ρυθμιστεί κατά βούληση. Ο χαρακτηρισμός της ντιζελογεννήτριας ως εγγυημένης μονάδας παραγωγής δεν επηρεάζεται από το αν η μονάδα είναι εγκατεστημένη στο θερμοηλεκτρικό σταθμό Μεγαλούπολης, στον οποίο η τροφοδοσία του καυσίμου είναι σε μεγάλο βαθμό εγγυημένη, ή από το αν η μονάδα είναι εγκατεστημένη στον Αυτόνομο Σταθμό Παραγωγής του Αγίου Ευστρατίου, όπου, ενδεχομένως, μία παρατεταμένη περίοδος έντονων καιρικών φαινομένων είναι δυνατό να θέσει υπό αμφισβήτηση την επάρκεια των αποθεμάτων καυσίμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο νησί.

Μορφοτροπείς μη εγγυημένης παραγωγής είναι εκείνοι στους οποίους η μορφοτροπή ενέργειας δεν είναι δυνατό να ελεγχθεί κατά βούληση από το χρήστη. Σε αυτές τις περιπτώσεις η μορφοτροπή ενέργειας συνήθως καθορίζεται από τη διαθεσιμότητα της αρχικής μορφής ενέργειας, η οποία, σε αντίθεση με την περίπτωση των μονάδων εγγυημένης παραγωγής, είναι τυχαία και δεν μπορεί να ελεγχθεί. Το γεγονός αυτό του ότι είναι τυχαία η διαθεσιμότητα της αρχικής μορφής ενέργειας, αλλά και η μη δυνατότητα ελέγχου της από το χρήστη καθιστά τη μορφοτροπή της από τους αντίστοιχους μορφοτροπείς ως τυχαία και μη ελεγχόμενη. Ο αναγνώστης ίσως αντιλαμβάνεται ότι οι μορφοτροπείς μη εγγυημένης παραγωγής είναι, συνήθως, οι μονάδες αξιοποίησης Α.Π.Ε. Η τυχαία διαθεσιμότητα αιολικού δυναμικού ή ηλιακής

ακτινοβολίας καθιστούν τους αντίστοιχους μορφοτροπείς (ανεμογεννήτριες, ηλιακούς συλλέκτες, φωτοβολταϊκά) ως μονάδες μη εγγυημένης παραγωγής.

Από την εμπειρία μας, ή και την όποια εξειδικευμένη γνώση διαθέτουμε, αντιλαμβανόμαστε ότι η μορφοτροπή σε χρήσιμες μορφές ενέργειας παγκοσμίως στηρίζεται, έως σήμερα, κυρίως σε συμβατικά ενεργειακά συστήματα, δηλαδή σε μορφοτροπείς εγγυημένης παραγωγής. Γνωρίζουμε, για παράδειγμα, ότι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στηρίζεται κυρίως σε θερμοηλεκτρικές μονάδες εγγυημένης παραγωγής, στις οποίες η αρχική μορφή ενέργειας διατίθεται από ορυκτά στερεά, υγρά ή αέρια καύσιμα (άνθρακας, πετρέλαιο, φυσικό αέριο και πυρηνικά καύσιμα). Ομοίως, η παραγωγή θερμικής ή μηχανικής ενέργειας στηρίζεται κυρίως επίσης σε μονάδες εγγυημένης παραγωγής (Μ.Ε.Κ. ή στρόβιλοι ως κινητήρες οχημάτων, καυστήρες θέρμανσης) με την αρχική ενέργεια και πάλι να προέρχεται από ορυκτά καύσιμα (βενζίνες, ντίζελ, κηροζίνες, υγραέριο). Το σύνολο των ανωτέρω ενεργειακών συστημάτων, τα οποία έχουν επικρατήσει στις μέρες μας για τη διάθεση χρησίων μορφών ενέργειας, στηριζόμενα σε μονάδες εγγυημένης παραγωγής, και των οποίων η χρήση και λειτουργία μπορεί να θεωρηθεί πλέον ως συμβατική, θα τα ονομάσουμε ως «συμβατικά» ενεργειακά συστήματα.

Προφανώς στα συμβατικά συστήματα ενέργειας, μαζί με τις μονάδες εγγυημένης παραγωγής, μπορεί να συμπεριλαμβάνονται και μονάδες μη εγγυημένης παραγωγής. Για παράδειγμα, το 2013 στο αυτόνομο σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην Κρήτη, μαζί με τις θερμοηλεκτρικές μονάδες υπήρχαν εγκατεστημένα αιολικά πάρκα συνολικής ονομαστικής ισχύος περίπου 170MW, τα οποία συνεισέφεραν στην κάλυψη της ετήσιας ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στο νησί σε ποσοστό περίπου 17%. Ένα αυτόνομο σύστημα θέρμανσης ενός κτηρίου μπορεί, πέραν του καυστήρα κεντρικής θέρμανσης (μονάδα εγγυημένης παραγωγής), να περιέχει και ένα αριθμό ηλιακών συλλεκτών, οι οποίοι να συμβάλλουν, στο ποσοστό που επιτρέπεται από τη διαθεσιμότητα της ηλιακής ακτινοβολίας, στην κάλυψη των αναγκών θέρμανσης του κτηρίου. Και στα δύο ανωτέρω παραδείγματα, η παραγωγή της τελικής μορφής ενέργειας στηρίζεται στις μονάδες εγγυημένης παραγωγής (θερμοηλεκτρικές μονάδες ή καυστήρας θέρμανσης), και, συνεπώς, τα συστήματα χαρακτηρίζονται ως συμβατικά. Ο ρόλος των μονάδων αξιοποίησης των τεχνολογιών Α.Π.Ε. στα ανωτέρω συστήματα, δηλαδή των μονάδων μη εγγυημένης παραγωγής, είναι επικουρικός. Αποσκοπούν δηλαδή, ανάλογα με τη διαθεσιμότητα της πρωτογενούς μορφής Α.Π.Ε., στην κάλυψη, κατά το δυνατό, μεγαλύτερου ποσοστού από τη ζήτηση τελικής ενέργειας, μειώνοντας αναλογικά την παραγωγή από τις μονάδες εγγυημένης παραγωγής και συμβάλλοντας, έτσι, στον περιορισμό της κατανάλωσης μη ανανεώσιμης πηγής ενέργειας. Όμως οι κύριες μονάδες παραγωγής παραμένουν οι μονάδες εγγυημένης παραγωγής.

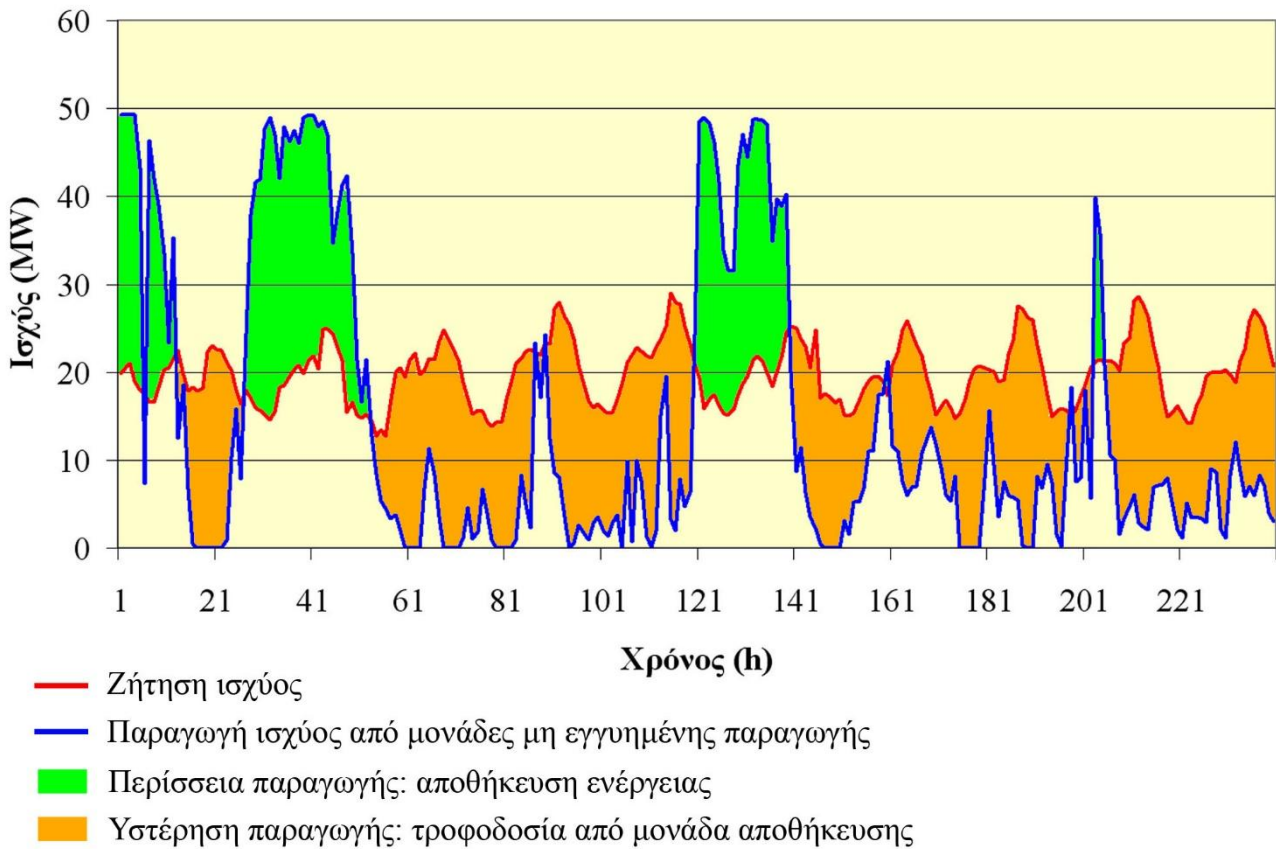
1.6.2. «Υβριδικά» ενεργειακά συστήματα

Τι γίνεται όμως στην περίπτωση στην οποία σε ένα ενεργειακό σύστημα επιθυμούμε να αλλάξουμε τους ρόλους των μονάδων εγγυημένης και μη εγγυημένης παραγωγής; Δηλαδή τι γίνεται, όταν επιχειρήσουμε να καταστήσουμε ως κύριες μονάδες τις μονάδες μη εγγυημένης παραγωγής και να περιορίσουμε τη λειτουργία των μονάδων εγγυημένης παραγωγής σε επικουρική; Είναι δυνατό να συμβεί κάτι τέτοιο, δεδομένης της μη ελεγχόμενης λειτουργίας από τις μονάδες μη εγγυημένης παραγωγής και να επιτύχουμε ασφαλή και διαρκή κάλυψη σε συγκεκριμένη ανελαστική ζήτηση τελικής ισχύος;

Σε αυτές τις περιπτώσεις, για να επιτευχθεί ο τελικός στόχος της αδιάλειπτης και ασφαλούς παραγωγής τελικής ισχύος, σύμφωνα με δεδομένη ζήτηση, από μονάδες μη εγγυημένης παραγωγής, απαιτείται η προσαρμογή της τυχαίας παραγωγής από τις μονάδες εγγυημένης παραγωγής στη ζήτηση ισχύος. Τούτο δεν μπορεί να προσεγγιστεί με κανένα άλλο τρόπο, παρά μόνο με τη συνδυασμένη λειτουργία των μονάδων μη εγγυημένης παραγωγής με μονάδες αποθήκευσης. Μία πρώτη απλοϊκή προσέγγιση του αλγόριθμου της συνδυασμένης λειτουργίας μονάδων, μη εγγυημένης παραγωγής και μονάδων αποθήκευσης, είναι η εξής:

- Όταν η τελική ισχύς από τις μονάδες μη εγγυημένης παραγωγής υπερβαίνει τη ζήτηση ισχύος, η περίσσεια παραγωγής αποθηκεύεται στις μονάδες αποθήκευσης
- Όταν η ζήτηση ισχύος είναι μεγαλύτερη της διάθεσης τελικής ισχύος από τις μονάδες μη εγγυημένης παραγωγής, τότε το έλλειμμα παραγωγής καλύπτεται από τις μονάδες αποθήκευσης.

Ο ανωτέρω περιγραφόμενος αλγόριθμος λειτουργίας παριστάνεται γραφικά στο σχήμα 1.13, στο οποίο αποτυπώνεται η ζήτηση ισχύος και η παραγωγή ισχύος από μονάδες μη εγγυημένης παραγωγής (αιολικό πάρκο) κατά τα δέκα πρώτα εικοσιτετράωρα του έτους στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας της Σάμου.



Σχήμα 1.13: Γραφική απεικόνιση του αλγόριθμου λειτουργίας ενός «υβριδικού» ενεργειακού συστήματος.

Οι πράσινες περιοχές στο διάγραμμα παριστάνουν περίσσεια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από το αιολικό πάρκο (μονάδες Α.Π.Ε.), η οποία διατίθεται προς αποθήκευση στη μονάδα αποθήκευσης του ενεργειακού συστήματος. Οι γαλάζιες περιοχές στο διάγραμμα παριστάνουν ενέργεια που αποδίδεται στην κατανάλωση από τη μονάδα αποθήκευσης, λόγω υστέρησης της παραγωγής ισχύος από τις μονάδες Α.Π.Ε. σε σχέση με τη ζήτηση ισχύος. Με τον τρόπο αυτό, η μονάδα αποθήκευσης συμβάλλει στην προσαρμογή της τυχαίας παραγωγής ισχύος από το αιολικό πάρκο στην ανελαστική ζήτηση ισχύος.

Για την εξασφάλιση της αδιάλειπτης και ασφαλούς παραγωγής ισχύος από ένα τέτοιο σύστημα, θα πρέπει να αντιμετωπιστεί η πιθανότητα της υστέρησης της παραγωγής ισχύος από τις μονάδες μη εγγυημένης παραγωγής και της ταυτόχρονης χαμηλής στάθμης αποθηκευμένης ενέργειας στη μονάδα αποθήκευσης. Στην περίπτωση αυτή, η μόνη περίπτωση για παραγωγή ισχύος είναι η διαθεσιμότητα μιας μονάδας εγγυημένης παραγωγής, π.χ. μίας ντιζελογεννήτριας, αν πρόκειται για ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.

Καταλήγουμε λοιπόν στο συμπέρασμα ότι ένα σύστημα, στο οποίο η μορφοτροπή ενέργειας στηρίζεται, κυρίως, σε μονάδες μη εγγυημένης παραγωγής, αποτελείται από τρεις διακριτές συνιστώσες:

- Τις μονάδες βάσης, οι οποίες αποτελούνται από μονάδες μη εγγυημένης παραγωγής. Οι μονάδες βάσης αποτελούν τις κύριες μονάδες παραγωγής του συστήματος. Στην περίπτωση ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, αυτές μπορεί να είναι αιολικά πάρκα, φωτοβολταϊκοί σταθμοί κλπ. Στην περίπτωση ενός συστήματος παραγωγής θερμικής ενέργειας οι μονάδες αυτές μπορεί να είναι ηλιακοί συλλέκτες.
- Τις μονάδες αποθήκευσης, που σκοπό έχουν την προσαρμογή της τυχαίας παραγωγής ισχύος από τις μονάδες βάσης στη ζήτηση ισχύος. Στην περίπτωση ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, μονάδες

αποθήκευσης μπορεί να είναι ένα αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό (αντλησιοταμιευτήρας), ηλεκτροχημικοί συσσωρευτές, μονάδες παραγωγής υδρογόνου ή μονάδες συμπίεσης αέρα (Compressed Air Energy Storage Systems – C.A.E.S.). Σε περίπτωση ενός συστήματος θερμικής ενέργειας, μονάδες αποθήκευσης μπορεί να είναι θερμοδοχεία.

- Τις μονάδες εφεδρείας, που σκοπό έχουν την κάλυψη της ζήτησης ισχύος σε περίπτωση χαμηλής διαθεσιμότητας ισχύος από τις μονάδες βάσης και εξάντλησης των αποθεμάτων ενέργειας στις μονάδες αποθήκευσης. Στην περίπτωση ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, μονάδες εφεδρείας μπορεί να είναι κοινές θερμοηλεκτρικές μονάδες, κυρίως ντιζελογεννήτριες. Σε περίπτωση ενός συστήματος θερμικής ενέργειας, μονάδες εφεδρείας μπορεί να είναι καυστήρες κεντρικής θέρμανσης.

Ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας που λειτουργεί με την ανωτέρω περιγραφόμενη φιλοσοφία, αποσκοπώντας στη μεγιστοποίηση της μορφοτροπής ενέργειας από τις μονάδες μη εγγυημένης παραγωγής και αποδίδοντας στις μονάδες εγγυημένης παραγωγής ρόλο εφεδρικό, έχει επικρατήσει να ονομάζεται καταχρηστικά ως «υβριδικό» ενεργειακό σύστημα.

Λέμε «καταχρηστικά», καθώς η λέξη «υβριδικός» έχει ως ρίζα της τη λέξη «ύβρις». Η λέξη «υβριδικός» χρησιμοποιήθηκε για την περιγραφή ενεργειακών συστημάτων, με την ίδια φιλοσοφία που χρησιμοποιήθηκε η λέξη «υβρίδιο» για την περιγραφή μεταλλαγμένων αγροτικών προϊόντων (υβρίδιο καλαμποκιού, υβρίδιο σόγιας κλπ). Τα προϊόντα αυτά παρήχθησαν κατά παράβαση των φυσικών διεργασιών, ουσιαστικά δηλαδή αποτέλεσαν μία ύβρη προς τη φύση. Ένα υβριδικό ενεργειακό σύστημα όμως σε καμία περίπτωση δεν αποτελεί ύβρη προς κάποια φυσική ή τεχνητή διαδικασία. Ο όρος χρησιμοποιείται καταχρηστικά, για να περιγράψει ένα ενεργειακό σύστημα που δεν ακολουθεί τη λειτουργία των συμβατικών ενεργειακών συστημάτων. Αυτό όμως δεν το καθιστά σε καμία περίπτωση υβριδικό, ουσιαστικά δηλαδή υβριστικό προς οποιαδήποτε μορφοτροπή ενέργειας. Θα μπορούσαμε, μάλιστα, να ισχυριστούμε το αντίθετο, το ότι δηλαδή υβριστικά προς τη φύση είναι τα συμβατικά συστήματα μορφοτροπής ενέργειας, στα οποία κατασπαταλώνται οι φυσικοί ενεργειακοί πόροι με ρυθμούς πολλαπλάσια μεγαλύτερους από αυτούς που χρειάστηκε η φύση, για να τους δημιουργήσει. Φυσικοί πόροι που, μάλιστα, δεν είναι μόνο ενεργειακοί, αλλά και πρώτες ύλες για σειρά υλικών και προϊόντων που χρησιμοποιούνται σε πλήθος εφαρμογών στη σύγχρονη καθημερινότητα παγκοσμίως. Φτάνει μόνο να σκεφτούμε ότι η ποσότητα πετρελαίου που απαιτείται για την παραγωγή 40lt αμόλυβδης βενζίνης, δηλαδή περίπου της χωρητικότητας ενός ρεζερβουάρ αυτοκινήτου μεσαίου μεγέθους, αρκεί, για να παραχθεί όλη η πλαστική ύλη μιας πλήρως εξοπλισμένης σύγχρονης οικοσκευής.

Ίσως ένας περισσότερος δόκιμος και ορθός όρος για την περιγραφή των «υβριδικών» ενεργειακών συστημάτων θα ήταν ο όρος «ενεργειακά συστήματα μεγιστοποίησης παραγωγής από Α.Π.Ε.» ή κάτι παρόμοιο. Παρόλα αυτά, για την περιγραφή των εν λόγω ενεργειακών συστημάτων στο παρόν σύγγραμμα, θα χρησιμοποιηθεί ο όρος «υβριδικά», καθώς έχει καθιερωθεί λανθασμένα.

1.7. Δομή του βιβλίου

Το παρόν σύγγραμμα έχει σκοπό να καλύψει, κατά κύριο λόγο, την ύλη του μαθήματος «Σύνθεση Ενεργειακών Συστημάτων», που διδάσκεται στο προπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών του Τμήματος Μηχανολογίας του Τ.Ε.Ι. Κρήτης. Επίσης θα καλύψει το σημαντικότερο μέρος της διδακτέας ύλης από το ομώνυμο μάθημα που διδάσκεται στο διατμηματικό μεταπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών των Τμημάτων Μηχανολογίας και Ηλεκτρολογίας του Τ.Ε.Ι. Κρήτης, με τίτλο «Ενεργειακά Συστήματα». Προφανώς, πέραν της χρήσης του ως εκπαιδευτικό βοήθημα, το βιβλίο αυτό, μέσω των αναφορών του σε εξειδικευμένα θέματα που αφορούν σε συμβατικά και υβριδικά ενεργειακά συστήματα, δύναται να αποτελέσει σημαντικό επιστημονικό και τεχνικό εγχειρίδιο για τον οποιοδήποτε επιστήμονα, μηχανικό, μελετητή που ασχολείται με τα συστήματα αυτά επαγγελματικά ή ερευνητικά.

Το παρόν βιβλίο χωρίζεται σε έξι κεφάλαια, το περιεχόμενο των οποίων παρουσιάζεται στη συνέχεια:

- **Κεφάλαιο 1: Εισαγωγικές έννοιες**

Στο εισαγωγικό κεφάλαιο, το οποίο ολοκληρώνεται με την παρούσα ενότητα, δόθηκαν ορισμοί για βασικά μεγέθη και έννοιες, που εμπλέκονται στη μελέτη ενεργειακών συστημάτων, και γενικότερα στη μετατροπή ενέργειας. Συγκεκριμένα:

- Ορίστηκαν τα μεγέθη της Ενέργειας και της Ισχύος, και επιχειρήθηκε και γίνει κατανοητή η φυσική έννοια των δύο αυτών θεμελιωδών μεγεθών μέσα από παραδείγματα. Παρουσιάστηκαν οι βασικότερες μονάδες μέτρησης των μεγεθών αυτών, και δόθηκαν οι συντελεστές μετατροπής.
- Έγινε ταξινόμηση των μορφών ενέργειας και καταδείχτηκε ο ρόλος της κάθε μίας. Παρουσιάστηκαν οι βασικές ενεργειακές μετατροπές.
- Ορίστηκαν οι βασικές ενεργειακές πηγές και διαχωρίστηκαν σε ανανεώσιμες και μη. Έγινε αναφορά στα διαθέσιμα αποθέματα των μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και στις ετήσιες απολαβές ενέργειας των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Ορίστηκε η πυκνότητα ενεργειακού περιεχομένου πηγής και δόθηκαν τιμές για βασικές ενεργειακές πηγές.
- Δόθηκε ο ορισμός της μορφοτροπής ενέργειας και του μορφοτροπέα ενέργειας. Ορίστηκε, επίσης, ο μέσος και ο στιγμιαίος βαθμός απόδοσης μιας μορφοτροπής ενέργειας.
- Παρουσιάστηκαν οι δύο βασικοί τύποι διασύνδεσης ενεργειακών μορφοτροπέων, σε σειρά και παράλληλα. Αναπτύχθηκαν οι αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού του συνολικού στιγμιαίου βαθμού απόδοσης των δύο συνδεσμολογιών.
- Ορίστηκαν οι δύο βασικοί τύποι των ενεργειακών συστημάτων, το συμβατικό και το υβριδικό ενεργειακό σύστημα. Παρουσιάστηκαν αντίστοιχα παραδείγματα.
- Το πρώτο κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την παρουσίαση της δομής και του περιεχομένου του βιβλίου στην παρούσα ενότητα.

- **Κεφάλαιο 2: Συμβατικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας**

Στο δεύτερο κεφάλαιο μελετώνται οι συμβατικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας συγκεντρωμένης παραγωγής, αποτελούμενοι από τους θερμικούς σταθμούς και τις μονάδες Α.Π.Ε. Το κεφάλαιο περιορίζεται στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, χωρίς να υπεισέρχεται σε θέματα μεταφοράς και διανομής. Η βασική θεματολογία του Κεφαλαίου έχει ως εξής:

- Περιγραφή συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας (σταθμοί παραγωγής, δίκτυα μεταφοράς και διανομής, υποσταθμοί). Διάκριση των συστημάτων σε διασυνδεδεμένα και αυτόνομα. Ιδιαιτερότητες μη διασυνδεδεμένων συστημάτων σχετικά με την ασφάλεια και την ευστάθειά τους.
- Δίνονται οι ορισμοί για τη δυναμική ασφάλεια και την ευστάθεια συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Οι ορισμοί συμπληρώνονται με παραδείγματα ευσταθών και ασταθών καταστάσεων. Περιγράφεται, επίσης, η τεχνική της διατήρησης στρεφόμενης εφεδρείας από τις μονάδες εγγυημένης παραγωγής, με σκοπό τη βελτίωση της δυναμικής ασφάλειας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.
- Δίνονται οι κανόνες και οι περιορισμοί για την ένταξη μονάδων μη εγγυημένης παραγωγής σε συμβατικά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Διακρίνονται οι περιπτώσεις διείσδυσης μονάδων μη εγγυημένης παραγωγής σε διασυνδεδεμένα και αυτόνομα συστήματα και παρουσιάζονται οι δυνητικές επιπτώσεις της διείσδυσης των μονάδων αυτών στη δυναμική ασφάλεια των συστημάτων.
- Παρουσιάζονται οι τύποι θερμικών μονάδων εγγυημένης παραγωγής (ατμοστρόβιλοι, ντιζελογεννήτριες, αεριοστρόβιλοι, συνδυασμένοι κύκλοι) που χρησιμοποιούνται σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης δίνονται τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά τους, όπως η απόκριση των μονάδων, η διακύμανση της απόδοσής τους συναρτήσει της φόρτισης (εξερχόμενης ισχύος), οι τύποι καυσίμων, που μπορούν να χρησιμοποιήσουν, το ειδικό κόστος παραγωγής, διαμορφούμενο κυρίως από την απόδοση των μονάδων και το χρησιμοποιούμενο καύσιμο.
- Παρουσιάζονται τα κριτήρια ένταξης των θερμικών μονάδων εγγυημένης ισχύος στην παραγωγή. Γίνεται η διάκρισή τους σε μονάδες αιχμής και μονάδες βάση.
- Τέλος, προς κατανόηση των ανωτέρω, παρουσιάζεται προσομοίωση της ετήσιας λειτουργίας ενός τυπικού συμβατικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Λαμβάνοντας όλους τους περιορισμούς και τους κανόνες λειτουργίας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας που έχουν παρουσιαστεί στο παρόν κεφάλαιο, η προσομοίωση στοχεύει στον υπολογισμό της σύνθεσης παραγωγής ισχύος από τις διαθέσιμες μονάδες εγγυημένης και μη παραγωγής ανά χρονικό βήμα υπολογισμού (ωριαίο) για ένα

πλήρες έτος λειτουργίας του συστήματος. Η εργασία ολοκληρώνεται με τον υπολογισμό των συνολικών ετήσιων μεγεθών του συστήματος (απόδοση μονάδων παραγωγής, διείσδυση και απόρριψη μονάδων μη εγγυημένης παραγωγής, ειδικό κόστος παραγωγής συστήματος, καταναλώσεις καυσίμων, εκπομπές ρύπων).

• Κεφάλαιο 3: Υβριδικοί σταθμοί ηλεκτρικής ενέργειας

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η έννοια του υβριδικού σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Τα θέματα τα οποία αναλύονται στο κεφάλαιο αυτό είναι τα εξής:

- Δίνονται οι συνιστώσες υβριδικού σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Περιγράφεται η διαφοροποίηση της λειτουργίας του από συμβατικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.
- Παρουσιάζονται οι υβριδικοί σταθμοί συγκεντρωμένης και αποκεντρωμένης παραγωγής, ουσιαστικά δηλαδή οι υβριδικοί σταθμοί μικρού και μεγάλου μεγέθους. Δίνονται οι διαθέσιμες αξιοποιήσιμες μορφές Α.Π.Ε. (μονάδες βάσης) και οι διαθέσιμες τεχνολογίες αποθήκευσης σε ένα υβριδικό σταθμό. Αναλύονται οι διαφορετικές συνθέσεις υβριδικών σταθμών, με βάση τις τεχνολογίες Α.Π.Ε. και αποθήκευσης που χρησιμοποιούνται, όπως αυτές επιβάλλονται κυρίως από το μέγεθος του υβριδικού σταθμού.
- Στη συνέχεια, θα δοθεί η βασική δομή αριθμητικών μεθόδων βελτιστοποίησης διαστασιολόγησης υβριδικών σταθμών. Οι μέθοδοι που θα παρουσιαστούν στηρίζονται στην προσομοίωση ετήσιας λειτουργίας με βήμα ωριαίο, ημερήσιο ή μηνιαίο. Θα παρουσιαστούν εναλλακτικές προσεγγίσεις βελτιστοποίησης διαστασιολόγησης με κριτήρια ενεργειακά ή επενδυτικά – οικονομικά. Οι μέθοδοι διαστασιολόγησης θα εφαρμοστούν και θα παρουσιαστούν σε δύο – τέσσερις διαφορετικούς υβριδικούς σταθμούς ηλεκτρικής ενέργειας, συγκεντρωμένης και αποκεντρωμένης παραγωγής (π.χ. κτηριακές εφαρμογές) με χρήση διαφορετικών τεχνολογιών Α.Π.Ε. και αποθήκευσης.
- Τέλος θα συνοψιστούν τα βασικά συμπεράσματα από τη μελέτη υβριδικών σταθμών, και θα αξιολογηθεί η δυνατότητα συμβολής τους στη μεγιστοποίηση αξιοποίησης των Α.Π.Ε. Θα συγκριθούν οι διαφορετικές τεχνολογίες, που μελετήθηκαν, αναλόγως του μεγέθους του σταθμού και των εμπλεκόμενων τεχνολογιών Α.Π.Ε. και αποθήκευσης.

• Κεφάλαιο 4: Συμπαράγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας

Στο τέταρτο κεφάλαιο μελετάται το εξειδικευμένο αντικείμενο της συμπαράγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας σε κεντρική παραγωγή μεγάλης κλίμακας. Ουσιαστικά το κεφάλαιο παρουσιάζει τη θεωρία και την πρακτική για τη μελέτη συστήματος συμπαράγωγής θερμότητας, με αξιοποίηση της απορριπτόμενης θερμικής ισχύος από θερμοηλεκτρικά εργοστάσια. Σκοπός του κεφαλαίου είναι να συγκεντρώσει και να διαθέσει στον εκπαιδευόμενο όλη την απαιτούμενη γνώση για τη μελέτη των συστημάτων αυτών.

Η θεματολογία του κεφαλαίου προσεγγίζεται μέσω των ακόλουθων ενοτήτων:

- Αρχικά δίνεται ο υπολογισμός της απορριπτόμενης θερμικής ισχύος από ένα θερμοηλεκτρικό σταθμό. Το πρόβλημα μελετάται διαφορετικά ανάλογα με τις διαθέσιμες θερμικές μονάδες. Βασικά μεγέθη, που υπεισέρχονται στον υπολογισμό, είναι ο συνολικός βαθμός απόδοσης των θερμοηλεκτρικών μονάδων, η θερμοκρασία και η παροχή απόρριψης καυσαερίων ή ατμού και η ειδική ενθαλπία τους.
- Εκτιμάται η δυνατότητα αξιοποίησης της απορριπτόμενης θερμικής ισχύος, με βάση τις διαθέσιμες τεχνολογίες μεταφοράς θερμότητας μέσω εναλλακτών. Υπολογίζονται τα βασικά μεγέθη του εργαζόμενου μέσου αξιοποίησης της θερμότητας (θερμοκρασία, παροχή).
- Υπολογίζονται, τέλος, τα βασικά μεγέθη μεταφοράς της θερμικής ισχύος προς της κατανάλωση. Δίνονται τα βασικά στοιχεία της μελέτης των δικτύων μεταφοράς και διανομής, και επιλύεται το υδραυλικό δίκτυο (υλικά, διαστασιολόγηση αγωγών, θερμικές απώλειες, υπολογισμός μανομετρικού και συνολικής στατικής και δυναμικής πίεσης δικτύου κλπ).
- Τα κεφάλαιο ολοκληρώνεται με ένα παράδειγμα αριθμητικής ετήσιας προσομοίωσης συστήματος συμπαράγωγής και υπολογισμού τελικής χρονοσειράς παραγωγής θερμικής ισχύος. Το παράδειγμα θα αποτελεί συνέχεια του παραδείγματος της ετήσιας λειτουργίας ενός συμβατικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας που έχει δοθεί στο κεφάλαιο 2.

- **Κεφάλαιο 5: Υβριδικοί σταθμοί παραγωγής θερμικής ισχύος**

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναπτυχθούν θέματα που αφορούν σε υβριδικούς σταθμούς παραγωγής θερμικής ισχύος. Δεδομένης της δυσκολίας μεταφοράς θερμότητας, οι υβριδικοί σταθμοί θερμικής ισχύος είναι αποκεντρωμένης παραγωγής, κυρίως μικρής κλίμακας. Συνεπώς, στο κεφάλαιο αυτό, θα παρουσιαστούν διαφορετικές υλοποιήσεις σταθμών παραγωγής θερμικής ισχύος, με σκοπό τη μεγιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος από Α.Π.Ε. Οι σταθμοί αυτοί αναφέρονται σε διεσπαρμένες καταναλώσεις (π.χ. κτηριακός τομέας, κολυμβητικές δεξαμενές, βιοτεχνίες κλπ). Η θεματολογία του κεφαλαίου έχει ως εξής:

- Ορισμός του υβριδικού σταθμού παραγωγής θερμότητας. Διαφορετικές διαθέσιμες τεχνολογίες παραγωγής και αποθήκευσης. Παραδείγματα εφαρμογής.
- Μέθοδοι βελτιστοποίησης διαστασιολόγησης υβριδικών σταθμών θερμότητας συναρτήσει της εφαρμογής. Βελτιστοποίηση με κριτήρια ενεργειακά ή επενδυτικά – οικονομικά. Διαφοροποίηση μεθόδων συναρτήσει του είδους της εφαρμογής και των απαιτήσεών της σε θερμική ισχύ και τελική θερμοκρασία εργαζόμενου μέσου και του είδους της μονάδας αποθήκευσης.
- Τέλος θα δοθούν παραδείγματα εφαρμογής σε θέρμανση χώρων κατοικίας με θερμαντικά σώματα υψηλής θερμοκρασίας, ή με ενδοδαπέδια θέρμανση, καθώς και σε θέρμανση νερού κολυμβητικής δεξαμενής.

- **Κεφάλαιο 6: Επίλογος**

Σκοπός του βιβλίου, πέραν της παροχής εξειδικευμένης τεχνικής γνώσης, είναι και η διαμόρφωση κριτικής σκέψης έναντι των διαθέσιμων τεχνολογιών για τη σύνθεση συστημάτων παραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού. Για το λόγο αυτό, στο καταληκτικό κεφάλαιο του βιβλίου, γίνεται ανασκόπηση των θεμάτων που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. Επιχειρείται μια αξιολόγηση των εξεταζόμενων συστημάτων και των αποτελεσμάτων διαστασιολόγησής τους, όπως προέκυψαν μέσα από τα παραδείγματα – εφαρμογές, που θα συνοδεύουν τις παρουσιάσεις των επιμέρους μεθόδων. Έτσι ο αναγνώστης – εκπαιδευόμενος θα έχει τη δυνατότητα να συγκρίνει τη λειτουργία των υφιστάμενων συμβατικών συστημάτων παραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας, με τα νέα συστήματα αξιοποίησης Α.Π.Ε., ως προς συγκεκριμένα κριτήρια (περιβαλλοντικά, ενεργειακά, οικονομικά). Η ταυτόχρονη παροχή τεχνικής κατάρτισης και τεκμηριωμένης κριτικής άποψης συνάδουν στην ισορροπημένη και ολοκληρωμένη συγκρότηση του επαγγελματία Μηχανικού.

Αναφορές Κεφαλαίου

- [1] BP Statistical Review of World Energy 2007.
http://www.bp.com/liveassets/bp_internet/switzerland/corporate_switzerland/STAGING/local_assets/downloads_pdfs/s/statistical_review_of_world_energy_full_review_2008.pdf.
- [2] World Energy Council, “Survey on Energy Resources, Interim update 2009”
http://www.worldenergy.org/documents/ser_interim_update_2009_final.pdf.
- [3] G. A. Alekseev. Energy and Entropy. Mir Publishers. 1986 Moscow.

Κεφάλαιο

2

Συμβατικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

2.1. Συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας

2.1.1. Δομή συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας

Ένα Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (Σ.Η.Ε.) αποτελείται από τις ακόλουθες διακριτές συνιστώσες:

- σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας,
- γραμμές μεταφοράς υπερευψηλής, υψηλής και μέσης τάσης,
- γραμμές διανομής μέσης και χαμηλής τάσης,
- υποσταθμοί μετασχηματισμού τάσης,
- καταναλώσεις.

Η συνδυασμένη λειτουργία των σταθμών παραγωγής, των υποσταθμών και των γραμμών μεταφοράς και διανομής αποσκοπεί στην αδιάλειπτη ικανοποίηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας από τους καταναλωτές, χωρίς περικοπές παροχής ισχύος και χωρίς παρεκκλίσεις από τις προδιαγραφές λειτουργίας του συστήματος, αναφορικά με την ονομαστική τάση και συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος. Ειδικότερα, καθεμία από τις ανωτέρω συνιστώσες σε ένα Σ.Η.Ε. αποσκοπεί στα ακόλουθα:

Σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας:

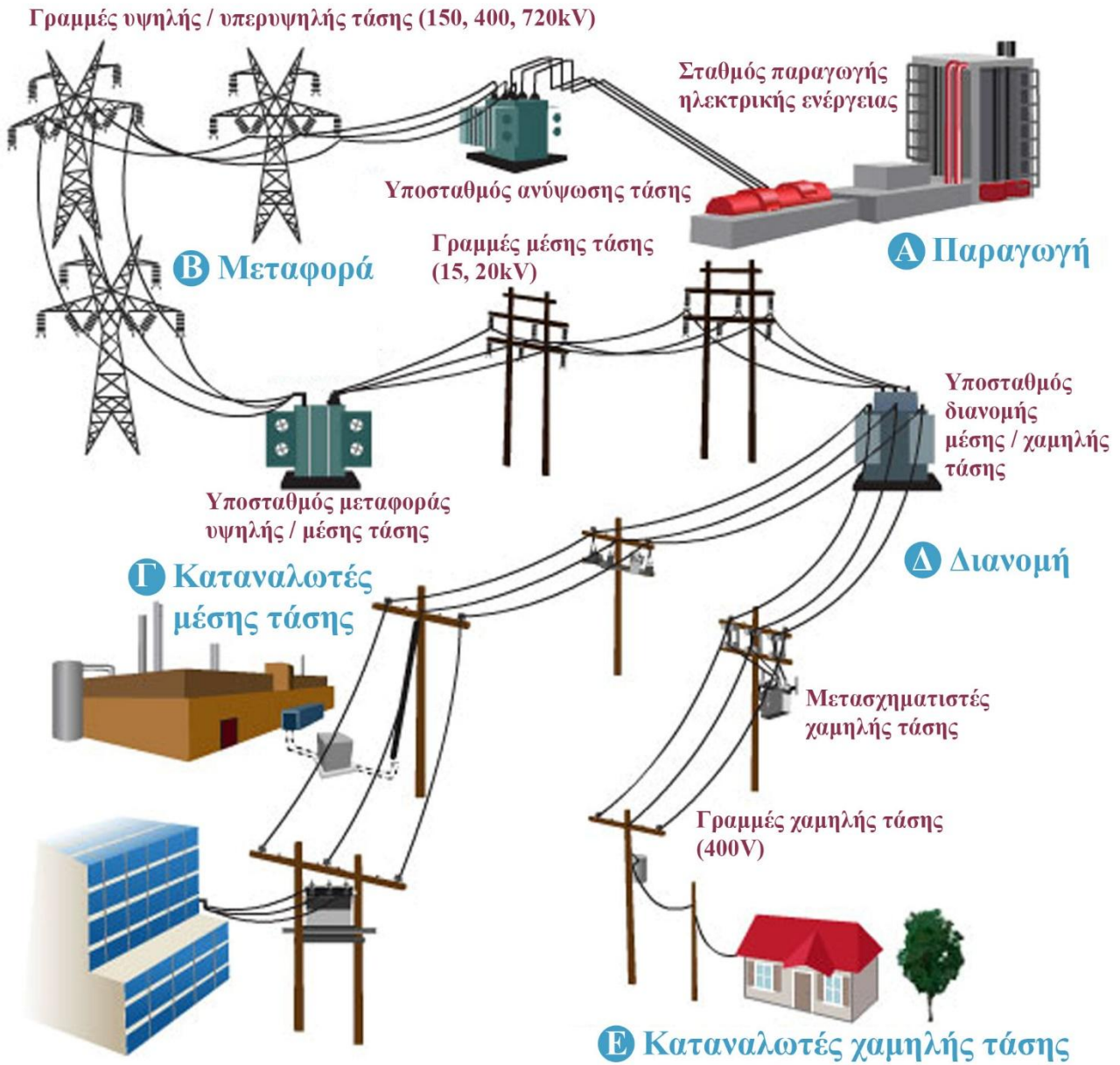
Στους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται η μετατροπή της αρχικής πηγής ενέργειας σε τελική ηλεκτρική ενέργεια. Η μετατροπή αυτή καταχρηστικά έχει επικρατήσει να ονομάζεται «παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας», κι αυτό γιατί η ενέργεια προϋπάρχει σε διάφορες μορφές στη φύση, συνεπώς δεν παράγεται, αλλά μετατρέπεται. Οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να είναι:

- **Θερμοηλεκτρικά εργοστάσια**, στα οποία η ηλεκτρική ενέργεια αποτελεί προϊόν μετατροπής θερμικής ενέργειας από κάποιο ενδιάμεσο στάδιο της συνολικής αλληλουχίας ενεργειακών μετατροπών. Η αρχική μορφή ενέργειας, από την οποία ξεκινάει η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, μπορεί να είναι είτε χημική ενέργεια ορυκτών καυσίμων (λιγνίτης, λιθάνθρακας, πετρέλαιο, φυσικό αέριο) είτε πυρηνική ενέργεια ορυκτών καυσίμων (ουράνιο, πλουτόνιο). Στη δεύτερη περίπτωση ο θερμοηλεκτρικός σταθμός έχει επικρατήσει να ονομάζεται πυρηνοηλεκτρικός. Οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες, οι οποίες θα παρουσιαστούν αναλυτικά στη συνέχεια, είναι σύγχρονες γεννήτριες, δηλαδή οι στροφές τους συμπίπτουν με την ονομαστική συχνότητα του παραγόμενου εναλλασσόμενου ρεύματος (στην Ελλάδα 50Hz).
- **Υδροηλεκτρικά εργοστάσια**, όπου η ηλεκτρική ενέργεια προέρχεται από τη μετατροπή της διαθέσιμης δυναμικής ενέργειας νερού που βρίσκεται σε υψηλότερη υψομετρική στάθμη σε σχέση με τη θέση του υδροηλεκτρικού σταθμού (υδροδυναμική ενέργεια). Οι γεννήτριες στις οποίες υλοποιείται η μετατροπή αυτή ονομάζονται υδροστρόβιλοι και είναι, επίσης, σύγχρονες γεννήτριες.
- **Διάφορες τεχνολογίες αξιοποίησης Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Α.Π.Ε.)**, όπως αιολικά πάρκα, φωτοβολταϊκοί σταθμοί, σταθμοί γεωθερμίας, σταθμοί βιομάζας, ηλιοθερμικοί σταθμοί, οι οποίες παρουσιάζουν ολοένα αυξανόμενο ποσοστό συμμετοχής στην κάλυψη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως, από τη δεκαετία του '80 και έπειτα.

Περισσότερα για τους σταθμούς παραγωγής θα παρουσιαστούν στη συνέχεια του παρόντος Κεφαλαίου.

Δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας:

Η βασική δομή ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας παρουσιάζεται στο σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1: Δομή συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

Για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ισχύος από τους σταθμούς παραγωγής έως τις τελικές καταναλώσεις χρησιμοποιούμε δύο τύπους δικτύου, ανάλογα με την τάση της μεταφερόμενης ηλεκτρικής ισχύος: το δίκτυο (ή σύστημα) Μεταφοράς και το δίκτυο Διανομής.

Το δίκτυο μεταφοράς μεταφέρει την ηλεκτρική ισχύ από τους σταθμούς παραγωγής στους υποσταθμούς μεταφοράς. Η μεταφορά γίνεται σε υψηλή τάση, μέσω του δικτύου υψηλής τάσης (150kV ή σε νησιωτικά συστήματα 66kV) και υπερυψηλής τάσης (400kV), για να μειωθούν οι απώλειες ισχύος, όταν οι αποστάσεις είναι μεγάλες. Οι γραμμές μεταφοράς δεν μπορούν να τροφοδοτήσουν άμεσα τους καταναλωτές, που χρησιμοποιούν χαμηλή τάση (220/380V), αλλά φθάνουν μέχρι ορισμένα σημεία, τους υποσταθμούς μεταφοράς, όπου γίνεται υποβιβασμός της υψηλής τάσης στη μέση τάση, δηλαδή στα 20kV. Οι υποσταθμοί αποτελούν κόμβους στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα συστατικά στοιχεία των γραμμών μεταφοράς είναι:

- πυλώνες ή πύργοι, στους οποίους στηρίζονται οι αγωγοί των εναέριων γραμμών,
- μονωτήρες, μέσω των οποίων αναρτώνται στους πυλώνες οι αγωγοί γραμμών,
- αγωγοί, κυρίως από χαλκό και αλουμίνιο.

Το δίκτυο διανομής ξεκινάει από τους υποσταθμούς μεταφοράς και καταλήγει στους υποσταθμούς διανομής, όπου γίνεται υποβιβασμός της μέσης τάσης στη χαμηλή τάση, μέσω της οποίας τροφοδοτούνται οι περισσότεροι καταναλωτές. Το δίκτυο διανομής περιλαμβάνει:

- το δίκτυο διανομής μέσης τάσης (20kV), που μεταφέρει την ηλεκτρική ενέργεια από τους υποσταθμούς μεταφοράς στους υποσταθμούς διανομής,
- το δίκτυο διανομής χαμηλής τάσης (220/380V), που μεταφέρει την ηλεκτρική ενέργεια από τους υποσταθμούς διανομής στους καταναλωτές.

Υποσταθμοί μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας:

Στα δίκτυα μεταφοράς και διανομής παρεμβάλλονται οι υποσταθμοί μεταφοράς και διανομής. Οι υποσταθμοί είναι κόμβοι, στους οποίους καταλήγουν και ξεκινάνε γραμμές μεταφοράς και διανομής. Η βασική σκοπιμότητα εισαγωγής υποσταθμών σε ένα Σ.Η.Ε. είναι ο μετασχηματισμός της τάσης της ηλεκτρικής ισχύος, είτε για τη μεταφορά της είτε για τη διανομή της. Η ανύψωση της τάσης του εναλλασσόμενου ρεύματος είναι απαραίτητη για τη μεταφορά του σε μεγάλες αποστάσεις, προκειμένου να περιοριστούν οι απώλειες μεταφοράς. Ο υποβιβασμός απαιτείται για τη διάθεση της ηλεκτρικής ισχύος στους τελικούς καταναλωτές.

Υπενθυμίζεται ότι οι απώλειες μεταφοράς P_L ενεργού ισχύος P υπό τάση V δίνονται από τη σχέση:

$$P_L = I^2 \cdot R \quad (2.1)$$

όπου I η ένταση του εναλλασσόμενου ρεύματος και R η συνολική ωμική αντίσταση του αγωγού μεταφοράς.

Η συνολική αντίσταση του αγωγού μεταφοράς δίνεται από τη σχέση:

$$R = L \cdot \rho \quad (2.2)$$

όπου L το μήκος του αγωγού και ρ η ειδική αντίσταση του αγωγού (σε Ω/km).

Η ένταση του εναλλασσόμενου ρεύματος δίνεται από τη σχέση:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot V} \quad (2.3)$$

Από τις σχέσεις 2.2. και 2.3 η σχέση 2.1 γίνεται:

$$P_L = \frac{P^2}{3 \cdot V^2} \cdot L \cdot \rho \quad (2.4)$$

από όπου καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι οι απώλειες μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος είναι αντιστρόφως ανάλογες του τετραγώνου της τάσης υπό την οποία γίνεται η μεταφορά.

Από τα ανωτέρω συνάγεται το συμπέρασμα ότι η βασική συνιστώσα που απαντάται στους υποσταθμούς είναι οι μετασχηματιστές ανύψωσης ή υποβιβασμού τάσης. Πέραν αυτών, σε ένα υποσταθμό απαντώνται ζυγοί, διακόπτες, ασφάλειες κλπ. Σε ένα Σ.Η.Ε. οι υποσταθμοί μεταφοράς μπορεί να είναι:

- υποσταθμοί ανύψωσης της τάσης παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος από τους σταθμούς παραγωγής στην τάση του δικτύου μεταφοράς (για την Ελλάδα 66, 150, 400kV),
- υποσταθμοί υποβιβασμού τάσης από την τάση του δικτύου μεταφοράς στη μέση τάση του δικτύου διανομής (για την Ελλάδα 15, 20kV).

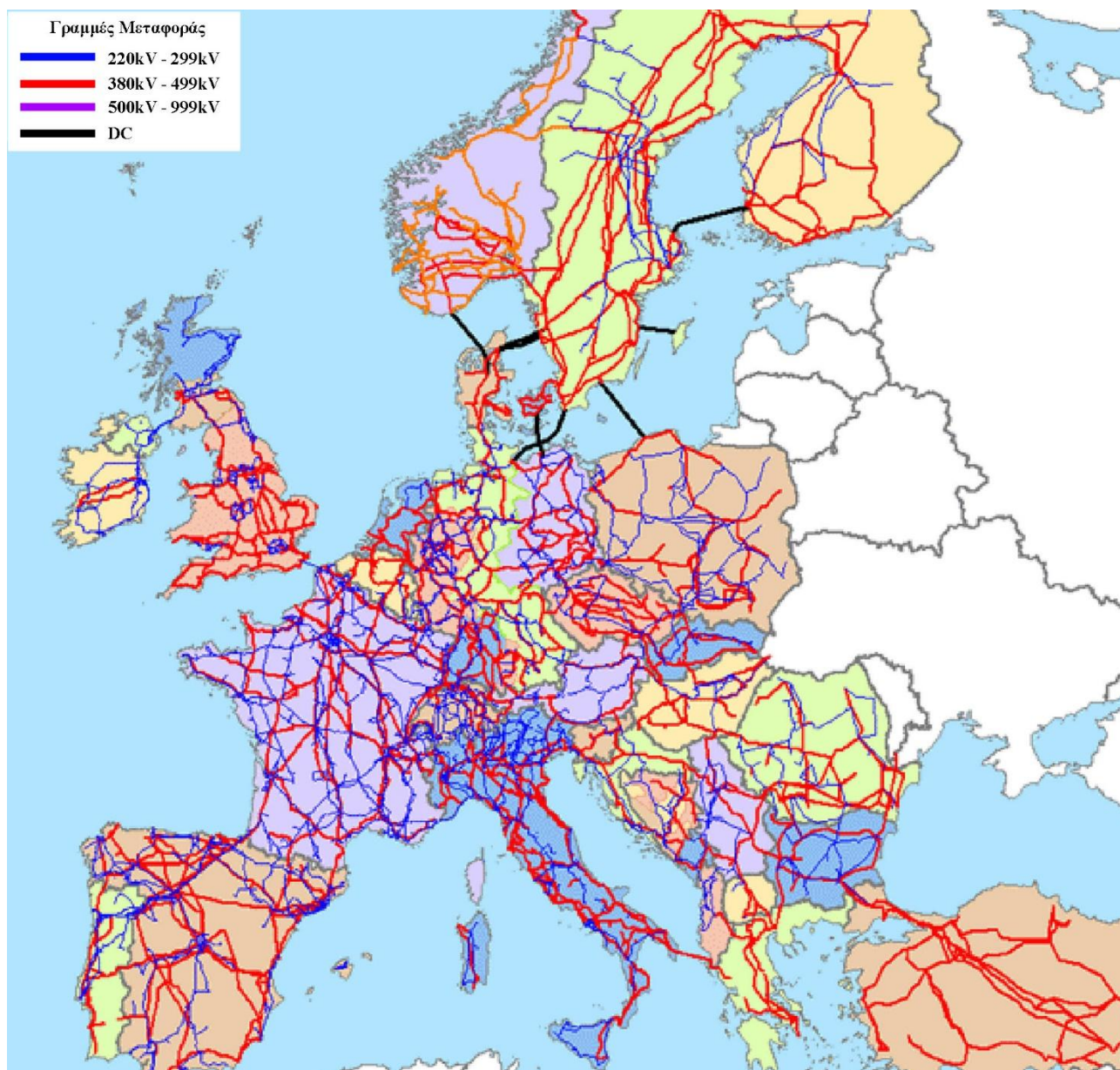
Σε ένα Σ.Η.Ε. οι υποσταθμοί διανομής είναι υποσταθμοί υποβιβασμού τάσης από τη μέση τάση του δικτύου διανομής (15, 20kV) στη χαμηλή τάση του δικτύου διανομής (220, 380V).

2.1.2. Απομονωμένα και διασυνδεδεμένα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας

Ως διασυνδεδεμένο ορίζεται ένα Σ.Η.Ε., όταν είναι ηλεκτρικά διασυνδεδεμένο με γειτονικά Σ.Η.Ε., π.χ. άλλων κρατών ή γεωγραφικών ενοτήτων. Έτσι όλα τα ηπειρωτικά ευρωπαϊκά εθνικά δίκτυα είναι διασυνδεδεμένα μεταξύ τους. Επίσης τα Επτάνησα, και κάποια ακόμα από τα ελληνικά νησιά, έχουν διασυνδεθεί με το ηπειρωτικό εθνικό σύστημα μεταφοράς. Στο χάρτη 2.1 παρουσιάζεται το διασυνδεδεμένο σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος στην Ελλάδα και το αυτόνομο σύστημα της Κρήτης. Αντίστοιχα στο χάρτη 2.2. παρουσιάζονται οι διασυνδέσεις των εθνικών συστημάτων μεταφοράς στην Ευρωπαϊκή ήπειρο.



Χάρτης 2.1: Εθνικό σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας (πηγή: www.rae.gr).



Χάρτης 2.2: Διασυνδέσεις εθνικών συστημάτων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρώπη (πηγή: www.geni.org).

Ως απομονωμένο, ή μη διασυνδεδεμένο, σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (isolated ή autonomous power production system) ορίζεται το σύστημα το οποίο καλύπτει κατ' αποκλειστικότητα τις ανάγκες σε ηλεκτρική ενέργεια μιας απομονωμένης γεωγραφικά περιοχής, στην οποία και είναι εγκατεστημένο, χωρίς να είναι διασυνδεδεμένο με «μεγάλα» δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Διαφορετικά λέμε ότι μία γεωγραφική περιοχή αποτελεί απομονωμένο ενεργειακό σύστημα, όταν όλες οι ανάγκες της σε ηλεκτρική ενέργεια καλύπτονται αποκλειστικά από συστήματα παραγωγής που είναι εγκατεστημένα στην περιοχή αυτή.

Είναι προφανές ότι οι ανωτέρω ορισμοί είναι κάπως ασαφείς. Η ασάφεια αυτή προκύπτει από τη διάκριση που εισάγεται με τον όρο «μεγάλο» ηπειρωτικό δίκτυο. Πότε ένα δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να χαρακτηριστεί «μεγάλο» και πότε όχι; Το κριτήριο διαχωρισμού δεν είναι απόλυτο και έχει να κάνει με την τάξη μεγέθους και το είδος του προβλήματος που μελετάται. Για παράδειγμα, στις μελέτες διείσδυσης μονάδων «μη εγγυημένης» ισχύος σε απομονωμένες γεωγραφικές περιοχές, η τάξη μεγέθους καθορίζεται από το μέγεθος της ζήτησης ηλεκτρικής ισχύος και από τη δυνατότητα εγκατάστασης μονάδων μη εγγυημένης ισχύος. Η εγκατάσταση μονάδων μη εγγυημένης ισχύος σε ποσοστά μεγαλύτερα του 30-40% της μέγιστης ετήσιας ζήτησης ισχύος μιας περιοχής, μπορεί να προκαλέσει σημαντικά προβλήματα ασφάλειας του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια. Όταν η

επίτευξη τέτοιων ποσοστών εγκατάστασης μονάδων μη εγγυημένης ισχύος σε μια γεωγραφική περιοχή είναι εφικτή, τότε για μια μελέτη διείσδυσης μη εγγυημένης ισχύος στην εν λόγω περιοχή, αυτή θα πρέπει να χαρακτηριστεί ως απομονωμένο ενεργειακό σύστημα. Συνήθως μη διασυνδεδεμένα Σ.Η.Ε. συναντώνται σε απομονωμένες γεωγραφικά περιοχές, όπως νησιά ή περιοχές με χαμηλή πληθυσμιακή πυκνότητα (π.χ. Σιβηρία, αρκτικές περιοχές κλπ). Στην Ελλάδα τα περισσότερα νησιά του Αιγαίου αποτελούν αυτόνομα ενεργειακά συστήματα, τα περισσότερα μικρού και μέσου μεγέθους. Απομονωμένα συστήματα μεγάλου αποτελούν τα μεγάλα νησιά της Μεσογείου (εκτός Σαρδηνίας και Σικελίας), η Ισλανδία, η Ιαπωνία κλπ.

Γίνεται αντιληπτό ότι τα διασυνδεδεμένα Σ.Η.Ε. δύνανται να αλληλοϋποστηριχτούν μεταξύ τους, μέσω της έγχυσης ηλεκτρικής ισχύος από το ένα στο άλλο. Η εξαγωγή και εισαγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανάμεσα σε εθνικά δίκτυα μεταφοράς είναι μία διαδικασία διαδεδομένη και συχνά εφαρμοσμένη στα πλαίσια εμπορικών συμφωνιών μεταξύ κρατών, με σκοπό, κυρίως, τη μείωση του κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Πολύ σημαντικότερη όμως είναι η δυνατότητα υποστήριξης ενός Σ.Η.Ε. από τα συστήματα με τα οποία είναι διασυνδεδεμένο, στις περιπτώσεις εμφάνισης σφαλμάτων ή ανωμαλιών στην παραγωγή, που θέτουν σε κίνδυνο τη διατήρηση της δυναμικής ισορροπίας μεταξύ παραγωγής και ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Σε τέτοιες οριακές καταστάσεις, η δυνατότητα έγχυσης ισχύος από γειτονικά Σ.Η.Ε. είναι δυνατό να αποτρέψει πιθανή κατάρρευση του συστήματος.

Από την άλλη μεριά, είναι προφανές ότι οι ανωτέρω δυνατότητες, που παρουσιάζονται στα διασυνδεδεμένα Σ.Η.Ε., δεν είναι διαθέσιμες στα απομονωμένα. Αποτέλεσμα τούτου είναι τα τελευταία συνήθως να παρουσιάζουν πολλαπλάσιο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και να εμφανίζονται ιδιαίτερα ευάλωτα σε απότομες μεταβολές του φορτίου, σε περιπτώσεις απώλειας παραγωγής και στην υψηλή διείσδυση μονάδων μη εγγυημένης παραγωγής, διαταραχές, που ενίοτε μπορούν να οδηγήσουν το απομονωμένο σύστημα σε μερική ή ολική κατάρρευση (black-out). Ενδεικτικά στον πίνακα 2.1 παρουσιάζονται τα ετήσια συνολικά ειδικά κόστη παραγωγής για διάφορα μη διασυνδεδεμένα Σ.Η.Ε. στην Ελλάδα το 2012 και το 2013. Για τα ίδια έτη το ετήσιο συνολικό ειδικό κόστος παραγωγής του ηπειρωτικού συστήματος διαμορφώθηκε περίπου στα 80€/MWh.

Πίνακας 2.1: Ετήσια συνολικά ειδικά κόστη παραγωγής για τα ελληνικά μη διασυνδεδεμένα συστήματα.

Α/Α	Σύστημα	Συνολικό ετήσιο ειδικό κόστος παραγωγής (€/MWh)		Α/Α	Σύστημα	Συνολικό ετήσιο ειδικό κόστος παραγωγής (€/MWh)	
		2012	2013			2012	2013
1	Κως - Κάλυμνος	176,87	171,93	17	Αμοργός	410,37	374,21
2	Χίος	187,50	178,25	18	Σίφνος	381,45	378,95
3	Πάρος	188,22	190,34	19	Σκύρος	420,16	400,80
4	Λέσβος	192,16	196,99	20	Κύθνος	409,71	405,36
5	Σάμος	225,95	222,43	21	Αστυπάλαια	424,15	411,74
6	Κρήτη	239,32	223,60	22	Σέριφος	425,88	419,62
7	Σύρος	233,80	226,58	23	Άγιος Ευστράτιος	444,00	420,82
8	Λήμνος	247,33	242,85	24	Ανάφη	480,60	500,43
9	Ρόδος	243,45	243,41	25	Καστελόριζο	492,94	527,16
10	Θήρα	204,88	268,95	26	Γαύδος	592,22	539,21
11	Μήλος	263,11	269,42	27	Οθωνοί	702,26	656,59
12	Κάρπαθος	284,76	294,40	28	Αγαθονήσι	733,99	704,86
13	Μύκονος	360,54	345,75	29	Δονούσα	766,92	754,79
14	Σύμη	386,36	349,63	30	Ερείκουσα	878,13	801,42
15	Ικαρία	363,70	364,99	31	Αρκιοί	893,90	948,00
16	Πάτμος	388,27	367,71	32	Αντικύθηρα	1.748,07	1.265,39

2.1.3. Διατήρηση ασφάλειας ενεργειακών συστημάτων

Με τον όρο *ασφάλεια ηλεκτρικού συστήματος* αναφερόμαστε στην εξασφάλιση της δυναμικής ισορροπίας συστήματος παραγωγής και φορτίου, δηλαδή στη δυνατότητα παρακολούθησης από το σύστημα παραγωγής των μεταβολών του ηλεκτρικού φορτίου, διατηρώντας την τάση και τη συχνότητα του δικτύου εντός των προδιαγεγραμμένων ορίων.

Η συχνότητα ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας σχετίζεται με τη ζήτηση ενεργού ισχύος από την κατανάλωση, ενώ η τάση ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας σχετίζεται με τη ζήτηση άεργου ισχύος από την κατανάλωση. Στις σχέσεις 2.5 και 2.6 περιγράφονται αναλυτικά οι εξαρτήσεις αυτές.

$$\Delta f = -\frac{\Delta P_L}{P_n} \cdot f_n \cdot R \quad (2.5)$$

$$\Delta Q = E_i \frac{\Delta V}{X_d} \cdot \cos(\delta) - \frac{(\Delta V)^2}{X_d} \quad (2.6)$$

όπου

- Δf : η προκαλούμενη μεταβολή συχνότητας εξαιτίας μεταβολής ενεργού ισχύος
- ΔP_L : η μεταβολή ενεργού ισχύος
- P_n : η αρχική συνολική παραγωγή ισχύος
- f_n : η συχνότητα μόνιμης κατάστασης λειτουργίας
- R : ο στατισμός του συστήματος
- ΔQ : η μεταβολή άεργου ισχύος
- E_i : η τάση διέγερσης γεννήτριας
- ΔV : η προκαλούμενη μεταβολή τάσης εξαιτίας μεταβολής άεργου ισχύος
- X_d : η επαγωγική αντίδραση γεννήτριας
- δ : η γωνία ισχύος γεννήτριας.

Η διατήρηση δυναμικής ασφάλειας σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας ουσιαστικά ανάγεται στην εξασφάλιση των απαιτούμενων από την κατανάλωση ροών ενεργού και άεργου ισχύος, με ρυθμούς απόκρισης μεταβολών φορτίου τέτοιους, ώστε οι προκαλούμενες μεταβολές συχνότητας και τάσης, βάσει των σχέσεων 2.5 και 2.6, να διατηρούνται πάντα εντός των ανεκτών ορίων λειτουργίας των γεννητριών.

Στα διασυνδεδεμένα ενεργειακά συστήματα, όπου συνυπάρχουν μεγάλα συστήματα παραγωγής και διανομής ηλεκτρικής ισχύος, η διατήρηση της ασφάλειας είναι πολύ πιο απλή υπόθεση από ό,τι στα μη διασυνδεδεμένα. Τούτο προκύπτει εξαιτίας των ακόλουθων χαρακτηριστικών:

- οι σχετικές μεταβολές φορτίου σε μεγάλα συστήματα δεν είναι το ίδιο έντονες όσο σε μικρά συστήματα, ή τουλάχιστον δε γίνονται αντιληπτές, αφού η μείωση ζήτησης ισχύος σε κάποια γεωγραφική περιοχή μπορεί να καλύπτεται από την ταυτόχρονη αύξηση κάπου αλλού. Συνεπώς στα συστήματα αυτά οι γεννήτριες ηλεκτρικής ισχύος συνήθως δεν καλούνται να υποστηρίξουν απότομες μεταβολές φορτίου
- στην περίπτωση ακραίων καταστάσεων (απότομες μεταβολές φορτίων, βλάβες γεννητριών ή δικτύων), υπάρχει πάντα η δυνατότητα αλληλοϋποστήριξης, της διάθεσης δηλαδή ισχύος από το ένα σύστημα στο άλλο.

Τα ανωτέρω χαρακτηριστικά των διασυνδεδεμένων συστημάτων δεν υφίστανται στα απομονωμένα ενεργειακά συστήματα. Σε περιπτώσεις μικρών συστημάτων, η παραγωγή ισχύος μπορεί να προέρχεται από μία μόνο σύγχρονη γεννήτρια. Η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της θα καθορίσει και τη συχνότητα της παραγόμενης ισχύος. Η ασφάλεια του συστήματος εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της γεννήτριας, π.χ. το στατισμό¹ της, τη δυνατότητα παρακολούθησης γρήγορων μεταβολών φορτίου κλπ. Στην πλειονότητα των

¹Ο στατισμός μιας γεννήτριας είναι μία από τις παραμέτρους που ορίζεται στον ελεγκτή πρωτεύουσας ταχύτητας ενός σταθμού παραγωγής (γεννήτρια και στρόβιλος). Είναι ίσος με το πηλίκο της οιονεί ημιτονοειδούς κατάστασης μεταβολής της συχνότητας του συστήματος και της αντίστοιχης μεταβολής της ισχύος που παράγεται από τη γεννήτρια σαν αποτέλεσμα της δράσης του πρωτεύοντος ρυθμιστή. Αυτός ο αδιάστατος λόγος εκφράζεται γενικά ως ποσοστό.

περιπτώσεων, ο μόνος τρόπος εξασφάλισης της δυναμικής ισορροπίας μεταξύ παραγωγής και φορτίου είναι η διατήρηση στρεφόμενης εφεδρείας, η έννοια της οποίας θα αναλυθεί σε επόμενη ενότητα. Άμεση συνέπεια είναι η αύξηση του ειδικού κόστους παραγωγής, όπως, επίσης, θα εξηγηθεί παρακάτω.

Όσο αυξάνει το μέγεθος ενός απομονωμένου ενεργειακού συστήματος, η ασφάλειά του εξαρτάται από τη λειτουργία ενός συνόλου γεννητριών. Συνήθως, σε μεγάλα απομονωμένα ενεργειακά συστήματα, η λειτουργία κάποιων γεννητριών αποσκοπεί στη ρύθμιση της συχνότητας – συνήθως συμπίπτουν με τις μηχανές βάσης – ενώ η λειτουργία κάποιων άλλων γεννητριών παρακολουθεί τις μεταβολές του φορτίου.

Πρακτικά τα προβλήματα ισχύος που μπορούν να προκαλέσουν σοβαρά προβλήματα στη δυναμική ισορροπία ενός Σ.Η.Ε. είναι η εμφάνιση υπότασης και υποσυχνότητας. Η υπόταση και η υποσυχνότητα μπορεί να είναι συνέπεια κάποιας ξαφνικής αύξησης φορτίου, ή κάποιας ξαφνικής απώλειας παραγωγής, λόγω βλάβης κάποιας γεννήτριας ενταγμένης στην παραγωγή. Η αντίδραση του συστήματος παραγωγής κατά την εμφάνιση ενός τέτοιου συμβάντος εξαρτάται από:

- το ποσοστό στιγμιαίας διείσδυσης μονάδων μη εγγυημένης ισχύος στην παραγωγή,
- τα χαρακτηριστικά των διαθέσιμων θερμοηλεκτρικών μηχανών, ειδικότερα δε, τους ρυθμούς απόκρισής τους σε ταχείς μεταβολές του φορτίου,
- το ποσοστό επί του φορτίου και το είδος της στρεφόμενης εφεδρείας (αναλύεται στην επόμενη ενότητα),
- τα όρια ανοχής σε διαταραχές τάσης και συχνότητας των ενταγμένων μονάδων παραγωγής.

Τα θεωρητικά ενδεχόμενα στην περίπτωση εμφάνισης υπότασης ή υποσυχνότητας σε ένα Σ.Η.Ε. είναι τα εξής:

- Το σύστημα αντιμετωπίζει το πρόβλημα επιτυχώς χωρίς διακοπή τροφοδοσίας ισχύος. Η περίπτωση αυτή μπορεί να συμβεί, όταν η διαταραχή δεν είναι έντονη, όταν υπάρχει διαθεσιμότητα γεννητριών με γρήγορη απόκριση ή όταν διατηρείται ικανή στρεφόμενη εφεδρεία.
- Το σύστημα αντιμετωπίζει τη διαταραχή με μερική διακοπή τροφοδοσίας ισχύος σε περιορισμένους καταναλωτές. Στην περίπτωση αυτή οι διαθέσιμες γεννήτριες, ή η στρεφόμενη εφεδρεία, δεν είναι σε θέση να αντιμετωπίσουν την ξαφνική αύξηση φορτίου ή την απώλεια παραγωγής. Οι διατάξεις προστασίας δικτύου αποκόπτουν την παροχή ισχύος σε κάποιο τμήμα καταναλωτών, έως ότου η δυναμική ισορροπία αποκατασταθεί στο υπόλοιπο δίκτυο. Η παροχή στο αποκομμένο τμήμα αποκαθίσταται εφόσον προκύψει η απαιτούμενη παραγωγή ισχύος από νέες γεννήτριες.
- Το σύστημα καταρρέει (black-out). Η περίπτωση αυτή προκύπτει, συνήθως, μετά από σοβαρά σφάλματα που θέτουν εκτός παραγωγής γεννήτριες με μεγάλη ποσοστιαία παραγωγή ισχύος τη στιγμή του συμβάντος. Η κατάρρευση επέρχεται κυρίως λόγω αλυσιδωτών απωλειών παραγωγής από γεννήτριες που τίθενται εκτός λειτουργίας μετά από ενεργοποίηση των προστατευτικών διατάξεών τους (generators' tripping). Οι απώλειες παραγωγής ξεκινούν από τις περισσότερο ευαίσθητες μηχανές στις μεταβολές των βασικών χαρακτηριστικών του δικτύου (τάση, συχνότητα), οι οποίες σειριακά συμπαρασύρουν και τις υπόλοιπες.

Θα πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι όλες οι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας παρουσιάζουν μέγιστα όρια ανοχής στις μεταβολές της συχνότητας και της τάσης του εναλλασσόμενου ρεύματος του δικτύου, τόσο ως προς το μέγεθος των μεταβολών αυτών, όσο και ως προς τη χρονική διάρκειά τους. Όταν τα όρια αυτά παραβιαστούν, οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες τίθενται εκτός λειτουργίας, για λόγους αυτοπροστασίας.

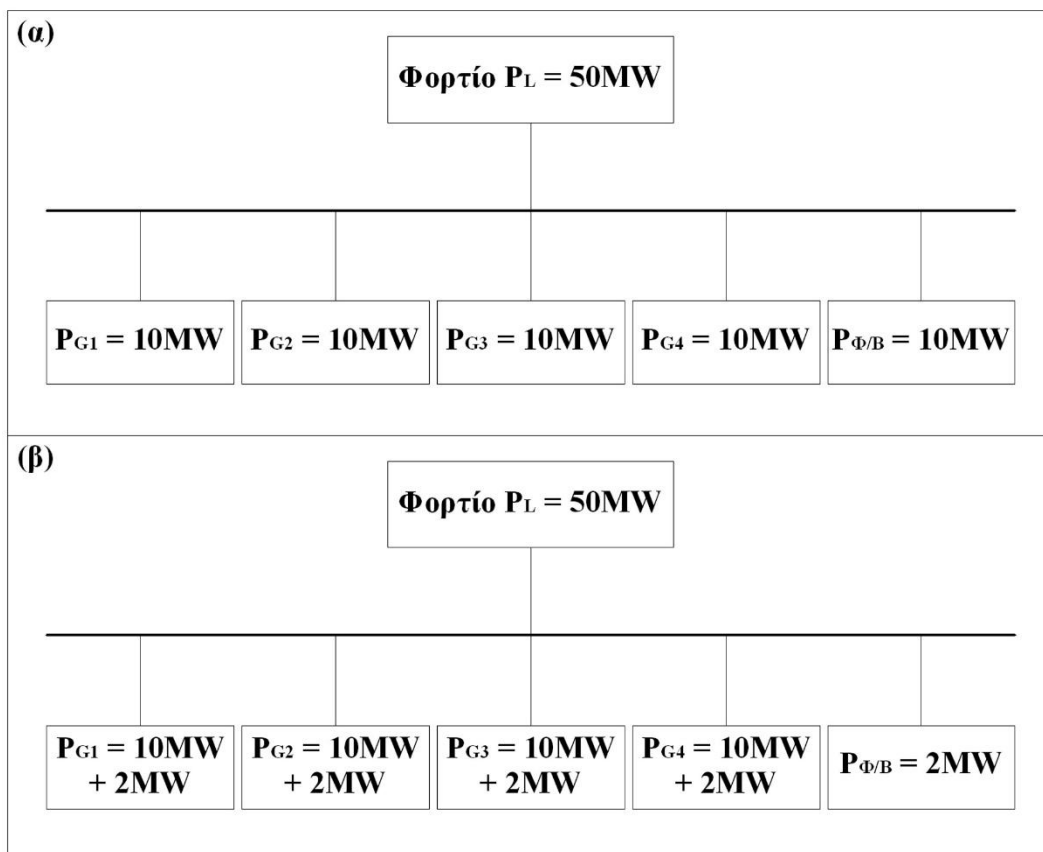
Στο παράδειγμα του σχήματος 2.2 ,η συνολική ζήτηση ισχύος 50MW καλύπτεται αρχικά από τέσσερις θερμοηλεκτρικές μονάδες με ισχύ 10MW από την καθεμία και ένα φωτοβολταϊκό σταθμό με ισχύ επίσης 10MW.

Κάποια στιγμή η παραγωγή από το φωτοβολταϊκό σταθμό μειώνεται απότομα στα 2MW, λόγω ξαφνικής νέφωσης, που μειώνει σημαντικά τη διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία. Συνεπώς εμφανίζεται ακαριαία μία απώλεια παραγωγής 8MW, η οποία θα πρέπει να καλυφθεί από τις υπόλοιπες ενταγμένες μονάδες. Πρακτικά, κατά την εμφάνιση της απώλειας παραγωγής, η ζήτηση ισχύος θα πρέπει να κατανομηθεί στις

(Πηγή Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας Α.Ε. Εγχειρίδιο Λεξιλογίου Νοέμβριος 2012, http://www.admie.gr/uploads/media/MANUAL_GLOSSARY_v5.0_TC.pdf).

υπόλοιπες τέσσερις ενταγμένες μονάδες, προκειμένου να επανέλθει δυναμική ισορροπία ανάμεσα στην παραγωγή και στο φορτίο. Η πλέον ευνοϊκή για κάθε μονάδα κατανομή της απώλειας παραγωγής των 8MW είναι η ισόποση κατανομή κατά 2MW σε καθεμία από τις ενταγμένες θερμοηλεκτρικές μονάδες.

Η απότομη αύξηση του φορτίου κατά 2MW σε κάθε μία θερμοηλεκτρική γεννήτρια θα γίνει αντιληπτή από μία εμφάνιση ηλεκτρομαγνητικής πέδης στο ρότορα των γεννητριών, η οποία θα οδηγήσει σε ακαριαία μείωση των στροφών των μονάδων σε τιμές χαμηλότερες της σύγχρονης ταχύτητας περιστροφής (50Hz) και, συνεπώς, θα οδηγήσει στην εμφάνιση υποσυχνότητας στο σύστημα. Ανάλογα με την εμφανιζόμενη υποσυχνότητα, οι μονάδες παραγωγής, όπως αιτιολογήθηκε παραπάνω, μπορούν να λειτουργήσουν για ένα μέγιστο χρονικό διάστημα, ανάλογα με τον τύπο και τα τεχνικά χαρακτηριστικά στους. Αν έως να παρέλθει το χρονικό αυτό διάστημα, δεν έχει επανέλθει η ονομαστική συχνότητα του συστήματος, τότε και οι υπόλοιπες μονάδες θα αρχίσουν να τίθενται διαδοχικά εκτός παραγωγής, οδηγώντας σε σειρά το σύστημα σε ολική κατάρρευση.



Σχήμα 2.2: Σχηματική απεικόνιση απώλειας παραγωγής.

Προκειμένου να αποτραπεί το ενδεχόμενο αυτό, θα πρέπει να πληρούνται δύο προϋποθέσεις:

- και οι τέσσερις μονάδες συνολικά να έχουν το περιθώριο να αυξήσουν τη συνολική παραγωγή τους κατά ποσό ίσο με την απώλεια παραγωγής (8MW)
- οι μονάδες να παρουσιάζουν υψηλό ρυθμό απόκρισης στις μεταβολές του φορτίου, σε κάθε περίπτωση ικανό, ώστε να αυξηθεί η παραγωγή τους κατά την απαιτούμενη ισχύ εντός του χρονικού διαστήματος πριν την κατάρρευση του συστήματος.

Οι δύο ανωτέρω προϋποθέσεις αναφέρονται συνοπτικά ως «ποσοστό και τύπος στρεφόμενης εφεδρείας», έννοιες που θα αναλυθούν στην αμέσως επόμενη ενότητα.

2.1.4. Στρεφόμενη εφεδρεία

Κάθε θερμοηλεκτρική γεννήτρια χαρακτηρίζεται από δύο όρια που καθορίζουν το πεδίο τιμών της παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος από αυτήν. Το κατώτατο όριο παραγωγής της γεννήτριας ονομάζεται *τεχνικό*

ελάχιστο και αντιστοιχεί στην ελάχιστη ισχύ με την οποία η μονάδα μπορεί να λειτουργήσει. Το ανώτατο όριο παραγωγής ονομάζεται *μέγιστη ικανότητα της μονάδας*, η οποία είτε συμπίπτει με την ονομαστική ισχύ της μονάδας είτε εμφανίζεται λίγο υψηλότερη από αυτή (συνήθως έως 10%).

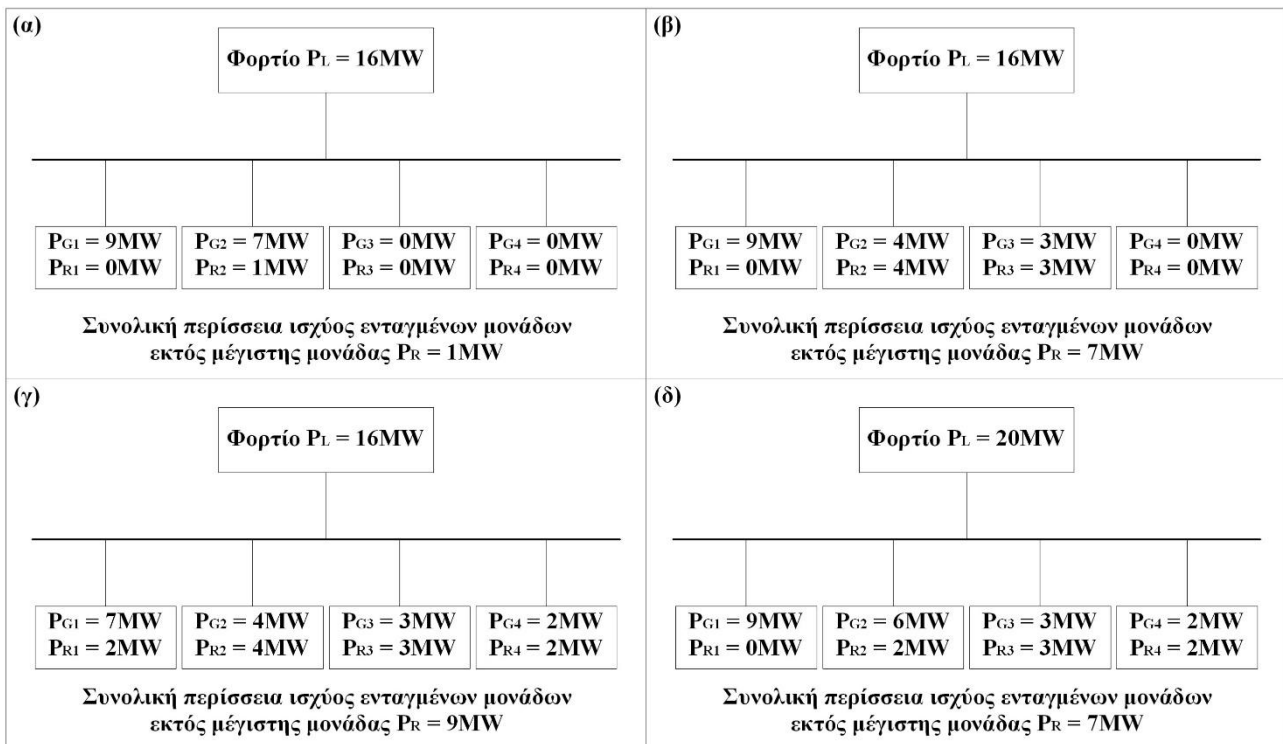
Ας υποθέσουμε ότι σε ένα Σ.Η.Ε. υπάρχουν διαθέσιμες τέσσερις θερμοηλεκτρικές γεννήτριες, με τις ακόλουθες τιμές τεχνικών ελαχίστων και μέγιστης ικανότητας παραγωγής:

- γεννήτρια 1: τεχνικό ελάχιστο 4MW, ονομαστική ισχύ 9MW
- γεννήτρια 2: τεχνικό ελάχιστο 4MW, ονομαστική ισχύ 8MW
- γεννήτρια 3: τεχνικό ελάχιστο 3MW, ονομαστική ισχύ 6MW
- γεννήτρια 4: τεχνικό ελάχιστο 2MW, ονομαστική ισχύ 4MW.

Στα σχήματα 2.3 παρουσιάζονται τέσσερα διαφορετικά σενάρια ζήτησης ισχύος στο εν λόγω Σ.Η.Ε. και σύνθεσης παραγωγής από τις διαθέσιμες μονάδες. Ας τα δούμε αναλυτικά:

- Σενάριο 1

Η ζήτηση ισχύος είναι 16MW και καλύπτεται με την παραγωγή 9MW από τη γεννήτρια 1 και 7MW από τη γεννήτρια 2. Η χειρότερη διαταραχή που μπορεί να συμβεί στο σύστημα είναι η απώλεια της ενταγμένης μονάδας με τη μέγιστη ονομαστική ισχύ, δηλαδή της γεννήτριας 1. Η περίσσεια ισχύος των υπόλοιπων ενταγμένων μονάδων έως τη μέγιστη ικανότητά τους, πρακτικά δηλαδή της γεννήτριας 2, είναι 1MW. Συνεπώς πιθανή απώλεια της γεννήτριας 1 δεν μπορεί να καλυφθεί από την περίσσεια ισχύος των λοιπών ενταγμένων μονάδων. Θα πρέπει να ενταχθούν στην παραγωγή οι υπόλοιπες γεννήτριες, δηλαδή οι 3 και 4, διαδικασία πιθανότατα όχι αρκετά γρήγορη, ώστε να αποφευχθεί η κατάρρευση του συστήματος, λόγω της υποσυχνότητας που θα εμφανιστεί, η οποία θα οδηγήσει και τη γεννήτρια 2 σε αποκοπή παραγωγής.



Σχήμα 2.3.: Σενάρια ζήτησης ισχύος, σύνθεσης παραγωγής και στρεφόμενης εφεδρείας.

- Σενάριο 2

Η ζήτηση ισχύος είναι και πάλι 16MW και καλύπτεται με την παραγωγή 9MW από τη γεννήτρια 1, 4MW από τη γεννήτρια 2 και 3MW από τη γεννήτρια 3. Η περίσσεια ισχύος των ενταγμένων μονάδων έως τη μέγιστη ικανότητά τους, πλην αυτής με τη μέγιστη ικανότητα (γεννήτρια 1), πρακτικά δηλαδή των γεννητριών 2 και 3, είναι 7MW. Συνεπώς, πιθανή απώλεια της γεννήτριας με τη μέγιστη ικανότητα παραγωγής, δηλαδή της γεννήτριας 1, θα μπορέσει να καλυφθεί από την περίσσεια ισχύος των λοιπών

ενταγμένων μονάδων, με μερική αποκοπή φορτίου 2MW από τη ζήτηση, ώστε να δοθεί ο χρόνος να ενταχθεί στην παραγωγή και η γεννήτρια 4.

•

- Σενάριο 3

Η ζήτηση ισχύος είναι ξανά 16MW, και καλύπτεται με την παραγωγή 7MW από τη γεννήτρια 1, 4MW από τη γεννήτρια 2, 3MW από τη γεννήτρια 3 και 2MW από τη γεννήτρια 4. Η περίσσεια ισχύος των ενταγμένων μονάδων έως τη μέγιστη ικανότητά τους, πλην αυτής με τη μέγιστη ικανότητα (γεννήτρια 1), πρακτικά δηλαδή των γεννητριών 2, 3 και 4, είναι 9MW. Συνεπώς πιθανή απώλεια της γεννήτριας με τη μέγιστη ικανότητα παραγωγής, δηλαδή της γεννήτριας 1, θα μπορέσει να καλυφθεί από την περίσσεια ισχύος των λοιπών ενταγμένων μονάδων.

- Σενάριο 4

Η ζήτηση ισχύος έχει αυξηθεί στα 20MW. Παρόλο που η παραγωγή έχει κατανομηθεί σε όλες τις διαθέσιμες γεννήτριες, η περίσσεια ισχύος των ενταγμένων μονάδων έως τη μέγιστη ικανότητά τους, πλην αυτής με τη μέγιστη ικανότητα (γεννήτρια 1), είναι 7MW. Συνεπώς, πιθανή απώλεια της γεννήτριας με τη μέγιστη ικανότητα παραγωγής, δηλαδή της γεννήτριας 1, δε θα μπορέσει να καλυφθεί από την περίσσεια ισχύος των λοιπών ενταγμένων μονάδων.

Η συνολική περίσσεια ισχύος των ενταγμένων θερμοηλεκτρικών μονάδων, πλην εκείνης με τη μέγιστη ικανότητα, από την τρέχουσα παραγωγή ισχύος έως τη μέγιστη ικανότητά τους, ονομάζεται *στρεφόμενη εφεδρεία*. Είναι ευνόητο ότι η διατήρηση στρεφόμενης εφεδρείας σε ένα σύστημα αποσκοπεί στη διατήρηση εφεδρείας ισχύος από τις ενταγμένες θερμοηλεκτρικές μονάδες, ώστε να είναι δυνατή η αύξηση της παραγωγής τους σε περίπτωση απώλειας ισχύος. Η στρεφόμενη εφεδρεία επιτυγχάνεται με την κατανομή της παραγωγής σε περισσότερες μονάδες, ώστε να διατηρείται η παραγωγή της καθεμιάς χαμηλότερη από τη μέγιστη ικανότητά της.

Πόση όμως στρεφόμενη εφεδρεία θα πρέπει να διατηρηθεί, ώστε το σύστημα να είναι ασφαλές. Ο κανόνας διατήρησης στρεφόμενης εφεδρείας που, συνήθως, τηρείται στα Σ.Η.Ε. είναι η συνολική περίσσεια ισχύος από τις ενταγμένες μονάδες στην παραγωγή (στρεφόμενη εφεδρεία), πλην εκείνης με τη μέγιστη ικανότητα, να ισούται τουλάχιστον με την ικανότητα παραγωγής από τη μέγιστη μονάδα. Είναι προφανές ότι, ακόμα και αν τηρείται ο κανόνας αυτός, δε συνεπάγεται ότι το σύστημα είναι ασφαλές. Η ασφάλεια του συστήματος, όπως ήδη αναφέρθηκε, εξαρτάται πέραν από τη στρεφόμενη εφεδρεία, από την ικανότητα απόκρισης των ενταγμένων μονάδων στις μεταβολές του φορτίου και, κατ' επέκταση, στην απώλεια παραγωγής ισχύος, από τις καιρικές συνθήκες, από τις ενταγμένες μονάδες Α.Π.Ε., όπως θα δούμε στη συνέχεια κλπ.

Στα παραδείγματα που παρουσιάστηκαν προηγουμένως, ο ανωτέρω κανόνας επιτυγχάνεται μόνο στο σενάριο 3. Στα σενάρια 1 και 2 δεν επιτυγχάνεται, λόγω λανθασμένης επιλογής των ενταγμένων θερμοηλεκτρικών μονάδων και της παραγωγής τους. Στο σενάριο 4 δεν είναι δυνατόν να ικανοποιηθεί ο κανόνας αυτός, εξαιτίας της αύξησης της ζήτησης ισχύος και της μείωσης της δυνατότητας διατήρησης στρεφόμενης εφεδρείας θερμοηλεκτρικών μονάδων ως προς τη μέγιστη ενταγμένη μονάδα.

Όπως θα δούμε σε επόμενη ενότητα, ο βαθμός απόδοσης των θερμοηλεκτρικών μονάδων μειώνεται για παραγωγή ισχύος χαμηλότερη της ονομαστικής. Συνεπώς η διατήρηση στρεφόμενης εφεδρείας, καθώς επιτυγχάνεται με παραγωγή θερμοηλεκτρικών μονάδων χαμηλότερη της ονομαστικής τους, συνεπάγεται λειτουργία των μονάδων με χαμηλότερο βαθμό απόδοσης και αυξημένο κόστος παραγωγής.

2.1.5. Μονάδες Α.Π.Ε. και ασφάλεια ηλεκτρικών συστημάτων

Ιδιαίτερη είναι η επίδραση των μονάδων μη εγγυημένης παραγωγής στη διατήρηση της ασφάλειας ενός Σ.Η.Ε. Οι μονάδες αυτές είναι μονάδες των οποίων η παραγωγή ισχύος δεν μπορεί να ελεγχθεί κατά βούληση από το χειριστή. Αντιθέτως εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα της πρωτογενούς πηγής ισχύος, η οποία είναι μεταβαλλόμενη. Συνήθως τέτοιες μονάδες είναι κάποιες από τις τεχνολογίες Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Α.Π.Ε.), όπως αιολικά πάρκα και φωτοβολταϊκοί σταθμοί. Η ιδιαίτερη αυτή επίδραση προκύπτει ακριβώς από το γεγονός της μεταβαλλόμενης παραγωγής ισχύος από τις μονάδες αυτές, ανάλογα με τη διαθεσιμότητα του δυναμικού Α.Π.Ε., η οποία θα πρέπει να αντιμετωπιστεί από τις υπόλοιπες

ενταγμένες μονάδες εγγυημένης ισχύος (π.χ. θερμοηλεκτρικές μονάδες), ώστε η τελική παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος να συμπίπτει πάντα με την κατανάλωση. Ακραία περίπτωση των μεταβολών αυτών είναι η ξαφνική απώλεια μέρους, ή ολόκληρης, της παραγωγής μη εγγυημένης ισχύος, που μπορεί να προκύψει από διάφορες αιτίες, όπως ξαφνική απώλεια δυναμικού Α.Π.Ε. (π.χ. απότομη μείωση ηλιακής ακτινοβολίας λόγω νέφωσης) ή βλάβη των μονάδων παραγωγής (π.χ. θραύση πτερυγίου ανεμογεννήτριας λόγω κεραυνού). Στις περιπτώσεις αυτές, όσο υψηλότερη είναι η αρχική ποσοστιαία συμμετοχή των μονάδων Α.Π.Ε. στην παραγωγή, τόσο δυσκολότερα θα αντιμετωπιστεί από τις υπόλοιπες μονάδες εγγυημένης παραγωγής η απώλεια παραγωγής ισχύος.

Πέραν της μεταβαλλόμενης μη εγγυημένης παραγωγής ισχύος, ειδικά για τις ανεμογεννήτριες, η επίδρασή τους στην ασφάλεια ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας προέρχεται επιπλέον από τα σχετικά χαμηλά όρια ανοχής που παρουσιάζουν στις μεταβολές τάσης ή συχνότητας του δικτύου. Τα όρια αυτά χαρακτηρίζουν τις ανεμογεννήτριες ως ευαίσθητες γεννήτριες και τις κατατάσσουν πρώτες στη σειρά των γεννητριών που τίθενται εκτός παραγωγής σε περιπτώσεις ανωμαλίας στην τάση ή στη συχνότητα του δικτύου. Χαρακτηριστικά όρια συχνότητων και τάσης ανοχής των σύγχρονων ανεμογεννητριών παρουσιάζονται στον πίνακα 2.2. Οι τιμές του πίνακα είναι ενδεικτικές, και μπορούν να διαφέρουν ανάλογα με τον κατασκευαστή της γεννήτριας. Νέα μοντέλα ανεμογεννητριών σαφώς παρουσιάζουν βελτιωμένα χαρακτηριστικά, τα οποία, όμως, δεν μπορούν να θεωρηθούν ως ενδεικτικά για την πλειοψηφία των εγκατεστημένων σήμερα ανεμογεννητριών.

<i>Πίνακας 2.2: Ανοχές ανεμογεννητριών στις διαταραχές τάσης και συχνότητας ηλεκτρικών συστημάτων.</i>		
Διαταραχή	Μεταβολή (%)	Χρονοκαθυστέρηση (sec)
Υπόταση	90,00	60,0
Υπέρταση	110,00	60,0
Υποσυχνότητα	- 6,00% (47 Hz)	0,2
Υπερσυχνότητα	+ 2,00% (51 Hz)	0,2

Η λειτουργία ανεμογεννητριών, και, γενικότερα, μονάδων μη εγγυημένης παραγωγής, σε απομονωμένα ενεργειακά συστήματα δυσχεραίνει τη διατήρηση ασφάλειας. Για το λόγο αυτό, η διατήρηση στρεφόμενης εφεδρείας, ικανής να αναλάβει πιθανή απώλεια παραγωγής από μονάδα Α.Π.Ε., αποτελεί μία λύση διασφάλισης ομαλούς λειτουργίας του συστήματος, με άμεση συνέπεια, βέβαια, την αύξηση του ειδικού κόστους παραγωγής. Μία άλλη λύση περιορισμού της επίδρασης των μονάδων Α.Π.Ε. στη λειτουργία ενός συστήματος είναι ο περιορισμός της συμμετοχής τους στην παραγωγή, για την οποία χρησιμοποιείται ο όρος «διείσδυση».

Η επίδραση της λειτουργίας μονάδων Α.Π.Ε. στη δυναμική ισορροπία ενός συστήματος παραγωγής και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας εξαρτάται από τα εξής:

- το ποσοστό στιγμιαίας διείσδυσης μη εγγυημένης ισχύος στην παραγωγή
- τα χαρακτηριστικά των ενταγμένων θερμοηλεκτρικών μονάδων, ειδικότερα δε, τους ρυθμούς απόκρισής τους σε ταχείς μεταβολές του φορτίου
- το ποσοστό επί του φορτίου και το είδος της στρεφόμενης εφεδρείας
- τα όρια ανοχής σε διαταραχές τάσης και συχνότητας των εγκατεστημένων ανεμογεννητριών.

Σχετικά με το ποσοστό διείσδυσης μη εγγυημένης ισχύος επί της συνολικής παραγωγής, μελέτες απομονωμένων ενεργειακών συστημάτων, που έχουν στηριχτεί σε προσομοιώσεις της ηλεκτρικής λειτουργίας των συστημάτων αυτών, κατέδειξαν ότι για ποσοστά διείσδυσης κάτω του 10% δεν προκύπτει πρόβλημα δυναμικής ισορροπίας από πιθανή απώλεια παραγωγής. Από την άλλη μεριά, για ποσοστά διείσδυσης μονάδων μη εγγυημένης ισχύος μεγαλύτερα του 37%, το σύστημα είναι δύσκολο να ανακάμψει από πιθανή απώλεια παραγωγής.

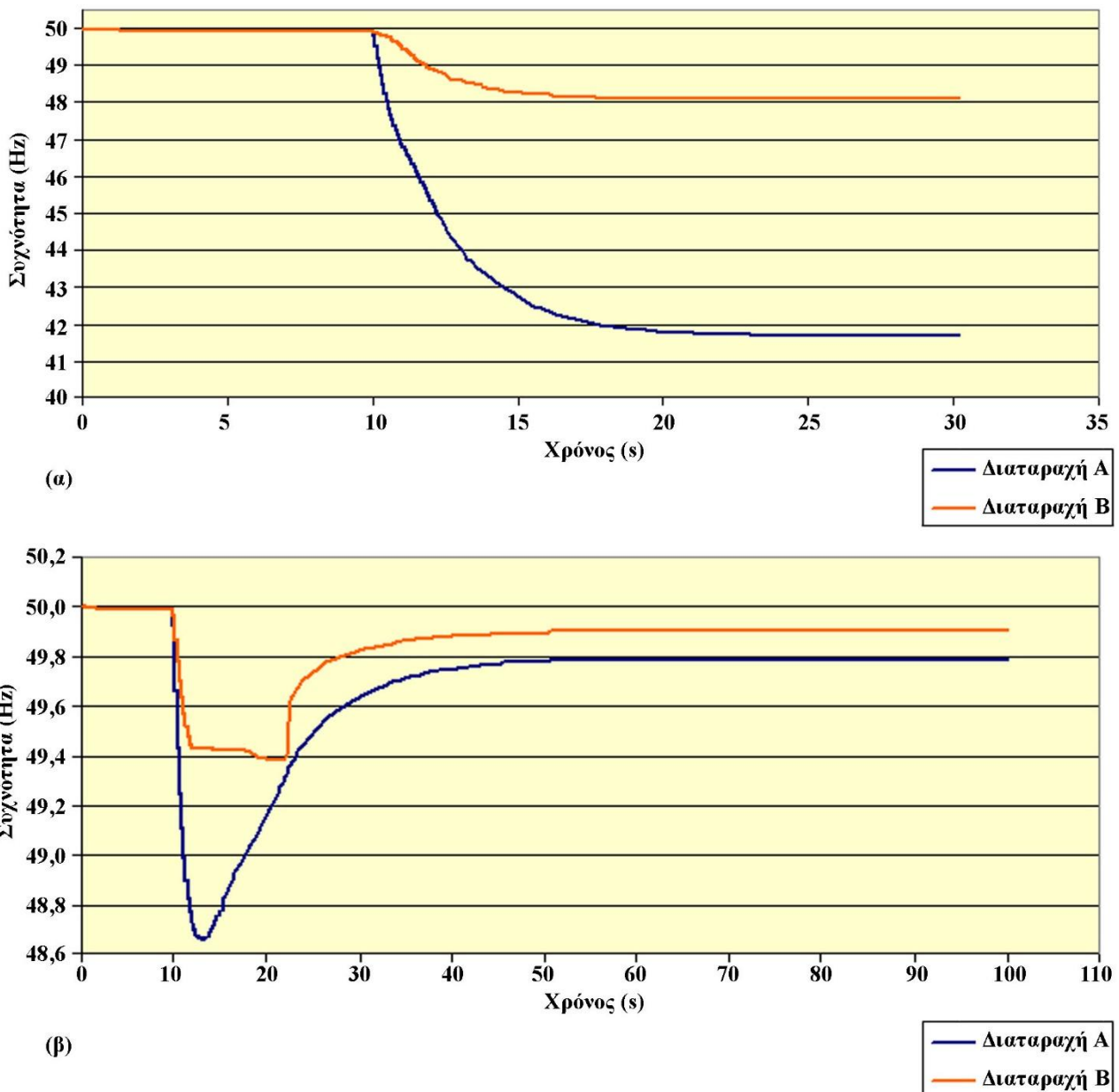
Οι παράγοντες που καθορίζουν το κατά πόσο είναι ασφαλές το ποσοστό στιγμιαίας διείσδυσης μονάδων μη εγγυημένης ισχύος είναι:

- οι θερμοηλεκτρικές μηχανές που είναι εντός παραγωγής (είδος μηχανών και χαρακτηριστικά τους)
- η δομή του δικτύου διανομής (ύπαρξη εφεδρικών γραμμών)
- η διατήρηση στρεφόμενης εφεδρείας και το είδος της

- οι καιρικές συνθήκες.

Οι ανωτέρω παράγοντες επιβάλλουν διαφορετικά ανώτατα όρια για το μέγιστο ασφαλές ποσοστό στιγμιαίας διείσδυσης μονάδων μη εγγυημένης ισχύος σε διαφορετικά απομονωμένα ενεργειακά συστήματα και σε διαφορετικές χρονικές περιόδους μέσα στο έτος. Πρακτικά, η μέγιστη στιγμιαία διείσδυση μη εγγυημένης ισχύος, με γνώμονα την ασφαλή λειτουργία του συστήματος, μπορεί να κυμανθεί από 10 - 15%, για μικρά και ασθενή συστήματα ή ιδιόμορφες συνθήκες φορτίου – παραγωγής (χαμηλή ζήτηση, έντονα καιρικά φαινόμενα, αργή στρεφόμενη εφεδρεία), έως 30 – 35% για μεγάλα συστήματα.

Σχετικά με το είδος των ενταγμένων θερμοηλεκτρικών μηχανών και της στρεφόμενης εφεδρείας, στο σχήμα 2.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα εργασίας προσομοίωσης συμβάντος απώλειας γεννήτριας που εφαρμόστηκε στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας της Κρήτης.



Σχήμα 2.4: Μεταβολές συχνότητας δικτύου Κρήτης κατά την απώλεια συμβατικής γεννήτριας για διάφορα συνδυαστικά σενάρια διείσδυσης αιολικής ισχύος και στρεφόμενης εφεδρείας.

Στα σχήματα 2.4 παρουσιάζεται η μεταβολή της συχνότητας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας της Κρήτης σε δύο διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας και για δύο διαφορετικές διαταραχές. Στο σχήμα 2.4α

το σύστημα λειτουργεί σε φορτίο 258MW με διατήρηση αργής στρεφόμενης εφεδρείας 30MW και παραγωγή ισχύος από αιολικά πάρκα 80MW. Στο σχήμα 2.4β το σύστημα λειτουργεί στο ίδιο φορτίο και με την ίδια παραγωγή ισχύος από τα αιολικά πάρκα, αλλά με διατήρηση γρήγορης στρεφόμενης εφεδρείας 159MW. Και για τις δύο εναλλακτικές περιπτώσεις λειτουργίας μελετώνται δύο διαταραχές:

- διαταραχή Α: απώλεια 80MW αιολικών πάρκων
- διαταραχή Β: απώλεια 25MW ατμοστροβίλου.

Στην πρώτη περίπτωση λειτουργίας το σύστημα καταρρέει μετά την εμφάνιση και των δύο διαταραχών. Ακόμα και η απώλεια 25MW ατμοστροβίλου, παρόλο που είναι μικρότερη από τα 30MW της στρεφόμενης εφεδρείας που διατηρείται, οδηγεί σε κατάρρευση του συστήματος εξαιτίας του ότι οι θερμοηλεκτρικές μονάδες στις οποίες βασίζεται η στρεφόμενη εφεδρεία είναι αργές. Στη δεύτερη περίπτωση, η γρήγορη και υψηλή στρεφόμενη εφεδρεία, που διατηρείται επιτρέπει στο σύστημα να ανακάμψει και στις δύο περιπτώσεις εμφάνισης διαταραχών. Είναι, επίσης, αναμενόμενο το ότι η διαταραχή Β, λόγω της χαμηλότερης απώλειας παραγωγής αντιμετωπίζεται ευκολότερα από το σύστημα.

Τέλος τα όρια ανοχής των εγκατεστημένων ανεμογεννητριών σε διακυμάνσεις τάσης και συχνότητας αποτελούν σημαντικό παράγοντα καθορισμού της μέγιστης ασφαλούς στιγμιαίας διείσδυσης αιολικής ισχύος. Η τεχνολογία κατασκευής των ανεμογεννητριών αναπτύσσεται συνεχώς. Τα όρια που παρουσιάστηκαν στον πίνακα 2.2 αντιπροσωπεύουν σχεδόν το σύνολο των εγκατεστημένων ανεμογεννητριών στην Ελλάδα και στον κόσμο. Ωστόσο, οι νέες τεχνολογίες θέτουν νέα δεδομένα στο θέμα της διείσδυσης. Οι απαιτήσεις των διαχειριστών δικτύου για ασφαλέστερη λειτουργία αιολικών πάρκων ωθούν τους κατασκευαστές σε ανάπτυξη σχετικών τεχνολογιών που επιτρέπουν την παραμονή μιας ανεμογεννήτριας εντός παραγωγής για μεγαλύτερα εύρη και χρονικά διαστήματα διακυμάνσεων τάσης και συχνότητας.

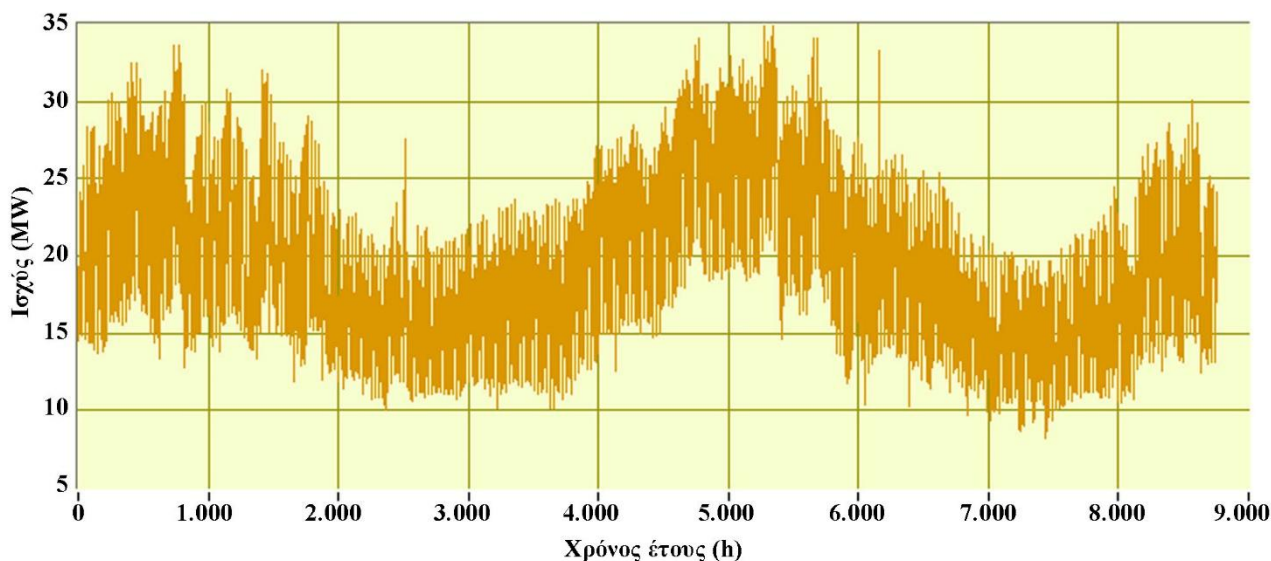
2.1.6. Ζήτηση ισχύος σε Σ.Η.Ε.

Η ζήτηση ισχύος σε ένα Σ.Η.Ε. καταγράφεται αυτόματα μέσω συστημάτων τηλεμετρίας (SCADA) ανά τακτά χρονικά διαστήματα (π.χ. μέσες ωριαίες τιμές) και για περιόδους ενός έτους. Στο τέλος του έτους συντάσσονται τεχνικά δελτία από τον αρμόδιο διαχειριστή (ΔΕΔΔΗΕ για τα μη διασυνδεδεμένα συστήματα και ΑΔΜΗΕ για το διασυνδεδεμένο σύστημα), στα οποία παρουσιάζονται όλα τα στοιχεία αναφορικά με τη ζήτηση ισχύος, την κατανομή της παραγωγής ανάμεσα στις διαθέσιμες μονάδες παραγωγής, τις καταναλώσεις καυσίμου, τους βαθμούς απόδοσης των μονάδων παραγωγής, πιθανές ειδικές καταστάσεις που προέκυψαν κατά την ετήσια περίοδο που ολοκληρώθηκε (σφάλματα, αποκοπές φορτίου κλπ) και, τελικά, τα ετήσια κόστη και τα ειδικά κόστη παραγωγής. Τα αποτελέσματα από την καταγραφή των στοιχείων σε ετήσια βάση επαναλαμβάνονται περίπου χρόνο με το χρόνο, συνήθως με μικρούς ρυθμούς αύξησης ή μείωσης της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, αν, βεβαίως, δεν υπάρξουν κάποιες σημαντικές αλλαγές στο σύστημα (προσθήκες νέων μονάδων, αλλαγή καυσίμων κλπ).

Στο σχήμα 2.5 παρουσιάζεται η ετήσια χρονοσειρά ζήτησης ισχύος στο αυτόνομο σύστημα της Σάμου, καταγεγραμμένης με μέσες ωριαίες τιμές. Από το σχήμα 2.5 παρατηρείται το ότι η ζήτηση ισχύος μεγιστοποιείται σε ετήσια βάση κατά τη θερινή περίοδο και ελαχιστοποιείται κατά τη διάρκεια της άνοιξης και του φθινοπώρου. Η ετήσια μέγιστη ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος σε ένα Σ.Η.Ε. ονομάζεται ετήσια αιχμή ζήτησης ισχύος ή, απλά, ετήσια αιχμή συστήματος. Κατά τη χειμερινή περίοδο, η ζήτηση ισχύος αυξάνει σε σχέση με το φθινόπωρο ή την άνοιξη, χωρίς να φθάνει όμως τα επίπεδα του καλοκαιριού.

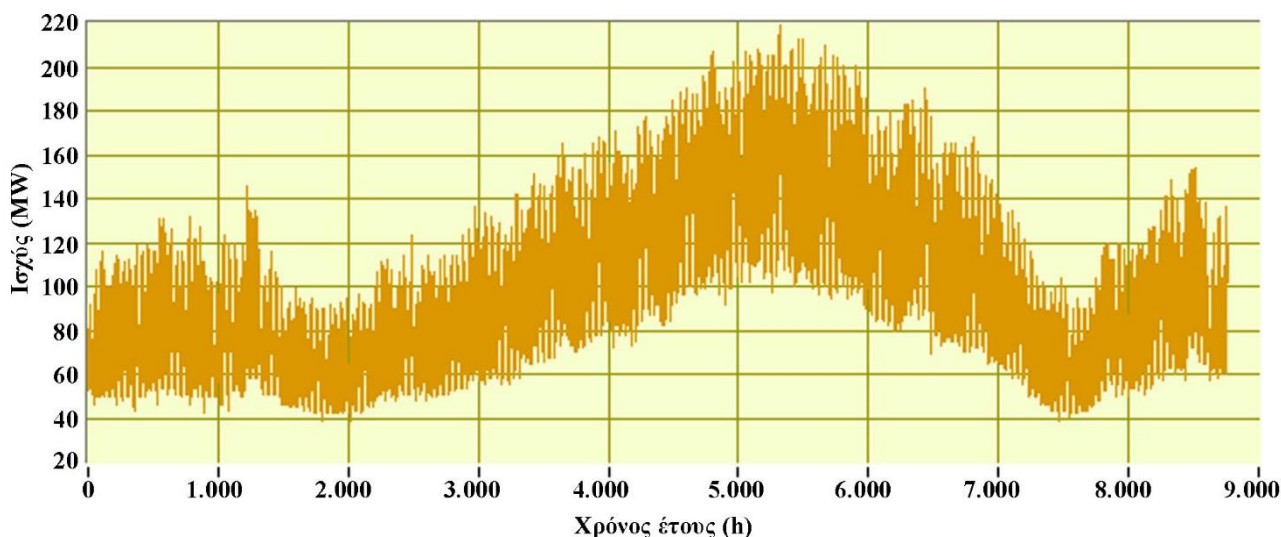
Η ετήσια διακύμανση της ζήτησης ισχύος που εμφανίζεται στο σχήμα 2.5 είναι χαρακτηριστική για τα ελληνικά συστήματα και για αρκετές ακόμα γεωγραφικές περιοχές στον κόσμο. Η μεγιστοποίηση της ζήτησης ηλεκτρικής ισχύος συμπίπτει με την περίοδο αύξησης των δραστηριοτήτων, κυρίως επαγγελματικών, μιας περιοχής. Για την Ελλάδα η περίοδος αυτή είναι σαφώς η θερινή περίοδος, στην οποία αναπτύσσεται η τουριστική δραστηριότητα. Από την άλλη μεριά, η ζήτηση ισχύος ελαχιστοποιείται κατά τις περιόδους του έτους, που αφενός δε σημειώνονται σημαντικές επαγγελματικές δραστηριότητες και αφετέρου οι καιρικές συνθήκες προσεγγίζουν τις πρότυπες συνθήκες θερμικής άνεσης εσωτερικών χώρων, ελαχιστοποιώντας έτσι τις καταναλώσεις ενέργειας για κλιματισμό. Αυτές οι εποχές στην Ελλάδα είναι σαφώς το φθινόπωρο και η άνοιξη. Κατά τη χειμερινή περίοδο, κυρίως λόγω των αυξημένων αναγκών σε κλιματισμό, αλλά και, ανά περιοχή, λόγω πιθανών τοπικών δραστηριοτήτων (π.χ. σε Κρήτη, Λέσβο, Σάμο, Πελοπόννησο κατά τη χειμερινή περίοδο προκύπτουν σημαντικές καταναλώσεις ηλεκτρικής ισχύος λόγω της εποχιακής λειτουργίας

των ελαιοτριβείων), παρατηρείται, επίσης, αύξηση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ισχύος, μικρότερη, ωστόσο, σε κάθε περίπτωση, από αυτήν της θερινής περιόδου.



Σχήμα 2.5: Ετήσια διακύμανση της ζήτησης ηλεκτρικής ισχύος στο Σ.Η.Ε. Σάμου.

Η διακύμανση στη ζήτηση ισχύος μεταξύ χειμερινής και θερινής περιόδου είναι τόσο περισσότερο έντονη, όσο περισσότερο έντονη είναι η διαφορά ανάμεσα στις δραστηριότητες που αναπτύσσονται στον αντίστοιχο γεωγραφικό χώρο στις δύο εποχιακές περιόδους. Στο σχήμα 2.5 παρατηρείται ότι η διαφορά στη ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος μεταξύ χειμώνα και καλοκαιριού στο Σ.Η.Ε. Σάμου δεν είναι ιδιαίτερα έντονη. Δεν συμβαίνει όμως το ίδιο και στην περίπτωση του Σ.Η.Ε. Ρόδου, στο οποίο η ετήσια διακύμανση της ζήτησης ηλεκτρικής ισχύος παρουσιάζεται στο σχήμα 2.6. Στο σχήμα αυτό παρατηρείται ότι η ζήτηση ισχύος κατά το καλοκαίρι είναι περίπου μιάμιση φορά μεγαλύτερη από την αντίστοιχη το χειμώνα, αντικατοπτρίζοντας χαρακτηριστικά την έντονη τουριστική δραστηριότητα, που αναπτύσσεται στο νησί κατά τη θερινή περίοδο. Συγκρίνοντας ακόμα τις καμπύλες ζήτησης ισχύος στα σχήμα 2.5 και 2.6, παρατηρούμε το ότι η ζήτηση ισχύος στη Ρόδο παρουσιάζεται περίπου έξι φορές υψηλότερη από την αντίστοιχη στη Σάμο, εκφράζοντας έτσι τη διαφορά μεγέθους ανάμεσα στα δύο συστήματα.



Σχήμα 2.6: Ετήσια διακύμανση της ζήτησης ηλεκτρικής ισχύος στο Σ.Η.Ε. Ρόδου.

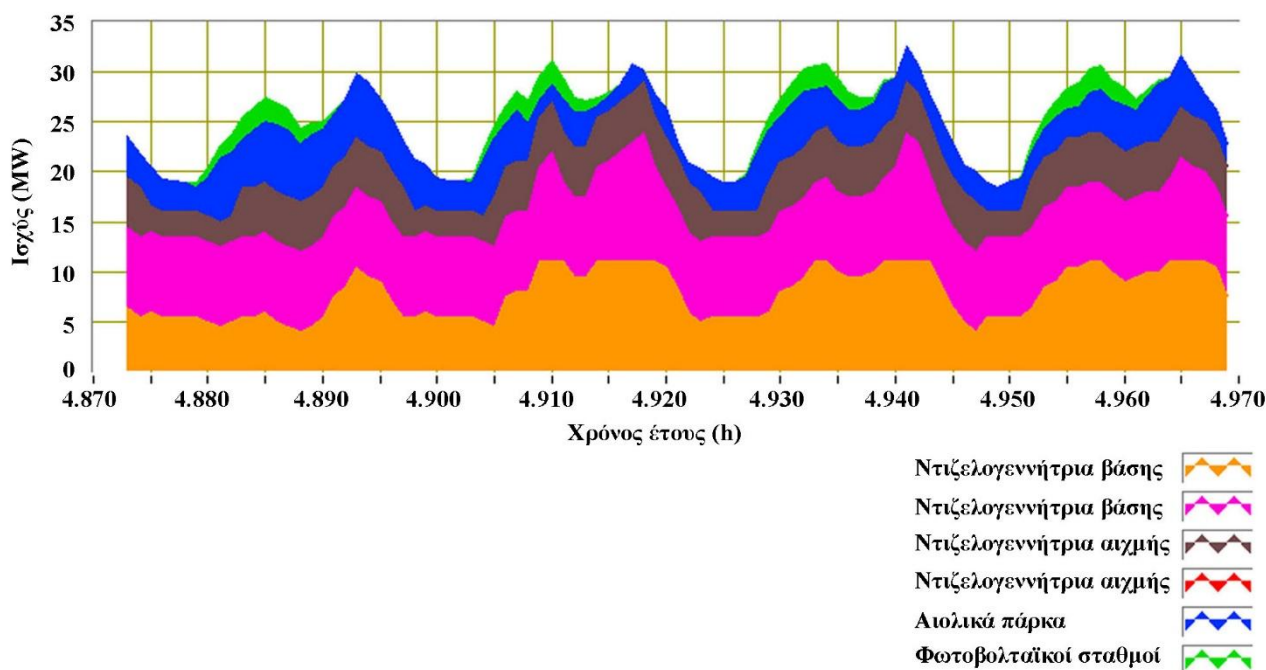
Με βάση τα ανωτέρω είναι ξεκάθαρο το πως μέσω της ετήσιας διακύμανσης της ζήτησης ηλεκτρικής ισχύος σε ένα γεωγραφικό χώρο μπορούμε να πάρουμε πληροφορίες σχετικά:

- το μέγεθος και το βιοτικό επίπεδο του γεωγραφικού χώρου στο οποίο αναφέρεται το Σ.Η.Ε.

- τις εποχιακές αλλαγές στις δραστηριότητες του πληθυσμού του γεωγραφικού χώρου
- την περίοδο έξαρσης επαγγελματικών και κοινωνικών δραστηριοτήτων.

Είναι, επίσης, σαφής ο τρόπος με τον οποίο οι αλλαγές στη ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος αποτυπώνουν τις τάσεις ανάπτυξης μιας περιοχής. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι στο Σ.Η.Ε. Κρήτης καταγραφόταν ετήσια αύξηση της αιχμής ζήτησης ισχύος της τάξης του 5 – 7% έως περίπου το 2008. Κατά τα χρόνια της οικονομικής κρίσης (2008 – 2012) παρουσιάστηκε μείωση της ετήσιας ζήτησης ηλεκτρικής ισχύος (η οποία σαφέστατα δεν οφείλεται ξαφνικά σε μέτρα εξοικονόμησης ενέργειας) με ρυθμούς της τάξης του 5 – 10%, αποτυπώνοντας έτσι την οικονομική ύφεση που έπληξε το νησί. Τα έτη 2013 και 2014 η ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος στο Σ.Η.Ε. Κρήτης τείνει να επανέλθει σε χαμηλούς ρυθμούς αύξησης.

Πέρα από τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα που αποτυπώνονται σε μία χρονοσειρά ετήσιας διακύμανσης ζήτησης ηλεκτρικής ισχύος σε ένα Σ.Η.Ε., αντίστοιχα στοιχεία παρατηρούνται και σε ημερήσιες καμπύλες ζήτησης. Στο σχήμα 2.7 παρουσιάζεται η διακύμανση της ημερήσιας καμπύλης ζήτησης ηλεκτρικής ισχύος σε τέσσερα εικοσιτετράωρα κατά το τελευταίο δεκαήμερο του Ιουλίου στο Σ.Η.Ε. Σάμου.



Σχήμα 2.7: Ημερήσια διακύμανση της ζήτησης ηλεκτρικής ισχύος κατά το τελευταίο δεκαήμερο του Ιουλίου στο Σ.Η.Ε. Σάμου.

Από το σχήμα 2.7 παρατηρούμε τα εξής:

- Η ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος παρουσιάζει μία σαφή επαναληψιμότητα σε εικοσιτετράωρη βάση.
- Από την εναλλαγή της ημέρας και μέχρι την ανατολή του ηλίου η ζήτηση ισχύος ακολουθεί φθίνουσα καμπύλη. Κατά τις πρώτες πρωινές ώρες η ζήτηση ισχύος παρουσιάζει το ημερήσιο ελάχιστο.
- Με την ανατολή του ηλίου η ζήτηση ισχύος αρχίζει να αυξάνεται, ακολουθώντας τις ανθρώπινες δραστηριότητες, παρουσιάζοντας το πρώτο μέγιστο ζήτησης ισχύος περίπου κατά το μεσημέρι.
- Μετά το μεσημέρι, και οδεύοντας προς τις απογευματινές ώρες, η ζήτηση ισχύος παρουσιάζει τοπικό ελάχιστο.
- Κατά τις βραδινές ώρες παρουσιάζεται το δεύτερο μέγιστο ζήτησης ισχύος, το οποίο αποτελεί, συνήθως, και το ολικό μέγιστο του εικοσιτετράωρου.
- Οι μέγιστες τιμές ζήτησης ισχύος που καταγράφονται κατά το μεσημέρι και το βράδυ ονομάζονται *ημερήσιες αιχμές ζήτησης ισχύος*.

- Τη χειμερινή περίοδο οι αιχμές ζήτησης ισχύος παρουσιάζονται νωρίτερα στο εικοσιτετράωρο από ότι τη θερινή περίοδο.

Στο σχήμα 2.7 παρουσιάζονται, επίσης, με διαφορετικούς χρωματισμούς οι επιμέρους παραγωγές ισχύος από τις διαθέσιμες θερμοηλεκτρικές μονάδες και τις μονάδες Α.Π.Ε. στο Σ.Η.Ε. Σάμου. Με δεδομένο το ότι το διάγραμμα του σχήματος 2.7 αποτυπώνεται σε άξονες ισχύος – χρόνου, το εμβαδό κάθε διαφορετικού χρωματισμού απεικονίζει την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την εκάστοτε μονάδα παραγωγής στο χρονικό διάστημα στο οποίο αναφέρεται το διάγραμμα. Διαγράμματα της μορφής του σχήματος 2.7, στα οποία απεικονίζεται η σύνθεση των μονάδων παραγωγής για την κάλυψη συγκεκριμένης ζήτησης ισχύος, ονομάζονται «διαγράμματα σύνθεσης παραγωγής». Εξυπακούεται ότι η σειρά ένταξης των μονάδων παραγωγής και η ισχύς με την οποία καθεμία από αυτές συμβάλλει στην κάλυψη της συνολικής ζήτησης ισχύος δεν είναι τυχαίες. Αντιθέτως ακολουθούν συγκεκριμένους κανόνες που σκοπό έχουν να εξασφαλίσουν την ασφάλεια και ευστάθεια του συστήματος και να προσεγγίσουν την κατά το δυνατόν ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής. Περισσότερα για τον τρόπο ένταξης των μονάδων παραγωγής σε ένα Σ.Η.Ε. αναφέρονται στην επόμενη ενότητα.

2.2. Μονάδες παραγωγής

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας επιτυγχάνεται μέσω της μετατροπής κάποιας αρχικής, πρωτογενούς μορφής ενέργειας. Ανάλογα με την αρχική διαθέσιμη μορφή ενέργειας, για τη μετατροπή της σε ηλεκτρική χρησιμοποιούνται διαφορετικές μηχανές. Επιγραμματικά οι βασικοί τύποι μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, είναι:

1. Θερμικές μηχανές ή θερμοηλεκτρικές μονάδες.

Ονομάζονται έτσι, γιατί, κατά τη μετατροπή της αρχικής διαθέσιμης πηγής ενέργειας έως την τελική ηλεκτρική, σε κάποιο στάδιο μετατροπής εμφανίζεται θερμική ενέργεια, η οποία μέσω της εφαρμογής κάποιου θερμοδυναμικού κύκλου, αξιοποιείται για την παραγωγή μηχανικού έργου, το οποίο τελικά μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω μίας γεννήτριας επαγωγής. Η αρχική μορφή ενέργειας στις θερμοηλεκτρικές μηχανές είναι, συνήθως, η χημική ενέργεια στερεών, υγρών ή αερίων ορυκτών καυσίμων (άνθρακες, πετρέλαιο, φυσικό αέριο) και, σπανιότερα, η πυρηνική ενέργεια σχάσιμων στοιχείων. Μετά το 2000 αναπτύχθηκαν οι πρώτοι ηλιοθερμικοί σταθμοί, στους οποίους η θερμική ενέργεια προέρχεται από τη συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας σε παραβολικά κάτοπτρα. Ανεξάρτητα από τη μορφή της αρχικής πρωτογενούς ενέργειας, για τη μετατροπή της σε ηλεκτρική χρησιμοποιούνται οι ακόλουθοι τύποι θερμοηλεκτρικών μονάδων:

- ατμοστρόβιλοι
- ντιζελογεννήτριες,
- αεριοστρόβιλοι,
- συνδυασμένοι κύκλοι των ανωτέρω τύπων.

2. Υδροστρόβιλοι.

Χρησιμοποιούνται σε υδροηλεκτρικούς σταθμούς για τη μετατροπή υδροδυναμικής ενέργειας (δυναμική ενέργεια νερού λόγω του βαρυτικού πεδίου της γης) σε ηλεκτρική.

3. Ανεμογεννήτριες.

Χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή της αιολικής ενέργειας (κινητική ενέργεια ανέμου) σε ηλεκτρική.

4. Φωτοβολταϊκά.

Χρησιμοποιούνται για την απευθείας μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας, χωρίς δηλαδή την ενδιάμεση εμφάνιση κάποιας άλλης μορφής ενέργειας, σε ηλεκτρική.

Εκτός των ανωτέρω εφαρμογών, στα πλαίσια της προσπάθειας αξιοποίησης επιπλέον διαθέσιμων πρωτογενών μορφών ενέργειας, έχουν αναπτυχθεί μία σειρά από τεχνολογίες για την αξιοποίηση της κυματικής και παλιρροιακής ενέργειας, όπως και οι κυψέλες καυσίμου (fuel cells), για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από υδρογόνο. Οι τεχνολογίες αυτές βρίσκονται ακόμα σε εμβρυϊκό στάδιο, χαρακτηρίζονται από υψηλό κόστος παραγωγής, χαμηλό βαθμό ωριμότητας και οι εγκαταστάσεις ανά τον

κόσμο είναι λίγες και χαμηλής ισχύος, κυρίως πιλοτικού και επιδεικτικού χαρακτήρα. Για τους λόγους αυτούς δε θα γίνει ιδιαίτερη αναφορά στις νέες αυτές τεχνολογίες. Ειδικά για τις κυψέλες καυσίμου θα γίνει εκτενής αναφορά στον επόμενο Κεφάλαιο.

Στη συνέχεια της παρούσας ενότητας παρουσιάζονται οι βασικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και αναλύονται τα μακροσκοπικά χαρακτηριστικά τους, τα οποία καθορίζουν τον τρόπο συνδυασμένης λειτουργίας και ένταξής τους μαζί με τις υπόλοιπες μονάδες σε ένα Σ.Η.Ε.

2.2.1. Ατμοστρόβιλοι

Σε ένα ατμοστρόβιλο η παραγωγή μηχανικής ισχύος επιτυγχάνεται μέσω της εκτόνωσης υπέρθερμου, πεπιεσμένου ατμού υψηλής ενθαλπίας σε ένα στρόβιλο. Η σύγχρονη μορφή του εισήχθη το 1884 από το Βρετανό Sir Charles Parsons (1854 –1931). Η χρήση των ατμοστροβίλων είναι εξαιρετικά διαδεδομένη στον τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Περισσότερο από το 85% της παγκόσμιας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας παράγεται από ατμοστρόβιλους.

Το μέγεθος των ατμοστροβίλων ποικίλλει από μονάδες με ισχύ μικρότερη των 0,75 kW για κίνηση αντλιών, συμπιεστών και μικρών γεννητριών ηλεκτρικής ισχύος, έως μονάδες με ισχύ 1,5GW για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Ένας ατμοστρόβιλος αποτελείται από μία σειρά στροβίλων συνδεδεμένων μεταξύ τους και συζευγμένων σε κοινό άξονα με την επαγωγική γεννήτρια. Στην αρχή του άξονα η αλληλουχία των στροβίλων ξεκινάει με τη βαθμίδα υψηλής πίεσης, η οποία ακολουθείται από τη βαθμίδα μέσης πίεσης, για να καταλήξει τελικά σε δύο στροβίλους χαμηλής πίεσης πριν την επαγωγική γεννήτρια. Καθώς ο ατμός κινείται διαμέσου των βαθμίδων, αποδίδοντας συνεχώς μηχανική ισχύ, η πίεσή του και θερμική ενέργειά του μειώνονται, με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο όγκος του, απαιτώντας έτσι ολοένα αυξανόμενη διάμετρο και περύγια μεγαλύτερου μήκους για τη δέσμευση της εναπομένουσας ισχύος. Η συνολική περιστρεφόμενη μάζα ενός ατμοστροβίλου μπορεί να ξεπερνάει τους 200 τόνους και τα 30m μήκους. Η μεγάλη μάζα ενός ατμοστροβίλου επιβάλλει τη διαρκεί περιστροφική κίνησή του, ακόμα και όταν τούτος παραμένει σβηστός, σε πολύ χαμηλές ταχύτητες περιστροφής (περίπου 3rpm), προκειμένου να αποτραπεί το ενδεχόμενο στρέβλωσης του άξονα και απώλειας της συμμετρίας του.

Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι το μέγεθος των προαναφερόμενων περιστρεφόμενων μαζών, σε συνδυασμό με την απαίτηση για το θάλαμο καύσης του καυσίμου και το λέβητα παραγωγής του ατμού, κάνουν μία ατμοηλεκτρική εγκατάσταση ιδιαίτερα ογκώδη και πολύπλοκη. Μία τέτοια εγκατάσταση παρουσιάζεται στο σχήμα 2.8, και αναλύεται παρακάτω.

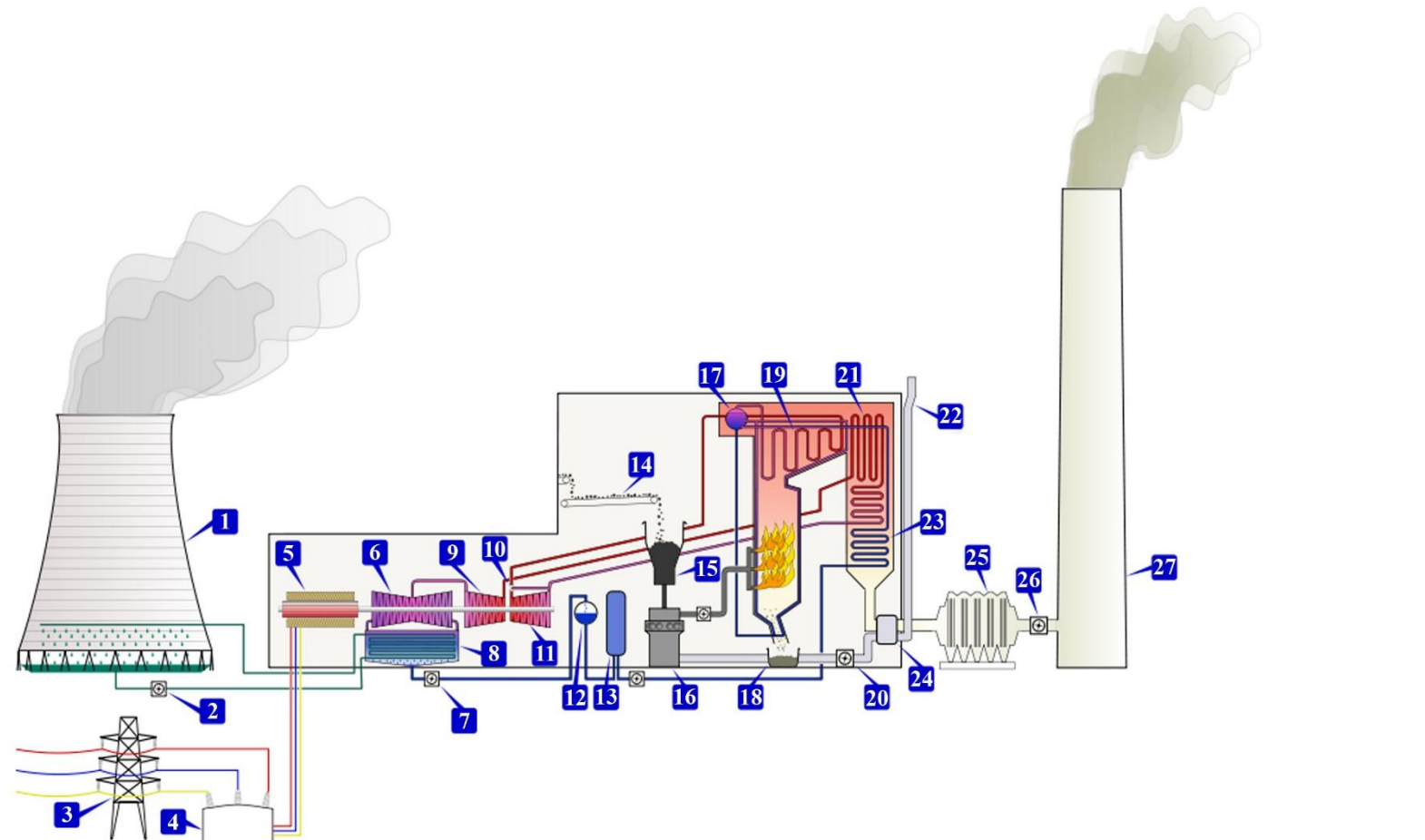
Η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος σε ένα ατμοηλεκτρικό σταθμό θα μπορούσε να διακριθεί σε τρία στάδια:

- στάδιο παρασκευής ατμού
- στάδιο εκτόνωσης ατμού και παραγωγής μηχανικής ισχύος
- στάδιο επαναφοράς του ατμού σε υγρή κατάσταση μετά την εκτόνωσή του στις βαθμίδες στροβίλου.

Με βάση το σχήμα 2.8, η λειτουργία ενός ατμοηλεκτρικού σταθμού αναλύεται στα ακόλουθα:

Στάδιο παρασκευής ατμού:

- Το καύσιμο (συνήθως στερεό) μεταφέρεται από το χώρο αποθήκευσής του με τη βοήθεια των ταινιόδρομων (14) προς το μύλο κονιοποίησής (16), όπου μετατρέπεται σε πολύ λεπτή σκόνη. Στην περίπτωση χρήσης μη στερεού καυσίμου (π.χ. μαζούτ) δεν υπάρχουν ταινιόδρομοι και μύλος κονιοποίησης, αλλά, αντίθετα το καύσιμο αντλείται από τη δεξαμενή αποθήκευσης και οδηγείται απευθείας στον καυστήρα.



- | | | | |
|----------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|
| 1. Πύργος ψύξης | 8. Επίπεδος συμπυκνωτής | 15. Σιλό καυσίμου | 22. Εισαγωγή αέρα στον καυστήρα |
| 2. Αντλία νερού ψύξης | 9. Στρόβιλος μέσης πίεσης | 16. Μύλος κονιοποίησης καυσίμου | 23. Οικονομητήρας |
| 3. Δίκτυο μεταφοράς | 10. Βαλβίδα ελέγχου ατμού | 17. Τόμπανο | 24. Προθερμαντήρας αέρα |
| 4. Μετασηματιστής ανύψωσης | 11. Στρόβιλος υψηλής πίεσης | 18. Δοχείο απομάκρυνσης τέφρας | 25. Ηλεκτροστατικά φίλτρα |
| 5. Επαγωγική γεννήτρια | 12. Εξαερωτής | 19. Υπερθερμαντήρας | 26. Ανεμιστήρας εξαγωγής καυσαερίων |
| 6. Στρόβιλος χαμηλής πίεσης | 13. Προθερμαντήρας νερού | 20. Ανεμιστήρας κυκλοφορίας αέρα | 27. Καμινάδα |
| 7. Αντλία τροφοδοσίας συμπυκνωτή | 14. Ταινιοδρομοί μεταφοράς καυσίμου | 21. Επαναθερμαντήρας | |

Σχήμα 2.8: Γενική διάταξη ατμοηλεκτρικού σταθμού [1].

- Από το μύλο κονιοποίησης η σκόνη καυσίμου οδηγείται στον καυστήρα, όπου αναμειγνύεται με προθερμασμένο αέρα, που έχει προπαρασκευαστεί στον προθερμαντήρα (24), και ο οποίος φτάνει, επίσης, στον καυστήρα με τη βοήθεια του ανεμιστήρα κυκλοφορίας (20).
- Το ήδη θερμό μίγμα αέρα – καυσίμου αναφλέγεται στον καυστήρα του λέβητα.
- Η παραγόμενη θερμότητα από την καύση του καυσίμου μεταφέρεται σε νερό υψηλής καθαρότητας, το οποίο ρέει κάθετα στα τοιχώματα του λέβητα.
- Το νερό ατμοποιείται και μεταφέρεται στο τύμπανο του λέβητα (17), όπου απομακρύνονται από τον ατμό τα οποιαδήποτε κατάλοιπα μη ατμοποιημένου νερού.
- Ο καθαρός ατμός οδηγείται στη συνέχεια στον υπερθερμαντήρα (19), όπου η πίεση και η θερμοκρασία του αυξάνονται σε τιμές της τάξης των 200bar και 570°C, αντίστοιχα. Εδώ ολοκληρώνεται η διαδικασία παρασκευής του ατμού για την εκτόνωσή του στις βαθμίδες στροβίλων.

Στάδιο εκτόνωσης ατμού:

- Αρχικά ο ατμός οδηγείται από το στρόβιλο υψηλής πίεσης (11), όπου εκτελείται η πρώτη από τις τρεις μετατροπές της ενθαλπίας του ατμού σε μηχανικό έργο. Μέσω της βαλβίδας ελέγχου (10) είναι δυνατός τόσο ο χειροκίνητος έλεγχος του στροβίλου όσο και η αυτόματη παύση του.
- Ο εξερχόμενος ατμός από τη βαθμίδα υψηλής πίεσης, έχοντας μειωμένη πίεση και θερμοκρασία σε σχέση με την έξοδό του από τον υπερθερμαντήρα (19), οδηγείται στη συνέχεια στον υπερθερμαντήρα (21), όπου αναθερμαίνεται.
- Ο αναθερμασμένος ατμός διέρχεται έπειτα από το στρόβιλο ενδιάμεσης ή μέσης πίεσης (9) και, στη συνέχεια, οδηγείται απευθείας στο στρόβιλο χαμηλής πίεσης (6). Εδώ ολοκληρώνεται η διαδικασία παραλαβής μηχανικού έργου από τον ατμό.

Στάδιο επαναφοράς ατμού:

- Μετά την εκτόνωση του ατμού στη βαθμίδα χαμηλής πίεσης, ο ατμός, ο οποίος βρίσκεται σε θερμοκρασία λίγο πάνω από το σημείο βρασμού του νερού, οδηγείται στο συμπυκνωτή (8), όπου ψύχεται και υγροποιείται, ερχόμενος σε επαφή με κρύο νερό που αντλείται από τον πύργο ψύξης (1). Το κρύο νερό ψύξης επιστρέφει στον πύργο ψύξης για την αποβολή της θερμότητας που παρέλαβε κατά την ψύξη του ατμού.
- Το συμπυκνωμένο νερό οδηγείται μέσω της αντλίας ανατροφοδосίας (7) στον εξαεριωτή (12) για την αποβολή τυχόν αερίων. Στη συνέχεια, αφού διέρθει από τον προθερμαντήρα (13), οδηγείται τελικά πίσω στο λέβητα, μέσω του οικονομητήρα (23).

Η παραγωγή της τελικής ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται μέσω της επαγωγικής γεννήτριας (5), με τον άξονα της οποίας είναι συζευγμένοι οι άξονες και των τριών στροβίλων.

Τα χαρακτηριστικά τα οποία κυρίως διαμορφώνουν και καθορίζουν τους ατμοστρόβιλους ως μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, τον τρόπο με τον οποίο τούτοι εντάσσονται σε ένα Σ.Η.Ε. και τις εργασίες που καλούνται να επιτελέσουν είναι τα ακόλουθα:

- Είναι οι μόνες μονάδες που μπορούν να καταναλώσουν οποιοδήποτε τύπο καυσίμου, στερεού, υγρού ή αερίου. Συνήθως χρησιμοποιούνται στερεά καύσιμα λόγω χαμηλού κόστους, όπως λιγνίτες, λιθάνθρακες κλπ. Η δυνατότητα αυτή προκύπτει εξαιτίας του ότι η καύση γίνεται σε θάλαμο εξωτερικό και ανεξάρτητο από αυτόν του στροβίλου. Για το λόγο αυτό οι ατμοστρόβιλοι κατατάσσονται στις μηχανές εξωτερικής καύσης.
- Σε περιπτώσεις παραγωγής θερμότητας από μη συμβατικά θερμοηλεκτρικά εργοστάσια, όπως σε πυρηνοληλεκτρικούς σταθμούς, σε γεωθερμικούς σταθμούς υψηλής ενθαλπίας και σε ηλιοθερμικούς σταθμούς, οι ατμοστρόβιλοι είναι οι μόνες μονάδες με τις οποίες δύναται να αξιοποιηθεί η

παραγόμενη θερμότητα, μετατρέποντάς την σε μηχανικό έργο. Η δυνατότητα αυτή, επίσης, οφείλεται στο ότι η παραγωγή θερμότητας γίνεται σε χώρο ανεξάρτητο από το στρόβιλο παραγωγής μηχανικού έργου.

- Γενικά χαρακτηρίζονται από χαμηλό συνολικό βαθμό απόδοσης, ο οποίος είναι της τάξης του 30 – 35%. Οι μεγαλύτερες απώλειες κατά τη μετατροπή από την αρχική χημική ενέργεια στην τελική ηλεκτρική είναι κατά τη μετατροπή της παραγόμενης θερμότητας σε μηχανικό έργο. Οι απώλειες αυτές εκφράζονται μέσω του θερμοδυναμικού βαθμού απόδοσης, ο οποίος είναι της τάξης του 40 – 45%. Οι υπόλοιπες απώλειες εντοπίζονται στις ιδιοκαταναλώσεις του ατμοηλεκτρικού σταθμού (περίπου 5 – 10%), στις απώλειες καύσης (5 – 10%), στις μηχανικές απώλειες τριβών (<2%) μεταξύ των τμημάτων του ατμοστροβίλου και στις απώλειες της επαγωγικής γεννήτριας (<2%).
- Το ειδικό κόστος παραγωγής σε ένα ατμοστρόβιλο (κόστος παραγωγής ανά παραγόμενη μονάδα τελικής ηλεκτρικής ενέργειας) είναι, προφανώς, συνάρτηση του καυσίμου που καταναλώνεται. Στην περίπτωση χρήσης μαζούτ, το ειδικό κόστος ενός ατμοστροβίλου διαμορφώνεται στα 0,10 – 0,12€/kWh, ενώ στην περίπτωση χρήσης εγχώριων στερεών καυσίμων, το κόστος παραγωγής μειώνεται σε τιμές της τάξης των 0,05€/kWh. Οι τιμές αυτές προκύπτουν από τις προσομοιώσεις των αντίστοιχων Σ.Η.Ε. ή παρέχονται στα ετήσια απολογιστικά τεχνικά δελτία των διαχειριστών των Σ.Η.Ε. Στην περίπτωση των πυρηνοληλεκτρικών σταθμών, το ετήσιο κόστος παραγωγής εκτιμάται στα 0,08 – 0,10€/kWh [2, 3].
- Το κόστος εγκατάστασης ενός ατμοστροβίλου ποικίλλει ανάλογα με το μέγεθος και τον τύπο του θερμοηλεκτρικού σταθμού. Στις περιπτώσεις συμβατικών θερμοηλεκτρικών σταθμών, το κόστος εγκατάστασης είναι της τάξης των 1.000 – 1.500€/kW. Στις περιπτώσεις πυρηνοληλεκτρικών σταθμών, το κόστος εγκατάστασης είναι της τάξης των 4.000€/kW [2, 3].
- Λόγω των μεγάλων περιστρεφόμενων μαζών, παρουσιάζουν υψηλή ροπή αδράνειας. Για τον ίδιο λόγο οι ατμοστρόβιλοι παρουσιάζουν δυσκολία ρύθμισης της ισχύος τους ανάλογα με τις μεταβολές του φορτίου.
- Λόγω της απαιτούμενης διαδικασίας παρασκευής του ατμού που προηγείται της παραγωγής μηχανικού έργου, οι ατμοστρόβιλοι χρειάζονται, συνήθως, ένα σημαντικό χρονικό διάστημα, που για μεγάλου μεγέθους μονάδες μπορεί να φτάσει τις αρκετές ώρες, μέχρι να τεθούν σε κατάσταση πλήρους ικανότητας παραγωγής, ξεκινώντας από την παύση. Για το λόγο αυτό χαρακτηρίζονται ως μονάδες με αργή εκκίνηση.

Ο ρόλος των ατμοστροβίλων σε ένα Σ.Η.Ε., όπως διαμορφώνεται με βάση τα ανωτέρω χαρακτηριστικά τους, θα αναλυθεί σε επόμενη ενότητα, συνοψίζοντας τα χαρακτηριστικά και των υπόλοιπων μονάδων παραγωγής.

2.2.2. Ντιζελογεννήτριες

Μία ντιζελογεννήτρια προκύπτει από το συνδυασμό μιας εμβολοφόρου Μηχανής Εσωτερικής Καύσης (Μ.Ε.Κ.) με μία επαγωγική γεννήτρια. Οι εμβολοφόρες Μ.Ε.Κ. χαρακτηρίζονται από ιδιαίτερα διαδεδομένη χρήση και από μακροχρόνια εμπειρία από την ανάπτυξή τους σε μεγέθη από μερικά kW έως δεκάδες MW. Το γεγονός αυτό σαφέστατα κατατάσσει τις ντιζελογεννήτριες στις μηχανές με κεκτημένη γνώση, αναφορικά με την κατασκευαστική τεχνολογία και τις δυνατότητες βελτιστοποίησής της. Ως αποτέλεσμα, η προμήθεια και η εγκατάσταση μιας ντιζελογεννήτριας είναι σε γενικές γραμμές οικονομική και γρήγορη. Επίσης η προηγμένη τεχνολογία και, κυρίως, η ιδιότητα των εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ. να αξιοποιούν εργαζόμενο μέσο (καυσαέρια) σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις, επιτρέπει τη λειτουργία τους με υψηλό βαθμό απόδοσης και, κατά συνέπεια, με χαμηλό κόστος παραγωγής.

Στις εμβολοφόρες Μ.Ε.Κ. το εργαζόμενο μέσο, το οποίο μπορεί να είναι αέρας ή μίγμα αέρα – καυσίμου, αναρροφάται στο θάλαμο καύσης και συμπιέζεται μέχρι μια μέγιστη πίεση. Με τη συμπίεση του μέσου αυξάνεται ταυτόχρονα και η θερμοκρασία του. Στη χρονική στιγμή της μέγιστης συμπίεσης εκτελείται η ανάφλεξη του μίγματος αέρα καυσίμου, το οποίο είτε έχει αναρροφηθεί εντός του θαλάμου καύσης είτε έχει προκύψει με ψεκασμό του καυσίμου στο συμπιεσμένο αέρα. Με την ανάφλεξη του καυσίμου προσδίδεται στο συμπιεσμένο εργαζόμενο μέσο επιπλέον η χημική ενέργεια του καυσίμου με τη μορφή θερμότητας,

αυξάνοντας ακόμα περισσότερο τη θερμοκρασία και την πίεσή του. Το εργαζόμενο μέσο υψηλής ενθαλπίας εκτονώνεται, ωθώντας το έμβολο της Μ.Ε.Κ. και προσδίδοντας σε αυτό την παραγόμενη μηχανική ισχύ, ένα μέρος της οποίας ιδιοκαταναλώνεται για τις ανάγκες της συμπίεσης που προηγήθηκε, ενώ το υπόλοιπο και μεγαλύτερο μέρος αποτελεί το ωφέλιμο μηχανικό έργο. Από την ανωτέρω περιγραφή προκύπτει ότι σε μία εμβολοφόρο Μ.Ε.Κ. όλοι οι διαδοχικοί χρόνοι παραγωγής μηχανικής ισχύος, δηλαδή η αναρρόφηση, η συμπίεση, η εκτόνωση και η εξαγωγή των καυσαερίων υλοποιούνται εντός του ίδιου χώρου, ο οποίος είναι ο θάλαμος καύσης. Ο θάλαμος καύσης ταυτίζεται με το χώρο παραγωγής μηχανικής ισχύος, ιδιότητα του κατατάσσει τις εμβολοφόρες Μ.Ε.Κ. στην τεχνολογία εσωτερικής καύσης.

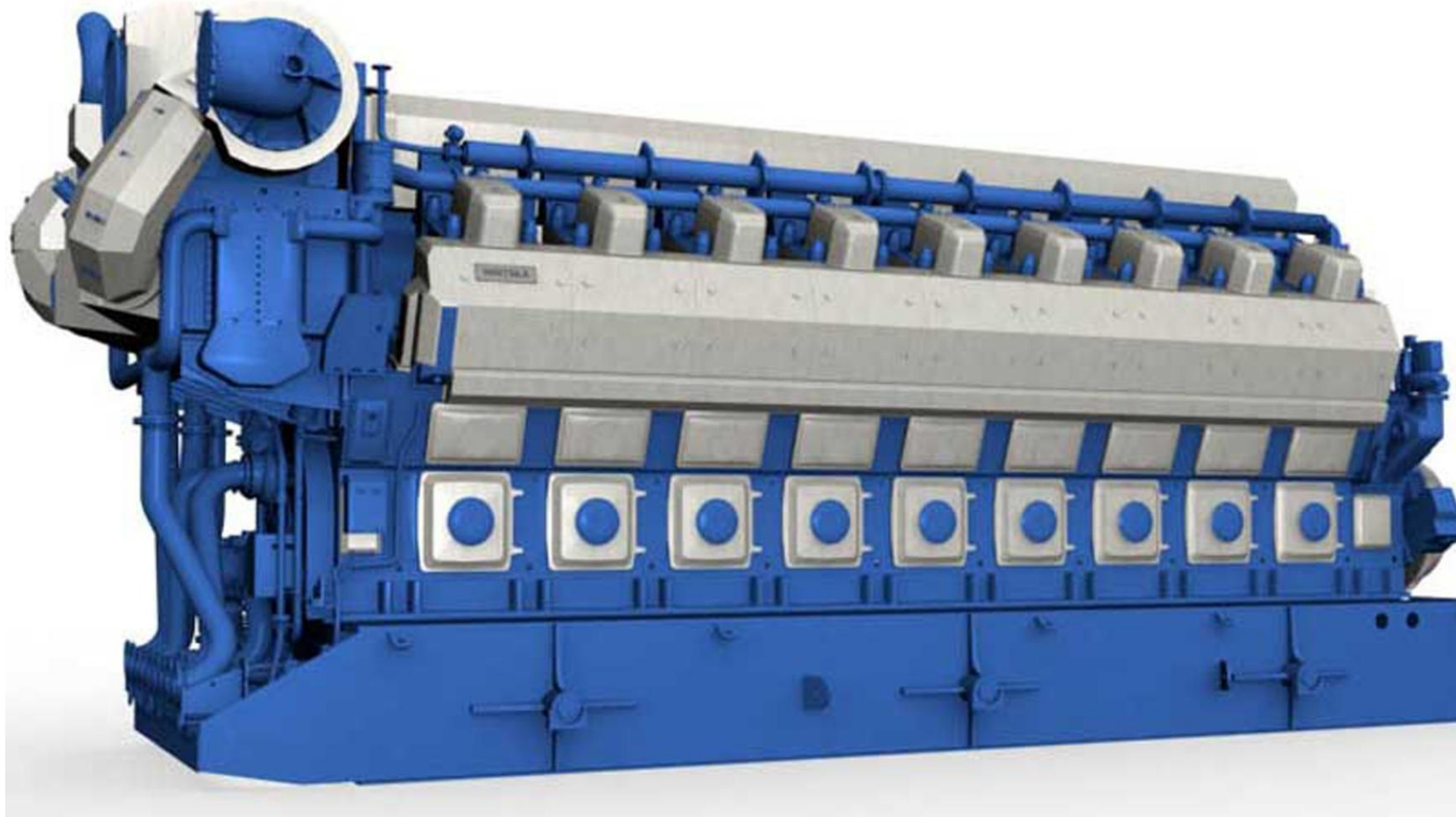
Στα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται συνήθως δίχρονες ντιζελογεννήτριες για μεγαλύτερη παραγωγή ισχύος για δεδομένο κυβισμό. Τα μεγέθη που δύνανται να εγκατασταθούν ποικίλλουν από μερικά kW, σε περιπτώσεις ηλεκτροπαραγωγών ζευγών, που χρησιμοποιούνται σε νοσοκομεία, εμπορικά κέντρα κλπ, ως μονάδες εφεδρείας, έως μερικές δεκάδες MW σε περιπτώσεις μεγάλων θερμοηλεκτρικών συστημάτων.

Στο σχήμα 2.9 παρουσιάζεται σκαρίφημα εμβολοφόρου Μ.Ε.Κ. φυσικού αερίου για παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος [4].

Τα στοιχεία που χαρακτηρίζουν και διαμορφώνουν τη χρήση των ντιζελογεννητριών σε ένα Σ.Η.Ε. είναι τα ακόλουθα:

- Παρουσιάζουν τον υψηλότερο βαθμό απόδοσης από όλες τις βασικές θερμοηλεκτρικές γεννήτριες. Ο βαθμός αυτός διαμορφώνεται σε τιμές άνω του 40% σε περιπτώσεις λειτουργίας κοντά στο ονομαστικό φορτίο.
- Έχουν τη δυνατότητα να καταναλώσουν όλα τα υγρά και αέρια καύσιμα (πετρέλαιο κίνησης, φυσικό αέριο) και με ειδική προθέρμανση δύνανται να καταναλώσουν και μαζούτ.
- Η δυνατότητα κατανάλωσης μαζούτ σε συνδυασμό με την υψηλή απόδοση συνεπάγονται τη διαμόρφωση χαμηλού ειδικού κόστους παραγωγής, που κυμαίνεται κάτω από 0,10€/kWh. Το κόστος αυτό υπερδιπλασιάζεται σε περιπτώσεις μικρών μονάδων με κατανάλωση ελαφρού καυσίμου (πετρέλαιο κίνησης).
- Σε μικρά μεγέθη έχουν μεγάλη ευελιξία αναφορικά με την ικανότητά τους να παρακολουθήσουν τις μεταβολές του φορτίου. Η ικανότητα αυτή περιορίζεται σχετικά, όσο το μέγεθος της ντιζελογεννήτριας αυξάνει.
- Έχουν άμεση και ταχεία διαδικασία εκκίνησης, της οποίας η διάρκεια ελαχιστοποιείται για ντιζελογεννήτριες μικρού μεγέθους.
- Λόγω της παλινδρομικής κίνησης των τμημάτων τους παρουσιάζουν περισσότερες φθορές και χρήζουν συχνότερης συντήρησης, εμφανίζοντας έτσι σχετικά υψηλότερο κόστος συντήρησης σε σχέση με τις υπόλοιπες θερμικές μονάδες.

Τα ανωτέρω χαρακτηριστικά διαμορφώνουν το ρόλο των ντιζελογεννητριών σε ένα Σ.Η.Ε. κατά τρόπο που θα παρουσιαστεί σε επόμενη ενότητα.

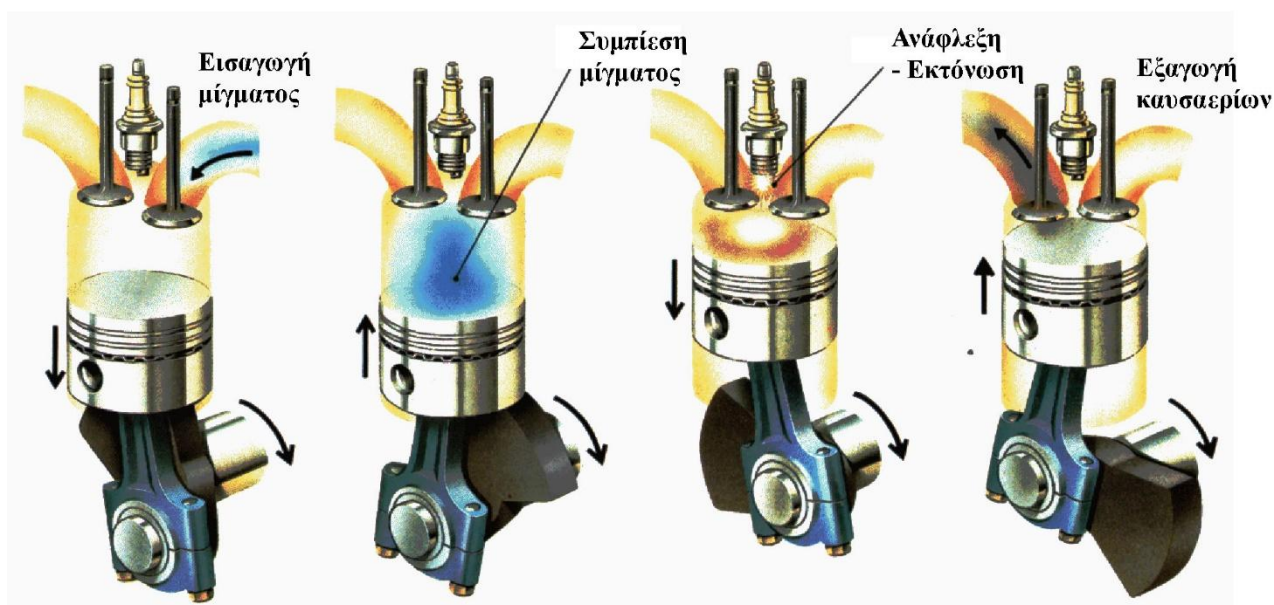
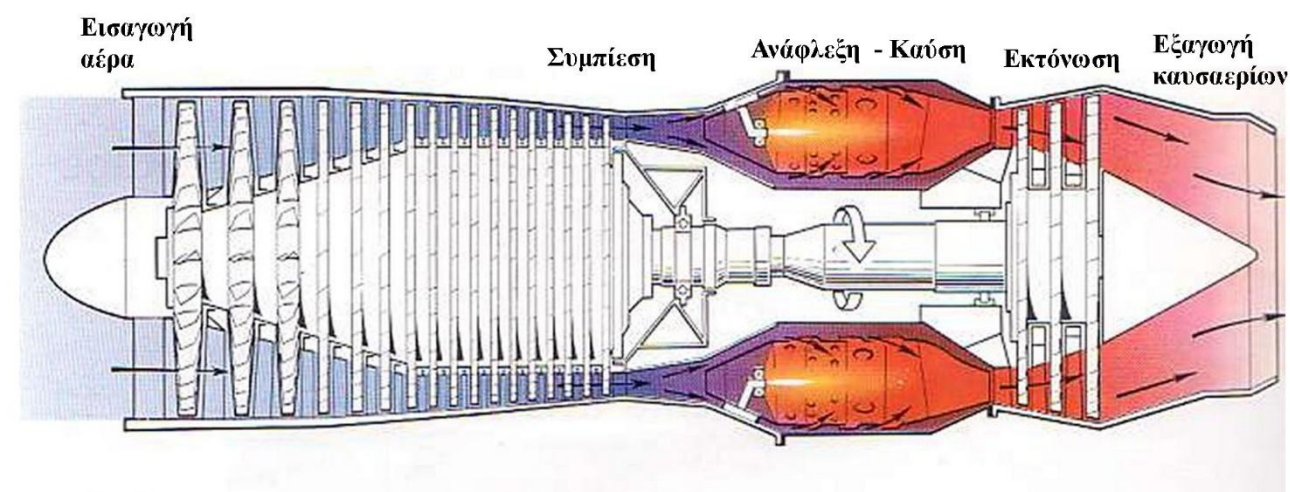


Σχήμα 2.9: Ντιζελογεννήτρια φυσικού αερίου κατασκευής Wartsila ισχύος 18MW [4].

2.2.3. Αεριοστρόβιλοι

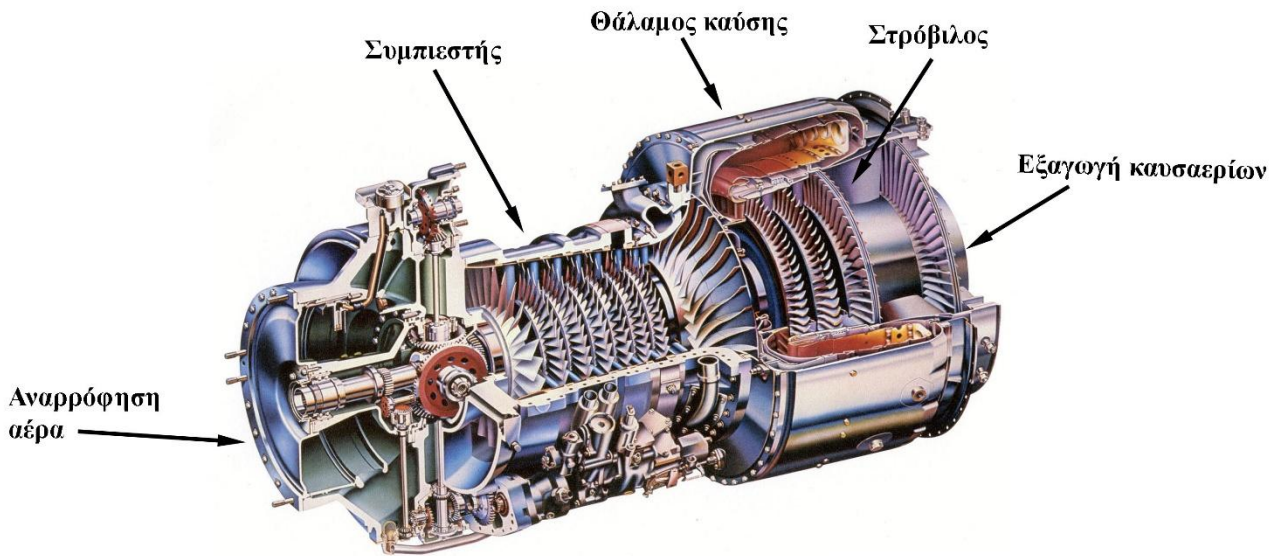
Οι αεριοστρόβιλοι κατατάσσονται, επίσης, στις Μ.Ε.Κ. Σε αντίθεση με τις εμβολοφόρες Μ.Ε.Κ., στους αεριοστρόβιλους οι απαιτούμενες φάσεις για την παραγωγή του τελικού μηχανικού έργου λαμβάνουν χώρα σε τρεις διακριτές συνιστώσες της μηχανής, το συμπιεστή, το θάλαμο καύσης και το στρόβιλο. Στο σχήμα 2.10 παρουσιάζεται διάγραμμα αντιστοίχισης της λειτουργίας μια τετράχρονης εμβολοφόρου Μ.Ε.Κ. με ένα αεριοστρόβιλο.

Ο αεριοστρόβιλος αποτελείται από έναν κύριο άξονα, που στη μία άκρη έχει μία ή, συνήθως, δύο βαθμίδες συμπιεστή και στην άλλη άκρη έχει μία ή, συνήθως, δύο βαθμίδες στρόβιλων. Με την περιστροφή του άξονα αναρροφάται αέρας από το περιβάλλον, ο οποίος συμπιέζεται και οδηγείται στο θάλαμο καύσης, όπου εκτελείται ψεκασμός καυσίμου. Το μίγμα αέρα – καυσίμου υψηλής πίεσης αναφλέγεται. Τα παραγόμενα καυσαέρια υψηλής ενθαλπίας (πίεσης και θερμοκρασίας) οδηγούνται στη συνέχεια καταρχήν στην υψηλή βαθμίδα στρόβιλου και, στη συνέχεια, στη χαμηλή βαθμίδα, όπου εκτονώνονται, αποδίδοντας μηχανική ισχύ. Ένα μέρος από την παραγόμενη μηχανική ισχύ χρησιμοποιείται για την περιστροφή του άξονα του στρόβιλου και την τροφοδοσία της απαιτούμενης μηχανικής ισχύος στο συμπιεστή. Το υπόλοιπο και μεγαλύτερο μέρος της μηχανικής ισχύος αποτελεί το ωφέλιμο μηχανικό έργο.



Σχήμα 2.10: Σχηματική αντιστοίχιση χρόνων λειτουργίας αεριοστρόβιλου (άνω) και εμβολοφόρου Μ.Ε.Κ. (κάτω) [5, 6].

Μία αναλυτικότερη σχηματική παρουσίαση των βασικών τμημάτων ενός αεριοστροβίλου παρέχεται στο σχήμα 2.11.



Σχήμα 2.11: Σχηματική παρουσίαση των βασικών τμημάτων ενός αεριοστροβίλου [7].

Τα βασικά χαρακτηριστικά των αεριοστροβίλων, τα οποία καθορίζουν το ρόλο τους σε ένα Σ.Η.Ε., είναι τα ακόλουθα:

- Παρουσιάζουν χαμηλό βαθμό απόδοσης, ο οποίος, κατά μέγιστο, μπορεί να φτάσει στο 35%, ενώ συνήθως διαμορφώνεται κάτω του 30%. Η απόδοση των αεριοστροβίλων μειώνεται ακόμα περισσότερο τους θερινούς μήνες, όταν η θερμοκρασία του περιβάλλοντος αέρα είναι υψηλή. Υπενθυμίζεται ότι βάσει του κύκλου Carnot, η μέγιστη απόδοση η_c ενός θερμοδυναμικού κύκλου ισούται με:

$$\eta_c = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (2.7)$$

όπου T_1 και T_2 είναι οι θερμοκρασίες του εργαζόμενου μέσου αμέσως μετά τη συμπίεση και κατά την εξαγωγή του στο περιβάλλον αντίστοιχα, η οποία δεν μπορεί να είναι μικρότερη από αυτή του περιβάλλοντος.

- Καταναλώνουν, συνήθως, ελαφρύ καύσιμο (π.χ. πετρέλαιο κίνησης), το οποίο παρουσιάζει υψηλή τιμή. Δύναται, βεβαίως, να λειτουργήσουν και με φυσικό αέριο, με χαμηλότερη τιμή προμήθειας.
- Η χαμηλή απόδοση των αεριοστροβίλων, σε συνδυασμό με την κατανάλωση ελαφρού καυσίμου, όποτε συμβαίνει κάτι τέτοιο, συνεπάγεται τη διαμόρφωση υψηλού ειδικού κόστους παραγωγής, το οποίο ξεπερνάει τα 0,30€/kWh. Στην περίπτωση κατανάλωσης φυσικού αερίου το ειδικό κόστος παραγωγής μειώνεται στα 0,20€/kWh. Οι τιμές αυτές προκύπτουν από τις προσομοιώσεις των αντίστοιχων Σ.Η.Ε. ή παρέχονται στα ετήσια απολογιστικά τεχνικά δελτία των διαχειριστών των Σ.Η.Ε.
- Είναι ταχείς μηχανές, έχουν γρήγορη διαδικασία εκκίνησης, της τάξης των μερικών λεπτών και παρουσιάζουν άριστη ευελιξία και ικανότητα στην παρακολούθηση των μεταβολών του φορτίου.
- Είναι οικονομικές στην προμήθεια και εύκολες στην εγκατάσταση.

Τα ανωτέρω χαρακτηριστικά των αεριοστρόβιλων διαμορφώνουν τον τρόπο με τον οποίο εντάσσονται σε ένα Σ.Η.Ε., ο οποίος θα παρουσιαστεί σε επόμενη ενότητα μαζί με τις υπόλοιπες θερμικές μονάδες.

2.2.4. Συνδυασμένοι κύκλοι

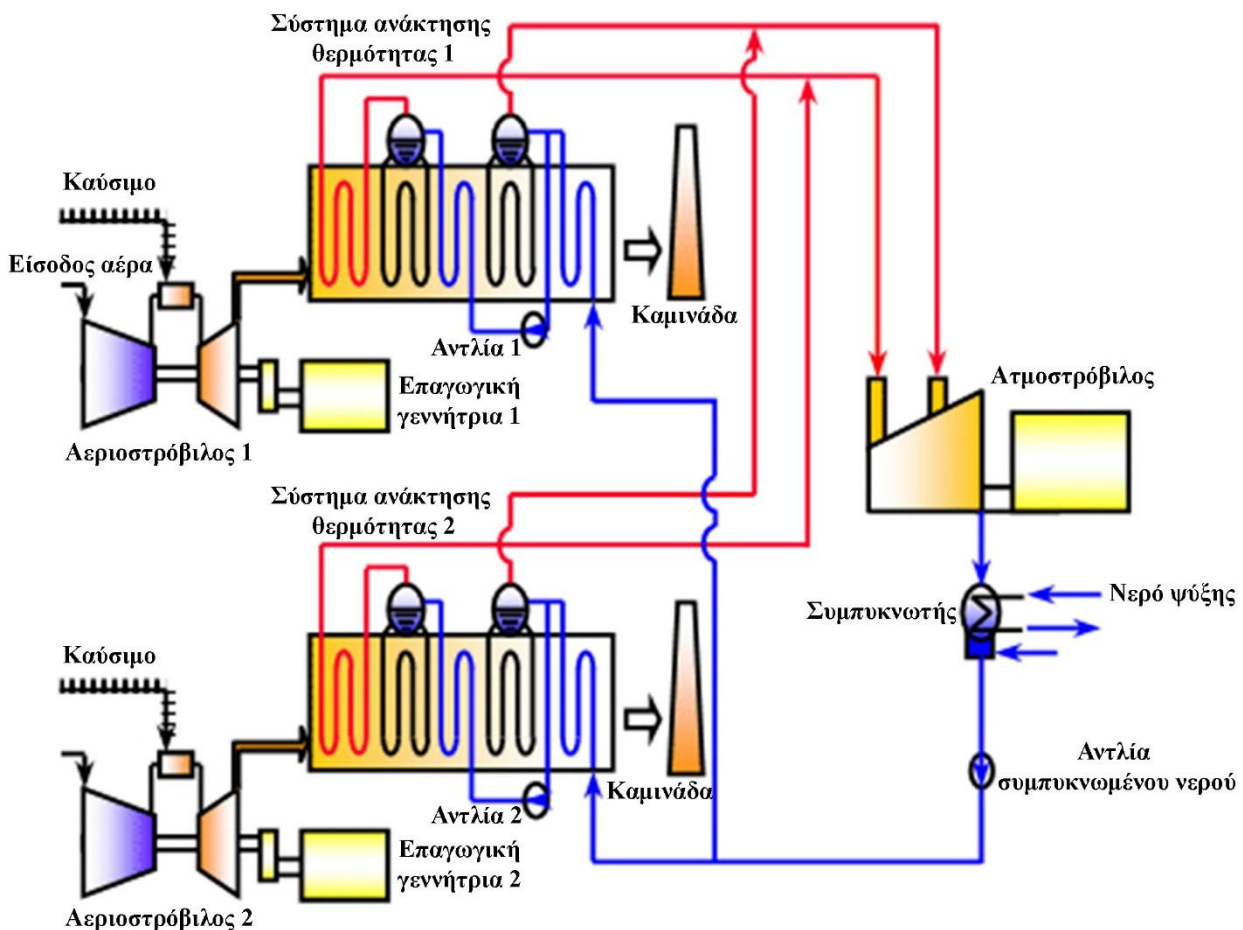
Πέρα από τους ανωτέρω τρεις βασικούς τύπους θερμοηλεκτρικών μονάδων, είναι δυνατή η συνδυασμένη λειτουργία κάποιων από αυτών, με απώτερο στόχο την αύξηση της συνολικής απόδοσης του συνολικού συστήματος. Οι υλοποιήσεις που προκύπτουν από τη συνδυασμένη λειτουργία των βασικών θερμοηλεκτρικών μονάδων ονομάζονται συνδυασμένοι κύκλοι.

Ένας συνδυασμένος κύκλος διακρίνεται σε δύο μέρη:

- τις βασικές μονάδες παραγωγής ή μονάδες βάσης του συνδυασμένου κύκλου, οι οποίες είναι, συνήθως, αεριοστρόβιλοι, ενώ μπορεί να είναι και ντιζελογεννήτριες
- την τελική μονάδα, η οποία είναι πάντα ατμοστρόβιλος.

Σε ένα συνδυασμένο κύκλο συνήθως έχουμε δύο μονάδες βάσης, χωρίς να αποκλείεται να υπάρχει και μία μονάδα βάσης. Η τελική μονάδα, δηλαδή ο ατμοστρόβιλος, είναι πάντα μία.

Η γενική δομή ενός συνδυασμένου κύκλου και ο τρόπος λειτουργίας του παρουσιάζονται στο σχήμα 2.12.



Σχήμα 2.12: Γενική δομή και λειτουργία συνδυασμένου κύκλου δύο αεριοστρόβιλων και ατμοστρόβιλου.

Με βάση το σχήμα 2.12, τα θερμά καυσαέρια από τους δύο αεριοστρόβιλους που αποτελούν τη μονάδα βάσης του συνδυασμένου κύκλου, πριν απορριφθούν στην ατμόσφαιρα, διέρχονται από δύο συστήματα ανάκτησης θερμότητας, στα οποία οδηγείται συμπυκνωμένο νερό. Στα συστήματα ανάκτησης

θερμότητας, η θερμότητα των καυσαερίων αξιοποιείται, θερμαίνοντας το νερό, το οποίο ατμοποιείται. Τα καυσαέρια χαμηλής πλέον ενθαλπίας απορρίπτονται στην ατμόσφαιρα, ενώ ο παραγόμενος ατμός οδηγείται σε ατμοστρόβιλο για την παραγωγή πρόσθετης ηλεκτρικής ισχύος, η οποία αθροίζεται στην παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος, που γίνεται ανεξάρτητα από τους δύο αεριοστρόβιλους.

Είναι προφανές ότι η επιπρόσθετη παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος από τον ατμοστρόβιλο επιτυγχάνεται χωρίς την κατανάλωση επιπλέον ποσότητας καυσίμου. Αν \dot{m}_{f1} και \dot{m}_{f2} είναι οι παροχές μάζας καυσίμου στους αεριοστρόβιλους 1 και 2 αντίστοιχα, H_u η θερμογόνο ικανότητα του καυσίμου και P_{GT1} , P_{GT2} , P_{ST} η παραγωγή τελικής ηλεκτρικής ισχύος από τους δύο αεριοστρόβιλους και τον ατμοστρόβιλο αντίστοιχα, τότε:

- ο συνολικός βαθμός απόδοσης των δύο αεριοστρόβιλων στην περίπτωση που λειτουργούσαν μόνοι τους, χωρίς δηλαδή τη συνδυασμένη λειτουργία με τον ατμοστρόβιλο θα ήταν:

$$\eta_{GT} = \frac{P_{GT1} + P_{GT2}}{(\dot{m}_{f1} + \dot{m}_{f2}) \cdot H_u} \quad (2.8)$$

- ο συνολικός βαθμός απόδοσης του συνδυασμένου κύκλου προκύπτει ως:

$$\eta_{GT} = \frac{P_{GT1} + P_{GT2} + P_{ST}}{(\dot{m}_{f1} + \dot{m}_{f2}) \cdot H_u} \quad (2.9)$$

Η αύξηση του βαθμού απόδοσης με το συνδυασμένο κύκλο αποτυπώνεται αναλυτικά στις ανωτέρω σχέσεις.

Τα χαρακτηριστικά που διαμορφώνουν και καθορίζουν το ρόλο ενός συνδυασμένου κύκλου σε ένα Σ.Η.Ε. είναι τα ακόλουθα:

- Παρουσιάζει υψηλούς βαθμούς απόδοσης, οι οποίοι είναι της τάξης του 50 – 55%.
- Σαφώς παρουσιάζει χαμηλότερο ειδικό κόστος παραγωγής από τους αεριοστρόβιλους. Το ειδικό κόστος παραγωγής του συνδυασμένου κύκλου, στην περίπτωση που χρησιμοποιείται ελαφρύ καύσιμο (π.χ. πετρέλαιο κίνησης) είναι της τάξης των 0,20€/kWh, ενώ, αν χρησιμοποιείται φυσικό αέριο, είναι χαμηλότερο του 0,10€/kWh. Οι τιμές αυτές προκύπτουν από τις προσομοιώσεις των αντίστοιχων Σ.Η.Ε. ή παρέχονται στα ετήσια απολογιστικά τεχνικά δελτία των διαχειριστών των Σ.Η.Ε.
- Ως σύνολο ο συνδυασμένος κύκλος, δεδομένης της παρουσίας του ατμοστρόβιλου, είναι μονάδα με αργή διαδικασία εκκίνησης. Ωστόσο, μέσω της επιμέρους παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος από τους αεριοστρόβιλους επιτυγχάνεται η υψηλή απόκριση στις μεταβολές του φορτίου.

Ο τρόπος με τον οποίο οι συνδυασμένοι κύκλοι εντάσσονται σε ένα Σ.Η.Ε. θα αναλυθεί σε επόμενη ενότητα.

2.2.4. Τεχνικό ελάχιστο, ονομαστική ισχύς και απόδοση θερμοηλεκτρικής μονάδας

Κάθε θερμοηλεκτρική μονάδα χαρακτηρίζεται από δύο τιμές παραγωγής ισχύος, μία ελάχιστη και μία μέγιστη. Οι δύο αυτές τιμές καθορίζουν το πεδίο λειτουργίας της μονάδας, αναφορικά με την τελική εξερχόμενη ισχύ.

Η ελάχιστη παραγωγή ισχύος από τη θερμοηλεκτρική μονάδα ονομάζεται *τεχνικό ελάχιστο* και αποτελεί το κάτω όριο παραγωγής ισχύος από τη μονάδα. Δηλαδή κάτω από αυτή την τιμή η μονάδα δεν μπορεί να λειτουργήσει. Αν για κάποιο λόγο η μονάδα πρέπει να είναι σε λειτουργία, το τεχνικό ελάχιστο είναι η ελάχιστη δυνατή ισχύ που μπορεί να παράγει.

Η μέγιστη ισχύς είναι το ανώτατο όριο λειτουργίας της μονάδας, αναφορικά με την εξερχόμενη τελική ισχύ. Η μονάδα δεν έχει τη δυνατότητα να παράγει ισχύ πάνω από τη μέγιστη. Συνήθως η μέγιστη ισχύς μιας θερμοηλεκτρικής μονάδας συμπίπτει με την ονομαστική. Δεν είναι, ωστόσο, σπάνιες οι

περιπτώσεις στις οποίες θερμοηλεκτρικές μονάδες δύνανται να παράγουν σε τιμές μεγαλύτερες της ονομαστικής, συνήθως κατά ένα ποσοστό της τάξης του 110%.

Κάθε θερμοηλεκτρική μονάδα χαρακτηρίζεται από μία συνολική στιγμιαία απόδοση, η οποία ορίζεται με βάση τη συνολική εξερχόμενη τελική ηλεκτρική ισχύ ως προς το ρυθμό κατανάλωσης καυσίμου, ή διαφορετικά, ως προς τη συνολική κατανάλωση χημικής ισχύος, σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$\eta_{el} = \frac{P_{el}}{\dot{m}_f \cdot H_u} = \frac{P_{el}}{P_{ch}} \quad (2.10)$$

όπου:

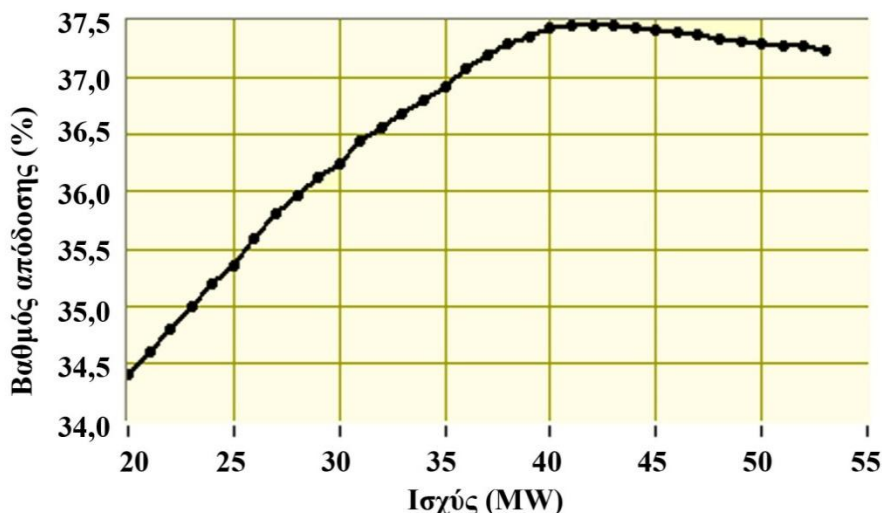
- P_{el} : η εξερχόμενη τελική ηλεκτρική ισχύς
- \dot{m}_f : η παροχή μάζας καυσίμου
- P_{ch} : η αντίστοιχη εισροή χημικής ισχύος στη μονάδα
- H_u : η θερμογόνο ικανότητα του καυσίμου
- η_{el} : ο συνολικός βαθμός απόδοσης της μονάδας.

Ο συνολικός βαθμός απόδοσης μιας θερμοηλεκτρικής μονάδας δεν παραμένει σταθερός σε όλο το εύρος λειτουργίας της μονάδας. Για λειτουργία της μονάδας κοντά στο τεχνικό ελάχιστό της, ο βαθμός απόδοσης ελαχιστοποιείται, ενώ, όσο η παραγωγή της μονάδας προσεγγίζει την ονομαστική ισχύ, ο βαθμός απόδοσης αυξάνει και μεγιστοποιείται είτε στην ονομαστική ισχύ, για την περίπτωση στροβιλομηχανών (ατμοστροβίλων και αεριοστροβίλων), είτε λίγο πριν από αυτή, για την περίπτωση εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ.

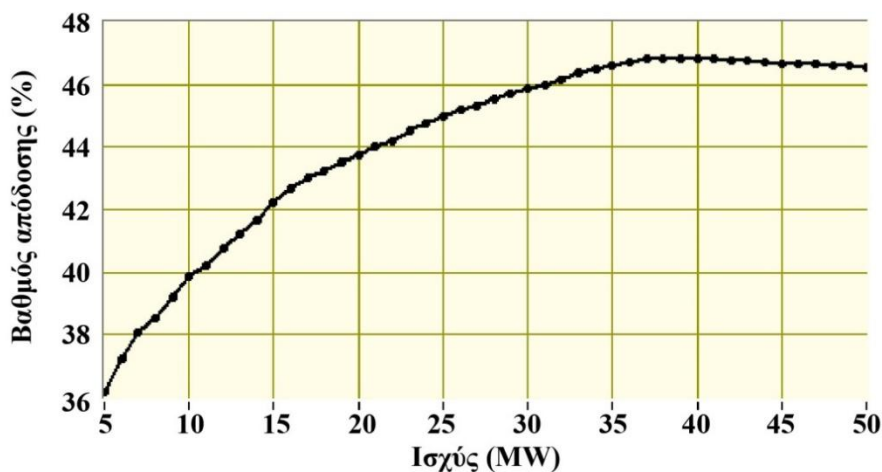
Η διακύμανση του βαθμού απόδοσης συναρτήσκει του σημείου λειτουργίας της θερμοηλεκτρικής μονάδας αποτελεί χαρακτηριστική καμπύλη της μονάδας και δίνεται από τους κατασκευαστές. Συνήθως ο βαθμός απόδοσης μιας θερμοηλεκτρικής μονάδας δίνεται από τους κατασκευαστές με τη μορφή της κατανάλωσης καυσίμου ανά παραγόμενη τελική μονάδα ηλεκτρικής ενέργειας, π.χ. σε gr καυσίμου (m_f) ανά παραγόμενη kWh ηλεκτρικής ενέργειας (E_{el}). Στην περίπτωση αυτή ο στιγμιαίος συνολικός βαθμός απόδοσης της μονάδας υπολογίζεται ως εξής, με τις ποσότητες ενέργειας να αναφέρονται σε στιγμιαίο χρονικό διάστημα dt :

$$\eta_{el} = \frac{E_{el}}{m_f \cdot H_u} = \frac{E_{el}}{E_{ch}} \quad (2.11)$$

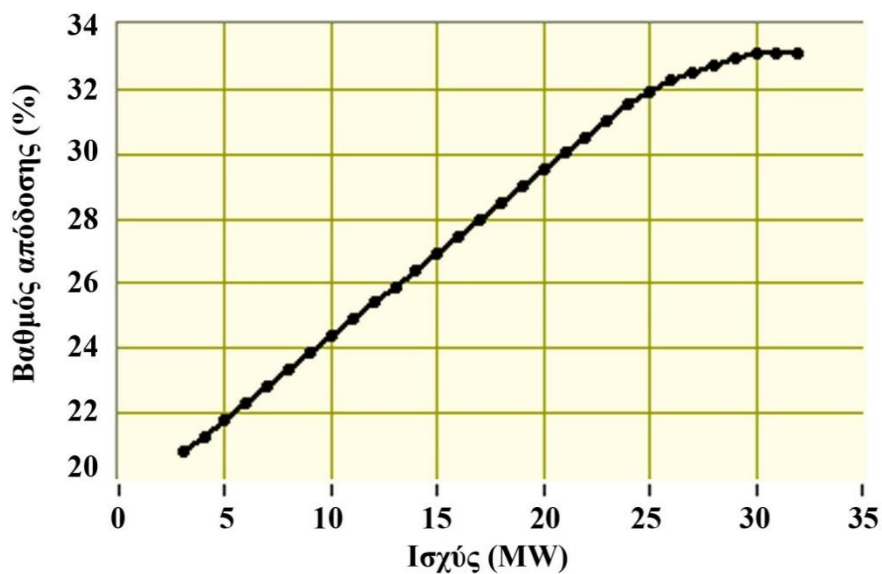
Στα σχήματα 2.13 – 2.16 παρουσιάζονται διαγράμματα διακύμανσης του βαθμού απόδοσης ατμοστροβίλου, ντιζελογεννήτριας, αεριοστροβίλου και συνδυασμένου κύκλου συναρτήσκει της εξερχόμενης ηλεκτρικής ισχύος. Τα διαγράμματα 2.13 – 2.15 αυτά αφορούν σε κάποιες από τις θερμοηλεκτρικές μονάδες των σταθμών παραγωγής του Σ.Η.Ε. Κρήτης. Το διάγραμμα του σχήματος 2.16 έχει προκύψει από μελέτη σκοπιμότητας εισαγωγής φυσικού αερίου στο αυτόνομο Σ.Η.Ε. Κρήτης [8].



Σχήμα 2.13: Χαρακτηριστική καμπύλη βαθμού απόδοσης ατμοστροβίλου ονομαστικής ισχύος 52MW με τεχνικό ελάχιστο 20MW.



Σχήμα 2.14: Χαρακτηριστική καμπύλη βαθμού απόδοσης ντιζελογεννήτριας ονομαστικής ισχύος 50MW με τεχνικό ελάχιστο 5MW.

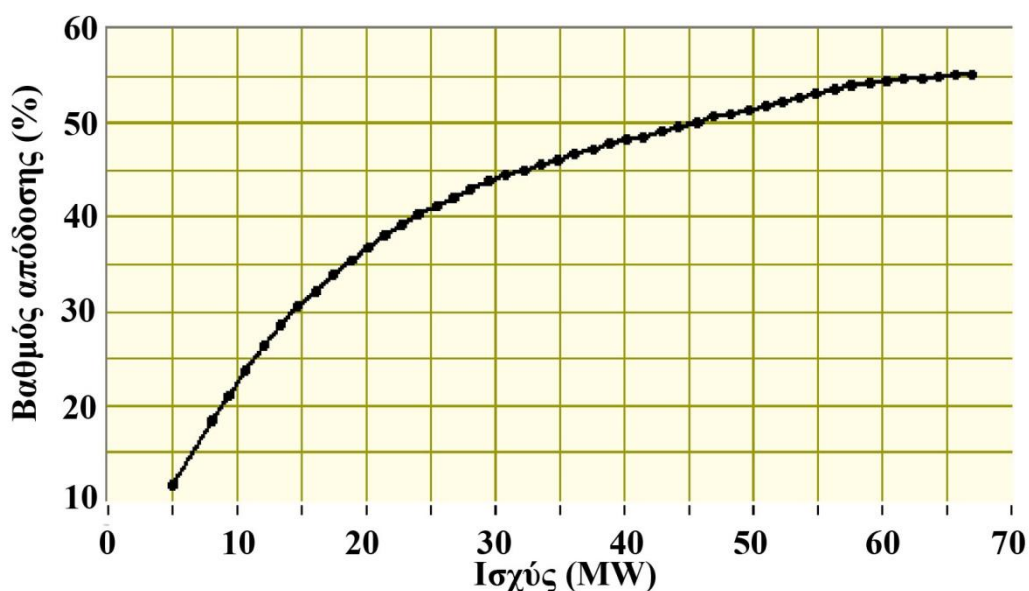


Σχήμα 2.15: Χαρακτηριστική καμπύλη βαθμού απόδοσης αεριοστροβίλου ονομαστικής ισχύος

32MW με τεχνικό ελάχιστο 3MW.

Από τις καμπύλες βαθμού απόδοσης – σημείου λειτουργίας είναι ξεκάθαρη η αύξηση του βαθμού απόδοσης της θερμοηλεκτρικής μονάδας όσο η ισχύς λειτουργίας της προσεγγίζει την ονομαστική ισχύ της. Είναι λοιπόν αυτονόητο, με δεδομένο το ότι ένας βασικός στόχος της βελτιστοποίησης της λειτουργίας ενός Σ.Η.Ε. είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού ειδικού κόστους παραγωγής, πως θα πρέπει να αποφεύγεται να λειτουργούν οι θερμοηλεκτρικές μονάδες κοντά στα τεχνικά ελάχιστα τους, και να επιδιώκεται η λειτουργία του κατά το δυνατό πλησιέστερα στην ονομαστική ισχύ.

Μία ακόμα πολύ σημαντική παράμετρος για την ευελιξία λειτουργίας των Σ.Η.Ε. είναι τα τεχνικά ελάχιστα των θερμικών μονάδων. Είναι επιθυμητό μία θερμοηλεκτρική μονάδα να έχει, όσο το δυνατόν, χαμηλότερο τεχνικό ελάχιστο. Τούτο επιτρέπει τη μείωση της ισχύος παραγωγής από τη μονάδα σε χαμηλές τιμές, εφόσον τούτο απαιτηθεί για λόγους μείωσης της ζήτησης ισχύος ή αύξησης της διείσδυσης Α.Π.Ε. Τα υψηλά τεχνικά ελάχιστα περιορίζουν την ευελιξία της μονάδας, ιδιαίτερα όταν τούτη χαρακτηρίζεται από αργή εκκίνηση (ατμοστρόβιλοι ή συνδυασμένοι κύκλοι), και, συνεπώς, δεν είναι εφικτή η σβέση και η έναυση της μονάδας σε μικρά χρονικά διαστήματα. Σε αυτές τις περιπτώσεις ο διαχειριστής υποχρεώνεται να διατηρήσει τις μονάδες αυτές σε λειτουργία υψηλών τεχνικών ελαχίστων, περιορίζοντας πιθανή διείσδυση μονάδων Α.Π.Ε. ή την παραγωγή από άλλες θερμοηλεκτρικές μονάδες ενδεχομένως με χαμηλότερο ειδικό κόστος παραγωγής.



Σχήμα 2.16: Χαρακτηριστική καμπύλη βαθμού απόδοσης συνδυασμένου κύκλου φυσικού αερίου ονομαστικής ισχύος 64MW, αποτελούμενου από δύο αεριοστρόβιλους ισχύος 25MW έκαστος και από ατμοστρόβιλο ισχύος 14MW.

2.2.5. Υδροστρόβιλοι

Οι υδροστρόβιλοι είναι από τις πρώτες κινητήριες μηχανές που χρησιμοποιήθηκαν για τη δέσμευση μηχανικής ισχύος. Λίγο πριν την αυγή των χριστιανικών χρόνων γίνονται οι πρώτες αναφορές στη χρήση υδραυλικής ενέργειας για τη λειτουργία μύλων. Όμως μόνο σε ένα έργο, στο «Περί Αρχιτεκτονικής του Βιτρούβιου», γύρω στο 25 π.Χ., υπάρχουν αρκετές λεπτομέρειες που να αποκαλύπτουν το σχέδιο της μηχανής. Αποτελείται, αναφέρει ο Βιτρούβιος, από έναν κάθετο άξονα που γυρίζει από ένα ρεύμα νερού που τρέχει από κάτω και προσκρούει συνεχώς σε μια σειρά από αξονικά φτερά. Η περιγραφή του Βιτρούβιου είναι καθαρή, χωρίς ασάφειες, και ικανή να περιγράψει την ίδια μηχανή που, 2.000 χρόνια μετά, χρησιμοποιείται για τον ίδιο σκοπό.

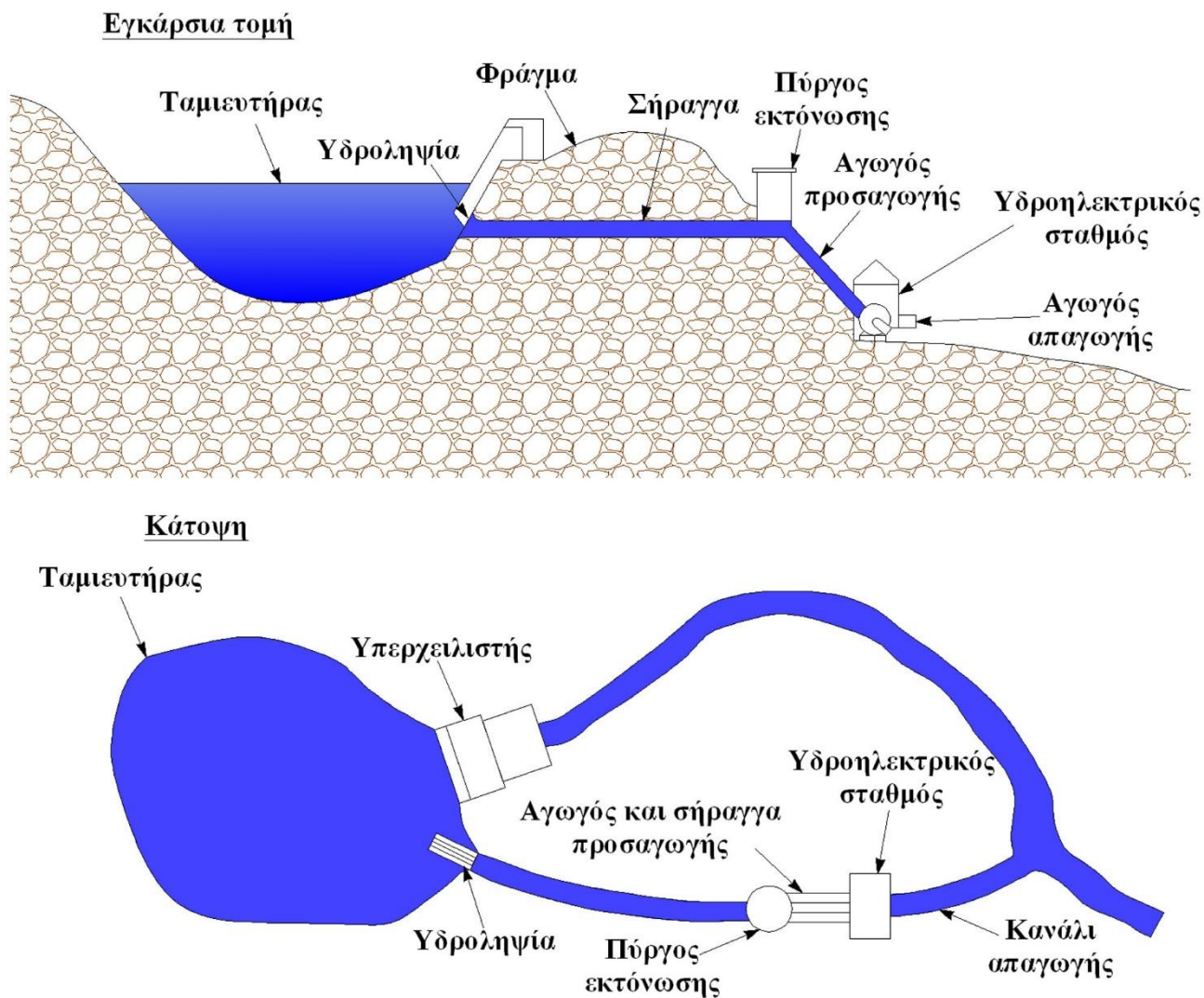
Η αλήθεια είναι ότι, σύμφωνα με τα στοιχεία που υπάρχουν, η υδραυλική ενέργεια δε χρησιμοποιήθηκε για τρεις ολόκληρους αιώνες. Οι πρώτες πηγές, αρχαιολογικές, λογοτεχνικές, σχεδιαστικές, ξεκινάνε από τον τέταρτο αιώνα να δείχνουν τη χρησιμοποίησή της στη Ρώμη, στην Αθήνα, στη Γαλλία, στη Συρία και στη Βρετανία. Από το δέκατο έκτο αιώνα η μηχανή που περιγράφει ο Βιτρούβιος, στην οποία το νερό χτυπά τον τροχό στο κάτω μέρος, έχει αρχίσει να αντικαθίσταται από μία παρόμοια, στην οποία όμως το νερό οδηγείται στην περρωτή από το επάνω μέρος. Η τελευταία έχει δύο φορές καλύτερο βαθμό απόδοσης, όπως είχε αποδειχτεί ήδη από το δέκατο όγδοο αιώνα.

Μόλις το δέκατο ένατο αιώνα η ατμομηχανή θα αρχίσει να παράγει περισσότερη ισχύ για τις ανάγκες της Βρετανίας, η οποία διανύει τη βιομηχανική επανάσταση. Από τότε η υδραυλική ενέργεια θα σταματήσει να είναι η κύρια συνιστώσα για την παραγωγή ενέργειας. Οι διάφοροι παραδοσιακοί τύποι υδρόμυλου που χρησιμοποιούντο μέχρι τον 19^ο αιώνα δεν ήταν σε θέση να αξιοποιήσουν ένα υδραυλικό ύψος πολύ μεγαλύτερο από τη διάμετρο του τροχού. Η καινούργια ανακάλυψη του υδροστροβίλου θα επιτρέψει την εκμετάλλευση μεγαλύτερου ύψους και την παραγωγή ηλεκτρισμού μέσω σύνδεσης με γεννήτρια.

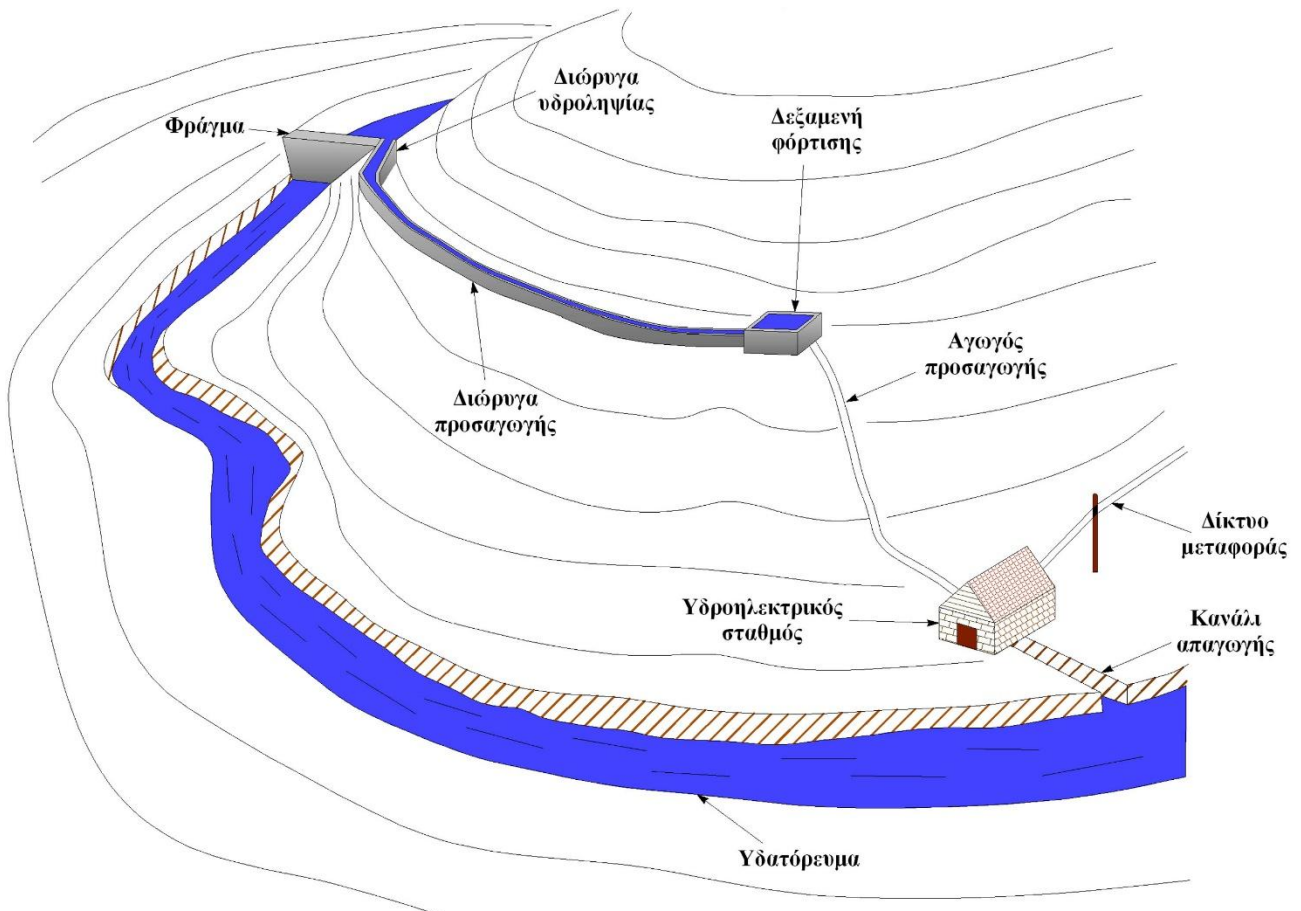
Το πρώτο υδροηλεκτρικό εργοστάσιο (ΥΗΕ) χτίστηκε το 1895 στους καταρράκτες του Νιαγάρα στις Η.Π.Α., και είχε δύο υδροστροβίλους, κάθε ένας ισχύος 4,1MW.

Οι υδροστροβίλοι είναι οι μηχανές μέσω των οποίων μετατρέπεται η ενέργεια του υγρού σε μηχανική ενέργεια, δηλαδή σε κινητήρια ροπή στη στρεφόμενη άτρακτο του δρομέα. Σε όλες σχεδόν τις εφαρμογές, εκτός ειδικών περιπτώσεων, το διακινούμενο υγρό είναι το φυσικό νερό της επιφανειακής απορροής ενός υδατορεύματος και η ενέργεια την οποία διαθέτει είναι η δυναμική ενέργεια που εκφράζεται από τη στάθμη του z ως προς τη στάθμη της θάλασσας. Η ενέργεια του υγρού, την οποία καλείται να μετατρέψει σε μηχανική ενέργεια ο υδροστροβίλος, είναι ανανεώσιμη, δεδομένου ότι η επιφανειακή απορροή είναι αποτέλεσμα του υδρολογικού κύκλου. Η επιφανειακή απορροή υδατορεύματος, χάρη στη βαρύτητα, ρέει συνεχώς προς χαμηλότερες στάθμες μέχρι τη στάθμη της θάλασσας. Κατά τη φυσική αυτή ροή η δυναμική ενέργεια του νερού συνεχώς υποβαθμίζεται και μετατρέπεται σε θερμότητα και μηχανικό έργο μέσω μηχανισμών υδραυλικών απωλειών, τύρβης και μεταφοράς υλικών (φερτών).

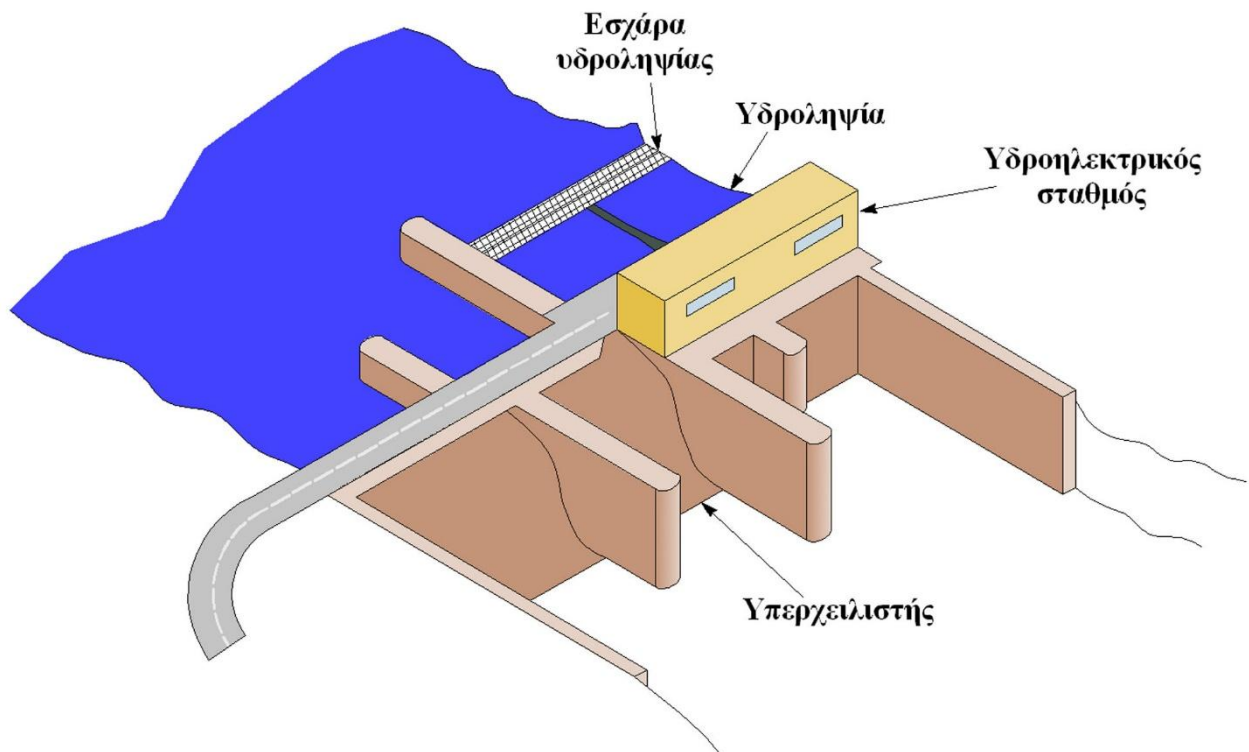
Στο σχήμα 2.17 δίνεται γραφικά η αρχή διαμόρφωσης ΥΗΕ έργου εκτροπής, στο οποίο το σύστημα προσαγωγής αποτελείται από σήραγγα και αγωγό προσαγωγής. Στο σχήμα 2.18 δίνεται η σχηματική διάταξη μικρού ΥΗΕ με ανοικτό αγωγό (διώρυγα) και δεξαμενή φόρτισης. Στο σχήμα 2.19 παρουσιάζεται τυπική διάταξη μικρού υδροηλεκτρικού έργου ροής, χαμηλής υδραυλικής πτώσης, στο οποίο ο υδροηλεκτρικός σταθμός (ΥΗΣ) είναι ενσωματωμένος στο φράγμα-εκχειλιστή [9].



Σχήμα 2.17: Σχηματική διάταξη υδροηλεκτρικού έργου εκτροπής με σήραγγα και αγωγό προσαγωγής.



Σχήμα 2.18: Τυπική διάταξη YHE, με ανοικτό αγωγό (διώρυγα) και δεξαμενή φόρτισης.



Σχήμα 2.19: Τυπική διάταξη μικρού YHE ροής, χαμηλής υδραυλικής πτώσης, στο οποίο ο YHEΣ είναι ενσωματωμένος στο φράγμα-εκχειλιστή.

Η ποικιλία των διαμορφώσεων των μικρών ΥΗΕ δεν εξαντλείται με τις βασικές διατάξεις των μικρών ΥΗΕ, που αναπτύχθηκαν προηγουμένως. Εάν ληφθεί υπόψη η ποικιλία που παρουσιάζει η φυσική διαμόρφωση κάθε λεκάνης απορροής, προκύπτει ότι για τη σωστή διάταξη του ΥΗΕ απαιτείται εμπειρία και φαντασία από το μελετητή, ώστε, λαμβάνοντας υπόψη την επιφανειακή διαμόρφωση κάθε εξεταζόμενης θέσης και τα γεωλογικά στοιχεία, να αναζητηθεί η απλούστερη, οικονομικότερη και ασφαλέστερη λύση.

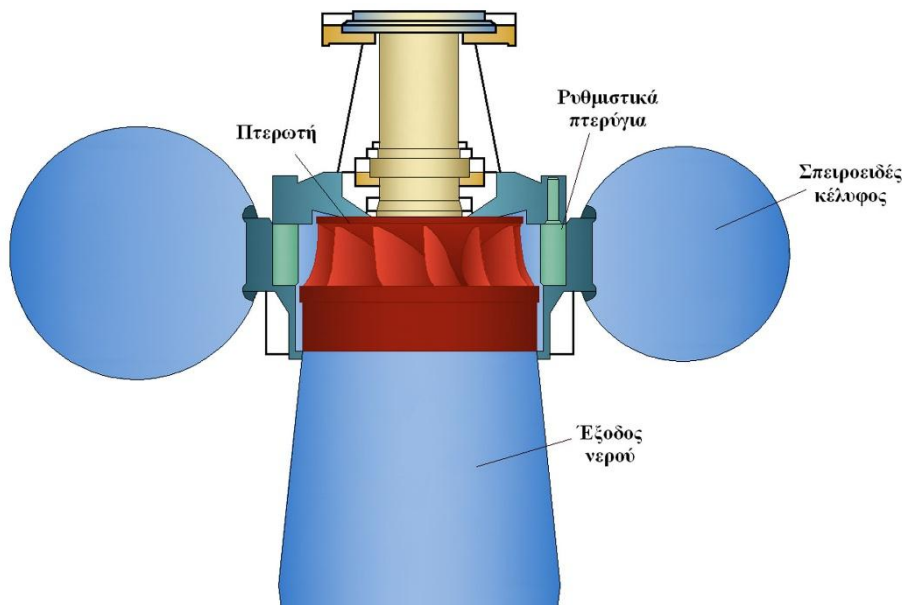
Αυτή ακριβώς η ποικιλία που απαντάται στη γεωμορφολογία και στις πιθανές θέσεις εγκατάστασης ΥΗΕ είναι που οδήγησε στην ανάπτυξη σειράς μοντέλων υδροστροβίλων. Πριν από οποιαδήποτε άλλη διαφοροποίηση στη σχεδίαση και στα χαρακτηριστικά, οι σύγχρονοι υδροστροβίλοι διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

- στους υδροστροβίλους ολικής προσβολής ή αντιδράσεως
- στους υδροστροβίλους μερικής προσβολής ή δράσεως.

Στους πρώτους η λειτουργία του δρομέα είναι αξονοσυμμετρική, και για το λόγο αυτό το τμήμα εισόδου πρέπει να περιβάλλει το δρομέα, εξασφαλίζοντας αξονοσυμμετρικές συνθήκες της ροής στη διατομή εισόδου του δρομέα. Αντίθετα, στους υδροστροβίλους μερικής προσβολής, σε κάθε χρονική στιγμή μόνο ένα τμήμα του δρομέα τροφοδοτείται και συμβάλλει στη μετατροπή της ενέργειας.

Οι υδροστροβίλοι ολικής προσβολής χαρακτηρίζονται και ως υδροστροβίλοι αντιδράσεως, καθώς η ροή διά μέσου του δρομέα γίνεται με παράλληλη μεταβολή της στατικής πίεσης του υγρού. Οι υδροστροβίλοι μερικής προσβολής χαρακτηρίζονται και ως υδροστροβίλοι δράσεως.

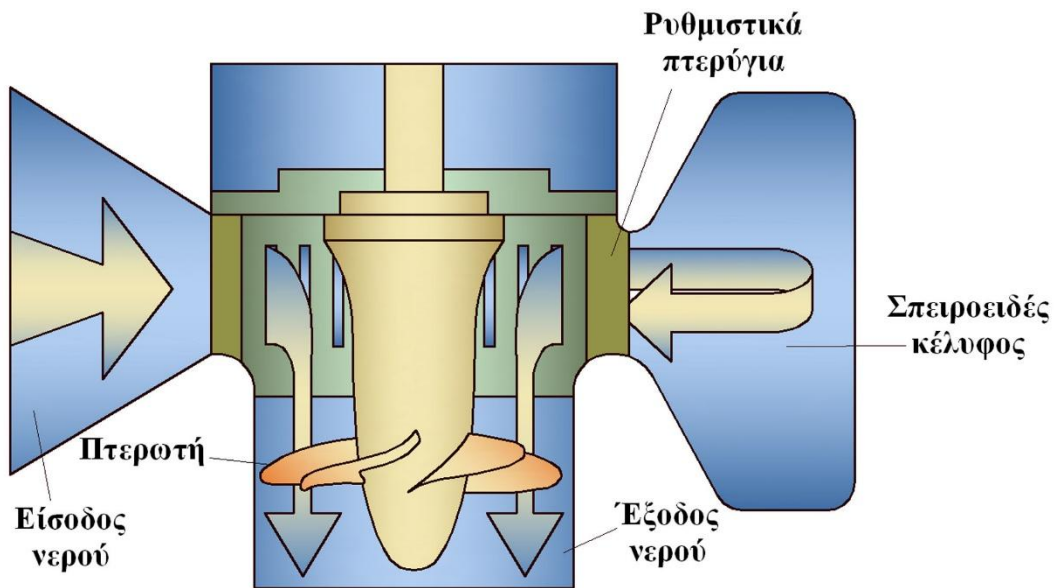
Στους υδροστροβίλους αντιδράσεως κατατάσσονται οι υδροστροβίλοι ακτινικής και μικτής ροής τύπου Francis (σχήμα 2.20), οι υδροστροβίλοι αξονικής ροής τύπου Kaplan (σχήμα 2.21) και οι άλλες παραλλαγές των υδροστροβίλων αξονικής ροής (Deriaz, σωληνωτός, βολβοειδής, κλπ).



Σχήμα 2.20: Τυπική διάταξη υδροστροβίλου Francis κατακόρυφου άξονα [10].

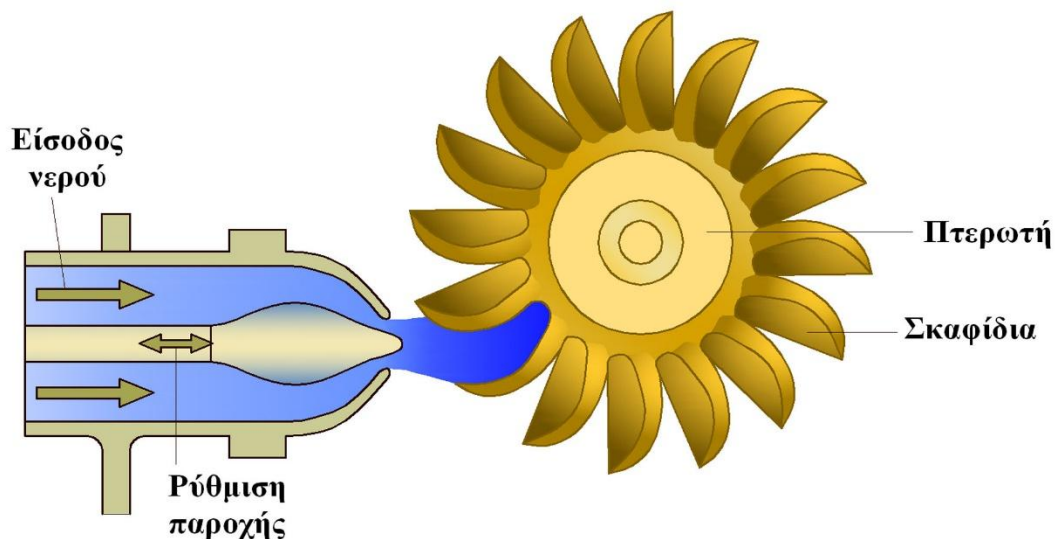
Από τα σχήματα 2.19 και 2.20 είναι εμφανείς οι διαφορές στις πτερωτές Francis και Kaplan. Η πτερωτή του υδροστροβίλου Kaplan προσεγγίζει περισσότερο τη διαμόρφωση της προπέλας σκάφους. Αντίθετως η πτερωτή Francis αποτελείται από δύο στεφάνια, με τα πτερύγιά της πακτωμένα στο ενδιάμεσό τους. Και στις δύο περιπτώσεις, η παροχή του νερού διέρχεται μέσα από στεφάνη ρυθμιστικών πτερυγίων. Το διάκενο ανάμεσα στα ρυθμιστικά πτερύγια ρυθμίζεται με περιστροφή των πτερυγίων γύρω από τον άξονά τους, καθορίζοντας έτσι τη διερχόμενη παροχή από την πτερωτή και την παραγόμενη ισχύ από τον υδροστροβίλο.

Ο υδροστροβίλος Kaplan είναι κατάλληλος για υψηλές παροχές και χαμηλά μανομετρικά, ενώ ο υδροστροβίλος Francis χρησιμοποιείται για μέσες παροχές και μέσα μανομετρικά. Περισσότερα για τις περιοχές χρήσεις των διαφόρων τύπων υδροστροβίλων παρουσιάζονται στη συνέχεια.



Σχήμα 2.21: Τυπική διάταξη υδροστρόβιλου Kaplan.

Χαρακτηριστικός τύπος υδροστρόβιλου δράσεως είναι ο υδροστρόβιλος τύπου Pelton (σχήμα 2.22) και οι παραλλαγές του (turgo, cross flow). Στο σχήμα 2.22 είναι εμφανής η διαφορά της πτερωτής Pelton από τις πτερωτές Francis ή Kaplan. Αντί υδροδυναμικά σχεδιασμένα πτερύγια, όπως στις πτερωτές Francis και Kaplan, ο υδροστρόβιλος Pelton έχει μία στεφάνη σκαφιδίων πακτωμένων περιφερειακά σε δίσκο. Η ροή του νερού προσκρούει πάνω στα σκαφίδια της πτερωτής Pelton μέσω ενός ή περισσοτέρων ακροφυσίων. Το άνοιγμα του ακροφυσίου, ρυθμιζόμενο από βελόνη, καθορίζει την παροχή του νερού και, κατ' επέκταση την ισχύ που θα παραχθεί από τον υδροστρόβιλο.

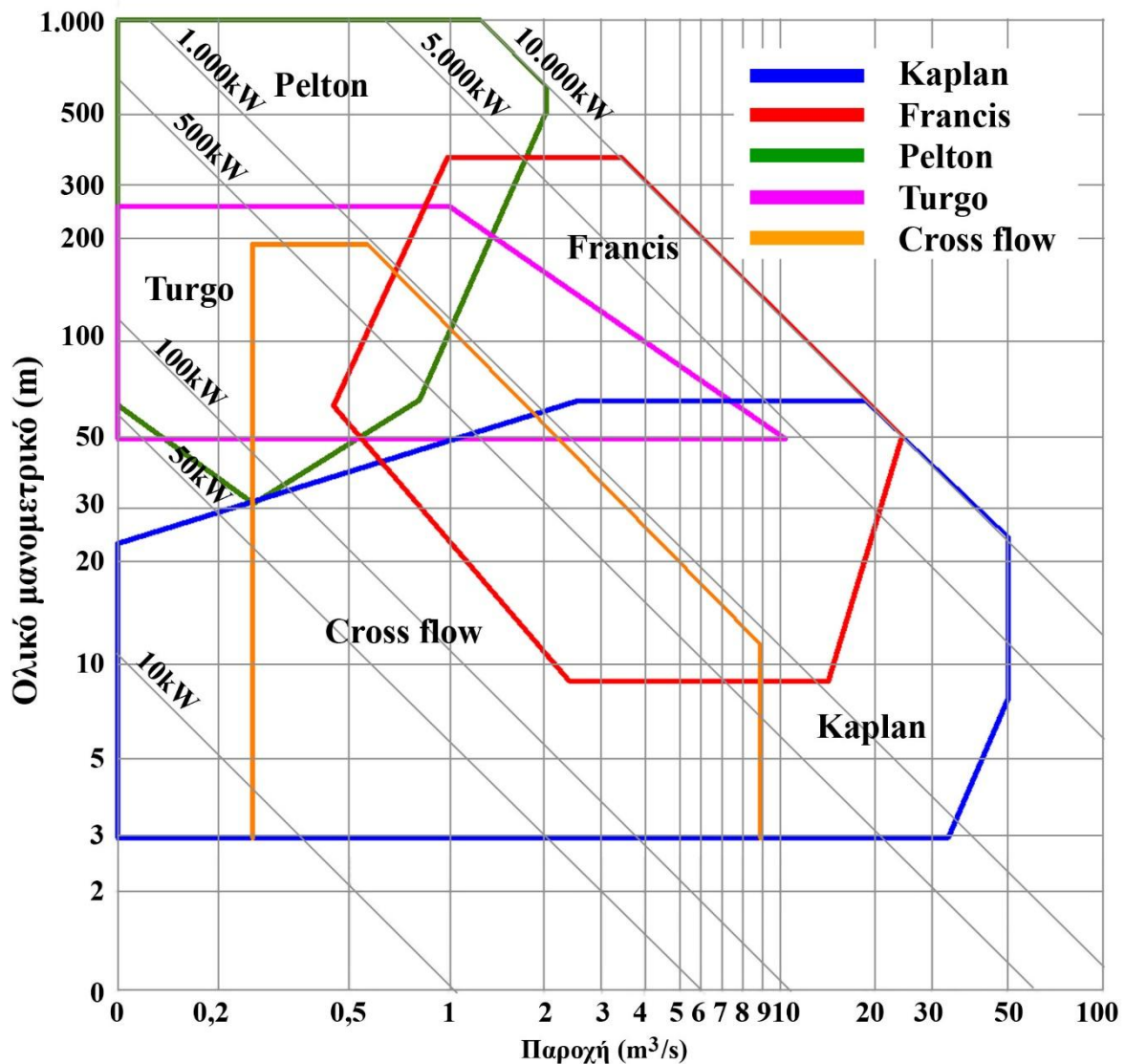


Σχήμα 2.22: Διαμόρφωση πτερωτής Pelton και σχηματική διάταξη υδροστρόβιλου Pelton.

Η απλή και στιβαρή κατασκευή του υδροστρόβιλου Pelton προσεγγίζει περισσότερο τις πρώτες κατασκευές αξιοποίησης υδροδυναμικής ενέργειας. Η υψηλή αντοχή του υδροστρόβιλου Pelton σε μεγάλες υδροστατικές πιέσεις τον καθιστά κατάλληλο για λειτουργία σε μεγάλα μανομετρικά.

Η επιλογή του μοντέλου υδροστρόβιλου που θα εγκατασταθεί σε ένα ΥΗΕ γίνεται πρώτιστα με βάση το διαθέσιμο μανομετρικό και τη διαθέσιμη παροχή στη θέση εγκατάστασης. Κατά δεύτερο λόγο, μπορούν να ληφθούν υπόψη δευτερεύουσες παράμετροι, όπως το κόστος κτήσης και εγκατάστασης, ο βαθμός απόδοσης σε μερικά φορτία, η απαίτηση για αναστρέψιμη λειτουργία (ως αντλία) κλπ. Σε γενικές γραμμές, για την επιλογή του

μοντέλου υδροστροβίλου που θα εγκατασταθεί σε ένα ΥΗΕ, με βάση το διαθέσιμο μανομετρικό και τη διαθέσιμη παροχή, χρησιμοποιούνται διαγράμματα αντίστοιχα με αυτά του σχήματος 2.23.



Σχήμα 2.23: Επιλογή μοντέλου υδροστροβίλου με βάση το διαθέσιμο μανομετρικό και τη διαθέσιμη παροχή στη θέση εγκατάστασης.

Με βάση το διάγραμμα 2.23:

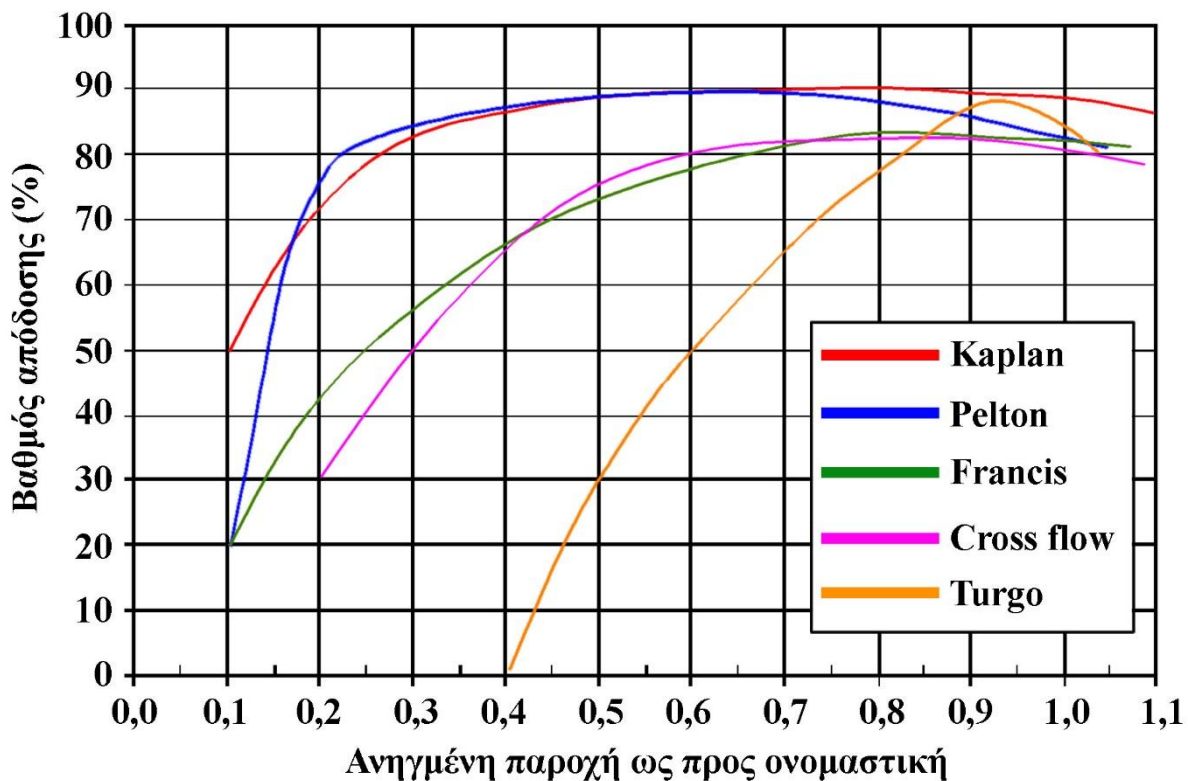
- Ο υδροστροβίλος Pelton χρησιμοποιείται σε μεγάλα μανομετρικά. Πρακτικά είναι ο μόνος τύπος υδροστροβίλου κατάλληλος για αξιοποίηση υδραυλικών πτώσεων μεγαλύτερων των 400m. Ωστόσο, οι παροχές λειτουργίας του υδροστροβίλου Pelton είναι περιορισμένες.
- Μία παραλλαγή του Pelton, ο υδροστροβίλος Turgo έχει κατασκευαστεί προκειμένου να μπορέσει να λειτουργήσει σε υψηλότερες παροχές.
- Ο υδροστροβίλος Francis καλύπτει την περιοχή μέσων παροχών και μανομετρικών. Είναι ο υδροστροβίλος με τις περισσότερες εγκαταστάσεις παγκοσμίως.
- Ο υδροστροβίλος Kaplan χρησιμοποιείται για πολύ υψηλές παροχές και χαμηλά μανομετρικά.
- Μία παραλλαγή του Kaplan, ο υδροστροβίλος Deriaz, έχει αναπτυχθεί με σκοπό να προσεγγίσει τη λειτουργία σε υψηλότερα μανομετρικά, χωρίς να υστερήσει σε παροχές. Καλύπτει την περιοχή

λειτουργίας του Kaplan, επεκτεινόμενος προς τα πάνω, καλύπτοντας και την περιοχή λειτουργίας του Francis.

Μία ακόμα παραλλαγή του υδροστροβίλου Kaplan, ο βολβοειδής υδροστρόβιλος, έχει αναπτυχθεί με σκοπό να καλύψει την περιοχή λειτουργίας σε ακόμα μεγαλύτερες παροχές (έως $100\text{m}^3/\text{s}$).

Το διάγραμμα που παρουσιάζεται στο σχήμα 2.24 είναι ιδιαίτερα σημαντικό για την εισαγωγή υδροστροβίλων σε ένα Σ.Η.Ε. Παρουσιάζει τη διακύμανση του βαθμού απόδοσης διαφόρων τύπων υδροστροβίλων συναρτήσει του σημείου λειτουργίας τους. Με βάση το διάγραμμα αυτό μπορούμε να διατυπώσουμε τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η μέγιστη απόδοση για όλους τους τύπους υδροστροβίλων ξεπερνάει το 80%. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι κατά την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος σε ένα υδροστρόβιλο υφίσταται πρακτικά η μεταφορά μηχανικής ισχύος από το νερό προς την πτερωτή και η μορφοτροπή ενέργειας, από μηχανική σε ηλεκτρική. Η ενεργειακή μορφοτροπή ξεκινάει απευθείας από τη μηχανική ισχύ, χωρίς να μεσολαβεί το στάδιο μορφοτροπής θερμότητας σε μηχανική, όπως συμβαίνει στις θερμικές μηχανές, κατά το οποίο εμφανίζονται οι μεγαλύτερες απώλειες.
- Κάποιοι τύποι υδροστροβίλων, όπως ο Pelton, ο Kaplan, ο Deriaz, αυξάνουν και διατηρούν την απόδοσή τους σε τιμές άνω του 80% για σημεία λειτουργίας από το 20% της ονομαστικής παροχής έως και την ονομαστική παροχή.



Σχήμα 2.24: Διακύμανση βαθμού απόδοσης διαφόρων τύπων υδροστροβίλων συναρτήσει του σημείου λειτουργίας τους.

Γίνεται αντιληπτό πόσο σημαντικά είναι τα ανωτέρω χαρακτηριστικά για την αποδοτική λειτουργία και τη μεγιστοποίηση της παραγωγής υδροστροβίλων σε ένα Σ.Η.Ε. Γενικότερα τα χαρακτηριστικά που διαμορφώνουν και καθορίζουν την ενσωμάτωση υδροστροβίλων σε ένα Σ.Η.Ε. είναι τα ακόλουθα:

- Όπως αναφέρθηκε ήδη, οι υδροστρόβιλοι παρουσιάζουν πολύ υψηλή απόδοση, έχοντας την ιδιαιτερότητα να τη διατηρούν σε υψηλές τιμές για μεγάλο εύρος του πεδίου λειτουργίας τους σε μερικά φορτία.
- Το ειδικό κόστος παραγωγής ενός υδροηλεκτρικού σταθμού, δεδομένης της απουσίας καυσίμου, που στις θερμικές μηχανές αποτελεί τη βασική συνιστώσα διαμόρφωσης του ειδικού κόστους παραγωγής,

διαμορφώνεται κυρίως από τις αποσβέσεις του αρχικού κεφαλαίου για την κατασκευή του σταθμού. Με βάση όσα αναφέρθηκαν ανωτέρω, εξάγεται το συμπέρασμα ότι ένα υδροηλεκτρικό έργο μπορεί να έχει πολλές διαφορετικές διαμορφώσεις. Μπορεί να συνοδεύεται από φράγμα, ή όχι, μπορεί ο ΥΗΣ να είναι υπέργειος, υπόγειος ή ενσωματωμένος στο φράγμα, το ίδιο το φράγμα μπορεί να είναι φράγμα βαρύτητας ή τοξωτό κλπ. Όλες αυτές οι διαφορετικές δυνατές υλοποιήσεις ενός υδροηλεκτρικού έργου συνεπάγονται διαφορετικά ειδικά κόστη κατασκευής. Έτσι για μικρά υδροηλεκτρικά έργα, με ονομαστική ισχύ μικρότερη των 10MW, το ειδικό αρχικό κόστος διαμορφώνεται μεταξύ 1.200 και 4.000€/kW. Σε μεγάλα υδραυλικά έργα η διακύμανση του ειδικού αρχικού κόστους είναι μικρότερη, συγκεκριμένα ανάμεσα στα 1.800 και 2.800€/kW. Η διακύμανση του αρχικού κόστους εγκατάστασης συνεπάγεται αντίστοιχη διακύμανση στο ειδικό κόστος παραγωγής. Έτσι σε μικρά υδροηλεκτρικά έργα, το ειδικό κόστος παραγωγής μπορεί να είναι από 0,03 έως 0,10€/kWh, ενώ σε μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα, το ειδικό κόστος παραγωγής μπορεί να είναι από 0,02 – 0,05€/kWh.

- Οι υδροστρόβιλοι είναι οι πλέον ταχείς μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Έχουν άμεση εκκίνηση (της τάξης δευτερολέπτων) και πολύ υψηλή ευελιξία και ικανότητα παρακολούθησης των μεταβολών του φορτίου.
- Η λειτουργία ενός ΥΗΕ καθορίζεται ανάλογα με τη διαθεσιμότητα του εργαζόμενου μέσου, δηλαδή του νερού. Σε περιπτώσεις αφθονίας του εργαζόμενου μέσου (π.χ. κεντρική και βόρεια Ευρώπη, Σκανδιναβία), οι υδροστρόβιλοι λειτουργούν συνεχώς, αναλαμβάνοντας ρόλο μονάδων βάσης. Αντίθετα, σε περιπτώσεις έντονων εποχιακών διακυμάνσεων στη διαθεσιμότητα νερού, συνήθως επιλέγεται η αποθήκευση του νερού σε δεξαμενές και η λειτουργία των ΥΗΣ σε περιόδους υψηλής ζήτησης ισχύος, προς αποφυγή λειτουργίας ακριβών μονάδων αιχμής (αεριοστρόβιλοι).
- Η υδραυλική ενέργεια είναι ανανεώσιμη, περιβαλλοντικά φιλική και δεν εκπέμπονται αέριοι ρύποι κατά τη λειτουργία υδροηλεκτρικών εργοστασίων.

Ο ρόλος και ο τρόπος ενσωμάτωσης των υδροστρόβιλων σε Σ.Η.Ε. θα αναπτυχθεί σε επόμενη ενότητα.

2.2.6. Μονάδες μη εγγυημένης παραγωγής

Οι βασικές μονάδες μη εγγυημένης παραγωγής που έχουν αναπτυχθεί σε επίπεδο τεχνολογικά ώριμο και οικονομικά ανταγωνιστικό, συμβάλλοντας ήδη σημαντικά στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα και στον κόσμο, είναι οι ανεμογεννήτριες και οι φωτοβολταϊκοί σταθμοί.

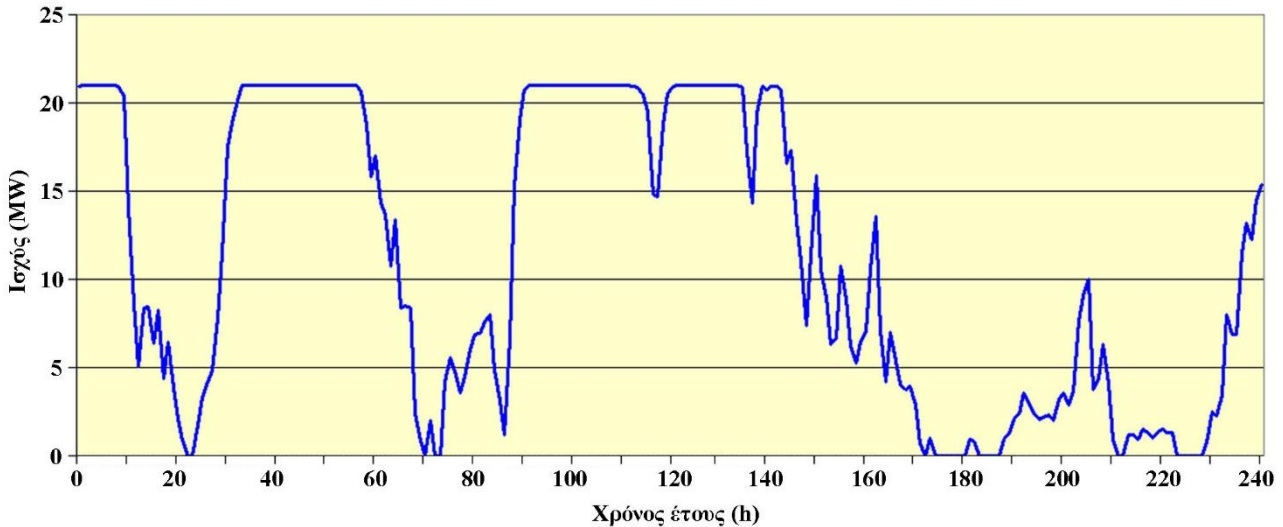
Με τις σύγχρονες ανεμογεννήτριες καταγράφεται σημαντική βελτίωση στην τεχνολογία, στο βάρος της μηχανής και στην αλληλεπίδρασή της με το δίκτυο. Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες είναι ελαφρύτερες ανά μονάδα ονομαστικής ισχύος, περισσότερο αποδοτικές και πιο φιλικές – ασφαλείς με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Η απόδοσή τους φτάνει περίπου το 45 – 50%, για περιοχές με υψηλό αιολικό δυναμικό (μέση ετήσια ταχύτητα άνω των 10m/s). Αντίστοιχες τιμές λαμβάνει σε αυτές τις περιπτώσεις και ο συντελεστής απασχόλησης του αιολικού πάρκου.

Αντίστοιχα, στην περίπτωση των φωτοβολταϊκών σταθμών έχει επικρατήσει η τεχνολογία των μονοκρυσταλλικών πλαισίων ως η πλέον αποδοτική, με απόδοση που κυμαίνεται μεταξύ 15 – 17%. Ο συντελεστής απασχόλησης ενός φωτοβολταϊκού σταθμού, σε συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας νότιας Ελλάδας και δυνατότητα προσανατολισμού κάθετα στη διεύθυνση προσβολής της ηλιακής ακτινοβολίας, μπορεί να ξεπεράσει το 20%.

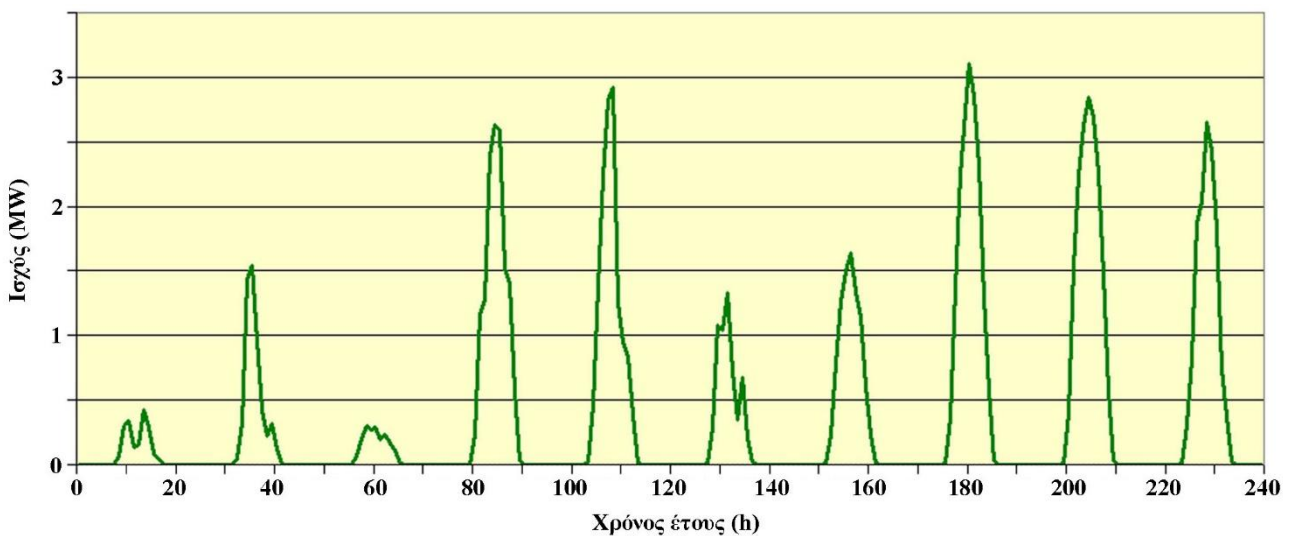
Τα βασικά χαρακτηριστικά που καθορίζουν και διαμορφώνουν το ρόλο των μονάδων μη εγγυημένης παραγωγής σε ένα Σ.Η.Ε είναι:

- Είναι ανανεώσιμες και περιβαλλοντικά φιλικές, καθώς δεν εκπέμπονται αέριοι ρύποι κατά τη λειτουργία τους.
- Το δυναμικό Α.Π.Ε. είναι διαθέσιμο στην περιοχή εγκατάστασης των αντίστοιχων έργων, συνεπώς αξιοποιούνται οι γηγενείς ενεργειακοί πόροι και μειώνονται οι εκροές συναλλάγματος για εισαγωγή ενεργειακών πόρων.

- Χαρακτηρίζονται από αβεβαιότητα στη διαθεσιμότητα της ενεργειακής πηγής και από αδυναμία ελέγχου της παραγωγής κατά βούληση (μονάδες μη εγγυημένης παραγωγής). Ενδεικτικά παρουσιάζονται τα διαγράμματα μεταβολής της παραγωγής από ένα αιολικό πάρκο ισχύος 24MW και ένα φωτοβολταϊκό σταθμό ισχύος 4,4MW (μετά απολειών παραγωγής) για το διάστημα των δέκα πρώτων εικοσιτετράωρων του έτους στα σχήματα 2.25 και 2.26.

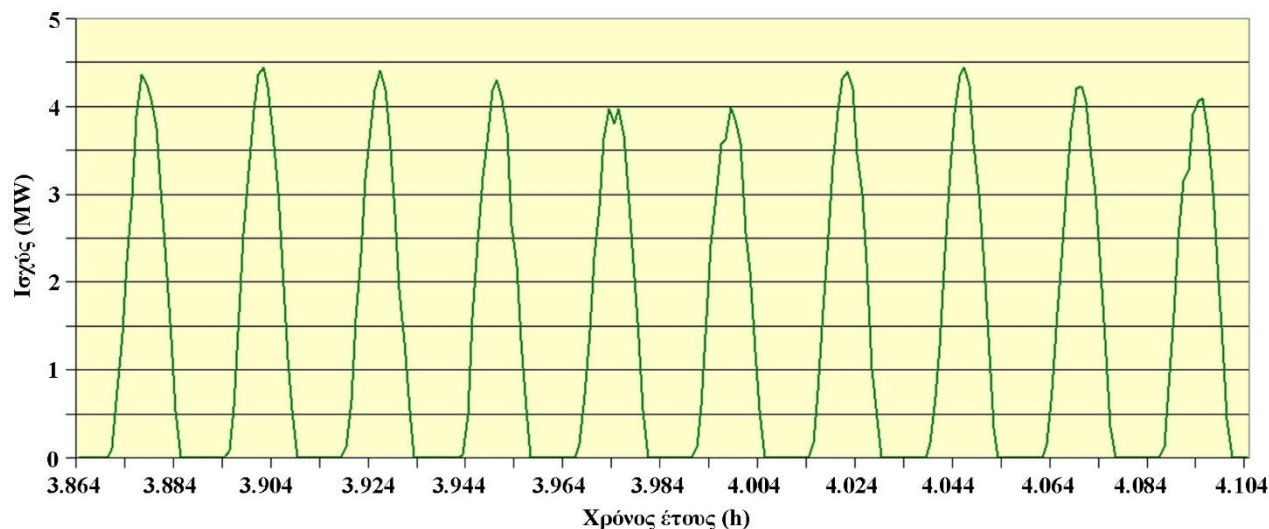


Σχήμα 2.25: Διακύμανση παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος μετά απολειών από αιολικό πάρκο ονομαστικής ισχύος 24MW κατά το πρώτο δεκαήμερο του έτους.



Σχήμα 2.26: Διακύμανση παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος μετά απολειών από φωτοβολταϊκό σταθμό ονομαστικής ισχύος 4,4MW κατά το πρώτο δεκαήμερο του έτους.

Παρατηρείται η σημαντική διακύμανση στην παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος και από τους δύο σταθμούς. Πρακτικά, κατά το διάστημα αυτό, δεν είναι εφικτή η οποιαδήποτε πρόβλεψη της παραγωγής του αιολικού πάρκου ή του φωτοβολταϊκού σταθμού. Αντίθετα, στο σχήμα 2.27 παρουσιάζεται η διακύμανση παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος από τον ίδιο φωτοβολταϊκό σταθμό κατά το δεύτερο δεκαήμερο του Ιουνίου. Κατά το διάστημα αυτό παρατηρείται ότι υπάρχει μία σαφής προβλεψιμότητα στην παραγωγή του φωτοβολταϊκού σταθμού. Αντίστοιχη βελτιωμένη συμπεριφορά μπορεί να εμφανιστεί και για παραγωγή αιολικού πάρκου κατά τη θερινή περίοδο, κυρίως λόγω των στρωτών και σταθερής έντασης βορειοδυτικών ανέμων που επικρατούν κατά την περίοδο αυτή στην Ελλάδα (μελέτεια). Τα διαγράμματα αυτά αφορούν στη νότια νησιωτική Ελλάδα και καταδεικνύουν πόσο σημαντικές είναι οι καιρικές συνθήκες στην ομαλή ένταξη τεχνολογιών ηλεκτροπαραγωγής από Α.Π.Ε. στα Σ.Η.Ε.



Σχήμα 2.27: Διακύμανση παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος μετά απωλειών από φωτοβολταϊκό σταθμό ονομαστικής ισχύος 4,4MW κατά το δεύτερο δεκαήμερο του Ιουνίου.

- Το συνολικό κόστος εγκατάστασης για την Ελλάδα διαμορφώνεται περίπου στα 1.000 – 1.200€/kW και για τις δύο βασικές τεχνολογίες ηλεκτροπαραγωγής από Α.Π.Ε.
- Το ειδικό κόστος παραγωγής, απουσίας καυσίμου, διαμορφώνεται κυρίως από τις αποσβέσεις του αρχικού κόστους παραγωγής και από την ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Για συντελεστές απασχόλησης της τάξης του 40% για αιολικό πάρκο και 17% για φωτοβολταϊκό σταθμό, και για ειδικό αρχικό κόστος της τάξης των 1.000€/kW, το ειδικό κόστος παραγωγής διαμορφώνεται στα 0,04€/kWh για το αιολικό πάρκο και στα 0,08€/kWh για το φωτοβολταϊκό σταθμό.

2.2.7. Ένταξη των μονάδων παραγωγής σε Σ.Η.Ε.

Στον πίνακα 2.3 συνοψίζονται τα χαρακτηριστικά στοιχεία των μονάδων παραγωγής που παρουσιάστηκαν ανωτέρω. Με βάση τα στοιχεία αυτά θα τεκμηριωθεί, στη συνέχεια, ο τρόπος ένταξης της κάθε μονάδας παραγωγής και ο ρόλος της σε ένα Σ.Η.Ε.

Η σειρά ένταξης των θερμοηλεκτρικών μονάδων στην παραγωγή καθορίζεται από τις παρακάτω παραμέτρους:

- την ασφάλεια του συστήματος, καθώς και την εξασφάλιση της διαρκούς και αδιάλειπτης ικανοποίησης της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας
- την οικονομική λειτουργία του συστήματος, μέσω της ελαχιστοποίησης του ειδικού κόστους παραγωγής.

Η πρώτη παράμετρος επιβάλλει τη λειτουργία των θερμοηλεκτρικών μονάδων με σχετικά χαμηλή απόκριση στις διακυμάνσεις φορτίου και με αργή εκκίνηση, δηλαδή των ατμοστροβίλων και των συνδυασμένων κύκλων, ως μονάδων βάσης. Η χρήση μιας θερμοηλεκτρικής μονάδας ως μονάδα βάσης συνεπάγεται την ένταξή της πρώτα από οποιαδήποτε άλλη μονάδα στην παραγωγή. Επίσης τούτο συνεπάγεται ότι οι μονάδες αυτές λειτουργούν συνεχώς. Ακόμα και κατά τη διάρκεια χαμηλών φορτίσεων θα λειτουργούν στα τεχνικά ελάχιστα τους, περιορίζοντας ενδεχομένως την παραγωγή άλλων μονάδων με χαμηλότερο κόστος παραγωγής. Οι περιπτώσεις αυτές συναντώνται συνήθως κατά τις νυκτερινές ώρες των περιόδων χαμηλής ζήτησης ισχύος, οι οποίες, για τα ελληνικά συστήματα, καταγράφονται κυρίως το φθινόπωρο και την άνοιξη.

Η δεύτερη παράμετρος επιβάλλει την ένταξη των θερμοηλεκτρικών μονάδων στην παραγωγή με την παρακάτω, σε γενικές γραμμές, σειρά:

1. συνδυασμένοι κύκλοι φυσικού αερίου,
2. ντιζελογεννήτριες φυσικού αερίου,

3. ατμοστρόβιλοι στερεών καυσίμων από το τεχνικό ελάχιστό τους μέχρι την πλήρη φόρτισή τους,
4. ντιζελογεννήτριες μαζούτ,
5. συνδυασμένοι κύκλοι ελαφρύ καυσίμου από το τεχνικό ελάχιστό τους μέχρι την πλήρη φόρτισή τους,
6. ατμοστρόβιλοι μαζούτ από το τεχνικό ελάχιστό τους μέχρι την πλήρη φόρτισή τους,
7. ντιζελογεννήτριες ελαφρύ καυσίμου,
8. αεριοστρόβιλοι ελαφρύ καυσίμου.

Η σειρά αυτή τηρείται, όταν δεν τίθενται περιορισμοί ασφάλειας των Σ.Η.Ε., με τους ατμοστρόβιλους και τους συνδυασμένους κύκλους να μη λειτουργούν ποτέ κάτω από τεχνικά ελάχιστα τους, ανεξάρτητα από σειρά ένταξης.

Πίνακας 2.3: Σύνοψη βασικών χαρακτηριστικών μονάδων παραγωγής.

Μονάδα	Βαθμός απόδοσης (%)	Τύπος καυσίμου	Απόκριση / Εκκίνηση	Ειδικό κόστος παραγωγής (€/kWh)
Ατμοστρόβιλοι	30 – 35	στερεά καύσιμα	αργή / αργή	0,05
		μαζούτ		0,10 – 0,12
		πυρηνικά καύσιμα		0,13 – 0,15
Ντιζελογεννήτριες	40 – 45	μαζούτ	ταχεία / ταχεία ⁽²⁾	0,08
		ελαφρύ καύσιμο		0,25
		φυσικό αέριο		0,05
Αεριοστρόβιλοι	30 – 35	ελαφρύ καύσιμο	ταχεία / ταχεία	0,35
		φυσικό αέριο		0,20
Συνδυασμένοι κύκλοι	45 – 55	ελαφρύ καύσιμο	ταχεία / αργή ⁽³⁾	0,20
		φυσικό αέριο		0,10
Υδροστρόβιλοι	80 – 90	–	ταχεία / ταχεία	0,02 – 0,05 ⁽⁴⁾ 0,03 – 0,10 ⁽⁵⁾
Ανεμογεννήτριες	40 – 50 ⁽¹⁾	–	–	0,04 ⁽¹⁾
Φωτοβολταϊκά	15 – 17 ⁽¹⁾	–	–	0,08 ⁽¹⁾

Παρατηρήσεις:

1. Οι βαθμοί απόδοσης και τα ειδικά κόστη παραγωγής ανεμογεννητριών και φωτοβολταϊκών αναφέρονται σε δυναμικό Α.Π.Ε. που συνεπάγεται συντελεστές απασχόλησης άνω του 40% για το αιολικό πάρκο και του 15% για το φωτοβολταϊκό σταθμό.
2. Η ταχεία απόκριση των ντιζελογεννητριών αφορά κυρίως τις μονάδες μικρού μεγέθους.
3. Η ταχεία απόκριση των συνδυασμένων κύκλων αφορά μόνο τη λειτουργία των αεριοστρόβιλων.
4. Για μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα.
5. Για μικρά υδροηλεκτρικά έργα (ισχύς κάτω των 10MW).

Ταυτόχρονα με τη σειρά ένταξης των μονάδων με βάση τα ανωτέρω κριτήρια, ελέγχεται και η τήρηση στρεφόμενης εφεδρείας, με στόχο να διατηρείται μεγαλύτερη ή ίση με την ικανότητα της μεγαλύτερης ενταγμένης συμβατικής μονάδας του συστήματος.

Οι υδροστρόβιλοι μπορεί να εντάσσονται είτε ως μονάδες βάσης, υποκαθιστώντας την παραγωγή των αντίστοιχων θερμικών μονάδων έως τα τεχνικά ελάχιστα τους, είτε ως μονάδες αιχμής, υποκαθιστώντας και πάλι τις αντίστοιχες θερμικές μονάδες, ανάλογα με τη διαθεσιμότητα του νερού.

Οι μονάδες μη εγγυημένης παραγωγής εντάσσονται έως το μέγιστο ποσοστό στιγμιαίας διείσδυσης ως προς τη ζήτηση ισχύος, το οποίο επιβάλλεται από την ασφαλή και ευσταθή λειτουργία του συστήματος.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται αναλυτική περιγραφή ανά τύπο μονάδας παραγωγής του τρόπου ένταξης και λειτουργίας στα Σ.Η.Ε.

Ατμοστρόβιλοι

Οι ατμοστρόβιλοι εισάγονται σε ένα Σ.Η.Ε. βασικά για δύο λόγους:

- αν υπάρχει διαθέσιμο καύσιμο, που δεν μπορεί να αξιοποιηθεί από άλλη θερμική μηχανή (π.χ. στερεό καύσιμο, πυρηνικό καύσιμο, γεωθερμία, ηλιοθερμικά)
- με σκοπό να αποτελέσουν τη βασική μονάδα διατήρησης και ρύθμισης της συχνότητας του συστήματος, λόγω της υψηλής ροπής αδράνειας που συνεπάγονται οι μεγάλες περιστρεφόμενες μάζες.

Από την άλλη μεριά, λόγω του μεγέθους και της πολυπλοκότητας της εγκατάστασης, καθώς και του συνεπαγόμενου κόστους, η εισαγωγή των αμοστροβίλων είναι σκόπιμη σε Σ.Η.Ε. μεγάλου μεγέθους, ουσιαστικά με μέση ζήτηση ισχύος άνω των 100MW. Για παράδειγμα στην Ελλάδα, πέραν του διασυνδεδεμένου συστήματος, αμοστροβίλοι έχουν εγκατασταθεί μόνο στα αυτόνομα συστήματα Κρήτης (εγκατεστημένη ισχύς αμοστροβίλων το 2014 200MW με αιχμή συστήματος τα 550MW) και Ρόδου (εγκατεστημένη ισχύς αμοστροβίλων το 2014 30MW με αιχμή συστήματος στα 180MW).

Η στήριξη της βασικής συχνότητας του συστήματος από τους αμοστροβίλους, σε συνδυασμό με την αργή διαδικασία εκκίνησης και τη χαμηλή ικανότητά τους να παρακολουθήσουν τις μεταβολές του φορτίου, επιβάλλουν τη χρήση των αμοστροβίλων ως μονάδες βάσης. Η λειτουργία των αμοστροβίλων ως μονάδες βάσης συνεπάγεται τη διαρκή λειτουργία τους, η οποία μπορεί να περιοριστεί σε συνθήκες χαμηλής φόρτισης κατ' ελάχιστο στα τεχνικά ελάχιστα τους. Ένας αμοστροβίλος δύναται να διακόψει τη λειτουργία του, εκτός περιπτώσεων βλαβών, μόνο για λόγους προγραμματισμένης συντήρησης, η οποία συνήθως εκτελείται ανά έτος.

Οι αμοστροβίλοι του ελληνικού διασυνδεδεμένου συστήματος καταναλώνουν στερεά εγχώρια καύσιμα (λιγνίτη και λιθάνθρακα), ενώ στα δύο μη διασυνδεδεμένα ελληνικά συστήματα της Κρήτης και της Ρόδου οι εγκατεστημένοι αμοστροβίλοι καταναλώνουν μαζούτ (βαρύ πετρελαϊκό καύσιμο).

Ντιζελογεννήτριες

Οι ντιζελογεννήτριες αποτελούν τις πλέον ευέλικτες θερμοηλεκτρικές μονάδες. Δύνανται να καταναλώσουν είτε φυσικό αέριο, είτε μαζούτ, είτε ελαφρύ καύσιμο. Ο υψηλός βαθμός απόδοσης που παρουσιάζουν συνεπάγεται χαμηλό ειδικό κόστος παραγωγής στην περίπτωση κατανάλωσης φυσικού αερίου ή μαζούτ. Είναι εύκολες, γρήγορες και οικονομικές στην εγκατάσταση. Είναι ταχείες στην εκκίνηση και ευέλικτες στη ρύθμιση ισχύος, με υψηλή ικανότητα παρακολούθησης των μεταβολών του φορτίου, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για μονάδες μικρού μεγέθους (κάτω των 15MW). Το μόνο μειονέκτημα που παρουσιάζουν, έναντι των λοιπών θερμικών μονάδων, είναι η αυξημένη ανάγκη συντήρησης λόγω των παλινδρομικών κινήσεων των εμβόλων.

Συνεπώς οι ντιζελογεννήτριες μπορούν να χρησιμοποιηθούν:

- ως μονάδες βάσης, όταν πρόκειται για μονάδες μεγάλης ισχύος (της τάξης των 50MW) με κατανάλωση μαζούτ ή φυσικού αερίου, με σκοπό την ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής,
- ως μονάδες αιχμής, για μικρότερες μονάδες και ανεξάρτητα του είδους του καυσίμου.

Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι στο σύνολο των ελληνικών αυτόνομων νησιωτικών συστημάτων μέσου και μικρού μεγέθους οι εγκατεστημένες μονάδες είναι αποκλειστικά ντιζελογεννήτριες, με μεγέθη που ποικίλουν από 100 – 200kW έως 5 – 10MW και με κατανάλωση είτε μαζούτ, είτε ελαφρύ καυσίμου. Οι εγκατεστημένες ντιζελογεννήτριες σε ένα αυτόνομο νησιωτικό σύστημα λειτουργούν οι ίδιες ως μονάδες βάσης και ως μονάδες αιχμής. Το ειδικό κόστος παραγωγής σε αυτές τις περιπτώσεις μπορεί να κυμαίνεται στα 0,15€/kWh, στην περίπτωση κατανάλωσης μαζούτ, και στα 0,30€/kWh, στην περίπτωση κατανάλωσης ελαφρύ καυσίμου.

Αεριοστροβίλοι

Οι αεριοστροβίλοι, ανεξάρτητα από τον τύπο του καταναλωθέντος καυσίμου (φυσικό αέριο ή ελαφρύ καύσιμο), χαρακτηρίζονται από υψηλό ειδικό κόστος παραγωγής, το οποίο διαμορφώνεται βασικά από το χαμηλό βαθμό απόδοσής τους. Το ευνοϊκό χαρακτηριστικό τους είναι η ταχεία εκκίνηση και η υψηλή ικανότητα παρακολούθησης των μεταβολών του φορτίου. Τα ανωτέρω χαρακτηριστικά συνάδουν από κοινού παράλληλα στον καθορισμό της χρήσης των αεριοστροβίλων ως μονάδων αιχμής, δηλαδή αποκλειστικά και μόνο για την κάλυψη των ημερήσιων αιχμών ζήτησης ισχύος και εφόσον έχουν εξαντληθεί οι όποιες

εναλλακτικές δυνατότητες κάλυψης της ζήτησης ισχύος από άλλες μονάδες με χαμηλότερο ειδικό κόστος παραγωγής.

Συνδυασμένοι κύκλοι

Έχει ήδη αναλυθεί ανωτέρω ότι, δεδομένης της παρουσίας του ατμοστροβίλου, ένας συνδυασμένος κύκλος χαρακτηρίζεται συνολικά ως μονάδα με αργή εκκίνηση. Συνεπώς κατατάσσεται στις μονάδες βάσης. Ταυτόχρονα, όμως, ο συνδυασμένος κύκλος έχει την ιδιαιτερότητα, λόγω της παρουσίας των αεριοστροβίλων, να παρουσιάζει υψηλή ικανότητα παρακολούθησης του φορτίου, τουλάχιστον έως εξάντλησης της συνολικής ικανότητας παραγωγής των αεριοστροβίλων του. Θα μπορούσαμε να πούμε λοιπόν ότι σαφέστατα οι συνδυασμένοι κύκλοι εντάσσονται ως μονάδες βάσης, με διαρκή λειτουργία κατ' ελάχιστον στα τεχνικά ελάχιστα τους, όπως ακριβώς και οι ατμοστροβίλοι, η οποία μπορεί να διακόπτεται μόνο για λόγους προγραμματισμένης συντήρησης και βλαβών. Ταυτόχρονα, όμως, έχουν τη δυνατότητα παρακολούθησης των μεταβολών του φορτίου με ταχεία απόκριση.

Η προτεραιότητα ένταξης των συνδυασμένων κύκλων ουσιαστικά καθορίζεται από τον τύπο του καταναλωθέντος καυσίμου. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση χρήσης φυσικού αερίου, ο συνδυασμένος κύκλος θα ενταχθεί με απόλυτη προτεραιότητα στην παραγωγή, τόσο λόγω των χαρακτηριστικών του ως μονάδα βάσης, όσο και λόγω του χαμηλού ειδικού κόστους παραγωγής. Στην περίπτωση χρήσης ελαφρύ καυσίμου, η αύξηση της παραγωγής του συνδυασμένου κύκλου πάνω από τα τεχνικά ελάχιστα του θα γίνει μετά την εξάντληση των μονάδων με χαμηλότερο ειδικό κόστος παραγωγής (ατμοστροβίλοι, ντιζελογεννήτριες με μαζούτ).

Μονάδες μη εγγυημένης παραγωγής

Ο ρόλος που οι μονάδες μη εγγυημένης παραγωγής μπορούν να έχουν σε ένα συμβατικό Σ.Η.Ε. καθορίζεται κυρίως από το δεδομένο της περιορισμένης στιγμιαίας διείσδυσης ισχύος που επιτρέπεται να έχουν, σε συνάρτηση της ζήτησης ισχύος, όπως αυτό επιβάλλεται για λόγους ασφάλειας και ευστάθειας του συστήματος (περισσότερα έχουν αναφερθεί στην ενότητα 2.1.5). Συνεπώς οι μονάδες μη εγγυημένης ισχύος διεισδύουν στην παραγωγή ισχύος έως ένα μέγιστο ποσοστό, το ύψος του οποίου καθορίζεται από μία σειρά παραμέτρων, όπως το μέγεθος του συστήματος, οι καιρικές συνθήκες, το σύνολο και το είδος των ενταγμένων θερμικών μονάδων, το μέγεθος και το είδος της στρεφόμενης εφεδρείας κλπ. Ερμηνεύοντας τα ανωτέρω, πρακτικά οι μονάδες εγγυημένης ισχύος, δεδομένου:

- του ανανεώσιμου και φιλικού περιβαλλοντικά χαρακτήρα τους,
- της τιμής αγοράς της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από αυτές, η οποία είναι χαμηλότερη από το συνολικό ειδικό κόστος παραγωγής των θερμικών μονάδων,
- της γενικότερης στήριξης στις τοπικές και στην εθνική οικονομία που συνεπάγεται η εγκατάσταση και η λειτουργία των τεχνολογιών ηλεκτροπαραγωγής από Α.Π.Ε., λόγω της εντοπιότητας του διαθέσιμου δυναμικού και της μείωσης εισαγωγών ενεργειακών πόρων.

εντάσσονται στην παραγωγή, όποτε και όσο είναι εφικτό, με απώτερο στόχο τη μείωση της κατανάλωσης μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, τη μείωση των εκπομπών αερίων ρύπων και τη μείωση του ειδικού κόστους παραγωγής του συστήματος.

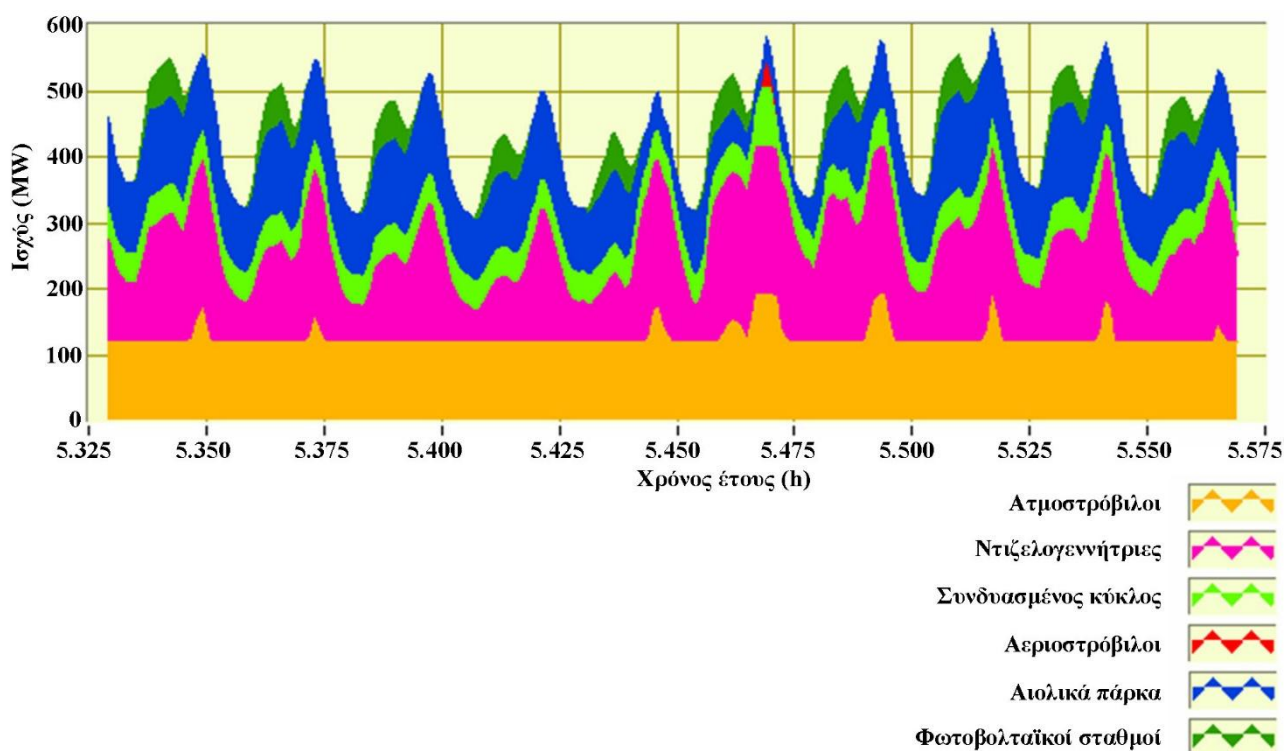
Υδροστροβίλοι

Ο ρόλος των υδροστροβίλων έχει ήδη περιγραφεί ανωτέρω. Τα άριστα χαρακτηριστικά τους αναφορικά με τη διαδικασία εκκίνησης και το χρόνο απόκρισης στις μεταβολές του φορτίου, σε συνδυασμό με το χαμηλό ειδικό κόστος παραγωγής, καθιστούν τους υδροστροβίλους ως εξαιρετικές μονάδες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, με τις οποίες εξασφαλίζεται τόσο η ασφάλης, όσο και η οικονομική λειτουργία του συστήματος, οι δύο δηλαδή βασικές παράμετροι διαμόρφωσης της σύνθεσης παραγωγής. Με βάση τα ανωτέρω, η ένταξη των υδροστροβίλων στην παραγωγή καθορίζεται πλέον αποκλειστικά από τη διαθεσιμότητα του εργαζόμενου μέσου. Στην περίπτωση αφθονίας παροχής ανεξάρτητα από την εποχή, οι υδροστροβίλοι μπορούν να λειτουργήσουν κάλλιστα ως μονάδες βάσης, αναλαμβάνοντας την κάλυψη των αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια για μεγάλες χρονικές περιόδους και συμβάλλοντας στην ελαχιστοποίηση του

ειδικού κόστους παραγωγής. Στην αντίθετη περίπτωση, όπου δηλαδή η διαθεσιμότητα του εργαζόμενου μέσου περιορίζεται κυρίως σε πλούσιες υδρολογικά εποχές (από φθινόπωρο έως άνοιξη), είναι προτιμότερη η αποθήκευσή του σε δεξαμενές και η αξιοποίησή του κατά τις περιόδους παρουσίας αιχμής ζήτησης. Στην Ελλάδα, όπου η διαθεσιμότητα του εργαζόμενου μέσου παρουσιάζεται μειωμένη το καλοκαίρι, όταν ακριβώς εμφανίζεται η μέγιστη ζήτηση ισχύος στο διασυνδεδεμένο σύστημα, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργεια κατά τις θερινές περιόδους αιχμής συμβάλει ουσιαστικά στη μείωση του συνολικού κόστους παραγωγής του συστήματος, μέσω της αποφυγής χρήσης θερμοηλεκτρικών μονάδων αιχμής με υψηλό ειδικό κόστος παραγωγής (αεριοστρόβιλοι).

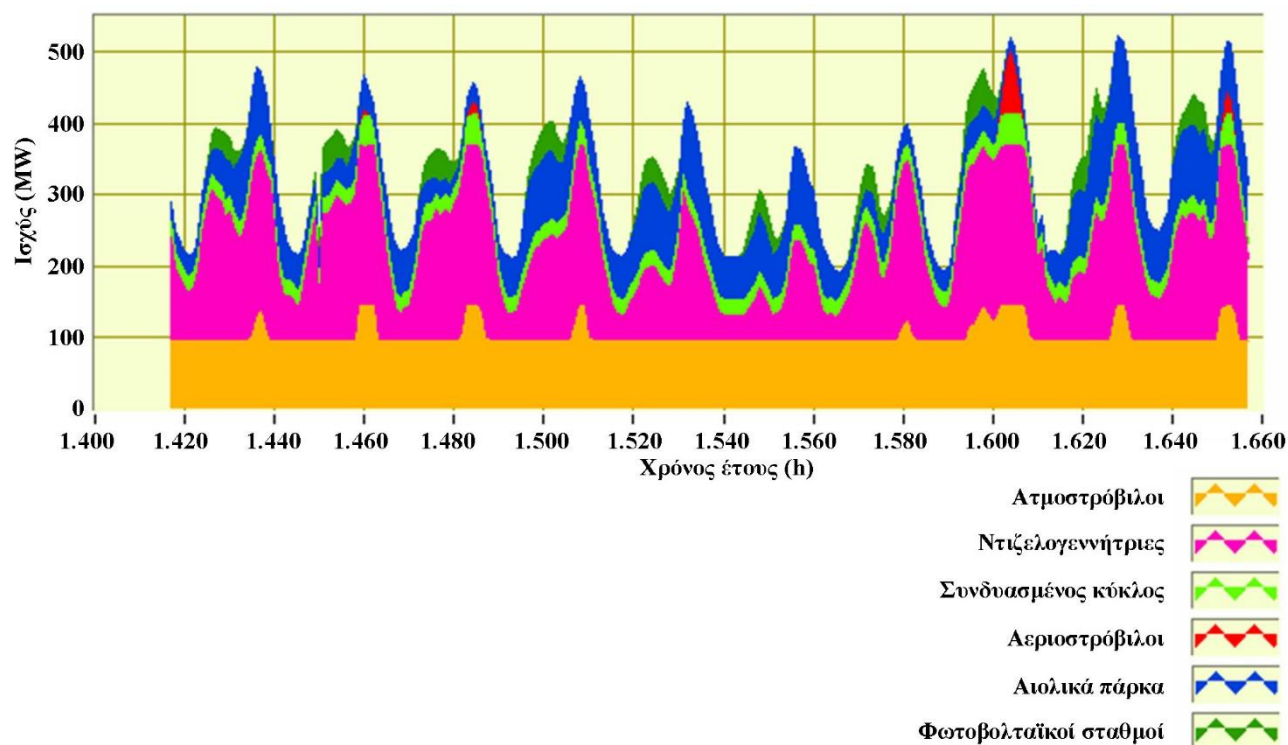
Προς εμπέδωση των ανωτέρω, στα σχήματα 2.28 και 2.29 παρουσιάζονται χαρακτηριστικές συνθέσεις παραγωγής που προέκυψαν από την προσομοίωση του αυτόνομου συστήματος Κρήτης για το έτος 2016. Οι συνθέσεις παραγωγής των σχημάτων αναφέρονται σε δύο διαφορετικές χρονικές περιόδους του έτους, ήτοι σε μία περίοδο υψηλής ζήτησης ισχύος (10-8-2016 έως 20-8-2016) και σε μία περίοδο χαμηλής ζήτησης ισχύος (1-3-2016 έως 10-3-2016).

Στη θερινή περίοδο (σχήμα 2.28), κατά τις πρώτες πρωινές ώρες, το φορτίο μειώνεται, με αποτέλεσμα να μειώνεται και η παραγωγή από τις ντιζελογεννήτριες, προκειμένου να διατηρηθεί ο συνδυασμένος κύκλος και οι ατμοστρόβιλοι στα τεχνικά ελάχιστα τους. Οι ατμοστρόβιλοι, οι ντιζελογεννήτριες και ο συνδυασμένος κύκλος εξαντλούν τη μέγιστη ικανότητα παραγωγής σε ένα μόνο εικοσιτετράωρο κατά τις ώρες αιχμής. Τότε εντάσσονται οι αεριοστρόβιλοι κατά τη βραδινή αιχμή, λόγω της έλλειψης παραγωγής από τους φωτοβολταϊκούς σταθμούς. Τις περιόδους χαμηλής ζήτησης οι ατμοστρόβιλοι και ο συνδυασμένος κύκλος λειτουργούν στα τεχνικά ελάχιστα τους.



Σχήμα 2.28: Σύνθεση παραγωγής στο αυτόνομο σύστημα Κρήτης από 10-8-2016 έως 20-8-2016.

Κατά τη φθινοπωρινή περίοδο (σχήμα 2.29), οι ατμοστρόβιλοι και ο συνδυασμένος κύκλος διατηρούνται σχεδόν μόνιμα στα τεχνικά ελάχιστα τους, ενώ οι ντιζελογεννήτριες σπάνια εξαντλούν τη μέγιστη ικανότητα παραγωγής, παρακολουθώντας τις μεταβολές του φορτίου. Παρατηρείται ακόμα ότι η συνολική μέγιστη ικανότητα των ντιζελογεννητριών κατά τη φθινοπωρινή περίοδο είναι μικρότερη από την αντίστοιχη κατά τη θερινή περίοδο κατά περίπου 50MW. Τούτο οφείλεται στο ότι μία ντιζελογεννήτρια ισχύος 52MW έχει τεθεί εκτός λειτουργίας τη συγκεκριμένη περίοδο για λόγους προγραμματισμένης συντήρησης. Οι αεριοστρόβιλοι και πάλι εντάσσονται αποκλειστικά κατά τη διάρκεια των αιχμών ζήτησης ισχύος.



Σχήμα 2.29: Σύνθεση παραγωγής στο αυτόνομο σύστημα Κρήτης από 1-3-2016 έως 10-3-2016.

Και στις δύο χρονικές περιόδους η στιγμιαία διείσδυση αιολικής και φωτοβολταϊκής ισχύος δεν ξεπερνά το 30% της ζήτησης ισχύος για λόγους εξασφάλισης της δυναμικής ασφάλειας του συστήματος.

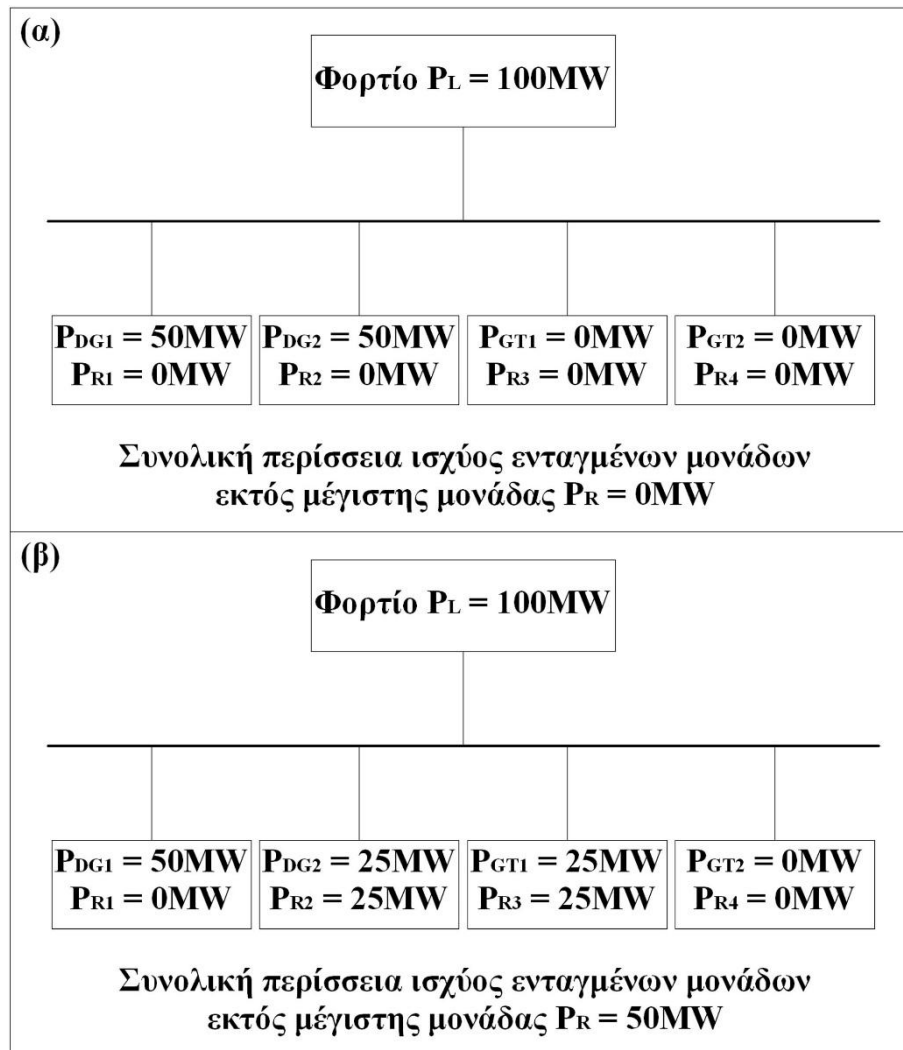
2.2.8. Διατήρηση στρεφόμενης εφεδρείας

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην ενότητα 2.1.4, αλλά και με βάση τους ιδιαίτερους κανόνες λειτουργίας του κάθε Σ.Η.Ε., διατηρείται πάντα στρεφόμενη εφεδρεία, η οποία, συνήθως, είναι ίση με τη μέγιστη ικανότητα παραγωγής της μεγαλύτερης ενταγμένης θερμοηλεκτρικής μονάδας. Η εφεδρεία αυτή διαμοιράζεται σε, κατά το δυνατόν, περισσότερες μονάδες, λαμβάνοντας υπόψη τις αρχές της οικονομικής λειτουργίας.

Η διατήρηση στρεφόμενης εφεδρείας είναι δυνατό να επηρεάσει τη σειρά ένταξης των μονάδων παραγωγής. Στόχος είναι το άθροισμα της διαθέσιμης στρεφόμενης εφεδρείας όλων των ενταγμένων θερμοηλεκτρικών μονάδων να δίνουν την ονομαστική ισχύ της μέγιστης ενταγμένης μονάδας. Όταν δεν ικανοποιείται αυτή η συνθήκη, τότε θα πρέπει κάποια ή κάποιες από τις ενταγμένες μονάδες να μειώσουν την παραγωγή τους, ενδεχομένως έως και μέχρι τα τεχνικά ελάχιστα τους, ώστε να δοθεί η δυνατότητα να ενταχθεί νέα μονάδα, με σκοπό να αυξηθεί η συνολική στρεφόμενη εφεδρεία και να ικανοποιηθεί ο ανωτέρω κανόνας. Αναλόγως λοιπόν με τις διαθέσιμες μονάδες σε ένα Σ.Η.Ε., είναι δυνατό να αλλάξει η σειρά ένταξης των μονάδων που αναφέρεται ανωτέρω, με βάση οικονομικά κριτήρια, προκειμένου να ικανοποιηθεί η ανάγκη για στρεφόμενη εφεδρεία.

Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα του σχήματος 2.30. Έστω ένα Σ.Η.Ε. με τέσσερις διαθέσιμες θερμοηλεκτρικές μονάδες, δύο ντιζελογεννήτριες και δύο αεριοστρόβιλους, με ονομαστική ισχύ για κάθε μία από αυτές 50MW και τεχνικό ελάχιστο 10MW για τις ντιζελογεννήτριες και 5MW για τους αεριοστρόβιλους. Κάποια χρονική στιγμή η ζήτηση ισχύος στο Σ.Η.Ε. είναι 100MW. Η σύνθεση ισχύος, που θα προέκυπτε με κριτήριο αποκλειστικά την ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής, θα ήταν η ένταξη των δύο ντιζελογεννητριών με 50MW η κάθε μία. Οι αεριοστρόβιλοι θα παρέμεναν σβηστοί. Στην περίπτωση αυτή αποφεύγεται η χρήση των αντιοικονομικών αεριοστροβίλων και επιτυγχάνεται λειτουργία των ντιζελογεννητριών στην ονομαστική ισχύ τους, συνεπώς με υψηλή απόδοση. Το συνολικό ειδικό κόστος παραγωγής σε ένα τέτοιο σενάριο θα ήταν το ελάχιστο δυνατό. Όμως η συνολική στρεφόμενη εφεδρεία,

δηλαδή το περιθώριο αύξησης της ισχύος των ενταγμένων μονάδων έως την ονομαστική τιμή τους, θα ήταν μηδέν. Σε μία πιθανή βλάβη κάποιας ντιζελογεννήτριας ή σε αύξηση της ζήτησης ισχύος, δε θα υπήρχε η δυνατότητα άμεσης απόκρισης από το σύστημα, το οποίο θα οδηγούταν μαθηματικά σε μερική ή και ολική κατάρρευση.



Σχήμα 2.30: Σενάρια σύνθεσης παραγωγής ισχύος σε ένα σύστημα με και χωρίς τη διατήρηση στρεφόμενης εφεδρείας.

Στο δεύτερο σενάριο που παρουσιάζεται στο σχήμα 2.30 η σύνθεση ισχύος έχει ως εξής:

- ντιζελογεννήτρια 1: παραγωγή ισχύος $P_{DG1} = 50\text{MW}$ (μέγιστη ενταγμένη μονάδα),
- ντιζελογεννήτρια 2: παραγωγή ισχύος $P_{DG2} = 25\text{MW}$, στρεφόμενη εφεδρεία $P_{R2} = 25\text{MW}$,
- αεριοστρόβιλος 1: παραγωγή ισχύος $P_{GT1} = 25\text{MW}$, στρεφόμενη εφεδρεία $P_{R3} = 25\text{MW}$,
- αεριοστρόβιλος 2: παραγωγή ισχύος $P_{GT2} = 0\text{MW}$, στρεφόμενη εφεδρεία $P_{R4} = 0\text{MW}$.

Στο σενάριο αυτό η συνολική στρεφόμενη εφεδρεία προέρχεται από τη ντιζελογεννήτρια 2 κατά 25MW και τον αεριοστρόβιλο 1 κατά 25MW επιπλέον και συνολικά ισούται με 50MW, καλύπτοντας την ονομαστική ισχύ της μέγιστης ενταγμένης μονάδας. Ο αεριοστρόβιλος 2 παραμένει σβηστός, συνεπώς δεν συμμετέχει ούτε στην παραγωγή ισχύος, ούτε στη διατήρηση στρεφόμενης εφεδρείας. Με το σενάριο αυτό τηρείται επιτυχώς ο κανόνας για διατήρηση στρεφόμενης εφεδρείας ίσης με την ονομαστική ισχύ της μέγιστης ενταγμένης μονάδας. Το σύστημα λειτουργεί σε ασφαλή κατάσταση. Ταυτόχρονα όμως είναι ευνόητο ότι, με τη συγκεκριμένη κατάσταση λειτουργίας, το ειδικό κόστος παραγωγής παρουσιάζεται αυξημένο, σε σχέση με το πρώτο σενάριο, τόσο λόγω της λειτουργίας του αεριοστρόβιλου, όσο και λόγω του

ότι οι δύο από τις τρεις ενταγμένες μονάδες, δηλαδή ο αεριοστρόβιλος και η ντιζελογεννήτρια 2, λειτουργούν σε φόρτιση 50% ως προς την ονομαστική, παρουσιάζοντας έτσι μειωμένο βαθμό απόδοσης.

Είναι προφανές ότι η διατήρηση στρεφόμενης εφεδρείας σε ένα Σ.Η.Ε. οδηγεί σε αύξηση του κόστους παραγωγής για δύο λόγους:

- Ενίοτε επιβάλλεται η πρόσκαιρη λειτουργία μονάδων με υψηλό ειδικό κόστος παραγωγής, χωρίς να έχει εξαντληθεί η δυνατότητα παραγωγής πιο οικονομικών μονάδων.
- Η στρεφόμενη εφεδρεία επιτυγχάνεται με την ταυτόχρονη λειτουργία πολλών θερμικών μονάδων σε χαμηλές φορτίσεις, ενδεχομένως στα τεχνικά ελάχιστα τους, οπωσδήποτε δε χαμηλότερα από την ονομαστική ισχύ. Σε αυτές τις περιπτώσεις η απόδοση των μονάδων μειώνεται, συνεπώς αυξάνεται η ειδική κατανάλωση καυσίμου (σε gr ανά παραγόμενη kWh) και το ειδικό κόστος παραγωγής.

Στο ερώτημα τι θα πρέπει να προτιμάται, η οικονομική λειτουργία του συστήματος ή η ασφάλειά του μέσω της διατήρησης στρεφόμενης εφεδρείας, η θεωρητική απάντηση είναι εύλογη:

Η ασφάλεια παραγωγής και η αδιάλειπτη παροχή ηλεκτρικής ισχύος προς την κατανάλωση αποτελεί τον ύψιστο στόχο ενός Σ.Η.Ε., συνεπώς ιεραρχείται υψηλότερα από το στόχο λειτουργίας του συστήματος με το ελάχιστο δυνατό κόστος παραγωγής.

Σε γενικές γραμμές τα Σ.Η.Ε. λειτουργούν με βάση τον ανωτέρω κανόνα. Ωστόσο, υπάρχουν ενίοτε περιπτώσεις που, υπό ευνοϊκές συνθήκες λειτουργίας, που τέτοιες μπορεί να είναι οι καλές καιρικές συνθήκες, η αναμονή ήπιων διακυμάνσεων στη ζήτηση, οι ταχείς ενταγμένες μονάδες κλπ, είναι δυνατό οι διαχειριστές των Σ.Η.Ε., με βάση την εμπειρία τους, να αναλάβουν την πρωτοβουλία να παρεκκλίνουν από τον ανωτέρω κανόνα, προς όφελος της οικονομικότερης λειτουργίας. Οι περιπτώσεις αυτές δεν μπορούν να καταγραφούν αναλυτικά. Προκύπτουν από την υπερπολύτιμη και μακρόχρονη εμπειρία των διαχειριστών των Σ.Η.Ε. και επιτρέπουν την ασφαλή λειτουργία τους χωρίς την αυστηρή τήρηση του ανωτέρω κανόνα.

2.3. Παραδείγματα σύνθεσης παραγωγής

Στην παρούσα ενότητα, προς εμπέδωση των ανωτέρω, θα δοθούν μερικά παραδείγματα προσέγγισης της βέλτιστης σύνθεσης ισχύος σε ένα Σ.Η.Ε., με κριτήρια την αδιάλειπτη και ασφαλή παροχή ηλεκτρικής ισχύος προς την κατανάλωση και την κατά το δυνατό μείωση του κόστους παραγωγής.

Έστω λοιπόν μη διασυνδεδεμένο Σ.Η.Ε., στο οποίο υπάρχουν διαθέσιμοι σήμερα οι κάτωθι τύποι θερμοηλεκτρικών μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, με τις αντίστοιχες τιμές για την ονομαστική ισχύ τους και τα τεχνικά ελάχιστα τους.

Πίνακας 2.4: Σύνθεση θερμοηλεκτρικών σταθμών μη διασυνδεδεμένου Σ.Η.Ε.

A/A	Τύπος θερμοηλεκτρικής μονάδας	Αριθμός μονάδων	Τεχνικό ελάχιστο μονάδας (MW)	Ονομαστική ισχύς μονάδας (MW)
1	Ατμοστρόβιλοι	5	6,00	20,00
2	Ντιζελογεννήτριες	2	10,00	50,00
3	Ντιζελογεννήτριες	4	3,00	10,00
4	Συνδυασμένος κύκλος	2 αεριοστρόβιλοι	7,00	40,00
		1 ατμοστρόβιλος	6,00	40,00
5	Αεριοστρόβιλοι	5	5,00	40,00

Οι θερμοηλεκτρικές μονάδες του πίνακα 2.4 παρουσιάζουν τους κάτωθι βαθμούς απόδοσης στις αντίστοιχες φορτίσεις:

Πίνακας 2.5: Βαθμοί απόδοσης θερμοηλεκτρικών μονάδων Σ.Η.Ε. σε διαφορετικές φορτίσεις.

Α/Α	Τύπος θερμοηλεκτρικής μονάδας	Φόρτιση (% επί της ονομαστικής ισχύος)		
		30	70	100
1	Ατμοστρόβιλοι	32,44	34,43	35,17
2	Ντιζελογεννήτριες	42,22	46,62	46,54
3	Συνδυασμένος κύκλος	30,91	40,74	44,18
4	Αεριοστρόβιλοι	21,16	31,11	35,59

Τέλος στον πίνακα 2.6 δίνεται ο τύπος καυσίμου που καταναλώνεται από κάθε θερμοηλεκτρική μονάδα, η θερμογόνος ικανότητά του και μία ενδεικτική τιμή του το 2014. Πέραν των παρουσιαζόμενων θερμοηλεκτρικών μονάδων, έστω ότι στο εξεταζόμενο Σ.Η.Ε. έχουν ενταχθεί στην παραγωγή 170MW αιολικών πάρκων.

Πίνακας 2.6: Τύπος καταναλωθέντος καυσίμου, θερμογόνος ικανότητα και τιμή αγοράς ανά μονάδα παραγωγής.

Α/Α	Τύπος θερμοηλεκτρικής μονάδας	Τύπος καυσίμου	Θερμογόνος ικανότητα	Τιμή
1	Ατμοστρόβιλοι	Μαζούτ	11,36 kWh/kg	0,50 €/kg
2	Ντιζελογεννήτριες	Μαζούτ	11,36 kWh/kg	0,50 €/kg
3	Συνδυασμένος κύκλος	Πετρέλαιο (Diesel)	10,07 kWh/lt	0,95 €/lt
4	Αεριοστρόβιλοι	Πετρέλαιο (Diesel)	10,07 kWh/lt	0,95 €/lt

Ζητείται η βέλτιστη σύνθεση παραγωγής ισχύος για τις περιπτώσεις μέσης ωριαίας ζήτησης ισχύος και διαθεσιμότητας παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος από τα εγκατεστημένα αιολικά πάρκα του πίνακα 2.7. Τονίζεται ότι οι καταστάσεις λειτουργίας του πίνακα 2.7 θεωρούνται ως μέσες ωριαίες.

Πίνακας 2.7: Εξεταζόμενες περιπτώσεις λειτουργίας Σ.Η.Ε.

Α/Α	Ζήτηση ισχύος (MW)	Διαθέσιμη ηλεκτρική ισχύς από αιολικά πάρκα (MW)
1	250,00	110,00
2	410,00	100,00
3	520,00	125,00

Θα ληφθεί υπόψη η εξασφάλιση της ασφάλειας του συστήματος και η ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής. Για την εξασφάλιση της ασφάλειας του συστήματος, το μέγιστο ποσοστό στιγμιαίας διείσδυσης από μονάδες μη εγγυημένης παραγωγής, δηλαδή των αιολικών πάρκων, θα θεωρηθεί ίσο με το $\delta_{\max} = 30\%$ ως προς τη ζήτηση ισχύος. Επίσης θα επιχειρηθεί η διατήρηση στρεφόμενης εφεδρείας ίσης με την ονομαστική ισχύ της μέγιστης ενταγμένης μονάδας, κατά πρώτο λόγο, και, εφόσον είναι εφικτό, με την ενταγμένη ισχύ των μονάδων Α.Π.Ε.

1^η περίπτωση:

Έχουμε:

ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος P_d	: 250MW
διαθέσιμη ισχύς από αιολικά πάρκα P_w	: 110MW
μέγιστη δυνάμενη να διεισδύσει μη εγγυημένη ισχύς $P_{w\delta}$: $0,30 \times 250\text{MW} = 75\text{MW}$.

Η μέγιστη δυνάμενη να διεισδύσει μη εγγυημένη ισχύς (75MW) είναι μικρότερη από τη διαθέσιμη ισχύ Α.Π.Ε. Συνεπώς η ισχύς από τα αιολικά πάρκα που θα διεισδύσει ισούται με τη μέγιστη δυνατή, δηλαδή:

$$P_{w\delta} = 75\text{MW}.$$

Η απόρριψη αιολικής ισχύος ισούται με:

$$110\text{MW} - 75\text{MW} = 35\text{MW},$$

η οποία αντιστοιχεί σε ποσοστό απόρριψης ως προς την αρχική διαθέσιμη ισχύ από τα αιολικά πάρκα:

$$\alpha = \frac{P_w - P_{w\delta}}{P_w} = \frac{P_{el}}{P_{ch}} = 31,82\% .$$

Η ποσοστιαία στιγμιαία διείσδυση μονάδων Α.Π.Ε. ως προς τη ζήτηση ισούται προφανώς με:

$$\delta = \frac{P_{w\delta}}{P_d} = 30,00\% = \delta_{\max}$$

Μετά τον υπολογισμό της διείσδυσης των αιολικών πάρκων (μονάδες μη εγγυημένης παραγωγής), παραμένουν άλλα $250 - 75 = 175\text{MW}$ ηλεκτρικής ισχύος που πρέπει να παραχθούν από τις θερμοηλεκτρικές μονάδες. Για τον καθορισμό της σύνθεσης παραγωγής εργαζόμαστε ως εξής:

- Καταρχήν υπολογίζουμε τα συνολικά τεχνικά ελάχιστα των θερμοηλεκτρικών μονάδων που δεν μπορούν να διακόψουν τη λειτουργία τους. Τούτες είναι οι ατμοστρόβιλοι και ο συνδυασμένος κύκλος. Αυτές οι μονάδες παρουσιάζουν συνολικά τεχνικά ελάχιστα:

$$5 \times 6\text{MW} + 2 \times 7\text{MW} + 6\text{MW} = 50\text{MW}.$$

Αφαιρούμενης της ισχύος, που αντιστοιχεί στα συνολικά τεχνικά ελάχιστα των ενταγμένων αργών μονάδων, η ζήτηση ισχύος που παραμένει ακόμα, για να καλυφθεί ισούται με $175 - 50 = 125\text{MW}$.

- Εντοπίζουμε τις θερμοηλεκτρικές μονάδες με το χαμηλότερο ειδικό κόστος παραγωγής. Τούτες είναι οι ντιζελογεννήτριες, δεδομένου του βαθμού απόδοσής τους (άνω του 40%) και του τύπου καυσίμου που καταναλώνουν (μαζούτ). Η συνολική ισχύς των ντιζελογεννητριών ισούται με 140MW , συνεπώς υπερβαίνει την ισχύ που μένει ακόμα να καλυφθεί. Οι δύο μεγάλες ντιζελογεννήτριες, με ονομαστική ισχύ 50MW , ως πιο αργές μονάδες, θα πρέπει να ενταχθούν πρώτες, ώστε να παίξουν το ρόλο μονάδων βάσης. Τα υπόλοιπα 25MW θα παραχθούν από τρεις μικρές ντιζελογεννήτριες, με τις δύο από αυτές να λειτουργούν στην ονομαστική ικανότητά τους (10MW) και την τρίτη στα 5MW .
- Έχοντας καλύψει τη συνολική ζήτηση ισχύος, μένει να υπολογιστεί η διαθέσιμη στρεφόμενη εφεδρεία. Τούτη υπολογίζεται ως εξής:

ατμοστρόβιλοι (αργή εφεδρεία) :	: 5 μονάδες x (20 – 6)MW = 70MW
ντιζελογεννήτριες (ταχεία εφεδρεία) :	: 1 μονάδα x (10 – 5)MW = 5MW
αεριοστρόβιλοι συνδυασμένου κύκλου (ταχεία εφεδρεία)	: 2 μονάδες x (40 – 7)MW = 66MW
ατμοστρόβιλος συνδυασμένου κύκλου (αργή εφεδρεία)	: 1 μονάδα x (40 – 6)MW = 34MW
συνολική ταχεία εφεδρεία	: 71MW
συνολική αργή εφεδρεία	: 104MW

Το σύνολο της ταχείας εφεδρείας υπερβαίνει την ονομαστική ισχύ της μέγιστης ενταγμένης μονάδας, ενώ προσεγγίζει τη διείσδυση μη εγγυημένης ισχύος. Η συνολική διατήρηση στρεφόμενης εφεδρείας, μαζί με την αργή, θεωρείται ικανή για την αντιμετώπιση πιθανών σφαλμάτων παραγωγής. Η κατάσταση λειτουργίας του συστήματος κρίνεται ασφαλής.

Τα αποτελέσματα της ανωτέρω ανάλυσης συνοψίζονται στον πίνακα 2.8.

Πίνακας 2.8: Βέλτιστη σύνθεση παραγωγής I^{ns} εξεταζόμενης περίπτωσης λειτουργίας.

A/A	Τύπος θερμοηλεκτρικής μονάδας	Τεχνικό ελάχιστο (MW)	Ονομαστική ισχύς (MW)	Παραγωγή (MW)	Στρεφόμενη εφεδρεία (MW)
1	Ατμοστρόβιλος 1	6,00	20,00	6,00	14,00
2	Ατμοστρόβιλος 2	6,00	20,00	6,00	14,00
3	Ατμοστρόβιλος 3	6,00	20,00	6,00	14,00
4	Ατμοστρόβιλος 4	6,00	20,00	6,00	14,00
5	Ατμοστρόβιλος 5	6,00	20,00	6,00	14,00
6	Ντιζελογεννήτρια 1	10,00	50,00	50,00	0,00
7	Ντιζελογεννήτρια 2	10,00	50,00	50,00	0,00
8	Ντιζελογεννήτρια 3	3,00	10,00	10,00	0,00
9	Ντιζελογεννήτρια 4	3,00	10,00	10,00	0,00
10	Ντιζελογεννήτρια 5	3,00	10,00	5,00	5,00
11	Ντιζελογεννήτρια 6	3,00	10,00	0,00	0,00
12	Σ.Κ. – αεριοστρόβιλος 1	7,00	40,00	7,00	33,00
13	Σ.Κ. – αεριοστρόβιλος 2	7,00	40,00	7,00	33,00
14	Σ.Κ. – ατμοστρόβιλος	6,00	40,00	6,00	34,00
15	Αεριοστρόβιλος 1	5,00	40,00	0,00	0,00
16	Αεριοστρόβιλος 2	5,00	40,00	0,00	0,00
17	Αεριοστρόβιλος 3	5,00	40,00	0,00	0,00
18	Αεριοστρόβιλος 4	5,00	40,00	0,00	0,00
19	Αεριοστρόβιλος 5	5,00	40,00	0,00	0,00
20	Αιολικά πάρκα			75,00	0,00
			Σύνολα :	250,00	175,00

2^η περίπτωση:

Έχουμε:

ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος P_d : 410MWδιαθέσιμη ισχύς από αιολικά πάρκα P_w : 100MWμέγιστη δυνάμενη να διεισδύσει μη εγγυημένη ισχύς $P_{w\delta}$: $0,30 \times 410\text{MW} = 123\text{MW}$.

Η μέγιστη δυνάμενη να διεισδύσει μη εγγυημένη ισχύς (123MW) είναι μεγαλύτερη από τη διαθέσιμη ισχύ Α.Π.Ε. (100MW). Συνεπώς η ισχύς από τα αιολικά πάρκα που θα διεισδύσει ισούται με τη διαθέσιμη, δηλαδή:

$$P_{w\delta} = 100\text{MW}.$$

Η απόρριψη αιολικής ισχύος ισούται με μηδέν.

Η ποσοστιαία στιγμιαία διείσδυση μονάδων Α.Π.Ε. ως προς τη ζήτηση ισχύος ισούται με:

$$\delta = \frac{P_{w\delta}}{P_d} = 24,39\%$$

Μετά τον υπολογισμό της διείσδυσης των αιολικών πάρκων (μονάδες μη εγγυημένης παραγωγής), παραμένουν άλλα $410 - 100 = 310\text{MW}$ ηλεκτρικής ισχύος που πρέπει να παραχθούν από τις θερμοηλεκτρικές μονάδες. Για τον καθορισμό της σύνθεσης παραγωγής εργαζόμαστε ξανά ως εξής:

- Καταρχήν υπολογίζουμε τα συνολικά τεχνικά ελάχιστα των θερμοηλεκτρικών μονάδων που δεν μπορούν να σβήσουν. Τούτες είναι οι ατμοστρόβιλοι και ο συνδυασμένος κύκλος, με συνολικά τεχνικά ελάχιστα:

$$5 \times 6\text{MW} + 2 \times 7\text{MW} + 6\text{MW} = 50\text{MW}.$$

Αφαιρούμενης της ισχύος που αντιστοιχεί στα συνολικά τεχνικά ελάχιστα των ενταγμένων αργών μονάδων, η ζήτηση ισχύος που παραμένει ακόμα, για να καλυφθεί ισούται με $310 - 50 = 260\text{MW}$.

- Οι θερμοηλεκτρικές μονάδες με το χαμηλότερο ειδικό κόστος παραγωγής είναι οι ντιζελογεννήτριες, με συνολική μέγιστη ικανότητα παραγωγής ισχύος 140MW . Η ισχύς αυτή δεν καλύπτει την ισχύ που υπολείπεται από τη συνολική ζήτηση. Σε πρώτη λοιπόν προσέγγιση εντάσσονται όλες οι ντιζελογεννήτριες στην ονομαστική ισχύ τους. Η ισχύς, που θα υπολείπεται ακόμα, θα είναι $260 - 140 = 120\text{MW}$.
- Οι αμέσως επόμενες πιο οικονομικές μονάδες είναι οι ατμοστρόβιλοι, με συνολική ακόμα διαθέσιμη ισχύ, αφαιρουμένων των τεχνικών ελαχίστων που έχουν ήδη συνυπολογιστεί, ίση με $5 \times 14\text{MW} = 70\text{MW}$. Εντάσσοντας και τους ατμοστρόβιλους στην παραγωγή θα υπολείπονται ακόμα $120 - 70 = 50\text{MW}$.
- Η μοναδική επιλογή που υπάρχει ακόμα, πριν την ένταξη των μονάδων αιχμής (αεριοστρόβιλων), είναι η αύξηση της ισχύος του συνδυασμένου κύκλου. Ο συνδυασμένος κύκλος παράγει ήδη 20MW λόγω λειτουργίας στα τεχνικά ελάχιστα. Συνεπώς, για να δώσει επιπλέον 50MW θα πρέπει συνολικά να αυξηθεί η ισχύς του στα 70MW . Η ισχύς αυτή μπορεί να παραχθεί από το συνδυασμένο κύκλο με παραγωγή 24MW από κάθε αεριοστρόβιλο (σύνολο και από τους δύο 48MW) και επιπλέον παραγωγή από τον ατμοστρόβιλο 22MW , δεδομένου του ότι η ισχύς του ατμοστρόβιλου του συνδυασμένου κύκλου ισούται περίπου με τον ήμισυ της συνολικής παραγωγής ισχύος από τους αεριοστρόβιλους.
- Έχοντας καλύψει τη συνολική ζήτηση ισχύος, μένει να υπολογιστεί η διαθέσιμη στρεφόμενη εφεδρεία. Τούτη υπολογίζεται ως εξής:

αεριοστρόβιλοι συνδυασμένου κύκλου (ταχεία εφεδρεία)	: 2 μονάδες x $(40 - 24)\text{MW} = 32\text{MW}$
ατμοστρόβιλος συνδυασμένου κύκλου (αργή εφεδρεία)	: 1 μονάδα x $(40 - 22)\text{MW} = 18\text{MW}$
συνολική ταχεία εφεδρεία	: 32MW
συνολική αργή εφεδρεία	: 18MW

Το σύνολο της εφεδρείας (αργής και ταχείας) ισούται με την ονομαστική ισχύ της μέγιστης ενταγμένης μονάδας. Το επίπεδο ασφάλειας κρίνεται ικανοποιητικό. Η απαίτηση για υψηλότερη στρεφόμενη εφεδρεία προϋποθέτει την ένταξη των αεριοστρόβιλων, γεγονός που συνεπάγεται τη σημαντική αύξηση του κόστους παραγωγής. Για το λόγο αυτό δεν επιλέγεται.

Τα αποτελέσματα της ανωτέρω ανάλυσης συνοψίζονται στον πίνακα 2.9.

Πίνακας 2.9: Βέλτιστη σύνθεση παραγωγής 2^{ης} εξεταζόμενης περίπτωσης λειτουργίας.

A/A	Τύπος θερμοηλεκτρικής μονάδας	Τεχνικό ελάχιστο (MW)	Ονομαστική ισχύς (MW)	Παραγωγή (MW)	Στρεφόμενη εφεδρεία (MW)
1	Ατμοστρόβιλος 1	6,00	20,00	20,00	0,00
2	Ατμοστρόβιλος 2	6,00	20,00	20,00	0,00
3	Ατμοστρόβιλος 3	6,00	20,00	20,00	0,00
4	Ατμοστρόβιλος 4	6,00	20,00	20,00	0,00
5	Ατμοστρόβιλος 5	6,00	20,00	20,00	0,00
6	Ντιζελογεννήτρια 1	10,00	50,00	50,00	0,00
7	Ντιζελογεννήτρια 2	10,00	50,00	50,00	0,00
8	Ντιζελογεννήτρια 3	3,00	10,00	10,00	0,00
9	Ντιζελογεννήτρια 4	3,00	10,00	10,00	0,00
10	Ντιζελογεννήτρια 5	3,00	10,00	10,00	0,00
11	Ντιζελογεννήτρια 6	3,00	10,00	10,00	0,00
12	Σ.Κ. – αεριοστρόβιλος 1	7,00	40,00	24,00	16,00
13	Σ.Κ. – αεριοστρόβιλος 2	7,00	40,00	24,00	16,00
14	Σ.Κ. – ατμοστρόβιλος	6,00	40,00	22,00	18,00
15	Αεριοστρόβιλος 1	5,00	40,00	0,00	0,00
16	Αεριοστρόβιλος 2	5,00	40,00	0,00	0,00
17	Αεριοστρόβιλος 3	5,00	40,00	0,00	0,00
18	Αεριοστρόβιλος 4	5,00	40,00	0,00	0,00
19	Αεριοστρόβιλος 5	5,00	40,00	0,00	0,00
20	Αιολικά πάρκα			100,00	0,00
			Σύνολα :	410,00	50,00

3^η περίπτωση:

Έχουμε:

ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος P_d : 520MW

διαθέσιμη ισχύς από αιολικά πάρκα P_w : 125MW

μέγιστη δυνάμενη να διεισδύσει μη εγγυημένη ισχύς $P_{w\delta}$: $0,30 \times 520\text{MW} = 156\text{MW}$.

Η μέγιστη δυνάμενη να διεισδύσει μη εγγυημένη ισχύς (156MW) είναι μεγαλύτερη από τη διαθέσιμη ισχύ Α.Π.Ε. (125MW). Συνεπώς η ισχύς από τα αιολικά πάρκα που θα διεισδύσει ισούται με τη διαθέσιμη, δηλαδή:

$$P_{w\delta} = 125\text{MW}.$$

Η απόρριψη αιολικής ισχύος ισούται με μηδέν.

Η ποσοστιαία στιγμιαία διείσδυση μονάδων Α.Π.Ε. ως προς τη ζήτηση ισχύος ισούται με:

$$\delta = \frac{P_{w\delta}}{P_d} = 24,04\%$$

Μετά τον υπολογισμό της διείσδυσης των αιολικών πάρκων (μονάδες μη εγγυημένης παραγωγής), παραμένουν άλλα $520 - 125 = 395\text{MW}$ ηλεκτρικής ισχύος που πρέπει να παραχθούν από τις θερμοηλεκτρικές μονάδες. Για τον καθορισμό της σύνθεσης παραγωγής εργαζόμαστε ξανά ως εξής:

- Καταρχήν υπολογίζουμε τα συνολικά τεχνικά ελάχιστα των θερμοηλεκτρικών μονάδων που δεν μπορούν να σβήσουν. Τούτες είναι οι ατμοστρόβιλοι και ο συνδυασμένος κύκλος, με συνολικά τεχνικά ελάχιστα:

$$5 \times 6\text{MW} + 2 \times 7\text{MW} + 6\text{MW} = 50\text{MW}.$$

Αφαιρούμενης της ισχύος που αντιστοιχεί στα συνολικά τεχνικά ελάχιστα των ενταγμένων αργών μονάδων, η ζήτηση ισχύος που παραμένει ακόμα για να καλυφθεί ισούται με $395 - 50 = 345\text{MW}$.

- Οι θερμοηλεκτρικές μονάδες με το χαμηλότερο ειδικό κόστος παραγωγής είναι οι ντιζελογεννήτριες, με συνολική μέγιστη ικανότητα παραγωγής ισχύος 140MW . Η ισχύς αυτή δεν καλύπτει την ισχύ που υπολείπεται από τη συνολική ζήτηση. Σε πρώτη λοιπόν προσέγγιση εντάσσονται όλες οι ντιζελογεννήτριες στην ονομαστική ισχύ τους. Η ισχύς που θα υπολείπεται ακόμα θα είναι $345 - 140 = 205\text{MW}$.
- Οι αμέσως επόμενες πιο οικονομικές μονάδες είναι οι ατμοστρόβιλοι, με συνολική ακόμα διαθέσιμη ισχύ, αφαιρουμένων των τεχνικών ελαχίστων που έχουν ήδη συνυπολογιστεί, ίση με $5 \times 14\text{MW} = 70\text{MW}$. Εντάσσοντας και τους ατμοστρόβιλους στην παραγωγή θα υπολείπονται ακόμα $205 - 70 = 135\text{MW}$.
- Η μοναδική επιλογή που υπάρχει ακόμα πριν την ένταξη των μονάδων αιχμής (αεριοστρόβιλων), είναι η αύξηση της ισχύος του συνδυασμένου κύκλου. Ο συνδυασμένος κύκλος παράγει ήδη 20MW , λόγω λειτουργίας στα τεχνικά ελάχιστα, και έχει συνολική ονομαστική ισχύ 120MW . Συνεπώς υπάρχει η δυνατότητα για επιπλέον παραγωγή ισχύος από το συνδυασμένο κύκλο ίση με 100MW , η οποία δεν επαρκεί για να καλύψει την υπολειπόμενη ζήτηση των 135MW . Άρα, με την εξάντληση της ικανότητας παραγωγής του συνδυασμένου κύκλου, δηλαδή με την επιπρόσθετη παραγωγή 100MW πέραν των τεχνικών ελαχίστων που ήδη συνυπολογιστεί, η εναπομένουσα ισχύς θα είναι $135 - 100 = 35\text{MW}$.
- Η μόνη επιλογή που μένει είναι η ένταξη των μονάδων αιχμής. Επιλέγονται δύο αεριοστρόβιλοι με παραγωγή 15MW και 20MW από τον καθένα.
- Έχοντας καλύψει τη συνολική ζήτηση ισχύος, υπολογίζεται η διαθέσιμη στρεφόμενη εφεδρεία ως εξής:

αεριοστρόβιλος	: 1 μονάδα x $(40 - 15)\text{MW} = 25\text{MW}$
αεριοστρόβιλος	: 1 μονάδα x $(40 - 20)\text{MW} = 20\text{MW}$
συνολική ταχεία εφεδρεία	: 45MW
συνολική αργή εφεδρεία	: 0MW

Το σύνολο της εφεδρείας (αργής και ταχείας) προσεγγίζει την ονομαστική ισχύ της μέγιστης ενταγμένης μονάδας. Για να καλυφθεί 100% θα χρειαστεί η ένταξη ενός ακόμα αεριοστρόβιλου, με ταυτόχρονο περιορισμό και των τριών πλέον ενταγμένων σε πολύ χαμηλές φορτίσεις, γεγονός που θα προκαλέσει σημαντική μείωση του βαθμού απόδοσης, αύξηση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου και, τελικά, του ειδικού κόστους παραγωγής. Για το λόγο αυτό επιλέγεται η ένταξη μόνο δύο αεριοστρόβιλων, καλύπτοντας την απαίτηση για στρεφόμενη εφεδρεία ως προς την ισχύ της μέγιστης ενταγμένης μονάδας σε ποσοστό 90% και ταυτόχρονα αποφεύγοντας την αύξηση του κόστους παραγωγής. Το επίπεδο ασφάλειας κρίνεται ικανοποιητικό.

Τα αποτελέσματα της ανωτέρω ανάλυσης συνοψίζονται στον πίνακα 2.10.

Πίνακας 2.10: Βέλτιστη σύνθεση παραγωγής 3^{ης} εξεταζόμενης περίπτωσης λειτουργίας.

A/A	Τύπος θερμοηλεκτρικής μονάδας	Τεχνικό ελάχιστο (MW)	Ονομαστική ισχύς (MW)	Παραγωγή (MW)	Στρεφόμενη εφεδρεία (MW)
1	Ατμοστρόβιλος 1	6,00	20,00	20,00	0,00
2	Ατμοστρόβιλος 2	6,00	20,00	20,00	0,00
3	Ατμοστρόβιλος 3	6,00	20,00	20,00	0,00
4	Ατμοστρόβιλος 4	6,00	20,00	20,00	0,00
5	Ατμοστρόβιλος 5	6,00	20,00	20,00	0,00
6	Ντιζελογεννήτρια 1	10,00	50,00	50,00	0,00
7	Ντιζελογεννήτρια 2	10,00	50,00	50,00	0,00
8	Ντιζελογεννήτρια 3	3,00	10,00	10,00	0,00
9	Ντιζελογεννήτρια 4	3,00	10,00	10,00	0,00
10	Ντιζελογεννήτρια 5	3,00	10,00	10,00	0,00
11	Ντιζελογεννήτρια 6	3,00	10,00	10,00	0,00
12	Σ.Κ. – αεριοστρόβιλος 1	7,00	40,00	40,00	0,00
13	Σ.Κ. – αεριοστρόβιλος 2	7,00	40,00	40,00	0,00
14	Σ.Κ. – ατμοστρόβιλος	6,00	40,00	40,00	0,00
15	Αεριοστρόβιλος 1	5,00	40,00	15,00	25,00
16	Αεριοστρόβιλος 2	5,00	40,00	20,00	20,00
17	Αεριοστρόβιλος 3	5,00	40,00	0,00	0,00
18	Αεριοστρόβιλος 4	5,00	40,00	0,00	0,00
19	Αεριοστρόβιλος 5	5,00	40,00	0,00	0,00
20	Αιολικά πάρκα			125,00	0,00
			Σύνολα :	520,00	45,00

2.4. Ωριαίος ενεργειακός υπολογισμός συστήματος

2.4.1. Περίπτωση λειτουργίας με αιολικά πάρκα

Σε συνέχεια του ανωτέρω παραδείγματος, στην ενότητα αυτή υπολογίζονται βασικά μεγέθη που χαρακτηρίζουν τη λειτουργία του συστήματος. Ο υπολογισμός θα γίνει ενδεικτικά για τη δεύτερη από τις τρεις προαναφερόμενες ωριαίες καταστάσεις λειτουργίας του, δηλαδή για μέση ωριαία ζήτηση ισχύος 410MW και διαθεσιμότητας ισχύος από τα αιολικά πάρκα 100MW. Για τη συγκεκριμένη κατάσταση λειτουργίας, με την ανάλυση που προηγήθηκε καταλήξαμε στη βέλτιστη σύνθεση παραγωγής που παρουσιάζεται στον πίνακα 2.9.

Τα μεγέθη που θα υπολογιστούν είναι τα ακόλουθα:

- η συνολική κατανάλωση πετρελαίου μαζούτ (σε kg) και ελαφρύ πετρελαίου (diesel) (σε lt)
- το συνολικό κόστος υγρών καυσίμων
- το συνολικό κόστος υγρών καυσίμων και αγοράς ενέργειας από τα αιολικά πάρκα, αν η τιμή πώλησης της παραγόμενης ενέργειας από τα αιολικά πάρκα είναι 0,095€/kWh
- το μέσο ωριαίο ειδικό κόστος παραγωγής σε €/kWh για:
 - κάθε τύπο θερμοηλεκτρικής μονάδας χωριστά,
 - το σύνολο των θερμοηλεκτρικών μονάδων,
 - το σύνολο των μονάδων παραγωγής.

Οι υπολογισμοί για τα κόστη και τα ειδικά κόστη παραγωγής θα εκτελεστούν, λαμβάνοντας υπόψη μόνο τα κόστη καυσίμων και αγοράς ενέργειας αιολικών πάρκων. Θα αγνοηθούν δηλαδή για το θερμοηλεκτρικό σύστημα όλες οι υπόλοιπες δαπάνες διαμόρφωσης του συνολικού κόστους παραγωγής (αποσβέσεις εξοπλισμού, συντηρήσεις μονάδων, μισθοδοσία κλπ). Θα πρέπει άλλωστε να τονιστεί ότι για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από θερμοηλεκτρικές μονάδες, η βασική παράμετρος διαμόρφωσης του

κόστους παραγωγής είναι το κόστος κατανάλωσης καυσίμου. Η συμβολή των υπόλοιπων δαπανών στη συνολική διαμόρφωση του κόστους παραγωγής είναι μικρή. Για την εκτέλεση των ανωτέρω υπολογισμών θα ληφθούν υπόψη τα δεδομένα για τους βαθμούς απόδοσης, τις θερμογόνες ικανότητες και τις τιμές αγοράς των καυσίμων που έχουν παρουσιαστεί στους πίνακες 2.5 και 2.6.

α. Συνολική κατανάλωση πετρελαίου μαζούτ και ντίζελ

Αν μία θερμοηλεκτρική μονάδα παράγει ηλεκτρική ισχύ P_{el} επί χρόνο t , με βαθμό απόδοσης η_{el} και θερμογόνο ικανότητα H_u , η κατανάλωση μάζας m_f ή όγκου V_f καυσίμου (ανάλογα με το αν η θερμογόνος ικανότητα δίνεται ανά μονάδα μάζας ή όγκου καυσίμου αντίστοιχα) δίνεται από τη σχέση (λύνοντας τη σχέση 2.10 που έχει παρουσιαστεί προηγουμένως):

$$m_f \text{ (ή } V_f) = \frac{P_{el} \cdot t}{\eta_{el} \cdot H_u} \quad (2.12)$$

Με βάση τη σύνθεση παραγωγής του πίνακα 2.9:

- Ατμοστρόβιλοι

Οι ατμοστρόβιλοι λειτουργούν όλοι στην ονομαστική ισχύ τους, δηλαδή με φόρτιση ως προς την ονομαστική ικανότητά τους 100%, συνεπώς, με βάση τον πίνακα 2.5, ο βαθμός απόδοσης με τον οποίο λειτουργούν ισούται με 35,17%.

Η συνολική ισχύς παραγωγής ισούται με 100MW και η θερμογόνος ικανότητα του μαζούτ δίνεται από τον πίνακα 2.6 ίση με 11,36kWh/kg. Με βάση τη σχέση 2.12, η ωριαία κατανάλωση καυσίμου, για ωριαία λειτουργία των μονάδων ($t = 1h$), ισούται:

$$m_{f-ST} = \frac{P_{el} \cdot t}{\eta_{el} \cdot H_u} \Leftrightarrow m_{f-ST} = \frac{100 \cdot 10^3 \text{ kW} \cdot 1h}{0,3517 \cdot 11,36 \text{ kWh/kg}} \Leftrightarrow m_{f-ST} = 25.029,33 \text{ kg}$$

- Ντιζελογεννήτριες

Οι ντιζελογεννήτριες λειτουργούν, επίσης, όλες στην ονομαστική ισχύ τους, δηλαδή με φόρτιση ως προς την ονομαστική ικανότητά τους 100%, συνεπώς, με βάση τον πίνακα 2.5, ο βαθμός απόδοσης με τον οποίο λειτουργούν ισούται με 46,54%.

Η συνολική ισχύς παραγωγής ισούται με 140MW και η θερμογόνος ικανότητα του μαζούτ δίνεται από τον πίνακα 2.6 ίση με 11,36kWh/kg. Με βάση τη σχέση 2.12, η ωριαία κατανάλωση καυσίμου, για ωριαία λειτουργία των μονάδων ($t = 1h$), ισούται:

$$m_{f-DG} = \frac{P_{el} \cdot t}{\eta_{el} \cdot H_u} \Leftrightarrow m_{f-DG} = \frac{140 \cdot 10^3 \text{ kW} \cdot 1h}{0,4654 \cdot 11,36 \text{ kWh/kg}} \Leftrightarrow m_{f-DG} = 26.480,33 \text{ kg}$$

- Συνδυασμένος κύκλος

Η συνολική παραγωγή ισχύος από το συνδυασμένο κύκλο ισούται με 70MW. Η ισχύς αυτή αντιστοιχεί σε φόρτιση της μονάδας στο 58,33% ως προς την ονομαστική ικανότητά της. Στον πίνακα 2.5 δίνονται οι βαθμοί απόδοσης για φορτίσεις στο 30% (30,91%) και στο 70% (40,74%) της ονομαστικής ικανότητας της μονάδας. Με γραμμική παρεμβολή ανάμεσα στις δύο αυτές τιμές υπολογίζεται ο βαθμός απόδοσης της μονάδας για φόρτιση στο 58,33% ίσος με 37,87%.

Η θερμογόνος ικανότητα του ντίζελ δίνεται από τον πίνακα 2.6 ίση με 10,07kWh/lit. Με βάση τη σχέση 2.12, η ωριαία κατανάλωση καυσίμου, για ωριαία λειτουργία της μονάδας ($t = 1h$), ισούται:

$$V_{f-CC} = \frac{P_{el} \cdot t}{\eta_{el} \cdot H_u} \Leftrightarrow V_{f-CC} = \frac{70 \cdot 10^3 \text{ kW} \cdot 1\text{h}}{0,3787 \cdot 10,07 \text{ kWh/l}} \Leftrightarrow V_{f-CC} = 18.355,80 \text{ lt}.$$

Με βάση τα ανωτέρω αποτελέσματα υπολογίζονται τελικά:

- συνολική κατανάλωση μαζούτ:

$$m_f = m_{f-ST} + m_{f-DG} \Leftrightarrow m_f = (25.029,33 + 26.480,33) \text{ kg} \Leftrightarrow m_f = 51.509,66 \text{ kg}$$

- συνολική κατανάλωση ντίζελ:

$$V_f = V_{f-CC} \Leftrightarrow V_f = 18.355,80 \text{ lt}.$$

β. Συνολικό κόστος υγρών καυσίμων

Οι τιμές αγοράς των υγρών καυσίμων δίνονται στον πίνακα 2.6 ίσες με 0,50€/kg για το μαζούτ και 0,95€/lt για το ντίζελ. Με βάση τις τιμές αυτές, τα συνολικά κόστη υγρών καυσίμων υπολογίζονται ως εξής:

- Ατμοστρόβιλοι

$$K_{f-ST} = p_{f-m} \cdot m_{f-ST} \Leftrightarrow K_{f-ST} = 0,50 \text{ €/kg} \cdot 25.029,33 \text{ kg} \Leftrightarrow K_{f-ST} = 12.514,67 \text{ €}.$$

- Ντιζελογεννήτριες

$$K_{f-DG} = p_{f-m} \cdot m_{f-DG} \Leftrightarrow K_{f-DG} = 0,50 \text{ €/kg} \cdot 26.480,33 \text{ kg} \Leftrightarrow K_{f-DG} = 13.240,17 \text{ €}.$$

- Συνδυασμένος κύκλος

$$K_{f-CC} = p_{f-d} \cdot V_{f-CC} \Leftrightarrow K_{f-CC} = 0,95 \text{ €/lt} \cdot 18.355,80 \text{ lt} \Leftrightarrow K_{f-CC} = 17.438,01 \text{ €}.$$

Με βάση τα ανωτέρω αποτελέσματα υπολογίζεται τελικά το συνολικό κόστος υγρών καυσίμων:

$$K_f = K_{f-ST} + K_{f-DG} + K_{f-CC} \Leftrightarrow K_f = (12.514,67 + 13.240,17 + 17.438,01) \text{ €} \Leftrightarrow K_f = 43.192,85 \text{ €}$$

γ. Συνολικό κόστος υγρών καυσίμων και αγοράς ενέργειας αιολικών πάρκων

Για παραγωγή ισχύος από τα αιολικά πάρκα ίση με 100MW επί μία ώρα, η συνολική παραγωγή ενέργειας προκύπτει 100MWh. Με τιμή αγοράς της ενέργειας από τα αιολικά πάρκα ίση με 0,095€/kWh, το συνολικό κόστος αγοράς ενέργειας των αιολικών πάρκων προκύπτει:

$$K_{WE} = p_{WE} \cdot E_{WP} \Leftrightarrow K_{WE} = 0,095 \text{ €/kWh} \cdot 100.000 \text{ kWh} \Leftrightarrow K_{WE} = 9.500,00 \text{ €}.$$

Το συνολικό κόστος καυσίμων και αγοράς ενέργειας από αιολικά πάρκα προκύπτει τελικά:

$$K_{TOT} = K_f + K_{WE} \Leftrightarrow K_{TOT} = (43.192,85 + 9.500,00) \text{ €} \Leftrightarrow K_{TOT} = 52.692,85 \text{ €}.$$

δ. Μέσο ωριαίο ειδικό κόστη παραγωγής

Το μέσο ωριαίο ειδικό κόστος παραγωγής μιας μονάδας, ή ενός συστήματος, προκύπτει ως το πηλίκο του κόστους παραγωγής συγκεκριμένης ποσότητας ενέργειας από τη μονάδα ή το σύστημα προς την ενέργεια αυτή:

$$c = \frac{K}{E_{el}} = \frac{K}{P_{el} \cdot t} \quad (2.13)$$

Με χρήση της ανωτέρω σχέσης υπολογίζονται τα ειδικά κόστη παραγωγής για κάθε μονάδα ξεχωριστά και για το σύνολό τους στην εξεταζόμενη κατάσταση λειτουργίας του συστήματος.

- Ατμοστρόβιλοι

$$c_{ST} = \frac{K_{f-ST}}{E_{el-ST}} = \frac{K_{f-ST}}{P_{el-ST} \cdot t} \Leftrightarrow c_{ST} = \frac{12.514,67\text{€}}{100 \cdot 10^3 \text{ kW} \cdot 1\text{h}} \Leftrightarrow c_{ST} = 0,1251\text{€/kWh}$$

- Ντιζελογεννήτριες

$$c_{DG} = \frac{K_{f-DG}}{E_{el-DG}} = \frac{K_{f-DG}}{P_{el-DG} \cdot t} \Leftrightarrow c_{DG} = \frac{13.240,17\text{€}}{140 \cdot 10^3 \text{ kW} \cdot 1\text{h}} \Leftrightarrow c_{DG} = 0,0946\text{€/kWh}$$

- Συνδυασμένος κύκλος

$$c_{CC} = \frac{K_{f-CC}}{E_{el-CC}} = \frac{K_{f-CC}}{P_{el-CC} \cdot t} \Leftrightarrow c_{CC} = \frac{17.438,01\text{€}}{70 \cdot 10^3 \text{ kW} \cdot 1\text{h}} \Leftrightarrow c_{CC} = 0,2491\text{€/kWh}.$$

- Σύνολο θερμικών μονάδων

Η συνολική ισχύς P_{TH} που παράγεται από τις θερμικές μονάδες, με βάση τον πίνακα 2.9, ισούται με 310MW. Το ειδικό κόστος παραγωγής υπολογίζεται ως:

$$c_{TH} = \frac{K_f}{E_{el-TH}} = \frac{K_f}{P_{el-TH} \cdot t} \Leftrightarrow c_{TH} = \frac{43.192,35\text{€}}{310 \cdot 10^3 \text{ kW} \cdot 1\text{h}} \Leftrightarrow c_{TH} = 0,1393\text{€/kWh}.$$

- Σύνολο μονάδων παραγωγής

Το συνολικό ειδικό κόστος παραγωγής υπολογίζεται, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις μονάδες παραγωγής, θερμικές και αιολικά πάρκα:

$$c_{TOT} = \frac{K_{TOT}}{E_{el-TOT}} = \frac{K_{TOT}}{P_{el-TOT} \cdot t} \Leftrightarrow c_{TOT} = \frac{52.692,35\text{€}}{410 \cdot 10^3 \text{ kW} \cdot 1\text{h}} \Leftrightarrow c_{TOT} = 0,1285\text{€/kWh}.$$

Αξιολογώντας τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στο παράδειγμα υπολογισμού, μπορούμε να καταλήξουμε στα εξής συμπεράσματα:

- Το χαμηλότερο ειδικό κόστος παραγωγής υπολογίστηκε για τις ντιζελογεννήτριες.
- Το υψηλότερο ειδικό κόστος παραγωγής εμφανίζεται στο συνδυασμένο κύκλο, λόγω της λειτουργίας του σε μερική φόρτιση και της κατανάλωσης ελαφρού καυσίμου.
- Εξαιρουμένων των ντιζελογεννητριών, όλες οι υπόλοιπες θερμικές μονάδες παρουσιάζουν ειδικά κόστη παραγωγής υψηλότερα από την τιμή αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από τα αιολικά πάρκα. Το γεγονός αυτό αποτυπώνεται και στα υπολογισθέντα ειδικά κόστη παραγωγής για το σύνολο των θερμικών μονάδων και για το σύνολο του συστήματος. Το συνολικό ειδικό κόστος

παραγωγής για το σύνολο του συστήματος, δηλαδή με τη συμμετοχή και των αιολικών πάρκων, υπολογίζεται χαμηλότερο από το αντίστοιχο συνολικό ειδικό κόστος μόνο για τις θερμικές μονάδες.

- Τα ανωτέρω μεγέθη είναι χαρακτηριστικά για τη λειτουργία Σ.Η.Ε. με κατανάλωση υγρών καυσίμων.

2.4.2. Περίπτωση λειτουργίας χωρίς αιολικά πάρκα

Αξίζει τον κόπο να εξεταστεί η περίπτωση λειτουργίας του Σ.Η.Ε. για την ίδια ζήτηση ισχύος (410MW), χωρίς όμως τη διαθεσιμότητα ισχύος από τα αιολικά πάρκα. Στην περίπτωση αυτή, ξεκινώντας από τη διαμόρφωση της βέλτιστης σύνθεσης παραγωγής, θα μπορούσαμε να πούμε:

- Δεδομένου ότι στην περίπτωση λειτουργίας του συστήματος με τα αιολικά πάρκα, οι ατμοστρόβιλοι και οι ντιζελογεννήτριες λειτούργησαν στις ονομαστικές φορτίσεις, είναι δεδομένο ότι και στη νέα εξεταζόμενη περίπτωση, χωρίς δηλαδή την παραγωγή ισχύος από τα αιολικά πάρκα, οι ατμοστρόβιλοι και οι ντιζελογεννήτριες θα λειτουργήσουν και πάλι στην ονομαστική ισχύ τους. Η συνολική παραγωγή ισχύος από τους δύο τύπους μονάδων θα είναι:

$$100\text{MW} + 140\text{MW} = 240\text{MW}.$$

Για την κάλυψη των 410MW ζήτησης ισχύος υπολείπονται ακόμα:

$$410\text{MW} - 240\text{MW} = 170\text{MW}.$$

- Η ονομαστική ισχύς του συνδυασμένου κύκλου (120MW) είναι μικρότερη από την ισχύ που υπολείπεται, για να καλυφθεί η ζήτηση. Συνεπώς και ο συνδυασμένος κύκλος θα λειτουργήσει πλέον στην ονομαστική ισχύ του. Με την ένταξη και του συνδυασμένου κύκλου θα υπολείπονται πλέον:

$$170\text{MW} - 120\text{MW} = 50\text{MW}.$$

- Η μόνη δυνατότητα κάλυψης της ισχύος των 50MW είναι οι αεριοστρόβιλοι. Λαμβάνοντας επίσης υπόψη, για την ανάγκη διατήρησης στρεφόμενης εφεδρείας, ότι η ονομαστική ισχύς της μέγιστης ενταγμένης μονάδας είναι 50MW (ντιζελογεννήτρια), θα ενταχθούν τελικά τρεις αεριοστρόβιλοι, με παραγωγή ισχύος 15MW, 15MW και 20MW και στρεφόμενη εφεδρεία που υπολογίζεται:

$$2 \times (40 - 15)\text{MW} + (40 - 20)\text{MW} = 70\text{MW}.$$

α. Καταναλώσεις και κόστη μαζούτ, ειδικά κόστη ατμοστροβίλων και ντιζελογεννητριών

Καθώς η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος από τους ατμοστρόβιλους και τις ντιζελογεννήτριες δεν έχουν αλλάξει σε σχέση με την κατάσταση λειτουργίας του Σ.Η.Ε. με τα αιολικά πάρκα, οι καταναλώσεις και τα κόστη μαζούτ, καθώς και τα ειδικά κόστη παραγωγής ατμοστροβίλων και ντιζελογεννητριών παραμένουν όπως έχουν υπολογιστεί παραπάνω.

β. Κατανάλωση ελαφρύ πετρελαίου (diesel)

- Συνδυασμένος κύκλος

Ο συνδυασμένος κύκλος λειτουργεί στην ονομαστική ισχύ του, δηλαδή με φόρτιση ως προς την ονομαστική ικανότητά του 100%, συνεπώς, με βάση τον πίνακα 2.5, ο βαθμός απόδοσης με τον οποίο λειτουργεί ισούται με 44,18%.

Η συνολική ισχύς παραγωγής ισούται με 120MW και η θερμογόνος ικανότητα του ντίζελ δίνεται από τον πίνακα 2.6 ίση με 10,07kWh/lit. Με βάση τη σχέση 2.12, η ωριαία κατανάλωση καυσίμου, για ωριαία λειτουργία της μονάδας ($t = 1\text{h}$), ισούται:

$$V_{f\text{-CC}} = \frac{P_{el} \cdot t}{\eta_{el} \cdot H_u} \Leftrightarrow V_{f\text{-CC}} = \frac{120 \cdot 10^3 \text{kW} \cdot 1\text{h}}{0,4418 \cdot 10,07 \text{kWh/lit}} \Leftrightarrow V_{f\text{-CC}} = 26.972,80 \text{lt}.$$

- Αεριοστρόβιλοι

Οι δύο από τους αεριοστρόβιλους λειτουργούν με ισχύ 15MW και ο τρίτος με ισχύ 20MW. Για ονομαστική ικανότητα ανά μονάδα αεριοστρόβιλου 40MW, οι ανωτέρω παραγωγές ηλεκτρικής ισχύος αντιστοιχούν σε φορτίσεις παραγωγή ισχύος ίσες με 37,5% και 50%. Στον πίνακα 2.5 δίνονται οι βαθμοί απόδοσης για φορτίσεις στο 30% (21,16%) και στο 70% (31,11%) της ονομαστικής ικανότητας του κάθε αεριοστρόβιλου. Με γραμμική παρεμβολή ανάμεσα στις δύο αυτές τιμές, υπολογίζεται ο βαθμός απόδοσης των αεριοστρόβιλων για φόρτιση στο 37,50% ίσος με 23,03% και για φόρτιση στο 50% ίσος με 26,14%.

Από τη συνολική ισχύ των 50MW που παράγεται από τους αεριοστρόβιλους, τα 30MW (2 μονάδες x 15MW έκαστη) παράγονται με βαθμό απόδοσης 23,03% και τα 20MW παράγονται με βαθμό απόδοσης 26,14%. Η θερμογόνος ικανότητα του ντίζελ δίνεται από τον πίνακα 2.6 ίση με 10,07kWh/lit. Με βάση τη σχέση 2.12, η ωριαία κατανάλωση καυσίμου για ωριαία λειτουργία της μονάδας ($t = 1h$) ισούται:

$$V_{f-GT1} = \frac{P_{el1} \cdot t}{\eta_{el} \cdot H_u} \Leftrightarrow V_{f-GT1} = \frac{30 \cdot 10^3 \text{ kW} \cdot 1h}{0,2303 \cdot 10,07 \text{ kWh/lit}} \Leftrightarrow V_{f-GT1} = 12.935,94 \text{ lit}$$

$$V_{f-GT2} = \frac{P_{el2} \cdot t}{\eta_{el} \cdot H_u} \Leftrightarrow V_{f-GT2} = \frac{20 \cdot 10^3 \text{ kW} \cdot 1h}{0,2614 \cdot 10,07 \text{ kWh/lit}} \Leftrightarrow V_{f-GT2} = 7.597,92 \text{ lit} .$$

Η συνολική κατανάλωση καυσίμου ντίζελ από τους αεριοστρόβιλους ισούται με:

$$V_{f-GT} = V_{f-GT1} + V_{f-GT2} \Leftrightarrow V_{f-GT} = (12.935,94 + 7.597,92) \text{ lit} \Leftrightarrow V_{f-GT} = 20.533,86 \text{ lit} .$$

Η συνολική κατανάλωση καυσίμου ντίζελ από το συνδυασμένο κύκλο και τους αεριοστρόβιλους ισούται με:

$$V_f = V_{f-CC} + V_{f-GT} \Leftrightarrow V_f = (26.972,80 + 20.533,86) \text{ lit} \Leftrightarrow V_f = 47.506,66 \text{ lit} .$$

γ. Συνολικό κόστος υγρών καυσίμων

Υπενθυμίζεται ότι οι τιμές αγοράς των υγρών καυσίμων δίνονται στον πίνακα 2.6 ίσες με 0,50€/kg για το μαζούτ και 0,95€/lit για το ντίζελ. Επίσης τα κόστη μαζούτ έχουν ήδη υπολογιστεί από την προηγούμενη περίπτωση λειτουργίας ίσα με:

- Ατμοστρόβιλοι

$$K_{f-ST} = 12.514,67 \text{ €} .$$

- Ντιζελογεννήτριες

$$K_{f-DG} = 13.240,17 \text{ €} .$$

Για τα κόστη ντίζελ έχουμε:

- Συνδυασμένος κύκλος

$$K_{f-CC} = p_{f-d} \cdot V_{f-CC} \Leftrightarrow K_{f-CC} = 0,95 \text{ €/lit} \cdot 26.972,80 \text{ lit} \Leftrightarrow K_{f-CC} = 25.624,16 \text{ €} .$$

- Αεριοστρόβιλοι

$$K_{f-GT} = p_{f-d} \cdot V_{f-GT} \Leftrightarrow K_{f-GT} = 0,95 \text{ €/lit} \cdot 20.533,86 \text{ lit} \Leftrightarrow K_{f-GT} = 19.507,17 \text{ €} .$$

Με βάση τα ανωτέρω αποτελέσματα υπολογίζεται τελικά το συνολικό κόστος υγρών καυσίμων:

$$K_f = K_{f-ST} + K_{f-DG} + K_{f-CC} + K_{f-GT} \Leftrightarrow$$

$$K_f = (12.514,67 + 13.240,17 + 25.624,16 + 19.507,17)\text{€} \Leftrightarrow K_f = 70.885,67\text{€}$$

Σε σχέση με την περίπτωση λειτουργίας του συστήματος με τη συμμετοχή των αιολικών πάρκων, προκύπτει αύξηση του συνολικού κόστους παραγωγής κατά:

$$\Delta K_f = (70.885,67 - 52.692,35)\text{€} \Leftrightarrow \Delta K_f = 18.193,32\text{€}$$

η οποία αντιστοιχεί σε ποσοστιαία αύξηση ως προς το κόστος λειτουργίας του συστήματος με τα αιολικά πάρκα ίση με 34,53%.

δ. Μέσα ωριαία ειδικά κόστη παραγωγής

Τα μέσα ωριαία ειδικά κόστη παραγωγής για τους ατμοστρόβιλους και τις ντιζελογεννήτριες παραμένουν όσο είχαν υπολογιστεί πριν, δηλαδή:

- Ατμοστρόβιλοι

$$c_{ST} = 0,1251\text{€/kWh}.$$

- Ντιζελογεννήτριες

$$c_{DG} = 0,0946\text{€/kWh}.$$

Για το συνδυασμένο κύκλο και τους αεριοστρόβιλους υπολογίζονται εκ νέου:

- Συνδυασμένος κύκλος

$$c_{CC} = \frac{K_{f-CC}}{E_{el-CC}} = \frac{K_{f-CC}}{P_{el-CC} \cdot t} \Leftrightarrow c_{CC} = \frac{25.624,16\text{€}}{120 \cdot 10^3 \text{kW} \cdot 1\text{h}} \Leftrightarrow c_{CC} = 0,2135\text{€/kWh}.$$

- Αεριοστρόβιλοι

$$c_{GT} = \frac{K_{f-GT}}{E_{el-GT}} = \frac{K_{f-GT}}{P_{el-GT} \cdot t} \Leftrightarrow c_{GT} = \frac{19.507,17\text{€}}{50 \cdot 10^3 \text{kW} \cdot 1\text{h}} \Leftrightarrow c_{GT} = 0,3901\text{€/kWh}.$$

- Σύνολο θερμικών μονάδων παραγωγής

Η συνολική ισχύς P_{TH} που παράγεται από τις θερμικές μονάδες ισούται με τη ζήτηση, δηλαδή 410MW. Το ειδικό κόστος παραγωγής υπολογίζεται ως:

$$c_{TH} = \frac{K_f}{E_{el-TH}} = \frac{K_f}{P_{el-TH} \cdot t} \Leftrightarrow c_{TH} = \frac{70.885,67\text{€}}{410 \cdot 10^3 \text{kW} \cdot 1\text{h}} \Leftrightarrow c_{TH} = 0,1729\text{€/kWh}.$$

- Μείωση εκπομπών αερίων ρύπων

Λαμβάνοντας τις ειδικές εκπομπές CO_2 ανά μονάδα καταναλωθέντος καυσίμου ως:

- $m_{gas-m} = 3,175 \text{ kg } CO_2 \text{ ανά kg μάζουτ}$
- $m_{gas-d} = 3,142 \text{ kg } CO_2 \text{ ανά lt ντίζελ}$

και καθώς η κατανάλωση μαζούτ για τις δύο περιπτώσεις λειτουργίας δεν αλλάζει, η μείωση εκπομπών αερίων ρύπων κατά την ωριαία λειτουργία του συστήματος λόγω της συμμετοχής των αιολικών πάρκων υπολογίζεται ως:

$$\Delta m_{\text{gas}} = m_{\text{gas-d}} \cdot \Delta V_f \Leftrightarrow \Delta m_{\text{gas}} = 3,142 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{lt}} \cdot (47.506,66 - 18.355,80) \text{lt}$$

$$\Leftrightarrow \Delta m_{\text{gas}} = 91,592 \text{tn CO}_2$$

Αξιολογώντας τα παραπάνω αποτελέσματα, αναφέρουμε τα εξής:

- Με τη συμμετοχή των αιολικών πάρκων στην παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος, δεδομένης της χαμηλότερης τιμής αγοράς της ενέργειας που παράγεται από αυτά σε σχέση με τα ειδικά κόστη παραγωγής των θερμοηλεκτρικών μονάδων, επιτυγχάνεται μείωση του συνολικού κόστους παραγωγής κατά την εξεταζόμενη ωριαία κατάσταση λειτουργίας κατά 34,5%.
- Με τη συμμετοχή των αιολικών πάρκων στην παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος κατά την ωριαία λειτουργία του συστήματος αποφεύγεται η απόρριψη 91,6tn CO₂ στην ατμόσφαιρα.
- Παρατηρείται η μείωση του ειδικού κόστους παραγωγής του συνδυασμένου κύκλου (0,2135€/kWh από 0,2491€/kWh) με τη λειτουργία του σε 100% φόρτιση από 58% που ήταν στην προηγούμενη περίπτωση.
- Αξιοσημείωτο είναι το πολύ υψηλό ειδικό κόστος παραγωγής των αεριοστροβίλων, γεγονός που καθιστά επιτακτικό τον κατά το δυνατό περιορισμό της χρήσης τους.
- Το ειδικό κόστος παραγωγής μιας θερμοηλεκτρικής μονάδας εξαρτάται πρακτικά από το σημείο λειτουργίας της, που συνεπάγεται το βαθμό απόδοσης της μονάδας, και από το είδος καυσίμου που χρησιμοποιείται (θερμογόνος ικανότητα και τιμή αγοράς).

2.5. Αριθμητική προσομοίωση ετήσιας λειτουργίας Σ.Η.Ε.

Στα ανωτέρω παραδείγματα υπολογίστηκαν οι βέλτιστες συνθέσεις παραγωγής σε διάφορες καταστάσεις λειτουργίας ενός Σ.Η.Ε. Επιπλέον, για δύο ωριαίες περιπτώσεις λειτουργίας, υπολογίστηκαν βασικά μεγέθη που απορρέουν από τη λειτουργία του συστήματος, όπως οι καταναλώσεις και τα κόστη καυσίμων, οι βαθμοί απόδοσης και τα μέσα ωριαία ειδικά κόστη παραγωγής ανά τύπο θερμοηλεκτρικών μονάδων.

Εφαρμόζοντας την ίδια διαδικασία, που περιγράφηκε στις παραπάνω ενότητες, για τη λειτουργία ενός Σ.Η.Ε. για ένα ολόκληρο το έτος και ανά χρονικό βήμα διακριτοποίησης, το οποίο συνήθως για τέτοιου είδους προβλήματα επιλέγεται να είναι ωριαίο, είναι δυνατός ο ακριβής υπολογισμός των ανωτέρω μεγεθών (καταναλώσεις καυσίμου, βαθμοί απόδοσης θερμοηλεκτρικών μονάδων) για κάθε χρονικό βήμα ξεχωριστά και αθροιστικά για όλο το έτος. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται *αριθμητική προσομοίωση της ετήσιας λειτουργίας Σ.Η.Ε.* και αποσκοπεί στο να προβλέψει, αν εκτελείται για μελλοντικά έτη, ή να αξιολογήσει, αν εκτελείται για παρελθόντα έτη, πώς θα λειτουργήσει ή πως λειτούργησε ένα Σ.Η.Ε., δεδομένων των βασικών κανόνων ένταξης των διαθέσιμων μονάδων, των κανόνων διατήρησης στρεφόμενης εφεδρείας κλπ.

Για την εκτέλεση μιας ετήσιας προσομοίωσης της λειτουργίας ενός Σ.Η.Ε. είναι απαραίτητα τα ακόλουθα δεδομένα:

1. ετήσια χρονοσειρά ζήτησης ισχύος μέσω ωριαίων τιμών
2. σύνθεση θερμοηλεκτρικών σταθμών (αριθμός και τύπος διαθέσιμων θερμοηλεκτρικών μονάδων)
3. για κάθε μονάδα τα ακόλουθα χαρακτηριστικά στοιχεία:
 - τεχνικό ελάχιστο,
 - ονομαστική ισχύς,
 - τύπος καταναλισκόμενου καυσίμου,

- διάγραμμα διακύμανσης βαθμού απόδοσης συναρτήσει της φόρτισης,
- σειρά ένταξης της μονάδας στην παραγωγή,
- τύπος και κατανάλωση καυσίμου κατά την εκκίνηση της μονάδας
 4. θερμογόνος ικανότητα κάθε χρησιμοποιούμενου τύπου καυσίμου,
 5. κανόνες διατήρησης στρεφόμενης εφεδρείας,
 6. μέση ετήσια τιμή αγοράς για κάθε τύπο καυσίμου στο εξεταζόμενο Σ.Η.Ε.,
 7. εγκατεστημένη ισχύς μονάδων μη εγγυημένης παραγωγής (συνήθως φωτοβολταϊκών σταθμών και αιολικών πάρκων),
 8. χρονοσειρές μέσων ωριαίων τιμών ετήσιας διαθεσιμότητας ισχύος από τις μονάδες Α.Π.Ε.
 9. τιμή αγοράς στο εν λόγω Σ.Η.Ε. της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από τις μονάδες Α.Π.Ε.

Εξετάζοντας τα ανωτέρω δεδομένα ένα προς ένα, γίνεται αντιληπτό ότι όλα αυτά χρησιμοποιήθηκαν στους υπολογισμούς και στις εκτιμήσεις της βέλτιστης σύνθεσης παραγωγής που παρουσιάστηκαν στα παραδείγματα των προηγούμενων ενοτήτων.

Τα βασικά αποτελέσματα που αναμένονται από τις ετήσιες προσομοιώσεις Σ.Η.Ε. είναι:

- συνολική ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά τύπο μονάδων και συνολικά για το σύστημα,
- μέσα ετήσια ειδικά κόστη παραγωγής και μέσοι ετήσιοι βαθμοί απόδοσης για κάθε τύπο θερμοηλεκτρικής μονάδας ξεχωριστά,
- μέσο ετήσιο ειδικό κόστος παραγωγής και μέσος ετήσιος βαθμός απόδοσης για το σύνολο των θερμικών μονάδων και για το σύνολο του συστήματος,
- συνολικές καταναλώσεις και κόστη καυσίμων,
- ετήσια διείσδυση και απόρριψη ενέργειας από μονάδες μη εγγυημένης παραγωγής,
- υπολογισμός εκπομπών αερίων ρύπων,
- συμπεράσματα σχετικά με την ασφάλεια παραγωγής του συστήματος.

Είναι, βέβαια, αυτονόητο ότι η εργασία της ετήσιας προσομοίωσης λειτουργίας Σ.Η.Ε. δεν μπορεί να εκτελεστεί με το χέρι, όπως δηλαδή στα ανωτέρω παραδείγματα. Αντιθέτως είναι δυνατή μέσω της υπολογιστικής προσομοίωσης του αλγόριθμου λειτουργίας των συστημάτων. Ένα παράδειγμα υπολογιστικής ετήσιας προσομοίωσης λειτουργίας του αυτόνομου Σ.Η.Ε. στην Κρήτη παρουσιάζεται συνοπτικά στην επόμενη ενότητα.

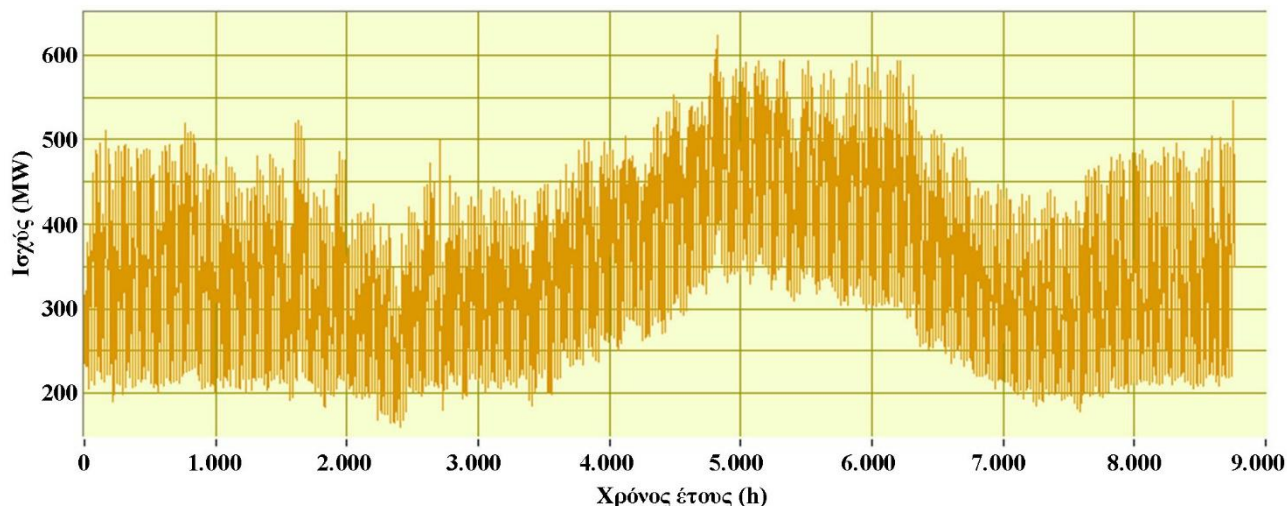
2.6. Ετήσια προσομοίωση Σ.Η.Ε. Κρήτης

2.6.1. Ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος

Για την προσομοίωση της λειτουργίας του Σ.Η.Ε. Κρήτης είναι απαραίτητη η γνώση της ζήτησης ηλεκτρικής ισχύος για ένα ημερολογιακό έτος. Με σκοπό την προσομοίωση του συστήματος για το έτος 2016, κατασκευάζεται χρονοσειρά ζήτησης με βάση τη διαθέσιμη χρονοσειρά για το 2011, και θεωρώντας ετήσιους ρυθμούς αύξησης ίσους με 2% για τα έτη 2012 έως 2015 και ίσο με 3% για το έτος 2016.

Η ετήσια χρονοσειρά ζήτησης ισχύος για το 2016 παρουσιάζεται στο σχήμα 2.31.

Στον πίνακα 2.11 παρουσιάζονται χαρακτηριστικές τιμές της ζήτησης ισχύος καθώς και χαρακτηριστικές τιμές για την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στο Σ.Η.Ε. Κρήτης για τα έτη 2010, 2011 και 2016.



Σχήμα 2.31: Ετήσια χρονοσειρά ζήτησης ηλεκτρικής ισχύος στο Σ.Η.Ε. Κρήτης το 2016.

Πίνακας 2.11: Χαρακτηριστικές τιμές ζήτησης ισχύος και κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στο Σ.Η.Ε. Κρήτης τα έτη 2010, 2011 και 2016.

Έτος	Μέγιστη ετήσια ζήτηση ισχύος (MW)	Ελάχιστη ετήσια ζήτηση ισχύος (MW)	Ετήσια ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας (MWh)	Μέση ημερήσια ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας (MWh)
2010	654,80	175,00	3.064.269,50	8.395,26
2011	559,30	143,80	2.757.804,25	7.555,63
2016	623,57	160,32	3.074.690,00	8.423,81

2.6.2. Το θερμοηλεκτρικό σύστημα Κρήτης

Στους πίνακες 2.12 έως 2.14 παρουσιάζεται η σύνθεση των τριών θερμοηλεκτρικών σταθμών παραγωγής, του ατμοηλεκτρικού σταθμού (ΑΗΣ) Λινοπεραμάτων στα Λινοπεράματα Ηρακλείου, του ΑΗΣ Χανίων στην Ξυλοκαμάρα Χανίων και του ΑΗΣ Αθρινόλακκου στον Αθρινόλακκο Λασιθίου, κατά το τέλος του 2011. Ο συνδυασμένος κύκλος (ΣΚ) του ΑΗΣ Χανίων αποτελείται από δύο παράλληλα λειτουργούντες αεριοστρόβιλους (Α/Σ) και ένα ατμοστρόβιλο (ΑΤΜ). Κάθε ένας από τους Α/Σ διοχετεύει τα θερμά καυσαερίά του στο λέβητα του ΑΤΜ, προσδίδοντας έτσι πρόσθετη ισχύ στο σύστημα.

Πίνακας 2.12: Η σύνθεση του ΑΗΣ Λινοπεραμάτων το 2011.

ΑΤΜ	Τεχνικά Ελάχιστα (MW)	Ικανότητα (MW)	Μονάδες Ντίζελ	Τεχνικά Ελάχιστα (MW)	Ικανότητα (MW)	Α/Σ	Τεχνικά Ελάχιστα (MW)	Ικανότητα (MW)
1	1,8	6,2	1	3,0	11,0	1	3,0	14,0
2	8,0	14,0	2	3,0	11,0	2	3,0	14,0
3	8,0	14,0	3	3,0	11,0	3	3,0	43,0
4	18,0	24,0	4	3,0	11,0	4	3,0	13,0
5	18,0	24,0				5	3,0	32,0
6	18,0	24,0						
Σύνολα:	71,8	106,2		12,0	44,0		15,0	116,0

Πίνακας 2.13: Η σύνθεση του ΑΗΣ Χανίων το 2011.

A/Σ	Τεχνικά Ελάχιστα (MW)	Ικανότητα (MW)	ΣΚ	Τεχνικά Ελάχιστα (MW)	Ικανότητα (MW)
1	3,0	12,0	A/Σ Νο 6	12,0	37,0
4	3,0	13,0	A/Σ Νο 7	12,0	37,0
5	5,0	29,0	ΑΤΜ	21,0	36,0
11	8,0	55,0			
12	8,0	55,0			
13	3,0	32,0			
Σύνολα:	30,0	196,0		45,0	110,0

Πίνακας 2.14: Η σύνθεση του ΑΗΣ Αθρινόλακκου το 2011.

ΑΤΜ	Τεχνικά Ελάχιστα (MW)	Ικανότητα (MW)	Μονάδες Ντίζελ	Τεχνικά Ελάχιστα (MW)	Ικανότητα (MW)
1	25,0	45,0	1	12,0	45,0
2	25,0	45,0	2	12,0	45,0
Σύνολα:	50,0	90,0		24,0	90,0

Από τις μονάδες των πινάκων 2.12, 2.13 και 2.14, οι ατμοστρόβιλοι και οι μονάδες ντίζελ καταναλώνουν μαζούτ (fuel oil), ενώ οι αεριοστρόβιλοι και, κατά συνέπεια, ο συνδυασμένος κύκλος, καταναλώνουν ελαφρύ πετρέλαιο (diesel oil).

Για το έτος 2016 προβλέπεται ότι θα εγκατασταθούν επιπλέον δύο νέες μονάδες ντίζελ στον ΑΗΣ Αθρινόλακκου, όμοιες με τις ήδη εγκατεστημένες στον εν λόγω ΑΗΣ.

Η σειρά ένταξης των θερμοηλεκτρικών μονάδων στην παραγωγή υπαγορεύεται από τις παρακάτω παραμέτρους:

- την ασφάλεια του συστήματος καθώς και την εξασφάλιση της διαρκούς ικανοποίησης της ζήτησης ισχύος,
- την οικονομική λειτουργία του συστήματος.

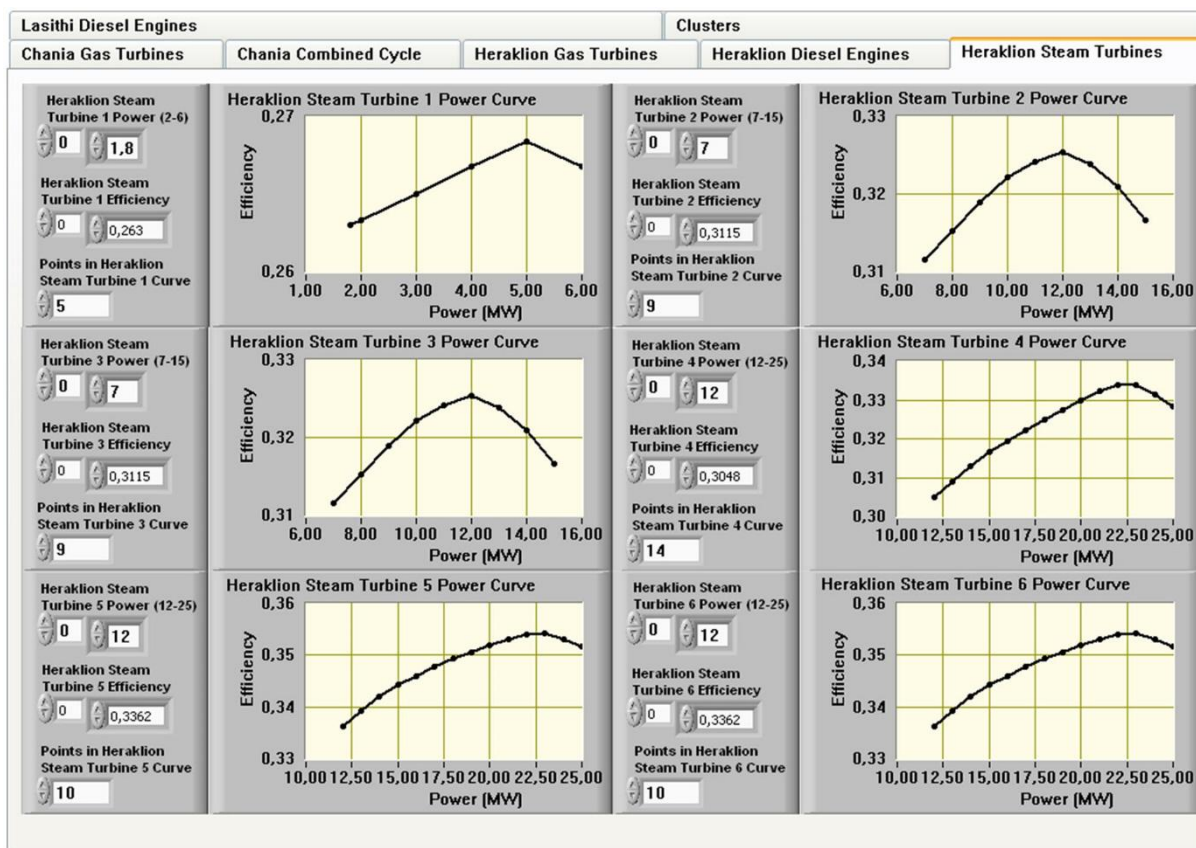
Η πρώτη παράμετρος επιβάλλει τη διαρκή λειτουργία των θερμοηλεκτρικών μονάδων με σχετικά χαμηλή απόκριση στις διακυμάνσεις φορτίου και με αργή εκκίνηση, δηλαδή των ατμοστροβίλων και του συνδυασμένου κύκλου.

Η δεύτερη παράμετρος επιβάλλει την ένταξη των θερμοηλεκτρικών μονάδων στην παραγωγή με την παρακάτω, σε γενικές γραμμές, σειρά:

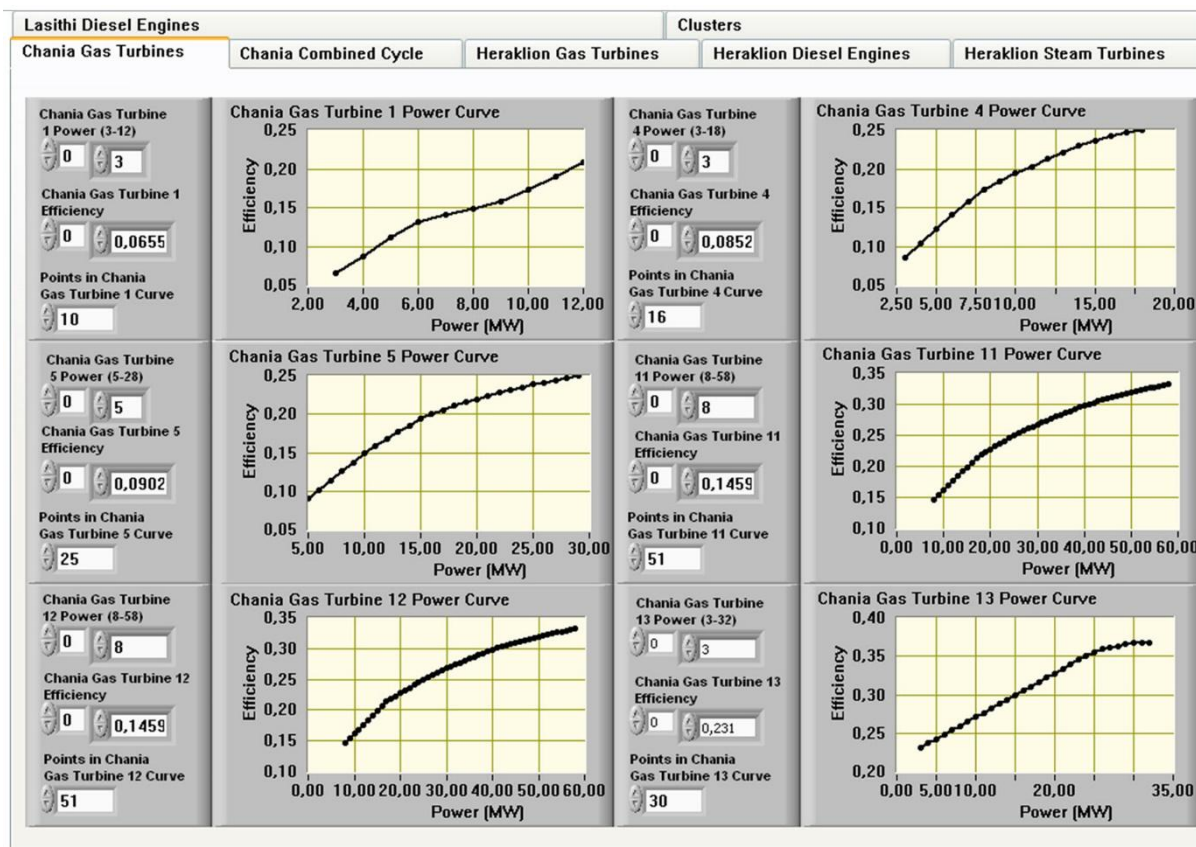
1. μονάδες ντίζελ,
2. ατμοστρόβιλοι από το τεχνικό ελάχιστό τους μέχρι την πλήρη φόρτισή τους,
3. συνδυασμένος κύκλος από το τεχνικό ελάχιστό του μέχρι την πλήρη φόρτισή του,
4. αεριοστρόβιλοι.

Η σειρά αυτή τηρείται, όταν δεν τίθενται περιορισμοί ασφάλειας του συστήματος, με τους ατμοστρόβιλους και το συνδυασμένο κύκλο να μη λειτουργούν ποτέ κάτω από τεχνικά ελάχιστα τους, ανεξάρτητα από σειρά ένταξης.

Προκειμένου να υπολογιστούν οι καταναλώσεις και τα κόστη καυσίμων για τη λειτουργία του Σ.Η.Ε. Κρήτης, είναι αναγκαία η εισαγωγή των καμπυλών ισχύος λειτουργίας – βαθμού απόδοσης των θερμοηλεκτρικών μονάδων. Στα σχήματα 2.32 και 2.33 παρουσιάζονται ενδεικτικά οι καμπύλες ισχύος λειτουργίας – βαθμού απόδοσης των ατμοστροβίλων του ΑΗΣ Λινοπεραμάτων και των αεριοστροβίλων του ΑΗΣ Χανίων.



Σχήμα 2.32: Καμπύλες απόδοσης για τους αμοστρόβιλους του ΑΗΣ Λινοπεραμάτων (πηγή: ΔΕΔΔΗΕ).



Σχήμα 2.33: Καμπύλες απόδοσης για τους Α/Σ του ΑΗΣ Χανίων (πηγή: ΔΕΔΔΗΕ).

Οι καμπύλες ισχύος λειτουργίας – βαθμού απόδοσης των θερμοηλεκτρικών μονάδων και οι τιμές για την κατώτερη θερμογόνο ικανότητα των καυσίμων μαζούτ και diesel θα χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό των ετήσιων καταναλώσεων καυσίμων.

Σύμφωνα με τους κανόνες λειτουργίας του Σ.Η.Ε. Κρήτης, διατηρείται πάντα στρεφόμενη εφεδρεία, η οποία είναι ίση με την ικανότητα της μεγαλύτερης ενταγμένης θερμοηλεκτρικής μονάδας. Η εφεδρεία αυτή διαμοιράζεται σε, κατά το δυνατόν, περισσότερες μονάδες, λαμβάνοντας υπόψη τις αρχές της οικονομικής λειτουργίας.

2.6.3. Οι μονάδες μη εγγυημένης ισχύος του συστήματος Κρήτης

Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των αιολικών πάρκων στο Σ.Η.Ε. Κρήτης προβλέπεται ότι θα ανέλθει το 2016 στα 221MW.

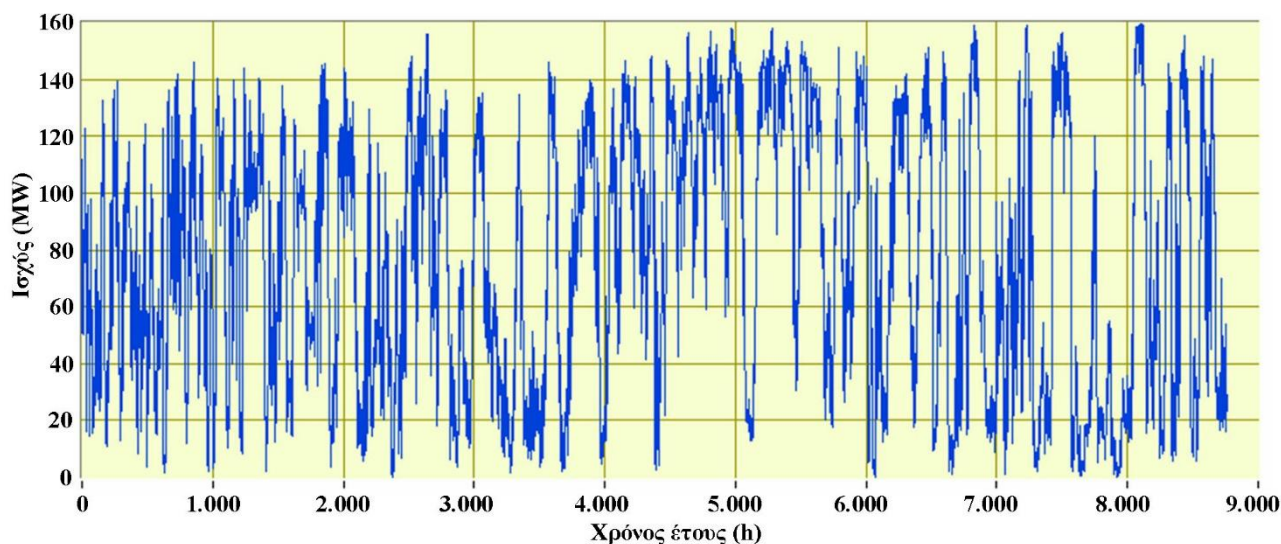
Απόρριψη αιολικής ισχύος υφίσταται, όταν:

- το στιγμιαίο ποσοστό διείσδυσης αιολικής ισχύος υπερβεί το 30% της στιγμιαίας ζήτησης ισχύος
- η απορρόφηση ολόκληρης της στιγμιαίας διαθέσιμης αιολικής ισχύος συνεπάγεται τη μείωση της ισχύος λειτουργίας των υποχρεωτικά ενταγμένων θερμοηλεκτρικών μονάδων κάτω από τα τεχνικά ελάχιστα τους.

Επίσης η συνολική εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών σταθμών ανέρχεται στα 90MW.

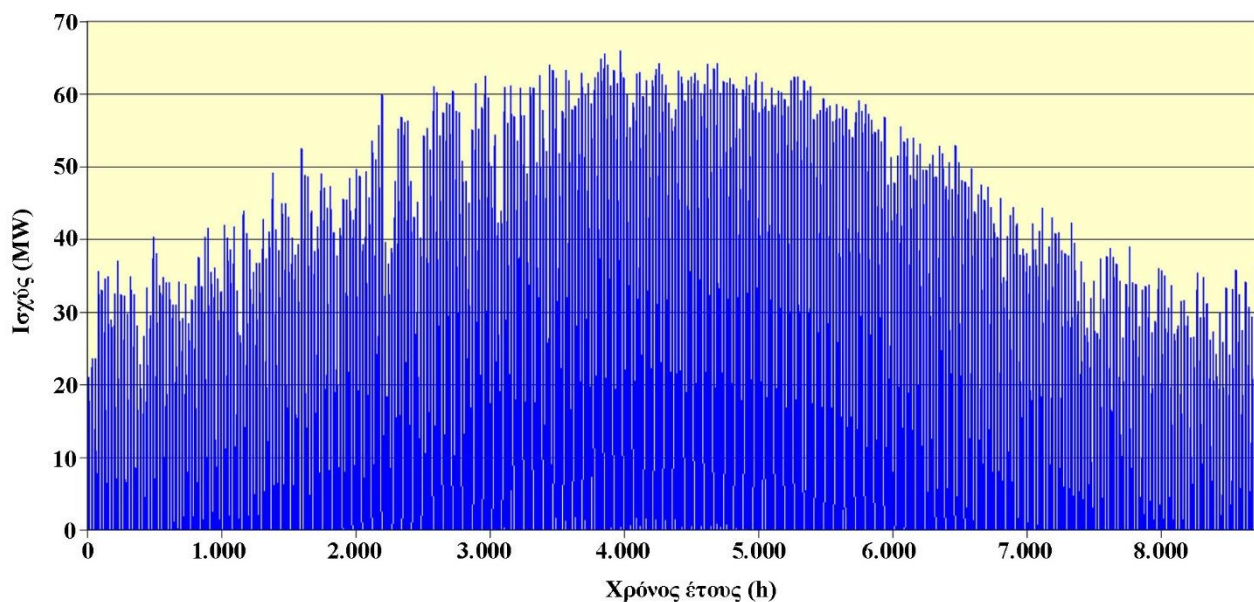
Για τον υπολογισμό της ετήσιας χρονοσειράς μέσω ωριαίων τιμών παραγωγής ισχύος από τα αιολικά πάρκα και από τους φωτοβολταϊκούς σταθμούς χρησιμοποιούνται ετήσιες χρονοσειρές μέσω ωριαίων τιμών ταχύτητας ανέμου και ηλιακής ακτινοβολίας από μετεωρολογικούς σταθμούς διεσπαρμένους σε όλο το νησί. Επίσης χρησιμοποιούνται οι καμπύλες ισχύος των εγκατεστημένων μοντέλων ανεμογεννητριών και η βασική θεωρία υπολογισμού απωλειών κατά την παραγωγή ισχύος από φωτοβολταϊκούς σταθμούς [11].

Υπολογίζεται τελικά η ετήσια χρονοσειρά μέσω ωριαίων τιμών ηλεκτρικής ισχύος παραγόμενης από το σύνολο των εγκατεστημένων αιολικών πάρκων στην Κρήτη το 2016. Η χρονοσειρά αυτή παρουσιάζεται στο σχήμα 2.34.



Σχήμα 2.34: Παραγωγή ισχύος από τα εγκατεστημένα αιολικά πάρκα στην Κρήτη το 2016.

Αντίστοιχα, η χρονοσειρά ετήσιας παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος στην Κρήτη από τα φωτοβολταϊκά πάρκα παρουσιάζεται στο σχήμα 2.35.



Σχήμα 2.35: Ετήσια χρονοσειρά παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος από τα φωτοβολταϊκά πάρκα στην Κρήτη.

2.6.4. Καύσιμα

Οι τιμές για την κατώτερη θερμογόνο ικανότητα μαζούτ και ντίζελ που χρησιμοποιήθηκαν, βάσει του Φ.Ε.Κ. 1526 Β' /27-7-1999, είναι:

- θερμογόνος ικανότητα μαζούτ χαμηλού θείου 1500: 11,45kWh/kg,
- θερμογόνος ικανότητα diesel oil: 11,92kWh/kg = 9,77kWh/l.

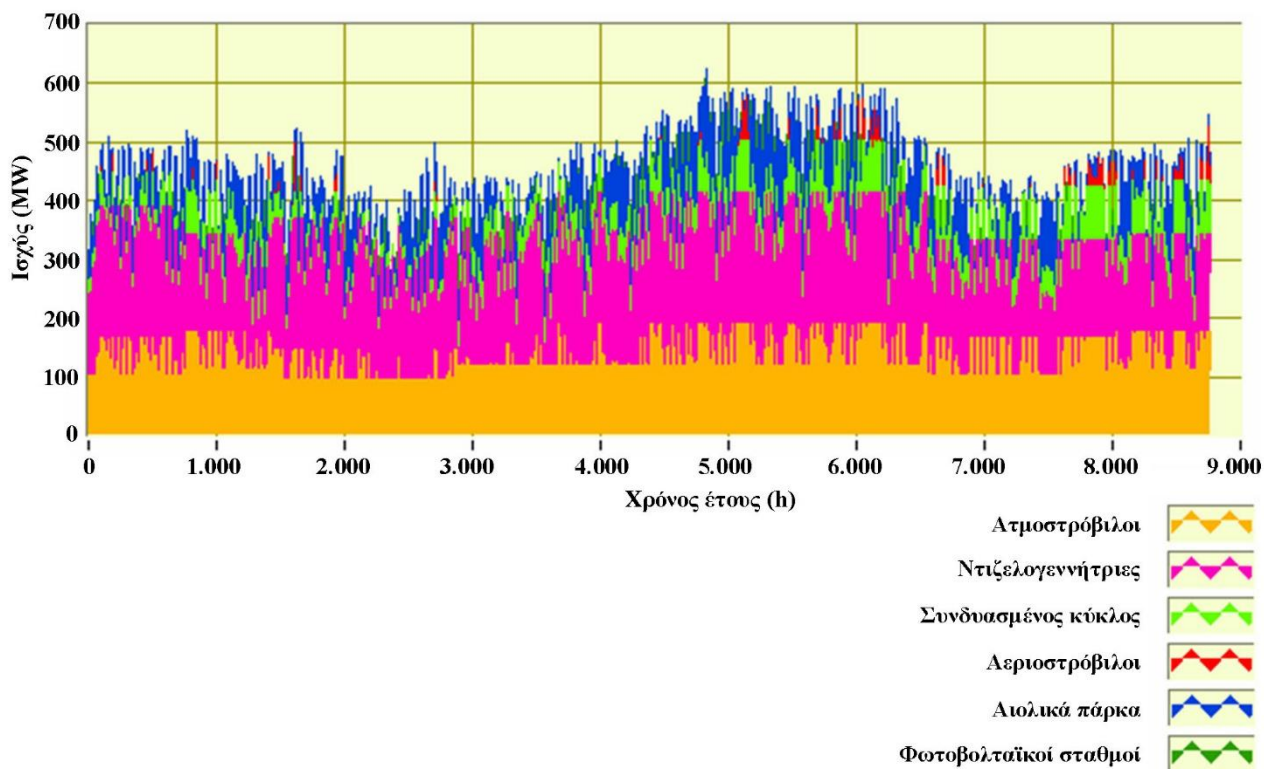
2.6.5. Αποτελέσματα προσομοίωσης

Με βάση τα ανωτέρω δεδομένα και παραδοχές, υλοποιήθηκε μέσω κατάλληλου λογισμικού προσομοίωση της λειτουργίας του Σ.Η.Ε. Κρήτης, όπως αναμένεται να διαμορφωθεί το 2016. Τα αποτελέσματα των σχετικών υπολογισμών παρουσιάζονται στη συνέχεια.

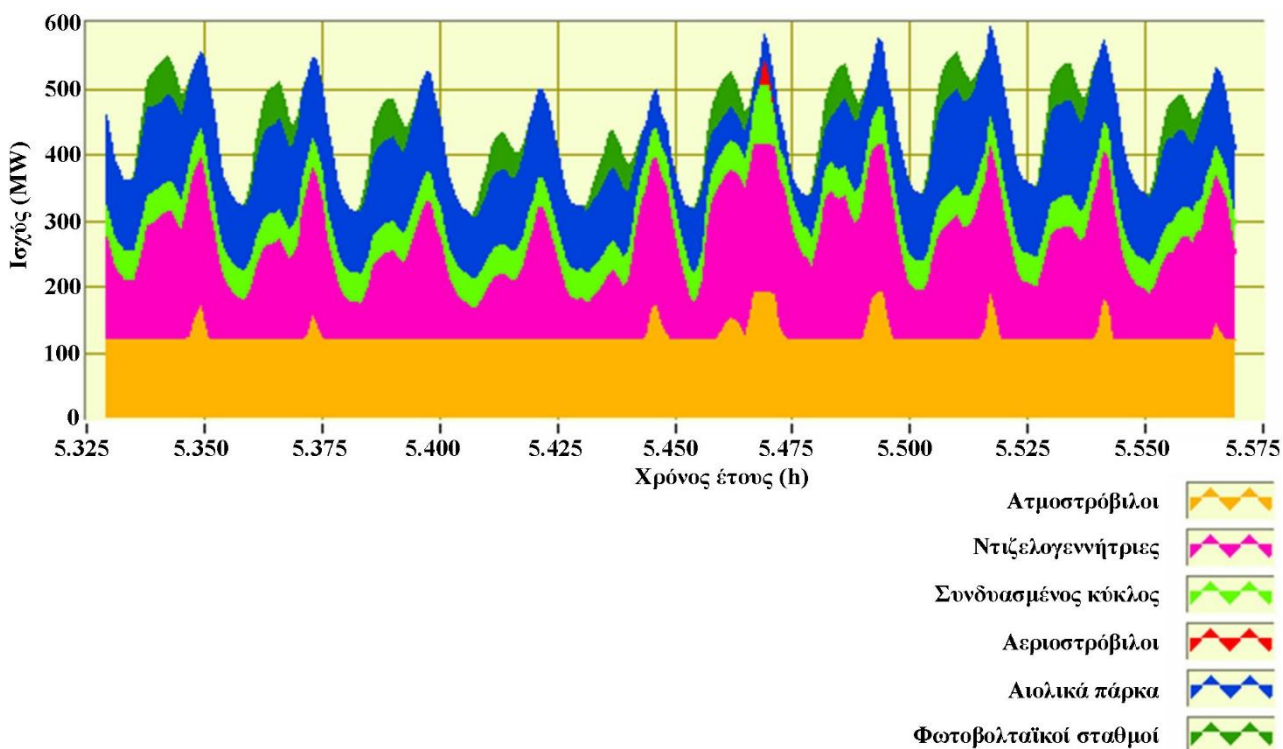
2.6.5.α. Συνθέσεις παραγωγής

Στα σχήματα 2.36, 2.37 & 2.38 παρουσιάζονται τα εξής διαγράμματα σύνθεσης παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος για τη λειτουργία του συστήματος:

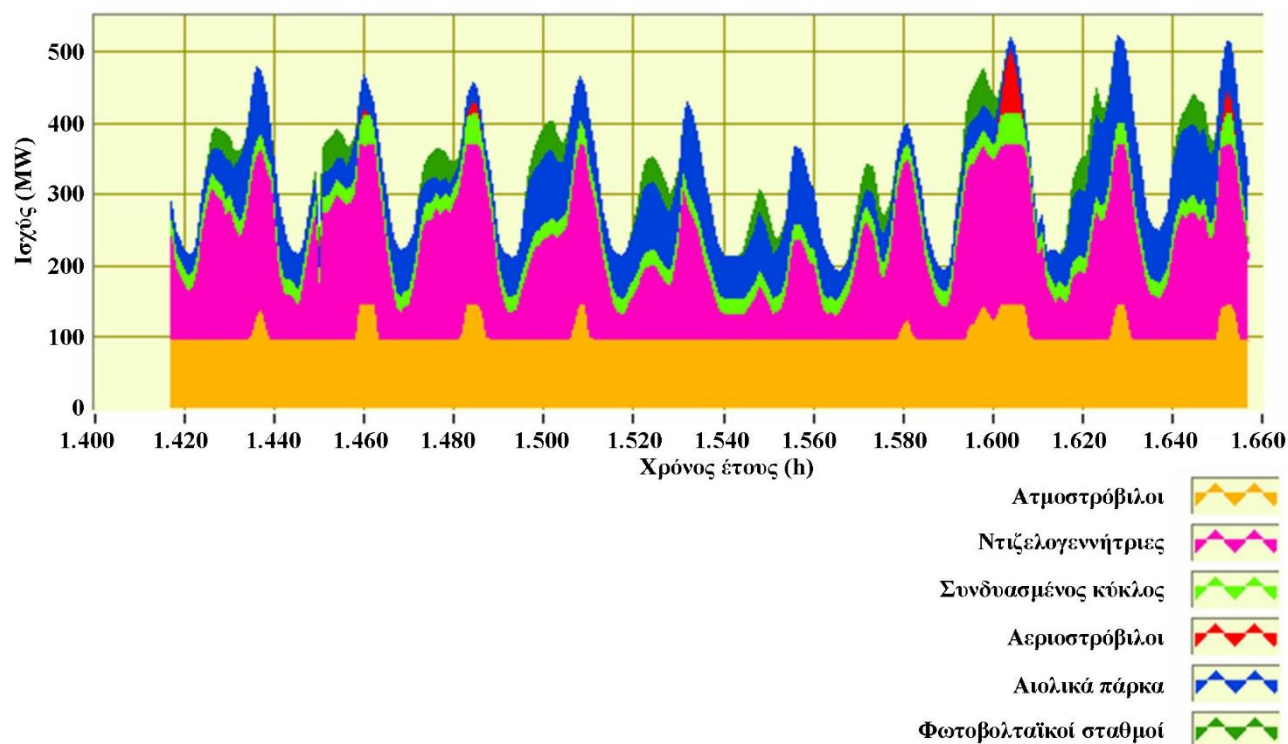
- σχήμα 2.36: ετήσια σύνθεση παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος για το 2016,
- σχήμα 2.37: σύνθεση παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος από 10-8-2016 έως 20-8-2016 (περίοδος υψηλής ζήτησης ισχύος),
- σχήμα 2.38: σύνθεση παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος από 1-3-2016 έως 10-3-2016 (περίοδος χαμηλής ζήτησης ισχύος).



Σχήμα 2.36: Προσομοίωση ετήσιας σύνθεσης παραγωγής Σ.Η.Ε. Κρήτης το 2016.



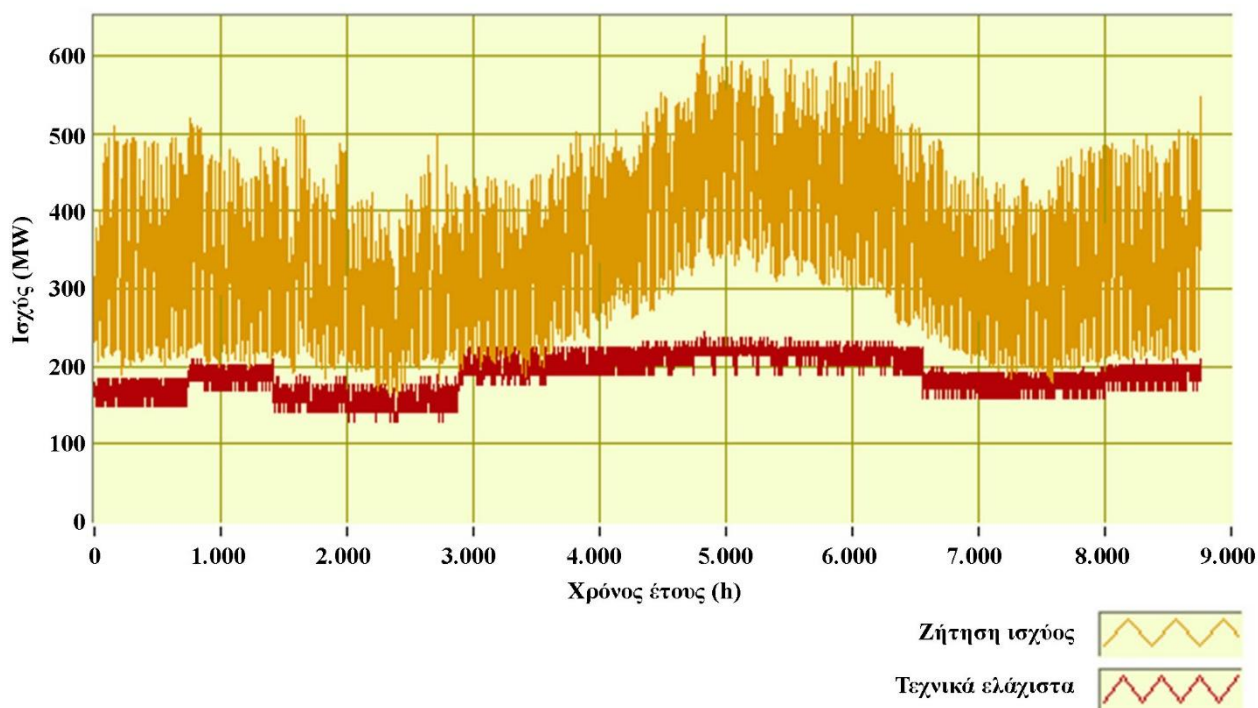
Σχήμα 2.37: Προσομοίωση σύνθεσης παραγωγής Σ.Η.Ε. Κρήτης από 10-8-2016 έως 20-8-2016.



Σχήμα 2.38: Προσομοίωση σύνθεσης παραγωγής Σ.Η.Ε. Κρήτης από 1-3-2016 έως 10-3-2016.

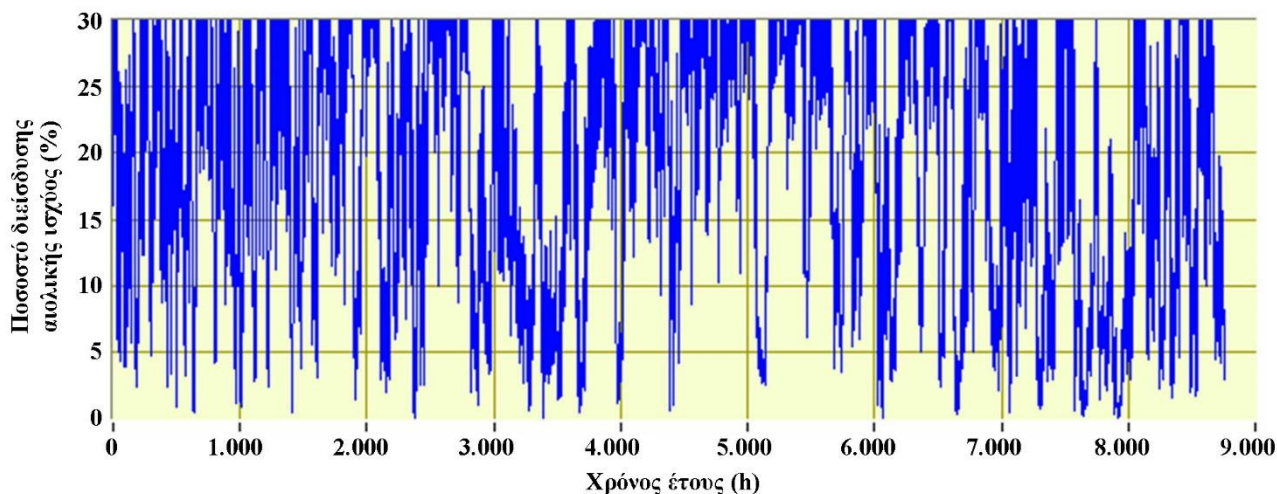
2.6.5.β. Διείσδυση αιολικής ενέργειας

Στο σχήμα 2.39 παρουσιάζονται οι ετήσιες χρονοσειρές ζήτησης ισχύος και συνολικών τεχνικών ελαχίστων των ενταγμένων θερμοηλεκτρικών μονάδων.



Σχήμα 2.39: Ετήσια ζήτηση ισχύος και συνολικά τεχνικά ελάχιστα των ενταγμένων θερμοηλεκτρικών μονάδων στο Σ.Η.Ε. Κρήτης το 2016.

Στο σχήμα 2.40 παρουσιάζεται η ετήσια διακύμανση για το 2016 του ποσοστού στιγμιαίας διείσδυσης αιολικής ισχύος



Σχήμα 2.40: Ετήσια διακύμανση για το 2016 του ποσοστού στιγμιαίας διείσδυσης αιολικής ισχύος στο Σ.Η.Ε. Κρήτης.

Στον πίνακα 2.15 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του υπολογισμού διείσδυσης αιολικής ισχύος στο Σ.Η.Ε. Κρήτης το 2016. Ο μέγιστος δυναμικός συντελεστής διείσδυσης αιολικής ισχύος ορίζεται στο 30%.

Πίνακας 2.15: Αποτελέσματα υπολογισμού διείσδυσης αιολικής ενέργειας στο Σ.Η.Ε. Κρήτης το 2016.	
Συνολική ετήσια παραγωγή ενέργειας από ΑΠ (MWh)	664.765,44
Συνολική ετήσια απόρριψη ενέργειας ΑΠ (MWh)	103.088,33
Ποσοστό ετήσιας απόρριψης αιολικής ενέργειας (%)	15,51
Συνολική ετήσια διείσδυση ΑΠ μετά απωλειών (MWh)	561.677,08
Ποσοστό κάλυψης της ετήσιας Ζήτησης ΗΕ (%)	18,27
Απόρριψη λόγω δυναμικού συντελεστή διείσδυσης (%)	13,05
Απόρριψη λόγω τεχνικών ελαχίστων (%)	2,46

2.6.5.γ. Παραγωγές ενέργειας, καταναλώσεις και κόστη καυσίμων

Στον πίνακα 2.16 παρουσιάζονται αποτελέσματα υπολογισμού σχετικά με τις παραγωγές ενέργειας, τις καταναλώσεις και τα κόστη καυσίμων από τις θερμοηλεκτρικές μονάδες παραγωγής για τη λειτουργία του Σ.Η.Ε. Κρήτης το 2016. Επίσης παρουσιάζονται τα αποτελέσματα υπολογισμού σχετικά με τις καταναλώσεις και τα κόστη καυσίμων κατά τη διαδικασία εκκίνησης των θερμοηλεκτρικών μονάδων.

Για τον υπολογισμό των δαπανών καυσίμων θεωρήθηκε ότι το 2016 οι τιμές των ορυκτών καυσίμων θα έχουν διαμορφωθεί ως εξής:

- μέση τιμή μαζούτ: 487,083€/tn,
- μέση τιμή ντίζελ: 990,607€/klit.

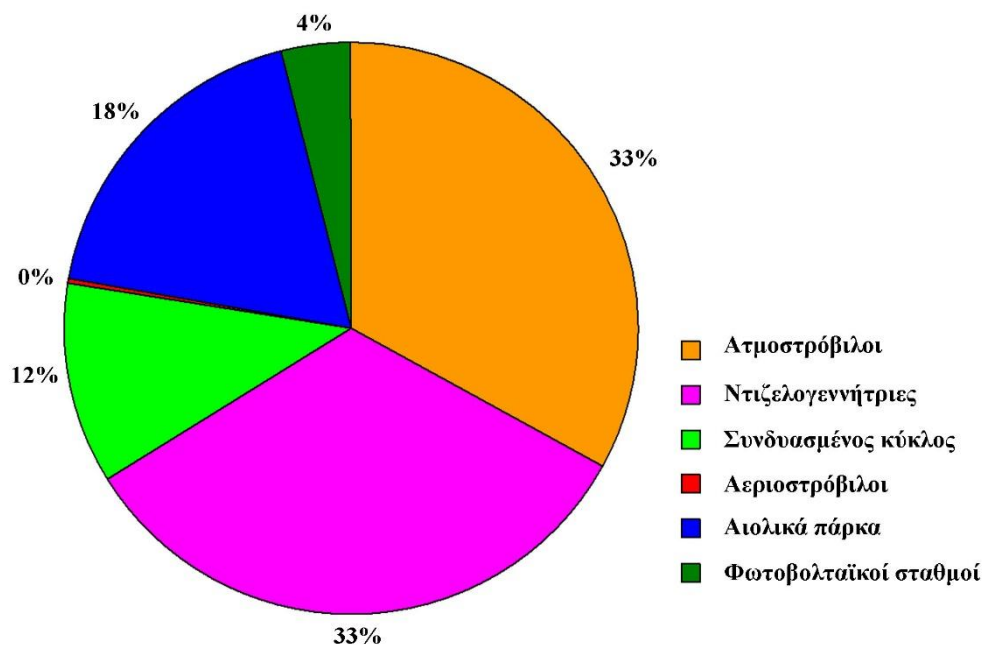
Η τιμή πώλησης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τα αιολικά πάρκα λαμβάνεται ίση με 0,095€/kWh. Τέλος για την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά πάρκα λαμβάνεται μία μέση τιμή ίση με 0,195€/kWh.

Πίνακας 2.16: Παραγωγές ενέργειας, μέσοι βαθμοί απόδοσης, καταναλώσεις και κόστη καυσίμων του Σ.Η.Ε. Κρήτης το 2016.

Μονάδα / διαδικασία	Παραγωγή ενέργειας (MWh)	Βαθμός απόδοσης (%)	Ειδικό κόστος παραγωγής (€/kWh)	Κατανάλωση μαζούτ (tn)	Κατανάλωση ντίζελ (klt)	Κόστος μαζούτ (Μ€)	Κόστος ντίζελ (Μ€)
ΑΤΜ	1.018.969	34,63	0,123	256.950	-	125,156	-
Ντίζελ	1.009.943	46,46	0,092	189.852	-	92,474	-
ΣΚ	356.539	38,31	0,265	-	95.271	-	94,376
Α/Σ	4.222	25,04	0,405	-	1.726	-	1,710
ΑΠ	561.677	-	0,095	-	-	-	-
ΦΒ	123.425	-	0,195	-	-	-	-
Εκκίνηση	-	-	-	522	30	0,254	0,030
Σύνολα	3.074.775	* 40,16	0,1273	447.324	97.027	217,884	96,116

* Πρόκειται για το μέσο βαθμό απόδοσης των θερμοηλεκτρικών μονάδων.

Στο σχήμα 2.41 παρουσιάζεται διάγραμμα ποσοστιαίας συμμετοχής των μονάδων παραγωγής στην κάλυψη της ετήσιας καταναλώσης ηλεκτρικής ενέργειας στην Κρήτη το 2016.

**Σχήμα 2.41:** Ποσοστά συμμετοχής των μονάδων παραγωγής στην κάλυψη της ετήσιας καταναλώσης ηλεκτρικής ενέργειας στην Κρήτη το 2016.

Τέλος, στον πίνακα 2.17, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά αποτελέσματα σχετικά με το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στο Σ.Η.Ε. Κρήτης το 2016.

Πίνακας 2.17: Κόστη παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στο Σ.Η.Ε. Κρήτης το 2016.

Συνολικό ετήσιο κόστος καυσίμων μαζούτ και ντίζελ (Μ€)	314,000
Συνολικό ετήσιο κόστος ενέργειας αιολικών πάρκων (Μ€)	53,359
Συνολικό ετήσιο κόστος ενέργειας φωτοβολταϊκών σταθμών (Μ€)	24,068
Συνολικό ετήσιο κόστος παραγωγής (Μ€)	* 391,427
Ετήσιο ειδικό κόστος παραγωγής (€/kWh)	* 0,1273
* Περιλαμβάνονται μόνο κόστη καυσίμων και ενέργειας ΑΠ, ΦΒ. Δεν περιλαμβάνονται άλλα κόστη (συντηρήσεις μονάδων, μισθοδοσίες, αποσβέσεις εξοπλισμού, κλπ).	

5.1.9.δ. Εκπομπές CO₂

Για τον υπολογισμό των ετήσιων εκπομπών CO₂ από το υφιστάμενο σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της Κρήτης το 2016 χρησιμοποιούνται τα δεδομένα του Φ.Ε.Κ. 1526B/27-7-1999. Σύμφωνα με το προαναφερόμενο Φ.Ε.Κ., οι εκπομπές αερίων ρύπων από τη χρήση διαφόρων καυσίμων προκύπτουν από τον πίνακα 2.18:

Πίνακας 2.18: Εκπομπές αερίων ρύπων ανά καύσιμο σύμφωνα με το Φ.Ε.Κ. 1526B/27-7-1999.

Καύσιμο	Εκπομπές αερίων ρύπων (gr/kgf καυσίμου)					
	CO ₂	SO	CO	NO	HC	Σωματίδια
Μαζούτ Νο 1(1500) Χαμηλού Θείου	3.175	14	0,585	5,363	0,188	1,832
Μαζούτ Νο 1(1500) Υψηλού Θείου	3.109	70	0,553	6,251	0,184	1,832
Μαζούτ Νο 3 (3500) Χαμηλού Θείου	3.175	14	0,585	5,363	0,188	1,832
Μαζούτ Νο 3 (3500) Υψηλού Θείου	3.091	80	0,550	5,221	0,183	1,832
Ντίζελ	3.142	6	0,572	2,384	0,191	0,286
Υγραέριο	3.030	0	0,332	2,102	0,080	0,100
Φυσικό Αέριο	2.715	0	0,332	2,102	0,080	0,100

Λαμβάνοντας την πυκνότητα του ντίζελ ίση με 0,85kgf/lt, οι ετήσιες εκπομπές CO₂ από το υφιστάμενο σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην Κρήτη το 2016 παρουσιάζονται στον πίνακα 2.19, βάσει των ετήσιων καταναλώσεων μαζούτ και ντίζελ που παρουσιάστηκαν στους πίνακες που προηγήθηκαν.

Πίνακας 2.19: Ετήσιες εκπομπές CO₂ στο Σ.Η.Ε. Κρήτης το 2016.

Ετήσιες εκπομπές CO ₂ λόγω κατανάλωσης μαζούτ (tn)	1.420.254
Ετήσιες εκπομπές CO ₂ λόγω κατανάλωσης ντίζελ (tn)	304.859
Συνολικές ετήσιες εκπομπές CO ₂ (tn)	1.725.113

Αναφορές Κεφαλαίου

- [1] Λάμπρος Οικονόμου, Δήμητρα Καρβουνιάρη, Άννα Μαλάμου. Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας. Εκδόσεις Τζιώλα, Θεσσαλονίκη 2014.
- [2] Steve Thomas. The economics of nuclear power. Nuclear issues paper No. 5. No 2, December 2005. Heinrich Böll Stiftung. http://www.nirs.org/c20/atommythen_thomas.pdf (πιο πρόσφατη πρόσβαση: 8/3/2015).
- [3] Nuclear Energy Agency. The Economics of Long-term Operation of Nuclear Power Plants. Organisation For Economic Co-Operation And Development 2012. ISBN 978-92-64-99205-4. <http://www.oecd-nea.org/ndd/reports/2012/7054-long-term-operation-npps.pdf> (πιο πρόσφατη πρόσβαση: 8/3/2015).
- [4] <http://interestingengineering.com/worlds-largest-four-stroke-gas-engine/> (πιο πρόσφατη πρόσβαση: 11/3/2015).
- [5] <https://shaikmoin.wordpress.com/tag/four-stroke-engine/> (πιο πρόσφατη πρόσβαση: 9/3/2015).
- [6] <http://www.century-of-flight.net/> (πιο πρόσφατη πρόσβαση: 9/3/2015).
- [7] <http://www.aerospaceonline.com/> (πιο πρόσφατη πρόσβαση: 9/3/2015).
- [8] Δημήτριος Αλ. Κατσαπρακάκης, Μύρων Μονιάκης, Νικόλαος Πασαδάκης, Ιωάννης Σκιάς. Σκοπιμότητα εισαγωγής φυσικού αερίου στο σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην Κρήτη. Τεχνικό Επιμελητήριο της Ελλάδας. Παράρτημα Ανατολικής και Δυτικής Κρήτης. Ηράκλειο, 2010. http://www.teetak.gr/files/domh_TEE/omades_ergasias/crete_gas.pdf (πιο πρόσφατη πρόσβαση: 8/3/2015).
- [9] Δημήτριος Παπαντώνης. Μικρά υδροηλεκτρικά έργα. Εκδόσεις Συμεών. Αθήνα 2008. ISBN10: 9607888235.
- [10] http://en.wikipedia.org/wiki/Francis_turbine (πιο πρόσφατη πρόσβαση: 11/3/2015).
- [11] Γιάννης Φραγκιαδάκης. Φωτοβολταϊκά συστήματα. Εκδόσεις Ζήτη, Αθήνα 2006. ISBN10: 9604560077

Υβριδικοί σταθμοί ηλεκτρικής ενέργειας

3.1. Η έννοια του υβριδικού σταθμού

Στην παράγραφο 1.6.2 του Κεφαλαίου 1 παρουσιάστηκε η έννοια του υβριδικού σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ή θερμικής ισχύος. Επαναλαμβάνεται εδώ, για λόγους αυτοτέλειας του παρόντος Κεφαλαίου, ότι ένας υβριδικός σταθμός αποσκοπεί να μεγιστοποιήσει τη συμμετοχή μονάδων μη εγγυημένης παραγωγής, πρακτικά δηλαδή μονάδων Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Α.Π.Ε.), στην κάλυψη μιας συγκεκριμένης ζήτησης ισχύος. Τούτο δεν προσεγγίζεται με τη φιλοσοφία ενός συμβατικού συστήματος ισχύος. Πιο συγκεκριμένα, όπως αναλύθηκε στο προηγούμενο Κεφάλαιο, σε ένα συμβατικό Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (Σ.Η.Ε.), οι μονάδες μη εγγυημένης ισχύος συμμετέχουν στην παραγωγή ισχύος έως ένα μέγιστο ποσοστό, το οποίο υπαγορεύεται από τους περιορισμούς ασφάλειας και ευστάθειας της λειτουργίας του συστήματος και διαμορφώνεται βάσει διαφόρων παραμέτρων, όπως το μέγεθος του συστήματος, οι καιρικές συνθήκες, η ποσότητα και το είδος διατήρησης στρεφόμενης εφεδρείας κλπ. Όσο υψηλή στιγμιαία διείσδυση μονάδων μη εγγυημένης ισχύος και αν επιτευχθεί σε ένα συμβατικό Σ.Η.Ε., ο ρόλος τους παραμένει συμπληρωματικός ως προς τις μονάδες εγγυημένης ισχύος, που συνήθως είναι θερμοηλεκτρικές μονάδες και, σπανιότερα, υδροστρόβιλοι, οι οποίες παραμένουν οι βασικές μονάδες, στις οποίες στηρίζεται η παραγωγή ισχύος. Σκοπός της διείσδυσης των μονάδων Α.Π.Ε. είναι:

- η κατά το δυνατόν αξιοποίηση του γηγενούς δυναμικού Α.Π.Ε. που οδηγεί σε αντίστοιχο περιορισμό της κατανάλωσης συνήθως εισαγόμενων ενεργειακών πηγών
- η μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου που εκλύονται από την καύση ορυκτών καυσίμων
- η μείωση του κόστους παραγωγής των Σ.Η.Ε., δεδομένου ότι, στις περισσότερες περιπτώσεις, η τιμή αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από τις μονάδες Α.Π.Ε. είναι μικρότερη από το ειδικό κόστος παραγωγής των θερμοηλεκτρικών μονάδων.

Ο ρόλος των Α.Π.Ε. σε ένα συμβατικό σύστημα ισχύος δεν υποκαθιστά το ρόλο των μονάδων εγγυημένης παραγωγής. Απλά προσπαθεί να περιορίσει τη χρήση τους, προσεγγίζοντας, έτσι, όσο το δυνατόν περισσότερο τα οφέλη που αναφέρονται παραπάνω. Η βασική παραγωγή ισχύος και η απαίτηση για αδιάλειπτη κάλυψη της ζήτησης με εναλλασσόμενο ρεύμα πρότυπης τάσης και συχνότητας συνεχίζουν να στηρίζονται στην εγγυημένη παραγωγή από τις συμβατικές θερμοηλεκτρικές μονάδες. Οι θερμοηλεκτρικές μονάδες παραμένουν αυτές που θα συμβάλουν τα μεγαλύτερα ποσοστά στην ετήσια κάλυψη της ζήτησης ενέργειας, που θα ενταχθούν πρώτες στη σύνθεση παραγωγή ισχύος, που θα κληθούν να στηρίξουν την παραγωγή σε περίπτωση εμφάνισης σφαλμάτων και που θα ρυθμίσουν τη βασική συχνότητα του Σ.Η.Ε. Τέλος η περίπτωση απουσίας παραγωγής από μονάδες μη εγγυημένης ισχύος δεν αποτελεί ειδική περίπτωση για το σύστημα, καθώς τούτο απλά συνεχίζει να στηρίζεται στην παραγωγή των συμβατικών μονάδων, αυτή τη φορά βέβαια σε ποσοστό 100%.

Ένας υβριδικός σταθμός επιχειρεί να αντιστρέψει τους ρόλους μονάδων Α.Π.Ε. και συμβατικών μονάδων σε ένα σύστημα ισχύος. Ο σκοπός του, που όπως αναφέρθηκε ανωτέρω είναι η μεγιστοποίηση της διείσδυσης των μονάδων Α.Π.Ε. στην παραγωγή, δεν περιορίζεται στην αύξηση του ποσοστού στιγμιαίας διείσδυσης των μονάδων Α.Π.Ε. στο σύστημα όποτε υπάρχει υψηλή παραγωγή ισχύος από αυτές, ενδεχομένως με τεχνικές και μεθόδους που θα βελτιώσουν την ασφάλεια του συστήματος. Σε μία τέτοια περίπτωση οι συμβατικές μονάδες θα ήταν και πάλι οι βασικές μονάδες παραγωγής του συστήματος. Πρακτικά και θεωρητικά, η φιλοσοφία του υβριδικού σταθμού είναι τελείως διαφορετική. Για να γίνει αντιληπτή η φιλοσοφία αυτή, ας υποθέσουμε ένα σύστημα ισχύος, στο οποίο οι συμβατικές μονάδες ισχύος

απουσιάζουν εντελώς, συνεπώς δεν υπάρχει εγγυημένη παραγωγή από συμβατικές μονάδες. Ξεκινώντας από αυτό το δεδομένο, ο σκοπός του υβριδικού σταθμού είναι η σύνθεση και η λειτουργία ενός συστήματος ισχύος, το οποίο, αξιοποιώντας μονάδες μη εγγυημένης παραγωγής, θα ανταποκριθεί με επιτυχία στις βασικές απαιτήσεις της ζήτησης, δηλαδή στην αδιάλειπτη κάλυψή της και στην ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής.

Πώς θα μπορούσε όμως η παραγωγή μη εγγυημένης ισχύος, η οποία προκύπτει από την τυχαία διαθεσιμότητα του δυναμικού Α.Π.Ε., να παρακολουθήσει τις ανάγκες των καταναλωτών ενέργειας, όπως αυτές αποτυπώνονται στη χρονική διακύμανση της ζήτησης ισχύος; Πρακτικά αυτό που πρέπει να γίνει είναι οι δύο αυτές εντελώς ανεξάρτητες μεταξύ τους χρονοσειρές, δηλαδή η διαθέσιμη ισχύς από τις μονάδες Α.Π.Ε. και η ζήτηση ισχύος, να συμπέσουν, να ταυτιστούν δηλαδή χρονικά. Θεωρώντας ως δεδομένο ότι δεν είναι δυνατό να αλλάξουν οι ανάγκες των καταναλωτών, η μόνη περίπτωση για να προσεγγιστεί η σύμπτωση των δύο χρονοσειρών είναι να προσαρμοστεί η τυχαία παραγωγή ισχύος από τις μονάδες Α.Π.Ε. στη ζήτηση ισχύος. Τούτο δεν μπορεί να προσεγγιστεί με κανένα άλλο τρόπο, παρά μόνο με τη συνδυασμένη λειτουργία των μονάδων μη εγγυημένης παραγωγής με μονάδες αποθήκευσης. Η βασική φιλοσοφία συνδυασμένης λειτουργίας των μονάδων Α.Π.Ε. και των μονάδων αποθήκευσης μπορεί να αναλυθεί στις ακόλουθες δύο περιπτώσεις:

- Μέσω των μονάδων αποθήκευσης είναι δυνατή η αποθήκευση ενέργειας, όταν η παραγωγή ισχύος από τις μονάδες μη εγγυημένης παραγωγής είναι μεγαλύτερη από τη ζήτηση ισχύος.
- Η αποθηκευμένη ενέργεια μπορεί να αποδοθεί στην κατανάλωση τις χρονικές στιγμές που η ζήτηση ισχύος είναι μεγαλύτερη από τη διαθεσιμότητα παραγωγής ισχύος από τις μονάδες μη εγγυημένης παραγωγής.

Η ανωτέρω απλοϊκή προσέγγιση της λειτουργίας του υβριδικού σταθμού έχει αποτυπωθεί στο σχήμα 1.13 του Κεφαλαίου 1.

Αρα λοιπόν ένας υβριδικός σταθμός αποτελείται τουλάχιστον από δύο διακριτά μέρη, τις μονάδες μη εγγυημένης παραγωγής (μονάδες Α.Π.Ε.) και τις μονάδες αποθήκευσης. Αρκούν όμως αυτές οι δύο συνιστώσες να εξασφαλίσουν αδιάλειπτη και ασφαλή κάλυψη της ζήτησης από τον υβριδικό σταθμό; Τι γίνεται αν προκύψει κάποια χρονική στιγμή που η διαθεσιμότητα παραγωγής ισχύος από τις μονάδες μη εγγυημένης ισχύος μαζί με την αποθηκευμένη ενέργεια στη μονάδα αποθήκευσης δεν επαρκούν να καλύψουν τη ζήτηση ισχύος; Ένα τέτοιο ενδεχόμενο δεν είναι διόλου απίθανο να προκύψει, καθώς εξαρτάται από το μέγεθος της ζήτησης ισχύος και από τη διαστασιολόγηση του υβριδικού σταθμού. Για την εξασφάλιση της αδιάλειπτης και ασφαλούς παραγωγής ισχύος από ένα υβριδικό σταθμό σε κάθε περίπτωση, θα πρέπει να αντιμετωπιστεί και η ανωτέρω πιθανότητα, της υστέρησης δηλαδή της παραγωγής ισχύος από τις μονάδες μη εγγυημένης παραγωγής ως προς τη ζήτηση ισχύος και της ταυτόχρονης χαμηλής στάθμης αποθηκευμένης ενέργειας στη μονάδα αποθήκευσης. Στην περίπτωση αυτή η μόνη περίπτωση παραγωγής ισχύος είναι η διαθεσιμότητα μιας ή περισσότερων μονάδων εγγυημένης παραγωγής, και πάλι αναλόγως με το μέγεθος του συστήματος και του υβριδικού σταθμού, π.χ. μίας ή περισσότερων θερμοηλεκτρικών μονάδων, αν πρόκειται για ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.

Με την ανωτέρω περιγραφή είναι πασιφανής η διαφορά της λειτουργίας των μονάδων εγγυημένης ισχύος ως τμήμα ενός υβριδικού σταθμού, σε σχέση με τη λειτουργία τους σε ένα συμβατικό σύστημα ισχύος. Στην περίπτωση του υβριδικού σταθμού η παραγωγή ισχύος στηρίζεται κατά απόλυτη και απεριόριστη προτεραιότητα στις μονάδες Α.Π.Ε. Οι μονάδες εγγυημένης ισχύος εντάσσονται στην παραγωγή μόνο σε περίπτωση χαμηλής διαθεσιμότητας ισχύος από τις μονάδες Α.Π.Ε. και ταυτόχρονης χαμηλής στάθμης φόρτισης των μονάδων αποθήκευσης. Πρακτικά λοιπόν οι μονάδες εγγυημένης παραγωγής σε ένα υβριδικό σταθμό έχουν έσχατη προτεραιότητα, εντάσσονται δηλαδή στην παραγωγή μόνο όταν έχει εξαντληθεί η δυνατότητα κάλυψης της ζήτησης από τις μονάδες Α.Π.Ε. και τις μονάδες αποθήκευσης. Η ενεργειακά ορθή διαστασιολόγηση ενός υβριδικού σταθμού θα έχει ως αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση της συμμετοχής των συμβατικών μονάδων στην κάλυψη της ζήτησης.

Καταλήγουμε λοιπόν στο συμπέρασμα ότι ένας υβριδικός σταθμός αποτελείται από τρεις βασικές και διακριτές συνιστώσες:

- Τις μονάδες βάσης, οι οποίες είναι μονάδες μη εγγυημένης παραγωγής, πρακτικά μονάδες Α.Π.Ε. Οι μονάδες βάσης αποτελούν τις κύριες μονάδες παραγωγής του συστήματος. Στην περίπτωση ενός

συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, αυτές μπορεί να είναι αιολικά πάρκα, φωτοβολταϊκοί σταθμοί κλπ. Στην περίπτωση ενός συστήματος παραγωγής θερμικής ενέργειας οι μονάδες αυτές μπορεί να είναι ηλιακοί συλλέκτες.

- Τις μονάδες αποθήκευσης, που σκοπό έχουν την προσαρμογή της τυχαίας παραγωγής ισχύος από τις μονάδες βάσης στη ζήτηση ισχύος. Στην περίπτωση ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, μονάδες αποθήκευσης μπορεί να είναι ένα αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό (αντλιοσταμειωτήρας), ηλεκτροχημικοί συσσωρευτές, μονάδα παραγωγής υδρογόνου ή μονάδες συμπίεσης αέρα (Compressed Air Energy Storage Systems – C.A.E.S.). Σε περίπτωση ενός συστήματος θερμικής ενέργειας, μονάδες αποθήκευσης μπορεί να είναι θερμοδοχεία ή μία μεγάλη δεξαμενή νερού.
- Τις μονάδες εφεδρείας, που σκοπό έχουν την κάλυψη της ζήτησης ισχύος σε περίπτωση χαμηλής διαθεσιμότητας ισχύος από τις μονάδες βάσης και εξάντλησης των αποθεμάτων ενέργειας στις μονάδες αποθήκευσης. Στην περίπτωση ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, μονάδες εφεδρείας μπορεί να είναι κοινές θερμοηλεκτρικές μονάδες, κυρίως ντιζελογεννήτριες. Σε περίπτωση ενός συστήματος θερμικής ενέργειας, μονάδες εφεδρείας μπορεί να είναι καυστήρες κεντρικής θέρμανσης.

Στο παρόν Κεφάλαιο θα παρουσιαστούν οι υβριδικοί σταθμοί ηλεκτρικής ενέργειας μεγάλου και μικρού μεγέθους ή, διαφορετικά, συγκεντρωμένης και αποκεντρωμένης παραγωγής. Η ύλη του παρόντος Κεφαλαίου μπορεί να συνοψιστεί στην ακόλουθη διακριτή θεματολογία:

- Θα γίνει επισκόπηση των δυνατών τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται ως μονάδες βάσης και ως μονάδες αποθήκευσης.
- Θα παρουσιαστούν σχηματικά οι βασικές δομές υβριδικών σταθμών μεγάλου και μικρού μεγέθους και θα αναλυθούν οι αλγόριθμοι λειτουργίας τους.
- Με βάση τους αλγόριθμους αυτούς θα δοθούν βασικές μέθοδοι διαστασιολόγησης των διαφορετικών τύπων υβριδικών σταθμών, ανάλογα με τις χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες για τις μονάδες βάσης και, κυρίως, για τις μονάδες αποθήκευσης. Η βελτιστοποίηση διαστασιολόγησης των υβριδικών σταθμών μπορεί να υλοποιείται με κριτήρια ενεργειακά (μεγιστοποίηση παραγωγής από Α.Π.Ε.) ή με κριτήρια οικονομικά (βελτιστοποίηση οικονομικών δεικτών επένδυσης).
- Τέλος θα παρουσιαστούν ενδεικτικά παραδείγματα σχεδίασης και διαστασιολόγησης υβριδικών σταθμών.

3.2. Κατηγοριοποίηση υβριδικών σταθμών ηλεκτρικής ενέργειας

Πριν την οποιαδήποτε παρουσίαση θεμάτων που αφορούν τους υβριδικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, είναι σκόπιμη η κατηγοριοποίηση των σταθμών ανάλογα με το μέγεθός τους. Τούτο, όπως θα φανεί στη συνέχεια, προκύπτει από το ότι, για διαφορετικά μεγέθη υβριδικών σταθμών, οι κατάλληλες τεχνολογίες για μονάδες βάσης και, κυρίως, μονάδες αποθήκευσης, αλλάζουν, με αποτέλεσμα να αλλάζει ο τρόπος δόμησης του σταθμού και η διαδικασία διαστασιολόγησης και υπολογισμού του. Θα διακρίνουμε λοιπόν τους υβριδικούς σταθμούς σε σταθμούς μεγάλου και μικρού μεγέθους, ενώ θα ορίσουμε και μία μεταβατική περιοχή ανάμεσα στις δύο βασικές κατηγορίες.

Στην κατηγορία υβριδικών σταθμών ηλεκτρικής ενέργειας μεγάλου μεγέθους θα κατατάξουμε τις υλοποιήσεις που απευθύνονται στην κάλυψη ζήτησης ισχύος μεγαλύτερη των 3MW. Τέτοιου μεγέθους ζήτηση ισχύος παρουσιάζουν μικροί οικισμοί ή μικρά νησιά, με συνολικό πληθυσμό που δεν ξεπερνά τους 1.000 – 1.500 κάτοικους. Συνεπώς οι υβριδικοί σταθμοί μεγάλου μεγέθους αποσκοπούν στο να καλύψουν, μέσω συγκεντρωμένης παραγωγής, τη ζήτηση ισχύος που προκύπτει από ένα σύνολο διεσπαρμένων καταναλώσεων (π.χ. ένα σύνολο οικισμών σε ένα νησί).

Στην κατηγορία υβριδικών σταθμών ηλεκτρικής ενέργειας μικρού μεγέθους ανήκουν οι σταθμοί που αποσκοπούν στην κάλυψη ζήτησης ισχύος που δεν υπερβαίνει το 1MW. Τέτοιου μεγέθους ζήτηση ισχύος εμφανίζεται σε μικρούς οικισμούς, με πληθυσμό κάτω των 500 κατοίκων, πολύ μικρά νησιά κλπ. Και οι υβριδικοί σταθμοί μικρού μεγέθους αποσκοπούν στην κάλυψη ζήτησης ισχύος μέσω κεντρικής παραγωγής.

Οι δυνάμενες να χρησιμοποιηθούν τεχνολογίες μονάδων βάσης και αποθήκευσης είναι πολύ συγκεκριμένες για καθεμία από τις δύο ανωτέρω κατηγορίες υβριδικών σταθμών. Για παράδειγμα, ένα σύνολο συστοιχιών ηλεκτροχημικών συσσωρευτών, το οποίο ενδείκνυται στην περίπτωση σταθμών μικρού μεγέθους, θα κριθεί ανεπαρκές, από τεχνικής και οικονομικής άποψης, για ένα σταθμό μεγάλου μεγέθους. Από την άλλη μεριά, ένα αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό, το οποίο θα είναι ιδανικό για ένα σταθμό μεγάλου μεγέθους, θα ήταν μάλλον αντιοικονομικό στην περίπτωση ενός μικρού υβριδικού σταθμού. Ανάμεσα στις δύο αυτές κατηγορίες υβριδικών σταθμών υπάρχει μία μεταβατική περιοχή, όπου η ζήτηση ισχύος κυμαίνεται ανάμεσα στο 1MW και στα 3MW. Στην περιοχή αυτή συστημάτων ισχύος, η επιλογή των τεχνολογιών που θα χρησιμοποιηθούν για τη σύνθεση ενός υβριδικού σταθμού δεν είναι δεδομένη εκ των προτέρων. Αντιθέτως εξαρτάται από μία σειρά παραμέτρων. Για παράδειγμα, σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να ευνοείται η κατασκευή ενός αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού, λόγω της μείωσης του κόστους κατασκευής που δύναται να προκύψει λόγω της κατάλληλης μορφολογίας του εδάφους. Σε περιπτώσεις διαθεσιμότητας φθηνού καυσίμου (π.χ. Η.Π.Α., Αυστραλία, Μέση Ανατολή), ίσως είναι περισσότερο ελκυστική η κατασκευή ενός σταθμού συμπιεσμένου αέρα, στον οποίο, όπως θα αναλυθεί σε επόμενη ενότητα, απαιτείται η κατανάλωση καυσίμου. Επίσης σημαντικό ρόλο στην επιλογή τεχνολογίας αποθήκευσης σε υβριδικούς σταθμούς που εντάσσονται σε αυτή τη μεταβατική περιοχή παίζει και ο προγραμματισμός λειτουργίας του σταθμού ανά εικοσιτετράωρο. Γενικά, όσο αυξάνουν το μέγεθος ή οι ώρες ημερήσιας παραγωγής ισχύος του υβριδικού σταθμού, η χρήση ηλεκτροχημικών συσσωρευτών τείνει να γίνει λιγότερο ανταγωνιστική, τόσο από τεχνικής, όσο και από οικονομικής σκοπιάς, καθώς η ανάγκη για αποθήκευση αυξάνεται.

Πέραν των ανωτέρω περιπτώσεων, θα μπορούσαμε να ορίσουμε μία ακόμα κατηγορία υβριδικών σταθμών, αυτή των σταθμών πολύ μικρού μεγέθους, με ισχύ που δεν ξεπερνά τα 100kW. Τέτοιου μεγέθους ζήτηση ισχύος μπορεί να εμφανίζονται απομονωμένες και μη διασυνδεδεμένες στο δίκτυο παροχής ηλεκτρικής ενέργειας εγκαταστάσεις, όπως κτηνοτροφικές μονάδες, μονάδες αφαλάτωσης, βιολογικοί καθαρισμοί, πολύ μικροί απομονωμένοι ορεινοί ή νησιωτικοί οικισμοί (π.χ. Γαύδος, Αντικύθηρα). Σε τέτοιες περιπτώσεις, οι τεχνολογίες μονάδων βάσης και μονάδων αποθήκευσης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι επίσης δεδομένες, κατ' αντιστοιχία με τους υβριδικούς σταθμούς μεγάλου μεγέθους.

Στην επόμενη ενότητα παρουσιάζονται οι δόκιμες και τεχνικοοικονομικά ώριμες και ανταγωνιστικές τεχνολογίες μονάδων βάσης και αποθήκευσης που δύναται να χρησιμοποιηθούν, ανάλογα με το μέγεθος και τον ημερήσιο προγραμματισμό λειτουργίας του υβριδικού σταθμού.

3.3. Τεχνολογίες συνιστωσών υβριδικών σταθμών μεγάλου μεγέθους

Χαρακτηριστικό γνώρισμα των υβριδικών σταθμών μεγάλου μεγέθους είναι οι υψηλές απαιτήσεις για παραγωγή και αποθήκευση ενέργειας. Οι χρησιμοποιούμενες μονάδες Α.Π.Ε. πρέπει να έχουν χαμηλό κόστος αγοράς και εγκατάστασης εξοπλισμού, χαμηλό λειτουργικό κόστος και υψηλό συντελεστή απασχόλησης. Υπενθυμίζεται εδώ ότι ο συντελεστής απασχόλησης c_f (capacity factor) ενός σταθμού παραγωγής ισχύος κατά ένα χρονικό διάστημα t λειτουργίας του σταθμού, ορίζεται ως το πηλίκο της πραγματικής παραγωγής ενέργειας E από το σταθμό στο εν λόγω χρονικό διάστημα προς τη θεωρητικά μέγιστη που δύναται να παραχθεί από το σταθμό στο ίδιο χρονικό διάστημα. Η ενέργεια αυτή, δηλαδή η θεωρητικά μέγιστη παραγωγή, προκύπτει στην περίπτωση λειτουργίας του σταθμού σταθερά με τη μέγιστη ικανότητά του P_n (συνήθως ονομαστική ισχύ στην περίπτωση σταθμών Α.Π.Ε.) καθ' όλη τη διάρκεια του εν λόγω χρονικού διαστήματος.

$$c_f = \frac{E}{P_n \cdot t} \quad (3.1)$$

Ο συντελεστής απασχόλησης ενός αιολικού πάρκου, ανάλογα με το αιολικό δυναμικό της περιοχής εγκατάστασης μπορεί να είναι από 25% έως 50%. Αντίστοιχα, ο συντελεστής απασχόλησης ενός υδροηλεκτρικού σταθμού μπορεί να ξεπεράσει το 80%, ενώ ο συντελεστής απασχόλησης ενός γεωθερμικού σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από γεωθερμικό πεδίο υψηλής ενθαλπίας μπορεί να είναι της τάξης του 98%.

Επίσης η μονάδα αποθήκευσης πρέπει να έχει μεγάλη αποθηκευτική ικανότητα, που, ξεκινώντας από στάθμη πλήρους φόρτισης, να εγγυάται τη λειτουργία του υβριδικού σταθμού για αρκετές ημέρες, χωρίς την επαναφόρτισή της και χωρίς τη συμμετοχή των μονάδων εφεδρείας. Παράλληλα, δεδομένου ότι ο υβριδικός σταθμός θα κληθεί να στηρίξει την παραγωγή ισχύος σε ένα Σ.Η.Ε., οι μονάδες αποθήκευσης θα πρέπει να χαρακτηρίζονται από ευελιξία στη διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης, οι οποίες πρέπει να εκτελούνται άμεσα και, ανάλογα με τον αλγόριθμο λειτουργίας του υβριδικού σταθμού, μπορεί να είναι και ταυτόχρονες. Τέλος η μονάδα αποθήκευσης θα πρέπει να έχει την ικανότητα να υποστηρίξει τη διατήρηση της βασικής συχνότητας του συστήματος και την ασφάλειά του.

Με βάση τις ανωτέρω απαιτήσεις, παρουσιάζονται παρακάτω οι τεχνολογίες μονάδων βάσης και αποθήκευσης για υβριδικούς σταθμούς μεγάλου μεγέθους.

3.3.1. Μονάδες βάσης

Οι πλέον ώριμες τεχνικά μονάδες μη εγγυημένης παραγωγής είναι τα αιολικά πάρκα και οι φωτοβολταϊκοί σταθμοί. Με τη μείωση στο κόστος προμήθειας των φωτοβολταϊκών πλαϊσίων που σημειώθηκε μετά το 2010, και οι δύο τεχνολογίες παρουσιάζουν τελικό ειδικό κόστος εγκατάστασης (turn key cost) της τάξης των 1.000 – 1.200€/kW.

Αναφορικά με το λειτουργικό κόστος, οι ανεμογεννήτριες παρουσιάζουν αυξημένο κόστος συντήρησης σε σχέση με τα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Από την άλλη μεριά, ένας φωτοβολταϊκός σταθμός απαιτεί πολλαπλάσια έκταση για την εγκατάστασή του ανά μονάδα ονομαστικής ισχύος του σταθμού, συνεπώς εμφανίζει υψηλότερα κόστη προμήθειας ή μίσθωσης της απαιτούμενης γης.

Τέλος μία τυπική τοποθεσία στη νησιωτική Ελλάδα για την εγκατάσταση ενός αιολικού πάρκου δύσκολα θα παρουσιάσει τελικό (μετά απωλειών) ετήσιο συντελεστή απασχόλησης κάτω του 40%. Ακόμα όμως και στην ηπειρωτική χώρα, η διαθεσιμότητα περιοχών που θα δώσουν τελικούς ετήσιους συντελεστές απασχόλησης άνω του 30% είναι μεγάλη. Σε αντιδιαστολή, ένας φωτοβολταϊκός σταθμός εγκατεστημένος στο νότιο ελλαδικό χώρο, με την υψηλότερη ένταση ηλιακής ακτινοβολίας στη χώρα, και εξοπλισμό προσανατολισμού των πλαϊσίων κάθετα στη διεύθυνση της ηλιακής ακτινοβολίας, δηλαδή στις πλέον ευνοϊκές συνθήκες εγκατάστασης και λειτουργίας του σταθμού, δύσκολα θα δώσει τελικό ετήσιο συντελεστή απασχόλησης άνω του 20%. Η χαμηλή αυτή τιμή προκύπτει κυρίως εξαιτίας του γεγονότος ότι το μισό χρονικό διάστημα από το σύνολο ενός έτους, δηλαδή κατά τη διάρκεια της νύχτας, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια παραμένουν μη παραγωγικά.

Οι χαμηλοί συντελεστές απασχόλησης που χαρακτηρίζουν τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών σταθμών πρακτικά συνεπάγεται ότι για την παραγωγή ίσης ποσότητας ενέργειας με ένα αιολικό πάρκο θα χρειαστεί η εγκατάσταση ισχύος 1,5 – 2 φορές μεγαλύτερη από αυτή του αιολικού πάρκου. Η εναλλακτική αυτή επιλογή όμως ουσιαστικά αναιρεί το χαμηλό κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας του φωτοβολταϊκού σταθμού, κάνοντας τα αιολικά πάρκα την πλέον ιδανική επιλογή για το ρόλο των μονάδων βάσης σε ένα υβριδικό σταθμό μεγάλου μεγέθους.

Τα ανωτέρω τεχνικά και οικονομικά στοιχεία σύγκρισης λειτουργίας αιολικών πάρκων και φωτοβολταϊκών σταθμών αποτυπώνονται χαρακτηριστικά στο τελικό ειδικό κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τις δύο τεχνολογίες. Ένα αιολικό πάρκο με ετήσιο τελικό συντελεστή απασχόλησης γύρω στο 40% εμφανίζει ειδικό κόστος παραγωγής της τάξης των 0,03€/kWh. Ένας φωτοβολταϊκός σταθμός με συντελεστή απασχόλησης γύρω στο 20% θα εμφανίσει ειδικό κόστος παραγωγής της τάξης του 0,08€/kWh. Για τον υπολογισμό των τιμών αυτών, πέρα από τα λειτουργικά κόστη, έχουν συμπεριληφθεί και οι αποσβέσεις των κεφαλαίων προμήθειας και εγκατάστασης των σταθμών.

Ένα ακόμα σημαντικό πλεονέκτημα των αιολικών πάρκων σε σχέση με τους φωτοβολταϊκούς σταθμούς είναι η περισσότερο ομοιόμορφη κατανομή της διαθεσιμότητας ισχύος συναρτήσει του χρόνου. Το χαρακτηριστικό αυτό έχει άμεση επίπτωση στη διαστασιολόγηση της μονάδας αποθήκευσης. Ένας φωτοβολταϊκός σταθμός παράγει αποκλειστικά την ημέρα. Συνεπώς η χωρητικότητα της μονάδας αποθήκευσης θα πρέπει να προβλεφθεί μεγαλύτερη, προκειμένου να καλύψει την καθολική έλλειψη παραγωγής ισχύος κατά τη διάρκεια της νύχτας. Το συμπέρασμα αυτό επιτείνεται πολύ περισσότερο από το ότι η παραγωγή ενός φωτοβολταϊκού σταθμού επικεντρώνεται κυρίως στη θερινή περίοδο. Τούτο έχει

απεικονιστεί στο σχήμα 2.35 του Κεφαλαίου 2. Πράγματι, ένας φωτοβολταϊκός σταθμός στην Ελλάδα παράγει περίπου το 65% της ετήσιας παραγωγής του από 15 Απριλίου έως 15 Οκτωβρίου. Συνεπώς, αν το ζητούμενο σε ένα υβριδικό σταθμό είναι η ετήσια μεγιστοποίηση της παραγωγής ενέργειας από Α.Π.Ε., στην περίπτωση χρήσης φωτοβολταϊκού σταθμού η μονάδα αποθήκευσης θα πρέπει να διαστασιολογηθεί πολύ μεγαλύτερη, προκειμένου κατά τη διάρκεια του χειμώνα να υπάρχει αποθηκευμένη ενέργεια από το καλοκαίρι και να είναι δυνατό να ανταποκριθεί ο σταθμός στην κάλυψη της χειμερινής ζήτησης ισχύος, χωρίς την υψηλή συμμετοχή των μονάδων εφεδρείας και με δεδομένη τη χαμηλή παραγωγή ισχύος από το φωτοβολταϊκό σταθμό. Γίνεται αντιληπτό, βέβαια, ότι κάτι τέτοιο δεν είναι δόκιμο, ούτε τεχνικά, καθώς θα υπάρχουν μεγάλες απώλειες στη μονάδα αποθήκευσης λόγω της μακροχρόνιας αποθήκευσης, ούτε και οικονομικά, καθώς το κόστος της μονάδας αποθήκευσης και, κατ' επέκταση, του υβριδικού σταθμού θα προκύψει πολύ υψηλό.

Καταληκτικά λοιπόν δεδομένου του ότι η μονάδα βάσης θα πρέπει να:

- Αποδίδει υψηλή παραγωγή ενέργειας, παρουσιάζοντας μεγάλο συντελεστή απασχόλησης
- Παρουσιάζει χαμηλό κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας
- Μη συνεπάγεται την κατασκευή πολύ μεγάλης μονάδας αποθήκευσης προκειμένου να επιτευχθούν οι στόχοι του υβριδικού σταθμού σχετικά με τη συμμετοχή των μονάδων Α.Π.Ε. στο ενεργειακό ισοζύγιο

η πλέον ενδεδειγμένη λύση για την τεχνολογία που θα χρησιμοποιηθεί ως μονάδα βάσης σε υβριδικούς σταθμούς μεγάλου μεγέθους είναι τα αιολικά πάρκα.

Γίνεται βέβαια αντιληπτό ότι η ανωτέρω σύγκριση ισχύει σε περιπτώσεις γεωγραφικών χώρων που υπάρχει διαθεσιμότητα τόσο υψηλού αιολικού δυναμικού, όσο και υψηλής ηλιακής ακτινοβολίας. Εξυπακούεται ότι δεν έχει νόημα επιλογή αιολικών πάρκων για τη μονάδα βάσης υβριδικού σταθμού σε περιπτώσεις ανυπαρξίας αιολικού δυναμικού. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η χρήση φωτοβολταϊκών σταθμών είναι η μόνη επιλογή, γνωρίζοντας όμως εκ των προτέρων ότι οι δυνατότητες για μεγιστοποίηση της διείσδυσης Α.Π.Ε. στο σύστημα μέσω του υβριδικού σταθμού είτε είναι περιορισμένες, είτε θα απαιτήσουν την κατασκευή πολύ μεγαλύτερου και ακριβότερου σταθμού (διπλάσια ισχύ φωτοβολταϊκού σταθμού, μεγαλύτερη μονάδα αποθήκευσης). Σε κάθε περίπτωση, η εξεύρεση περιοχών με υψηλό αιολικό δυναμικό, τέτοιων, ώστε το κόστος εγκατάστασης του αιολικού πάρκου να μην επηρεάζεται αρνητικά (π.χ. απομακρυσμένες περιοχές από τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, δύσκολη προσβασιμότητα, ακριβή γη, μορφολογικά και γεωτεχνικά δύσκολο ανάγλυφο), αποτελεί θεμελιώδη προϋπόθεση για την επιτυχή σχεδίαση και υλοποίηση υβριδικού σταθμού, ο οποίος, με χαμηλό κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας, θα δύναται να εξασφαλίσει υψηλά ποσοστά διείσδυσης Α.Π.Ε. στο σύστημα.

3.3.2. Μονάδες αποθήκευσης

Για τους υβριδικούς σταθμούς μεγάλου μεγέθους είναι ευνόητο ότι η μονάδα αποθήκευσης θα πρέπει να χαρακτηρίζεται καταρχάς από μεγάλη χωρητικότητα. Επιπλέον, ανάλογη με το μέγεθος της ζήτησης ισχύος που καλείται να καλύψει ο υβριδικός σταθμός θα πρέπει να είναι και η ισχύς φόρτισης / εκφόρτισης της μονάδας αποθήκευσης. Με βάση τα αποτελέσματα από τη μελέτη και τη διαστασιολόγηση σειράς υβριδικών σταθμών, θα μπορούσαμε εμπειρικά να πούμε ότι οι μονάδες αποθήκευσης που θα υποστηρίξουν ένα υβριδικό σταθμό μεγάλου μεγέθους θα πρέπει να παρουσιάζουν μία χωρητικότητα από 1% έως 3% της ετήσιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από το αιολικό πάρκο του υβριδικού σταθμού, ανάλογα με τον αλγόριθμο λειτουργίας του υβριδικού σταθμού και για συντελεστή απασχόλησης αιολικού πάρκου της τάξης του 30 – 40%. Η ισχύς εκφόρτισης της μονάδας αποθήκευσης θα πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με την ετήσια αιχμή ζήτησης ισχύος του συστήματος, στην περίπτωση που ο υβριδικός σταθμός καλείται να καλύψει καθολικά τη ζήτηση ισχύος. Η ισχύς φόρτισης της μονάδας αποθήκευσης θα πρέπει να είναι της τάξης της ονομαστικής ισχύος του αιολικού πάρκου του υβριδικού σταθμού (συνήθως λίγο μικρότερη). Τα ανωτέρω συνεπάγονται ότι για ένα αιολικό πάρκο υβριδικού σταθμού με ονομαστική ισχύ 50MW και συντελεστή απασχόλησης 30%, η μονάδα αποθήκευσης του υβριδικού σταθμού θα πρέπει να έχει χωρητικότητα περίπου ίση με 1.300MWh. Για να πάρουμε μία εικόνα του τι συνεπάγεται το νούμερο αυτό, στην περίπτωση κατασκευής αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού ως μονάδα αποθήκευσης του υβριδικού σταθμού, η ανωτέρω

χωρητικότητα επιτυγχάνεται με μία άνω δεξαμενή ωφέλιμου όγκου περίπου $1.700.000\text{m}^3$, ευρισκόμενη σε υψομετρική διαφορά 300m με την κάτω δεξαμενή.

Παρόλο που, θεωρητικά, ίσως υπάρχουν διαθέσιμες μία σειρά από διαφορετικές τεχνολογίες αποθήκευσης, εκείνες που στην πράξη μπορούν να αντεπεξέλθουν σε τέτοια μεγάλα μεγέθη χωρητικότητας και ισχύος φόρτισης / εκφόρτισης περιορίζονται σημαντικά. Ουσιαστικά οι διαθέσιμες τεχνολογίες αποθήκευσης για τη διαχείριση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας και την επαρκή συνδυασμένη λειτουργία τους με ένα αιολικό πάρκο στα πλαίσια ανάπτυξης ενός υβριδικού σταθμού είναι οι δύο ακόλουθες:

- σταθμοί αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα (Compressed Air Energy Storage Systems – CAES)
- αναστρέψιμο υδροηλεκτρικά – αντλιοσταμειωτήρας (Pumped Storage Systems – PSS).

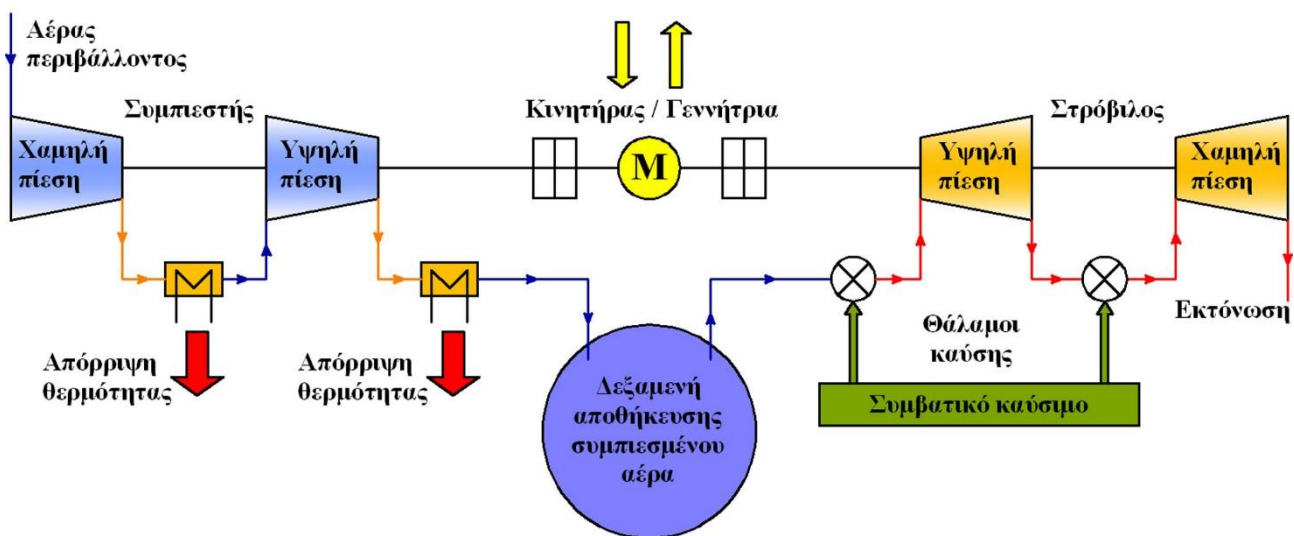
Οι τεχνολογίες αυτές παρουσιάζονται αμέσως παρακάτω.

3.3.2.a. Συστήματα αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα

Στα Συστήματα Αποθήκευσης Συμπιεσμένου Αέρα (Compressed Air Energy Storage Systems – CAES) η ενέργεια αποθηκεύεται με τη μορφή ελαστικής ενέργειας, μέσω συμπίεσης αέρα. Τα CAES διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, τα συμβατικά και τα αδιαβατικά (AA-CAES). Μέχρι σήμερα έχουν εγκατασταθεί και λειτουργούν δύο συμβατικά CAES μεγάλου μεγέθους, ένα στο Neuen Huntorf της Γερμανίας και ένα στο McIntosh των Η.Π.Α. [1]. Εντός του 2015 ενδεχομένως να προκύψουν οι πρώτες υλοποιήσεις αδιαβατικών CAES [2].

A. Συμβατικά CAES

Η δομή και η λειτουργία ενός συμβατικού CAES παρουσιάζονται στο σχήμα 3.1. Πιο συγκεκριμένα, η δομή που παρουσιάζεται στο σχήμα 3.1 είναι αυτή που έχει υλοποιηθεί στο σταθμό αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα στο Neuen Huntorf της Γερμανίας [3].



Σχήμα 3.1: Η δομή και η λειτουργία του υφιστάμενου συμβατικού CAES στο Neuen Huntorf της Γερμανίας.

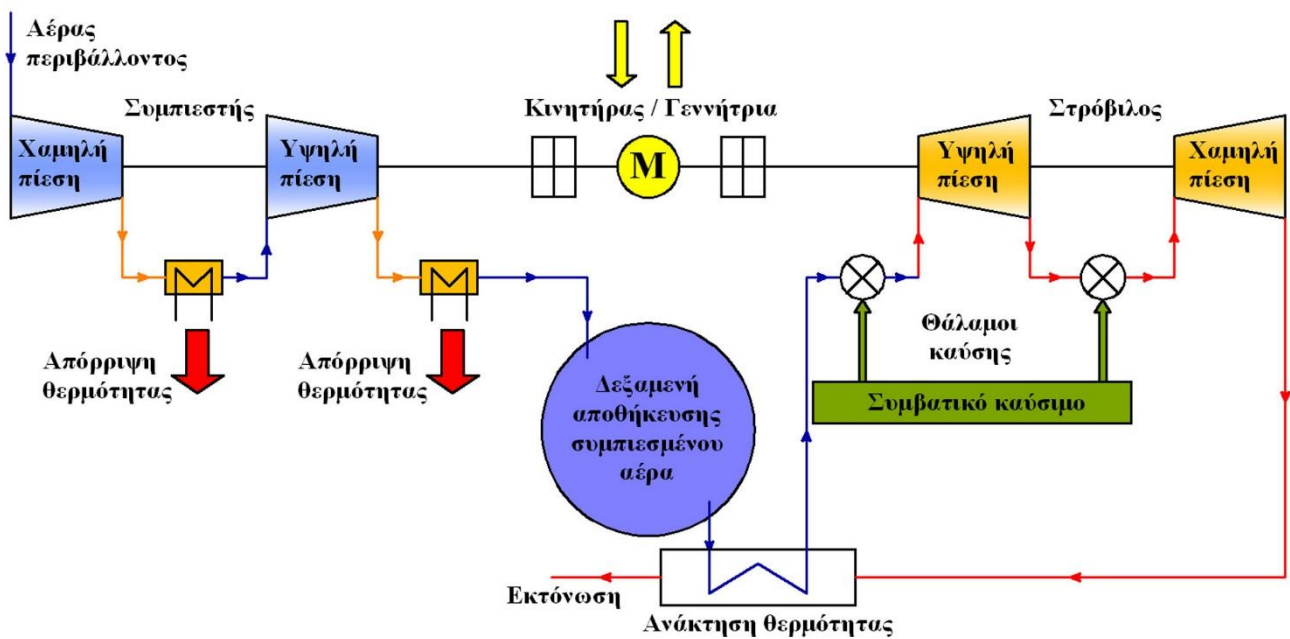
Ο αλγόριθμος λειτουργίας ενός συμβατικού CAES έχει ως εξής:

- Στην περίπτωση περισσεύσεως ενέργειας από τη μονάδα Α.Π.Ε. του υβριδικού σταθμού, τούτη διατίθεται σε ένα διβάθμιο συμπιεστή με ενδιάμεση ψύξη του συμπιεσμένου αέρα ανάμεσα στις δύο βαθμίδες. Το εργαζόμενο μέσο είναι αέρας περιβάλλοντος, ο οποίος, συμπιέζεται τελικά σε πίεση της τάξης των 40 – 70bar. Ο συμπιεσμένος αέρας, μετά την έξοδό του από το συμπιεστή, ψύχεται ξανά, με σκοπό τη διατήρηση της θερμοκρασίας του κοντά στη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η διατήρηση της θερμοκρασίας του αέρα σε χαμηλές τιμές αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση της πυκνότητάς του, συνεπώς και του όγκου του, και στην τελική αποθήκευση κατά το δυνατόν μεγαλύτερης μάζας αέρα

στο διαθέσιμο όγκο του χώρου αποθήκευσης. Κατά το τελικό στάδιο αποθήκευσης, ο κρύος και συμπιεσμένος αέρας αποθηκεύεται σε μία υπόγεια δεξαμενή.

- Στην περίπτωση που απαιτείται η μονάδα αποθήκευσης να συμπληρώσει την παραγωγή ισχύος για την κάλυψη της ζήτησης, συμπιεσμένος αέρας συγκεκριμένης παροχής, η οποία, προφανώς, εξαρτάται από την απαιτούμενη παραγωγή ισχύος, ελευθερώνεται από τη δεξαμενή αποθήκευσης, θερμαίνεται σε ένα καυστήρα με σκοπό την αύξηση της ειδικής ενθαλπίας του και οδηγείται προς εκτόνωση σε ένα διβάθμιο στρόβιλο, με ενδιάμεση αναθέρμανση του εργαζόμενου μέσου ανάμεσα στις δύο βαθμίδες του.

Στην περίπτωση του έτερου υφιστάμενου συμβατικού CAES, ο οποίος έχει εγκατασταθεί στο McIntosh της Πολιτείας της Αλαμπάμα των Η.Π.Α., έχει εφαρμοστεί μία παραλλαγή του ανωτέρω περιγραφόμενου συστήματος, με σκοπό την εξοικονόμηση του καυσίμου που καταναλώνεται για την αναθέρμανση του εργαζόμενου μέσου πριν την εκτόνωσή του. Σύμφωνα με την παραλλαγή αυτή, η οποία παρουσιάζεται στο σχήμα 3.2, ο συμπιεσμένος αέρας, μετά την έξοδό του από τη δεξαμενή αποθήκευσης και πριν την εισαγωγή του στο στρόβιλο, προθερμαίνεται σε ένα εναλλάκτη θερμότητας, στον οποίο ανακτάται θερμότητα από τον αέρα που εξέρχεται από τη δεύτερη βαθμίδα του στροβίλου, μετά την εκτόνωσή του. Με την εισαγωγή του εναλλάκτη θερμότητας επιτυγχάνεται μία συνολική αύξηση του βαθμού απόδοσης του κύκλου αποθήκευσης – παραγωγής του συμβατικού CAES κατά περίπου 10%. Από την άλλη μεριά, ένα σημαντικό μειονέκτημα αυτής της παραλλαγής είναι το απαιτούμενο μεγάλο μέγεθος του εναλλάκτη θερμότητας και η συνεπαγόμενη αύξηση του αρχικού κόστους του συστήματος [4].



Σχήμα 3.2: Η δομή και η λειτουργία του υφιστάμενου συμβατικού CAES στο McIntosh των Η.Π.Α. με την ανάκτηση θερμότητας του εξερχόμενου αέρα μετά την εκτόνωση.

Στον πίνακα 3.1 παρουσιάζονται τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά των δύο υφιστάμενων συμβατικών CAES.

Πίνακας 3.1: Βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά των δύο υφιστάμενων συμβατικών CAES.

Τεχνικά / οικονομικά χαρακτηριστικά	Neuen Huntorf, Γερμανία	McIntosh, Αλαμπάμα, Η.Π.Α.
Ισχύς (MW)	321	110
Χωρητικότητα αποθήκευσης (MWh)	1.160	2.640
Όγκος δεξαμενής αποθήκευσης (m ³)	310.000 (2 σπήλαια)	560.000
Μέγιστη πίεση αποθήκευσης (bar)	70	75
Συνολική παροχή στροβίλων (kg/s)	416	154
Συνολική παροχή συμπιεστών (kg/s)	104	96
Αρχικό κόστος εγκατάστασης (\$) - 2010)	167.000.000	65.000,000
Ειδικό κόστος αποθήκευσης (\$/kWh)	143.966	24.621
Ειδικό κόστος εγκατάστασης (\$/kW)	520.25	590.91

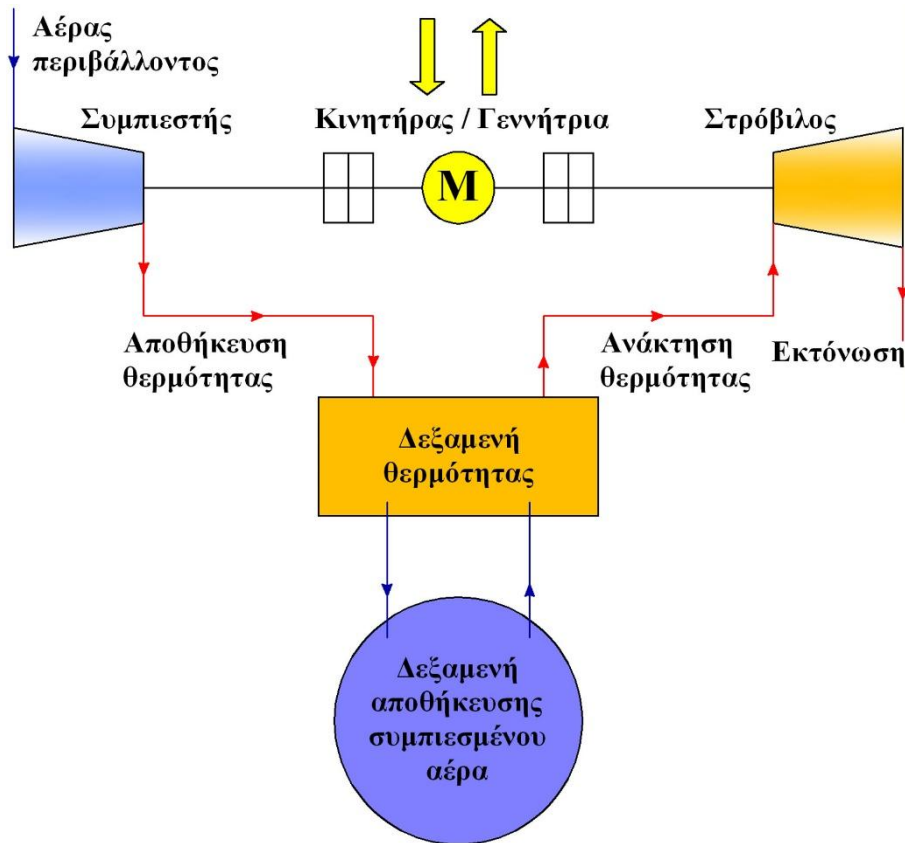
Για τη συμπίεση του ατμοσφαιρικού αέρα χρησιμοποιούνται είτε αξονικοί συμπιεστές, με τους οποίους επιτυγχάνονται λόγοι συμπίεσης της τάξης του 20 για παροχές που ανέρχονται στα 1,4Mm³/h είτε ακτινικοί συμπιεστές, με μέγιστες παροχές συμπίεσης έως 100.000m³/h και μέγιστη πίεση συμπίεσης έως 1.000bar. Με τη σημερινή διαθέσιμη τεχνολογία, η συμπίεση του αέρα επιτυγχάνεται σε δύο βαθμίδες με ενδιάμεση ψύξη, σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 40 έως 200°C [5]. Ο συμπιεσμένος αέρας εκτονώνεται τελικά σε αεριοστροβίλους με λόγους εκτόνωσης έως 22 και μέγιστη θερμοκρασία εισαγωγής μέσου έως 1.230°C.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η αποθήκευση του συμπιεσμένου αέρα σε θερμοκρασίες κοντά στη θερμοκρασία περιβάλλοντος επιτρέπει την υψηλή πυκνότητα του αποθηκευμένου μέσου, μειώνοντας έτσι τον απαιτούμενο όγκο των δεξαμενών αποθήκευσης. Για την αποθήκευση του συμπιεσμένου αέρα σε συμβατικά CAES μεγάλου μεγέθους μπορούν να χρησιμοποιηθούν υπόγειες κοιλότητες με υψηλή ποιότητα πετρωμάτων αναφορικά με την αντοχή και την αεροστεγανότητά τους, ο υδροφόρος ορίζοντας, εκκενωμένα υπόγεια πρώην σπήλαια φυσικού αερίου, ορυχεία αλατιού, με συνολικό όγκο αποθήκευσης που μπορεί να κυμαίνεται από 300.000 έως 600.000m³. Μία ακόμα εφικτή εναλλακτική επιλογή αποθήκευσης είναι η χρήση υπόγειων σωληνώσεων υψηλής πίεσης (20–100bar).

B. Αδιαβατικά CAES

Σε ένα αδιαβατικό σταθμό αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα (AA-CAES), η αφαιρούμενη θερμότητα από τον αέρα κατά τη συμπίεσή του, αντί να απορρίπτεται στο περιβάλλον, αποθηκεύεται σε μία ανεξάρτητη δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας. Η αλλαγή αυτή στη βασική δομή λειτουργίας, η οποία παρουσιάζεται στο σχήμα 3.3, αποτελεί τη βασική διαφορά ανάμεσα στα συμβατικά και στα αδιαβατικά CAES. Γίνεται αντιληπτό ότι με τα AA-CAES εκμηδενίζεται η κατανάλωση συμβατικών καυσίμων για την αναθέρμανση του αέρα πριν την εκτόνωσή του στις βαθμίδες του στροβίλου. Το σημαντικό αυτό όφελος αποτελεί το βασικό λόγο ανάπτυξης των AA-CAES.

Με τα αδιαβατικά CAES, ο συνολικός βαθμός απόδοσης του κύκλου αποθήκευσης – παραγωγής μπορεί να ανέλθει σε τιμές της τάξης του 70% [1, 2, 4], προσεγγίζοντας έτσι τις αντίστοιχες τιμές της απόδοσης που επιτυγχάνεται σε ένα αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό.



Σχήμα 3.3: Δομή και λειτουργία ενός αδιαβατικού CAES.

Η βασική δομή λειτουργίας των AA-CAES αναλύεται ως εξής, διακρινόμενη στα μονοβάθμια και στα διβάθμια αδιαβατικά CAES:

Μονοβάθμια AA-CAES

- Όταν διατίθεται περίσσεια παραγωγής ισχύος από τη μονάδα Α.Π.Ε. του υβριδικού σταθμού, ο αέρας συμπιέζεται σε μία βαθμίδα συμπίεστη χωρίς ψύξη, απελευθερώνοντας τη θερμότητα που ανακτά κατά τη συμπίεση σε μία ανεξάρτητη δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας, πριν την αποθήκευσή του στη δεξαμενή αποθήκευσης του κρύου συμπιεσμένου αέρα.
- Σε περιόδους που απαιτείται από τη μονάδα αποθήκευσης να συμβάλει μέσω της παραγωγής ισχύος στην κάλυψη της ζήτησης, ο συμπιεσμένος αέρας αναθερμαίνεται σε κατάλληλη θερμοκρασία (600°C) για την είσοδό του στο στρόβιλο μιας βαθμίδας, μέσω της ανάκτησης της αποθηκευμένης θερμότητας.

Διβάθμια AA-CAES

- Σε αδιαβατικά CAES με διβάθμια συμπίεση του εργαζόμενου μέσου, η θερμότητα, που προσδίδεται στον αέρα κατά τη συμπίεσή του στις δύο βαθμίδες του συμπιεστή, αποθηκεύεται σε διαφορετικές δεξαμενές αποθήκευσης θερμότητας.
- Κατά τις περιόδους εκφόρτισης του συστήματος αποθήκευσης, η θερμότητα, που έχει αποθηκευτεί μετά τη χαμηλή και την υψηλή βαθμίδα του συμπιεστή, ανακτάται από τον συμπιεσμένο αέρα πριν από την είσοδό του στη βαθμίδα χαμηλής και υψηλής πίεσης του στρόβιλου αντίστοιχα.

Με τα διβάθμια AA-CAES επιτυγχάνεται μεγαλύτερη πυκνότητα αποθηκευμένης ενέργειας (kWh αποθηκευμένης ενέργειας ανά m^3 όγκου δεξαμενής αποθήκευσης), αντισταθμίζοντας με αυτό τον τρόπο την περισσότερο πολύπλοκη κατασκευή του συστήματος (δύο δεξαμενές αποθήκευσης, σωληνώσεις μεταφοράς αέρα).

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα των αδιαβατικών CAES είναι:

- η εξάλειψη της κατανάλωσης καυσίμου για την αναθέρμανση του αέρα πριν από την εκτόνωσή του στους στροβίλους
- η συμπίεση του αέρα χωρίς ενδιάμεση και τελική ψύξη, που επιτρέπει τη διατήρηση υψηλών θερμοκρασιών μετά τη συμπίεση και, συνεπώς, υψηλά ποσά αποθηκευόμενης θερμότητας στη δεξαμενή αποθήκευσης.

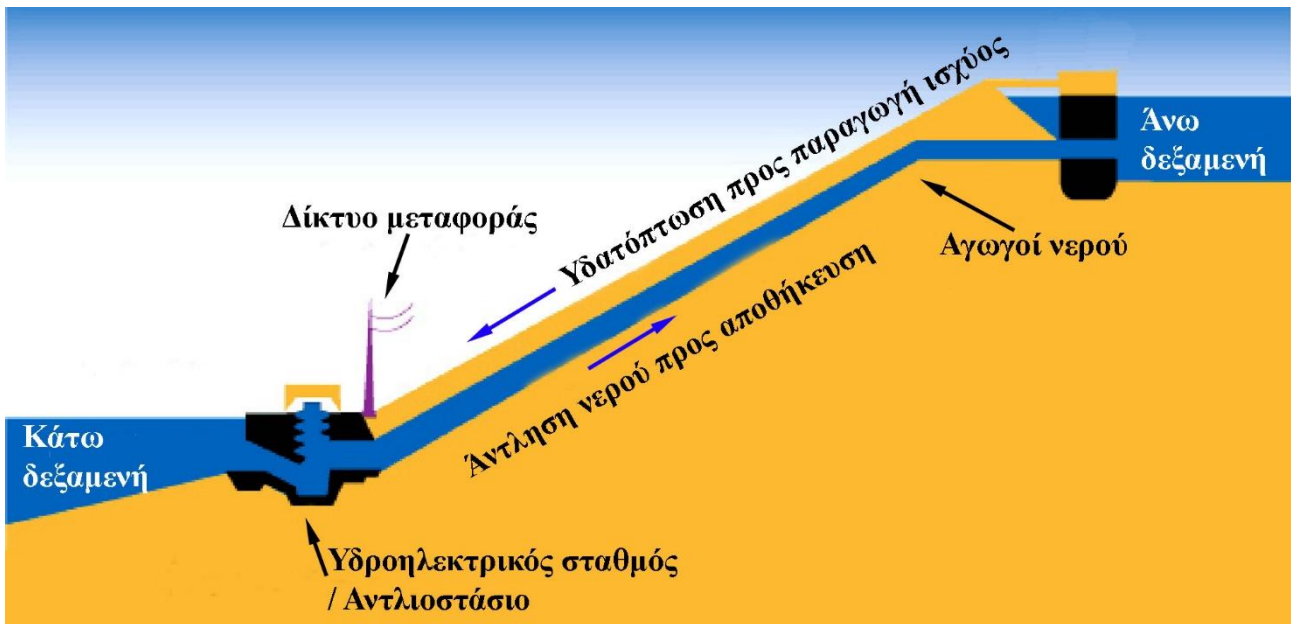
Ωστόσο, η υλοποίηση των αδιαβατικών CAES θα απαιτήσει τον εκ νέου σχεδιασμό με συγκεκριμένες βελτιώσεις των βασικών συνιστωσών του συστήματος. Συγκεκριμένα οι βελτιώσεις στον εξοπλισμό των αδιαβατικών CAES, που πρέπει να γίνουν, μπορούν να συνοψιστούν στα εξής:

- Οι απαιτούμενες δεξαμενές αποθήκευσης θερμότητας με χωρητικότητες από 120 έως 1.800MWh_{th} θα χρειαστούν ειδική σχεδίαση, προκειμένου να επιτευχθούν υψηλοί συντελεστές μεταφοράς θερμότητας κατά την αποθήκευση και την ανάκτηση θερμότητας στην και από τη δεξαμενή, ελαχιστοποιώντας όμως ταυτόχρονα τις θερμικές απώλειες προς το περιβάλλον, όσο η θερμότητα παραμένει αποθηκευμένη εντός της δεξαμενής. Θα πρέπει, επίσης, να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες θερμότητας κατά τη διαδικασία αποθήκευσης και ανάκτησης θερμότητας στην και από τη δεξαμενή [6-8]
- Σχετικά με το συμπίεστη, στα αδιαβατικά CAES η συμπίεση προσεγγίζεται θεωρητικά ορθότερα ως αδιαβατική, σε αντίθεση με τα συμβατικά CAES, όπου η συμπίεση προσεγγίζεται θεωρητικά ορθότερα ως ισοθερμοκρασιακή. Ωστόσο, με τους συμβατικούς συμπίεστες δεν μπορούν να επιτευχθούν οι υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες (100bar/620°C για μονοβάθμια συστήματα και 160bar/450°C για διβάθμια συστήματα) που απαιτούνται για την αδιαβατική συμπίεση, σε συνδυασμό με τους επιθυμητούς πολύ χαμηλούς χρόνους απόκρισης και την απαίτηση για υψηλό βαθμό απόδοσης συμπίεσης. Ως εκ τούτου, απαιτείται η σχεδίαση νέων τύπων συμπίεστων για την προσέγγιση των ανωτέρω χαρακτηριστικών λειτουργίας. Πρόσφατες μελέτες συγκλίνουν ότι οι ανωτέρω απαιτήσεις μπορούν να ικανοποιηθούν με την κατασκευή ενός συμπίεστη που θα αποτελείται από τρία τμήματα. Το πρώτο τμήμα θα συνίσταται από έναν αξονικό ή ακτινικό συμπίεστη ως τη μονάδα χαμηλής πίεσης, για μεγάλες ή μικρές παροχές αέρα αντίστοιχα. Το δεύτερο και το τρίτο τμήμα θα αποτελούνται από δύο ακτινικούς συμπίεστες κοινού άξονα, ως βαθμίδες μέσης και υψηλής πίεσης.
- Η μονάδα στροβίλου πρέπει, επίσης, να σχεδιαστεί εκ νέου προκειμένου να λειτουργήσει με υψηλές θερμοκρασίες εισόδου, μεταβαλλόμενες παροχές αέρα, χωρίς να επηρεάζεται αρνητικά η απόδοση του συστήματος. Για να προσεγγιστούν οι ανωτέρω προδιαγραφές, θα πρέπει να σχεδιαστεί μία νέα, μη συμβατική βαθμίδα ρύθμισης λειτουργίας, για τη βελτιωμένη διαχείριση εργαζόμενου μέσου με μεταβαλλόμενη πίεση και παροχή. Η προθέρμανση του στροβίλου αποδεικνύεται, επίσης, να βοηθάει στη βελτίωση της απόκρισής του [6 – 8].

3.3.2.β. Αναστρέψιμα υδροηλεκτρικά

Η αποθήκευση ενέργειας με τη μέθοδο της αντλησιοταμίευσης ή, διαφορετικά, με αντλησιοταμιευτήρες ή αναστρέψιμα υδροηλεκτρικά (Pumped Storage Systems – PSS), είναι η περισσότερο τεχνολογικά ώριμη και οικονομικά ανταγωνιστική τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας για Σ.Η.Ε. μεγάλου μεγέθους. Δεκάδες αναστρέψιμα υδροηλεκτρικά, τα οποία έχουν ήδη κατασκευαστεί και λειτουργούν παγκοσμίως κάτω από εντελώς διαφορετικές συνθήκες, καλύπτουν ένα πεδίο ισχύος από 5MW έως 2GW και παρέχουν τεράστια πρακτική εμπειρία σχετικά με τις τεχνικές προδιαγραφές και τις λεπτομέρειες που αφορούν την κατασκευή και τη λειτουργία τους.

Η βασική δομή και λειτουργία ενός αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού παρουσιάζεται στο σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4: Βασική δομή και λειτουργία ενός αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού.

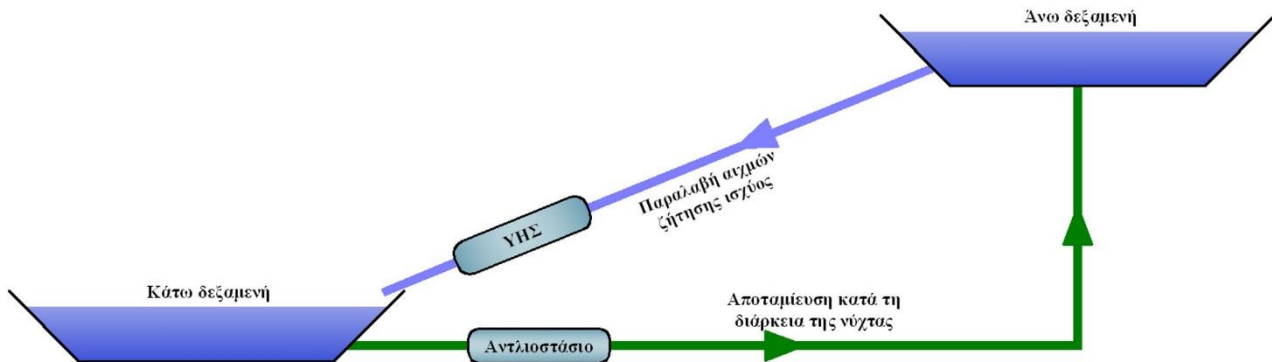
Ένα αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό αποτελείται από δύο δεξαμενές νερού, κατασκευασμένες σε όμορες γεωγραφικές θέσεις, με ικανή υψομετρική διαφορά μεταξύ τους, συνήθως μερικών εκατοντάδων μέτρων. Οι χωρητικότητες των δεξαμενών νερού μπορεί να κυμαίνονται από μερικές εκατοντάδες χιλιάδες κυβικά μέτρα, έως μερικά εκατομμύρια κυβικά μέτρα. Το νερό μπορεί να μεταφέρεται ανάμεσα στις δύο δεξαμενές είτε μέσω μονής σωληνώσεως, η οποία χρησιμοποιείται τόσο για άντληση όσο και για πτώση νερού, είτε μέσω δύο ανεξάρτητων σωληνώσεων, μία για άντληση και μία για πτώση. Το αν θα κατασκευαστούν μία ή δύο ανεξάρτητες σωληνώσεις νερού, μέσω των οποίων θα συνδέονται οι δύο δεξαμενές του αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού, εξαρτάται από τον αλγόριθμο λειτουργίας του υβριδικού σταθμού, από τον οποίο προκύπτει αν θα υπάρχει η ανάγκη για ταυτόχρονη πτώση και άντληση νερού, δηλαδή, για ταυτόχρονη φόρτιση και εκφόρτιση της μονάδας αποθήκευσης. Τα κάτω άκρα των σωληνώσεων νερού καταλήγουν σε ένα αντλιοστάσιο και σε ένα υδροηλεκτρικό σταθμό. Όταν, κατά τη λειτουργία του υβριδικού σταθμού, υπάρχει περίσσεια ισχύος από τη μονάδα Α.Π.Ε. που πρέπει να αποθηκευτεί, η ισχύς αυτή οδηγείται στις αντλίες του αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού, μέσω των οποίων το νερό αντλείται από την κάτω και αποθηκεύεται στην άνω δεξαμενή. Με αυτό τον τρόπο, η περίσσεια ενέργειας αποθηκεύεται στην άνω δεξαμενή με τη μορφή δυναμικής ενέργειας, λόγω του βαρυτικού πεδίου της γης. Στην περίπτωση που, κατά τη λειτουργία του υβριδικού σταθμού, προκύψει ανάγκη παραγωγής ισχύος από τη μονάδα αποθήκευσης, το αποθηκευμένο νερό στην άνω δεξαμενή ελευθερώνεται, διέρχεται μέσω των σωληνώσεων και καταλήγει στους υδροτροβίλους του υδροηλεκτρικού σταθμού, παρέχοντας έτσι την επιπρόσθετη απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύ.

Α. Αναστρέψιμα υδροηλεκτρικά για απαλοιφή αιχμών ισχύος

Μέχρι σήμερα έχουν κατασκευαστεί δεκάδες αναστρέψιμα υδροηλεκτρικά ανά τον κόσμο, τα οποία έχουν ενταχθεί σε συμβατικά Σ.Η.Ε. αποσκοπώντας στη λεγόμενη «απαλοιφή αιχμών ισχύος». Η απαλοιφή αιχμών ισχύος επιτυγχάνεται, αποθηκεύοντας ηλεκτρική ενέργεια από θερμοηλεκτρικές μονάδες βάσης (ατμοστρόβιλοι, ντιζελογεννήτριες, συνδυασμένοι κύκλοι), οι οποίες παρουσιάζουν χαμηλό ειδικό κόστος παραγωγής, κατά τις πρώτες πρωινές ώρες χαμηλής ζήτησης ισχύος, με σκοπό να αποδοθεί στο δίκτυο κατά τις ώρες αιχμής ζήτησης ισχύος (μεσημέρι και απόγευμα ή βράδυ, ανάλογα με την εποχή), αποφεύγοντας έτσι την ένταξη στην παραγωγή θερμικών μονάδων αιχμής με υψηλό ειδικό κόστος παραγωγής (αεριοστρόβιλοι). Ο τρόπος αυτός λειτουργίας παρουσιάζεται στο σχήμα 3.5.

Η απαλοιφή αιχμών ζήτησης ισχύος μέσω αναστρέψιμων υδροηλεκτρικών εφαρμόζεται συνήθως σε Πυρηνοληλεκτρικούς Σταθμούς ισχύος (ΠΗΣ) μεγάλου μεγέθους (της τάξης των GW), στους οποίους η μείωση της συνολικής ισχύος λειτουργίας των ενταγμένων μεγάλων ατμοστρόβιλων δεν είναι εφικτή. Για τη

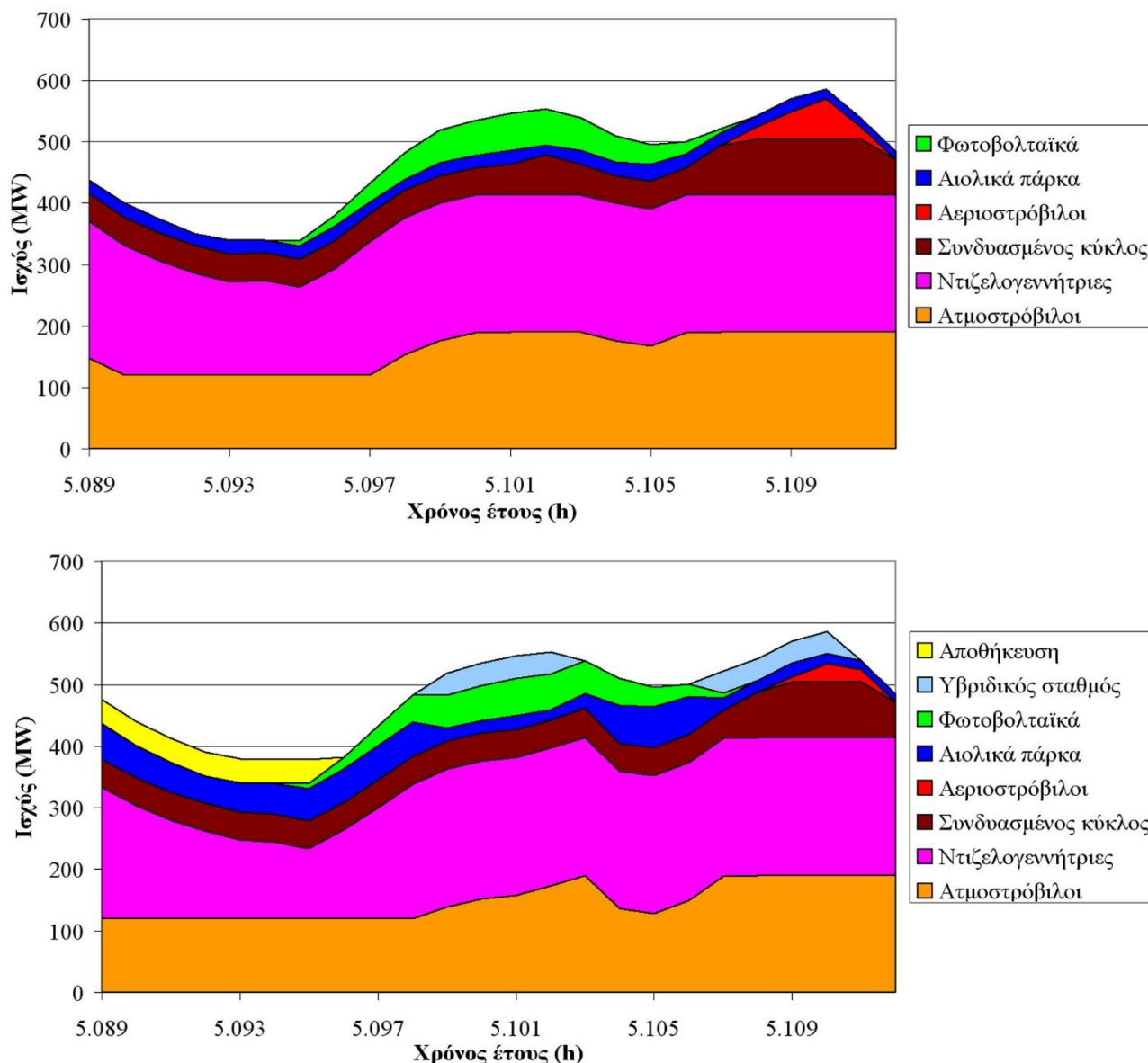
διαδικασία της απαλοιφής αιχμών ισχύος, τα αναστρέψιμα υδροηλεκτρικά κατασκευάζονται με μονή σωλήνωση, καθώς η ταυτόχρονη άντληση και πτώση νερού, ουσιαστικά δηλαδή η ταυτόχρονη αποθήκευση και παραγωγή ισχύος από το αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό, δεν έχει νόημα.



Σχήμα 3.5: Απαλοιφή αιχμών ζήτησης ισχύος μέσω αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού.

Το αποτέλεσμα της απαλοιφής ισχύος μέσω αναστρέψιμων υδροηλεκτρικών στη σύνθεση παραγωγής ισχύος παρουσιάζεται στο σχήμα 3.6, σε μία εικονική προσομοίωση του Σ.Η.Ε. Κρήτης. Στο πρώτο διάγραμμα σύνθεσης ισχύος το Σ.Η.Ε. λειτουργεί χωρίς την υποστήριξη αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού και παρουσιάζει σύνθεση παραγωγής ισχύος ανάλογη με αυτές που αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 2, ακολουθώντας τους βασικούς κανόνες ένταξης θερμικών μονάδων και μονάδων Α.Π.Ε., καθώς και διατήρησης στρεφόμενης εφεδρείας σε αυτόνομα Σ.Η.Ε.

Στο δεύτερο διάγραμμα σύνθεσης παραγωγής ισχύος του σχήματος 3.6, υποτίθεται ότι έχει ενσωματωθεί στο Σ.Η.Ε. ένα αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό εικοσιτετράωρου κύκλου αποθήκευσης – παραγωγής. Δηλαδή κάθε εικοσιτετράωρο αποθηκεύεται ενέργεια κατά τις πρωινές ώρες χαμηλής ζήτησης ισχύος, η οποία αποδίδεται πίσω στο σύστημα κατά τις μεσημεριανές και βραδινές ώρες αιχμής. Καθώς και στα δύο διαγράμματα η ζήτηση ισχύος παραμένει αμετάβλητη, η αποθήκευση ισχύος από τις μονάδες βάσης αποθηκεύεται στο αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό. Η αποθηκευμένη ενέργεια αποδίδεται πίσω στο δίκτυο κατά τις ώρες αιχμής του εικοσιτετράωρου, ελαχιστοποιώντας τη λειτουργία των αεριοστρόβιλων, η οποία εντοπίζεται στη βραδινή αιχμή, λόγω και της απουσίας παραγωγής ισχύος από τους φωτοβολταϊκούς σταθμούς. Οι αεριοστρόβιλοι τίθενται τελικά σε λειτουργία, μόνο όταν έχει εξαντληθεί η αποθηκευμένη ενέργεια στο αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό. Κατά την πρωινή αιχμή, η ένταξη του υβριδικού σταθμού υποκαθιστά παραγωγή ισχύος από το συνδυασμένο κύκλο και τους ατμοστρόβιλους.



Σχήμα 3.6: Το αποτέλεσμα της απαλοιφής αιχμών ισχύος στη σύνθεση παραγωγής.

Β. Αναστρέψιμα υδροηλεκτρικά και μονάδες Α.Π.Ε.

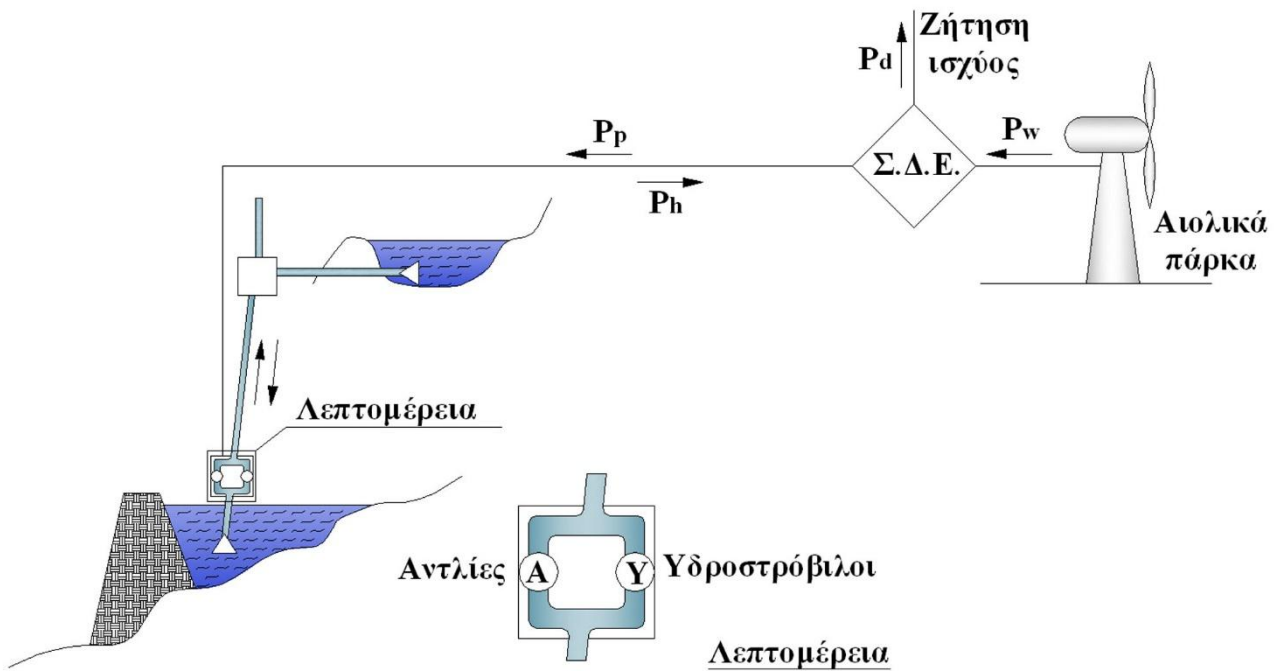
Η συνδυασμένη λειτουργία αναστρέψιμων υδροηλεκτρικών και μονάδων Α.Π.Ε., πρακτικά αιολικών πάρκων, παρόλο που αποτελεί εδώ και δύο δεκαετίες περίπου ένα ιδιαίτερα δημοφιλές θέμα στις επιστημονικές δημοσιεύσεις, έχει εφαρμοστεί στην πράξη σε δύο περιπτώσεις. Η πρώτη από αυτές απαντάται στο νησί El Hierro του συμπλέγματος των Καναρίων Νήσων, ενώ η δεύτερη από αυτές απαντάται στο νησί της Ικαρίας, στην Ελλάδα. Και στις δύο περιπτώσεις, ο υβριδικός σταθμός αιολικού πάρκου – αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού αποσκοπεί στη μεγιστοποίηση της διείσδυσης της πρωτογενούς Α.Π.Ε. (αιολική ενέργεια) στην ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τα βασικά τεχνικά και οικονομικά χαρακτηριστικά των δύο συστημάτων παρουσιάζονται στον πίνακα 3.2.

Πίνακας 3.2: Βασικά τεχνικά και οικονομικά χαρακτηριστικά των υβριδικών σταθμών στα νησιά *El Hierro* και *Ικαρία*.

Τεχνικά / οικονομικά χαρακτηριστικά	El Hierro, Ισπανία	Ικαρία, Ελλάδα
Ετήσια αιχμή ζήτησης ισχύος συστήματος (MW)	13,3	7,8
Ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας (MWh)	41.000	27.600
Αιολικά πάρκα (αριθμός ανεμογεννητριών / ισχύς)	5 x 2,3MW = 11,5MW	4 x 600kW = 2,4 MW
Χωρητικότητα άνω δεξαμενής (m ³)	380.000	900.000 (1 ^η δεξαμενή) 80.000 (2 ^η δεξαμενή)
Χωρητικότητα κάτω δεξαμενής (m ³)	150.000	80.000
Ολικό μανομετρικό (m)	655	724 (1 ^η δεξαμενή) 555 (2 ^η δεξαμενή)
Χωρητικότητα αποθήκευσης (MWh)	580	1.500
Αντλιοστάσιο (μονάδες / ισχύς)	2 x 1.500kW + 6 x 500kW = 6MW	8 x 250kW = 2MW
Υδροηλεκτρικός σταθμός (μονάδες / ισχύς)	4 Pelton x 2,830kW = 11,32MW	2 x 1,550kW + 1,050kW = 4,15MW
Συνολικό αρχικό κόστος εγκατάστασης (€)	64.700.000	26.000.000
Αρχικό κόστος αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού (€)	50.000.000	23.000.000
Ειδικό κόστος αποθήκευσης αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού (€/kWh)	86,21	15,33
Συνολικός βαθμός απόδοσης αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού (%)	65	69
Ετήσια διείσδυση ενέργειας υβριδικού σταθμού (%)	80,0	50,0

Ο βασικός σκοπός της συνδυασμένης λειτουργίας αιολικού πάρκου και αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού, που δεν είναι άλλος από τη μεγιστοποίηση της ετήσιας συμμετοχής του αιολικού πάρκου στην κάλυψη των αναγκών του Σ.Η.Ε. σε ηλεκτρική ενέργεια, εισάγει συγκεκριμένες διαφοροποιήσεις στη σχεδίαση και στη λειτουργία του αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού. Η βασική καινοτομία και διαφορά με τα αναστρέψιμα υδροηλεκτρικά, που χρησιμοποιούνται για απαλοιφή αιχμών ζήτησης ισχύος, είναι η εγκατάσταση διπλής σωλήνωσης, μέσω της οποίας είναι δυνατή η ταυτόχρονη άντληση και πτώση νερού [9]. Η αναγκαιότητα για την εγκατάσταση διπλής σωλήνωσης απορρέει από το δεδομένο της ύπαρξης μέγιστου ποσοστού απευθείας στιγμιαίας διείσδυσης των μονάδων Α.Π.Ε. στο δίκτυο, το οποίο, με βάση τα αναφερόμενα στο Κεφάλαιο 2, επιβάλλεται για λόγους εξασφάλισης της δυναμικής ασφάλειας του συστήματος. Η εγκατάσταση διπλής σωλήνωσης επιτρέπει την αποθήκευση της περίσσειας ηλεκτρικής ισχύος από το αιολικό πάρκο που δεν επιτρέπεται να διεισδύσει απευθείας στο δίκτυο, ενώ ταυτόχρονα είναι δυνατή η ροή νερού από την ανεξάρτητη σωλήνωση πτώσης, για την κάλυψη από τους υδροστρόβιλους του ελλείμματος στην παραγωγή ισχύος ως προς τη ζήτηση. Η διαθεσιμότητα διπλής σωλήνωσης βελτιώνει, επίσης, την ευελιξία του συστήματος και την ικανότητά του να αντιδράσει σε περίπτωση εμφάνισης συμβάντων και διαταραχών στο Σ.Η.Ε. Για παράδειγμα, στην περίπτωση ξαφνικής απώλειας παραγωγής ισχύος από το αιολικό πάρκο, η ανεξάρτητη σωλήνωση πτώσης επιτρέπει την άμεση ένταξη στο δίκτυο των υδροστρόβιλων για κάλυψη της απώλειας παραγωγής, ακόμα και αν τη στιγμή του συμβάντος επιτελούνταν άντληση νερού.

Ο αλγόριθμος λειτουργίας ενός αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού, συνδυαζόμενου με αιολικό πάρκο, είναι, επίσης, εντελώς διαφορετικός από τον αντίστοιχο για απαλοιφή αιχμών ζήτησης ισχύος. Ο αλγόριθμος αυτός απεικονίζεται γραφικά, στη γενική μορφή του, στο σχήμα 3.7 [9].



Σχήμα 3.7: Η φιλοσοφία λειτουργίας υβριδικού σταθμού αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού και αιολικού πάρκου.

Κάποια χρονική στιγμή έστω ότι η ζήτηση ισχύος είναι P_d και η διαθεσιμότητα ισχύος από το αιολικό πάρκο είναι P_w . Η απευθείας διείσδυση ισχύος P_{wp} από το αιολικό πάρκο προς το δίκτυο περιορίζεται έως ένα μέγιστο ποσοστό a ως προς τη ζήτηση ισχύος $P_{wp} = a \cdot P_d$ ($0 < a < 1$), με σκοπό να μην επηρεαστεί αρνητικά η δυναμική ασφάλεια του συστήματος. Τούτο επιτυγχάνεται με την ένταξη στο σύστημα των αντλιών του αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού, στην περίπτωση στην οποία η ισχύς του αιολικού πάρκου υπερβαίνει την εν λόγω μέγιστη δυνατή διείσδυση ισχύος.

Διακρίνονται δύο περιπτώσεις:

1. Αν το αποθηκευμένο νερό στην άνω δεξαμενή του αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού δεν επαρκεί, το υπόλοιπο της ζήτησης ισχύος, που δεν καλύπτεται μέσω της απευθείας διείσδυσης του αιολικού πάρκου, παρέχεται από τις μονάδες εφεδρείας του υβριδικού σταθμού, οι οποίες παράγουν συνολική ισχύ ίση με $P_{th} = P_d - P_{wp}$. Η παραγωγή ισχύος από τους υδροστρόβιλους του υβριδικού σταθμού είναι μηδενική: $P_{ht} = 0$. Οι αντλίες του αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού τροφοδοτούνται με την περίσσεια ισχύος του αιολικού πάρκου $P_p = P_w - P_{wp}$, προκειμένου να την αποθηκεύσουν, ανεβάζοντας νερό στην άνω δεξαμενή.

2. Αν στην άνω δεξαμενή του αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού υπάρχει ικανή αποθηκευμένη ποσότητα νερού, το υπόλοιπο της ζήτησης ισχύος, που δεν καλύπτεται μέσω της απευθείας διείσδυσης του αιολικού πάρκου, παράγεται από τους υδροστρόβιλους: $P_{ht} = P_d - P_{wp}$. Την ίδια στιγμή, η πιθανή περίσσεια ισχύος από το αιολικό πάρκο $P_w - P_{wp}$ αποθηκεύεται και πάλι μέσω του αντλιοστασίου στην άνω δεξαμενή του αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού, υπό την προϋπόθεση ότι τούτη δεν είναι γεμάτη. Αν συμβαίνει κάτι τέτοιο, δεν είναι δυνατή η αποθήκευση της περίσσειας ισχύος από το αιολικό πάρκο. Η περίσσεια αυτή είτε θα πρέπει να απορριφθεί, καθορίζοντας το σημείο λειτουργίας των ανεμογεννητριών είτε θα μπορούσε να αξιοποιηθεί σε εναλλακτικές δράσεις (π.χ. αφαλάτωση ή παραγωγή υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης). Η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος από τις μονάδες εφεδρείας είναι μηδενική: $P_{th} = 0$.

Από τον ανωτέρω αλγόριθμο είναι ξεκάθαρος ο ρόλος των μονάδων Α.Π.Ε. ως μονάδες βάσης του συστήματος και των θερμοηλεκτρικών μονάδων ως μονάδες εφεδρείας.

Μια ειδική κατηγορία αναστρέψιμων υδροηλεκτρικών, ιδιαίτερης σημασίας για την Ελλάδα και, ακόμα περισσότερο, για τα ελληνικά νησιά, είναι η χρήση θαλασσινού νερού ως εργαζόμενου μέσου στο αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό και η απευθείας χρήση της θάλασσας ως κάτω δεξαμενή του αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού. Η περίπτωση λειτουργίας αναστρέψιμων υδροηλεκτρικών με θαλασσινό νερό παρέχει μία πολύτιμη εναλλακτική λύση σε γεωγραφικές περιοχές με χαμηλές βροχοπτώσεις, καθώς εξασφαλίζει τη διαθεσιμότητα του εργαζόμενου μέσου χωρίς να επηρεάζει τα περιορισμένα αποθέματα γλυκού νερού. Οι

περιπτώσεις αυτές απαντώνται συχνά σε μικρά νησιά, όπως τα ελληνικά, καθώς και σε νησιά κοντά στον Ισημερινό. Έως σήμερα έχει κατασκευαστεί μόνο ένα αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό με χρήση θαλασσινού νερού (Seawater Pumped Storage System – S-PSS) στην Okinawa της Ιαπωνίας, απασχολούμενο για απαλοιφή αιχμών ισχύος. Το έργο αυτό, καθώς λειτουργεί ήδη για περισσότερο από δέκα έτη, αποτελεί μια πολύτιμη πηγή γνώσης και εμπειρίας για την ανάπτυξη παρόμοιων συστημάτων [10 – 12].

Είναι αυτονόητο ότι τα αναστρέψιμα υδροηλεκτρικά με χρήση θαλασσινού νερού πρέπει να εγκαθίστανται επί της ακτογραμμής [13]. Η μορφολογία του εδάφους στην ακτογραμμή αποτελεί κρίσιμη παράμετρο σχετικά με την τεχνική εφικτότητα του αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού και τη διαμόρφωση του συνολικού αρχικού κόστους εγκατάστασής του. Λόφοι και μικρά υψώματα με απόλυτα υψόμετρα από 200m έως 600m θεωρούνται ιδανικά για την εγκατάσταση αναστρέψιμων υδροηλεκτρικών. Οι ήπιες κλίσεις των πρανών από τις κορυφές προς την ακτή, καθώς και η ήπια μορφολογία τόσο των πρανών όσο και της ακτής (απουσία γκρεμών, χαραδρών κλπ), συμβάλλουν προς την ελαχιστοποίηση των απαιτούμενων χωματουργικών έργων για την εγκατάσταση των αγωγών και των σταθμών υδροδυναμικών μηχανών (αντλιοστάσιο και υδροηλεκτρικός σταθμός). Τα ανωτέρω συμβάλλουν συντεταγμένα στην ελαχιστοποίηση του κόστους εγκατάστασης του έργου. Ιδιαίτερα οι απότομες κλίσεις των πρανών ενδεχομένως να συνεπάγονται την κατασκευή υπόγειων σηράγγων. Τέτοιου είδους έργα ανεβάζουν σημαντικά το αρχικό κόστος εγκατάστασης και, υπό προϋποθέσεις, δύναται να καταστήσουν οικονομικά μη σκόπιμη την κατασκευή και λειτουργία του έργου, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις μικρών έργων, όπως των προαναφερόμενων στο El Hierro και στην Ικαρία. Σε τέτοια μικρά έργα, η ελαχιστοποίηση του αρχικού κόστους εγκατάστασης, για την οποία βασική παράμετρος είναι η ευνοϊκή εδαφική μορφολογία, αποτελεί κρίσιμη προϋπόθεση για την οικονομική σκοπιμότητα του υβριδικού σταθμού.

3.4. Τεχνολογίες συνιστωσών υβριδικών σταθμών μικρού μεγέθους

Οι υβριδικοί σταθμοί μικρού μεγέθους αποσκοπούν στη συμβολή παραγωγής ή στη συνολική κάλυψη της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας στα οποία η ζήτηση ισχύος δεν ξεπερνά το 1MW. Σε υβριδικούς σταθμούς μικρού μεγέθους, όπως θα τεκμηριωθεί στη συνέχεια, η εισαγωγή αναστρέψιμων υδροηλεκτρικών ή σταθμών συμπιεσμένου αέρα μεγάλου μεγέθους δεν κρίνεται σκόπιμη, λόγω του υψηλού κόστους εγκατάστασης που τούτες οι τεχνολογίες συνεπάγονται, το οποίο δεν δικαιολογείται από τη χαμηλή κατανάλωση ισχύος. Οι διαφορετικές τεχνολογίες των μονάδων αποθήκευσης ανατρέπουν τα δεδομένα και στις μονάδες βάσης.

3.4.1. Μονάδες βάσης

Και στην περίπτωση υβριδικών σταθμών μικρού μεγέθους ισχύουν τα όσα αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα για τις μονάδες βάσης. Τα αιολικά πάρκα παρουσιάζουν τους υψηλότερους συντελεστές απασχόλησης, συνεπώς θα παράγουν ετησίως τα υψηλότερα ποσά ηλεκτρικής ενέργειας με το χαμηλότερο ειδικό κόστος παραγωγής. Άρα σαφέστατα έχουν προτεραιότητα σε σχέση με τους φωτοβολταϊκούς σταθμούς, όσον αφορά τις μονάδες βάσης του υβριδικού σταθμού μικρού μεγέθους.

Στην περίπτωση όμως των υβριδικών σταθμών μικρού μεγέθους, η προτεραιότητα των αιολικών πάρκων δε συνεπάγεται και αποκλειστικότητα, όπως στους υβριδικούς σταθμούς μεγάλου μεγέθους. Και τούτο δεν έχει να κάνει με τις ίδιες τις τεχνολογίες των μονάδων βάσης, αλλά με τις τεχνολογίες αποθήκευσης που θα τις υποστηρίξουν, στα πλαίσια της ολοκλήρωσης του υβριδικού σταθμού. Σε περίπτωση μεγάλου υβριδικού σταθμού, η ύπαρξη ενός αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού σωστά διαστασιολογημένου, θα συνεπάγεται τη διαθεσιμότητα μιας μονάδας αποθήκευσης με αυτονομία που δύναται να ξεπερνάει ακόμα και τη μία εβδομάδα. Συνεπώς γίνεται κατανοητό ότι στις περιπτώσεις μεγάλων υβριδικών σταθμών, η μονάδα αποθήκευσης παρέχει τη δυνατότητα μεγάλης αποθήκευσης ενέργειας, που είναι δυνατό να υποστηρίξει από μόνη της το σύστημα για αρκετές μέρες, αποθηκεύοντας μεγάλες ποσότητες ενέργειας από τη μονάδα Α.Π.Ε. όταν τούτες είναι διαθέσιμες. Η δυνατότητα αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για την κάλυψη των αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια κατά τις περιόδους που δεν υπάρχει διαθεσιμότητα παραγωγής ισχύος από τις μονάδες Α.Π.Ε.

Στην περίπτωση όμως μικρών υβριδικών σταθμών, τούτη η δυνατότητα ίσως να μην παρέχεται από τις μονάδες αποθήκευσης, ειδικά αν χρησιμοποιούνται ηλεκτροχημικοί συσσωρευτές. Συγκεκριμένα, οι

ηλεκτροχημικοί συσσωρευτές, οι διάφοροι τύποι των οποίων θα παρουσιαστούν αναλυτικά στη συνέχεια, παρουσιάζουν κάποια βασικά χαρακτηριστικά, τα οποία συνάδουν στον περιορισμό της εγκατάστασης υψηλής ισχύος:

- Παρουσιάζουν υψηλό κόστος προμήθειας και μικρή διάρκεια ζωής. Για παράδειγμα, από το σύνολο των διαθέσιμων τεχνολογιών ηλεκτροχημικής αποθήκευσης, η πλέον οικονομική τεχνολογία είναι οι συσσωρευτές οξέος μολύβδου. Οι συσσωρευτές οξέος μολύβδου, όμως, υπό ιδανικές συνθήκες λειτουργίας (θερμοκρασίες περιβάλλοντος έως 26 °C, μέγιστο βάθος εκφόρτισης έως 60%), μπορούν να λειτουργήσουν ικανοποιητικά, χωρίς σημαντική μείωση της χωρητικότητάς τους, έως 6 – 7 έτη. Συνεπώς, κατά τη διάρκεια ζωής ενός υβριδικού σταθμού, η οποία θεωρητικά λαμβάνεται της τάξης των είκοσι ετών, οι ηλεκτροχημικοί συσσωρευτές θα πρέπει να αντικατασταθούν δύο με τρεις φορές.
- Το χαμηλό βάθος εκφόρτισης από το οποίο χαρακτηρίζονται κάποιοι βασικοί τύποι ηλεκτροχημικών συσσωρευτών ουσιαστικά περιορίζει αναλογικά την ωφέλιμη χωρητικότητά τους, δηλαδή τη μέγιστη ικανότητα αποθήκευσης.
- Υπάρχει περιορισμός ως προς την ευελιξία τους. Σε ένα αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό ή σε ένα σταθμό συμπιεσμένου αέρα είναι δυνατή η ταυτόχρονη φόρτιση – εκφόρτισή τους. Αντίθετα, σε μία μονάδα ηλεκτροχημικής αποθήκευσης, η ταυτόχρονη φόρτιση – εκφόρτιση δεν είναι δυνατή. Προκειμένου να προβλεφθεί αυτή η σημαντική δυνατότητα για την εύρυθμη λειτουργία του υβριδικού σταθμού, θα πρέπει να εγκατασταθούν διαφορετικές ανεξάρτητες μεταξύ τους μονάδες αποθήκευσης (συστοιχίες συσσωρευτών). Τούτο, όπως γίνεται αντιληπτό, αυξάνει τον απαιτούμενο αριθμό των συστοιχιών και, κατ' επέκταση, το αρχικό κόστος προμήθειας και το κόστος των ενδιάμεσων αντικαταστάσεων.
- Κάποιοι τεχνολογικά βελτιωμένοι τύποι ηλεκτροχημικών συσσωρευτών (π.χ. συσσωρευτές ροής – floating batteries), οι οποίοι δε χαρακτηρίζονται από περιορισμό στο βάθος εκφόρτισης και, επίσης, παρουσιάζουν διάρκεια ζωής μεγαλύτερη της εικοσαετίας, ακόμα εμφανίζουν πολύ υψηλό κόστος προμήθειας.

Για όλους τους παραπάνω λόγους, προς το παρόν τουλάχιστον, δεν είναι δυνατή η εγκατάσταση μεγάλων μονάδων αποθήκευσης σε μικρούς υβριδικούς σταθμούς. Η μέγιστη ικανότητα αποθήκευσης περιορίζεται για λόγους τεχνικούς και οικονομικούς, με αποτέλεσμα η δυνατότητα μακροχρόνιας υποστήριξης του συστήματος από τη μονάδα αποθήκευσης να μην είναι εφικτή σε σταθμούς μικρού μεγέθους. Στην πράξη, με τη χρήση ηλεκτροχημικών συσσωρευτών συνήθως επιτυγχάνεται αυτονομία παραγωγής από τη μονάδα αποθήκευσης της τάξης της μίας ημέρας.

Ως συνέπεια των ανωτέρω, προκειμένου να προκύψει υψηλή διείσδυση Α.Π.Ε. σε ένα Σ.Η.Ε. μικρού μεγέθους, δεδομένης της χαμηλής αποθηκευτικής ικανότητας της μονάδας αποθήκευσης, θα πρέπει να υπάρξει συνεχής παραγωγή ισχύος από τις μονάδες Α.Π.Ε. Τούτο πρακτικά προσεγγίζεται με δύο τρόπους, που τεκμηριώνονται στη συνέχεια.

Κατά πρώτον, εγκαθιστώντας υψηλή ισχύ, περίπου μιάμιση με δύο φορές μεγαλύτερη από την ετήσια αιχμή του συστήματος της βασικής μονάδας Α.Π.Ε., δηλαδή του αιολικού πάρκου. Τούτη η πρακτική έχει αποτέλεσμα τη συνεχή παραγωγή ισχύος σε μεγέθη ικανά για την κάλυψη της ζήτησης, ακόμα και σε περιόδους χαμηλής διαθεσιμότητας δυναμικού Α.Π.Ε.. Προφανώς βασική προϋπόθεση αποτελεί η διαθεσιμότητα κάποιου, έστω χαμηλού, δυναμικού Α.Π.Ε. συνεχώς.

Καθώς όμως είναι στατιστικά βέβαιο ότι θα προκύψουν κάποιες περιόδους στο έτος που η διαθεσιμότητα του δυναμικού της βασικής τεχνολογίας Α.Π.Ε. θα είναι ανεπαρκής, στις περιόδους αυτές, ανεξάρτητα από την ισχύ της μονάδας Α.Π.Ε. που θα εγκατασταθεί, δε θα είναι δυνατή η παραγωγή της ελάχιστης ποσότητας ισχύος από αυτήν. Στην περίπτωση χρήσης αιολικού πάρκου ως βασική μονάδα Α.Π.Ε., οι περίοδοι μη διαθεσιμότητας αιολικού δυναμικού συμπίπτουν με χρονικά διαστήματα νηνεμίας. Τα διαστήματα αυτά, όταν απαντώνται κατά τη θερινή περίοδο, προκαλούν την εμφάνιση υψηλών θερμοκρασιών και οδηγούν στη διαμόρφωση καύσωνα, κατά τη διάρκεια των οποίων, συνήθως, εμφανίζονται οι ετήσιες αιχμές κατανάλωσης ηλεκτρικής ισχύος, λόγω της ταυτόχρονης και υψηλής χρήσης συστημάτων κλιματισμού. Η έλλειψη παραγωγής ισχύος από τη μονάδα Α.Π.Ε. και η χαμηλή χωρητικότητα της μονάδας αποθήκευσης συνεπάγονται την αδυναμία υποστήριξης της ζήτησης ισχύος από τον υβριδικό σταθμό μικρού μεγέθους για περισσότερο από μία ημέρα. Η λύση στην περίπτωση αυτή είναι η εγκατάσταση μιας

εναλλακτικής τεχνολογίας Α.Π.Ε., η οποία θα λειτουργήσει συμπληρωματικά ως προς την πρώτη, σε περιπτώσεις που τούτη δεν θα είναι διαθέσιμη. Βασική προϋπόθεση είναι η διαθεσιμότητα δυναμικού για την εναλλακτική τεχνολογία Α.Π.Ε. κατά τις χρονικές περιόδους στις οποίες το αντίστοιχο δυναμικό της βασικής τεχνολογίας Α.Π.Ε. δεν επαρκεί. Στο ανωτέρω παράδειγμα χρήσης αιολικού πάρκου ως βασική τεχνολογία Α.Π.Ε., η εναλλακτική τεχνολογία, που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί κατά τις περιόδους νηνεμίας, είναι οι φωτοβολταϊκοί σταθμοί. Η τεχνολογία αυτή δύναται να καλύψει με απόλυτη επιτυχία τις περιπτώσεις χαμηλής παραγωγής ισχύος από το αιολικό πάρκο, ιδιαίτερα κατά τη θερινή περίοδο εμφάνισης νηνεμιών, όταν η διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία είναι, εκ των πραγμάτων, εγγυημένη και υψηλή. Ούτως ή άλλως, η τεχνολογία αυτή, όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη ενότητα για τους μεγάλους υβριδικούς σταθμούς, είναι πρακτικά η μόνη εναλλακτική λύση μετά τα αιολικά πάρκα, ως η πλέον ώριμη τεχνολογικά και οικονομικά ανταγωνιστική για χρήση ως μονάδα βάσης υβριδικού σταθμού. Η εμπειρία από την προσομοίωση λειτουργίας και τη διαστασιολόγηση υβριδικών σταθμών μικρού μεγέθους αποδεικνύει ότι, συνήθως, επαρκεί η εγκατάσταση ισχύος φωτοβολταϊκού σταθμού περίπου στο 80% της ετήσιας αιχμής ζήτησης ισχύος του συστήματος, με δεδομένη την ηλιακή ακτινοβολία της Ελλάδας κατά τη θερινή περίοδο. Η εναλλακτική τεχνολογία για τη μονάδα βάσης, αναφερόμενοι για γεωγραφικές περιοχές με κλιματικά χαρακτηριστικά όμοια με αυτά της Ελλάδας, αναμένεται να συμβάλει στην κάλυψη της ζήτησης κυρίως κατά τη θερινή περίοδο εμφάνισης των ετήσιων αιχμών ζήτησης ισχύος.

Η εγκατάσταση της εναλλακτικής τεχνολογίας μονάδας βάσης, ουσιαστικά δηλαδή των φωτοβολταϊκών σταθμών, πρακτικά προτιμάται από την εναλλακτική επιλογή της αύξησης της ονομαστικής χωρητικότητας των μονάδων αποθήκευσης κυρίως για οικονομικούς λόγους. Το ίδιο δηλαδή αποτέλεσμα αναφορικά με την τελική διείσδυση ηλεκτρικής ενέργειας στο σύστημα από τον υβριδικό σταθμό, το οποίο επιτυγχάνεται με την εγκατάσταση μικρής ισχύος φωτοβολταϊκού σταθμού, θα μπορούσε να επιτευχθεί, επίσης, με την εγκατάσταση πολύ μεγαλύτερου αριθμού στοιχείων αποθήκευσης, λύση όμως με σημαντικά υψηλότερο κόστος.

Με την τεκμηρίωση λοιπόν που προηγήθηκε καταλήγουμε στα ακόλουθα συμπεράσματα σχετικά με τις δυνατές επιλογές για τις μονάδες βάσης υβριδικών σταθμών μικρού μεγέθους:

- Ως βασική μονάδα Α.Π.Ε. χρησιμοποιείται και πάλι η αιολική ενέργεια, με την εγκατάσταση μικρών αιολικών πάρκων με ισχύ περίπου μιάμιση με δύο φορές μεγαλύτερη από την ετήσια αιχμή του συστήματος.
- Συμπληρωματικά, κυρίως για την κάλυψη των ετήσιων αιχμών ισχύος κατά τη θερινή περίοδο, ενδείκνυται η εγκατάσταση φωτοβολταϊκού σταθμού, περίπου με ονομαστική ισχύ περίπου στο 80% της ετήσιας αιχμής του συστήματος.

Εν γένει ισχύει ως κανόνας ότι σε περιπτώσεις χαμηλής χωρητικότητας της μονάδας αποθήκευσης, η διαθεσιμότητα ισχύος από τις εναλλακτικές τεχνολογίες Α.Π.Ε. συμβάλει σημαντικά στη μεγιστοποίηση της παραγωγής του υβριδικού σταθμού.

Θα πρέπει, τέλος, να τονιστεί ότι σε πολύ μικρούς υβριδικούς σταθμούς, όπως, για παράδειγμα, ένας υβριδικός σταθμός παραγωγής ισχύος για πολύ μικρούς ορεινούς ή νησιωτικούς οικισμούς (Γαύδος, Αγαθονήσι, Αντικύθηρα κλπ), το μικρό μέγεθος της ζήτησης αντιμετωπίζεται εύκολα και με τις δύο εναλλακτικές, δηλαδή είτε με τη χρήση δύο διαφορετικών τεχνολογιών Α.Π.Ε. είτε με την αύξηση της μονάδας αποθήκευσης. Το μικρό μέγεθος της ζήτησης και, κατά συνέπεια, του απαιτούμενου υβριδικού σταθμού, επιτρέπει την υλοποίηση οποιασδήποτε εναλλακτικής σχεδίασης, χωρίς τη δραματική ή απαγορευτική αύξηση του κόστους εξοπλισμού και εγκατάστασης. Στις περιπτώσεις αυτές, η αύξηση της χωρητικότητας αποθήκευσης μπορεί να προτιμηθεί αντί της εγκατάστασης δύο τεχνολογιών Α.Π.Ε. για διάφορους λόγους, όπως η απλούστευση της δομής του υβριδικού σταθμού, η μη διαθεσιμότητα σε ικανοποιητική ένταση του δυναμικού Α.Π.Ε. για τη μία από τις δύο τεχνολογίες, περιβαλλοντικοί ή αισθητικοί λόγοι κλπ.

3.4.2. Μονάδες αποθήκευσης

Σε υβριδικούς σταθμούς μικρού και πολύ μικρού μεγέθους οι διαθέσιμες τεχνολογίες προς αποθήκευση ενέργειας είναι:

- οι διάφοροι τύποι ηλεκτροχημικών συσσωρευτών,
- οι σταθμοί συμπιεσμένου αέρα μικρού μεγέθους, οι λεγόμενοι micro CAES,
- οι κυψέλες καυσίμου, που, πρακτικά, αποτελούν ένα ιδιαίτερο τύπο ηλεκτροχημικής αποθήκευσης.

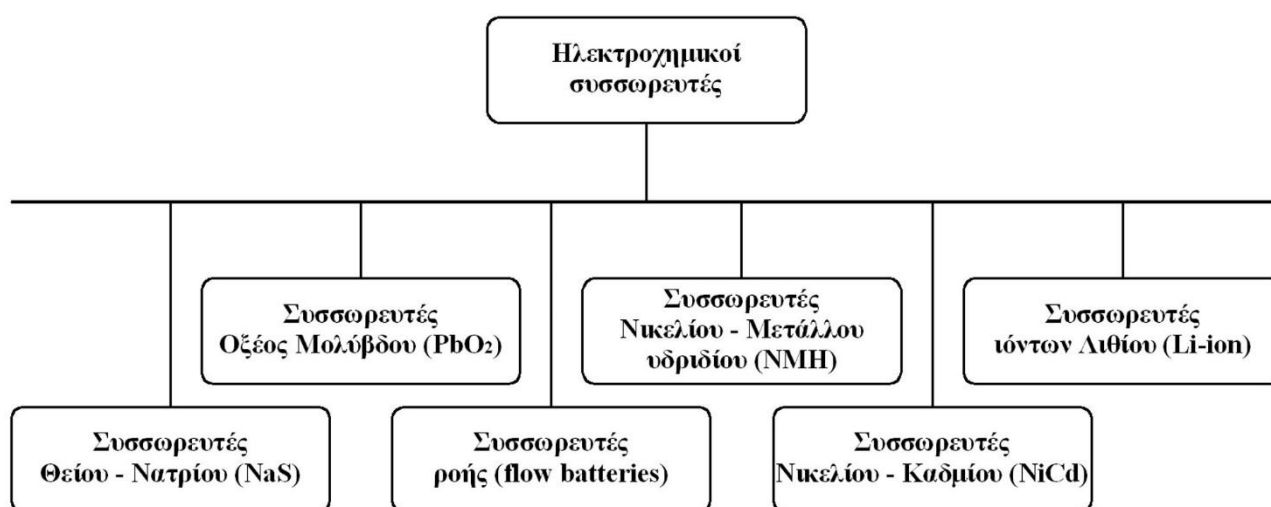
Οι τεχνολογίες αυτές αναλύονται στη συνέχεια.

3.4.2.a. Ηλεκτροχημικοί συσσωρευτές

Ένας ηλεκτροχημικός συσσωρευτής είναι μία συσκευή αποθήκευσης ενέργειας, σχεδιασμένη για να:

- Μετατρέπει την αποθηκευμένη σε αυτήν χημική ενέργεια σε ηλεκτρική κατά την περίοδο εκφόρτισης
- Μετατρέπει την παρεχόμενη σε αυτήν ηλεκτρική ενέργεια σε χημική και να την αποθηκεύει κατά την περίοδο φόρτισης.

Οι διαφορετικοί τύποι ηλεκτροχημικών συσσωρευτών (ή μπαταριών) παρουσιάζονται στο σχήμα 3.8.



Σχήμα 3.8: Διαφορετικοί τύποι ηλεκτροχημικών συσσωρευτών.

Οι ηλεκτροχημικοί συσσωρευτές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε συσσωρευτές χαμηλών θερμοκρασιών εσωτερικής αποθήκευσης και σε συσσωρευτές υψηλών θερμοκρασιών εξωτερικής αποθήκευσης. Οι συσσωρευτές χαμηλών θερμοκρασιών λειτουργούν συνήθως σε θερμοκρασίες δωματίου. Η βασική διαφορά ανάμεσα στους συσσωρευτές εσωτερικής και εξωτερικής αποθήκευσης έγκειται στο ότι στους συσσωρευτές εξωτερικής αποθήκευσης το τμήμα μετατροπής ενέργειας είναι διαχωρισμένο από το τμήμα του ενεργού χημικού υλικού του συσσωρευτή. Η διαμόρφωση αυτή επιτρέπει τη διαστασιολόγηση και τη σχεδίαση του τμήματος εκφόρτισης ανεξάρτητα από το τμήμα φόρτισης του συσσωρευτή. Στους συσσωρευτές εξωτερικής αποθήκευσης, η μονάδα μετατροπής ενέργειας και το σύστημα χημικής αποθήκευσης είναι, αφενός, διαχωρισμένα αλλά, αφετέρου, συνδεδεμένα μεταξύ τους για τη μεταφορά ηλεκτροχημικών αντιδράσεων ανάμεσα στα δύο τμήματα, κατά τις διαδικασίες φόρτισης και εκφόρτισης των συσσωρευτών.

Παραδείγματα συσσωρευτών χαμηλών θερμοκρασιών εσωτερικής αποθήκευσης είναι οι συσσωρευτές οξέος μολύβδου (PbO_2), οι συσσωρευτές νικελίου – καδμίου (NiCd), οι συσσωρευτές ιόντων λιθίου και νικελίου – υδριδίου μετάλλου (NiMH). Βασικοί τύποι συσσωρευτών υψηλών θερμοκρασιών εξωτερικής αποθήκευσης είναι οι συσσωρευτές νατρίου – θείου (NaS), οι συσσωρευτές νατρίου – νικελίου – χλωρίου (NaNiCl) και οι μπαταρίες ροής (flow batteries).

Στον πίνακα 3.3 συνοψίζονται τα βασικά χαρακτηριστικά και οι εφαρμογές των διαφορετικών τύπων ηλεκτροχημικών συσσωρευτών [14].

Πίνακας 3.3: Βασικά χαρακτηριστικά και οι εφαρμογές των διαφορετικών τύπων ηλεκτροχημικών συσσωρευτών.

Τύπος συσσωρευτή	Μεγαλύτερη ικανότητα / χωρητικότητα	Τοποθεσία εγκατάστασης / χρήση	Χαρακτηριστικά
Υγρού οξέος μολύβδου ανοιχτού τύπου (Flooded Lead Acid)	10MW / 40MWh	California-Chino, Η.Π.Α. / διαχείριση φορτίου	<ul style="list-style-type: none"> • απόδοση: 72 – 78% • αρχικό κόστος: 50 – 150€/kWh • διάρκεια ζωής: 1.000 – 2.000 κύκλοι με βάθος εκφόρτισης 70% • θερμοκρασία λειτουργίας: -5 – 40 °C • ενεργειακή πυκνότητα: 25Wh/kg • αυτο-εκφόρτιση: 2 – 5% ανά μήνα • συχνή συντήρηση για αναπλήρωση απωλειών νερού, βαρύς
Οξέος μολύβδου τύπου VRLA	300kW / 580kWh	Milwaukee, Η.Π.Α. / διαχείριση φορτίου	<ul style="list-style-type: none"> • απόδοση: 72 – 78% • αρχικό κόστος: 50 – 150€/kWh • διάρκεια ζωής: 200 – 300 κύκλοι με βάθος εκφόρτισης 80% • θερμοκρασία λειτουργίας: -5 – 40 °C • ενεργειακή πυκνότητα: 30 – 50Wh/kg • αυτο-εκφόρτιση: 2 – 5% ανά μήνα • χαμηλή συντήρηση, φορητός, περισσότερο ασφαλής
Νικελίου – Καδμίου (NiCd)	27MW / 6,75MWh	Alaska, Η.Π.Α. / έλεγχος φορτίου	<ul style="list-style-type: none"> • απόδοση: 72 – 78% • αρχικό κόστος: 200 – 600€/kWh • διάρκεια ζωής: 3.000 κύκλοι με βάθος εκφόρτισης 100% • θερμοκρασία λειτουργίας: -40 – 50 °C • ενεργειακή πυκνότητα: 45 – 80Wh/kg • αυτο-εκφόρτιση: 5 – 20% ανά μήνα • ικανότητα υψηλής ισχύος εκφόρτισης, χαμηλή συντήρηση, κίνδυνος δηλητηρίασης από τα στοιχεία NiCd

Πίνακας 3.3: Βασικά χαρακτηριστικά και οι εφαρμογές των διαφορετικών τύπων ηλεκτροχημικών συσσωρευτών.

Τύπος συσσωρευτή	Μεγαλύτερη ικανότητα / χωρητικότητα	Τοποθεσία εγκατάστασης / χρήση	Χαρακτηριστικά
Νατρίου – Θείου (NaS)	9,6MW / 64MWh	Τόκιο, Ιαπωνία / Διαχείριση φορτίου	<ul style="list-style-type: none"> • απόδοση: 89% (στους 325 °C) • αρχικό κόστος: 200 – 300€/kWh • διάρκεια ζωής: 2.500 κύκλοι με βάθος εκφόρτισης 100% • θερμοκρασία λειτουργίας: 325 °C • ενεργειακή πυκνότητα: 100Wh/kg • αυτο-εκφόρτιση: 5 – 20% ανά μήνα • σε κατάσταση αναμονής (stand-by mode) θα πρέπει να θερμαίνεται, λόγω της υψηλής θερμοκρασίας λειτουργίας, με αποτέλεσμα τη μείωση της συνολικής απόδοσης
Ιόντων Λιθίου (Li – ion)			<ul style="list-style-type: none"> • απόδοση: 100% • αρχικό κόστος: 700 – 1.000€/kWh • διάρκεια ζωής: 3.000 κύκλοι με βάθος εκφόρτισης 80% • θερμοκρασία λειτουργίας: -30 – 60 °C • ενεργειακή πυκνότητα: 90 – 190Wh/kg • αυτο-εκφόρτιση: 1% ανά μήνα • υψηλό κόστος λόγω απαιτούμενης ειδικής συσκευασίας και εσωτερικής προστασίας υπερφόρτισης
Βαναδίου ροής (Vanadium redox flow batteries)	1MW / 4MWh	Ιαπωνία / Απαλοιφή αιχμών φορτίου	<ul style="list-style-type: none"> • απόδοση: 85% • αρχικό κόστος: 360 – 1.000€/kWh • διάρκεια ζωής: 10.000 κύκλοι με βάθος εκφόρτισης 75% • θερμοκρασία λειτουργίας: 0 – 40 °C • ενεργειακή πυκνότητα: 70Wh/kg • αυτο-εκφόρτιση: 0% • υψηλό κόστος, μεγάλη διάρκεια ζωής

A. Συσσωρευτές ιόντων λιθίου (Li-ion)

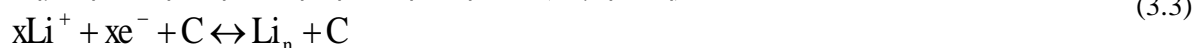
Οι εφαρμογές των συσσωρευτών ιόντων λιθίου (Li-ion) εστιάζονται σε συσκευές τόσο υψηλής, όσο και χαμηλής κατανάλωσης ισχύος, σε φορητές ηλεκτρονικές συσκευές και σε εξοπλισμό τηλεπικοινωνίας. Η προτίμησή τους έγκειται κυρίως στην υψηλή απόδοσή τους και στην υψηλή πυκνότητα ενέργειας [15]. Στον πίνακα 3.3 παρουσιάζεται, μεταξύ άλλων χαρακτηριστικών, η πυκνότητα ισχύος διαφόρων τύπων ηλεκτροχημικών συσσωρευτών, με τις μπαταρίες ιόντων λιθίου να παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη (90 – 190Wh/kg).

Η άνοδος σε ένα συσσωρευτή ιόντων λιθίου κατασκευάζεται από ανθρακούχο γραφίτη (carbon graphite), ενώ η κάθοδος κατασκευάζεται από λιθιωμένο οξείδιο μετάλλου (lithiated metal oxide) [16, 17]. Το μέσο αποθήκευσης περιέχει ένα μίγμα από άλατα λιθίου (LiBF_4 , LiClO_4 ή LiPF_6) και καρβονικό διμεθύλιο (dimethyl carbonate) ή καρβονικό διαιθύλιο (diethyl carbonate). Κατά την εκφόρτιση του συσσωρευτή, θετικά ιόντα λιθίου Li^+ μετακινούνται από το αρνητικό ηλεκτρόδιο μεταφέροντας ηλεκτρικό ρεύμα προς το θετικό ηλεκτρόδιο. Η αντίστροφη διαδρομή εκτελείται κατά τη διαδικασία φόρτισης. Οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα είναι οι εξής:

Χημική αντίδραση στο θετικό ηλεκτρόδιο (φόρτιση):



Χημική αντίδραση στο αρνητικό ηλεκτρόδιο (εκφόρτιση):



Οι σύγχρονες μπαταρίες ιόντων λιθίου έχουν διάρκεια ζωής που μπορεί να φτάσει τους 3.000 κύκλους [16]. Άλλα σημαντικά χαρακτηριστικά των συσσωρευτών ιόντων λιθίου είναι η ικανότητα ταχείας φόρτισης και εκφόρτισης [17] και η υψηλή πυκνότητα ενέργειας 75–125Wh/kg [18]. Ο τύπος αυτός συσσωρευτών έχει επίσης αμελητέο βαθμό αυτο-εκφόρτισης. Το βασικό μειονέκτημα των συσσωρευτών ιόντων λιθίου είναι το υψηλό κόστος παραγωγής. Ακριβώς αυτό το χαρακτηριστικό καθιστά τη χρήση τους απαγορευτική σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, ιδιαίτερα σε υβριδικούς σταθμούς.

B. Συσσωρευτές Νατρίου – Θείου (NaS)

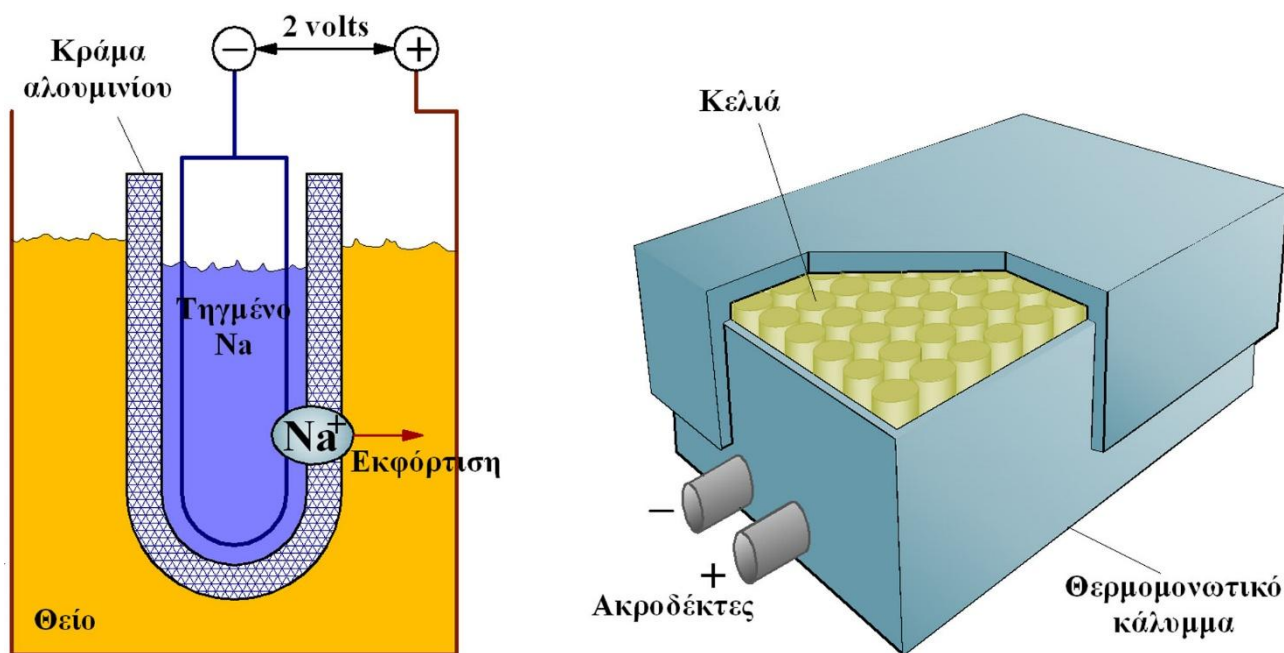
Οι συσσωρευτές νατρίου – θείου (NaS), η σχηματική απεικόνιση και η δομή λειτουργίας των οποίων παρουσιάζονται στο σχήμα 3.9, χαρακτηρίζονται από υψηλό αρχικό κόστος, υψηλή πυκνότητα ενέργειας, βελτιωμένη απόδοση (σε σχέση με τους συσσωρευτές μολύβδου) και βελτιωμένη λειτουργία που βασίζεται σε ενεργά υγρά συστατικά. Παρουσιάζουν, επίσης, χαμηλό λειτουργικό κόστος, λόγω των ιδιαίτερα ανθεκτικών υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τους, τα οποία μάλιστα είναι δυνατό να ανακυκλώνονται και να χρησιμοποιούνται ξανά για την κατασκευή νέων συσσωρευτών. Επιπλέον το κόστος συντήρησης είναι αμελητέο. Ο τύπος αυτός συσσωρευτών έχει τύχει ευρείας εφαρμογής στην Ιαπωνία και στις Η.Π.Α. Στους συσσωρευτές NaS χρησιμοποιούνται λειωμένα ηλεκτρόδια νατρίου (αρνητικό) και θείου (θετικό).

Κατά τη διαδικασία εκφόρτισης, ιόντα νατρίου άγονται, για να προσκρούσουν σε ηλεκτρόνια, τα οποία, τελικά, κινούμενα παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα. Μέσω του τηγμένου ηλεκτροδίου νατρίου παράγεται ηλεκτρική ισχύς προς το εξωτερικό κύκλωμα στο οποίο έχει διασυνδεθεί ο συσσωρευτής.

Για τη λειτουργία των συσσωρευτών NaS απαιτείται υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας (270–300°C), προκειμένου να διατηρηθεί η ηλεκτροχημική αντίδραση. Η θερμότητα για τη διατήρηση των υψηλών απαιτούμενων θερμοκρασιών παρέχεται κατά τις διαδικασίες φόρτισης και εκφόρτισης, χωρίς έτσι να απαιτείται η εξωτερική παροχή θερμικής ισχύος. Τούτη όμως είναι απαραίτητη και κατά τις περιόδους διατήρησης του συσσωρευτή σε κατάσταση αναμονής (stand-by mode), με αποτέλεσμα την πτώση της τελικής συνολικής απόδοσης του συσσωρευτή. Αναφορικά με την απαιτούμενη θερμοκρασία της ηλεκτροχημικής αντίδρασης, κατασκευαστές στην Ιαπωνία έχουν ασχοληθεί με την κατασκευή συσσωρευτών NaS χαμηλής θερμοκρασίας.

Για τους συσσωρευτές NaS απαιτείται ο εγκιβωτισμός τους εντός μονωμένης κατασκευής, ικανής να διατηρήσει την απαιτούμενη θερμοκρασία της αντίδρασης και να περιορίσει τις θερμικές απώλειες προς το περιβάλλον. Ο ηλεκτρολύτης που χρησιμοποιείται σε συσσωρευτές NaS είναι κράμα στερεού αλουμινίου. Πέρα του ρόλου του μέσου μεταφοράς ισχύος, ο ηλεκτρολύτης έχει, επίσης, το ρόλο διαχωριστή, ο οποίος επιτρέπει επιλεκτικά μόνο στα θετικά ιόντα νατρίου να διέρθουν μέσω της μάζας του, για να αντιδράσουν με το θείο, δίνοντας τελικά σουλφίδια του νατρίου (Na_2S_4) [19] (σχήμα 3.9).

Για βάθη εκφόρτισης 100%, οι συσσωρευτές NaS παρουσιάζουν διάρκεια ζωής περίπου 2.500 κύκλους φόρτισης / εκφόρτισης. Οι συσσωρευτές NaS έχουν χρησιμοποιηθεί σε διάφορες εφαρμογές στα συστήματα ισχύος, όπως η ρύθμιση τάσης, η απαλοιφή αιχμών ισχύος, η βελτίωση της ποιότητας ισχύος, η υποστήριξη συχνότητας δικτύου και η σταθεροποίηση παραγωγής ισχύος, συνδυαζόμενοι με αιολικά πάρκα. Οι συσσωρευτές NaS είχαν χρησιμοποιηθεί για παροχή ισχύος στο δίκτυο κατά την κατάρρευση του Σ.Η.Ε. το 2010 στο Presidio της Νέας Υόρκης.



Σχήμα 3.9: Δομή και λειτουργία ηλεκτροχημικών συσσωρευτών NaS.

Γ. Συσσωρευτές οξέος μολύβδου (PbO_2)

Ο συσσωρευτής οξέος μολύβδου ήταν ο πρώτος τύπος επαναφορτιζόμενων συσσωρευτών που κατασκευάστηκε, τόσο για οικιακές, όσο και για επαγγελματικές χρήσεις. Η χρήση των συσσωρευτών οξέος μολύβδου σε επαγγελματικές εφαρμογές είναι κάπως περιορισμένη. Αυτό οφείλεται στη διαθεσιμότητα εναλλακτικών τύπων ηλεκτροχημικών συσσωρευτών υψηλότερης απόδοσης και διάρκειας ζωής. Οι συσσωρευτές οξέος μολύβδου χρησιμοποιούνται κυρίως λόγω του χαμηλότερου κόστους προμήθειας που παρουσιάζουν σε σχέση με άλλους τύπους ηλεκτροχημικής αποθήκευσης, της αξιόπιστης λειτουργίας τους, του ώριμου τεχνολογικού επιπέδου από το οποίο χαρακτηρίζονται, της άμεσης απόκρισης, ειδικά σε συστήματα αυτοκίνησης. Γενικά χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές στις οποίες το βάρος του συσσωρευτή δεν αποτελεί κρίσιμη παράμετρο επιλογής.

Οι συσσωρευτές οξέος μολύβδου παρουσιάζουν σχετικά χαμηλό κόστος (50 – 150€/kWh) και σχετικά υψηλή απόδοση, αναλόγως των συνθηκών λειτουργίας τους (70–90%) [20]. Τα δύο αυτά χαρακτηριστικά καθιστούν τους συσσωρευτές οξέος μολύβδου ανταγωνιστικούς σε σχέση με τις εναλλακτικές τεχνολογίες αποθήκευσης μεγάλου μεγέθους (CAES, αναστρέψιμα υδροηλεκτρικά), σε περιπτώσεις υβριδικών σταθμών μικρού μεγέθους. Οι συσσωρευτές οξέος μολύβδου χαρακτηρίζονται από διάρκεια ζωής της τάξης των 5 – 7 ετών ή, διαφορετικά, 250– 1.000 κύκλοι φόρτισης / εκφόρτισης. Ωστόσο, θα πρέπει να τονιστεί ότι η διάρκεια ζωής των συσσωρευτών οξέος μολύβδου επηρεάζεται σημαντικά από τη

θερμοκρασία περιβάλλοντος, η οποία πρέπει να διατηρείται κάτω από μία μέγιστη τιμή, και από το βάθος εκφόρτισης το οποίο, ανάλογα με τον κατασκευαστή, δεν πρέπει να υπερβαίνει το 60 – 70%.

Υπάρχουν δύο τύποι συσσωρευτών οξέος μολύβδου, οι συσσωρευτές (Valve Regulated Lead Acid – VRLA), οι οποίοι είναι σφραγισμένοι με βαλβίδα ρυθμιζόμενης πίεσης, όπως καταδεικνύει και η ονομασία τους, και οι συσσωρευτές ανοιχτού τύπου (Flooded Lead Acid – FLA). Οι δύο αυτοί τύποι συσσωρευτών οξέος μολύβδου έχουν όμοια χαρακτηριστικά αναφορικά με τις βασικές αρχές λειτουργίας τους, ωστόσο διαφέρουν στο κόστος προμήθειας, στις απαιτήσεις και διαδικασίες συντήρησης και στο φυσικό μέγεθος. Οι συσσωρευτές VRLA έχουν υψηλότερο κόστος προμήθειας, χαμηλότερη διάρκεια ζωής, μικρότερο μέγεθος και χαμηλότερο κόστος συντήρησης, συγκρινόμενοι με τους συσσωρευτές FLA.

Κατά τη φόρτιση των συσσωρευτών οξέος μολύβδου, η ισχύς φόρτισης προκαλεί τη μετακίνηση των ηλεκτρονίων από το θετικό ηλεκτρόδιο προς το αρνητικό. Στην εκφόρτιση προκαλείται μία αντίστροφη διαδικασία, μετατρέποντας τα ηλεκτρόδια σε θειούχο μόλυβδο, ενώ η ποσότητα του θεικού οξέος στο υγρό των συσσωρευτών μειώνεται, παράγοντας έτσι απεσταγμένο νερό σε μεγάλες ποσότητες. Η συχνή συντήρηση που απαιτείται για τους συσσωρευτές FLA εστιάζει κυρίως στην απομάκρυνση του απεσταγμένου νερού.

Ο συσσωρευτής Valve Regulated Lead Acid (VRLA) είναι ένας τύπος επαναφορτιζόμενου συσσωρευτή με βαλβίδα ασφαλείας, που επιτρέπει την εκτόνωση της εσωτερικής πίεσης σε περίπτωση υπερφόρτισης.

Δ. Συσσωρευτές Νικελίου - Καδμίου (NiCd)

Οι συσσωρευτές νικελίου – καδμίου (NiCd) χαρακτηρίζονται από υψηλή απόδοση (72 – 78%), υψηλή πυκνότητα ενέργειας, ικανοποιητική διάρκεια ζωής, ικανοποιητική συμπεριφορά σε συστήματα ισχύος αναφορικά με την απόκρισή τους και δυνατότητα κατασκευής σε μεγάλο εύρος μεγεθών. Είναι ανθεκτικοί και παρουσιάζουν γενικότερα χαρακτηριστικά (εξαιρουμένου του κόστους παραγωγής) παρόμοια με αυτά των συσσωρευτών οξέος μολύβδου.

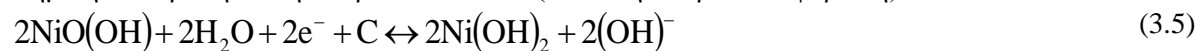
Οι βασικές συνιστώσες ενός συσσωρευτή Ni–Cd είναι ένα ηλεκτρόδιο οξειδίου – υδροξειδίου του νικελίου, το οποίο λειτουργεί ως το θετικό ηλεκτρόδιο, και ένα ηλεκτρόδιο καδμίου, το οποίο είναι το αρνητικό ηλεκτρόδιο. Ως ηλεκτρολύτης χρησιμοποιείται υδροξείδιο του καλίου (potassium hydroxide), το οποίο είναι ένας αλκαλικός ηλεκτρολύτης. Η όλη κατασκευή εσωκλείεται εντός καλά σφραγισμένου πλαισίου.

Οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις κατά τη φόρτιση και εκφόρτιση του συσσωρευτή είναι οι ακόλουθες:

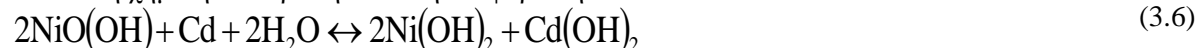
Χημική αντίδραση στο ηλεκτρόδιο καδμίου (αρνητικό ηλεκτρόδιο – φόρτιση):



Χημική αντίδραση στο ηλεκτρόδιο νικελίου (θετικό ηλεκτρόδιο – φόρτιση):



Συνολική χημική αντίδραση κατά την εκφόρτιση:



Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα σχετικά με τη χρήση των συσσωρευτών NiCd είναι το υψηλό κόστος παραγωγής, το οποίο προκύπτει από το υψηλό κόστος προμήθειας των βασικών υλικών του συσσωρευτή, δηλαδή του νικελίου και του καδμίου. Ένα ακόμα θέμα είναι οι δυνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, οι οποίες προέρχονται από πιθανή διαρροή του ηλεκτρολύτη προς το περιβάλλον. Ας σημειωθεί ότι το κάδμιο και το νικέλιο είναι ισχυρά τοξικά υλικά, με σημαντικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και στο φυσικό περιβάλλον. Άλλο ένα αρνητικό γνώρισμα του συσσωρευτή αυτού είναι το γνωστό ως «χαρακτηριστικό μνήμης». Εξαιτίας του χαρακτηριστικού μνήμης, ο συσσωρευτής πρέπει να φορτίζεται και να εκφορτίζεται πλήρως. Σε διαφορετική περίπτωση, μετά από μία μερική φόρτιση ή εκφόρτιση, η νέα χωρητικότητα της μπαταρίας ορίζεται πλέον από το επίπεδο φόρτισης ή εκφόρτισης του προηγούμενου κύκλου. Η ιδιότητα αυτή είναι ιδιαίτερα αρνητική, καθώς περιορίζει σημαντικά την ευελιξία της μπαταρίας

σε περίπτωση χρήσης της ως μονάδα αποθήκευσης υβριδικού σταθμού και, επιπλέον, με την πάροδο του χρόνου ελαττώνεται η ονομαστική χωρητικότητά της. Άλλο ένα μειονέκτημα του συσσωρευτή NiCd είναι η αυτοεκφόρτιση, που μπορεί να φτάσει σε ποσοστά της τάξης του 20% ανά μήνα.

Παρόλα τα προαναφερόμενα αρνητικά χαρακτηριστικά, οι συσσωρευτές NiCd τυγχάνουν μίας σειράς από χρήσεις σε φορητές ηλεκτρονικές συσκευές, σε συστήματα αναμονής ηλεκτρικών συστημάτων και συσκευών, σε λειτουργία συστημάτων αεροπλοΐας, σε ηλεκτρικά οχήματα και σε φωτισμούς ασφαλείας, εξαιτίας κάποιων σημαντικών πλεονεκτημάτων που εμφανίζουν σε σχέση με τους άλλους τύπους ηλεκτροχημικής αποθήκευσης, όπως:

- μεγάλη διάρκεια ζωής (περισσότεροι από 3.500 κύκλοι) σε συνδυασμό με χαμηλή συντήρηση και απόλυτη αξιοποίηση της ονομαστικής χωρητικότητας, μέσω της 100% εκφόρτισής τους
- ανθεκτική κατασκευή, που την καθιστά λιγότερο ευάλωτη σε περιπτώσεις δολιοφθοράς
- λειτουργία με υψηλή ένταση ρεύματος κατά την εκφόρτιση, που συνεπάγεται παροχή μεγάλης ισχύος.

Ε. Συσσωρευτές νατρίου – νικελίου – χλωρίου (NaNiCl)

Οι συσσωρευτές αυτοί αναπτύχθηκαν αρχικά για τη χρήση σε ηλεκτρικά κινούμενα οχήματα [21]. Η ανάπτυξη ηλεκτρικών οχημάτων και υβριδικών ηλεκτρικών συστημάτων έχει γνωρίσει άνθηση τα τελευταία έτη. Το σημείο κλειδί προς αυτή την κατεύθυνση είναι η ανάπτυξη κατάλληλου τύπου συσσωρευτή. Για το σκοπό αυτό σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν διάφοροι τύποι συσσωρευτών. Ως αποτέλεσμα της ανωτέρω έρευνας και ανάπτυξης είναι η κατασκευή προηγμένων τύπων μεταλλικών συσσωρευτών νατρίου, περισσότερο κατάλληλων για τη χρήση τους σε ηλεκτρικά οχήματα. Οι συσσωρευτές NaNiCl έχουν πλέον ανακτήσει το ενδιαφέρον των ερευνητών και των κατασκευαστών για εφαρμογές συνδυασμένης λειτουργίας με μονάδες Α.Π.Ε.

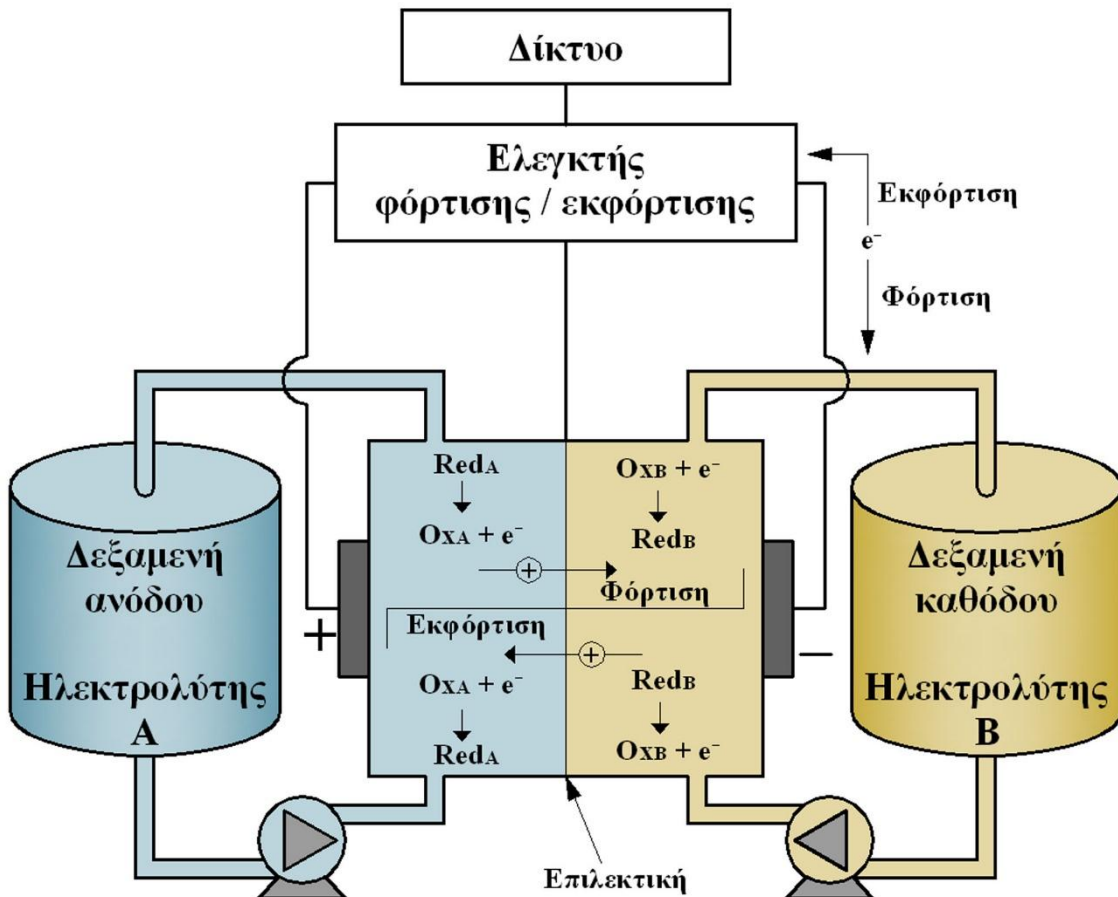
Η θερμοκρασία λειτουργίας των συσσωρευτών NaNiCl είναι της τάξης των 300 °C, με ηλεκτρολύτη σε υγρή μορφή. Χαρακτηρίζονται από υψηλή πυκνότητα ενέργειας. Το υγρό νάτριο χρησιμοποιείται ως το αρνητικό ηλεκτρόδιο, ενώ το ρόλο του θετικού ηλεκτροδίου τον έχει το νικέλιο κατά τη φόρτιση και το χλώριο κατά την εκφόρτιση.

Οι συσσωρευτές NaNiCl χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές υποβρύχιας παροχής ισχύος, σε στρατιωτικές χρήσεις, σε εγκαταστάσεις τηλεπικοινωνίας και στην υποστήριξη της ένταξης μονάδων Α.Π.Ε. σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.

ΣΤ. Μπαταρίες ροής

Η δομή και η λειτουργία των συσσωρευτών οξειδοαναγωγής ροής (redox flow batteries) παρουσιάζεται στο σχήμα 3.10. Η σχεδίαση των μπαταριών ροής περιλαμβάνει δύο ανεξάρτητες εξωτερικές δεξαμενές αποθήκευσης ηλεκτρολύτη, διαχωρισμένες από τη μονάδα μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας. Η διαδικασία μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας εκτελείται στο ηλεκτροχημικό στοιχείο, αφού οι ηλεκτρολύτες έχουν μεταφερθεί στο στοιχείο με τη βοήθεια αντλίας. Οι ηλεκτρολύτες είναι ηλεκτροχημικά ενεργά στοιχεία, τα οποία ρέουν διαμέσου ενός ηλεκτροχημικού στοιχείου, με αναστρέψιμη ικανότητα μετατροπής χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική.

Οι μπαταρίες ροής αναπτύσσονται για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος σε απομονωμένους οικισμούς, ενώ η σχεδιάσή τους τις καθιστά κατάλληλες για συνδυασμένη λειτουργία με μονάδες Α.Π.Ε. Έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί σε Σ.Η.Ε. για ρύθμιση τάσης, διατήρηση συχνότητας, υποστήριξη ένταξης μονάδων Α.Π.Ε. κλπ. Παρουσιάζουν το πολύ σημαντικό πλεονέκτημα ότι μπορούν να αποφορτίζονται πλήρως, χωρίς την πρόκληση βλάβης. Τεχνικά έχουν όλες τις απαιτούμενες προδιαγραφές για υποστήριξη συστημάτων ισχύος και ειδικά υβριδικών σταθμών. Προς το παρόν, όμως, το κόστος προμήθειας τους παραμένει υψηλό, όπως και οι απαιτήσεις σε συντήρηση.



Σχήμα 3.10: Δομή και λειτουργία ηλεκτροχημικών συσσωρευτών ροής.

3.4.2.β. Κυψέλες καυσίμου (fuel cells)

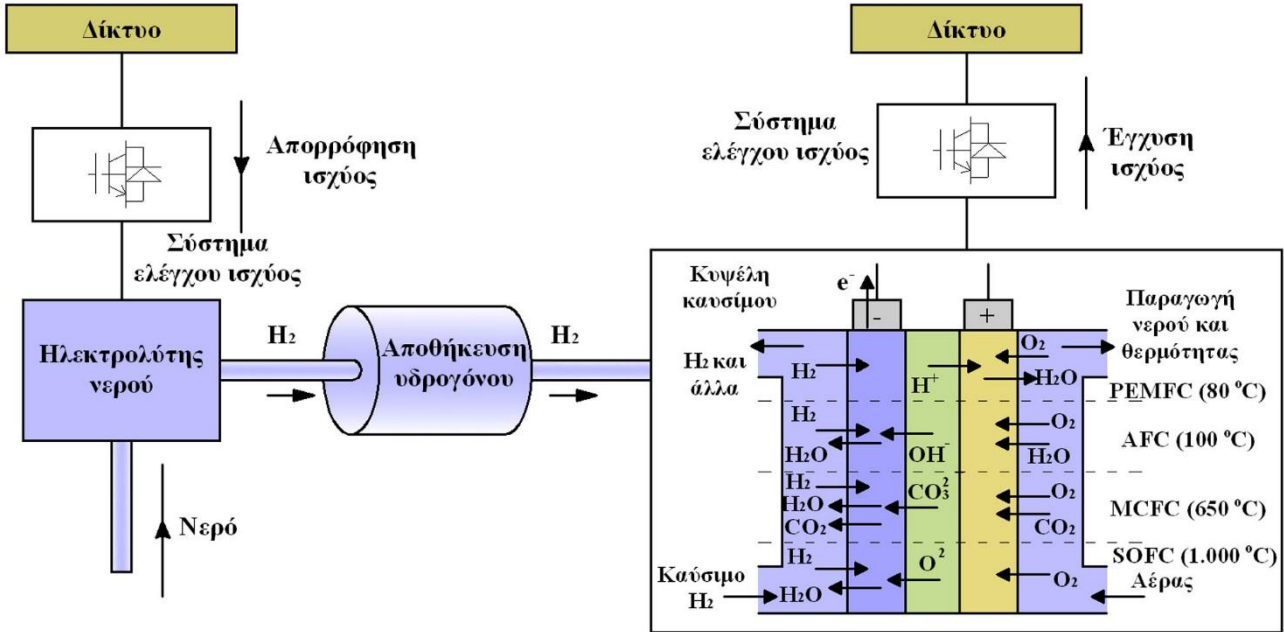
Οι κυψέλες καυσίμου αποτελούν μία από τις βασικές τεχνολογίες για την ενεργειακή χρήση υδρογόνου. Οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να θεωρηθούν ως έμμεσος τύπος ηλεκτροχημικής αποθήκευσης. Οι κυψέλες καυσίμου διαφέρουν από τις βασικές ηλεκτροχημικές τεχνολογίες αποθήκευσης που παρουσιάστηκαν παραπάνω στο ότι καταναλώνεται κάποιας μορφής καύσιμο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το επιθυμητό καύσιμο είναι καθαρό υδρογόνο, που μπορεί όμως να παραχθεί και από κάποιο άλλο καύσιμο, φορέα υδρογόνου, μετά από κατάλληλη επεξεργασία. Τέτοιοι φορείς είναι η αμμωνία, το φυσικό αέριο, παράγωγα του πετρελαίου, το υγρό προπάνιο και η βιομάζα. Καθαρό υδρογόνο μπορεί, επίσης, να παραχθεί με την ηλεκτρόλυση νερού, η οποία, όταν επιτυγχάνεται με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως ηλιακή, αιολική και γεωθερμία, οδηγεί σε 100% λειτουργία της κυψέλης καυσίμου με Α.Π.Ε.

Στην περίπτωση που το υδρογόνο αποθηκεύεται με σκοπό να εξασφαλιστεί συνεχής παροχή ισχύος από την κυψέλη καυσίμου, τότε η όλη διάταξη ονομάζεται ως αναγεννούμενη κυψέλη καυσίμου (regenerative fuel cell – RFC), η δομή και η λειτουργία της οποίας παρουσιάζονται στο σχήμα 3.11. Η κυψέλη καυσίμου τροφοδοτείται με υδρογόνο που παράγεται είτε από μία συσκευής ηλεκτρόλυσης, είτε από μία διαδικασία διάσπασης υδρογονανθράκων. Το υδρογόνο αποθηκεύεται στην κυψέλη καυσίμου, για να αντιδράσει τελικά με το οξυγόνο, παρέχοντας ηλεκτρική ισχύ, όταν τούτο απαιτηθεί από το δίκτυο.

Σε μία κυψέλη καυσίμου παράγονται νερό, θερμότητα και ηλεκτρική ενέργεια από τη βασική ηλεκτροχημική αντίδραση. Η χημική αλληλουχία είναι τέτοια, ώστε τα αντιδρώντα στοιχεία εισέρχονται στην κυψέλη, ενώ ταυτόχρονα τα προϊόντα της αντίδρασης εξέρχονται από αυτή, με τον ηλεκτρολύτη να παραμένει εντός της κυψέλης [22, 23].

Στο σχήμα 3.11 τα δύο ηλεκτρόδια της κυψέλης καυσίμου διαχωρίζονται από μία μεμβράνη, η οποία έχει το ρόλο του ηλεκτρολύτη. Μεταξύ αυτής της μεμβράνης και των ηλεκτροδίων υπάρχει ένα στρώμα καταλύτη. Το υδρογόνο τροφοδοτεί την άνοδο της κυψέλης, το αρνητικό ηλεκτρόδιο, το οποίο, ερχόμενο σε

επαφή με τον καταλύτη, διαχωρίζεται σε θετικά φορτισμένα ιόντα υδρογόνου και ηλεκτρόνια. Η άνοδος και ο καταλύτης είναι τέτοιας κατασκευής, ώστε η διάχυση των ατόμων του υδρογόνου να γίνεται με ομογενή τρόπο. Τα ηλεκτρόνια, τα οποία απελευθερώθηκαν, μεταφέρονται μέσω εξωτερικού ηλεκτρικού κυκλώματος προς την κάθοδο, παράγοντας ηλεκτρικό ρεύμα, αφού η μεμβράνη αποτρέπει τη διέλευσή τους μέσω αυτής. Για αυτό το λόγο, άνοδος και καταλύτης επιλέγονται να είναι αγωγά υλικά.



Σχήμα 3.11: Δομή και λειτουργία κουβέλης καυσίμου.

Τα θετικά φορτισμένα ιόντα του υδρογόνου, στην ουσία μεμονωμένα πρωτόνια, διαπερνούν τη μεμβράνη και ενώνονται με το οξυγόνο, το οποίο τροφοδοτεί την κάθοδο, το θετικά φορτισμένο ηλεκτρόδιο, και παράγεται νερό. Όπως και πριν, την ομογενή διάχυση του οξυγόνου στον καταλύτη εξασφαλίζει η κατασκευή του ηλεκτροδίου. Ο καταλύτης αναλαμβάνει την επιτάχυνση της δημιουργίας του νερού από τα συστατικά του. Στο σχηματισμό του νερού συμμετέχουν, εκτός των μορίων του οξυγόνου και των ιόντων του υδρογόνου, τα ηλεκτρόνια τα οποία διοχετεύτηκαν μέσω του εξωτερικού ηλεκτρικού κυκλώματος στην κάθοδο, στην αρχή της διαδικασίας.

Τα δύο στρώματα καταλύτη χρησιμεύουν στην αύξηση της ταχύτητας των αντιδράσεων διάσπασης του μορίου του υδρογόνου και της ένωσης υδρογόνου και οξυγόνου για τη δημιουργία νερού, στην άνοδο και στην κάθοδο αντίστοιχα. Συνήθως ο καταλύτης αποτελείται από ένα πολύ λεπτό στρώμα λευκόχρυσου (Pt) πάνω σε επιφάνεια άνθρακα. Το στρώμα αυτό είναι και το μέρος του καταλύτη, το οποίο βρίσκεται σε επαφή με τη μεμβράνη. Ο καταλύτης είναι τραχύς και πορώδης, ώστε να μεγιστοποιείται η εκτεθειμένη επιφάνειά του.

Οι χημικές αντιδράσεις οι οποίες χαρακτηρίζουν τα παραπάνω βήματα, συνοψίζονται παρακάτω.

Χημική αντίδραση στην άνοδο:



Συνολική χημική αντίδραση στην κάθοδο:



Ολική αντίδραση:



Με τις παραπάνω αντιδράσεις σε μία απλή κυψέλη καυσίμου παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα τάσης περίπου 0,7Volts. Προκειμένου να παραχθούν μεγαλύτερες (και πρακτικά αξιοποιήσιμες) τάσεις, χρησιμοποιούνται περισσότερες κυψέλες σε σειρά (fuel cell stack).

Με τη διάταξη αυτή, η κυψέλη καυσίμου συμπεριφέρεται με τρόπο παρόμοιο με μία αποθήκη καυσίμου, καθώς το αποθηκευμένο υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η λειτουργία της κυψέλης καυσίμου ελέγχεται από συστήματα αυτομάτου ελέγχου και καθορίζεται, αφενός, από τη διαθεσιμότητα της απαιτούμενης πηγής ισχύος για την παραγωγή του υδρογόνου (συνήθως περίσσεια Α.Π.Ε. σε ένα υβριδικό σταθμό) και, αφετέρου, από την ανάγκη συμβολής της κυψέλης καυσίμου στην παραγωγή ισχύος. Η χρήση των κυψελών καυσίμου ως καθαρές πηγές ενέργειας έχει αναγνωριστεί τις τελευταίες δύο δεκαετίες.

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί μία σειρά διαφορετικών τύπων κυψελών καυσίμου, με σκοπό την αντικατάσταση των μηχανών εσωτερικής καύσης, την παροχή ισχύος σε Σ.Η.Ε. και την τροφοδοσία ισχύος σε φορητές καταναλώσεις και ως βοηθητική πηγή ισχύος σε αυτοκινούμενα οχήματα (π.χ. υβριδικά αυτοκίνητα). Οι διαφορετικοί τύποι κυψελών καυσίμου κατηγοριοποιούνται ανάλογα με το μηχανισμό εναλλαγής ιόντων και τον τύπο των ηλεκτροχημικών αντιδράσεων, ο οποίος, σαφώς, καθορίζεται ανάλογα με το είδος των χρησιμοποιούμενων ηλεκτρολυτών και αντιδρώντων στοιχείων. Ανάλογα με τον ηλεκτρολύτη, οι διαθέσιμοι τύποι κυψελών καυσίμου είναι:

- αλκάλια (alkaline – AFC),
- μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (proton exchange membrane – PEMFC),
- άμεσης μεθανόλης (direct methanol – DMFC),
- άμεσης αιθανόλης (direct ethanol – DEFC),
- φωσφορικό οξύ (phosphoric acid – PAFC),
- τηγμένα ανθρακικά άλατα (molten carbonate – MCFC),
- στερεοποιημένα οξειδία (solide oxide – SOFC).

Στον πίνακα 3.4 παρουσιάζονται συνοπτικά οι κυριότεροι τύποι κυψελών καυσίμου που έχουν αναπτυχθεί με τα βασικά κατασκευαστικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά τους [24 – 26].

Η συνολική απόδοση μιας κυψέλης καυσίμου είναι της τάξης του 40 – 65%, με τάση αύξησης υπό την προϋπόθεση ότι προκύπτει ταυτόχρονη αξιοποίηση της απορριπτόμενης θερμότητας σε παράλληλες χρήσεις. Ένα βασικό μειονέκτημα, που προς το παρόν αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα στην ευρεία χρήση των κυψελών καυσίμου, είναι το υψηλό κόστος προμήθειας και εγκατάστασης, το οποίο είναι της τάξης των 5.000 – 8.000€/kW. Το κόστος αυτό διαμορφώνεται κυρίως από το κόστος των απαιτούμενων υλικών για την κατασκευή και τη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου.

A. Κυψέλες καυσίμου υδρογόνου

Αναμφισβήτητα το υδρογόνο είναι το καύσιμο που χρησιμοποιείται περισσότερο στις κυψέλες καυσίμου για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στις περισσότερες αναπτυγμένες χώρες καταβάλλονται σημαντικές προσπάθειες για την καθιέρωση της παραγωγής υδρογόνου από Α.Π.Ε. και τη διάδοση της χρήσης του σε διάφορες εφαρμογές. Προς το παρόν πάντως, η παραγωγή υδρογόνου από Α.Π.Ε., κυρίως αιολική ενέργεια, ηλιακή ακτινοβολία και βιομάζα, κοστίζει περίπου δύο με τρεις φορές περισσότερο από ό,τι η παραγωγή του υδρογόνου με φυσικό αέριο [27]. Σημαντικές προσπάθειες, συνεπώς, καταβάλλονται προς την κατεύθυνση της βελτίωσης των τεχνολογιών παραγωγής υδρογόνου από Α.Π.Ε., με απώτερους στόχους την αύξηση της απόδοσης και τη μείωση του κόστους παραγωγής [24].

Πίνακας 3.4: Χαρακτηριστικά διαφορετικών τύπων κυψελών καυσίμου.

Τύπος κυψέλης καυσίμου	Θερμοκρασία λειτουργίας (°C)	Ηλεκτρολύτης	Μέσο φόρτισης	Άνοδος καταλύτη	Καύσιμο κυψέλης	Απόδοση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (%)	Ονομαστική ισχύς εμπορικών συσκευών (kW)
Αλκάλια (AFC)	70 – 100	υδατικό αλκαλικό διάλυμα (υγρό)	H ⁺	Ni	H ₂	60 – 70	10 – 100
Μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC)	50 – 100	πορώδες, θειούχο πολυμερές (στερεό)	H ⁺	Pt (πλατίνα)	H ₂	30 – 50	0,1 – 500
Άμεσης μεθανόλης (DMFC)	90 – 120	πορώδες, θειούχο πολυμερές (στερεό)	H ⁺	Pt (πλατίνα)	Μεθανόλη	20 – 30	100 – 1.000
Άμεσης αιθανόλης (DEFC)	90 – 120	πορώδες, θειούχο πολυμερές (στερεό)	H ⁺	Pt (πλατίνα)	Αιθανόλη	20 – 30	100 – 1.000
Φωσφορικό οξύ (PAFC)	150 – 220	φωσφορικό οξύ (υγρό)	H ⁺	Pt (πλατίνα)	H ₂	40 – 55	5 – 10.000
Τηγμένα ανθρακικά άλατα (MCFC)	650 – 700	ανθρακούχο αλκαλικό διάλυμα (υγρό)	CO ²⁻	Ni	CO / H ₂	50 – 60	100 – 300
Στερεοποιημένα οξειδία (SOFC)	800 – 1.000	στερεοποιημένα άλατα ζιρκόνιου (στερεό)	O ²⁻	Ni	CO / H ₂ / CH ₄	50 – 60	0,5 – 100

Οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου έχουν μία σειρά από δυναμικές εφαρμογές. Μία από τις πιο δημοφιλείς είναι η χρήση τους στην αυτοκίνηση. Οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου για οχήματα (hydrogen fuel cell vehicles – HFCVs) φιγουράρουν τα τελευταία χρόνια ως λύση μηδενικής εκπομπής αερίων ρύπων.

Οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου αποτελούνται από τρία βασικά τμήματα, τα οποία είναι ο θάλαμος αποθήκευσης του υδρογόνου, το τμήμα ενεργειακής μετατροπής για τη μετατροπή του υδρογόνου σε ηλεκτρική ενέργεια, και το τμήμα ηλεκτρόλυσης, με σκοπό τη μετατροπή της εξωτερικά παρεχόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ξανά σε υδρογόνο.

Οι βασικότερες κατηγορίες κυψελών καυσίμου υδρογόνου είναι οι μεμβράνες ανταλλαγής πρωτονίων, τα αλκάλια και οι κυψέλες φωσφορικού οξέος. Οι κυψέλες υδρογόνου, παρά τα πλεονεκτήματά τους, παρουσιάζουν μία σειρά από σημαντικά μειονεκτήματα, όπως το υψηλό κόστος κατασκευής, ευαισθησία στη μόλυνση του υδρογόνου και σχετικά χαμηλό βαθμό απόδοσης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

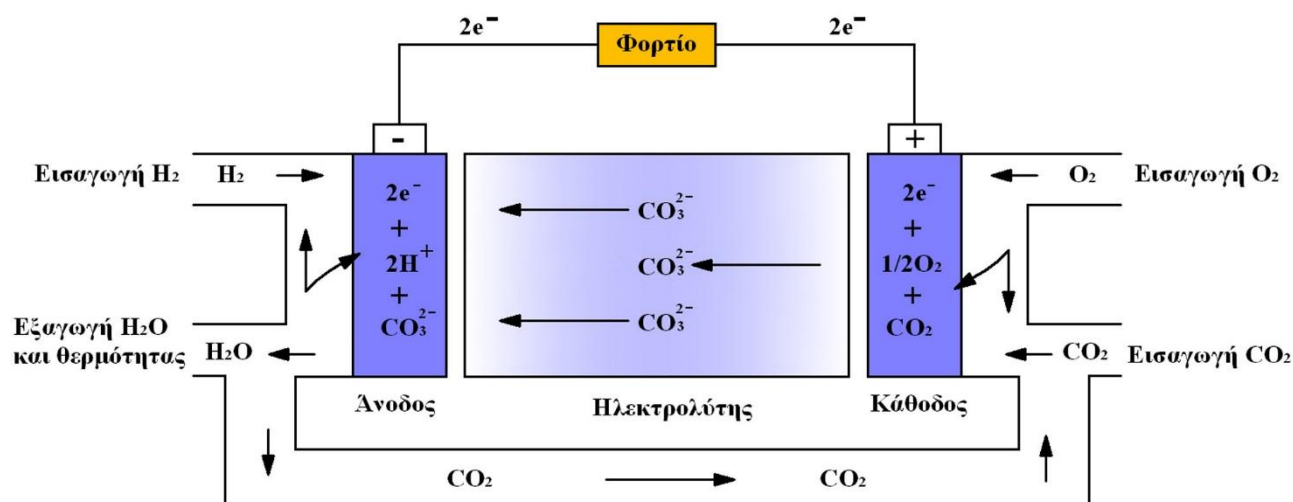
B. Μεμβράνες ανταλλαγής πρωτονίων

Οι κυψέλες καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC) είναι μία από τις περισσότερο υποσχόμενες τεχνολογίες στο χώρο των κυψελών καυσίμου [28]. Η δομή και η λειτουργία τους παρουσιάστηκε στο σχήμα 3.11 και περιγράφηκε αναλυτικά ανωτέρω. Θεωρητικά η παραγωγή ισχύος από μία κυψέλη καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων μπορεί να είναι από 10 έως 500kW, με βαθμό απόδοσης 30 – 50%. Τα πλεονεκτήματα των PEMFC είναι η απλή και ανθεκτική κατασκευή τους, το μικρό βάρος τους, η υψηλή πυκνότητα ισχύος, η δυνατότητά τους να χρησιμοποιούν ατμοσφαιρικό αέρα και οι πολύ χαμηλές εκπομπές αερίων. Μέχρι σήμερα οι PEMFC έχουν χρησιμοποιηθεί σε στατικές μονάδες παραγωγής ισχύος [29], για την υποστήριξη συστημάτων αδιάλειπτης παροχής ισχύος (uninterrupted power supply – UPS) [30], σε φορητές ηλεκτρονικές συσκευές [31], σε οχήματα μικρού βάρους [32], σε ποδήλατα με παροχή ισχύος [33], υβριδικά λεωφορεία [34] και ιστιοπλοϊκά [35].

Γ. Κυψέλες καυσίμου με τηγμένα ανθρακικά άλατα

Οι κυψέλες καυσίμου με τηγμένα ανθρακικά άλατα (MCFC) χρησιμοποιούν ανθρακικά άλατα λιθίου, καλίου, νατρίου ως ηλεκτρολύτες, σε θερμοκρασίες της τάξης των 650 °C. Οι MCFC παρουσιάζουν μεγάλη ιοντική αγωγιμότητα. Το αέριο καύσιμο που χρησιμοποιείται στις κυψέλες αυτές είναι ένα αεριοποιημένο μίγμα H_2 και CO . Το οξειδωτικό μέσο είναι μίγμα O_2 και CO_2 , το οποίο μπορεί να περιέχει και υδρατμούς. Η πίεση λειτουργίας είναι μεταξύ 1 και 10atm. Εξαιτίας της υψηλής πίεσης που απαιτείται για τη λειτουργία της συσκευής, ως ηλεκτρόδιο ανόδου χρησιμοποιείται ένα όχι πολύτιμο μέταλλο (συνήθως Ni), ενώ το οξειδίο του (στην περίπτωση νικελίου, το NiO) είναι κατάλληλο ως ηλεκτρόδιο καθόδου. Κατά τη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου, τα άλατα της κυψέλης λειώνουν από την υψηλή επικρατούσα θερμοκρασία, παράγοντας έτσι ανθρακικά ιόντα (CO_3^{2-}) στην κάθοδο. Τα ιόντα μετακινούνται προς την άνοδο, όπου ενώνονται με το υδρογόνο για να παράγουν υδρατμούς, CO_2 , θερμότητα και ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια που ελευθερώνονται παρασύρονται προς ένα εξωτερικά συνδεδεμένο ηλεκτρικό κύκλωμα, για να παράγουν τελικά ηλεκτρικό ρεύμα, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 3.12.

Οι κυψέλες καυσίμου με τηγμένα ανθρακικά άλατα έχουν το πλεονέκτημα να μπορούν να λειτουργήσουν με διαφορετικούς τύπους καυσίμου, σε αντίθεση με τις υπόλοιπες τεχνολογίες κυψελών καυσίμου. Σε Ιαπωνία και Η.Π.Α. αναπτύσσονται σήμερα MCFC με τεχνολογικές τροποποιήσεις, που τους παρέχουν τη δυνατότητα να λειτουργήσουν με συνθετικό αέριο (syngas), φυσικό αέριο και βιοαέριο για σταθμούς παραγωγής ισχύος. Άλλο ένα σημαντικό πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα αντικατάστασης του καταλύτη πλατίνας με νικέλιο, με σημαντική συμβολή στη μείωση του κόστους κατασκευής της κυψέλης. Λόγω της ευελιξίας στη χρήση καυσίμου, οι MCFC έχουν χρησιμοποιηθεί σε στρατιωτικές εφαρμογές και στη ναυσιπλοΐα. Επιπλέον, η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας των MCFC, δημιουργεί την προοπτική για ταυτόχρονη αξιοποίησή τους για συμπαραγωγή θερμότητας.



Σχήμα 3.12: Δομή και λειτουργία κυψέλης καυσίμου με τηγμένα ανθρακικά άλατα.

Από την άλλη μεριά, τα βασικά μειονεκτήματα των κυψελών καυσίμου είναι τα μεγάλα χρονικά διαστήματα στα οποία η θερμοκρασία πρέπει να διατηρείται σε υψηλές τιμές, η χαμηλή αντοχή της κυψέλης στις οξειδωτικές δράσεις του θείου, οι εκπομπές CO₂ και η δυσκολία διαχείρισης των υγρών ηλεκτρολυτών. Προς το παρόν οι MCFC έχουν χαμηλή διείσδυση στην αγορά.

Δ. Κυψέλες καυσίμου με στερεοποιημένα οξείδια

Οι κυψέλες καυσίμου με στερεοποιημένα οξείδια (SOFC) είναι ιδιαίτερα ελκυστικές λόγω του υψηλού βαθμού απόδοσής τους. Οι κυψέλες SOFC χρησιμοποιούν ως ηλεκτρολύτη στερεοποιημένα οξείδια για τη μεταφορά αρνητικών ιόντων οξειδίου (O²⁻) από την κάθοδο προς την άνοδο, μέσω ενός ηλεκτροδίου είτε νικελίου, είτε κοβαλτίου, το οποίο λειτουργεί σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες (μεταξύ 700 και 1.000 °C). Κάποια από τα πλεονεκτήματα των SOFC είναι το σχετικά μέσο κόστος κατασκευής τους, η υψηλή απόδοσή τους, σχετικά χαμηλές εκπομπές αερίων ρύπων, γρήγορες εσωτερικές χημικές αντιδράσεις και σταθερή παραγωγή ισχύος για μεγέθη από μερικές εκατοντάδες W έως 2MW. Ωστόσο, εκπονείται έρευνα με σκοπό τη μείωση της θερμοκρασίας λειτουργίας των κυψελών αυτών. Επιπλέον η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας των SOFC τις καθιστά κατάλληλες για εφαρμογές συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας. Τέλος, λόγω και πάλι της υψηλής θερμοκρασίας λειτουργίας των κυψελών αυτών δεν απαιτείται η χρήση ακριβής πλατίνας ως καταλύτη. Τα σημαντικότερα μειονεκτήματα των SOFC είναι η διάβρωση των κυψελών από το θείο και το χαμηλό επίπεδο ωριμότητας της σχετικής τεχνολογίας.

Ε. Κυψέλες καυσίμου άμεσης μεθανόλης

Οι κυψέλες καυσίμου άμεσης μεθανόλης (DMFC) είναι μία υποκατηγορία των κυψελών καυσίμων με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων, στις οποίες ως καύσιμο για τη λειτουργία της κυψέλης χρησιμοποιείται απευθείας (άμεσα) μεθανόλη (CH₃OH). Οι DMFC έχουν χαμηλότερη απόδοση, χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας, ωστόσο εξελίσσονται ταχέως σε μία αξιόπιστη τεχνολογία αποθήκευσης, εξαιτίας της μεγάλης διάρκειας ζωής και της μεγάλης πυκνότητας ενέργειας που εμφανίζουν.

Η βασική αρχή λειτουργίας των DMFC είναι η εξαγωγή υδρογόνου από τη μεθανόλη μέσω ηλεκτρο-οξείδωσης, για να παραχθεί τελικά CO₂ στην άνοδο της συσκευής. Τα κατιόντα υδρογόνου (H⁺) έλκονται προς την κάθοδο, αφού περάσουν διαμέσου της μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων, για να αντιδράσουν τελικά με το O₂ και να παραχθεί νερό. Οι ηλεκτρολύτες που χρησιμοποιούνται στις DMFC είναι οι ίδιοι που δύνανται να χρησιμοποιηθούν και στις PEMFC.

Οι χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα σε μία DMFC είναι:

Χημική αντίδραση στην άνοδο:



Συνολική χημική αντίδραση στην κάθοδο:



Ολική αντίδραση:



Η μέγιστη ονομαστική ισχύς των DMFC είναι περιορισμένη σε σχέση με αυτή των κυψελών υδρογόνου. Ωστόσο, οι DMFC παρουσιάζουν το πλεονέκτημα της ευχρηστίας και της ευελιξίας, που οφείλεται στο ότι η μεθανόλη είναι καύσιμο πολύ πιο εύκολο στη μεταφορά και στην αποθήκευση, από ότι το υδρογόνο. Οι DMFC έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί σε φορητές ηλεκτρονικές συσκευές, όπως τηλεφωνικές συσκευές, ψηφιακές κάμερες και φορητούς υπολογιστές μικρού μεγέθους (notebooks). Βασικό μειονέκτημα των DMFC είναι οι εκπομπές CO₂.

3.4.3. Επιλογή μονάδας αποθήκευσης σε μικρούς υβριδικούς σταθμούς

Με την παρουσίαση των δυνατών εναλλακτικών μονάδων αποθήκευσης που προηγήθηκε, είναι πλέον δυνατή η συγκριτική αξιολόγησή τους με σκοπό την επιλογή της καταλληλότερης από αυτές, για συνδυασμένη λειτουργία με μονάδα ηλεκτροπαραγωγής από Α.Π.Ε. στα πλαίσια υλοποίησης ενός υβριδικού σταθμού. Υπενθυμίζεται ότι η μονάδα αποθήκευσης ενός υβριδικού σταθμού θα πρέπει να χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένες προδιαγραφές, που εξασφαλίζουν την επίτευξη των βασικών στόχων του υβριδικού σταθμού, που δεν είναι άλλοι από τη μεγιστοποίηση της διείσδυσης των Α.Π.Ε. στο Σ.Η.Ε. με το χαμηλότερο δυνατό κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας και χωρίς να βλάπτεται η ασφάλεια και η ευστάθεια του συστήματος.

Προκειμένου η μονάδα αποθήκευσης να συμβάλλει, κατά το δυνατόν, στους ανωτέρω στόχους του υβριδικού σταθμού θα πρέπει να:

- Διαθέτει, κατά το δυνατό, μεγαλύτερη αποθηκευτική ικανότητα.
- Είναι δυνατή η προμήθεια και η λειτουργία της με χαμηλό κόστος.
- Να χαρακτηρίζεται από υψηλή απόκριση στις απαιτήσεις της ζήτησης και στις διακυμάνσεις του φορτίου.

Από την προηγούμενη ανάλυση, εκείνο που διαφάνηκε είναι ότι στις τεχνολογίες ηλεκτροχημικής αποθήκευσης, δηλαδή στους ηλεκτροχημικούς συσσωρευτές και στις κυψέλες καυσίμου, το κόστος κατασκευής της μονάδας, και, συνεπώς, το ειδικό κόστος αποθήκευσης, είναι πολύ υψηλό, συγκρινόμενο με τις τεχνολογίες αποθήκευσης που δύνανται να ενταχθούν σε υβριδικούς σταθμούς μεγάλου μεγέθους (αναστρέψιμα υδροηλεκτρικά και σταθμοί συμπιεσμένου αέρα). Πράγματι, το ειδικό κόστος αποθήκευσης στους δύο υφιστάμενους σταθμούς συμπιεσμένου αέρα, με βάση τον πίνακα 3.1, είναι της τάξης των 20 – 110€/kWh, ενώ η αντίστοιχη τιμή για τα δύο αναστρέψιμα υδροηλεκτρικά που υλοποιούνται στα πλαίσια υβριδικών σταθμών, με βάση τον πίνακα 3.2, είναι της τάξης των 15 – 85€/kWh. Αντίθετα, στους ηλεκτροχημικούς συσσωρευτές, με βάση τον πίνακα 3.3, το κόστος αποθήκευσης στην καλύτερη περίπτωση είναι της τάξης των 50 – 150€/kWh για τους συσσωρευτές οξέος μολύβδου, ενώ μπορεί να φτάσει έως και τα 1.000€/kWh για τους συσσωρευτές ροής. Ακόμα όμως και για τους συσσωρευτές οξέος, το ειδικό κόστος αποθήκευσης στην πραγματικότητα τριπλασιάζεται τουλάχιστον σε σχέση με την προαναφερθείσα τιμή για μία διάρκεια ζωής του υβριδικού σταθμού της τάξης των είκοσι ετών, δεδομένης της διάρκειας ζωής των συσσωρευτών μολύβδου (5 – 6 έτη) και των συνεπαγόμενων αντικαταστάσεων που πρέπει να γίνουν. Ακόμα υψηλότερα είναι τα κόστη αποθήκευσης για τις κυψέλες καυσίμου.

Οι ηλεκτροχημικοί συσσωρευτές, συνεπώς, γίνονται ανταγωνιστικοί ως προς τις τεχνολογίες αποθήκευσης μεγάλου μεγέθους, όταν η ζήτηση ισχύος που καλείται να καλύψει ο υβριδικός σταθμός είναι μικρού μεγέθους, τέτοιου, ώστε δε δικαιολογούνται τα υψηλά πάγια κόστη που συνεπάγεται η κατασκευή

ενός αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού ή ενός σταθμού συμπιεσμένου αέρα. Στην περίπτωση αυτή, οι μεγάλες μονάδες αποθήκευσης στην πράξη παραμένουν αναξιοποίητες, λόγω της χαμηλής απαίτησης για αποθήκευση και παραγωγή ενέργειας, και τα αντίστοιχα κόστη κατασκευής δεν αποσβένονται.

Για παράδειγμα, το κόστος κατασκευής της μονάδας αποθήκευσης ενός υβριδικού σταθμού για την 100% κάλυψη των αναγκών μιας χαμηλής ζήτησης ισχύος, με ετήσια αιχμή γύρω στα 500kW, εκτιμάται:

- Περίπου στα 8.000.000€, στην περίπτωση που κατασκευαστεί αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό με δεξαμενές νερού χωρητικότητας 150.000m³ σε μαομετρικά της τάξης των 120m.
- Περίπου στα 5.500.000€ στην περίπτωση που κατασκευαστεί σταθμός συμπιεσμένου αέρα με δεξαμενή αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα της τάξης των 10.000m³ σε πίεση 70bar.
- Περίπου στο 1.500.000€ συνολικά, συμπεριλαμβανομένων των αντικαταστάσεων κατά τη διάρκεια ζωής του υβριδικού σταθμού, στην περίπτωση που χρησιμοποιηθούν ηλεκτροχημικοί συσσωρευτές οξέος μολύβδου.

Είναι προφανές ότι στην ανωτέρω περίπτωση χαμηλής ζήτησης ισχύος, οι μεγάλες μονάδες αποθήκευσης αποδεικνύεται να παρουσιάζουν πολύ υψηλό κόστος κατασκευής, δυσανάλογα μεγάλο με τη ζήτηση ισχύος. Το αποτέλεσμα αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι το κόστος κατασκευής των μεγάλων μονάδων αποθήκευσης περιλαμβάνει κάποια πάγια κόστη (οδοποιία πρόσβασης, δεξαμενές, αγωγοί, κτήρια υδροδυναμικών σταθμών) που δε δύνανται να μειωθούν, ακολουθώντας τη ζήτηση ισχύος. Έτσι, σε πολύ μικρά μεγέθη ζήτησης ισχύος, τα έργα αυτά αποδεικνύονται πολύ μεγάλα και πολύ ακριβά. Όσο, όμως, μεγαλώνει το μέγεθος του Σ.Η.Ε., συνεπώς και η ζήτηση ισχύος, οι μεγάλες μονάδες αποθήκευσης γίνονται ολοένα και πιο ανταγωνιστικές, σε σχέση με τους ηλεκτροχημικούς συσσωρευτές. Για παράδειγμα, το ανωτέρω αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό, στην περίπτωση που αυξηθεί το διαθέσιμο μαομετρικό μεταξύ των δεξαμενών του περίπου στα 200m, θα είναι ικανό να προσεγγίσει την 100% κάλυψη ζήτησης ισχύος με ετήσια αιχμή στο 1MW, πιθανότατα, ανάλογα με τη διαθέσιμη εδαφική μορφολογία και τη γεωλογία των πετρωμάτων, χωρίς καθόλου αύξηση του κόστους κατασκευής. Στην περίπτωση αυτή, το συνολικό κόστος προμήθειας ηλεκτροχημικών συσσωρευτών, συμπεριλαμβανομένων και των ενδιάμεσων αντικαταστάσεων, εκτιμάται περίπου στα 4.500.000€. Φαίνεται λοιπόν ότι, ήδη από μεγάθη ζήτηση ισχύος της τάξης του 1MW, η διαφορά στο κόστος κατασκευής ή προμήθειας της μονάδας αποθήκευσης υβριδικού σταθμού μειώνεται σημαντικά ανάμεσα στις μεγάλες και στις μικρές μονάδες αποθήκευσης. Πρακτικά, για μεγέθη ισχύος άνω των 2MW η χρήση ηλεκτροχημικών συσσωρευτών δεν ενδείκνυται, ούτε για ενεργειακούς – τεχνικούς, ούτε για οικονομικούς λόγους.

Θα πρέπει στο σημείο αυτό να τονιστεί ότι τα ανωτέρω συμπεράσματα ισχύουν για την περίπτωση που ο υβριδικός σταθμός αποσκοπεί στη συνεχή κάλυψη της ζήτησης ισχύος του Σ.Η.Ε., σε όλη τη διάρκεια του εικοσιτετραώρου. Σε διαφορετική περίπτωση, για παράδειγμα στην περίπτωση παραγωγής ισχύος από τον υβριδικό σταθμό μόνο κατά τις περιόδους αιχμής, η εισαγωγή μεγάλων μονάδων αποθήκευσης κρίνεται σκόπιμη για μεγαλύτερα Σ.Η.Ε. Γενικά, όσο περιορίζονται τα χρονικά διαστήματα εντός του εικοσιτετραώρου στα οποία ο υβριδικός σταθμός συμβάλει στην κάλυψη της ζήτησης, τόσο οι μικρές μονάδες αποθήκευσης παραμένουν περισσότερο ανταγωνιστικές σε σχέση με τις μεγαλύτερες, ακόμα και για ζήτηση ισχύος μεγαλύτερου μεγέθους.

3.5. Αλγόριθμοι λειτουργίας υβριδικών σταθμών μεγάλου μεγέθους

Ένας υβριδικός σταθμός μεγάλου μεγέθους μπορεί να εντάσσεται σε ένα σύστημα με σκοπό:

- Τη διαρκή κάλυψη της ζήτησης ισχύος, σε όλη τη διάρκεια του εικοσιτετραώρου, αποσκοπώντας στην 100% ετήσια κάλυψη της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στο Σ.Η.Ε. Τέτοιες περιπτώσεις υβριδικών σταθμών συνήθως μελετώνται και προτείνονται, προς το παρόν τουλάχιστον, για Σ.Η.Ε. μικρού και μεσαίου μεγέθους, με ζήτηση ισχύος από 3 έως 10MW.
- Την κάλυψη της ζήτησης ισχύος κατά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα εντός του εικοσιτετραώρου. Τα χρονικά διαστήματα αυτά περιέχουν, συνήθως, τις αιχμές ζήτησης ισχύος. Ουσιαστικά, στις περιπτώσεις αυτές, ο υβριδικός σταθμός λειτουργεί με σκοπό την απαλοιφή αιχμών ισχύος από το Σ.Η.Ε., αποθηκεύοντας ενέργεια όχι από τις θερμοηλεκτρικές μονάδες βάσης, αλλά από τις μονάδες

Α.Π.Ε. από τις οποίες συνοδεύεται. Τέτοιες περιπτώσεις υβριδικών σταθμών μελετώνται και σχεδιάζονται για ένταξη σε συστήματα μεσαίου και μεγάλου μεγέθους, με ζήτηση ισχύος μεγαλύτερη των 10MW.

Ο αλγόριθμος λειτουργίας των υβριδικών σταθμών αλλάζει ανάλογα με το ποια από τις ανωτέρω περιγραφόμενες φιλοσοφίες λειτουργεί. Οι αλγόριθμοι λειτουργίας για τις ανωτέρω περιπτώσεις περιγράφονται στη συνέχεια, συνοδευόμενοι από τις απαιτούμενες σχέσεις υπολογισμού, ανάλογα με το είδος της μονάδας αποθήκευσης (αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό ή σταθμός συμπιεσμένου αέρα).

3.5.1. Υβριδικοί σταθμοί για 100% κάλυψη ισχύος

Οι υβριδικοί σταθμοί μεγάλου μεγέθους μπορούν να εισαχθούν με στόχο τη συνεχή παραγωγή εγγυημένης ισχύος και την προσέγγιση της 100% κάλυψης της ετήσιας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στις περιπτώσεις μικρών και μεσαίων συστημάτων [36]. Η διαστασιολόγηση και η λειτουργία του υβριδικού σταθμού επηρεάζεται ανάλογα με την τεχνολογία αποθήκευσης. Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζεται αναλυτικά ο υπολογισμός και η διαστασιολόγηση υβριδικών σταθμών μεγάλου μεγέθους με χρήση αναστρέψιμων υδροηλεκτρικών και σταθμών συμπιεσμένου αέρα ως μονάδες αποθήκευσης.

3.5.1.a. Αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό ως μονάδα αποθήκευσης

Ο υπολογισμός ενός υβριδικού σταθμού με μονάδα αποθήκευσης αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό γίνεται με τη μέθοδο των ετήσιων χρονοσειρών. Το χρονικό βήμα υπολογισμού συνήθως λαμβάνεται ωριαίο. Ο αλγόριθμος λειτουργίας ενός υβριδικού σταθμού με σκοπό τη μεγιστοποίηση της παραγωγής σε όλο το 24ωρο, στην περίπτωση που χρησιμοποιείται ως μονάδα αποθήκευσης αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό, αναλύεται στα ακόλουθα βήματα:

1. Σε κάθε χρονικό βήμα υπολογισμού εισάγονται ως δεδομένα η διαθέσιμη ισχύς P_{RES} από τη μονάδα Α.Π.Ε. του υβριδικού σταθμού (συνήθως αιολικό πάρκο) και η ζήτηση ισχύος P_d . Επίσης εισάγεται ένα ποσοστό δ_{max} μέγιστης στιγμιαίας διεύθυνσης της μονάδας Α.Π.Ε.
2. Αν P_{RES} η διαθέσιμη ισχύς από τη μονάδα Α.Π.Ε. και P_d η ζήτηση ισχύος, τότε η απευθείας διεύθυνση ισχύος Α.Π.Ε. $P_{RES\delta}$ ισούται με:
 - i. Αν $P_{RES} \geq \delta_{max} \cdot P_d$, τότε $P_{RES\delta} = \delta_{max} \cdot P_d$.
 - ii. Αν $P_{RES} < \delta_{max} \cdot P_d$, τότε $P_{RES\delta} = P_{RES}$.
3. Αν P_p είναι η ονομαστική ισχύς των μονάδων αποθήκευσης (αντλίες), υπολογίζεται η δυνάμενη να αποθηκευτεί ισχύς P_{st} :
 - i. Αν $P_{RES} - P_{RES\delta} > P_p$, τότε $P_{st} = P_p$.
 - ii. Αν $P_{RES} - P_{RES\delta} \leq P_p$, τότε $P_{st} = P_{RES} - P_{RES\delta}$.
4. Υπολογίζεται ο όγκος V_p που πρέπει να αντληθεί στην άνω δεξαμενή, προκειμένου να αποθηκευτεί ισχύς P_{st} για χρονικό βήμα διάρκειας t (H_p το διαθέσιμο μανομετρικό άντλησης, γ το ειδικό βάρος του νερού, η_p ο μέσος βαθμός απόδοσης των αντλιών για το χρονικό βήμα υπολογισμού):

$$V_p = \frac{P_{st} \cdot t \cdot \eta_p}{\gamma \cdot H_p} \quad (3.13)$$

5. Υπολογίζεται ο όγκος νερού V_h που θα πρέπει να αφαιρεθεί από την άνω δεξαμενή προκειμένου να καλυφθεί η εναπομένουσα ζήτηση ισχύος $P_d - P_{RES\delta}$ από τους υδροστρόβιλους για το χρονικό βήμα διάρκειας t (H_T το διαθέσιμο μανομετρικό πτώσης):

$$V_h = \frac{(P_d - P_{RES\delta}) \cdot t}{\gamma \cdot H_T \cdot \eta_h} \quad (3.14)$$

6. Ο παραμένον όγκος νερού κατά το τρέχον χρονικό βήμα j στην άνω δεξαμενή θα είναι:

$$V_{st}(j) = V_{st}(j-1) + V_p - V_h.$$

7. Ελέγχεται αν ο παραμένον όγκος νερού στην άνω δεξαμενή υπερβαίνει τη μέγιστη χωρητικότητα της δεξαμενής:
- i. Αν $V_{st}(j) > V_{max}$, τότε:

$$P_{st} = 0$$

$$P_{rej} = P_{RES} - P_{RES\delta}$$

$$V_{st}(j) = V_{st}(j-1) - V_h.$$
 - ii. Αν $V_{st}(j) \leq V_{max}$, τότε:

$$P_{st} = P_p \text{ ή } P_{st} = P_{RES} - P_{RES\delta}$$

$$P_{rej} = P_{RES} - P_{RES\delta} - P_{st}.$$
8. Επιπλέον ελέγχεται αν ο παραμένον όγκος νερού στην άνω δεξαμενή είναι μικρότερος από τον ελάχιστο περιεχόμενο σε αυτήν:
- i. Αν $V_{st}(j) < V_{min}$, τότε:

$$P_h = 0$$

$$P_{th} = P_d - P_{RES\delta}$$

$$V_{st}(j) = V_{st}(j-1) + V_p.$$
 - ii. Αν $V_{st}(j) \geq V_{min}$, τότε:

$$P_h = P_d - P_{RES\delta}$$

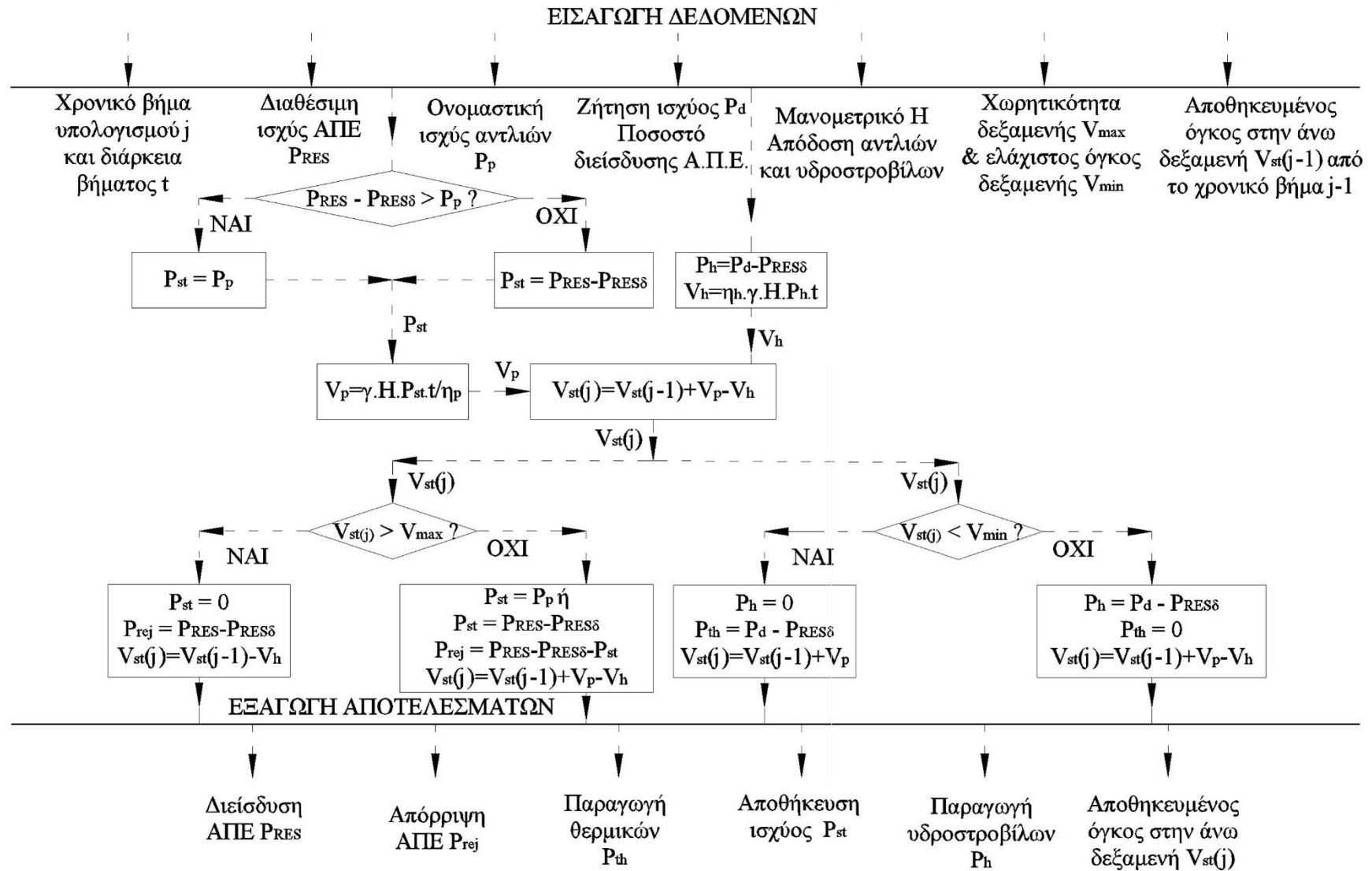
$$P_{th} = 0$$

$$V_{st}(j) = V_{st}(j-1) + V_p - V_h.$$

Διαφαίνεται από την ανωτέρω παρουσίαση ότι προβλέπεται, με βάση τον αλγόριθμο λειτουργίας, η ταυτόχρονη άντληση και πτώση νερού στο ίδιο χρονικό βήμα. Η σκοπιμότητα αυτής της δυνατότητας είναι προφανής από την ανάλυση του αλγόριθμου λειτουργίας. Κάποια χρονική στιγμή, καθώς το αιολικό πάρκο δεν επιτρέπεται να διεισδύσει απευθείας στην παραγωγή σε ποσοστό μεγαλύτερο του δ_{max} ως προς τη ζήτηση ισχύος, θα πρέπει να καλυφθεί το υπόλοιπο της ζήτησης κατά προτεραιότητα από τους υδροστρόβιλους, εφόσον, βέβαια, επαρκεί η αποθηκευμένη ποσότητα νερού στην άνω δεξαμενή. Την ίδια χρονική στιγμή όμως είναι επιθυμητό να αποθηκευτεί η περίσσεια ενέργειας από το αιολικό πάρκο, που είναι αυτή που παραμένει διαθέσιμη μετά την απευθείας διείσδυση αιολικής ισχύος. Η ταυτόχρονη άντληση και πτώση νερού μπορεί να εξασφαλιστεί με την εγκατάσταση δύο ανεξάρτητων μεταξύ τους σωληνώσεων, μίας αποκλειστικά για υδατόπτωση και μίας αποκλειστικά για άντληση.

Με την ανωτέρω διαδικασία, σε κάθε χρονικό βήμα, υπολογίζονται οι τιμές για την απευθείας διείσδυση ισχύος του αιολικού πάρκου, για την παραγωγή ισχύος από τους υδροστρόβιλους και τις θερμοηλεκτρικές μονάδες εφεδρείας και για την αποθήκευση ισχύος από τις αντλίες. Επίσης υπολογίζονται οι όγκοι νερού που αποθηκεύονται και αφαιρούνται από την άνω δεξαμενή και ο όγκος νερού που τελικά παραμένει αποθηκευμένος σε αυτή μετά από κάθε χρονικό βήμα υπολογισμού. Με την ολοκλήρωση των ετήσιων αποτελεσμάτων είναι δυνατός στο τέλος ο υπολογισμός της ετήσιας παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας από τις συνιστώσες του υβριδικού σταθμού, η διακύμανση της στάθμης φόρτισης της μονάδας αποθήκευσης (πρακτικά ο αποθηκευμένος όγκος νερού στην άνω δεξαμενή) και η σχεδίαση του ετήσιου διαγράμματος σύνθεσης παραγωγής ισχύος από τον υβριδικό σταθμό. Επίσης οι μέγιστες ετήσιες τιμές παραγωγής ισχύος από τους υδροστρόβιλους και τις θερμοηλεκτρικές μονάδες και αποθήκευσης ισχύος από τις αντλίες θα αποτελέσουν τις ελάχιστες απαιτούμενες τιμές για την ονομαστική ισχύ των μονάδων αυτών.

Ο ανωτέρω περιγραφόμενος αλγόριθμος λειτουργίας παρουσιάζεται γραφικά στο σχήμα 3.13.



Σχήμα 3.13: Αλγόριθμος λειτουργίας υβριδικού σταθμού αιολικού πάρκου και αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού για 100% κάλυψη ζήτησης ισχύος.

Τα δεδομένα που απαιτούνται για τον ανωτέρω υπολογισμό είναι:

1. η ετήσια χρονοσειρά ζήτησης ισχύος με τουλάχιστον μέσες ωριαίες τιμές
2. η ετήσια χρονοσειρά παραγωγής ισχύος από το αιολικό πάρκο με τουλάχιστον μέσες ωριαίες τιμές
3. η χωρητικότητα των δεξαμενών
4. το φυσικό ύψος υδατόπτωσης και άντλησης
5. τα διαγράμματα μεταβολής του βαθμού απόδοσης των υδροδυναμικών μηχανών (υδροστροβίλων και αντλιών)
6. το μήκος των αγωγών διασύνδεσης των δύο δεξαμενών.

Η χωρητικότητα των δεξαμενών, τα φυσικά ύψη άντλησης και υδατόπτωσης και το μήκος των αγωγών αποτελούν δεδομένα που προκύπτουν από την εδαφική μορφολογία της θέσης εγκατάστασης και την αναλυτική χωροθέτηση του έργου. Η ετήσια χρονοσειρά παραγωγής ισχύος από το αιολικό πάρκο προκύπτει από το αιολικό δυναμικό στη θέση εγκατάστασης και από τον αριθμό και τον τύπο των ανεμογεννητριών του, δεδομένα που καθορίζουν την ονομαστική ισχύ του αιολικού πάρκου. Καθώς όμως η ονομαστική ισχύς του αιολικού πάρκου είναι ζητούμενο της διαδικασίας διαστασιολόγησης του υβριδικού σταθμού, κατά τη διαδικασία υπολογισμού το μέγεθος αυτό δεν μπορεί παρά να αποτελεί ανεξάρτητη παράμετρο επιλογής. Η ονομαστική ισχύς δηλαδή του αιολικού πάρκου και, κατά συνέπεια, η ετήσια χρονοσειρά παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος από αυτό, εισάγονται επαναληπτικά στη διαδικασία υπολογισμού και ο ανωτέρω αλγόριθμος εκτελείται για διαφορετικές τιμές της ονομαστικής ισχύος του αιολικού πάρκου. Με τον τρόπο αυτό ο υβριδικός σταθμός υπολογίζεται για διαφορετικές διαστασιολογήσεις με απώτερο σκοπό τον υπολογισμό της βέλτιστης, με κριτήρια που μπορεί να είναι καθαρά ενεργειακά, όπως, για παράδειγμα η μεγιστοποίηση της ετήσιας διείσδυσης Α.Π.Ε., ή οικονομικά, όπως η ελαχιστοποίηση του κόστους κύκλου ζωής του έργου. Η επαναληπτική διαδικασία βελτιστοποίησης διαστασιολόγησης του υβριδικού σταθμού θα παρουσιαστεί αναλυτικά σε επόμενη ενότητα.

Ιδιαίτερο μέρος της διαδικασίας διαστασιολόγησης υβριδικού σταθμού με αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό αποτελεί ο υπολογισμός του υδραυλικού δικτύου και, κυρίως, των αγωγών διασύνδεσης των δύο δεξαμενών. Ο υπολογισμός του υδραυλικού δικτύου είναι απαραίτητος, καθώς μέσω των απωλειών ροής υπολογίζονται τα ολικά διαθέσιμα μανομετρικά υδατόπτωσης H_T και άντλησης H_P από τις σχέσεις (για δεξαμενές αναρρόφησης και κατάθλιψης ανοιχτές στην ατμοσφαιρική πίεση):

$$H_T = H_{NT} - \sum \delta h_{fT} \quad (3.15)$$

$$H_P = H_{NP} + \sum \delta h_{fP} \quad (3.16)$$

όπου:

H_{NT} : η φυσική υψομετρική διαφορά μεταξύ της άνω δεξαμενής και του υδροηλεκτρικού σταθμού

H_{NP} : η φυσική υψομετρική διαφορά μεταξύ της άνω δεξαμενής και του αντλιοστασίου

$\sum \delta h_{fT}$: οι συνολικές απώλειες ροής κατά την υδατόπτωση

$\sum \delta h_{fP}$: οι συνολικές απώλειες ροής κατά την άντληση.

Οι συνολικές απώλειες ροής αποτελούν το άθροισμα των γραμμικών απωλειών ροής και των τοπικών απωλειών ροής στα διάφορα υδραυλικά εξαρτήματα:

$$\sum \delta h_f = \delta h_f + \sum \delta h_{f\zeta} \quad (3.17)$$

Οι τοπικές απώλειες ροής είναι της μορφής:

$$\sum \delta h_{f\zeta} = \sum \zeta \cdot \frac{u^2}{2 \cdot g} \quad (3.18)$$

όπου ζ ο συντελεστής απωλειών ροής του εκάστοτε υδραυλικού εξαρτήματος και u η ταχύτητα ροής κατά την υδατόπτωση και την άντληση.

Οι γραμμικές απώλειες ροής δίνονται από τις σχέσεις:

$$\delta h_{fT} = f \frac{L_T}{D_T^5} \frac{8 \cdot Q_T^2}{g \cdot \pi^2} \quad (3.19)$$

$$\delta h_{fP} = f \frac{L_P}{D_P^5} \frac{8 \cdot Q_P^2}{g \cdot \pi^2} \quad (3.20)$$

όπου:

f : ο συντελεστής γραμμικών απωλειών ροής
 D_T & D_P : οι διάμετροι των αγωγών πτώσης και άντλησης αντίστοιχα
 L_T & L_P : τα μήκη των αγωγών πτώσης και άντλησης αντίστοιχα
 Q_T & Q_P : οι παροχές πτώσης και άντλησης αντίστοιχα
 g : η επιτάχυνση της βαρύτητας.

Ο συντελεστής απωλειών ροής f εξαρτάται από το υλικό και την κατεργασία κατασκευής των αγωγών. Στη γενική περίπτωση ο συντελεστής απωλειών ροής f δίνεται από τον κατασκευαστή των αγωγών. Ειδικά για χαλύβδινους συγκολλητούς αγωγούς ελικοειδούς ραφής, ο συντελεστής f μπορεί να υπολογιστεί και από την εμπειρική σχέση του Nikuradse [37] (ϵ_s η απόλυτη τραχύτητα του αγωγού σε mm):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \cdot \log\left(\frac{1}{\epsilon_s}\right) + 1.14 \quad (3.21)$$

Για τον υπολογισμό των γραμμικών απωλειών ροής, με βάση τις σχέσεις 3.19 και 3.20, απαιτείται η γνώση της παροχής νερού εντός των αγωγών κατά την πτώση και άντληση. Οι παροχές αυτές υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$Q_T = \frac{P_{ht}}{\eta_T \rho g H_T} \quad \& \quad Q_P = \frac{\eta_P P_P}{\rho g H_P} \quad (3.22)$$

Στις σχέσεις όμως αυτές παρατηρείται ότι για τον υπολογισμό της παροχής είναι απαραίτητη η γνώση των συνολικών μανομετρικών άντλησης και πτώσης, τα οποία, με τη σειρά τους, προϋποθέτουν τον υπολογισμό των γραμμικών απωλειών ροής και τον υπολογισμό των διαμέτρων των αγωγών, δεδομένα που δεν είναι εκ των προτέρων γνωστά. Παρατηρείται λοιπόν ότι η διαδικασία υπολογισμού προϋποθέτει την εκ των προτέρων γνώση μεγεθών που αναμένεται να προκύψουν ως αποτελέσματα της υπολογιστικής διαδικασίας.

Τέτοιου είδους προβλήματα επιλύονται με τη μέθοδο του επαναληπτικού υπολογισμού μέσω της αρχικής υπόθεσης τιμών και της επιβεβαίωσής τους μετά την εκτέλεση των υπολογισμών. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η επαναληπτική διαδικασία υπολογισμού ακολουθεί τα ακόλουθα βήματα:

1. Υποτίθεται μια αρχική τιμή για την ονομαστική ισχύ του αιολικού πάρκου και κατασκευάζεται η ετήσια χρονοσειρά παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος από αυτό, με βάση τη χωροθέτηση των ανεμογεννητριών, το αιολικό δυναμικό στις θέσεις εγκατάστασής τους και την καμπύλη ισχύος της επιλεγμένης προς εγκατάσταση ανεμογεννήτριας. Η ονομαστική ισχύς του αιολικού πάρκου θα αποτελέσει την ανεξάρτητη παράμετρο βελτιστοποίησης της διαστασιολόγησης του υβριδικού σταθμού.

2. Δεδομένου του ότι δεν είναι γνωστές οι διάμετροι των αγωγών πτώσης και άντλησης, δεν είναι δυνατός ο υπολογισμός των απωλειών ροής. Συνεπώς, σε πρώτη προσέγγιση, οι απώλειες ροής αγνοούνται και τα ολικά μανομετρικά πτώσης και άντλησης τίθενται ίσα με τα φυσικά ύψη υδατόπτωσης και άντλησης αντίστοιχα:

$$H_T = H_{NT}$$

$$H_P = H_{NP}$$

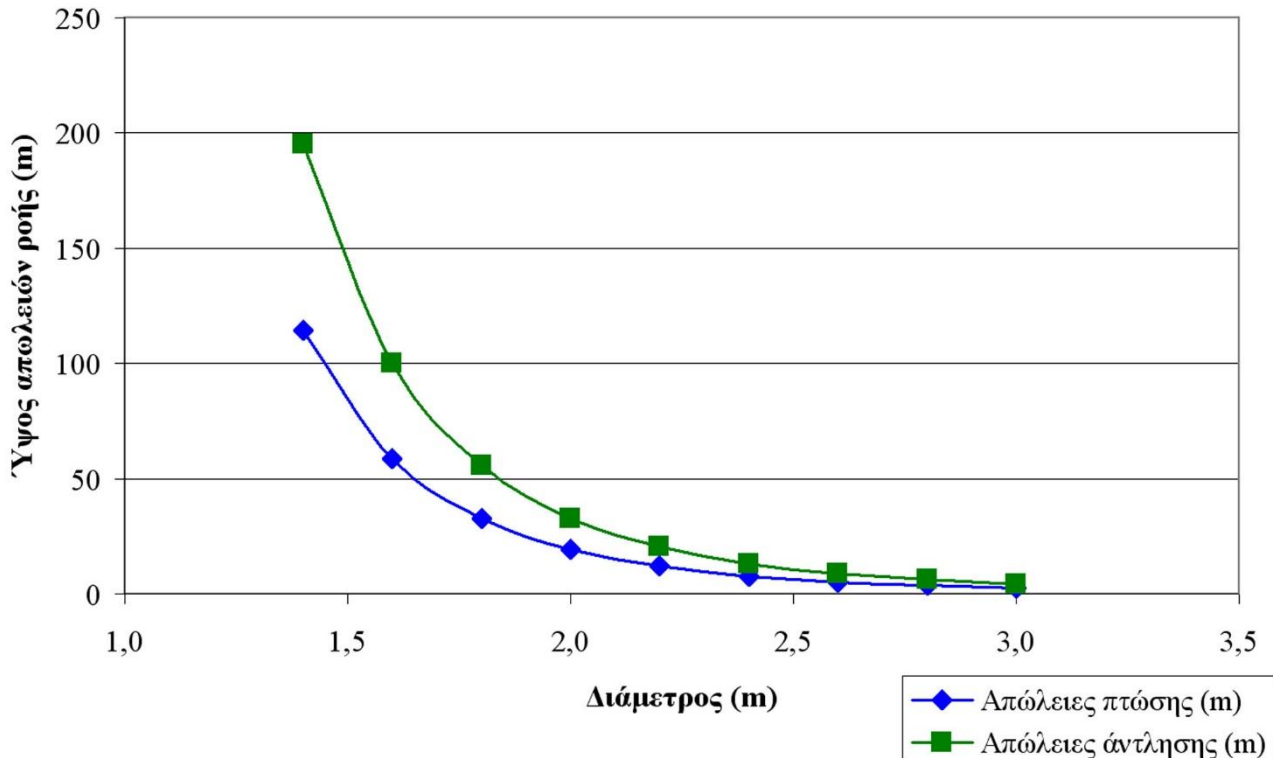
3. Εκτελείται ο ανωτέρω περιγραφόμενος αλγόριθμος υπολογισμού της ετήσιας λειτουργίας του συστήματος. Για κάθε χρονικό βήμα υπολογίζονται η παραγωγή ισχύος από τους υδροστρόβιλους P_{ht} και η ισχύς άντλησης P_p .
4. Από τις σχέσεις 3.22 υπολογίζονται οι παροχές πτώσης και άντλησης για κάθε χρονικό βήμα υπολογισμού. Από τις ετήσιες χρονοσειρές παροχής πτώσης και άντλησης υπολογίζονται οι μέγιστες τιμές Q_{Tmax} και Q_{Pmax} .
5. Με δεδομένα το συντελεστή απωλειών ροής και τα μήκη των αγωγών πτώσης και άντλησης, από τις σχέσεις 3.19 και 3.20 υπολογίζονται οι απώλειες ροής στους αγωγούς πτώσης και άντλησης για ένα πεδίο τιμών διαμέτρων. Το πεδίο τιμών των διαμέτρων για την εκτέλεση του υπολογισμού επιλέγεται, με βάση την εμπειρία του μελετητή, ανάμεσα σε μία ελάχιστη και μία μέγιστη τιμή, με συγκεκριμένο βήμα αύξησης, που, ανάλογα με το μέγεθος της διακινούμενης παροχής, μπορεί να είναι της τάξης των 0,2 – 0,5m. Με την ανωτέρω διαδικασία, επιλέγονται τελικά οι διάμετροι για τους αγωγούς πτώσης και άντλησης που δίνουν γραμμικές απώλειες ροής κάτω από μία μέγιστη επιτρεπτή τιμή. Ένας εμπειρικός κανόνας είναι η μέγιστη τιμή για τις απώλειες ροής να μην υπερβαίνει το 5% του φυσικού μανομετρικού. Εναλλακτικά, οι διάμετροι των αγωγών επιλέγονται, ώστε η μέγιστη ταχύτητα ροής εντός των αγωγών να διατηρηθεί σε τιμές κάτω των 2m/s.

Το αποτέλεσμα του ανωτέρω υπολογισμού είναι ένας πίνακας της μορφής του πίνακα 3.5. Με δεδομένο το ότι η μέγιστες απώλειες ροής επιλέγονται να διατηρηθούν κάτω των 20m, θα πρέπει να επιλεγεί διάμετρος ίση με 2m για τον αγωγό πτώσης και ίση με 2,40m για τον αγωγό άντλησης.

Πίνακας 3.5: Επιλογή διαμέτρου αγωγών σε αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό.

Διάμετρος σωληνώσεων (m)	Απώλειες πτώσης (m)	Απώλειες άντλησης (m)
1,40	114,50	195,03
1,60	58,73	100,03
1,80	32,59	55,51
2,00	19,24	32,78
2,20	11,95	20,35
2,40	7,73	13,17
2,60	5,18	8,83
2,80	3,58	6,09
3,00	2,53	4,32

Τα αποτελέσματα του πίνακα 3.5 παρουσιάζονται γραφικά στο σχήμα 3.14.



Σχήμα 3.14: Διακύμανση γραμμικών απωλειών ροής στους αγωγούς αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού συναρτήσεως της διαμέτρου.

6. Έχοντας υπολογίσει πλέον τη διάμετρο των αγωγών, είναι δυνατός ο υπολογισμός των απωλειών ροής για κάθε διακινούμενη παροχή, ουσιαστικά δηλαδή, για κάθε τιμή της παραγωγής ισχύος από τους υδροστρόβιλους και της ισχύος άντλησης από τις αντλίες. Ο αλγόριθμος υπολογισμού λοιπόν εκτελείται ξανά:
 - 6.1. Από τις τιμές των παροχών που έχουν ήδη υπολογιστεί από την πρώτη προσέγγιση υπολογίζονται οι απώλειες ροής, με βάση τις σχέσεις 3.18 – 3.20.
 - 6.2. Υπολογίζονται τα ολικά μανομετρικά πτώσης και άντλησης από τις σχέσεις 3.15 και 3.16.
 - 6.3. Εκτελείται ο αλγόριθμος προσομοίωσης της ετήσιας λειτουργίας του υβριδικού σταθμού και υπολογίζονται ξανά οι τιμές για την ισχύ λειτουργίας υδροστροβίλων και αντλιών.
 - 6.4. Από τις σχέσεις 3.22 υπολογίζονται και πάλι οι παροχές πτώσης και άντλησης. Στην περίπτωση που διαφέρουν από τις αρχικά υπολογισμένες, εκτελούνται και πάλι τα βήμα 6.1 – 6.4.
 - 6.5. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να προκύψει σύγκλιση των υπολογιζόμενων τιμών για τις παροχές. Σε αυτή την περίπτωση, οι χρονοσειρές ισχύος υδροστροβίλων και αντλιών, απευθείας διείσδυσης ισχύος αιολικού πάρκου, αποθήκευσης και αφαίρεσης όγκου νερού από την άνω δεξαμενή αποτελούν τα οριστικά αποτελέσματα της διαδικασίας διαστασιολόγησης.
7. Η ανωτέρω διαδικασία υλοποιείται επαναληπτικά για διαφορετικές τιμές της ονομαστικής ισχύος του αιολικού πάρκου. Επιλέγεται τελικά η διαστασιολόγηση που ικανοποιεί τα κριτήρια βελτιστοποίησης. Τούτα μπορεί να είναι καθαρά ενεργειακά, όπως η μεγιστοποίηση της διείσδυσης ισχύος από το αιολικό πάρκο, ή οικονομικά, όπως η βελτιστοποίηση επενδυτικών δεικτών.

Για παράδειγμα, ένα ενεργειακό κριτήριο βελτιστοποίησης διαστασιολόγησης του υβριδικού σταθμού θα μπορούσε να είναι η μεγιστοποίηση της διείσδυσης Α.Π.Ε., χωρίς όμως την αύξηση της ετήσιας περίσσειας ενέργειας E_{rej} . Όσο αυξάνει η ονομαστική ισχύς του αιολικού πάρκου, είναι προφανές ότι η ετήσια διείσδυση ενέργειας Α.Π.Ε. $E_{RES\delta} + E_{st}$ αυξάνει. Την ίδια στιγμή όμως αυξάνει και η περίσσεια ενέργειας από το αιολικό πάρκο E_{rej} . Ως ενεργειακός στόχος βελτιστοποίησης είναι η αύξηση της ετήσιας διείσδυσης Α.Π.Ε. $E_{RES\delta} + E_{st}$ σε ποσοστό άνω του 90%, με ταυτόχρονη

διατήρηση της ετήσιας περίσσειας ενέργειας Α.Π.Ε. E_{rej} σε ποσοστό κάτω του 10%. Θα πρέπει να τονιστεί ότι η επίτευξη του ανωτέρω στόχου δεν είναι πάντα εφικτή, καθώς εξαρτάται από δύο βασικούς παράγοντες:

- το διαθέσιμο αιολικό δυναμικό
- τη δυνατότητα κατασκευής αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού με μεγάλη χωρητικότητα αποθήκευσης.

Τονίζεται ότι ο αλγόριθμος λειτουργίας και διαστασιολόγησης υβριδικών σταθμών με αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό ως μονάδα αποθήκευσης που παρουσιάστηκε ανωτέρω είναι κοινός για όλα τα μεγέθη υβριδικών σταθμών. Εφαρμόζεται, δηλαδή, χωρίς διαφορές επί της διαδικασίας υπολογισμού ανεξάρτητα του μεγέθους του υβριδικού σταθμού.

3.5.1.β. Σταθμός συμπιεσμένου αέρα ως μονάδα αποθήκευσης

Αντίστοιχα με την ανωτέρω ενότητα, ο υπολογισμός ενός υβριδικού σταθμού με μονάδα αποθήκευσης σταθμό συμπιεσμένου αέρα γίνεται με τη μέθοδο των ετήσιων χρονοσειρών. Το χρονικό βήμα υπολογισμού συνήθως λαμβάνεται ωριαίο. Ο αλγόριθμος λειτουργίας ενός υβριδικού σταθμού με σκοπό τη μεγιστοποίηση της παραγωγής σε όλο το 24ωρο, στην περίπτωση που χρησιμοποιείται ως μονάδα αποθήκευσης συμβατικός σταθμός συμπιεσμένου αέρα, αναλύεται στα ακόλουθα βήματα:

1. Σε κάθε χρονικό βήμα υπολογισμού εισάγονται ως δεδομένα η διαθέσιμη ισχύς P_{RES} από τη μονάδα Α.Π.Ε. του υβριδικού σταθμού (συνήθως αιολικό πάρκο) και η ζήτηση ισχύος P_d . Επίσης εισάγεται ένα ποσοστό δ_{max} μέγιστης στιγμιαίας διείσδυσης της μονάδας Α.Π.Ε.
2. Αν P_{RES} η διαθέσιμη ισχύς από τη μονάδα Α.Π.Ε. και P_d η ζήτηση ισχύος, τότε η απευθείας διείσδυση ισχύος Α.Π.Ε. $P_{RES\delta}$ ισούται με:
 - i. Αν $P_{RES} \geq \delta_{max} \cdot P_d$, τότε $P_{RES\delta} = \delta_{max} \cdot P_d$.
 - ii. Αν $P_{RES} < \delta_{max} \cdot P_d$, τότε $P_{RES\delta} = P_{RES}$.
3. Αν P_{comp} είναι η συνολική ονομαστική ισχύς των συμπιεστών του σταθμού, τότε υπολογίζεται η δυνάμενη να αποθηκευτεί ισχύς P_{st} :
 - i. Αν $P_{RES} - P_{RES\delta} > P_{comp}$, τότε $P_{st} = P_{comp}$.
 - ii. Αν $P_{RES} - P_{RES\delta} \leq P_{comp}$, τότε $P_{st} = P_{RES} - P_{RES\delta}$.
4. Υπολογίζεται η μάζα αέρα m_{comp} που πρέπει να συμπιεστεί στη δεξαμενή αποθήκευσης αέρα, προκειμένου να αποθηκευτεί ισχύς P_{st} για χρονικό βήμα διάρκειας t ($\eta_{el,M}$ και $\eta_{m,M}$ ο ηλεκτρικός και μηχανικός βαθμός απόδοσης αντίστοιχα του κινητήρα του συμπιεστή, $\eta_{m,comp}$ ο μηχανικός βαθμός απόδοσης του συμπιεστή, Δh_{LPC} και Δh_{HPC} οι διαφορές ειδικής ενθαλπίας του αέρα κατά τη συμπίεσή του στις δύο βαθμίδες του συμπιεστή):

$$m_{comp} = \frac{P_{st} \cdot \eta_{el,M} \cdot \eta_{m,M} \cdot \eta_{m,comp} \cdot t}{\Delta h_{LPC} + \Delta h_{HPC}} \quad (3.23)$$

5. Υπολογίζεται η μάζα αέρα m_{turb} που θα πρέπει να αφαιρεθεί από τη δεξαμενή αποθήκευσης αέρα, προκειμένου να καλυφθεί η εναπομένουσα ζήτηση ισχύος $P_d - P_{RES\delta}$ από τους στρόβιλους για το χρονικό βήμα διάρκειας t ($\eta_{el,G}$ και $\eta_{m,G}$ ο ηλεκτρικός και μηχανικός βαθμός απόδοσης αντίστοιχα της γεννήτριας του στρόβιλου, $\eta_{m,turb}$ ο μηχανικός βαθμός απόδοσης του στρόβιλου, Δh_{LPT} και Δh_{HPT} οι διαφορές ειδικής ενθαλπίας του αέρα κατά την εκτόνωσή του στις δύο βαθμίδες του στρόβιλου):

$$m_{turb} = \frac{(P_d - P_{RES\delta}) \cdot t}{(\Delta h_{LPT} + \Delta h_{HPT}) \cdot \eta_{el,G} \cdot \eta_{m,G} \cdot \eta_{m,turb}} \quad (3.24)$$

6. Η παραμένουσα μάζα αέρα κατά το τρέχον χρονικό βήμα j στη δεξαμενή αποθήκευσης του αέρα θα είναι:

$$m_{st}(j) = m_{st}(j-1) + m_{comp} - m_{turb}.$$

7. Ελέγχεται αν η παραμένουσα μάζα αέρα στη δεξαμενή αποθήκευσης του αέρα υπερβαίνει τη μέγιστη χωρητικότητα της δεξαμενής:
- i. Αν $m_{st}(j) > m_{max}$, τότε:

$$P_{st} = 0$$

$$P_{rej} = P_{RES} - P_{RES\delta}$$

$$m_{st}(j) = m_{st}(j-1) - m_{turb}.$$
 - ii. Αν $m_{st}(j) \leq m_{max}$, τότε:

$$P_{st} = P_{comp} \text{ ή } P_{st} = P_{RES} - P_{RES\delta}$$

$$P_{rej} = P_{RES} - P_{RES\delta} - P_{st}.$$
8. Επιπλέον ελέγχεται αν η παραμένουσα μάζα αέρα στη δεξαμενή αποθήκευσης είναι μικρότερη από την ελάχιστη περιεχόμενη σε αυτήν:
- i. Αν $m_{st}(j) < m_{min}$, τότε:

$$P_{turb} = 0$$

$$P_{th} = P_d - P_{RES\delta}$$

$$m_{st}(j) = m_{st}(j-1) + m_{comp}.$$
 - ii. Αν $m_{st}(j) \geq m_{min}$, τότε:

$$P_{turb} = P_d - P_{RES\delta}$$

$$P_{th} = 0$$

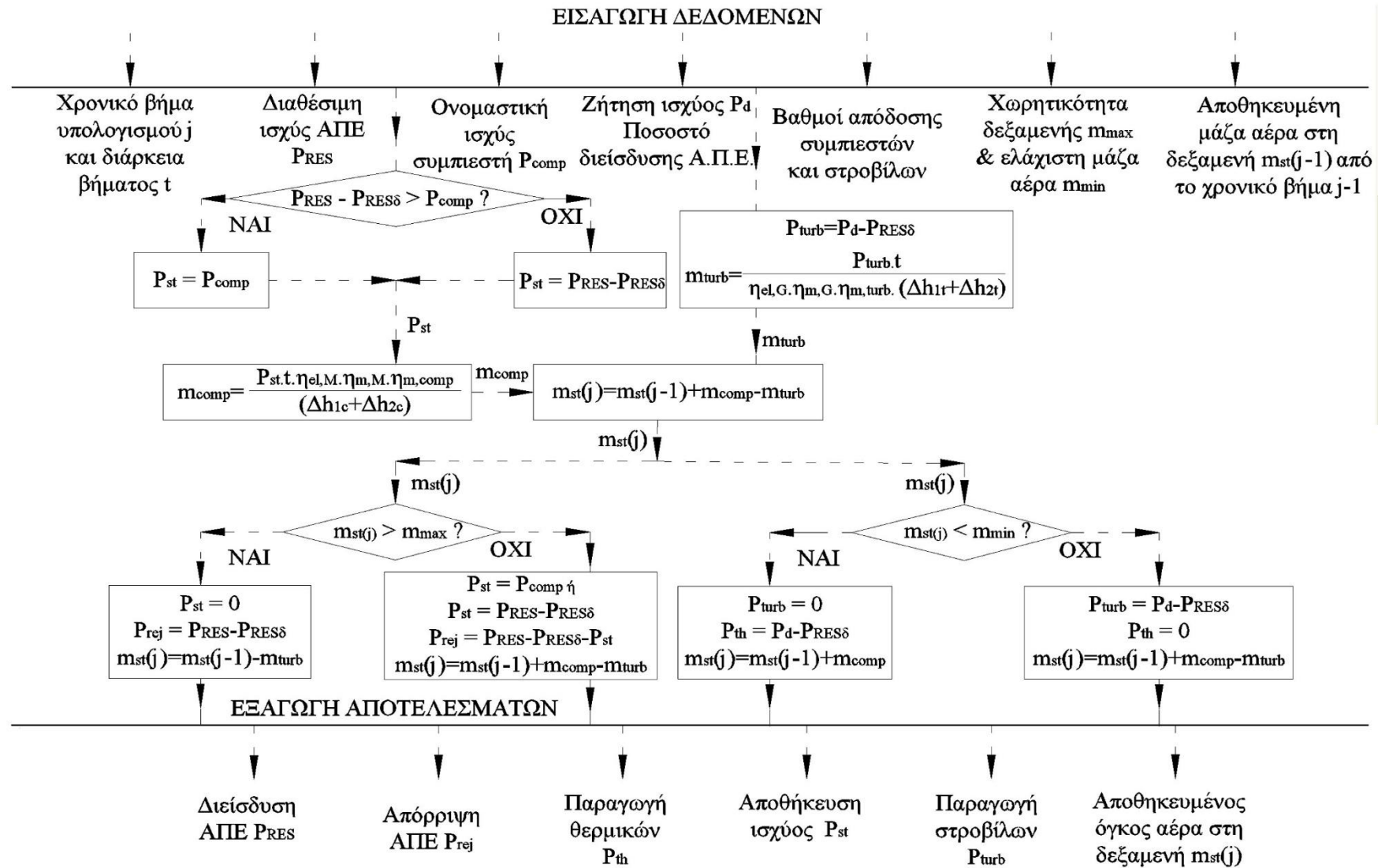
$$m_{st}(j) = m_{st}(j-1) + m_{comp} - m_{turb}.$$
9. Η πίεση $p_{tank}(j)$, που επικρατεί στη δεξαμενή αποθήκευσης του αέρα κατά το τρέχον χρονικό βήμα j , υπολογίζεται, τέλος, από τη σχέση:

$$\frac{p_{tank}(j)}{p_{tank}(j-1)} = \frac{m_{st}(j)}{m_{st}(j-1)} \quad (3.25)$$

Παρατηρείται ότι ο αλγόριθμος λειτουργίας του υβριδικού σταθμού με μονάδα αποθήκευσης συμβατικό σταθμό συμπιεσμένου αέρα δεν διαφέρει, όπως άλλωστε αναμενόταν, σε σχέση με τον αλγόριθμο λειτουργίας υβριδικού σταθμού με μονάδα αποθήκευσης αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό. Και στην περίπτωση της χρήσης συμβατικού CAES είναι δυνατή η ταυτόχρονη αποθήκευση και παραγωγή ενέργειας από τη μονάδα αποθήκευσης. Τούτο εξασφαλίζεται από την ίδια την κατασκευή του συμβατικού CAES. Σε ένα συμβατικό CAES η συμπίεση εκτελείται ανεξάρτητα από την εκτόνωση, επιτρέποντας την ταυτόχρονη αποθήκευση και παραγωγή ενέργειας.

Με την ανωτέρω διαδικασία, σε κάθε χρονικό βήμα υπολογίζονται οι τιμές για την απευθείας διείσδυση ισχύος του αιολικού πάρκου, για την παραγωγή ισχύος από το στρόβιλο και τις θερμοηλεκτρικές μονάδες εφεδρείας και για την αποθήκευση ισχύος στο συμπιεστή. Επίσης υπολογίζονται οι μάζες αέρα που αποθηκεύονται και αφαιρούνται από τη δεξαμενή αποθήκευσης αέρα και η τελική μάζα αέρα που τελικά παραμένει αποθηκευμένη σε αυτή μετά από κάθε χρονικό βήμα υπολογισμού. Με την ολοκλήρωση των ετήσιων αποτελεσμάτων είναι δυνατός στο τέλος ο υπολογισμός της ετήσιας παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας από τις συνιστώσες του υβριδικού σταθμού, η διακύμανση της στάθμης φόρτισης της μονάδας αποθήκευσης (πρακτικά η αποθηκευμένη μάζα αέρα στη δεξαμενή αποθήκευσης) και η σχεδίαση του ετήσιου διαγράμματος σύνθεσης παραγωγής ισχύος από τον υβριδικό σταθμό. Επίσης οι μέγιστες ετήσιες τιμές παραγωγής ισχύος από το στρόβιλο και τις θερμοηλεκτρικές μονάδες και αποθήκευσης ισχύος από το συμπιεστή θα αποτελέσουν τις ελάχιστες απαιτούμενες τιμές για την ονομαστική ισχύ των μονάδων αυτών.

Ο ανωτέρω περιγραφόμενος αλγόριθμος λειτουργίας παρουσιάζεται γραφικά στο σχήμα 3.15.



Σχήμα 3.15: Αλγόριθμος λειτουργίας υβριδικού σταθμού αιολικού πάρκου και σταθμού συμπιεσμένου αέρα για 100% κάλυψη ζήτησης ισχύος.

Στην ανωτέρω προσομοίωση απαιτείται ο υπολογισμός των ειδικών ενθαλιπών του αέρα μεταξύ των βαθμίδων συμπίεσης και εκτόνωσης. Στη συνέχεια ,περιγράφεται η διαδικασία υπολογισμού των διαφορών ειδικών ενθαλιπών αναλυτικά.

- Διαφορά ενθαλπίας στη βαθμίδα χαμηλής πίεσης του συμπιεστή Δh_{LPc} :

Αυτή η διαφορά ενθαλπίας ισούται με: $\Delta h_{LPc} = h_{LPc,out} - h_{LPc,in}$.

Η ενθαλπία $h_{LPc,in}$ είναι η ενθαλπία του εισερχόμενου αέρα περιβάλλοντος στο συμπιεστή. Συνεπώς μπορεί να εντοπιστεί στον ψυχομετρικό χάρτη, γνωρίζοντας τις συνθήκες περιβάλλοντος, π.χ θερμοκρασία ξηρού βολβού και σχετική υγρασία.

Η μεταβολή στη βαθμίδα χαμηλής πίεσης του συμπιεστή μπορεί να προσεγγιστεί με μία ισεντροπική μεταβολή (αναστρέψιμη αδιαβατική). Ο λόγος ή βαθμός συμπίεσης σε μία βαθμίδα συμπιεστή ορίζεται ως:

$$\varepsilon = \frac{V_{in}}{V_{out}} \quad (3.26)$$

όπου V_{in} και V_{out} ο όγκος της εισερχόμενης και εξερχόμενης αντίστοιχα μάζας αέρα στη βαθμίδα του συμπιεστή. Ο λόγος συμπίεσης της βαθμίδας του συμπιεστή είναι γνωστός, καθώς αποτελεί χαρακτηριστικό λειτουργίας του συμπιεστή. Σε αξονικούς συμπιεστές ο λόγος συμπίεσης είναι της τάξης του 20.

Επιπλέον, για ισεντροπική συμπίεση, ισχύει η σχέση:

$$\frac{T_{out}}{T_{in}} = \left(\frac{V_{in}}{V_{out}} \right)^{\gamma-1} \quad (3.27)$$

όπου γ ο λόγος των ειδικών θερμοτήτων αέρα υπό σταθερή πίεση και όγκο c_p και c_v αντίστοιχα:

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} \quad (3.28)$$

Ο λόγος γ εξαρτάται από τη θερμοκρασία του αέρα. Οι τιμές του λόγου γ για θερμοκρασίες από 250K έως 1.000K δίνονται στον πίνακα 3.6.

Προσεγγίζοντας τις ιδιότητες του αέρα με αυτές του τελείου αερίου, ο λόγος γ λαμβάνει τιμές από 1,400, για θερμοκρασίες γύρω στους 20 °C, έως 1,365, για θερμοκρασίες γύρω στους 450 °C. Από τον πίνακα 3.6 παρατηρείται ότι η μεταβολή του λόγου γ των ειδικών θερμοτήτων είναι σχετικά χαμηλή, ακόμα και για εντελώς διαφορετικές θερμοκρασίες αέρα.

Από τις σχέσεις 3.26 και 3.27, λαμβάνοντας το λόγο γ για τη θερμοκρασία εισόδου του αέρα στη χαμηλή βαθμίδα συμπίεσης (πρακτικά περίπου ίσος με 1,4), και έχοντας γνωστό το λόγο συμπίεσης στη βαθμίδα, είναι δυνατός ο υπολογισμός της θερμοκρασίας T_{out} στην έξοδο της βαθμίδας.

Η ενθαλπία $h_{LPc,out}$ του συμπιεσμένου αέρα στην έξοδο από τη βαθμίδα χαμηλής πίεσης του συμπιεστή υπολογίζεται τελικά από τη σχέση:

$$h_{LPc,out} = h_{air} + h_w = c_{pair} \cdot T_{out} + w \cdot (c_{pw} \cdot T_{out} + h_{we}) \quad (3.29)$$

όπου:

$h_{air} = c_{pair} \cdot T_{out}$: η ειδική ενθαλπία του ξηρού αέρα στην έξοδο από τη βαθμίδα χαμηλής πίεσης

$h_w = w \cdot (c_{pw} \cdot T_{out} + h_{we})$: η ειδική ενθαλπία των υδρατμών του αέρα στην έξοδο από τη βαθμίδα χαμηλής πίεσης

c_{pair} : η ειδική θερμότητα υπό σταθερή πίεση του αέρα στην έξοδο από τη βαθμίδα

χαμηλής πίεσης, η οποία δίνεται από τον πίνακα 3.6

w :	η ειδική υγρασία (σε kg υδρατμών ανά kg ξηρού αέρα), η οποία βρίσκεται από τον ψυχομετρικό χάρτη για την αρχική κατάσταση του αέρα (είσοδος στη βαθμίδα συμπίεσης)
c_{pw} :	η ειδική θερμότητα του νερού, που ισούται με 4,184kJ/(kg·K)
h_{we} :	η θερμότητα εξάτμισης του νερού στους 0 °C, η οποία ισούται με 2.501kJ/kg.
T_{out} :	η θερμοκρασία εξόδου του αέρα από τη βαθμίδα χαμηλής πίεσης του συμπιεστή σε βαθμούς K.

Με τις ενθαλπίες $h_{LPc_{out}}$ και $h_{LPc_{in}}$ γνωστές, είναι δυνατός ο υπολογισμός της διαφοράς τους Δh_{LPc} που περιγράφει τη συμπίεση του αέρα στη βαθμίδα χαμηλής πίεσης.

Θερμοκρασία		Ειδική θερμότητα υπό σταθερή πίεση c_p (kJ/kg·K)	Ειδική θερμότητα υπό σταθερό όγκο c_v (kJ/kg·K)	Λόγος ειδικών θερμότητα $\gamma = c_p/c_v$
(K)	(°C)			
250	-23	1,003	0,716	1,401
300	27	1,005	0,718	1,400
350	77	1,008	0,721	1,398
400	127	1,013	0,726	1,395
450	177	1,020	0,733	1,392
500	227	1,029	0,742	1,387
550	277	1,040	0,753	1,381
600	327	1,051	0,764	1,376
650	377	1,063	0,776	1,370
700	427	1,075	0,788	1,364
750	477	1,087	0,800	1,359
800	527	1,099	0,812	1,353
900	627	1,121	0,834	1,344
1.000	727	1,142	0,855	1,336

- Διαφορά ενθαλπίας στη βαθμίδα υψηλής πίεσης του συμπιεστή Δh_{HPc} :

Αυτή η διαφορά ενθαλπίας ισούται με: $\Delta h_{HPc} = h_{HPc_{out}} - h_{HPc_{in}}$.

Ανεξάρτητα από το αν ο σταθμός CAES είναι συμβατικός ή αδιαβατικός, ο αέρας μετά την έξοδό του από τη βαθμίδα χαμηλής πίεσης του συμπιεστή ψύχεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Συνεπώς στην είσοδο του αέρα στη βαθμίδα υψηλής πίεσης του συμπιεστή είναι γνωστή η θερμοκρασία του.

Ο υπολογισμός της ειδικής ενθαλπίας $h_{HPc_{in}}$ εισόδου του αέρα στη βαθμίδα υψηλής πίεσης του συμπιεστή είναι δυνατός με τη βοήθεια του ψυχομετρικού χάρτη.

Η ενθαλπία εξόδου του αέρα από τη βαθμίδα υψηλής πίεσης του συμπιεστή πρακτικά υπολογίζεται με τον ίδιο τρόπο όπως και ανωτέρω. Γνωρίζοντας το λόγο συμπίεσης της βαθμίδας υψηλής πίεσης του συμπιεστή, είναι δυνατός ο υπολογισμός της θερμοκρασίας εξόδου του αέρα από αυτόν, μέσω της σχέσης 3.27. Στη συνέχεια, η ειδική ενθαλπία για την κατάσταση εξόδου του αέρα από το συμπιεστή υπολογίζεται από τη σχέση 3.29, εισάγοντας στη θέση του μεγέθους T_{out} τη θερμοκρασία εξόδου του αέρα από τη βαθμίδα υψηλής πίεσης του συμπιεστή.

- Διαφορά ενθαλπίας στη βαθμίδα υψηλής πίεσης του στροβίλου Δh_{HPi} :

Αυτή η διαφορά ενθαλπίας ισούται με: $\Delta h_{HPi} = h_{HPi\text{in}} - h_{HPi\text{out}}$.

Ανεξάρτητα από το αν ο σταθμός CAES είναι συμβατικός ή αδιαβατικός, ο αέρας μετά την έξοδό του από τη δεξαμενή αποθήκευσης θερμαίνεται, είτε μέσω θαλάμου καύσης (συμβατικός σταθμός), είτε μέσω ανάκτησης θερμότητας από τη δεξαμενή θερμικής αποθήκευσης. Συνεπώς, και στις δύο εναλλακτικές εκδοχές CAES, θερμική ισχύς παρέχεται στον αέρα πριν εισέλθει στη βαθμίδα υψηλής πίεσης του στροβίλου, αυξάνοντας έτσι την ειδική ενθαλπία του.

Η θερμοκρασία εισόδου T_{in} του αέρα στη βαθμίδα υψηλής πίεσης του στροβίλου καθορίζεται με βάση τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του. Συνήθως είναι της τάξης των 1.000 – 1.200 °C. Συνεπώς, γνωρίζοντας τη θερμοκρασία εισόδου του αέρα, είναι δυνατός ο υπολογισμός της ειδικής ενθαλπίας του $h_{HPi\text{in}}$, με βάση τη σχέση 3.29.

Οι εκτόνωσεις στις βαθμίδες του στροβίλου θεωρούνται ως ισεντροπικές, για τις οποίες ισχύει η σχέση:

$$\frac{T_{in}}{T_{out}} = \left(\frac{V_{out}}{V_{in}} \right)^{\gamma-1} \quad (3.30)$$

Με γνωστό το λόγο εκτόνωσης στην κάθε βαθμίδα στροβίλου:

$$\varepsilon = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (3.31)$$

από τη σχέση 3.30 είναι δυνατός ο υπολογισμός της θερμοκρασίας εξόδου από τη βαθμίδα υψηλής πίεσης του στροβίλου. Στη συνέχεια, και πάλι με βάση τη σχέση 3.29, μπορεί να υπολογιστεί η ειδική ενθαλπία $h_{HPi\text{out}}$ του αέρα στην έξοδο από τη βαθμίδα υψηλής πίεσης του στροβίλου.

- Διαφορά ενθαλπίας στη βαθμίδα χαμηλής πίεσης του στροβίλου Δh_{LPi} :

Αυτή η διαφορά ενθαλπίας ισούται με: $\Delta h_{LPi} = h_{LPi\text{in}} - h_{LPi\text{out}}$.

Η διαδικασία υπολογισμού των ειδικών ενθαλπιών του αέρα στην είσοδο και στην έξοδο του από τη βαθμίδα χαμηλής πίεσης του στροβίλου είναι η ίδια ακριβώς με αυτή που περιγράφηκε για τη βαθμίδα υψηλής πίεσης. Η θερμοκρασία εισόδου του αέρα στη βαθμίδα χαμηλής πίεσης θα οδηγήσει στον υπολογισμό της ειδικής ενθαλπίας του μέσω της σχέσης 3.29. Η θερμοκρασία αυτή, μετά την αναθέρμανση του αέρα κατά την έξοδό του από τη βαθμίδα υψηλής πίεσης του συμπιεστή, είναι της τάξης των 800 – 1.000°C. Έπειτα, με γνωστό το λόγο εκτόνωσης στη βαθμίδα, υπολογίζεται η θερμοκρασία εξόδου του αέρα από αυτή με τη σχέση 3.30. Τέλος, και πάλι με χρήση της σχέσης 3.29, υπολογίζεται η ειδική ενθαλπία του αέρα στην έξοδο του από τη βαθμίδα χαμηλής πίεσης.

Με τον υπολογισμό των ειδικών ενθαλπιών είναι πλέον δυνατή η υπολογιστική εκτέλεση του αλγορίθμου λειτουργίας του υβριδικού σταθμού, όπως έχει περιγραφεί ανωτέρω.

Διαιρώντας και τα δύο μέλη της σχέσης 3.24 με το χρονικό βήμα υπολογισμού t , υπολογίζεται η απαιτούμενη παροχή μάζας αέρα στο στροβίλο \dot{m}_{air} για κάθε χρονικό βήμα. Με τη γνώση της παροχής μάζας στο στροβίλο είναι πλέον δυνατός ο υπολογισμός της απαιτούμενης θερμικής ισχύος για την αναθέρμανση του αέρα πριν την είσοδό του στις βαθμίδες του στροβίλου.

Αναλυτικά, ξεκινώντας με τη βαθμίδα υψηλής πίεσης του στροβίλου, αν μέσω της εξωτερικής πηγής θέρμανσης προσφέρεται θερμική ισχύς \dot{Q}_{HP} σε παροχή αέρα \dot{m}_{air} πριν την είσοδό της στη βαθμίδα, τότε η ισχύς αυτή θα ισούται με:

$$\dot{Q}_{HP} = \dot{m}_{turb} \cdot (h_{HPin} - h_{st}) \quad (3.32)$$

όπου h_{st} είναι η ειδική ενθαλπία του αέρα σε κατάσταση αποθήκευσης. Πρακτικά ισούται με την ειδική ενθαλπία του αέρα σε κατάσταση περιβάλλοντος, η οποία εντοπίζεται από τον ψυχομετρικό χάρτη. Ο υπολογισμός της ειδικής ενθαλπίας h_{HPin} του αέρα κατά την είσοδό του στη βαθμίδα υψηλής πίεσης του στροβίλου έχει περιγραφεί παραπάνω.

Αναφορικά με τη βαθμίδα χαμηλής πίεσης του στροβίλου, η προσφερόμενη θερμική ισχύς σε παροχή μάζας αέρα \dot{m}_{turb} πριν την είσοδό της σε αυτήν ισούται με:

$$\dot{Q}_{LP} = \dot{m}_{turb} \cdot (h_{LPin} - h_{HPout}). \quad (3.33)$$

Ο υπολογισμός των ενθαλπιών εισόδου του αέρα στη βαθμίδα χαμηλής πίεσης και εξόδου του από τη βαθμίδα υψηλής πίεσης του στροβίλου h_{LPin} και h_{HPout} αντίστοιχα έχει περιγραφεί αναλυτικά παραπάνω.

Υπολογίζοντας τις προσφερόμενες εξωτερικές θερμικές ισχύεις \dot{Q}_{HP} και \dot{Q}_{LP} στον αέρα πριν την είσοδό του στις βαθμίδες του στροβίλου και ολοκληρώνοντας για το ετήσιο χρονικό διάστημα προσομοίωσης, υπολογίζεται τελικά η συνολική τελική θερμική ενέργεια που προσφέρθηκε στον αέρα για την αναθέρμανσή του. Στην περίπτωση συμβατικού CAES, ο υπολογισμός της ετήσιας κατανάλωσης μάζας m_f ή όγκο V_f καυσίμου για την αναθέρμανση το αέρα ισούται με:

$$m_f \text{ (ή } V_f) = \frac{\sum (\dot{Q}_{HP} + \dot{Q}_{LP}) \cdot t}{H_u \cdot \eta_c \cdot \eta_{ex}}. \quad (3.34)$$

όπου:

H_u : η θερμογόνο ικανότητα του καυσίμου σε kWh/kg ή kWh/l

η_c : ο βαθμός απόδοσης καύσης

η_{ex} : ο βαθμός απόδοσης μεταφοράς θερμότητας από το θάλαμο καύσης προς τον αέρα.

Ο υπολογισμός των απωλειών ροής για τη μεταφορά του αέρα από το συμπιεστή προς τη δεξαμενή αποθήκευσης και από τη δεξαμενή αποθήκευσης προς το στρόβιλο δεν είναι ιδιαίτερα κρίσιμος, όπως στην περίπτωση του αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού. Τούτο οφείλεται, αφενός, στην πυκνότητα του αέρα, η οποία είναι πολύ χαμηλότερη από αυτή του νερού, και, αφετέρου, στα μικρά μήκη των σωληνώσεων μεταφοράς. Και οι δύο ανωτέρω παράμετροι συνεπάγονται σημαντική μείωση των απωλειών μεταφοράς.

Στη γενική περίπτωση, κατά την οποία είναι επιθυμητός ο υπολογισμός των απωλειών ροής του αέρα στους αγωγούς μεταφοράς, για τον υπολογισμό του συστήματος θα πρέπει και πάλι να υλοποιηθεί μία επαναληπτική διαδικασία. Τα βήματά της έχουν ως εξής:

1. Αρχικά εκτελείται ο ανωτέρω περιγραφόμενος αλγόριθμος προσομοίωσης. Μεταξύ των αποτελεσμάτων προκύπτουν οι ετήσιες χρονοσειρές παροχής μάζας του αέρα από το συμπιεστή προς τη δεξαμενή αποθήκευσης και από τη δεξαμενή αποθήκευσης προς το στρόβιλο. Από τις χρονοσειρές παροχής μάζας υπολογίζονται οι μέγιστες ετήσιες τιμές. Για τη θερμοκρασία του αέρα περιβάλλοντος, καθώς με αυτή τη θερμοκρασία διακινείται ο αέρας μεταξύ συμπιεστή, στροβίλου και δεξαμενής αποθήκευσης, υπολογίζονται οι μέγιστες παροχές όγκου αέρα.
2. Υπολογίζονται οι συνολικές απώλειες (γραμμικές και εντοπισμένες) για τις σωληνώσεις προσαγωγής και απαγωγής του αέρα προς και από τη δεξαμενή αποθήκευσης, με βάση τις σχέσεις 3.17 – 3.20. Υπολογίζεται η συνολική πτώση πίεσης ξεχωριστά για το τμήμα προσαγωγής και το τμήμα απαγωγής από τις σχέσεις:

$$\Delta p_{\text{comp}} = \sum \Delta h_{\text{comp}} \cdot \gamma_{\text{air}} \quad (3.35)$$

$$\Delta p_{\text{turb}} = \sum \Delta h_{\text{turb}} \cdot \gamma_{\text{air}} \quad (3.36)$$

όπου:

$\sum \Delta h_{\text{comp}}$: οι συνολικές απώλειες ροής στο τμήμα προσαγωγής αέρα προς τη δεξαμενή αποθήκευσης σε mΣΥ

$\sum \Delta h_{\text{turb}}$: οι συνολικές απώλειες ροής στο τμήμα απαγωγής αέρα από τη δεξαμενή αποθήκευσης σε mΣΥ

$\gamma_{\text{air}} = \rho_{\text{air}} \cdot g$: το ειδικό βάρος του αέρα στη θερμοκρασία περιβάλλοντος

Δp_{comp} : η συνολική πτώση πίεσης στο τμήμα προσαγωγής αέρα προς τη δεξαμενή αποθήκευσης

Δp_{turb} : η συνολική πτώση πίεσης στο τμήμα απαγωγής αέρα από τη δεξαμενή αποθήκευσης.

Επιλέγονται τελικά οι διάμετροι για τις σωληνώσεις μεταφοράς αέρα που εξασφαλίζουν πτώση πίεσης Δp χαμηλότερη από ένα μέγιστο επιτρεπτό όριο (π.χ. 5%) ή, εναλλακτικά, για τις οποίες η ταχύτητα ροής του αέρα δεν υπερβαίνει τα 2m/s.

3. Υπολογίζονται, τέλος, οι βαθμοί απόδοσης μεταφοράς του αέρα προς και από τη δεξαμενή αποθήκευσης, ως ποσοστά ως προς την αρχική διαθέσιμη πίεση στην εκκίνηση της εκάστοτε σωληνώσεως:

$$\eta_{\text{tr,comp}} = \frac{p_{\text{HP,comp}} - \Delta p_{\text{comp}}}{p_{\text{HP,comp}}} \quad (3.37)$$

$$\eta_{\text{tr,turb}} = \frac{p_{\text{tank}} - \Delta p_{\text{turb}}}{p_{\text{tank}}} \quad (3.38)$$

όπου:

$\eta_{\text{tr,comp}}$: ο βαθμός απόδοσης μεταφοράς αέρα από το συμπιεστή προς τη δεξαμενή αποθήκευσης

$\eta_{\text{tr,turb}}$: ο βαθμός απόδοσης μεταφοράς αέρα από τη δεξαμενή αποθήκευσης προς το στρόβιλο

$p_{\text{HP,comp}}$: η πίεση εξόδου του αέρα από τη βαθμίδα υψηλής πίεσης του συμπιεστή

p_{tank} : η πίεση εξόδου του αέρα από τη δεξαμενή αποθήκευσης το τρέχον χρονικό βήμα.

Η πίεση $p_{\text{HP,comp}}$ εξόδου του αέρα από τη βαθμίδα υψηλής πίεσης του συμπιεστή είναι γνωστή με βάση το λόγο συμπίεσης με τον οποίο λειτουργεί ο συμπιεστής. Η πίεση $p_{\text{tank}(j)}$ που επικρατεί στη δεξαμενή αποθήκευσης του αέρα κατά το τρέχον χρονικό βήμα j έχει υπολογιστεί κατά την ετήσια προσομοίωση της λειτουργίας του σταθμού αποθήκευσης.

4. Υπολογίζονται και πάλι:

- i. η μάζα αέρα m_{comp} που πρέπει να συμπιεστεί στη δεξαμενή αποθήκευσης αέρα, προκειμένου να αποθηκευτεί ισχύς P_{st} για χρονικό βήμα διάρκειας t , εισάγοντας όμως τώρα και το βαθμό απόδοσης μεταφοράς αέρα από το συμπιεστή προς τη δεξαμενή $\eta_{\text{tr,comp}}$:

$$m_{\text{comp}} = \frac{P_{\text{st}} \cdot \eta_{\text{el,M}} \cdot \eta_{\text{m,M}} \cdot \eta_{\text{m,comp}} \cdot \eta_{\text{tr,comp}} \cdot t}{\Delta h_{\text{LPc}} + \Delta h_{\text{HPc}}} \quad (3.39)$$

- ii. η μάζα αέρα m_{turb} που θα πρέπει να αφαιρεθεί από τη δεξαμενή αποθήκευσης αέρα, προκειμένου να καλυφθεί η εναπομένουσα ζήτηση ισχύος $P_d - P_{\text{RES}}$ από τους στρόβιλους για το χρονικό βήμα διάρκειας t , εισάγοντας όμως τώρα και το βαθμό απόδοσης μεταφοράς αέρα από τη δεξαμενή προς το στρόβιλο $\eta_{\text{tr,turb}}$:

$$m_{\text{turb}} = \frac{(P_d - P_{\text{RES}}) \cdot t}{(\Delta h_{\text{LPt}} + \Delta h_{\text{HPt}}) \cdot \eta_{\text{el,G}} \cdot \eta_{\text{m,G}} \cdot \eta_{\text{m,turb}} \cdot \eta_{\text{tr,turb}}} \quad (3.40)$$

5. Εκτελούνται και πάλι τα βήματα 6 – 9 του ανωτέρω περιγραφόμενου αλγόριθμου διαστασιολόγησης, τα οποία οδηγούν σε νέο υπολογισμό για την παραγωγή ισχύος από το στρόβιλο, την ισχύ λειτουργίας του συμπιεστή, την παροχή μάζας αέρα προς και από τη δεξαμενή και την πίεση του αέρα στη δεξαμενή αποθήκευσης. Συγκρίνονται τα νέα αποτελέσματα με τα αρχικά. Στην περίπτωση που σημειώνεται σημαντική απόκλιση μεταξύ των δύο ομάδων αποτελεσμάτων, τότε επαναλαμβάνονται τα τρέχοντα βήματα 2 – 5 της επαναληπτικής διαδικασίας.

Όπως και στην περίπτωση υβριδικών σταθμών με τεχνολογία αποθήκευσης αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό, ο ανωτέρω αλγόριθμος που παρουσιάστηκε για υβριδικούς σταθμούς με σταθμό συμπιεσμένου αέρα εκτελείται επαναληπτικά για διαφορετική ονομαστική ισχύ της μονάδας Α.Π.Ε., με σκοπό να επιλεγεί εκείνη η διαστασιολόγηση, η οποία οδηγεί σε ικανοποίηση των κριτηρίων βελτιστοποίησης. Όπως αναλύθηκε ανωτέρω, τα κριτήρια αυτά μπορεί να είναι:

- ενεργειακά, όπως η μεγιστοποίηση της ετήσιας διείσδυσης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τον υβριδικό σταθμό, χωρίς όμως σημαντική αύξηση της ετήσιας περίσσειας ενέργειας από τη μονάδα Α.Π.Ε.,
- οικονομικά – επενδυτικά, όπως η ελαχιστοποίηση του κόστους κύκλου ζωής του σταθμού ή η βελτιστοποίηση των επενδυτικών δεικτών του σταθμού.

Τονίζεται ότι ο αλγόριθμος λειτουργίας και διαστασιολόγησης υβριδικών σταθμών με σταθμό συμπιεσμένου αέρα ως μονάδα αποθήκευσης που παρουσιάστηκε ανωτέρω είναι κοινός για όλα τα μεγέθη υβριδικών σταθμών. Εφαρμόζεται δηλαδή χωρίς διαφορές επί της διαδικασίας υπολογισμού ανεξάρτητα του μεγέθους του υβριδικού σταθμού.

Με την ολοκλήρωση της περιγραφής της μεθοδολογίας διαστασιολόγησης υβριδικών σταθμών με σταθμούς συμπιεσμένου αέρα ως μονάδα αποθήκευσης, γίνεται αντιληπτό ότι τούτη δε διαφέρει ως προς τη βασική δομή της αντίστοιχης μεθοδολογίας που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα, για υβριδικούς σταθμούς με αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό ως μονάδα αποθήκευσης. Οι όποιες διαφορές εντοπίζονται ανάμεσα στις δύο μεθοδολογίες δεν αφορούν τη βασική δομή, αλλά τις επιμέρους σχέσεις υπολογισμού των μεγεθών που εμπλέκονται στον υπολογισμό της αποθηκευμένης ενέργειας. Τούτο οφείλεται ότι στη μία περίπτωση η ενέργεια αποθηκεύεται με τη μορφή βαρυτικής ενέργειας νερού, ενώ στην άλλη περίπτωση η ενέργεια αποθηκεύεται με τη μορφή ελαστικής ενέργειας αέρα. Επίσης γίνεται αντιληπτό ότι η θεωρία στην οποία αναπτύσσονται οι ανωτέρω μεθοδολογίες στηρίζεται σε βασικές σχέσεις των στροβιλομηχανών, υδροδυναμικών μηχανών, συμπιεστών και αεριοστροβίλων.

3.5.2. Υβριδικοί σταθμοί για απαλοιφή αιχμών ισχύος

Σε μεγάλα Σ.Η.Ε., ένας υβριδικός σταθμός συνήθως δεν είναι δυνατόν να λειτουργήσει με σκοπό την 100% κάλυψη της ζήτησης ισχύος, καθώς κάτι τέτοιο θα απαιτούσε πολύ υψηλή ονομαστική ισχύ και αντίστοιχα μεγάλες εγκαταστάσεις, οι οποίες είτε δεν είναι δυνατόν να κατασκευαστούν είτε απαιτούν ιδιαίτερες τεχνικές και μέσα εγκατάστασης, που αυξάνουν πολύ το κόστος κατασκευής. Σε αυτές τις περιπτώσεις οι υβριδικοί σταθμοί εισάγονται σε μεγέθη εύλογα και, συνήθως, μικρότερα από την αιχμή ζήτησης ισχύος για το εκάστοτε Σ.Η.Ε., με σκοπό την περιορισμένη χρονικά λειτουργία τους κατά τα ημερήσια χρονικά διαστήματα εμφάνισης αιχμών ζήτησης ισχύος [38, 39].

Η μεθοδολογία διαστασιολόγησης των υβριδικών σταθμών στην περίπτωση αυτή σαφώς είναι διαφορετική σε σχέση με την περίπτωση της 100% κάλυψης της ζήτησης ισχύος, αφού αλλάζει ο αλγόριθμος

λειτουργίας τους. Στη γενική περίπτωση, ο αλγόριθμος λειτουργίας υβριδικού σταθμού με στόχο την απαλοιφή αιχμών ισχύος, ανεξάρτητα από την τεχνολογία αποθήκευσης, αναλύεται στα βασικά βήματα που περιγράφονται στη συνέχεια. Ο βασικός έλεγχος, ο οποίος προηγείται και καθορίζει τη λειτουργία του υβριδικού σταθμού, είναι το αν η τρέχουσα χρονική στιγμή βρίσκεται εντός ή εκτός των ωρών παραγωγής εγγυημένης ισχύος. Διακρίνονται οι εξής περιπτώσεις:

A. Ώρες παραγωγής εγγυημένης ισχύος (ώρες αιχμής ζήτησης ισχύος):

1. Κατά τις ώρες αιχμής ζήτησης ισχύος, ο υβριδικός σταθμός θα πρέπει να έχει ικανά αποθηκευμένα αποθέματα ενέργειας, ώστε να καλύψει την απαίτηση για παραγωγή εγγυημένης ισχύος και την αντίστοιχη απαλοιφή αιχμών ισχύος. Ήδη από την προηγούμενη ημέρα έχουν ελεγχθεί τα διαθέσιμα αποθέματα ενέργειας. Βάσει αυτών, έχει καθοριστεί η εγγυημένη ισχύς και το χρονικό διάστημα για το οποίο τούτη θα παραχθεί από τον υβριδικό σταθμό στο τρέχον εικοσιτετράωρο.
2. Εισάγονται ως δεδομένα η διαθέσιμη ισχύς P_{RES} από τη μονάδα Α.Π.Ε. του υβριδικού σταθμού (συνήθως αιολικό πάρκο) και η παραγωγή εγγυημένης ισχύος P_g . Επίσης εισάγεται ένα ποσοστό δ_{max} μέγιστης στιγμιαίας διείσδυσης της μονάδας Α.Π.Ε. στην παραγωγή εγγυημένης ισχύος.
3. Αν P_{RES} η διαθέσιμη ισχύς από τη μονάδα Α.Π.Ε. και P_g η παραγωγή εγγυημένης ισχύος που πρέπει να δώσει ο υβριδικός σταθμός στο Σ.Η.Ε., τότε η απευθείας διείσδυση ισχύος Α.Π.Ε. $P_{RES\delta}$ ισούται με:
 - i. Αν $P_{RES} \geq \delta_{max} \cdot P_g$, τότε $P_{RES\delta} = \delta_{max} \cdot P_g$.
 - ii. Αν $P_{RES} < \delta_{max} \cdot P_g$, τότε $P_{RES\delta} = P_{RES}$.
4. Η παραγωγή ισχύος από τις ελεγχόμενες μονάδες του υβριδικού σταθμού (υδροστρόβιλοι ή αεριοστρόβιλοι) θα είναι:

$$P_h \text{ ή } P_{turb} = P_g - P_{RES\delta}$$
5. Υπολογίζεται ο όγκος του νερού V_T που αφαιρείται από την άνω δεξαμενή, στην περίπτωση αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού, ή η μάζα αέρα m_{turb} που αφαιρείται από τη δεξαμενή αποθήκευσης, στην περίπτωση σταθμού συμπιεσμένου αέρα, σύμφωνα με τις σχέσεις 3.14 και 3.40 αντίστοιχα.

B. Οποιαδήποτε ώρα του εικοσιτετράωρου:

6. Η περίσσεια ισχύος Α.Π.Ε., η οποία είναι διαθέσιμη προς αποθήκευση, ισούται με:

$$P_{rej} = P_{RES} - P_{RES\delta}$$
7. Αν η μονάδα αποθήκευσης του υβριδικού σταθμού δεν είναι πλήρως φορτισμένη, τότε ελέγχεται η περίσσεια ισχύος από τη μονάδα Α.Π.Ε. Αν P_n είναι η ονομαστική ισχύς των μονάδων αποθήκευσης ισχύος (αντλιών ή συμπιεστών), διακρίνονται οι εξής επιμέρους περιπτώσεις:
 - i. Αν $P_{RES} - P_{RES\delta} > P_n$, τότε $P_{st} = P_n$.
 - ii. Αν $P_{RES} - P_{RES\delta} \leq P_n$, τότε $P_{st} = P_{RES} - P_{RES\delta}$.
8. Υπολογίζεται ο όγκος νερού ή η μάζα αέρα που αποθηκεύεται στην άνω δεξαμενή του αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού ή στη δεξαμενή αποθήκευσης του σταθμού συμπιεσμένου αέρα αντίστοιχα, με τις σχέσεις 3.13 και 3.39.
9. Ο παραμένον όγκος νερού ή η παραμένουσα μάζα αέρα κατά το τρέχον χρονικό βήμα j στην άνω δεξαμενή του αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού ή στη δεξαμενή συμπιεσμένου αέρα θα είναι:

$$V_{st}(j) = V_{st}(j-1) + V_p - V_h$$

$$m_{st}(j) = m_{st}(j-1) + m_{comp} - m_{turb}$$
10. Ελέγχεται, αν ο παραμένον όγκος νερού ή η παραμένουσα μάζα αέρα στις δεξαμενές αποθήκευσης υπερβαίνει τις αντίστοιχες μέγιστες χωρητικότητες:
 - i. Αν $V_{st}(j) > V_{max}$ (ή αν $m_{st}(j) > m_{max}$) τότε:

$$P_{st} = 0$$

$$P_{rej} = P_{RES} - P_{RES\delta}$$

$$V_{st}(j) = V_{st}(j-1) - V_h \text{ (ή } m_{st}(j) = m_{st}(j-1) - m_{turb}).$$

ii. Αν $V_{st}(j) \leq V_{max}$ (ή αν $m_{st}(j) \leq m_{max}$) τότε:

$$P_{st} = P_n \text{ ή } P_{st} = P_{RES} - P_{RES\delta}$$

$$P_{rej} = P_{RES} - P_{RES\delta} - P_{st}$$

Και σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει να εφαρμοστεί επαναληπτικά η διαδικασία υπολογισμού των απωλειών ροής συναρτήσει της διαμέτρου των σωληνώσεων μεταφοράς νερού ή αέρα.

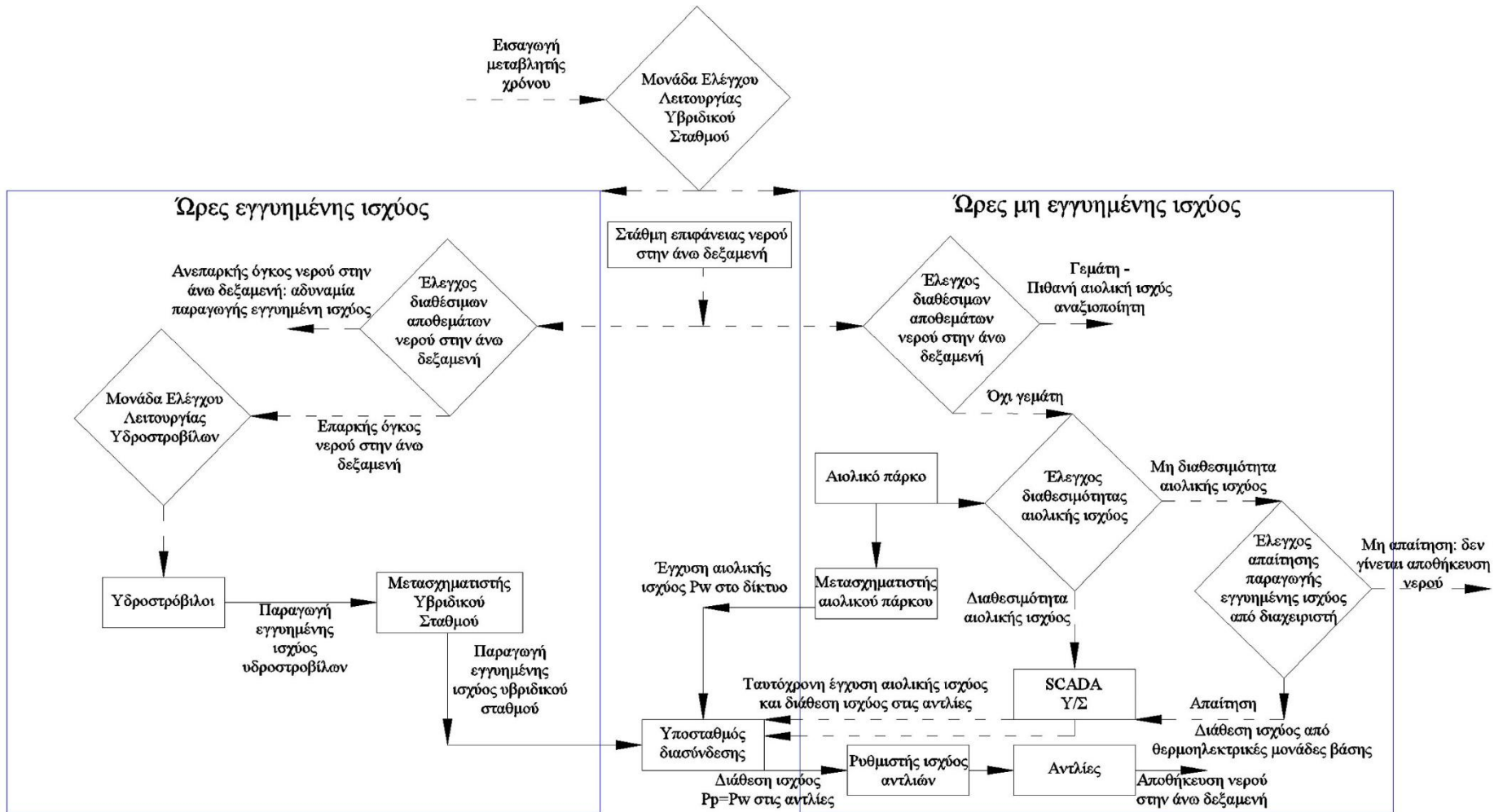
Από τον ανωτέρω αλγόριθμο λειτουργίας συνάγεται ότι είναι επιθυμητή η δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας καθ' όλη τη διάρκεια του εικοσιτετράωρου, δηλαδή ακόμα και κατά τη διάρκεια παραγωγής εγγυημένης ισχύος από τον υβριδικό σταθμό. Τούτο συνεπάγεται ότι θα πρέπει να παρέχεται η δυνατότητα ταυτόχρονης παραγωγής και αποθήκευσης ισχύος από τον υβριδικό σταθμό. Η δυνατότητα αυτή είναι δεδομένη για τους σταθμούς συμπιεσμένου αέρα, ενώ για τα αναστρέψιμα υδροηλεκτρικά εξασφαλίζεται με την εγκατάσταση διπλής σωλήνωσης.

Τονίζεται ότι η δυνατότητα ταυτόχρονης αποθήκευσης και παραγωγής ισχύος από τον υβριδικό σταθμό σε περίπτωση λειτουργίας για απαλοιφή αιχμών ισχύος δεν είναι υποχρεωτικά απαραίτητη. Στην περίπτωση που δεν παρέχεται η δυνατότητα αυτή, η αποθήκευση ισχύος ουσιαστικά δεν θα είναι δυνατή κατά τις ώρες παραγωγής εγγυημένης ισχύος, δεδομένου του ότι η παραγωγή εγγυημένης ισχύος είναι αυτή που έχει προτεραιότητα σε σχέση με την αποθήκευση. Απάντηση στο ερώτημα αν είναι προτιμητέα η εγκατάσταση μονής ή διπλής σωλήνωσης δεν μπορεί να δοθεί μονοσήμαντα. Πρακτικά η εγκατάσταση μονής σωλήνωσης θα οδηγήσει σε μείωση της αποθηκευμένης ενέργειας ετησίως. Αυτό που ενδιαφέρει όμως, σε τελική ανάλυση, δεν είναι η μειωμένη αποθήκευση ενέργειας, αλλά η παραγωγή εγγυημένης ενέργειας από τον υβριδικό σταθμό. Η μείωση της αποθηκευμένης ενέργειας ενδεχομένως να προκαλέσει μείωση και στη δυνατότητα παραγωγής εγγυημένης ενέργειας. Τούτο όμως δεν είναι εκ των προτέρων δεδομένο. Για παράδειγμα, στην περίπτωση διαθεσιμότητας υψηλού δυναμικού Α.Π.Ε. ή στην περίπτωση κατασκευής δεξαμενής αποθήκευσης με μεγάλη χωρητικότητα, είναι πιθανό η εξαίρεση της δυνατότητας αποθήκευσης κατά τις ώρες εγγυημένης ισχύος να μην προκαλέσει μείωση της μέγιστης δυνάμενης να παραχθεί εγγυημένης ενέργειας από τον υβριδικό σταθμό, κάτι που καθορίζεται από την ονομαστική ισχύ των μονάδων εγγυημένης παραγωγής (υδροστρόβιλοι ή αεριοστρόβιλοι) και των ωρών εγγυημένης παραγωγής ανά εικοσιτετράωρο.

Ακόμα όμως και αν η εγκατάσταση μονής σωλήνωσης σε ένα αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό προκαλέσει μείωση της δυνατότητας παραγωγής εγγυημένης ενέργειας, θα πρέπει να εξεταστεί πόση είναι η εγγυημένη αυτή ενέργεια που τελικά δεν δύναται να παραχθεί, πόσα είναι τα διαφεύγοντα έσοδα από τη μη πώληση της ενέργειας αυτής και αν τούτα συνεπάγονται μία εύλογη περίοδο αποπληρωμής του κόστους εγκατάστασης διπλής σωλήνωσης. Τελικά, δηλαδή, η εγκατάσταση διπλής σωλήνωσης σε υβριδικό σταθμό με αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό ως μονάδα αποθήκευσης, θα πρέπει να εξεταστεί ανάλογα με το βασικό κριτήριο διαστασιολόγησης του υβριδικού σταθμού. Αν τούτο είναι αποκλειστικά η μεγιστοποίηση της διείσδυσης Α.Π.Ε. στο Σ.Η.Ε., τότε ενδεχομένως η εγκατάσταση διπλής σωλήνωσης να είναι απαραίτητη, ανάλογα, βέβαια, με το διαθέσιμο δυναμικό Α.Π.Ε. και το μέγεθος της δεξαμενής αποθήκευσης. Αν το κριτήριο διαστασιολόγησης του υβριδικού σταθμού είναι επενδυτικό – οικονομικό, τότε θα πρέπει να εξεταστεί αν το επιπλέον κόστος εγκατάστασης διπλής σωλήνωσης δικαιολογείται από τα επιπλέον έσοδα που θα προκύψουν από την αύξηση της παραγόμενης και πωλούμενης εγγυημένης ενέργειας.

Τέλος, μία ακόμα παράμετρος που συμβάλει στη λήψη απόφασης σχετικά με την εγκατάσταση ή όχι διπλής σωλήνωσης σε αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό, είναι η ευελιξία λειτουργίας του υβριδικού σταθμού και η συμβολή του στη βελτίωση της δυναμικής ασφάλειας του Σ.Η.Ε. Το κριτήριο αυτό σαφώς είναι σημαντικό, ωστόσο ο συντελεστής βαρύτητάς του στην περίπτωση υβριδικών σταθμών για απαλοιφή αιχμών ισχύος είναι περιορισμένος, ακριβώς λόγω του μειωμένου μεγέθους του σταθμού σε σχέση με το μέγεθος του Σ.Η.Ε. και της περιορισμένης χρονικά λειτουργίας του.

Ο αλγόριθμος λειτουργίας του υβριδικού σταθμού για απαλοιφή αιχμών ισχύος παρουσιάζεται στο σχήμα 3.16 για την περίπτωση χρήσης αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού ως μονάδα αποθήκευσης.



Σχήμα 3.16: Γραφική απεικόνιση του αλγόριθμου λειτουργίας του υβριδικού σταθμού για απαλοιφή αιχμών ισχύος.

3.6. Αλγόριθμοι λειτουργίας υβριδικών σταθμών μικρού μεγέθους

Παρόλο που, θεωρητικά, ένας υβριδικός σταθμός μικρού μεγέθους μπορεί να εντάσσεται σε ένα σύστημα είτε για 100% κάλυψη ζήτησης ισχύος είτε για απαλοιφή αιχμών ισχύος, συνήθως εισάγεται με την πρώτη φιλοσοφία λειτουργίας, δηλαδή για 100% κάλυψη της ζήτησης ισχύος. Τούτο προκύπτει εξαιτίας των ακόλουθων δεδομένων:

- Σε μικρά συστήματα ισχύος το μέγεθος της ζήτησης ισχύος είναι τέτοιο, που επιτρέπει τη συνεχή παραγωγή ισχύος και την 100% κάλυψη των ετήσιων αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια εύκολα, χωρίς να απαιτούνται εγκαταστάσεις μεγάλης έκτασης ή δύσκολα και ογκώδη τεχνικά έργα.
- Στις περιπτώσεις μικρών υβριδικών σταθμών, το υψηλό, συγκριτικά, κόστος προμήθειας των ηλεκτροχημικών συσσωρευτών αποσβένεται με την, κατά το δυνατό, μεγιστοποίηση της παραγωγής. Τούτη προσεγγίζεται με τη συνεχή λειτουργία των υβριδικών σταθμών καθ' όλη τη διάρκεια του εικοσιτετράωρου και όχι με τον περιορισμό της μόνο κατά τις ώρες αιχμής.
- Σε μικρά συστήματα ισχύος πρακτικά δεν υπάρχει διάκριση ανάμεσα σε θερμοηλεκτρικές μονάδες βάσης και αιχμής. Συνήθως σε τέτοια συστήματα οι θερμοηλεκτρικοί σταθμοί εξοπλίζονται αποκλειστικά με ντιζελογεννήτριες. Συνεπώς, δεδομένης της απουσίας ακριβών μονάδων αιχμής (αεριοστρόβιλων), δεν υπάρχει διαφορά στο ειδικό κόστος παραγωγής ανάμεσα σε περιόδους χαμηλής ζήτησης ισχύος και σε περιόδους αιχμής ζήτησης. Άρα δεν υπάρχει κάποια τεχνική ή οικονομική σκοπιμότητα για αντικατάσταση της παραγωγής των θερμοηλεκτρικών μονάδων μόνο κατά τις ώρες αιχμής.

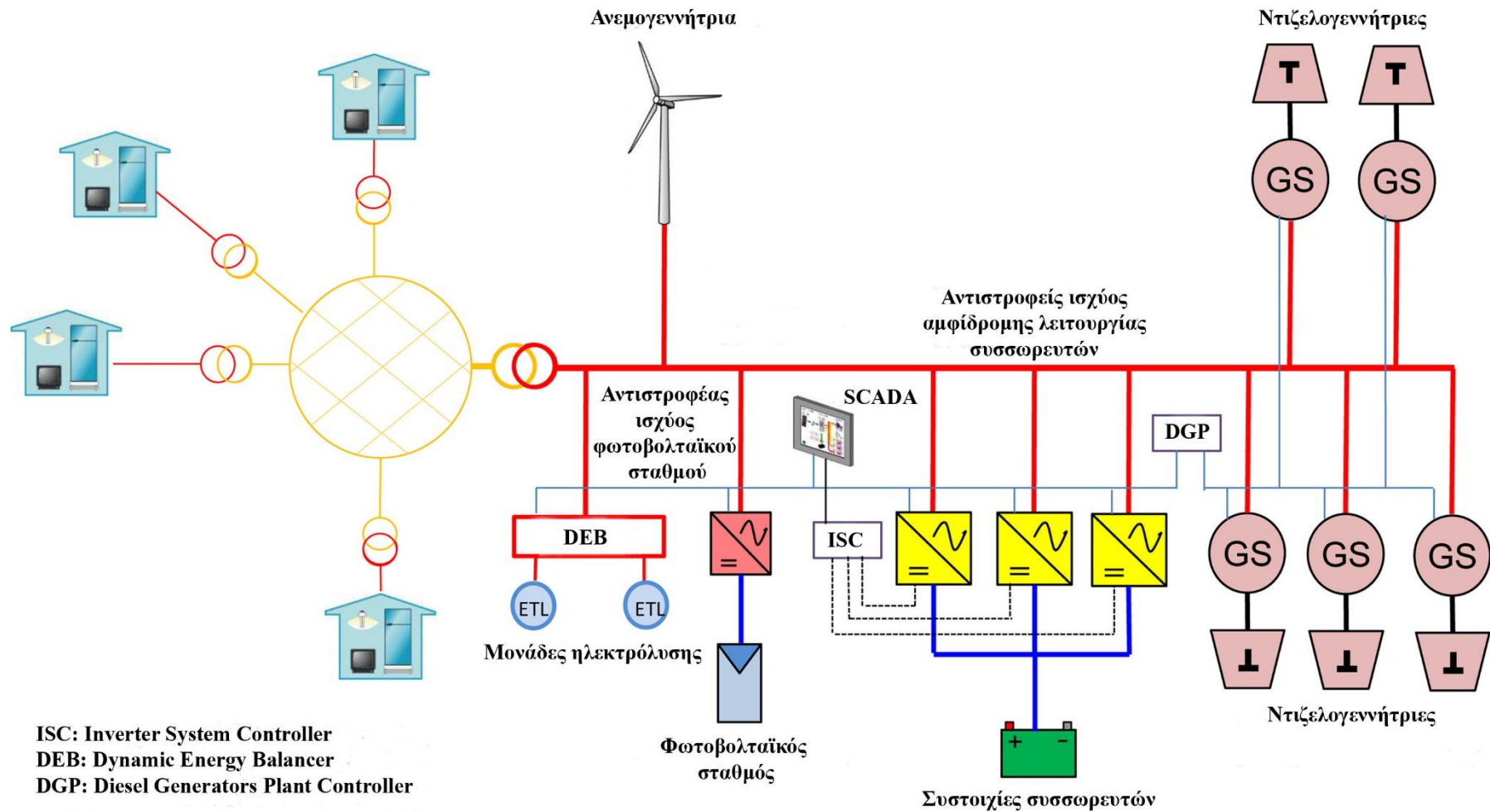
Με βάση τα ανωτέρω αναφερόμενα, στις επόμενες ενότητες θα παρουσιαστούν οι αλγόριθμοι λειτουργίας για υβριδικούς σταθμούς μικρού μεγέθους, δηλαδή από 100kW έως 1MW, και για υβριδικούς σταθμούς πολύ μικρού μεγέθους, με ονομαστική ισχύ μικρότερη των 100kW. Η πρώτη περίπτωση αφορά Σ.Η.Ε. σε πολύ μικρά νησιά, με πληθυσμό της τάξης των μερικών εκατοντάδων μόνιμων κατοίκων, ενώ η δεύτερη περίπτωση αφορά σε διεσπαρμένες καταναλώσεις, όπως μη διασυνδεδεμένες κατοικίες, κτηνοτροφικές μονάδες, μονάδες αφαλάτωσης, βιολογικούς καθαρισμούς, πολύ μικρούς απομονωμένους ορεινούς ή νησιωτικούς οικισμούς κλπ.

3.6.1. Υβριδικοί σταθμοί μικρού μεγέθους

Στο σχήμα 3.17 παρουσιάζεται η δομή ενός υβριδικού σταθμού μικρού μεγέθους. Όπως έχει αναλυθεί στις προηγούμενες ενότητες, σε μία τέτοια περίπτωση οι μονάδες Α.Π.Ε. του υβριδικού σταθμού μπορεί να είναι ένας μικρός αριθμός ανεμογεννητριών (π.χ. μία έως τρεις) και ένας φωτοβολταϊκός σταθμός. Ως μονάδα αποθήκευσης χρησιμοποιούνται ηλεκτροχημικοί συσσωρευτές οποιουδήποτε τύπου (OpZV, floating batteries κλπ).

Στο σχήμα 3.17 εμφανίζεται, επίσης, μία μονάδα ηλεκτρόλυσης ως εναλλακτική μονάδα αποθήκευσης. Η μονάδα αυτή μπορεί να εισαχθεί στον υβριδικό σταθμό συμπληρωματικά για την παραγωγή υδρογόνου, στην περίπτωση που οι κύριοι ηλεκτροχημικοί συσσωρευτές είναι πλήρως φορτισμένοι και υπάρχει διαθεσιμότητα ισχύος από τις μονάδες Α.Π.Ε. για αποθήκευση.

Παρατηρείται ότι όλες οι μονάδες παραγωγής (μονάδες Α.Π.Ε. και μονάδες εφεδρείας), οι μονάδες αποθήκευσης και η ζήτηση ισχύος είναι διασυνδεδεμένες μεταξύ τους με τον ίδιο ζυγό. Τούτο συνεπάγεται ότι η έγχυση ισχύος θα προκύπτει ακαριαία και αυτόματα πάντα προς τη ζήτηση ισχύος, στην περίπτωση εμφάνισης πτώσης τάσης. Δεδομένης της ηλεκτρολογικής διασύνδεσης όλων των μονάδων παραγωγής και αποθήκευσης σε ένα κοινό ζυγό και της δυνατότητας άμεσης έγχυσης ισχύος από τους συσσωρευτές, η απευθείας διείσδυση των μονάδων Α.Π.Ε. μπορεί να ανέλθει έως 100%. Το σύστημα μπορεί να θεωρηθεί ασφαλές, αν διατηρείται πάντα ένα μέγιστο βάθος εκφόρτισης των συσσωρευτών που δεν υπερβαίνει το 60%. Υπό αυτή την προϋπόθεση, θα υπάρχει πάντα διαθέσιμη αποθηκευμένη ενέργεια στους συσσωρευτές, ικανή να καλύψει τη ζήτηση ισχύος σε περίπτωση συμβάντος απότομης απώλειας παραγωγής από τις μονάδες Α.Π.Ε. και για το χρονικό διάστημα που απαιτείται έως την ένταξη των μονάδων εφεδρείας.



Σχήμα 3.17: Υβριδικός σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μικρού μεγέθους.

Υπενθυμίζεται ότι οι ηλεκτροχημικοί συσσωρευτές ομαδοποιούνται σε συστοιχίες. Στην περίπτωση χρήσης ηλεκτροχημικών συσσωρευτών οξέος μολύβδου, κάθε συστοιχία αποτελείται από N συσσωρευτές συνδεδεμένους σε σειρά, με ονομαστική τάση V έκαστος. Συνεπώς η ονομαστική τάση της συστοιχίας συσσωρευτών θα είναι:

$$V_{st} = V \cdot N \quad (3.41)$$

Αν I_{max} είναι η μέγιστη ένταση ρεύματος που δύναται να διέλθει μέσω του επιλεγμένου τύπου ηλεκτροχημικού συσσωρευτή, τότε η ονομαστική ισχύς φόρτισης / εκφόρτισης της συστοιχίας θα ισούται με:

$$P_{bat} = V_{st} \cdot I_{max} \quad (3.42)$$

Η μέγιστη ένταση ρεύματος I_{max} καθορίζεται από τον κατασκευαστή του ηλεκτροχημικού συσσωρευτή και έχει να κάνει με την αντοχή του στην ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών εντός του συσσωρευτή.

Αν C_n είναι η ονομαστική χωρητικότητα του μοντέλου συσσωρευτή σε Ah (αμπερώρια), η ονομαστική χωρητικότητα C_{bat} σε Wh της κάθε συστοιχίας συσσωρευτών θα είναι:

$$C_{bat} = V_{st} \cdot C_n \quad (3.43)$$

όπου V_{st} η ονομαστική τάση της συστοιχίας σε volts.

Αν b_{dis} είναι το ποσοστιαίο μέγιστο βάθος εκφόρτισης του κάθε συσσωρευτή ως προς την ονομαστική χωρητικότητά του, τότε η ωφέλιμη ή ενεργή χωρητικότητα της κάθε συστοιχίας θα ισούται με:

$$C_{bat,eff} = C_{bat} \cdot b_{dis} \quad (3.44)$$

Τέλος υπενθυμίζεται ακόμα ότι η κάθε συστοιχία συσσωρευτών δεν είναι δυνατόν να φορτίζεται και να εκφορτίζεται ταυτόχρονα. Προκειμένου ο υβριδικός σταθμός να έχει αυτή τη δυνατότητα, θα πρέπει το σύνολο των ηλεκτροχημικών συσσωρευτών να ομαδοποιηθεί σε κατάλληλο αριθμό συστοιχιών, ο οποίος σαφώς θα προκύψει με βάση την προσομοίωση του σταθμού και τη σωστή διαστασιολόγησή του.

Μετά τα ανωτέρω, αναφορικά με τον αλγόριθμο λειτουργίας του υβριδικού σταθμού μικρού μεγέθους με ηλεκτροχημικούς συσσωρευτές ως μονάδα αποθήκευσης, για κάθε χρονικό βήμα ελέγχου j εκτελούνται οι ακόλουθες ενέργειες:

1. Σύγκριση παραγωγής ισχύος από Α.Π.Ε. P_{RES} και της ζήτησης ισχύος P_d :
 - i. Αν $P_{RES} < P_d$, τότε όλη η διαθέσιμη ισχύς από τις μονάδες Α.Π.Ε. διεισδύει στο δίκτυο για κάλυψη της ζήτησης, δηλαδή η διείσδυση ισχύος Α.Π.Ε. $P_{RES\delta}$ ισούται με τη διαθέσιμη ισχύ από τις μονάδες Α.Π.Ε.: $P_{RES\delta} = P_{RES}$.
 - ii. Αν $P_{RES} \geq P_d$, τότε η διείσδυση Α.Π.Ε. ισούται με τη ζήτηση, δηλαδή: $P_{RES\delta} = P_d$ (ποσοστό απευθείας διείσδυσης Α.Π.Ε. 100%).
2. Έλεγχος στάθμης φόρτισης της κάθε συστοιχίας συσσωρευτών ξεχωριστά $b_i(j-1)$ από το προηγούμενο χρονικό βήμα $j-1$, όπου με το δείκτη i υποδηλώνεται η κάθε συστοιχία ($i = 1, 2, 3, \dots$). Διακρίνονται οι περιπτώσεις:
 - i. $P_{RES} < P_d$:
Αν υπάρχει επαρκής ενέργεια αποθηκευμένη στις συστοιχίες, τότε η ισχύς που υπολείπεται θα καλυφθεί από τους συσσωρευτές: $P_{bat} = P_d - P_{RES\delta}$.
Η παραγωγή ισχύος των μονάδων εφεδρείας είναι 0.

Η νέα στάθμη φόρτισης για κάθε συστοιχία θα είναι:

$$b_i(j) = b_i(j-1) - P_{\text{bati}} \cdot t_i / \eta_{\text{disi}}$$

όπου P_{bati} και η_{disi} η ισχύς εκφόρτισης και ο βαθμός απόδοσης εκφόρτισης της συστοιχίας i .

Αν δεν υπάρχει επαρκής ενέργεια αποθηκευμένη στις συστοιχίες, τότε η παραγωγή ισχύος των συσσωρευτών θα ανέλθει στο ποσό που μπορούν να δώσουν έως το κατώτατο επίπεδο φόρτισής τους. Στην περίπτωση αυτή θα είναι:

$$P_{\text{bat}} = [\sum b_i(j-1) - b_{\text{dis}} \cdot C_{\text{bat}}] \cdot \eta_{\text{disi}} / t_i$$

όπου C_{bat} η συνολική ονομαστική χωρητικότητα των συσσωρευτών, b_{dis} το μέγιστο βάθος εκφόρτισης και t_i η χρονική διάρκεια του βήματος υπολογισμού.

Η ισχύς που υπολείπεται θα καλυφθεί από τις μονάδες εφεδρείας (ντιζελογεννήτριες):

$$P_{\text{th}} = P_d - P_{\text{RES}\delta} - P_{\text{bat}}.$$

Στην περίπτωση αυτή η αποθήκευση ισχύος P_{st} είναι μηδενική, όπως, επίσης, η διαθέσιμη ισχύς για τη μονάδα ηλεκτρόλυσης P_{el} και η ισχύς P_{RESred} , κατά την οποία θα χρειαστεί να περιοριστεί η αρχική παραγωγή των μονάδων Α.Π.Ε.

Η νέα στάθμη φόρτισης για κάθε συστοιχία θα ταυτίζεται με την ελάχιστη στάθμη φόρτισης των συσσωρευτών.

ii. $P_{\text{RES}} > P_d$:

Αν υπάρχει επαρκής χωρητικότητα στις συστοιχίες, τότε η περίσσεια ισχύος από τις Α.Π.Ε. θα οδηγηθεί προς αποθήκευση:

$$P_{\text{st}} = P_{\text{RES}} - P_{\text{RES}\delta}.$$

Στην περίπτωση αυτή δε θα προκύψει διαθέσιμη ισχύς για τη μονάδα ηλεκτρόλυσης, ενώ, προφανώς, δε θα χρειαστεί να περιοριστεί η αρχική παραγωγή ισχύος από τις μονάδες Α.Π.Ε.

Η περίσσεια ισχύος από τις μονάδες Α.Π.Ε. μπορεί να αποθηκευτεί στις συστοιχίες συσσωρευτών που δεν έχουν συμβάλει στην παραγωγή ισχύος κατά το τρέχον χρονικό βήμα. Αυτές θα είναι οι διαθέσιμες προς αποθήκευση συστοιχίες. Η νέα στάθμη φόρτισης για αυτές τις συστοιχίες θα είναι:

$$b_i(j) = b_i(j-1) + P_{\text{sti}} \cdot t_i / \eta_{\text{chi}}$$

όπου P_{sti} και η_{chi} η ισχύς φόρτισης και ο βαθμός απόδοσης φόρτισης της συστοιχίας i .

Αν δεν υπάρχει επαρκής χωρητικότητα στις διαθέσιμες προς αποθήκευση συστοιχίες, για να αποθηκευτεί όλη η περίσσεια ισχύος από τις μονάδες Α.Π.Ε., τότε θα αποθηκευτεί ισχύς έως την πλήρη φόρτισή τους. Τούτη υπολογίζεται ως:

$$P_{\text{bat}} = [C_{\text{bat}} - \sum b_i(j-1)] \cdot \eta_{\text{chi}} / t_i$$

Σε αυτή την περίπτωση, η ισχύς από τις μονάδες Α.Π.Ε. που πιθανώς θα προκύψει διαθέσιμη μετά και την αποθήκευση στους συσσωρευτές θα είναι:

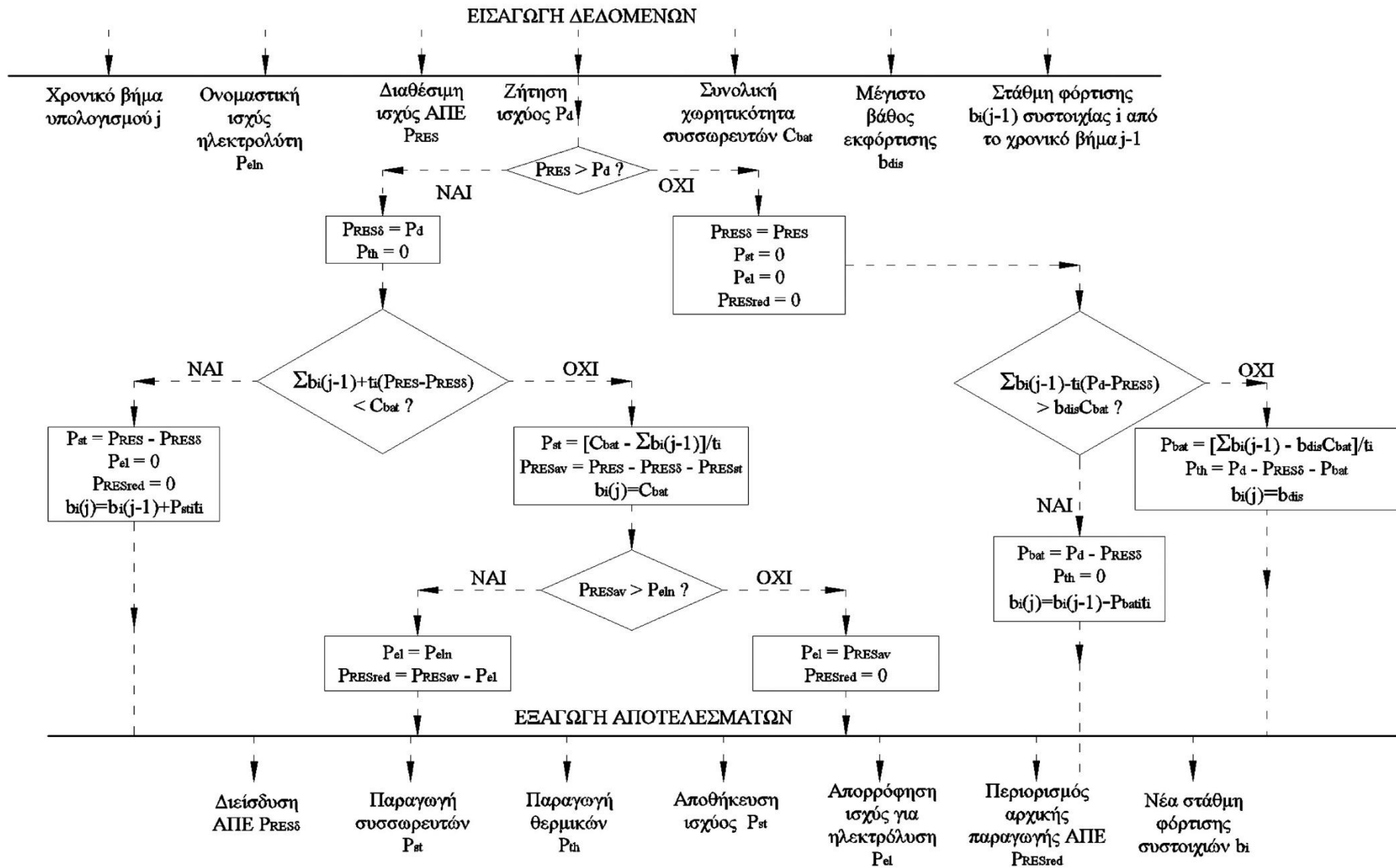
$$P_{\text{RESav}} = P_{\text{RES}} - P_{\text{RES}\delta} - P_{\text{st}}.$$

Αν η μονάδα ηλεκτρόλυσης δύναται να απορροφήσει ισχύ ίση με P_{el} , τότε ο περιορισμός της αρχικής διαθέσιμης ισχύος από τις μονάδες ΑΠΕ θα πρέπει είναι:

$$P_{\text{RESred}} = P_{\text{RES}} - P_{\text{RES}\delta} - P_{\text{st}} - P_{\text{el}}.$$

Η νέα στάθμη φόρτισης για κάθε συστοιχία που είναι διαθέσιμη προς αποθήκευση, εξαιρουμένων, δηλαδή, των συστοιχιών που στο τρέχον χρονικό βήμα έχουν χρησιμοποιηθεί για παραγωγή ισχύος, θα ταυτίζεται με την ονομαστική χωρητικότητά της.

Ο ανωτέρω περιγραφόμενος αλγόριθμος παρουσιάζεται γραφικά στο σχήμα 3.18.



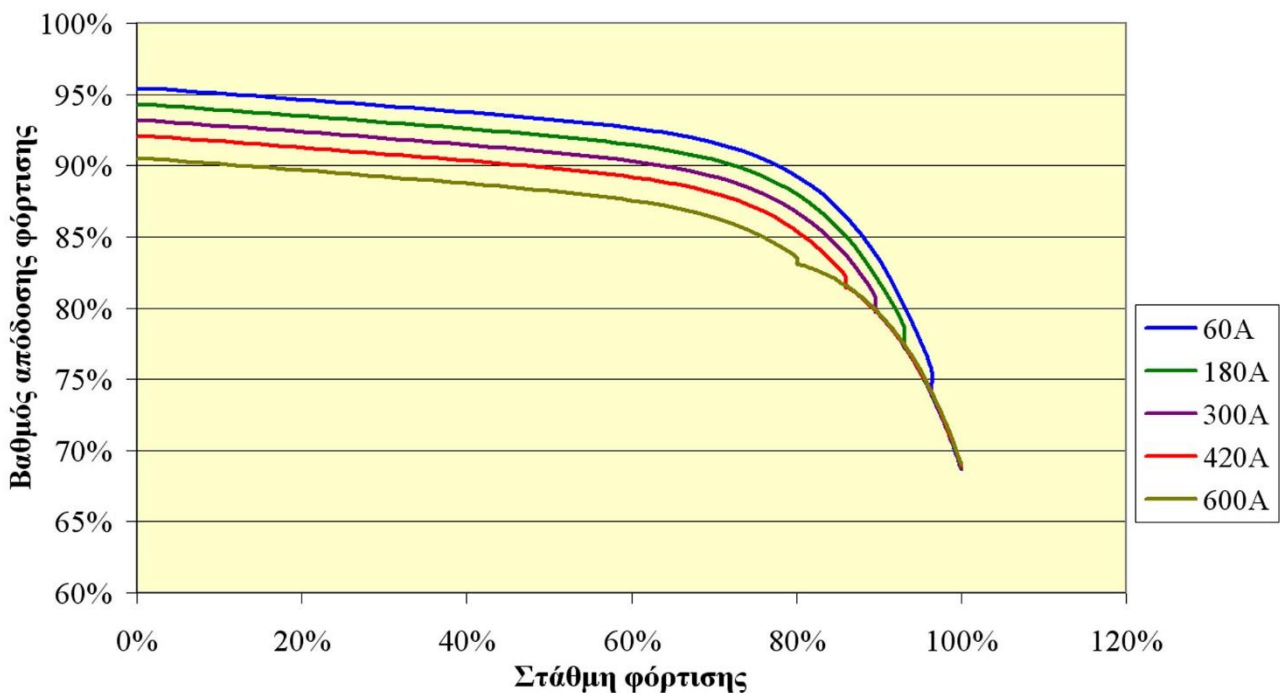
Σχήμα 3.18: Αλγόριθμος λειτουργίας υβριδικού σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με ηλεκτροχημικούς συσσωρευτές.

Ο ανωτέρω αλγόριθμος παρουσιάζει δύο θεμελιώδεις διαφορές με τους αλγόριθμους που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα, για τη λειτουργία υβριδικών σταθμών με μονάδες αποθήκευσης αναστρέψιμα υδροηλεκτρικά ή σταθμούς αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα. Τούτες είναι:

- Η δυνατότητα των μονάδων Α.Π.Ε. του υβριδικού σταθμού να διεισδύουν έως και ποσοστό 100% στην κάλυψη της ζήτησης ισχύος, χαρακτηριστικό που προκύπτει στην περίπτωση που όλες οι μονάδες παραγωγής και κατανάλωσης ισχύος είναι συνδεδεμένες στον ίδιο ζυγό τάσης και οι συσσωρευτές έχουν τη δυνατότητα άμεσης απόκρισης σε περίπτωση εμφάνισης πτώσης τάσης από τη μεριά της ζήτησης.
- Η αδυναμία ταυτόχρονης φόρτισης και εκφόρτισης της ίδιας συστοιχίας συσσωρευτών. Τούτο το χαρακτηριστικό επηρεάζει τη διαστασιολόγηση του υβριδικού σταθμού, καθώς προκειμένου να εξασφαλιστεί η ανωτέρω δυνατότητα, θα πρέπει να εγκατασταθεί επαρκής αριθμός συσσωρευτών διαιρεμένος σε κατάλληλο αριθμό συστοιχιών. Συνήθως το μίρασμα των συσσωρευτών σε παράλληλες συστοιχίες που δρουν ανεξάρτητα μεταξύ τους οδηγεί σε αύξηση του μεγέθους των μονάδων αποθήκευσης και αύξηση του κόστους προμήθειας.

Τέλος είναι προφανές ότι διαστασιολόγηση των μονάδων αποθήκευσης και ο υπολογισμός των αποθηκευόμενων και παραγόμενων ποσοτήτων ενέργειας σε και από αυτές δεν απαιτεί κάποια εκτενή υπολογιστική διαδικασία, όπως στην περίπτωση των αναστρέψιμων υδροηλεκτρικών και των σταθμών συμπιεσμένου αέρα. Αντιθέτως αρκεί η γνώση των καμπύλων βαθμών απόδοσης φόρτισης και εκφόρτισης συσσωρευτών.

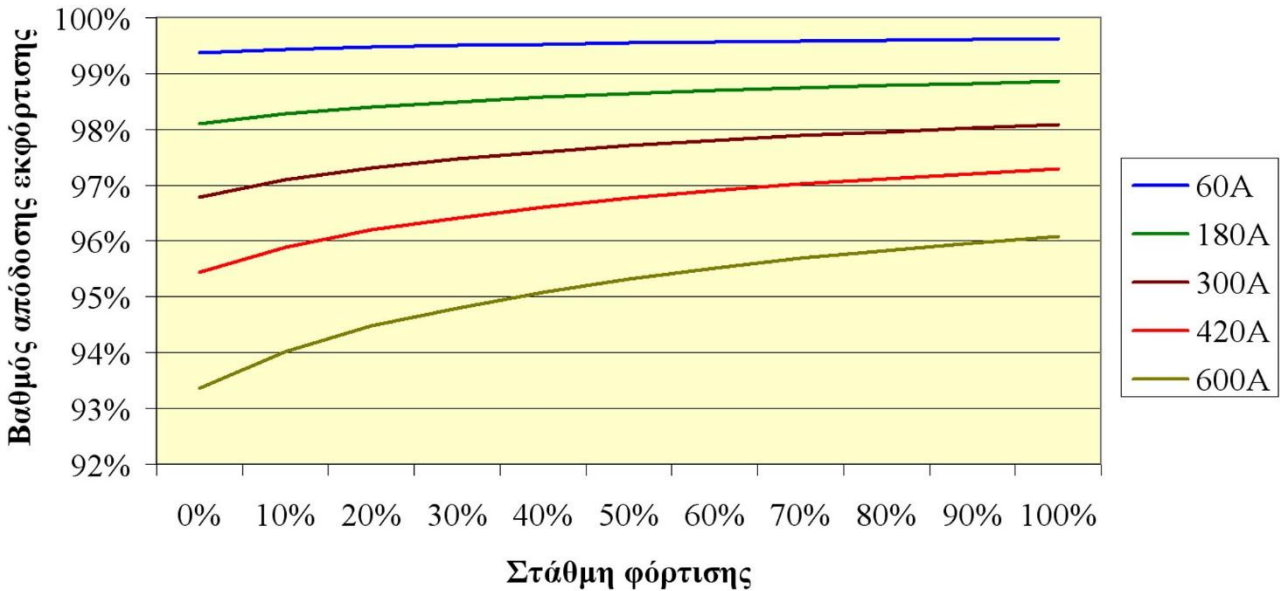
Στο σχήμα 3.19 παρουσιάζονται ενδεικτικές καμπύλες φόρτισης συσσωρευτών οξέος μολύβδου. Παρατηρείται ότι η απόδοση φόρτισης των συσσωρευτών εξαρτάται από την ένταση ρεύματος φόρτισης, δηλαδή την ισχύ φόρτισης και από την τρέχουσα στάθμη φόρτισης των συσσωρευτών. Οι συγκεκριμένες καμπύλες αναφέρονται σε συσσωρευτή ονομαστικής χωρητικότητας 3.000Ah με μέγιστη ένταση ρεύματος φόρτισης / εκφόρτισης 600A. Παρατηρείται, επίσης, ότι ο βαθμός απόδοσης φόρτισης διατηρείται σε τιμές άνω του 80%, ανεξάρτητα από το ρεύμα φόρτισης, για στάθμες φόρτισης συσσωρευτών μικρότερες του 90%. Τέλος η απόδοση φόρτισης των συσσωρευτών οξέος μολύβδου μειώνεται με την αύξηση της έντασης ρεύματος φόρτισης και με την αύξηση της στάθμης φόρτισης των συσσωρευτών.



Σχήμα 3.19: Καμπύλες βαθμού απόδοσης φόρτισης συσσωρευτών οξέος μολύβδου.

Αντίστοιχα, στο σχήμα 3.20 παρουσιάζονται ενδεικτικές καμπύλες εκφόρτισης συσσωρευτών οξέος μολύβδου. Και στην περίπτωση της εκφόρτισης, η απόδοση εκφόρτισης των συσσωρευτών εξαρτάται από

την ένταση ρεύματος εκφόρτισης, δηλαδή την ισχύ εκφόρτισης, και από την τρέχουσα στάθμη φόρτισης των συσσωρευτών. Οι συγκεκριμένες καμπύλες αναφέρονται επίσης σε συσσωρευτή ονομαστικής χωρητικότητας 3.000Ah με μέγιστη ένταση ρεύματος φόρτισης / εκφόρτισης 600A. Ο βαθμός απόδοσης εκφόρτισης διατηρείται σε υψηλές τιμές άνω του 93%, ανεξάρτητα από το ρεύμα εκφόρτισης και τη στάθμη φόρτισης των συσσωρευτών. Τέλος η απόδοση εκφόρτισης των συσσωρευτών οξέος μολύβδου μειώνεται με την αύξηση της έντασης ρεύματος φόρτισης και με τη μείωση της στάθμης φόρτισης των συσσωρευτών.



Σχήμα 3.20: Καμπύλες βαθμού απόδοσης εκφόρτισης συσσωρευτών οξέος μολύβδου.

Ένα τελευταίο θέμα που θα πρέπει να αναφερθεί για την περίπτωση των υβριδικών σταθμών μικρού μεγέθους προκύπτει από την εν δυνάμει ταυτόχρονη ύπαρξη δύο τεχνολογιών βάσης, για παράδειγμα ανεμογεννητριών και φωτοβολταϊκού σταθμού. Το θέμα που ανακύπτει από το δεδομένο αυτό είναι η προτεραιότητα μεταξύ των τεχνολογιών Α.Π.Ε. του υβριδικού σταθμού, με την οποία εντάσσονται είτε απευθείας στην παραγωγή είτε προς αποθήκευση της παραγόμενης ισχύος τους. Η προτεραιότητα αυτή δεν είναι μονοσήμαντα ορισμένη. Αναφορικά με την απευθείας διείσδυση των μονάδων Α.Π.Ε. στο δίκτυο, θα μπορούσαμε να πούμε, ως γενικό κανόνα, ότι προτεραιότητα θα έχει η μονάδα εκείνη με τη μεγαλύτερη αξιοπιστία και τη χαμηλότερη επίδραση στην ασφάλεια του συστήματος. Γενικά η διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι σαφέστατα λιγότερο έντονη από αυτήν του ανέμου, ειδικά κατά τη θερινή περίοδο. Στις περισσότερες, συνεπώς, περιπτώσεις οι φωτοβολταϊκοί σταθμοί θα παρουσιάζουν μικρότερη διακύμανση στην παραγωγή ισχύος και θα εντάσσονται κατά προτεραιότητα στο σύστημα. Σε χρονικές περιόδους, ωστόσο, με συχνή εναλλαγή ηλιοφάνειας και νεφώσεων, ενδεχομένως η παραγωγή ισχύος από τις ανεμογεννήτριες να εμφανίζεται σταθερότερη.

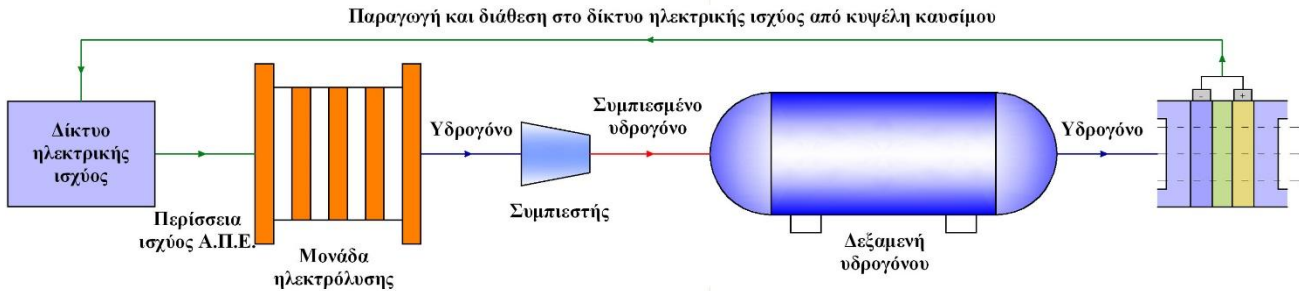
Η ίδια φιλοσοφία ισχύει και για τον καθορισμό της προτεραιότητας των μονάδων Α.Π.Ε. για τη διάθεση ισχύος προς τις μονάδες αποθήκευσης, με περισσότερη, ωστόσο, ελαστικότητα και ευελιξία.

3.6.2. Προσομοίωση μονάδας ηλεκτρόλυσης και κυψέλης καυσίμου

Στην προηγούμενη ενότητα αναφέρθηκε η δυνατότητα εισαγωγής μίας μονάδας ηλεκτρόλυσης στον υβριδικό σταθμό, ο τρόπος ένταξης της οποίας περιγράφηκε στον αλγόριθμο λειτουργίας του υβριδικού σταθμού μικρού μεγέθους. Είναι προφανές, από την παρουσίαση του εν λόγω αλγορίθμου, ότι η μονάδα ηλεκτρόλυσης εισάγεται στον υβριδικό σταθμό ως εναλλακτική τεχνολογία αποθήκευσης. Η αποθήκευση ενέργειας σε αυτή, μέσω της παραγωγής υδρογόνου, υλοποιείται μόνο στην περίπτωση που εξαντλείται η αποθηκευτική ικανότητα των συμβατικών ηλεκτροχημικών συσσωρευτών (πλήρης στάθμη φόρτισης συσσωρευτών) και υπάρχει ακόμα διαθέσιμη ισχύς προς αποθήκευση από τις μονάδες Α.Π.Ε. του υβριδικού σταθμού. Το παραγόμενο υδρογόνο μπορεί, στη συνέχεια, να χρησιμοποιηθεί για την επιπρόσθετη παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος σε μία κυψέλη καυσίμου. Η έσχατη προτεραιότητα αποθήκευσης ισχύος από

τον υβριδικό σταθμό μέσω της ηλεκτρόλυσης επιλέγεται κυρίως λόγω του υψηλού κόστους εγκατάστασης και του σχετικά χαμηλού βαθμού απόδοσης του συνολικού κύκλου παραγωγής υδρογόνου και ηλεκτρικής ισχύος από την κυψέλη καυσίμου.

Η δομή του συστήματος μονάδας ηλεκτρόλυσης – κυψέλης καυσίμου παρουσιάζεται στο σχήμα 3.21. Το παραγόμενο υδρογόνο από τη μονάδα ηλεκτρόλυσης συμπιέζεται σε ένα συμπιεστή και αποθηκεύεται σε μία δεξαμενή, από την οποία, τελικά, οδηγείται στην κυψέλη καυσίμου για παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος, όποτε τούτο απαιτηθεί από την κατανάλωση.



Σχήμα 3.21: Δομή συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος με μονάδα ηλεκτρόλυσης και κυψέλη καυσίμου.

Η διαστασιολόγηση και ο ετήσιος υπολογισμός του συστήματος μονάδας ηλεκτρόλυσης – κυψέλης καυσίμου, με δεδομένα:

- την ετήσια χρονοσειρά της διαθέσιμης ανά χρονικό βήμα υπολογισμού ηλεκτρικής ισχύος για τη μονάδα ηλεκτρόλυσης,
- το μέγιστο όγκο και την ονομαστική πίεση αποθήκευσης στη δεξαμενή υδρογόνου,
- την τρέχουσα πίεση αποθήκευσης στη δεξαμενή υδρογόνου,
- την ονομαστική ισχύ και την καμπύλη παραγωγής υδρογόνου ανά μονάδα κατανάλωσης ηλεκτρικής ισχύος της μονάδας ηλεκτρόλυσης,
- την ονομαστική ισχύ και την καμπύλη βαθμού απόδοσης παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος της κυψέλης καυσίμου,
- τις βασικές ιδιότητες του υδρογόνου, όπως τη θερμογόνο ικανότητά του, την ειδική θερμότητά του υπό σταθερή πίεση (c_p), την πυκνότητά του και το λόγο γ των ειδικών θερμότητων του

αποσκοπεί στον υπολογισμό:

- της ετήσιας χρονοσειράς κατανάλωσης ισχύος και παραγόμενου όγκου υδρογόνου από τη μονάδα ηλεκτρόλυσης,
- της ετήσιας χρονοσειράς παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος από την κυψέλη καυσίμου,
- της ετήσιας χρονοσειράς κατανάλωσης ηλεκτρικής ισχύος από το συμπιεστή υδρογόνου,
- της ετήσιας χρονοσειράς αποθήκευσης μάζας υδρογόνου στη δεξαμενή.

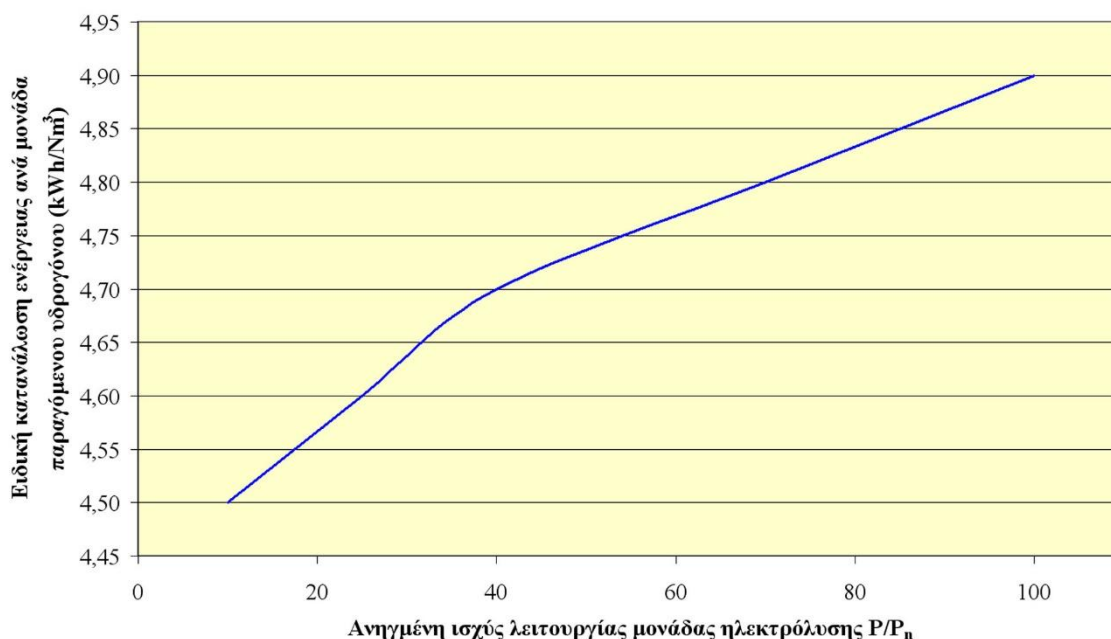
Η διαδικασία προσομοίωσης και υπολογισμού του συστήματος μονάδας ηλεκτρόλυσης – κυψέλης καυσίμου έχει ως εξής, για κάθε χρονικό βήμα υπολογισμού:

1. Αν P_{RESav} είναι η διαθέσιμη για τη μονάδα ηλεκτρόλυσης ισχύς από τις μονάδες Α.Π.Ε. του υβριδικού σταθμού, μετά δηλαδή και την αποθήκευση στους ηλεκτροχημικούς συσσωρευτές, και P_{eln} είναι η ονομαστική ισχύς της μονάδας ηλεκτρόλυσης στο τρέχον χρονικό βήμα, τότε:
 - i. αν $P_{RESav} > P_{eln}$, η ισχύς που θα απορροφηθεί από τη μονάδα ηλεκτρόλυσης θα είναι:

$$P_{el} = P_{eln}$$
 - ii. αν $P_{RESav} \leq P_{eln}$, η ισχύς που θα απορροφηθεί από τη μονάδα ηλεκτρόλυσης θα είναι:

$$P_{el} = P_{RESav}$$
2. Για τη μονάδα ηλεκτρόλυσης εισάγεται η καμπύλη κατανάλωσης ισχύος ανά μονάδα παραγόμενου όγκου υδρογόνου. Στο σχήμα 3.22 παρουσιάζεται μία τέτοια ενδεικτική καμπύλη από εμπορικό μοντέλο μονάδας ηλεκτρόλυσης, ονομαστικής ισχύος 250kW. Γενικά, για την προσομοίωση του

συστήματος ηλεκτρόλυσης – κυψέλης καυσίμου, θα πρέπει να αναζητηθούν παρόμοιες καμπύλες από τον κατασκευαστή της μονάδας ηλεκτρόλυσης.



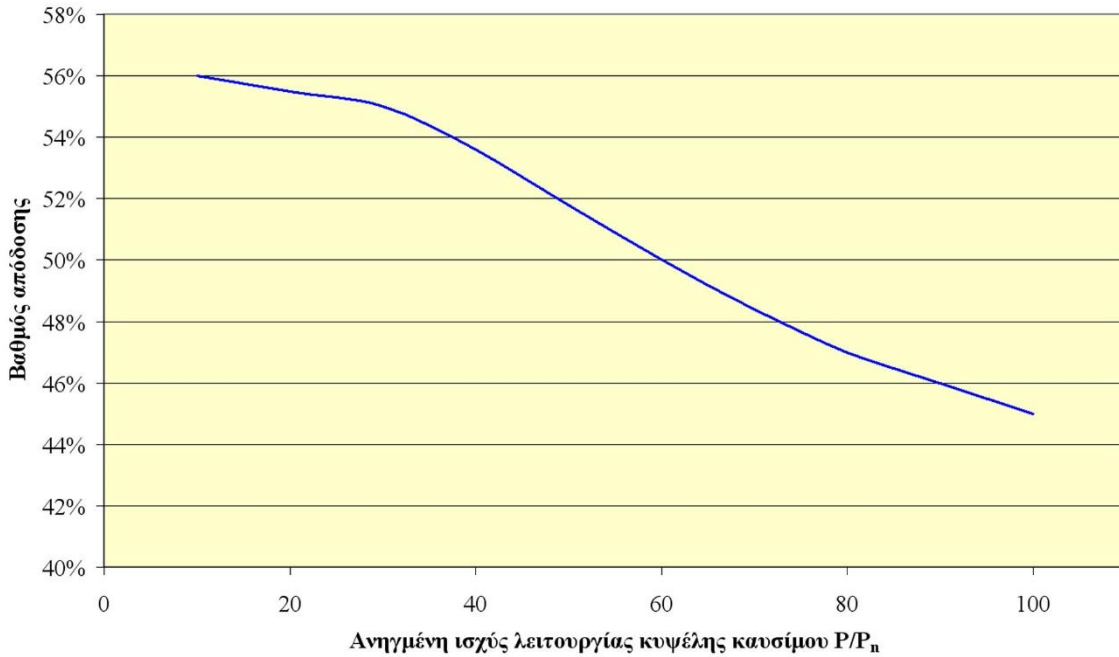
Σχήμα 3.22: Καμπύλη κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας ανά μονάδα παραγόμενου όγκου υδρογόνου σε μονάδα ηλεκτρόλυσης.

Από το σχήμα 3.22 παρατηρείται ότι η κατανάλωση ενέργειας ανά μονάδα παραγόμενου όγκου υδρογόνου είναι ανάλογη της ισχύος λειτουργίας της μονάδας ηλεκτρόλυσης. Παρατηρείται, ωστόσο, ότι η διακύμανση της ειδικής κατανάλωσης ενέργειας είναι μικρή σε διαφορετικά σημεία λειτουργίας της συσκευής ηλεκτρόλυσης.

3. Με βάση την καμπύλη ειδικής κατανάλωσης ενέργειας ανά μονάδα παραγόμενου όγκου υδρογόνου και δεδομένης της διαθεσιμότητας ισχύος από τις μονάδες Α.Π.Ε. του υβριδικού σταθμού, υπολογίζεται τελικά ο παραγόμενος όγκος υδρογόνου V_{el} από τη συσκευή ηλεκτρόλυσης στο τρέχον χρονικό βήμα υπολογισμού. Ο όγκος V_{el} υπολογίζεται σε Nm³ (κανονικό κυβικό μέτρο), δηλαδή για θερμοκρασία 0 °C και για απόλυτη ατμοσφαιρική πίεση 1atm (101.325Pa).
4. Σε κάθε χρονικό βήμα είναι, επίσης, επιθυμητός ο υπολογισμός της παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος από την κυψέλη καυσίμου. Ο τρόπος υπολογισμού της ισχύος αυτής δεν είναι μονοσήμαντα ορισμένος, καθώς εξαρτάται από τις απαιτήσεις και τις ιδιότητες της ζήτησης ισχύος που η κυψέλη καυσίμου καλείται να καλύψει. Για παράδειγμα, η κυψέλη καυσίμου μπορεί να αποσκοπεί στην κάλυψη της ζήτησης ισχύος που δεν δύναται να καλυφθεί από τις μονάδες Α.Π.Ε. και αποθήκευσης του υβριδικού σταθμού και που, σε περίπτωση απουσίας της κυψέλης καυσίμου, θα καλύπτονταν από τις μονάδες εφεδρείας αυτού, δηλαδή τις θερμοηλεκτρικές μονάδες. Η χρονοσειρά της παραγωγής ισχύος από τις μονάδες εφεδρείας του υβριδικού σταθμού υπολογίζεται με την εκτέλεση του αντίστοιχου αλγορίθμου λειτουργίας, ο οποίος έχει παρουσιαστεί παραπάνω.

Έστω ότι η ισχύς που ζητείται να παραχθεί από την κυψέλη καυσίμου το τρέχον χρονικό βήμα ισούται με P_{fc} .

5. Εισάγεται η καμπύλη διακύμανσης του βαθμού απόδοσης της κυψέλης καυσίμου συναρτήσει της παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος από αυτήν. Μία τέτοια καμπύλη για εμπορικό μοντέλο κυψέλης καυσίμου μεμβράνης πρωτονίων με ονομαστική ισχύ 200kW παρουσιάζεται στο σχήμα 3.23. Γενικά, για την προσομοίωση του συστήματος ηλεκτρόλυσης – κυψέλης καυσίμου θα πρέπει να αναζητηθούν παρόμοιες καμπύλες από τον κατασκευαστή της κυψέλης καυσίμου.



Σχήμα 3.23: Καμπύλη βαθμού απόδοσης κυψέλης καυσίμου συναρτήσει του σημείου λειτουργίας της.

Με την ανωτέρω καμπύλη βαθμού απόδοσης της κυψέλης καυσίμου και την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος P_{fc} υπολογίζεται ο βαθμός απόδοσης η_{fc} της κυψέλης καυσίμου για το σημείο λειτουργίας της κατά το τρέχον χρονικό βήμα υπολογισμού.

6. Υπολογίζεται η κατανάλωση υδρογόνου V_{cons} που απαιτείται για την παραγωγή ισχύος P_{fc} από την κυψέλη καυσίμου επί χρονικό βήμα διάρκειας t από τη σχέση:

$$V_{cons} = \frac{P_{fc} \cdot t}{\eta_{fc} \cdot H_{hydr}} \quad (3.45)$$

όπου H_{hydr} η θερμογόνος ικανότητα του υδρογόνου. Ο όγκος V_{cons} υπολογίζεται σε Nm^3 .

7. Ο όγκος υδρογόνου $V_{st}(j)$ Nm^3 που θα παραμείνει εντός της δεξαμενής αποθήκευσης μετά και το τρέχον χρονικό βήμα j ισούται με:

$$V_{st}(j) = V_{st}(j-1) + V_{el} - V_{cons}$$

όπου $V_{st}(j-1)$ ο παραμένων όγκος στη δεξαμενή υδρογόνου σε Nm^3 μετά το προηγούμενο χρονικό βήμα $j-1$.

8. Υπολογίζεται η νέα πίεση $p(j)$ στη δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου μετά το τέλος του χρονικού βήματος j :

$$\frac{p(j)}{p(j-1)} = \frac{V(j-1)}{V(j)} \quad (3.46)$$

9. Ελέγχεται αν η νέα πίεση στη δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου μετά και το τρέχον χρονικό βήμα πέφτει κάτω από την ελάχιστη τιμή p_{min} (π.χ. 1bar) ή ανέρχεται πάνω από τη μέγιστη τιμή (π.χ. 200bar). Διακρίνονται οι ακόλουθες περιπτώσεις:

- i. Αν $p(j) < p_{min}$, τότε:
 - $V_{cons} = 0$
 - $P_{fc} = 0$
 - $V_{st}(j) = V_{st}(j-1) + V_{el}$.

ii. Αν $p(j) > p_{\max}$, τότε:

$$V_{el} = 0$$

$$P_{el} = 0$$

$$V_{st}(j) = V_{st}(j-1) - V_{cons}$$

iii. Αν $p_{\min} \leq p(j) \leq p_{\max}$, τότε τα μεγέθη V_{cons} , V_{el} , $V_{st}(j)$, P_{fc} και P_{el} υπολογίζονται από τις σχέσεις που παρουσιάστηκαν παραπάνω.

10. Η ισχύς που θα καταναλωθεί από το συμπιεστή, θεωρώντας ισεντροπική συμπίεση, δίνεται από τη σχέση:

$$P_{comp} = p_1 \cdot \dot{V}_{el} \cdot \frac{\gamma}{\gamma-1} \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] = p_1 \cdot \dot{V}_{el} \cdot \frac{\gamma}{\gamma-1} \cdot \left[\varepsilon^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \quad (3.47)$$

όπου:

p_1 : η πίεση εισόδου του υδρογόνου στο συμπιεστή (πρακτικά ισούται με την ατμοσφαιρική)

\dot{V}_{el} : η παροχή όγκου του υδρογόνου κατά τη συμπίεση $\dot{V}_{el} = V_{el} / t$

γ : ο λόγος $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ των ειδικών θερμοτήτων του υδρογόνου υπό σταθερή πίεση c_p και σταθερό όγκο c_v

p_2 : η πίεση εξόδου του υδρογόνου στο συμπιεστή

ε : ο λόγος συμπίεσης στο συμπιεστή

Στον πίνακα 3.7 παρουσιάζονται τιμές για τις ειδικές θερμοότητες του υδρογόνου συναρτήσει της θερμοκρασίας του.

Πίνακας 3.7: Ιδιότητες υδρογόνου συναρτήσει της απόλυτης θερμοκρασίας του.

Θερμοκρασία		Ειδική θερμοότητα υπό σταθερή πίεση c_p (kJ/kg·K)	Ειδική θερμοότητα υπό σταθερό όγκο c_v (kJ/kg·K)	Λόγος ειδικών θερμοτήτων $\gamma = c_p/c_v$
(K)	(°C)			
250	-23	14,051	9,927	1,416
300	27	14,307	10,183	1,405
350	77	14,427	10,302	1,400
400	127	14,476	10,352	1,398
450	177	14,501	10,377	1,398
500	227	14,513	10,389	1,397
550	277	14,530	10,405	1,396
600	327	14,546	10,422	1,396
650	377	14,571	10,447	1,395
700	427	14,604	10,480	1,394
750	477	14,645	10,521	1,392
800	527	14,695	10,570	1,390
900	627	14,822	10,698	1,385
1.000	727	14,983	10,859	1,380

Με την προσομοίωση της λειτουργίας και του κύκλου παραγωγής υδρογόνου από τη συσκευή ηλεκτρόλυσης και παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος από την κυψέλη καυσίμου ολοκληρώνεται η ανάλυση της μεθοδολογίας διαστασιολόγησης και υπολογισμού υβριδικών σταθμών μικρού μεγέθους.

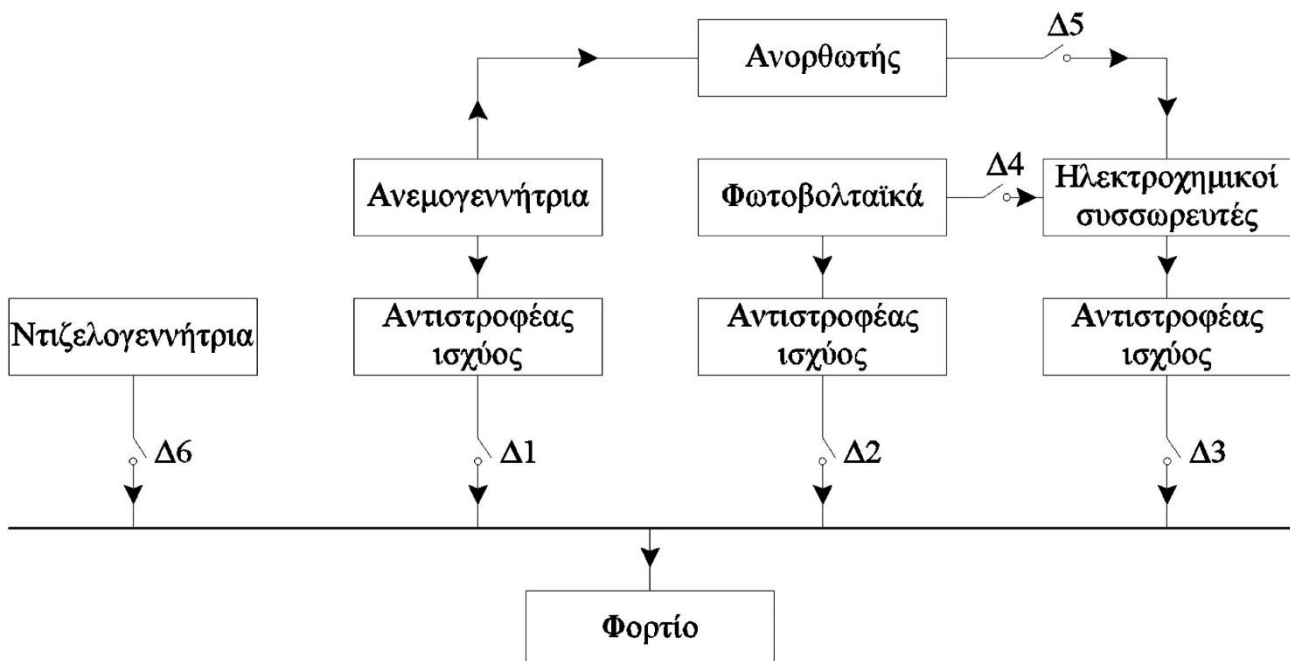
3.6.3. Υβριδικοί σταθμοί πολύ μικρού μεγέθους

Η παρουσίαση των αλγορίθμων και της υπολογιστικής προσομοίωσης της λειτουργίας υβριδικών σταθμών ολοκληρώνεται στην παρούσα ενότητα με τους υβριδικούς σταθμούς πολύ μικρού μεγέθους, οι οποίοι αποσκοπούν στην κάλυψη ζήτησης ισχύος μεγέθους έως 100 – 200kW. Αυτοί οι υβριδικοί σταθμοί, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, συνήθως αναπτύσσονται σε περιπτώσεις απαίτησης για κάλυψη απομονωμένων καταναλώσεων ισχύος, όπως πολύ μικροί ορεινοί ή νησιωτικοί οικισμοί, εξοχικές κατοικίες, φάρoi, μονάδες αφαλάτωσης, κτηνοτροφικές μονάδες κλπ. Οι εγκαταστάσεις που καλούνται να τροφοδοτήσουν με ηλεκτρική ισχύ οι υβριδικοί σταθμοί πολύ μικρού μεγέθους είναι, συνήθως, αυτόνομες, δηλαδή μη διασυνδεδεμένες με κάποιο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Το δεδομένο αυτό, σε συνδυασμό με το μικρό μέγεθος των καταναλώσεων και, προφανώς, την απαίτηση για αξιόπιστη και εγγυημένη παροχή ισχύος, διαφοροποιεί τη σχεδίαση και τον τρόπο λειτουργίας των υβριδικών σταθμών πολύ μικρού μεγέθους. Η έλλειψη υποστήριξης από κάποιο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας συνεπάγεται ότι ο υβριδικός σταθμός θα πρέπει να ανταποκριθεί σε ποσοστό 100% στις ανάγκες ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, σε τέτοια συστήματα μικρού μεγέθους, σημαντική είναι η παράμετρος του κόστους εγκατάστασης και λειτουργίας του σταθμού, αφού τούτα δεν επιμερίζονται σε ένα μεγάλο αριθμό καταναλωτών, αντιθέτως τα ενοικιάζονται λίγοι τελικοί χρήστες, ή ακόμα και ένας. Για τους λόγους αυτούς, ο αλγόριθμος λειτουργίας και η διαστασιολόγηση των υβριδικών σταθμών μικρού μεγέθους διαφοροποιούνται με τα όσα αναφέρθηκαν στις προηγούμενες περιπτώσεις.

Σε ένα υβριδικό σταθμό πολύ μικρού μεγέθους μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι ακόλουθες τεχνολογίες:

- μονάδες Α.Π.Ε.: μικρές ανεμογεννήτριες (συνήθως μία) και φωτοβολταϊκά πλαίσια,
- μονάδες αποθήκευσης: ηλεκτροχημικοί συσσωρευτές, με επικρατέστερους, για λόγους κόστους, τους συσσωρευτές οξέος μολύβδου,
- μονάδες εφεδρείας: συνήθως μία μικρή ντιζελογεννήτρια (ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος).

Στο σχήμα 3.24 παρουσιάζεται η δομή και το μονογραμμικό διάγραμμα διασύνδεσης ενός πολύ μικρού υβριδικού σταθμού.



Σχήμα 3.24: Δομή και μονογραμμικό διάγραμμα πολύ μικρού υβριδικού σταθμού.

Με βάση το σχήμα 3.24, όλες οι μονάδες παραγωγής ισχύος (ανεμογεννήτρια, φωτοβολταϊκά, συσσωρευτές και ντιζελογεννήτρια) είναι διασυνδεδεμένες σε κοινό ζυγό με το φορτίο. Οι μονάδες Α.Π.Ε. και αποθήκευσης εγγείουν την παραγόμενη ισχύ τους μέσω αντιστροφών ισχύος (inverters), οι οποίοι εξασφαλίζουν ότι το παρεχόμενο προς το φορτίο εναλλασσόμενο ρεύμα θα παρουσιάζει πρότυπη συχνότητα και τάση. Επίσης οι μονάδες Α.Π.Ε. συνδέονται απευθείας με τους συσσωρευτές του υβριδικού σταθμού. Για την αποθήκευση της εναλλασσόμενης ηλεκτρικής ισχύος από την ανεμογεννήτρια είναι απαραίτητη η ανόρθωση του ρεύματος σε συνεχές, μέσω ανορθωτή που παρεμβάλλεται μεταξύ ανεμογεννήτριας και συσσωρευτών. Σε όλες τις διασυνδέσεις από τις μονάδες παραγωγής προς το φορτίο και από τις μονάδες Α.Π.Ε. προς τους συσσωρευτές παρεμβάλλονται διακόπτες ισχύος.

Ο βασικός στόχος του υβριδικού σταθμού είναι η εγγυημένη παροχή ισχύος προς το φορτίο, μέσω της μεγιστοποίησης της αξιοποίησης της παραγωγής ισχύος από τις μονάδες Α.Π.Ε., κάτι που συνεπάγεται ελαχιστοποίηση της παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος από τη ντιζελογεννήτρια και ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας του σταθμού, το οποίο διαμορφώνεται σχεδόν αποκλειστικά από το κόστος του καταναλωθέντος καυσίμου. Για τον ανωτέρω στόχο θα πρέπει να:

- εξασφαλίζεται διαρκώς ικανή στάθμη φόρτισης στους συσσωρευτές, δεδομένο που θα επιτρέψει την εγγυημένη παραγωγή ισχύος από τον υβριδικό σταθμό σε χρονικές στιγμές χαμηλής διαθεσιμότητας ισχύος από τις μονάδες Α.Π.Ε., ελαχιστοποιώντας τη συμμετοχή της ντιζελογεννήτριας στη σύνθεση ισχύος
- Η αποθήκευση ισχύος προς τους συσσωρευτές θα παρέχεται μόνο από τις μονάδες Α.Π.Ε. και θα εκτελείται, προφανώς, όταν η στάθμη φόρτισης των συσσωρευτών το επιτρέπει.
- Θα είναι δυνατή η απευθείας έγχυση ισχύος από τις μονάδες Α.Π.Ε. προς το φορτίο, όταν η στάθμη φόρτισης των συσσωρευτών είναι υψηλή.
- Η παραγωγή ισχύος από τη ντιζελογεννήτρια θα γίνεται απευθείας προς το φορτίο, δηλαδή όχι μέσω των συσσωρευτών, και μόνο όταν δεν επαρκεί η διαθέσιμη ισχύς από τις μονάδες Α.Π.Ε. και τους συσσωρευτές (πολύ χαμηλή στάθμη φόρτισης).

Από τις ανωτέρω γενικές αρχές λειτουργίας του υβριδικού σταθμού συνάγεται το συμπέρασμα ότι βασική παράμετρος που καθορίζει σε κάποιο χρονικό βήμα τον τρόπο κάλυψης του φορτίου είναι η στάθμη φόρτισης των συσσωρευτών. Με βασική παράμετρο λοιπόν αυτό το μέγεθος, οι ανωτέρω αρχές μπορούν να προσεγγιστούν με τον ακόλουθο αλγόριθμο λειτουργίας).

Έστω b_{\min} και b_{\max} η ελάχιστη και η μέγιστη αντίστοιχα δυνατή στάθμη φόρτισης των συσσωρευτών και P_{ch} η μέγιστη ικανότητα φόρτισής τους. Έστω ακόμα ότι κάποια χρονική j η τρέχουσα στάθμη φόρτισης των συσσωρευτών είναι $b(j)$. Τέλος, στο τρέχον χρονικό βήμα υπολογισμού η παραγωγή ισχύος από την ανεμογεννήτρια και τα φωτοβολταϊκά είναι P_w και P_{pv} αντίστοιχα και η κατανάλωση ισχύος (φορτίο) είναι P_L . Διακρίνονται οι ακόλουθες περιπτώσεις:

1. Αν $b(j-1) = b_{\max}$ και $P_w + P_{pv} \geq P_L$:

Στην περίπτωση αυτή είναι προφανές ότι δεν υπάρχει δυνατότητα αποθήκευσης ισχύος στους πλήρως φορτισμένους συσσωρευτές από το χρονικό βήμα $j-1$. Επίσης η διαθέσιμη ισχύς από τις μονάδες Α.Π.Ε. υπερκαλύπτει τη ζήτηση ισχύος, η οποία θα καλυφθεί εξ' ολοκλήρου από τις μονάδες Α.Π.Ε. Η ρύθμιση της ισχύος των μονάδων Α.Π.Ε. επιτυγχάνεται με τους αντιστροφείς ισχύος. Συνεπώς:

- i. διείσδυση ισχύος μονάδων Α.Π.Ε.:

$$P_{RES8} = P_L$$

- ii. αποθήκευση ισχύος στους συσσωρευτές:

$$P_{st} = 0$$

- iii. η παραγωγή ισχύος από τους συσσωρευτές θα είναι μηδενική:

$$P_{bat} = 0$$

- iv. νέα στάθμη φόρτισης συσσωρευτών:

$$b(j) = b_{\max}$$

- v. η παραγωγή ισχύος από τη ντιζελογεννήτρια θα είναι μηδενική:

$$P_{dg} = 0.$$

Οι θέσεις των διακοπών του ηλεκτρικού κυκλώματος σε αυτή την περίπτωση είναι:

- Δ_1, Δ_2 : κλειστοί
- $\Delta_3, \Delta_4, \Delta_5, \Delta_6$: ανοιχτοί.

2. Αν $b = b_{\max}$ και $P_W + P_{PV} < P_L$:

Στην περίπτωση αυτή είναι προφανές ότι δεν υπάρχει δυνατότητα αποθήκευσης ισχύος στους συσσωρευτές, τόσο γιατί τούτοι είναι πλήρως φορτισμένοι από το χρονικό βήμα $j-1$, όσο και επειδή δεν υπάρχει περίσσεια διαθεσιμότητας ισχύος από τις μονάδες Α.Π.Ε. Η διαθέσιμη ισχύς από τις μονάδες Α.Π.Ε. δεν επαρκεί για τη ζήτηση ισχύος, η οποία θα καλυφθεί από τις μονάδες Α.Π.Ε. και τους συσσωρευτές. Η ρύθμιση της ισχύος των συσσωρευτών επιτυγχάνεται με τους αντιστροφείς ισχύος. Συνεπώς:

- i. διείσδυση ισχύος μονάδων Α.Π.Ε.:

$$P_{RES\delta} = P_W + P_{PV}$$

- ii. αποθήκευση ισχύος στους συσσωρευτές:

$$P_{st} = 0$$

- iii. η παραγωγή ισχύος P_{bat} από τους συσσωρευτές ισούται με:

$$P_{bat} = P_L - P_{RES\delta}$$

δηλαδή με το έλλειμμα ισχύος των μονάδων Α.Π.Ε. σε σχέση με τη ζήτηση

- iv. η νέα στάθμη φόρτισης των συσσωρευτών θα ισούται με:

$$b(j) = b_{\max} - P_{bat} \cdot t / \eta_{dis}$$

όπου η_{dis} ο βαθμός απόδοσης εκφόρτισης των συσσωρευτών και t η χρονική διάρκεια του χρονικού βήματος υπολογισμού

- v. η παραγωγή ισχύος από τη ντιζελογεννήτρια θα είναι μηδενική:

$$P_{dg} = 0.$$

Οι θέσεις των διακοπών του ηλεκτρικού κυκλώματος σε αυτή την περίπτωση είναι:

- $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$: κλειστοί
- $\Delta_4, \Delta_5, \Delta_6$: ανοιχτοί.

3. Αν $b = b_{\min}$ και $P_W + P_{PV} < P_{ch}$:

Στην περίπτωση αυτή η στάθμη φόρτισης των συσσωρευτών είναι στο κατώτατο επίπεδο. Επιπλέον η συνολική παραγωγή ισχύος από τις μονάδες Α.Π.Ε. είναι μικρότερη από τη μέγιστη ικανότητα φόρτισης των συσσωρευτών. Σε μία τέτοια κατάσταση προέχει η φόρτιση των συσσωρευτών. Η διαθέσιμη ισχύς από τις μονάδες Α.Π.Ε. διατίθεται εξολοκλήρου για τη φόρτιση των συσσωρευτών. Η ζήτηση ισχύος θα καλυφθεί από τη ντιζελογεννήτρια. Συνεπώς:

- i. διείσδυση μονάδων Α.Π.Ε.:

$$P_{RES\delta} = 0$$

- ii. αποθήκευση ισχύος στους συσσωρευτές:

$$P_{st} = P_W + P_{PV}$$

- iii. παραγωγή ισχύος από τους συσσωρευτές:

$$P_{\text{bat}} = 0$$

iv. η νέα στάθμη φόρτισης των συσσωρευτών θα ισούται με:

$$b(j) = b_{\text{min}} + P_{\text{st}} \cdot t \cdot \eta_{\text{ch}}$$

όπου η_{ch} ο βαθμός απόδοσης φόρτισης των συσσωρευτών

v. παραγωγή ντιζελογεννήτριας:

$$P_{\text{dg}} = P_{\text{L}}$$

Οι θέσεις των διακοπών του ηλεκτρικού κυκλώματος σε αυτή την περίπτωση είναι:

- $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$: ανοιχτοί
- $\Delta_4, \Delta_5, \Delta_6$: κλειστοί.

4. Αν $b = b_{\text{min}}$ και $P_{\text{W}} + P_{\text{PV}} \geq P_{\text{ch}}$:

Στην περίπτωση αυτή η στάθμη φόρτισης των συσσωρευτών είναι στο κατώτατο επίπεδο. Η συνολική παραγωγή ισχύος από τις μονάδες Α.Π.Ε. είναι μεγαλύτερη από τη μέγιστη ικανότητα φόρτισης των συσσωρευτών. Άρα υπάρχει η δυνατότητα φόρτισης των συσσωρευτών στην πλήρη ισχύ φόρτισης και ταυτόχρονης διάθεσης ισχύος προς τη ζήτηση. Αν η διαθέσιμη παραγωγή ισχύος από τις μονάδες Α.Π.Ε. δεν επαρκεί για τη ζήτηση ισχύος, τότε θα συμμετέχει στη σύνθεση ισχύος και η ντιζελογεννήτρια. Συνεπώς:

i. απευθείας διείσδυση μονάδων Α.Π.Ε.:

$$P_{\text{RES}\delta} = P_{\text{W}} + P_{\text{PV}} - P_{\text{ch}}$$

ii. αποθήκευση ισχύος στους συσσωρευτές:

$$P_{\text{st}} = P_{\text{ch}}$$

iii. παραγωγή ισχύος από τους συσσωρευτές:

$$P_{\text{bat}} = 0$$

iv. η νέα στάθμη φόρτισης των συσσωρευτών θα ισούται με:

$$b(j) = b_{\text{min}} + P_{\text{st}} \cdot t \cdot \eta_{\text{ch}}$$

v. παραγωγή ισχύος ντιζελογεννήτριας:

$$P_{\text{dg}} = P_{\text{L}} - P_{\text{RES}\delta}$$

Οι θέσεις των διακοπών του ηλεκτρικού κυκλώματος σε αυτή την περίπτωση είναι:

- Δ_3 : ανοιχτός
- $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_4, \Delta_5, \Delta_6$: κλειστοί.

5. Αν $b_{\text{min}} \leq b \leq b_{\text{max}}$:

Στην περίπτωση αυτή η στάθμη φόρτισης των συσσωρευτών κυμαίνεται μεταξύ κατώτατου και ανώτατου επιπέδου. Η κάλυψη της ζήτησης θα προκύψει από τις μονάδες Α.Π.Ε. και τους συσσωρευτές. Ταυτόχρονα θα είναι δυνατή η αποθήκευση ισχύος από τις μονάδες Α.Π.Ε. Συνεπώς:

i. απευθείας διείσδυση μονάδων Α.Π.Ε.:

$$\text{αν } P_{\text{W}} + P_{\text{PV}} \geq P_{\text{L}}, \text{ τότε: } P_{\text{RES}\delta} = P_{\text{L}}$$

$$\text{διαφορετικά: } P_{\text{RES}\delta} = P_{\text{W}} + P_{\text{PV}}$$

ii. αποθήκευση ισχύος στους συσσωρευτές:

$$P_{\text{st}} = P_{\text{W}} + P_{\text{PV}} - P_{\text{RES}\delta}$$

iii. παραγωγή ισχύος από τους συσσωρευτές

$$P_{bat} = P_L - P_{RES\delta}$$

iv. η νέα στάθμη φόρτισης των συσσωρευτών θα ισούται με:

$$b(j) = b(j-1) + P_{st} \cdot t \cdot \eta_{ch} - P_{bat} \cdot t \cdot \eta_{dis}$$

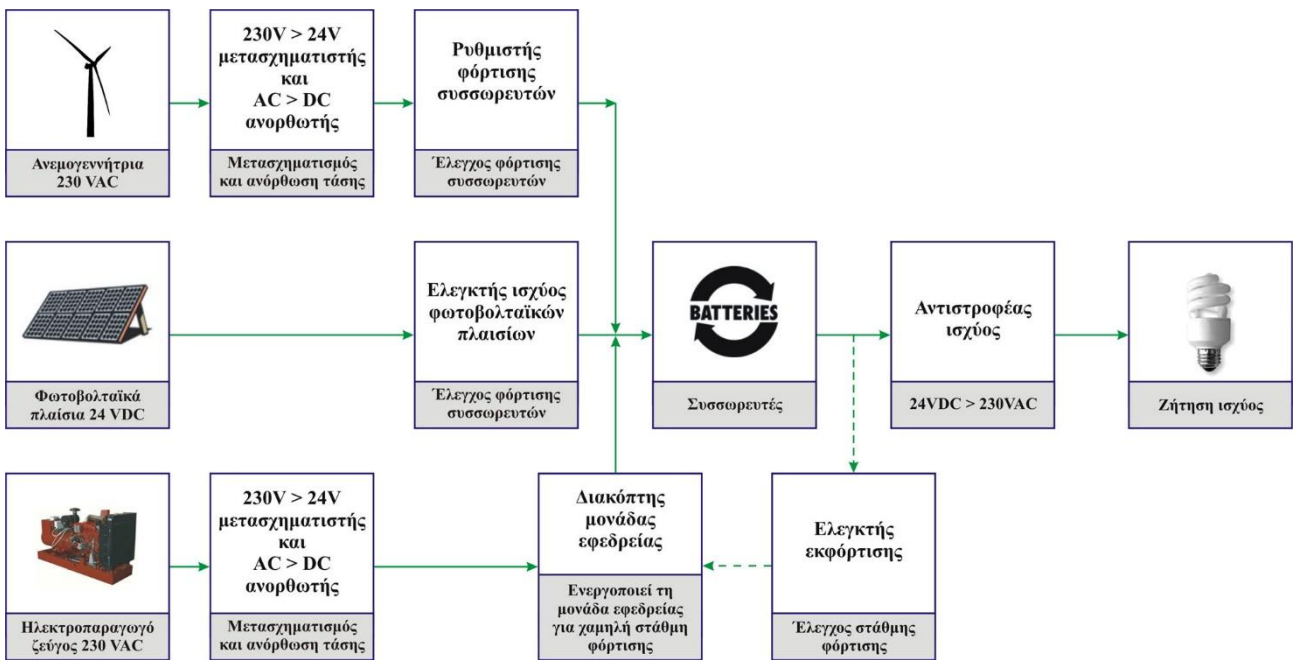
v. παραγωγή ισχύος ντιζελογεννήτριας:

$$P_{dg} = P_L - P_{RES\delta} - P_{bat}$$

Όλοι οι διακόπτες του ηλεκτρικού κυκλώματος σε αυτή την περίπτωση είναι ανοιχτοί. Πρακτικά ο υβριδικός σταθμός σε αυτή την περίπτωση παρουσιάζει την ίδια φιλοσοφία λειτουργίας, όπως και οι υβριδικοί σταθμοί μικρού μεγέθους, που εξετάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα.

Ο αλγόριθμος λειτουργίας που περιγράφηκε ανωτέρω δεν είναι μοναδικός. Αναλόγως με διάφορες εμπλεκόμενες παραμέτρους, όπως ο τύπος και η σπουδαιότητα της ζήτησης, το διαθέσιμο δυναμικό Α.Π.Ε. κλπ, μπορεί να έχει διάφορες παραλλαγές. Μία, για παράδειγμα, βασική αλλαγή έγκειται στην ανωτέρω υπ' αριθμό 3 περίπτωση, όπου η στάθμη φόρτισης των συσσωρευτών είναι στο ελάχιστο επίπεδο και η διαθέσιμη ισχύς από τις μονάδες Α.Π.Ε. είναι, επίσης, χαμηλότερη της ονομαστικής ικανότητας φόρτισης. Στον ανωτέρω αλγόριθμο, σε μία τέτοια περίπτωση, δόθηκε προτεραιότητα στη φόρτιση των συσσωρευτών. Εναλλακτικά, όμως, θα μπορούσε ακόμα και σε αυτή την περίπτωση να προταχθεί η κάλυψη της ζήτησης ισχύος από τις μονάδες Α.Π.Ε., αφού, σε τελική ανάλυση, αυτός είναι ο στόχος. Μία τέτοια παραλλαγή δε θα μπορούσε να θεωρηθεί σε καμία περίπτωση λανθασμένη.

Μία εντελώς διαφορετική παραλλαγή υλοποίησης υβριδικού σταθμού πολύ μικρού μεγέθους είναι αυτή που παρουσιάζεται στο σχήμα 3.25.



Σχήμα 3.25: Δομή και μονογραμμικό διάγραμμα πολύ μικρού υβριδικού σταθμού.

Όπως φαίνεται στο σχήμα αυτό, όλες οι μονάδες παραγωγής, δηλαδή οι μονάδες Α.Π.Ε. και εφεδρείας, φορτίζουν τους συσσωρευτές. Η ζήτηση ισχύος ικανοποιείται αποκλειστικά από τους συσσωρευτές. Προτεραιότητα στη φόρτιση των συσσωρευτών έχουν οι μονάδες Α.Π.Ε. Η μονάδα εφεδρείας φορτίζει τους συσσωρευτές, μόνο όταν παρουσιάζεται χαμηλή διαθεσιμότητα ισχύος από τις μονάδες Α.Π.Ε. και η στάθμη φόρτισης των συσσωρευτών είναι στο ελάχιστο επίπεδο. Είναι προφανές ότι αυτή η προσέγγιση παρουσιάζει μεγαλύτερες απώλειες παραγωγής – αποθήκευσης ισχύος, αφού όλες οι μονάδες παραγωγής μπορούν μόνο να αποθηκεύσουν ενέργεια στους συσσωρευτές και όχι να τροφοδοτήσουν απευθείας τη ζήτηση ισχύος. Από την άλλη, όμως, μεριά, η υλοποίηση αυτή είναι απλούστερη στη σχεδίαση και στην κατασκευή, έχει λιγότερα μέρη, δεν απαιτεί ιδιαίτερους αυτοματισμούς στη λειτουργία της και είναι πιο απλή λειτουργικά. Επιπλέον, δεδομένου ότι η ζήτηση τροφοδοτείται αποκλειστικά από τους συσσωρευτές, η

ποιότητα ισχύος είναι εξασφαλισμένη. Ενδεχομένως σε πολύ μικρά μεγέθη υβριδικών σταθμών, όπως απομονωμένες ή εξοχικές κατοικίες με μικρή χρονική περίοδο χρήσης, η λύση αυτή να είναι η βέλτιστη, τόσο τεχνικά, αφού προσφέρει απλή και αξιόπιστη κατασκευή και λειτουργία, όσο ακόμα και οικονομικά, αφού το υψηλό λειτουργικό κόστος, λόγω των απωλειών αποθήκευσης ενέργειας, αντισταθμίζεται από το χαμηλό κόστος προμήθειας και κατασκευής και την περιορισμένη χρονικά λειτουργία του σταθμού.

3.7. Κριτήρια βελτιστοποίησης διαστασιολόγησης υβριδικών σταθμών

Ήδη αναφέρθηκε στις προηγούμενες ενότητες ότι η βελτιστοποίηση της διαστασιολόγησης των υβριδικών σταθμών επιτυγχάνεται με την επαναληπτική εκτέλεση της προσομοίωσης των αλγόριθμων λειτουργίας τους για διαφορετικές τιμές των βασικών μεγεθών του υβριδικού σταθμού, όπως η ονομαστική ισχύς των μονάδων Α.Π.Ε. και αποθήκευσης, η χωρητικότητα των μονάδων αποθήκευσης κλπ. Συνήθως επιλέγεται μία ανεξάρτητη μεταβλητή σχεδιασμού, ενώ οι υπόλοιπες προκύπτουν υπολογιστικά μέσω της εκτέλεσης της προσομοίωσης λειτουργίας. Στις περιπτώσεις που παρουσιάστηκαν στο παρόν κεφάλαιο, η ανεξάρτητη μεταβλητή σχεδιασμού επιλέχθηκε να είναι η ισχύς των μονάδων Α.Π.Ε. του υβριδικού σταθμού. Για κάθε εξεταζόμενη διαστασιολόγηση, υπολογίζεται ένα κοινό μέγεθος, προκειμένου να προκύψει ένας ενιαίος δείκτης σύγκρισης. Το μέγεθος αυτό μπορεί να είναι οικονομικό ή ενεργειακό. Η βέλτιστη διαστασιολόγηση του υβριδικού σταθμού προκύπτει στο σημείο σχεδίασης που βελτιστοποιείται το επιλεγμένο κριτήριο.

3.7.1. Ενεργειακή βελτιστοποίηση διαστασιολόγησης υβριδικών σταθμών

Η περίπτωση ενεργειακής βελτιστοποίησης αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα. Αν E_{th} είναι η ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τις θερμοηλεκτρικές μονάδες εφεδρείας του υβριδικού σταθμού, E_d η ετήσια ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, E_{RES} η συνολική ετήσια αρχική διαθέσιμη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τις μονάδες Α.Π.Ε. και E_{rej} η ετήσια περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας από τις μονάδες Α.Π.Ε., τότε το κριτήριο που ετέθη ήταν οι λόγοι:

- E_{th}/E_d της ετήσιας παραγωγής ενέργειας από τις μονάδες εφεδρείας του υβριδικού σταθμού προς την ετήσια ζήτηση ενέργειας
- E_{rej}/E_{RES} της ετήσιας περίσσειας ενέργειας προς την ετήσια αρχική παραγωγή ενέργειας από τις μονάδες Α.Π.Ε.

να είναι αμφότεροι μικρότεροι κάποιου μέγιστου αποδεκτού ποσοστού, το οποίο, σε ευνοϊκές περιπτώσεις (υψηλό διαθέσιμο δυναμικό Α.Π.Ε., υψηλή χωρητικότητα μονάδων αποθήκευσης), μπορεί να είναι της τάξης του 10% ή και μικρότερο.

Από τα ανωτέρω εξάγεται το συμπέρασμα ότι, εν γένει, η ενεργειακή βελτιστοποίηση υβριδικών σταθμών αποσκοπεί σαφώς στη μεγιστοποίηση της ετήσιας ποσοστιαίας συμβολής των μονάδων Α.Π.Ε. στην κάλυψη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, χωρίς όμως τούτη να συνδυάζεται με απαράδεκτα υψηλά ετήσια ποσά απόρριψης ενέργειας. Η υψηλή απόρριψη ενέργειας ουσιαστικά προδίδει την εγκατάσταση υπερβολικά μεγάλης ισχύος των μονάδων Α.Π.Ε. και δυσανάλογα μικρής χωρητικότητας των μονάδων αποθήκευσης. Ενδεχομένως, επίσης, να συνεπάγεται ότι ο στόχος της μεγιστοποίησης της ετήσιας διείσδυσης των μονάδων Α.Π.Ε. θα πρέπει να προσεγγιστεί εναλλακτικά με την εγκατάσταση και δεύτερης τεχνολογίας Α.Π.Ε. ή με την επανασχεδίαση του σταθμού με καθολική αντικατάσταση της αρχικής τεχνολογίας Α.Π.Ε. με κάποια εναλλακτική. Το ίδιο, βεβαίως, θα μπορούσε να ισχύει και για τη μονάδα αποθήκευσης.

3.7.2. Οικονομική βελτιστοποίηση διαστασιολόγησης υβριδικών σταθμών

Η περίπτωση οικονομικής βελτιστοποίησης έχει να κάνει με δύο διαφορετικές προσεγγίσεις:

A. Βελτιστοποίηση επενδυτικών δεικτών του έργου

Τέτοιοι μπορεί να είναι ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης (internal rate of return – I.R.R.), η καθαρή παρούσα αξία (net present value – N.P.V.), η άτοκη και η έντοκη περίοδος αποπληρωμής και η απόδοση του συνόλου της επένδυσης ή των ιδίων κεφαλαίων (return on investment – R.O.I. και return on equity – R.O.E. αντίστοιχα). Η βελτιστοποίηση του υβριδικού σταθμού με κριτήριο την αύξηση της επενδυτικής απόδοσης του έργου εφαρμόζεται σε περιπτώσεις συνήθως μεγάλων υβριδικών σταθμών και, γενικότερα, σε περιπτώσεις που το έργο κατασκευάζεται με βασικό στόχο την επένδυση κεφαλαίων. Τα περισσότερα έργα ηλεκτροπαραγωγής από Α.Π.Ε. που έχουν κατασκευαστεί και λειτουργούν σήμερα εμπίπτουν σε αυτή την κατηγορία.

Ο υπολογισμός των επενδυτικών δεικτών του έργου εκτελείται πάντα ως προς τη χρηματοροή των ετήσιων καθαρών κερδών. Η διαδικασία υπολογισμού έχει, συνοπτικά, ως εξής:

1. Αρχικά υπολογίζονται τα ετήσια ακαθάριστα έσοδα της επένδυσης, τα οποία, συνήθως, προκύπτουν από την πώληση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Σε κάποιες περιπτώσεις έσοδα προκύπτουν και από τη διαθεσιμότητα της εγγυημένης ισχύος του υβριδικού σταθμού. Οι τιμές πώλησης της εγγυημένης ενέργειας και διαθεσιμότητας εγγυημένης ισχύος καθορίζονται με βάση την τιμολογιακή πολιτική του κάθε κράτους για την παραγωγή ενέργειας από Α.Π.Ε. Στην Ελλάδα σήμερα ισχύουν σταθερές τιμές (feed in tariff) πώλησης ενέργειας και ισχύος από υβριδικούς σταθμούς, οι οποίες διαμορφώνονται με βάση το υφιστάμενο ειδικό κόστος παραγωγής είτε του ηπειρωτικού, είτε των αυτόνομων νησιωτικών συστημάτων, ανάλογα με την περιοχή εγκατάστασης του σταθμού.
2. Στη συνέχεια υπολογίζονται τα ετήσια λειτουργικά έξοδα του έργου, τα οποία, συνήθως, συνίστανται από:
 - ανταποδοτικά τέλη προς τους οικείους Οργανισμούς Τοπικής Αυτοδιοίκησης, τα οποία καθορίζονται ως ένα ποσοστό επί των ακαθάριστων εσόδων του έργου (στην Ελλάδα σήμερα τούτο είναι 3%),
 - έξοδα συντήρησης εξοπλισμού,
 - ετήσιες δόσεις αποπληρωμής δανείων που πιθανώς ελήφθησαν για την κατασκευή του έργου,
 - ασφάλεια εξοπλισμού,
 - μισθοδοσία προσωπικού,
 - ενοίκια γης και χώρων,
 - λοιπά λειτουργικά έξοδα,
 - φόροι.
3. Αφαιρώντας από τα αρχικά ακαθάριστα έσοδα το σύνολο των λειτουργικών εξόδων, προκύπτουν τελικά τα ετήσια καθαρά κέρδη του έργου.
4. Ο υπολογισμός των καθαρών κερδών εκτελείται για το σύνολο της διάρκειας ζωής του έργου. Σε περιπτώσεις οικονομικής αξιολόγησης επενδύσεων, ο υπολογισμός εκτελείται συνήθως για διάρκεια 20 ή 25 ετών.
5. Οι οικονομικοί δείκτες της επένδυσης υπολογίζονται επί της χρηματοροής των καθαρών κερδών και για το σύνολο της χρονικής περιόδου επί της οποίας εκτελείται η επενδυτική αξιολόγηση του έργου. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι σχέσεις υπολογισμού χαρακτηριστικών οικονομικών δεικτών:
 - Καθαρή παρούσα αξία (net present value – N.P.V.):

$$NPV = \sum_{t=1}^N \left(\frac{K_t}{(1+i)^t} \right) - A.K. \quad (3.48)$$

όπου K_t τα καθαρά κέρδη του έργου κατά το έτος t , i το επιτόκιο αναγωγής, N το σύνολο των ετών επί των οποίων εκτελείται η οικονομική αξιολόγηση και $A.K.$ το ύψος της επένδυσης. Η

καθαρή παρούσα αξία εκφράζει τα αθροιστικά καθαρά κέρδη που θα αφήσει το έργο σε ένα σύνολο ετών λειτουργίας, ανηγμένων στην παρούσα αξία. Είναι προφανές ότι η αξιολόγηση μιας επένδυσης με βάση την καθαρή παρούσα αξία προϋποθέτει τη γνώση και του ύψους της επένδυσης.

Στην περίπτωση που στη σχέση 3.48 αντί του συνολικού αρχικού κεφαλαίου της επένδυσης Α.Κ. εισαχθεί η ίδια συμμετοχή Ι.Κ. του επενδυτή στο χρηματοδοτικό σχήμα, τότε η καθαρή παρούσα αξία ορίζεται ως προς τα ίδια κεφάλαια της επένδυσης.

- Εσωτερικός βαθμός απόδοσης (internal rate of return – I.R.R.):

Ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης (I.R.R.) είναι το επιτόκιο αναγωγής το οποίο μηδενίζει την καθαρή παρούσα αξία της επένδυσης:

$$NPV = \sum_{t=1}^N \left(\frac{K_t}{(1 + I.R.R.)^t} \right) - A.K. = 0 \quad (3.49)$$

Καθώς το επιτόκιο αναγωγής διαμορφώνεται κυρίως από τα επιτόκια καταθέσεων, ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης ουσιαστικά περιγράφει ένα θεωρητικό επιτόκιο καταθέσεων για το οποίο το απαιτούμενο κεφάλαιο επένδυσης θα είχε την ίδια απόδοση με την εξεταζόμενη επένδυση. Για παράδειγμα, αν ο I.R.R. μιας επένδυσης ισούται με 10%, τούτο σημαίνει ότι η απόδοση των κεφαλαίων επένδυσης είναι αντίστοιχη τραπεζικών καταθέσεων με επιτόκιο 10%. Είναι ευνόητο ότι ο I.R.R. αποτελεί ένα χαρακτηριστικό δείκτη επενδυτικής αξιολόγησης ενός έργου, ο οποίος είναι αρκετός για να δώσει συμπεράσματα σχετικά με την επενδυτική απόδοση του έργου, χωρίς να απαιτείται η γνώση κάποιου άλλου μεγέθους.

Στην περίπτωση που στη σχέση 3.49 αντί του συνολικού αρχικού κεφαλαίου της επένδυσης Α.Κ. εισαχθεί η ίδια συμμετοχή Ι.Κ. του επενδυτή στο χρηματοδοτικό σχήμα, τότε ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης ορίζεται ως προς τα ίδια κεφάλαια της επένδυσης.

- Περίοδος αποπληρωμής (payback period) και έντοκη περίοδος αποπληρωμής (discounted payback period):

Η περίοδος αποπληρωμής προκύπτει κατά τη χρονική στιγμή t_p που το άθροισμα των καθαρών κερδών της επένδυσης ισούται με το αρχικό κεφάλαιο της επένδυσης. Συνεπώς η περίοδος αποπληρωμής υπολογίζεται, επιλύοντας την ακόλουθη εξίσωση ως προς t_p :

$$\sum_{t=1}^{t_p} K_t - A.K. = 0. \quad (3.50)$$

Η έντοκη περίοδος αποπληρωμής προκύπτει κατά τη χρονική στιγμή t_p που το άθροισμα των καθαρών κερδών της επένδυσης των ανηγμένων στην παρούσα αξία ισούται με το αρχικό κεφάλαιο της επένδυσης. Συνεπώς η έντοκη περίοδος αποπληρωμής υπολογίζεται επιλύοντας την ακόλουθη εξίσωση ως προς t_p :

$$\sum_{t=1}^{t_p} \left(\frac{K_t}{(1+i)^t} \right) - A.K. = 0. \quad (3.51)$$

Στην περίπτωση που στις σχέσεις 3.50 και 3.51 αντί του συνολικού αρχικού κεφαλαίου της επένδυσης Α.Κ. εισαχθεί η ίδια συμμετοχή Ι.Κ. του επενδυτή στο χρηματοδοτικό σχήμα, τότε οι περίοδοι αποπληρωμής ορίζονται ως προς τα ίδια κεφάλαια της επένδυσης.

Οι περίοδοι αποπληρωμής αποτελούν χαρακτηριστικούς δείκτες επενδυτικής αξιολόγησης ενός έργου, από τους οποίους συνάγονται ολοκληρωμένα συμπεράσματα σχετικά με την επενδυτική απόδοση του έργου, χωρίς να απαιτείται η γνώση κάποιου άλλου μεγέθους.

- Απόδοση επένδυσης (return on investment – R.O.I.):

Η απόδοση της επένδυσης υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$R.O.I. = \frac{\sum_{t=1}^N \left(\frac{K_t}{(1+i)^t} \right)}{A.K.} \quad (3.52)$$

Η απόδοση της επένδυσης ουσιαστικά εκφράζει τα ποσοστιαία κέρδη της επένδυσης ανά μονάδα κεφαλαίου επένδυσης.

- Απόδοση ιδίων κεφαλαίων επένδυσης (return on equities – R.O.E.):

Η απόδοση των ιδίων κεφαλαίων της επένδυσης υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$R.O.E. = \frac{\sum_{t=1}^N \left(\frac{K_t}{(1+i)^t} \right)}{I.K.} \quad (3.53)$$

Η απόδοση των ιδίων κεφαλαίων της επένδυσης ουσιαστικά εκφράζει τα ποσοστιαία κέρδη της επένδυσης ανά μονάδα ιδίων κεφαλαίων επένδυσης.

Η επαναληπτική διαδικασία διαστασιολόγησης του υβριδικού σταθμού ολοκληρώνεται με την επιλογή της σύνθεσης των συνιστωσών του, με την οποία επιτυγχάνεται βελτιστοποίηση των ανωτέρω δεικτών, δηλαδή μεγιστοποίηση των N.P.V., I.R.R., R.O.I., R.O.E. και ελαχιστοποίηση των περιόδων αποπληρωμής.

B. Ελαχιστοποίηση του κόστους κατασκευής και λειτουργίας του έργου.

Σε αυτή την περίπτωση συνήθως υπολογίζεται το κόστος κύκλου ζωής του υβριδικού σταθμού (life cycle cost – L.C.C.), στο οποίο συμπεριλαμβάνεται το αρχικό κόστος προμήθειας του εξοπλισμού και κατασκευής του σταθμού, καθώς και το λειτουργικό κόστος του σταθμού για όλη τη διάρκεια ζωής του. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε περιπτώσεις που ο υβριδικός σταθμός δεν κατασκευάζεται επενδυτικά, ωστόσο μας ενδιαφέρει η κάλυψη συγκεκριμένων ενεργειακών καταναλώσεων με το ελάχιστο δυνατό κόστος. Τέτοιες περιπτώσεις είναι οι υβριδικοί σταθμοί μικρού και πολύ μικρού μεγέθους, που αναπτύσσονται σε απομονωμένες καταναλώσεις μικρού μεγέθους. Για παράδειγμα, ένα κτηνοτρόφος ενδιαφέρεται για την κάλυψη των απαιτήσεων σε ηλεκτρική ενέργεια της κτηνοτροφικής μονάδας του με υβριδικό σταθμό που θα παρουσιάζει το ελάχιστο δυνατό συνολικό αρχικό και λειτουργικό κόστος.

Το κόστος κύκλου ζωής για την περίπτωση υβριδικών σταθμών μικρού μεγέθους μπορεί να προσεγγιστεί από την ακόλουθη σχέση [40]:

$$LCC = C_{RES} + C_{inst.} + C_{maint.} + C_B + C_{inv} + C_{DG-S} \quad (3.54)$$

όπου:

- C_{RES} :

Το αρχικό κόστος προμήθειας εξοπλισμού των μονάδων Α.Π.Ε. του υβριδικού σταθμού. Το κόστος αυτό μπορεί να προσεγγιστεί με μεγάλη ακρίβεια με βάση κάποιο ειδικό κόστος αγοράς, ανά μονάδα ισχύος. Για παράδειγμα, στην περίπτωση μικρών ανεμογεννητριών και φωτοβολταϊκών σταθμών μικρού μεγέθους, στην ελληνική αγορά ισχύουν οι ακόλουθες τιμές:

μικρές ανεμογεννήτριες έως 5kW:	2.000 – 2.500€/kW
μικρές ανεμογεννήτριες άνω των 5kW:	1.500€/kW

φωτοβολταϊκά πλαίσια: 1.000€/kW.

- $C_{inst.}$:

Το κόστος εγκατάστασης του υβριδικού σταθμού. Καθώς το κόστος αυτό διαμορφώνεται κυρίως από το κόστος εγκατάστασης των μονάδων Α.Π.Ε., μπορεί να προσεγγιστεί ως ένα ποσοστό του κόστους προμήθειας του εξοπλισμού των μονάδων Α.Π.Ε. Συνήθως το ποσοστό αυτό είναι της τάξης του 5 – 8%. Συνεπώς, το κόστος εγκατάστασης του υβριδικού σταθμού μπορεί να προσεγγιστεί από τη σχέση:

$$C_{inst.} = a_{inst.} \cdot C_{RES}, a_{inst.} = 5 - 8\% \quad (3.55)$$

- $C_{maint.}$:

Το συνολικό κόστος συντήρησης του υβριδικού σταθμού σε όλη τη διάρκεια ζωής του, ανηγμένο στην παρούσα αξία. Καθώς το ετήσιο κόστος συντήρησης του υβριδικού σταθμού διαμορφώνεται κυρίως από το κόστος συντήρησης των μονάδων Α.Π.Ε., δύναται να προσεγγιστεί επίσης ως ένα ποσοστό του κόστους προμήθειας του εξοπλισμού των μονάδων Α.Π.Ε. Το ποσοστό αυτό λαμβάνεται της τάξης του 2%:

$$C_{maint,an} = a_{maint.} \cdot C_{RES}, a_{maint.} = 2\% \quad (3.56)$$

Το άθροισμα του ετήσιου κόστους συντήρησης για όλα τα έτη λειτουργίας του υβριδικού σταθμού, ανηγμένο στην παρούσα αξία προκύπτει από τη σχέση:

$$C_{maint.} = \sum_{t=1}^N \frac{a_{maint.} \cdot C_{RES}}{(1+i)^t} = a_{maint.} \cdot C_{RES} \cdot \sum_{t=1}^N (1+i)^{-t} \quad (3.57)$$

- C_B :

Το κόστος αγοράς των συσσωρευτών. Το κόστος αυτό προκύπτει μετά από έρευνα αγοράς. Ενδεικτικά θα μπορούσε να αναφερθεί ότι ένα στοιχείο συσσωρευτή οξέος μολύβδου χωρητικότητας 3.000Ah κοστίζει περίπου 1.000€. Τα στοιχεία με χαμηλότερη χωρητικότητα κοστίζουν λιγότερο, όχι όμως αναλογικά.

Η διάρκεια ζωής των συσσωρευτών οξέος μολύβδου είναι μικρότερη από τη διάρκεια ζωής του υβριδικού σταθμού. Στην καλύτερη περίπτωση, υπό πρότυπες συνθήκες λειτουργίας αναφορικά με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και το βάθος εκφόρτισης, τούτη μπορεί να φτάσει έως 6 – 7 έτη. Συνεπώς, στο κόστος προμήθειας των συσσωρευτών, θα πρέπει να συνυπολογιστούν και τα κόστη των αντικαταστάσεων κατά τις χρονικές στιγμές που θα προκύψουν. Αν C_{B0} είναι το κόστος προμήθειας των συσσωρευτών κατά τη χρονική στιγμή εγκατάστασης του υβριδικού σταθμού, το συνολικό κόστος C_B των συσσωρευτών για όλη τη διάρκεια ζωής του υβριδικού σταθμού θα είναι:

$$C_B = C_{B0} \cdot \left(1 + \sum_{t=1}^n (1+i)^{-N_t} \right) \quad (3.58)$$

όπου n είναι ο συνολικός αριθμός των αντικαταστάσεων των συσσωρευτών σε όλη τη διάρκεια ζωής του υβριδικού σταθμού και N_t είναι τα έτη στα οποία εκτελούνται οι αντικαταστάσεις.

- $C_{inv.}$:

Το κόστος των αντιστροφών ισχύος (inverter), το οποίο εξαρτάται από το μέγεθος της συσκευής και θα πρέπει να αναζητηθεί στο εμπόριο. Ενδεικτικά παρατίθενται οι ακόλουθες τιμές:

κόστος αντιστροφέα ισχύος 3kVA, 24V/220V	3.000€
κόστος αντιστροφέα ισχύος 8kVA, 24V/220V	4.500€
κόστος αντιστροφέα ισχύος 30kVA, 24V/220V	10.000€.

- C_{DG} :

Στο κόστος αυτό συμπεριλαμβάνονται το αρχικό κόστος προμήθειας της μονάδας εφεδρείας C_{DG0} και το κόστος λειτουργίας της για όλη τη διάρκεια ζωής του υβριδικού σταθμού C_{FC} , το οποίο πρακτικά διαμορφώνεται από το κόστος κατανάλωσης καυσίμου:

$$C_{DG} = C_{DG0} + C_{FC} \quad (3.59)$$

Το κόστος προμήθειας της μονάδας εφεδρείας, σε περίπτωση μικρών υβριδικών σταθμών, εξαρτάται από το μέγεθος του σταθμού. Ενδεικτικά παρατίθενται οι ακόλουθες τιμές:

ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος 10kVA, 220V, 50Hz	4.500 €
ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος 100kVA, 220V, 50Hz	20.000 €.

Το συνολικό κόστος κατανάλωσης καυσίμου C_{FC} από τη μονάδα εφεδρείας του υβριδικού σταθμού για όλη τη διάρκεια ζωής του, ανηγμένο στην παρούσα αξία, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$C_{FC} = V_{FC} \cdot c_{FC} \sum_{t=1}^N \frac{(1+FPIR)^t}{(1+i)^t} \quad (3.60)$$

όπου

V_{FC} :	ο ετήσιος όγκος κατανάλωσης καυσίμου σε lt (πρακτικά ελαφρύ καυσίμου)
c_{FC} :	η τιμή πώλησης του καυσίμου κατά την έναρξη λειτουργίας του υβριδικού σταθμού €/lt
FPIR:	έναν ετήσιο συντελεστή αύξησης ή, γενικότερα, μεταβολής, της τιμής του καυσίμου
i :	το επιτόκιο αναγωγής
N :	η διάρκεια ζωής του υβριδικού σταθμού.

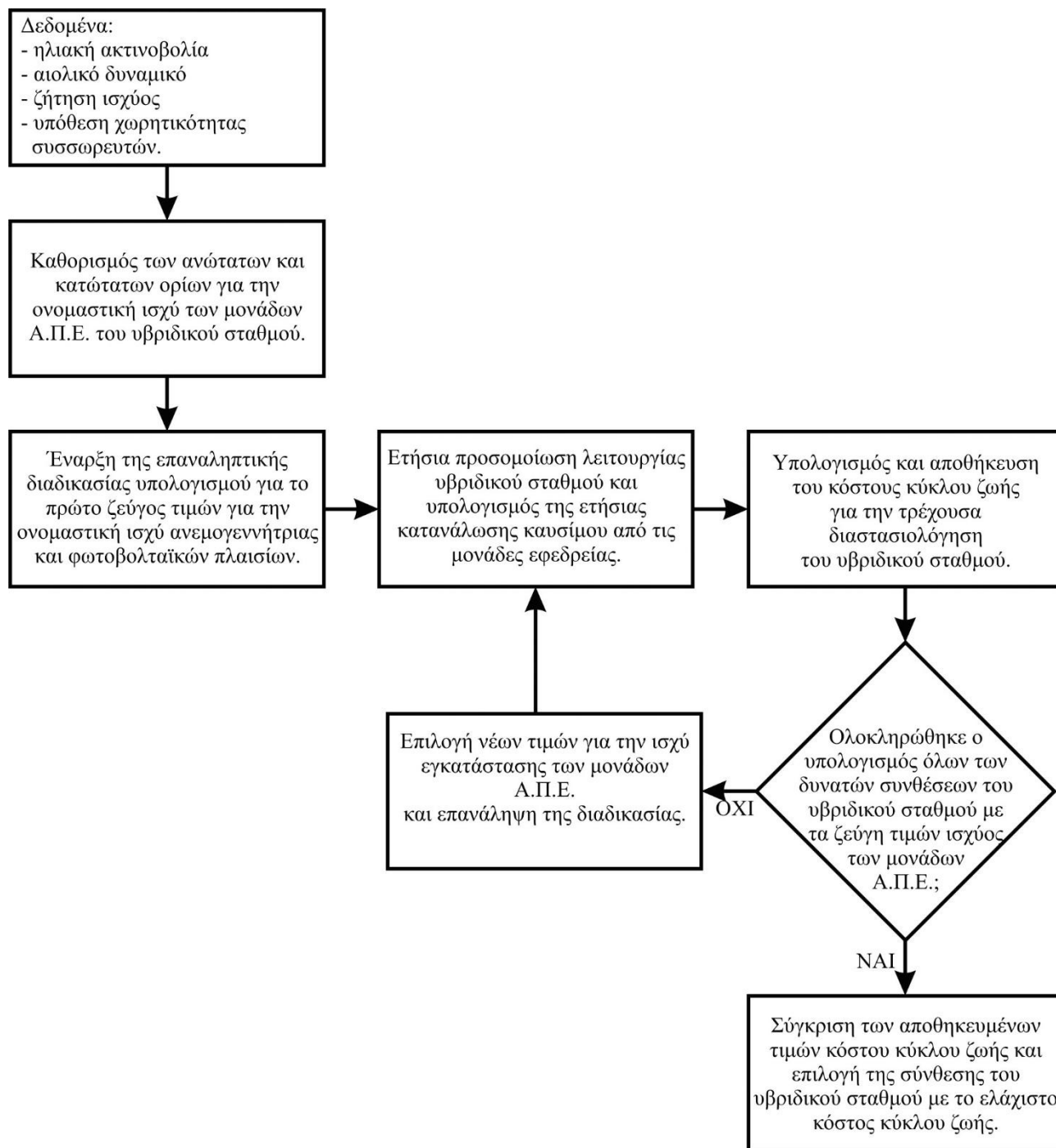
Από την ανωτέρω σχέση, προκύπτει ότι ο υπολογισμός του κόστους κύκλου ζωής προϋποθέτει τη γνώση της ετήσιας κατανάλωσης καυσίμου, η οποία μπορεί να υπολογιστεί μόνο με την προσομοίωση της ετήσιας λειτουργίας του υβριδικού σταθμού και τον υπολογισμό της ετήσιας παραγωγής ενέργειας από τις μονάδες εφεδρείας. Συνεπώς, η ετήσια λειτουργία του υβριδικού σταθμού και η συμμετοχή των μονάδων εφεδρείας στην ετήσια παραγωγή, ή, εναλλακτικά, η ετήσια διείσδυση των μονάδων Α.Π.Ε., εισέρχονται στον υπολογισμό του κόστους κύκλου ζωής με τη συνιστώσα C_{FC} .

- S :

Η εναπομένουσα αξία του υβριδικού σταθμού στο τέλος της διάρκειας ζωής του. Η τιμή της εναπομένουσας αξίας συνήθως λαμβάνεται ως ένα μικρό ποσοστό, της τάξης του 10%, της αρχικής αξίας της προμήθειας του εξοπλισμού του υβριδικού σταθμού (μονάδες Α.Π.Ε., αντιστροφείς ισχύος, συσσωρευτές και μονάδες εφεδρείας). Για λόγους ασφάλειας υπολογισμών, ενίοτε λαμβάνεται μηδενική.

Από τις συνιστώσες υπολογισμού του κόστους κύκλου ζωής, οι C_{RES} , $C_{inst.}$, C_B , C_{inv} , C_{DG0} αφορούν στο αρχικό κόστος προμήθειας και εγκατάστασης εξοπλισμού, συμπεριλαμβανομένων και των ενδιάμεσων αντικαταστάσεων των συσσωρευτών, ενώ οι συνιστώσες $C_{maint.}$ και C_{FC} αφορούν στο ετήσιο λειτουργικό κόστος του υβριδικού σταθμού.

Το κόστος κύκλου ζωής υπολογίζεται επαναληπτικά για διαφορετικές συνθέσεις του υβριδικού σταθμού. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ανεξάρτητες παράμετροι αποτελούν οι τιμές για την ονομαστική ισχύ των μονάδων Α.Π.Ε. Καθορίζονται, συνεπώς, ελάχιστες και μέγιστες τιμές για αυτές, οι οποίες, συνήθως, για μικρούς υβριδικούς σταθμούς μπορεί να είναι μικρές ανεμογεννήτριες και φωτοβολταϊκά πλαίσια. Η διαδικασία υπολογισμού του κόστους κύκλου ζωής επαναλαμβάνεται για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς των τιμών της ονομαστικής ισχύος των μονάδων Α.Π.Ε. και επιπλέον και για διαφορετικές τιμές της χωρητικότητας των συσσωρευτών. Με την ολοκλήρωση των επαναληπτικών υπολογισμών ως βέλτιστη σύνθεση λαμβάνεται εκείνη με το ελάχιστο κόστος κύκλου ζωής. Ο αλγόριθμος επαναληπτικής υπολογιστικής διαδικασίας βελτιστοποίησης παρουσιάζεται στο σχήμα 3.26.



Σχήμα 3.26: Αλγόριθμος επαναληπτικής υπολογιστικής διαδικασίας βελτιστοποίησης διαστασιολόγησης υβριδικού σταθμού με κριτήριο το κόστος κύκλου ζωής.

Είναι προφανές ότι το κόστος κύκλου ζωής αποτελεί ένα ολοκληρωμένο κριτήριο οικονομικής αξιολόγησης του έργου, καθώς συμπεριλαμβάνει τόσο το αρχικό κόστος προμήθειας εξοπλισμού και εγκατάστασής του, όσο και όλα τα λειτουργικά κόστη του υβριδικού σταθμού για το σύνολο της διάρκειας ζωής του. Ουσιαστικά περιγράφει το συνολικό κόστος παραγωγής ενέργειας από τον υβριδικό σταθμό για όλη τη διάρκεια ζωής του, ανηγμένο στην παρούσα αξία. Συνεπώς αποτελεί ένα αντικειμενικό κριτήριο αξιολόγησης και διαστασιολόγησης του έργου, στην περίπτωση που αυτό που τελικά ενδιαφέρει είναι η κάλυψη συγκεκριμένων ενεργειακών αναγκών με το ελάχιστο δυνατό κόστος.

Ανάλογα με τη σύνθεση του υβριδικού σταθμού και τον τρόπο λειτουργίας του, ενδεχομένως να υπεισέρχονται στον υπολογισμό του κόστους κύκλου ζωής του επιπλέον συνιστώσες. Άρα καλό θα ήταν ο

ανωτέρω τρόπος προσέγγισης του κόστους κύκλου ζωής υβριδικού σταθμού να ληφθεί ως ενδεικτικός και όχι ως δεσμευτικός.

Μία εναλλακτική προσέγγιση είναι η βελτιστοποίηση της διαστασιολόγησης όχι με το κόστος κύκλου ζωής, αλλά με το ειδικό ετήσιο κόστος παραγωγής. Το ειδικό ετήσιο κόστος παραγωγής ορίζεται ως το πηλίκο του συνολικού ετήσιου κόστους παραγωγής του υβριδικού σταθμού προς την ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στο συνολικό ετήσιο κόστος παραγωγής, πέραν του ετήσιου λειτουργικού κόστους, συνυπολογίζεται ως απόσβεση εξοπλισμού και το αρχικό κόστος προμήθειας και εγκατάστασης του εξοπλισμού του υβριδικού σταθμού. Η πιο απλή μέθοδος υπολογισμού του ετήσιου ειδικού κόστους παραγωγής c_p του υβριδικού σταθμού δίνεται από τη σχέση:

$$c_p = \frac{A.K./N + \Lambda.K.}{E_{el}} \quad (3.61)$$

όπου $A.K.$ είναι το αρχικό κόστος προμήθειας και εγκατάστασης εξοπλισμού, N είναι η διάρκεια ζωής του υβριδικού σταθμού σε έτη, $\Lambda.K.$ είναι το ετήσιο λειτουργικό κόστος του υβριδικού σταθμού (συντήρηση και κατανάλωση καυσίμου) και E_{el} είναι η ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στην περίπτωση που το ετήσιο λειτουργικό κόστος του υβριδικού σταθμού διαφέρει από έτος σε έτος, στην ανωτέρω σχέση δύναται να ληφθεί το μέσο ετήσιο λειτουργικό κόστος για τη συνολική διάρκεια ζωής του υβριδικού σταθμού. Κατά τα λοιπά, η διαδικασία υπολογισμού ακολουθεί την ανωτέρω περιγραφόμενη μεθοδολογία.

3.8. Παραδείγματα διαστασιολόγησης υβριδικών σταθμών

Στην παρούσα ενότητα θα παρουσιαστούν δύο παραδείγματα βελτιστοποίησης διαστασιολόγησης υβριδικών σταθμών, ενός μεγάλου μεγέθους και ενός πολύ μικρού μεγέθους. Ο υβριδικός σταθμός μεγάλου μεγέθους θα μελετηθεί για το Σ.Η.Ε. Ρόδου και θα αποτελείται από υπεράκτιο αιολικό πάρκο και αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό. Η διαστασιολόγηση του υβριδικού σταθμού θα γίνει με σκοπό τη βελτιστοποίηση των οικονομικών δεικτών της συνεπαγόμενης επένδυσης. Ο υβριδικός σταθμός μικρού μεγέθους θα γίνει για τον Άγιο Ευστράτιο και θα αποτελείται από ένα μικρό αιολικό πάρκο, ένα φωτοβολταϊκό σταθμό και συστοιχίες ηλεκτροχημικών συσσωρευτών οξέος μολύβδου. Η διαστασιολόγηση του μικρού υβριδικού σταθμού θα γίνει με κριτήρια ενεργειακά, δηλαδή τη μεγιστοποίηση της ετήσιας διείσδυσης ενέργειας από τις μονάδες Α.Π.Ε. σε ποσοστά άνω του 90%. Και στις δύο περιπτώσεις οι υβριδικοί σταθμοί εισάγονται με σκοπό τη μεγιστοποίηση της διείσδυσης Α.Π.Ε. σε όλο το εικοσιτετράωρο, χωρίς δηλαδή να περιορίζεται η λειτουργία τους μόνο κατά τις ώρες αιχμής. Οι αλγόριθμοι λειτουργίας των δύο υβριδικών σταθμών έχουν περιγραφεί στις αντίστοιχες ενότητες που προηγήθηκαν.

3.8.1. Διαστασιολόγηση υβριδικού σταθμού Ρόδου

3.8.1.a. Σκοπός της διαστασιολόγησης

Η υπολογιστική διαδικασία αποσκοπεί στη διαστασιολόγηση του υβριδικού σταθμού με κριτήριο τη βελτιστοποίηση των οικονομικών δεικτών της επένδυσης. Συγκεκριμένα θα υπολογιστούν και θα σχεδιαστούν αντίστοιχα διαγράμματα μεταβολής της περιόδου αποπληρωμής και του εσωτερικού βαθμού απόδοσης (I.R.R.).

3.8.1.β. Ανεξάρτητη παράμετρος διαστασιολόγησης

Η ανεξάρτητη παράμετρος διαστασιολόγησης είναι η ονομαστική ισχύς του αιολικού πάρκου. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα επιλέγεται η εγκατάσταση υπεράκτιου αιολικού πάρκου με ανεμογεννήτριες ονομαστικής ισχύος 5MW. Συνεπώς, η διαδικασία βελτιστοποίησης θα εκτελεστεί επαναληπτικά με βήμα αύξησης της ονομαστικής ισχύος του αιολικού πάρκου 5MW.

3.8.1.γ. Δεδομένα

Τα απαιτούμενα δεδομένα για την εκτέλεση της υπολογιστικής διαδικασίας είναι:

1. η ετήσια χρονοσειρά μέσω ωριαίων τιμών ζήτησης ισχύος για το Σ.Η.Ε. Ρόδου,
2. η ετήσια χρονοσειρά μέσω ωριαίων τιμών παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος από το αιολικό πάρκο,
3. η χωρητικότητα της άνω δεξαμενής, η οποία καθορίζεται από τη μορφολογία της θέσης εγκατάστασης,
4. το διαθέσιμο ύψος υδατόπτωσης και το απαιτούμενο ύψος άντλησης,
5. οι καμπύλες βαθμού απόδοσης των υδροστροβίλων και των αντλιών που θα χρησιμοποιηθούν,
6. το μήκος των αγωγών μεταφοράς νερού.

Στον πίνακα 3.8 παρουσιάζονται βασικά χαρακτηριστικά στοιχεία για τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας στη Ρόδο το 2005 και το 2011. Παρατηρείται η μείωση στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία οφείλεται στην οικονομική κρίση που μεσολάβησε. Η ετήσια χρονοσειρά μέσω ωριαίων τιμών ζήτησης ισχύος στη Ρόδο για το 2011 έχει παρουσιαστεί στο σχήμα 2.6 του Κεφαλαίου 2.

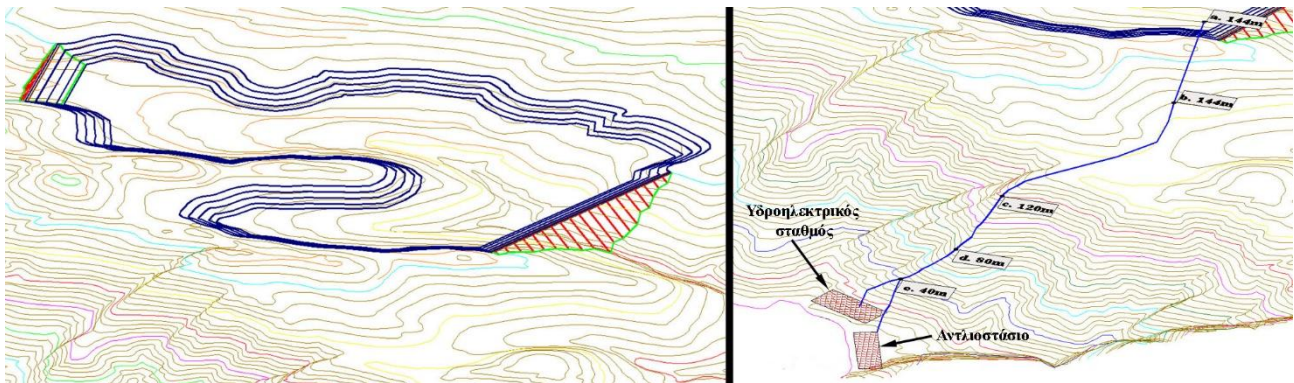
Μέγεθος	2005	2011	Ποσοστό μείωσης (%)
Μέγιστη ετήσια ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος (MW)	218,72	176,40	19,35
Ελάχιστη ετήσια ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος (MW)	38,94	38,70	0,62
Ετήσια ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας (MWh)	875.581,37	789.168,37	9,87
Μέση ημερήσια ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας (MWh)	2.398,85	2.162,11	9,87

Η ετήσια χρονοσειρά παραγωγής αιολικής ισχύος προσεγγίζεται με βάση τη λήψη μετρήσεων αιολικού δυναμικού από τη θέση εγκατάστασης του αιολικού πάρκου και την καμπύλη ισχύος της επιλεγμένης ανεμογεννήτριας.

Στον πίνακα 3.9 παρουσιάζονται βασικά δεδομένα σχετικά με το αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό. Τα δεδομένα αυτά αναφέρονται σε συγκεκριμένη θέση εγκατάστασης και καθορίζονται από τη μορφολογία της. Η θέση αυτή εντοπίζεται στη νοτιοδυτική ακτογραμμή της Ρόδου.

Διαθέσιμο μανομετρικό υδατόπτωσης (m)	135,85 – 150,85
Απαιτούμενο μανομετρικό άντλησης (m)	146,66 – 161,66
Μήκος υδραυλικού δικτύου υδατόπτωσης (m)	856
Μήκος υδραυλικού δικτύου άντλησης (m)	877
Μέση απόδοση υδροστροβίλων	0,90
Μέση απόδοση αντλιών	0,78
Ενεργή χωρητικότητα άνω δεξαμενής (m ³)	4.554.257
Τραχύτητα σωληνώσεων (mm)	0,10

Το αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό θα κατασκευαστεί, χρησιμοποιώντας ως κάτω δεξαμενή τη θάλασσα, και θα λειτουργεί με θαλασσινό νερό. Επίσης θα λειτουργήσει με διπλές σωληνώσεις, για ανεξάρτητη λειτουργία άντλησης και υδατόπτωσης. Στο σχήμα 3.27 παρουσιάζονται τρισδιάστατες όψεις της άνω δεξαμενής και της όδευσης των αγωγών μεταφοράς θαλασσινού νερού.

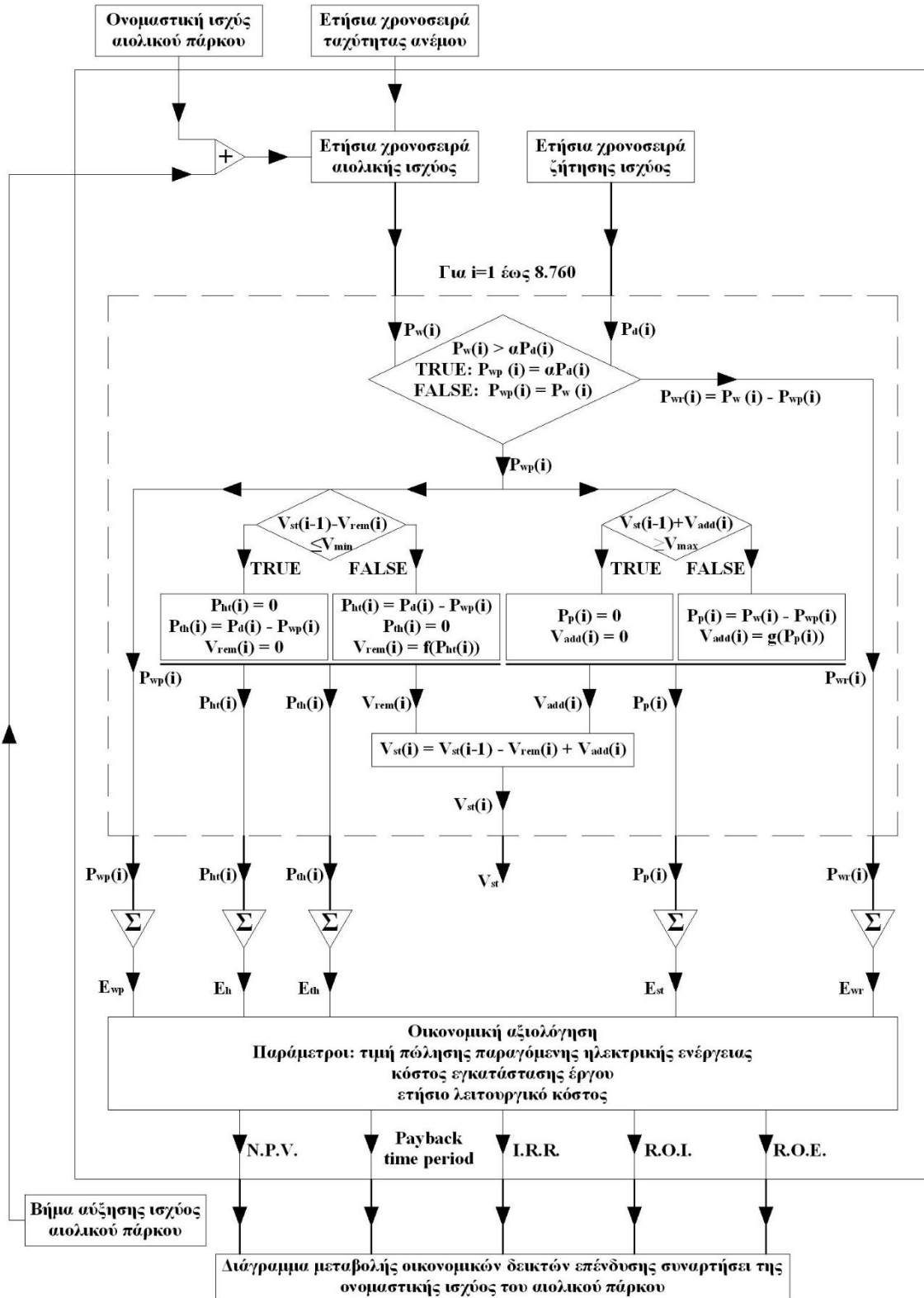


Σχήμα 3.27: Τρισδιάστατες όψεις της άνω δεξαμενής και της όδευσης των αγωγών μεταφοράς θαλασσινού νερού του αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού.

3.8.1.δ. Υπολογιστική διαδικασία

Στο σχήμα 3.28 παρουσιάζεται διάγραμμα ροής της υπολογιστικής διαδικασίας. Με βάση το σχήμα 3.28, η υπολογιστική διαδικασία, η οποία ακολουθεί τον αλγόριθμο λειτουργίας του υβριδικού σταθμού που παρουσιάστηκε στην ενότητα 3.5.1.α, εκτελείται επαναληπτικά για ετήσια χρονικά διαστήματα με μεταβαλλόμενη ονομαστική ισχύ αιολικού πάρκου. Μετά από κάθε επανάληψη της διαδικασίας, υπολογίζονται τα ακόλουθα μεγέθη:

1. η ετήσια μέγιστη μέση ωριαία ισχύς λειτουργίας υδροστροβίλων και αντλιών
2. η διάμετρος των αγωγών μεταφοράς νερού, η οποία επιλέγεται με στόχο την ελαχιστοποίηση των απωλειών ροής για την ετήσια μέγιστη διακινούμενη παροχή
3. με ολοκλήρωση των ετήσιων χρονοσειρών της διείσδυσης αιολικής ισχύος, της παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος από υδροστροβίλους και θερμοηλεκτρικές μονάδες και της ισχύος λειτουργίας των αντλιών, υπολογίζονται τα αντίστοιχα ετήσια ποσά ενέργειας
4. για κάθε ετήσια υπολογιστική επανάληψη υπολογίζονται το ετήσιο κόστος κατασκευής του έργου, το ετήσιο λειτουργικό κόστος, τα ετήσια έσοδα από την πώληση της παραγόμενης ενέργειας και, τελικά, οι οικονομικοί δείκτες της επένδυσης
5. με την ολοκλήρωση της διαδικασίας σχεδιάζονται διαγράμματα μεταβολής των οικονομικών δεικτών συναρτήσει της ανεξάρτητης παραμέτρου διαστασιολόγησης, (ονομαστική ισχύς αιολικού πάρκου).

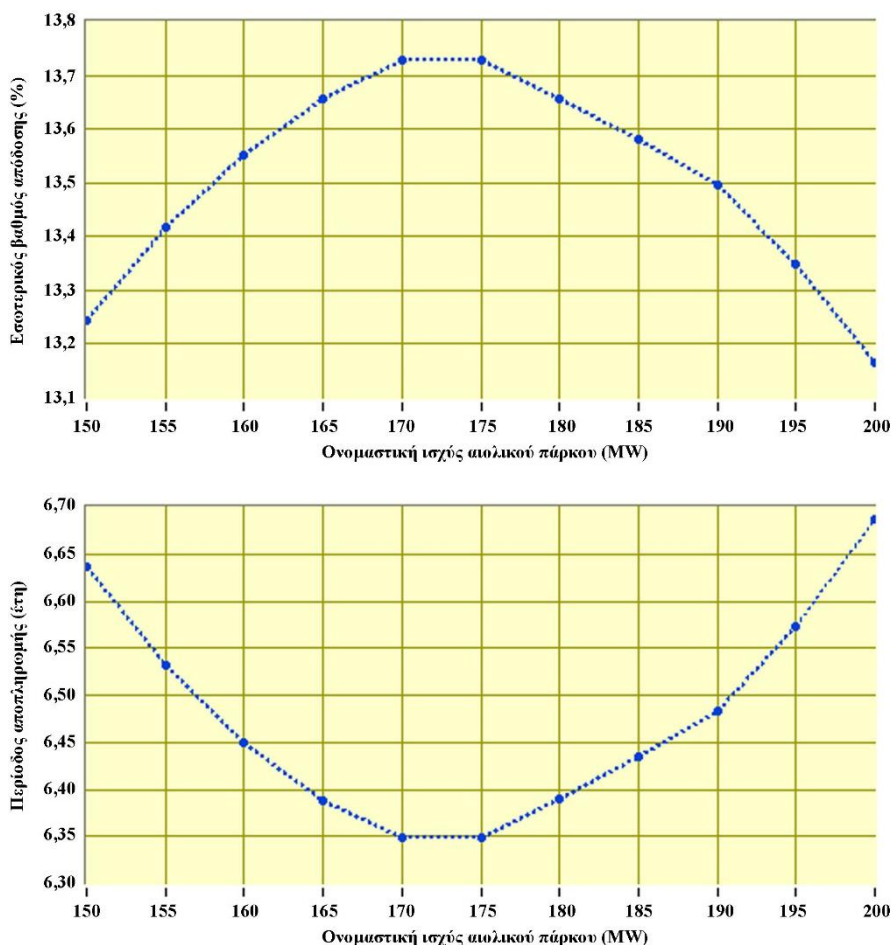


Σχήμα 3.28: Διάγραμμα ροής της υπολογιστικής διαδικασίας.

3.8.1.ε. Αποτελέσματα

Στο σχήμα 3.29 παρουσιάζεται η διακύμανση της περιόδου αποπληρωμής και του εσωτερικού βαθμού απόδοσης της επένδυσης, συναρτήσει της ανεξάρτητης παραμέτρου διαστασιοποίησης, δηλαδή της

ονομαστικής ισχύος του αιολικού πάρκου. Με βάση το σχήμα 3.29, η επένδυση βελτιστοποιείται για εγκατάσταση ονομαστικής ισχύος αιολικού πάρκου ίσης με 175MW, δηλαδή 35 ανεμογεννήτριες των 5MW.



Σχήμα 3.29: Διακύμανση της περιόδου αποπληρωμής και του εσωτερικού βαθμού απόδοσης της επένδυσης του υβριδικού σταθμού, συναρτήσει της ανεξάρτητης παραμέτρου διαστασιολόγησης.

Στον πίνακα 3.10 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα βέλτιστης διαστασιολόγησης των βασικών μεγεθών του υβριδικού σταθμού.

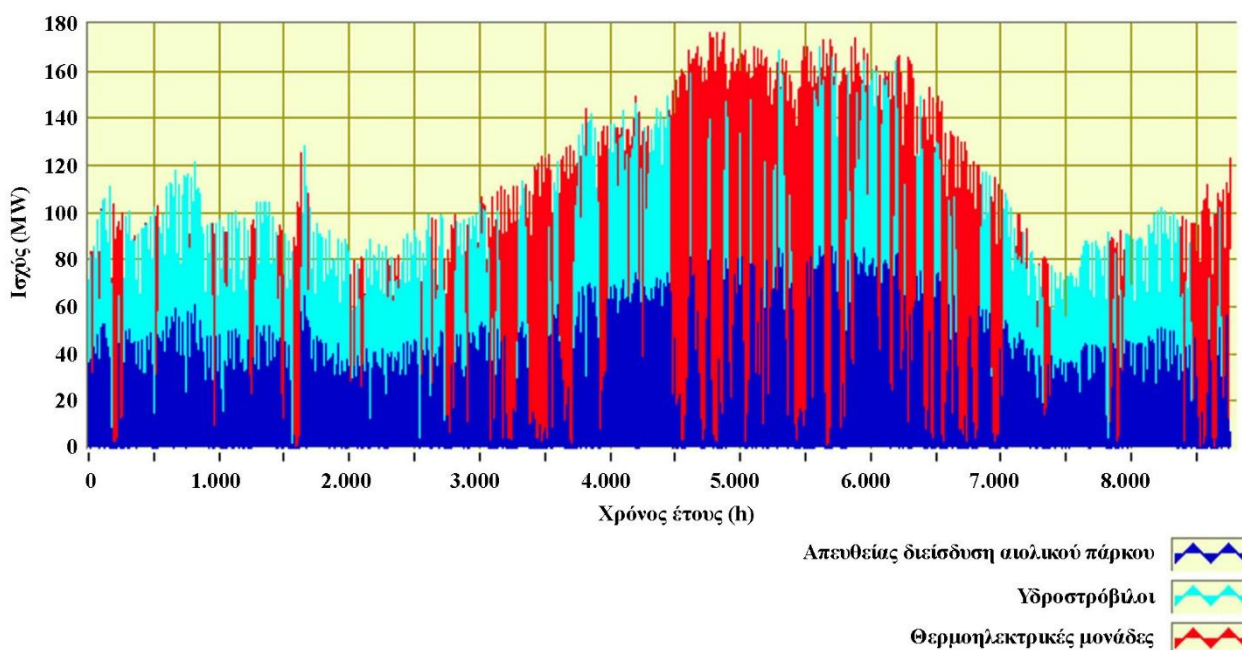
Πίνακας 3.10: Αποτελέσματα διαστασιολόγησης υβριδικού σταθμού.	
Ονομαστική ισχύς αιολικού πάρκου (MW)	175,00
Μέγιστη ετήσια παραγωγή ισχύος από υδροστρόβιλους (MW)	113,90
Μέγιστη ετήσια ισχύς λειτουργίας αντλιών (MW)	126,67
Μέγιστη ετήσια παροχή υδατόπτωσης (m^3/s)	111,23
Μέγιστη ετήσια παροχή άντλησης (m^3/s)	66,69
Ελάχιστη απαιτούμενη διάμετρος σωληνώσεων υδατόπτωσης (m)	7,20
Ελάχιστη απαιτούμενη διάμετρος σωληνώσεων άντλησης (m)	5,60
Αριθμός παράλληλων σωληνώσεων υδατόπτωσης / ονομαστική διάμετρος (mm)	20 / 2.540
Αριθμός παράλληλων σωληνώσεων άντλησης / ονομαστική διάμετρος (mm)	20 / 2.540
Μέγιστη ταχύτητα ροής υδατόπτωσης (m/s)	1,57
Μέγιστη ταχύτητα ροής άντλησης (m/s)	1,12
Μέγιστες απώλειες ροής υδατόπτωσης (m)	1,15
Μέγιστες απώλειες ροής άντλησης (m)	0,66

Για την ανωτέρω βέλτιστη διαστασιολόγηση υπολογίζονται οι ετήσιες ποσότητες ενέργειας που παρουσιάζονται στον πίνακα 3.11. Για λόγους σύγκρισης, στον πίνακα αυτό οι ετήσιες ποσότητες ενέργειας παρουσιάζονται για δύο εναλλακτικά σενάρια σχετικά με την εγκατάσταση των αγωγών μεταφοράς νερού, δηλαδή για εγκατάσταση μονής ή διπλής σωλήνωσης.

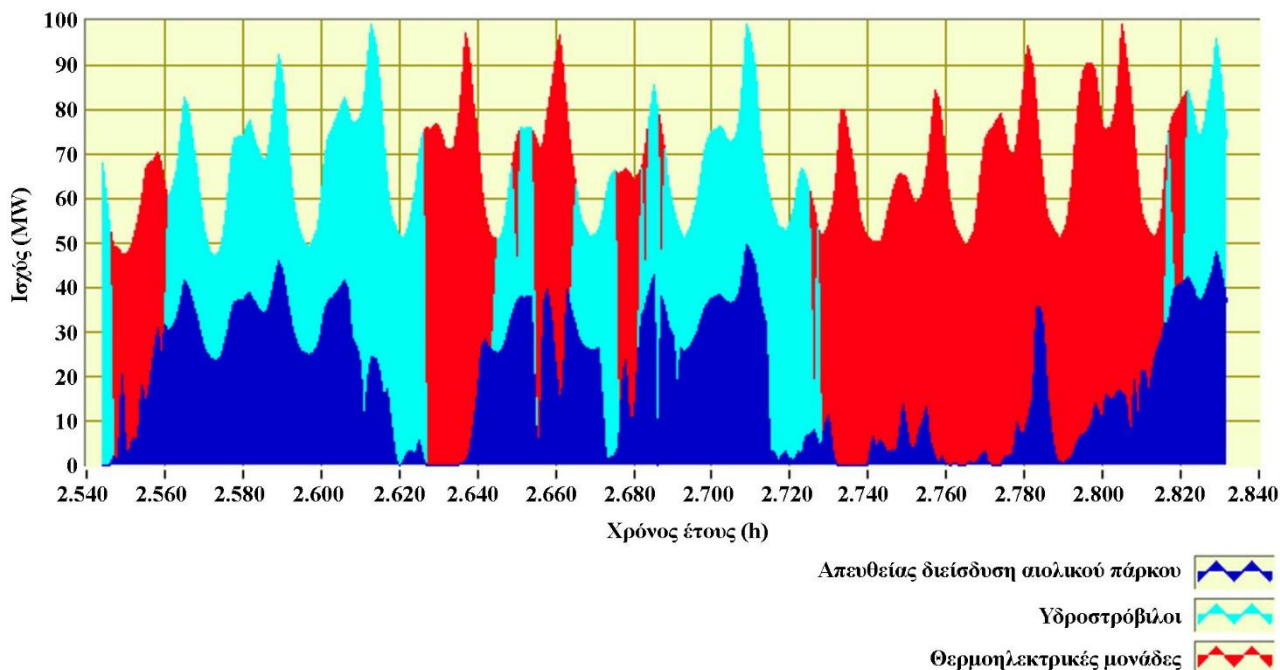
Πίνακας 3.11: Ετήσιες ποσότητες ενέργειας για τη βέλτιστη διαστασιολόγηση του υβριδικού σταθμού.		
	Διπλή σωλήνωση	Μονή σωλήνωση
Ετήσια διείσδυση αιολικής ενέργειας (MWh)	223.501,56	180.474,48
Ετήσια παραγωγή από υδροστρόβιλους (MWh)	177.886,96	147.496,60
Συνολική ετήσια διείσδυση Α.Π.Ε. (MWh)	401.388,52	327.971,08
Ετήσια παραγωγή θερμικών μονάδων (MWh)	387.779,88	461.197,32
Ετήσια αποθήκευση ενέργειας (MWh)	271.880,75	225.285,73
Ετήσια απόρριψη ενέργειας (MWh)	24.250,67	94.951,27
Αρχική ετήσια παραγωγή αιολικού πάρκου (MWh)	519.632,98	519.632,98
Ποσοστό ετήσιας απόρριψης αιολικής ενέργειας (%)	4,67	18,27
Τελικός συντελεστής απασχόλησης αιολικού πάρκου (%)	33,90	33,90
Συνολικός μέσος ετήσιος βαθμός απόδοσης αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού (%)	65,43	65,47

Από τον πίνακα 3.11 παρατηρείται ότι η εγκατάσταση διπλής σωλήνωσης επιτρέπει την αύξηση της ετήσιας διείσδυσης αιολικής ενέργειας κατά 9,3%. Επίσης, στην περίπτωση εγκατάστασης μονής σωλήνωσης, η ετήσια απόρριψη αιολικής ενέργειας εκτιμάται στο 18,96%, ως προς την αρχική ετήσια παραγωγή από το αιολικό πάρκο. Το ποσοστό αυτό μειώνεται στο 4,67% με την εγκατάσταση διπλής σωλήνωσης. Η παραγωγή των θερμοηλεκτρικών μονάδων περιορίζεται στο 49,14% με την εγκατάσταση διπλής σωλήνωσης και στο 58,44% με την εγκατάσταση μονής σωλήνωσης.

Στο σχήμα 3.30 παρουσιάζεται η ετήσια σύνθεση παραγωγής ισχύος στο Σ.Η.Ε. Ρόδου με τον υβριδικό σταθμό. Στο σχήμα 3.31 παρουσιάζεται η σύνθεση παραγωγής ισχύος από 17/4 έως 28/4. Το ποσοστό απευθείας στιγμιαίας διείσδυσης αιολικής ισχύος περιορίζεται στο 50% της τρέχουσα ζήτησης.



Σχήμα 3.30: Ετήσια σύνθεση παραγωγής ισχύος Ρόδου με τον υβριδικό σταθμό.



Σχήμα 3.31: Σύνθεση παραγωγής ισχύος Ρόδου με τον υβριδικό σταθμό από 17/4 έως 28/4.

3.8.1.στ. Οικονομικές παραδοχές

Με δεδομένο το ότι η διαστασιολόγηση του υβριδικού σταθμού εκτελείται με κριτήριο τη βελτιστοποίηση των οικονομικών δεικτών της επένδυσης, είναι απαραίτητο να γίνουν σχετικές παραδοχές αναφορικά με οικονομικές παραμέτρους του έργου. Καταρχήν απαιτείται η εκτίμηση του αρχικού κόστους του υβριδικού σταθμού. Τούτη βασίζεται στην εκτίμηση του ειδικού κόστους ανά μονάδα ισχύος για κάποιες από τις συνιστώσες του έργου και στον αναλυτικό υπολογισμό των λοιπών συνιστωσών που δεν επηρεάζονται από την εγκατεστημένη ισχύ του αιολικού πάρκου. Η εκτίμηση του αρχικού κόστους παρουσιάζεται στον πίνακα 3.12. Στον ίδιο πίνακα παρουσιάζεται η υπόθεση για τη χρηματοδότηση του έργου που λήφθηκε υπόψη στο συγκεκριμένο παράδειγμα.

Σύμφωνα με την ελληνική νομοθεσία περί υβριδικών σταθμών Α.Π.Ε., η τιμή πώλησης της παραγόμενης ενέργειας από ένα υβριδικό σταθμό καθορίζεται με βάση το μέσο ετήσιο ειδικό κόστος παραγωγής του Σ.Η.Ε. Για το Σ.Η.Ε. Ρόδου το συνολικό μέσο ετήσιο ειδικό κόστος παραγωγής εκτιμάται στα 0,2434€/kWh (πίνακας 2.1 Κεφαλαίου 2). Στο συγκεκριμένο παράδειγμα λαμβάνεται τιμή πώλησης ενέργειας υβριδικού σταθμού ίση με 0,25€/kWh.

Το ετήσιο λειτουργικό κόστους του υβριδικού σταθμού αναλύεται ως εξής:

- δημοτικά τέλη 3% επί των ακαθάριστων εσόδων,
- συντήρηση αιολικού πάρκου 0,020 €/kWh παραγόμενης ενέργειας,
- συντήρηση αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού 200.000€,
- δόση τραπεζικού δανείου με περίοδο αποπληρωμής 10 έτη και επιτόκιο 5,5%,
- μισθοδοσία 500.000€,
- ασφάλιση εξοπλισμού 4‰ ως προς το κόστος εξοπλισμού,
- λοιπά κόστη 100.000€,
- φόροι.

Η διάρκεια ζωής το έργου θεωρήθηκε 20 έτη και το επιτόκιο αναγωγής 5,0%.

Πίνακας 3.12: Ανάλυση αρχικού κόστους υβριδικού σταθμού και χρηματοδοτικό σχήμα.

Συνιστώσα	Ειδικό κόστος	Συνολικό κόστος (€)
Υπεράκτιο αιολικό πάρκο με δίκτυο διασύνδεσης (€/MW)	2.000.000	350.000.000
Υδροηλεκτρικός σταθμός (€/MW)	400.000	60.000.000
Αντλιοστάσιο (€/MW)	600.000	90.000.000
Άνω δεξαμενή (€)	50.000	⁽¹⁾ 18.500.000
Σωληνώσεις (διπλή σωλήνωση) (€)		⁽²⁾ 45.000.000
Νέα οδοποιία (€/km)		⁽³⁾ 1.000.000
Δίκτυο διασύνδεσης (€)		⁽⁴⁾ 30.000.000
SCADA (€)		5.000.000
Έργα διαμόρφωσης ακτογραμμής (€)		3.000.000
Λοιπά έργα υποδομής (€)		2.000.000
Λοιπά απρόβλεπτα κόστη (€)		5.000.000
Κόστος μελέτης και αδειοδότησης (€)		2.000.000
Συνολικό κόστος:		611.500.000
Χρηματοδοτικό σχήμα		
Ίδια συμμετοχή 25% (€)		152,875,000
Τραπεζική δανειοδότηση 75% (€)		458,625,000
⁽¹⁾ Περιλαμβάνει διαμόρφωση και στεγανοποίηση πυθμένα και κατασκευή φραγμάτων. ⁽²⁾ Εκτιμάται για χάλυβα X70 total με συνολική μάζα 27.435.207kg και τιμή 1,2€/kg. Συμπεριλαμβάνεται επίσης κόστος εγκατάστασης ίσο με το 30% του κόστους προμήθειας των σωληνώσεων. ⁽³⁾ Με βάση την υφιστάμενη υποδομή στη θέση εγκατάστασης, εκτιμάται ότι θα απαιτηθεί διάνοιξη νέας οδοποιίας μήκους 20km. ⁽⁴⁾ Το μήκος της απαιτούμενης γραμμής μεταφοράς τάσης 66kV εκτιμάται στα 50km. Θα απαιτηθούν 11 παράλληλα καλώδια N2XS(F)2Y 38/66 kV και ένας νέος υποσταθμός 20 / 66kV.		

3.8.2. Διαστασιολόγηση υβριδικού σταθμού Αγίου Ευστρατίου

3.8.2.a. Σκοπός της διαστασιολόγησης

Στην περίπτωση του Αγίου Ευστρατίου, η υπολογιστική διαδικασία αποσκοπεί στη διαστασιολόγηση του υβριδικού σταθμού με κριτήριο τη μεγιστοποίηση της ετήσιας διείσδυσης Α.Π.Ε. σε ποσοστό άνω του 90%.

3.8.2.β. Συνιστώσες του υβριδικού σταθμού

Ο υβριδικός σταθμός θα αποτελείται από τις ακόλουθες βασικές μονάδες παραγωγής και αποθήκευσης:

- αιολικό πάρκο,
- φωτοβολταϊκό σταθμό,
- ηλεκτροχημικούς συσσωρευτές OPzV.

Το αιολικό πάρκο και ο φωτοβολταϊκός σταθμός θα είναι οι μονάδες βάσης του υβριδικού σταθμού, από τις οποίες θα προκύπτει η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, με αξιοποίηση της πρωτογενούς αιολικής ενέργειας και ηλιακής ακτινοβολίας. Οι ηλεκτροχημικοί συσσωρευτές θα αποτελούν τη μονάδα αποθήκευσης του υβριδικού σταθμού, με σκοπό την προσαρμογή της στοχαστικής παραγωγής του αιολικού πάρκου και του φωτοβολταϊκού σταθμού στη ζήτηση ισχύος.

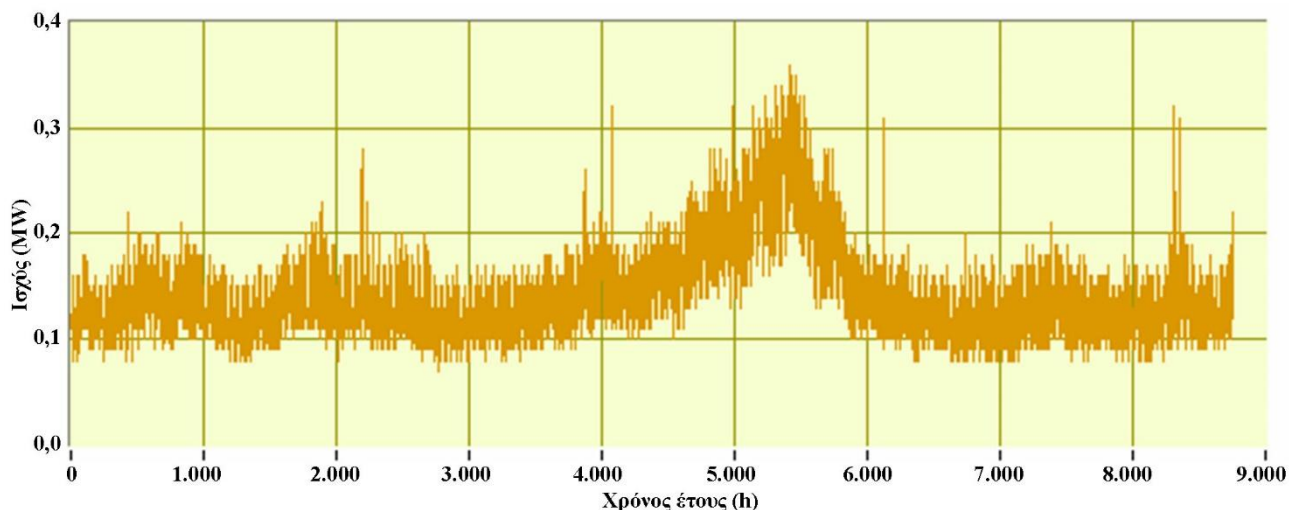
3.8.2.γ. Δεδομένα

Τα απαιτούμενα δεδομένα για την εκτέλεση της υπολογιστικής διαδικασίας είναι:

1. η ετήσια χρονοσειρά μέσω ωριαίων τιμών ζήτησης ισχύος για το Σ.Η.Ε. Αγίου Ευστρατίου,
2. η ετήσια χρονοσειρά μέσω ωριαίων τιμών παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος από το αιολικό πάρκο,
3. η ετήσια χρονοσειρά μέσω ωριαίων τιμών παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος από το φωτοβολταϊκό σταθμό,
4. οι καμπύλες απόδοσης φόρτισης και εκφόρτισης των ηλεκτροχημικών συσσωρευτών.

Στον πίνακα 3.13 παρουσιάζονται βασικά χαρακτηριστικά στοιχεία για τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας στον Άγιο Ευστράτιο το 2010. Η ετήσια χρονοσειρά μέσω ωριαίων τιμών ζήτησης ισχύος στον Άγιο Ευστράτιο για το 2010 παρουσιάζεται στο σχήμα 3.32.

Πίνακας 3.13: Βασικά χαρακτηριστικά ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στον Άγιο Ευστράτιο το 2010.	
Μέγεθος	2010
Μέγιστη ετήσια ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος (MW)	0,360
Ελάχιστη ετήσια ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος (MW)	0,070
Ετήσια ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας (MWh)	1.225,17
Μέση ημερήσια ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας (MWh)	3,36



Σχήμα 3.32: Ετήσια διακύμανση ζήτησης ισχύος στο σύστημα Αγίου Ευστρατίου το 2010.

Η ετήσια χρονοσειρά παραγωγής αιολικής ισχύος προσεγγίζεται με βάση τη λήψη μετρήσεων αιολικού δυναμικού από τη θέση εγκατάστασης του αιολικού πάρκου και την καμπύλη ισχύος της επιλεγμένης ανεμογεννήτριας. Ομοίως, η ετήσια χρονοσειρά παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος από το φωτοβολταϊκό σταθμό προκύπτει με βάση μετρήσεις ηλιακής ακτινοβολίας από την περιοχή εγκατάστασης.

3.8.2.β. Διαστασιολόγηση υβριδικού σταθμού

Ο αλγόριθμος λειτουργίας του υβριδικού σταθμού έχει παρουσιαστεί στην παράγραφο 3.6.1. και η συνδεσμολογία των συνιστωσών του στο σχήμα 3.17. Κάθε χρονική στιγμή προτεραιότητα στη φόρτιση έχει η συστοιχία συσσωρευτών με τη χαμηλότερη στάθμη φόρτισης. Αντίστοιχα, κάθε χρονική στιγμή προτεραιότητα στην εκφόρτιση έχει η συστοιχία συσσωρευτών με την υψηλότερη στάθμη φόρτισης.

Η υπολογιστική διαδικασία εκτελείται επαναληπτικά με παράμετρο την ισχύ των μονάδων Α.Π.Ε. Δεδομένου ότι τα μικρότερα εμπορικά μοντέλα ανεμογεννητριών μεγάλου μεγέθους κατασκευάζονται με ονομαστική ισχύ της τάξης των 800kW, δηλαδή πολύ μεγαλύτερη από την αιχμή της ζήτησης ισχύος στο Σ.Η.Ε. Αγίου Ευστρατίου, επιλέγεται η εγκατάσταση μίας τέτοιας ανεμογεννήτριας και στη συνέχεια αυξάνεται η ισχύς του φωτοβολταϊκού σταθμού ανά ένα δεδομένο βήμα ισχύος, π.χ. 10kW. Επίσης επιλέγεται

η εγκατάσταση τουλάχιστον δύο συστοιχιών ηλεκτροχημικών συσσωρευτών, ώστε να δοθεί η δυνατότητα ταυτόχρονης φόρτισης και εκφόρτισης των μονάδων αποθήκευσης. Η ισχύς φόρτισης / εκφόρτισης των συσσωρευτών καθορίζεται σε επίπεδα της αιχμής ζήτησης ισχύος. Για κάθε συνδυασμό εγκατεστημένης ισχύος από τις μονάδες Α.Π.Ε. εκτελείται μία πλήρης υπολογιστική διαδικασία, όπως περιγράφεται στην ενότητα 3.6.1., και υπολογίζονται τελικά οι ετήσιες ποσότητες παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας. Η διαστασιολόγηση θεωρείται επιτυχής, όταν επιτευχθεί ετήσια διείσδυση ενέργειας στο Σ.Η.Ε. Αγίου Ευστρατίου άνω του 90%.

Με την εκτέλεση της ανωτέρω διαδικασίας παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διαστασιολόγησης στον πίνακα 3.14.

Πίνακας 3.14: Τιμές διαστασιολόγησης βασικών συνιστωσών υβριδικού σταθμού.	
Ονομαστική ισχύς αιολικού πάρκου (kW)	800
Ονομαστική ισχύς φωτοβολταϊκού σταθμού (kW)	100,00
Ονομαστική ισχύς φόρτισης / εκφόρτισης συσσωρευτών (kW)	720
Ονομαστική χωρητικότητα συσσωρευτών (MWh)	3,60
Μέγιστο βάθος εκφόρτισης συσσωρευτών (%)	70
Ωφέλιμη χωρητικότητα συσσωρευτών (MWh)	2,52
Συστοιχίες συσσωρευτών	
Πλήθος συστοιχιών	2
Πλήθος στοιχείων ανά συστοιχία	300
Τάση (V) / ονομαστική χωρητικότητα (Ah) στοιχείων	2 / 3.000
Τύπος στοιχείων	OPzV
Ισχύς φόρτισης / εκφόρτισης ανά συστοιχία (kW)	360

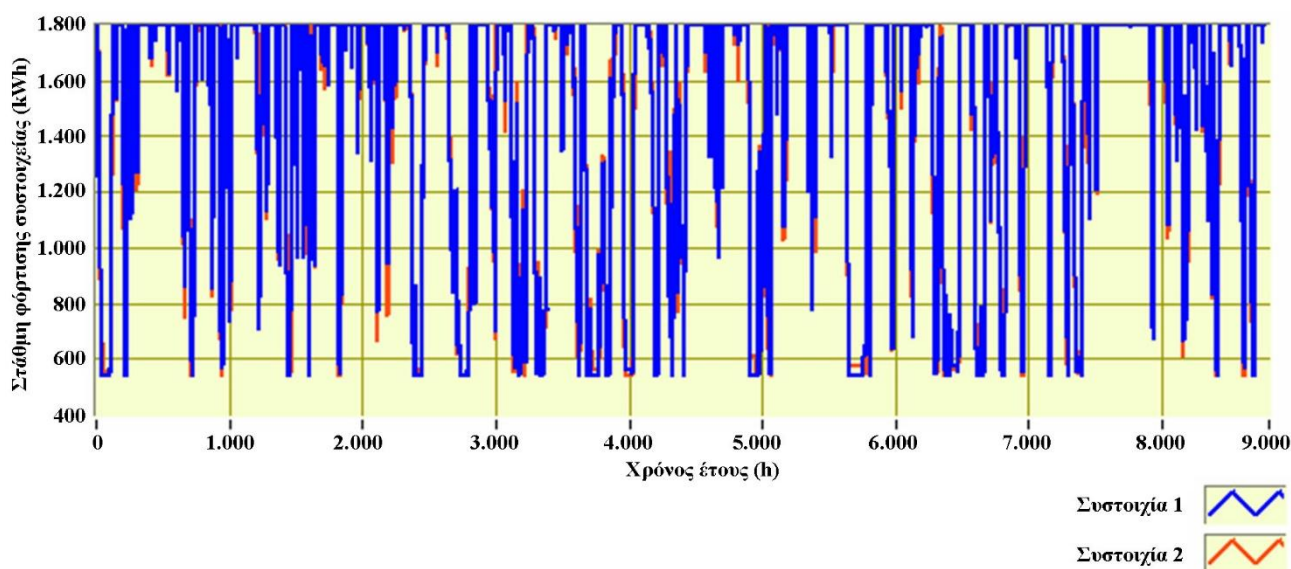
Τα αποτελέσματα σχετικά με την παραγωγή και αποθήκευση ενέργειας από τον υβριδικό σταθμό παρουσιάζονται στον πίνακα 3.15.

Με βάση τα αποτελέσματα του πίνακα 3.15, ο στόχος της μεγιστοποίησης της ετήσιας διείσδυσης των μονάδων Α.Π.Ε. σε ποσοστό άνω του 90% έχει επιτευχθεί. Ωστόσο, παρατηρείται ότι υπάρχει σημαντική περίσσεια ισχύος από τις μονάδες Α.Π.Ε. Τούτο οφείλεται στην υψηλή εγκατεστημένη ισχύ των μονάδων Α.Π.Ε. η οποία απαιτείται για την κάλυψη των αιχμών ζήτησης ισχύος στη θερινή περίοδο. Η ισχύς αυτή παραμένει αναξιοποίητη κατά τη χειμερινή περίοδο, λόγω της πολύ χαμηλότερης ζήτησης ισχύος.

Πίνακας 3.15: Ετήσια παραγωγή και αποθήκευση ενέργειας στο σύστημα Αγίου Ευστατίου με την εισαγωγή του υβριδικού σταθμού.

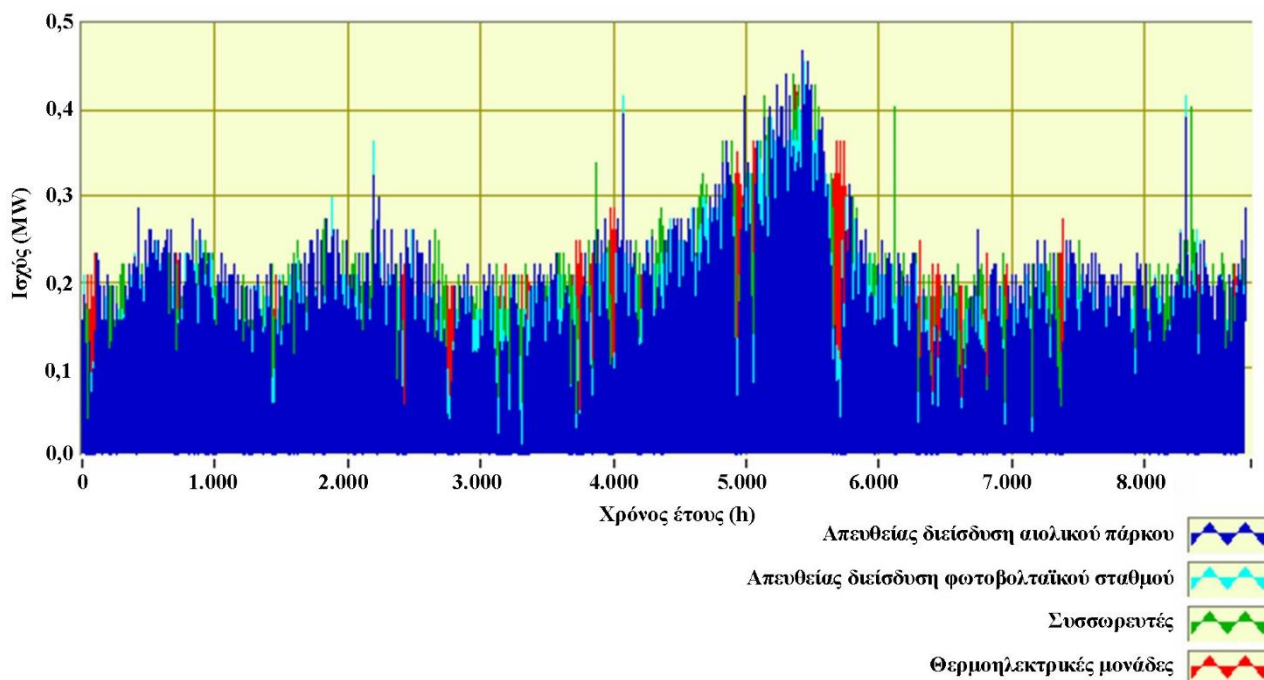
Αρχική παραγωγή ενέργειας από μονάδες Α.Π.Ε.	
Αρχική παραγωγή ενέργειας από ΑΠ (MWh)	3.573,77
Αρχική παραγωγή ενέργειας από ΦΣ (MWh)	137,89
Συνολική αρχική παραγωγή ενέργειας από μονάδες Α.Π.Ε. (MWh)	3.711,66
Απευθείας διείσδυση ενέργειας μονάδων Α.Π.Ε.	
Απευθείας διείσδυση ενέργειας ΑΠ (MWh)	1.154,12
Απευθείας διείσδυση ενέργειας ΦΣ (MWh)	137,89
Συνολική απευθείας διείσδυση ενέργειας από μονάδες Α.Π.Ε. (MWh)	1.292,01
Αποθήκευση και παραγωγή ενέργειας από συσσωρευτές	
Παραγωγή ενέργειας από συσσωρευτές (MWh)	184,76
Αποθήκευση ενέργειας από μονάδες Α.Π.Ε. (MWh)	188,68
Κατανάλωση ενέργειας για αποθήκευση από μονάδες Α.Π.Ε. (MWh)	274,01
Αρχική στάθμη φόρτισης συσσωρευτών (MWh)	2,52
Τελική στάθμη φόρτισης συσσωρευτών (MWh)	3,60
Μέση ετήσια συνολική απόδοση φόρτισης / εκφόρτισης συσσωρευτών (%)	67,43
Παραγωγή ενέργειας από θερμικές μονάδες	
Παραγωγή ενέργειας από θερμικές μονάδες (MWh)	115,82
Ποσοστό παραγωγής ενέργειας από θερμικές μονάδες (%)	7,27
Περίσσεια ενέργειας από Α.Π.Ε.	
Περίσσεια ενέργειας από Α.Π.Ε. (MWh)	2.145,65
Ποσοστό περίσσειας ενέργειας Α.Π.Ε. ως προς αρχική παραγωγή (MWh)	57,81
Σύνολο	
Συνολική απευθείας διείσδυση ενέργειας από μονάδες Α.Π.Ε. (MWh)	1.292,01
Παραγωγή ενέργειας από συσσωρευτές (MWh)	184,76
Παραγωγή ενέργειας από θερμικές μονάδες (MWh)	115,82
Συνολική κάλυψη ενέργειας ζήτησης (MWh)	1.592,58
Ποσοστό ετήσιας διείσδυσης Α.Π.Ε. στην παραγωγή (%)	92,73

Στο σχήμα 3.33 παρουσιάζεται η ετήσια διακύμανση της αποθηκευμένης ενέργειας στις δύο συστοιχίες συσσωρευτών. Παρατηρείται ότι η ιεράρχηση που ακολουθείται κατά τη φόρτιση / εκφόρτιση των συσσωρευτών έχει ως αποτέλεσμα την ισόποση και ομοιόμορφη αξιοποίηση των συστοιχιών.



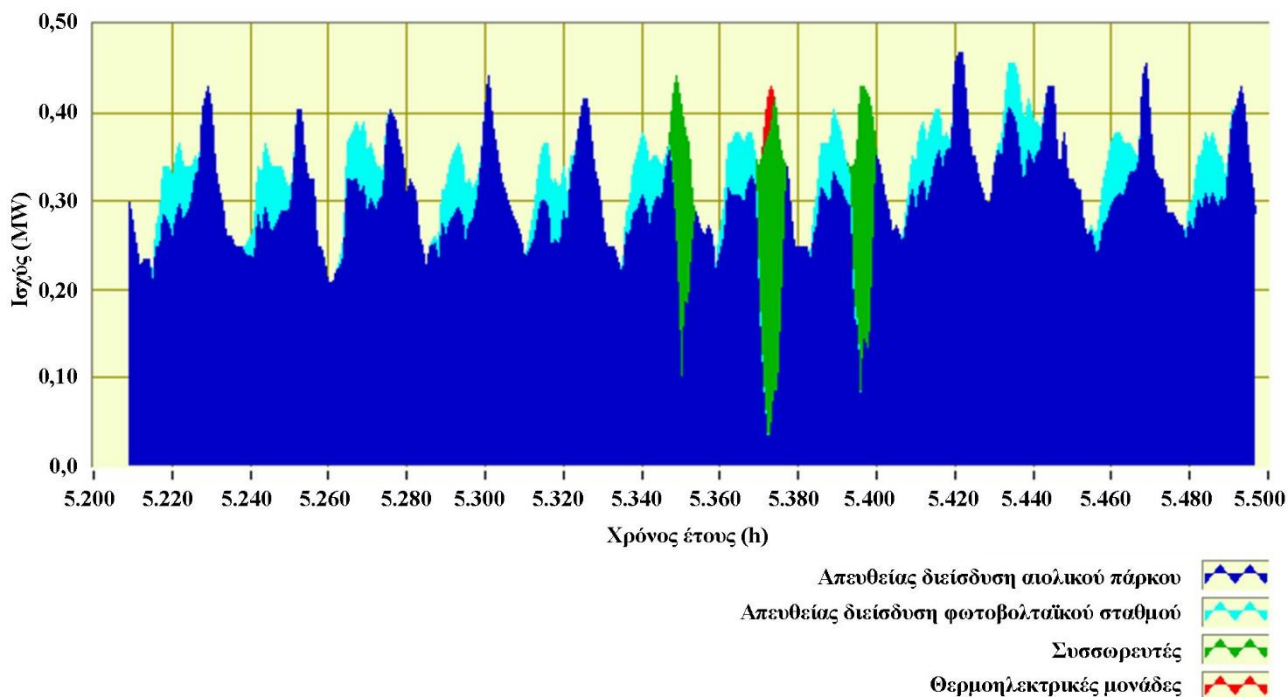
Σχήμα 3.33: Ετήσια διακύμανση της στάθμης φόρτισης των δύο συστοιχιών.

Στο σχήμα 3.34 παρουσιάζεται η ετήσια σύνθεση της παραγωγής ισχύος από τις μονάδες παραγωγής, δηλαδή από το αιολικό πάρκο, το φωτοβολταϊκό σταθμό, τους συσσωρευτές και τις υφιστάμενες θερμικές μονάδες του συστήματος.



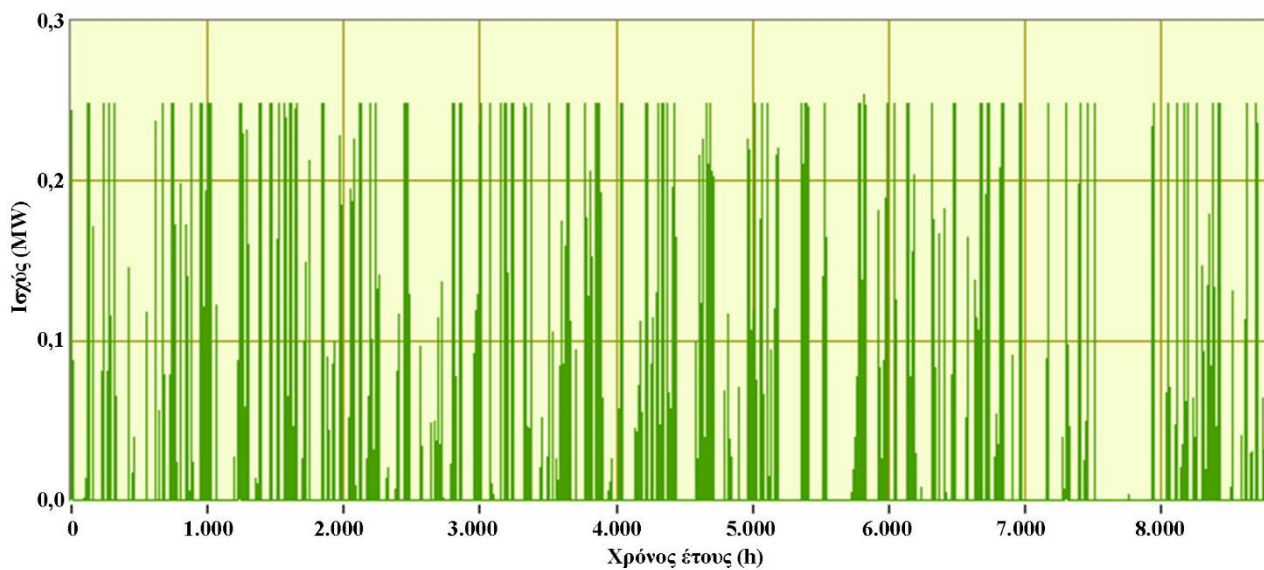
Σχήμα 3.34: Ετήσια σύνθεση παραγωγής ισχύος.

Από το σχήμα 3.34 παρατηρείται ότι η ανάγκη για παραγωγή ισχύος από τις θερμικές μονάδες εμφανίζεται κυρίως τον Ιούλιο, το Σεπτέμβριο, τον Απρίλιο και τον Ιανουάριο. Στο σχήμα 3.35 παρουσιάζεται σύνθεση παραγωγής ισχύος για χρονικό διάστημα δώδεκα ημερών από 5/8 έως 17/8 (περίοδος υψηλής ζήτησης ισχύος).



Σχήμα 3.35: Προσομοίωση σύνθεσης παραγωγής από 5 Αυγούστου έως 17 Αυγούστου.

Στα σχήμα 3.36 παρουσιάζεται η ετήσια διακύμανση της συνολικής ισχύος φόρτισης των συσσωρευτών. Παρατηρείται ότι τούτη δεν υπερβαίνει ποτέ τα 300kW.



Σχήμα 3.36: Ετήσια διακύμανση ισχύος φόρτισης συσσωρευτών.

Αναφορές Κεφαλαίου

- [1] S. Karellas, N. Tzouganatos. Comparison of the performance of compressed-air and hydrogen energy storage systems: Karpathos island case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2014; 29: 865-882.
- [2] Meyer F. Integration von regenerativen Stromerzeugern. *Druckluft-Speicher- kraftwerke, Projektinfo* 05/2007.
- [3] Crotogino F.KBB Underground Technologies GmbH, Hannover, Compressed Air Storage, Internationale Konferenz “Energieautonomie durch Speicherung Erneuerbarer Energien”, 30–31. Oktober 2006.
- [4] Ibrahim H, Iinca A, Perron J. Energy storage systems – characteristics and comparisons. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2008; 12: 1221–50.
- [5] Nölke M. Compressed Air Energy Storage (CAES) – Eine sinnvolle Ergänzung zur Energieversorgung? Promotionsvortrag 2006.
- [6] Jakiel C. Entwicklung von Großdampfturbinen, Wärmespeichern und Hochtemperatur – Kompressoren für adiabate Druckluftspeicherkraftwerke. 5. dena-EnergieForum “Druckluftspeicherkraftwerke”. Berlin 8 September 2005.
- [7] Zunft S, Tamme R, Nowi A, Jakiel C. Adiabate Druckluftspeicherkraftwerke: Ein Element zur netzkonformen Integration von Windenergie. *Energiewirtschaft – tliche Tagesfragen*, 55 Jg 2005, Heft 7.
- [8] Nowi A, Jakiel C, Moser P Zunft S. Adiabate Druckluftspeicherkraftwerke zur netzvertäglichen Windstrominegration.VDI-GET Fachtagung “Fortschrittliche Energiewandlung und-anwendung. Strom – und Wärmeerzeugung. Kommunale und industrielle Energieanwendungen”, Leverkusen, 09 – 10 Mai 2006.
- [9] Dimitris Al. Katsaprakakis, Dimitris G. Christakis. Seawater pumped storage systems and offshore wind parks in islands with low onshore wind potential. A fundamental case study. *Energy* 2014; 66: 470-486.
- [10] Akitaka Hiratsuka, Takashi Arai, Tsukasa Yoshimura. Seawater pumped-storage power plant in Okinawa island, Japan. *Engineering Geology* 1993; 35:237-246.
- [11] Japan Commission on Large Dams: <http://web.archive.org/web/20030430004611/http://www.jcold.or.jp/Eng/Seawater/Summary.htm>. Τελευταία πρόσβαση: 2/11/2014.
- [12] Tetsuo Fujihara, Haruo Imano, Katsuhiro Oshima. Development of Pump Turbine for Seawater Pumped - Storage Power Plant. *Hitachi Review* 1997; 47 (5).
- [13] Dimitris Al. Katsaprakakis, Dimitris G. Christakis, Ioannis Stefanakis, Petros Spanos, Nikos Stefanakis. Technical details regarding the design, the construction and the operation of seawater pumped storage systems. *Energy* 2013; 55: 619-630.
- [14] Mohammed Yekini Suberu, Mohd Wazir Mustafa, Nouruddeen Bashir. Energy storage systems for renewable energy power sector integration and mitigation of intermittency. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2014; 35: 499–514.
- [15] Hall PJ, Bain EJ. Energy-storage technologies and electricity generation. *Energy Policy* 2008; 36: 4352–5.
- [16] Leadbetter J, Swan LG. Selection of battery technology to support grid integrated renewable electricity. *J Power Sourc* 2012; 216: 376–86.

- [17] Zaghib K, Dontignya M, Guerfi A, Charest P, Rodrigues I, Mauger A, et al. Safe and fast-charging Li-ion battery with long shelf life for power applications. *J Power Sourc* 2011; 196: 3949–54.
- [18] Wakihara M. Recent developments in lithium ion batteries. *Mater Sci Eng* 2001; 33: 109–34.
- [19] Chen H, Cong TN, Yang W, Tan C, Li T, Ding Y. Progress in electrical energy storage system: a critical review. *Prog Nat Sci* 2009; 19: 291–312.
- [20] Mc Dowall J. Integrating energy storage with wind power in weak electricity grids. *J Power Sourc* 2005; 162: 959–64.
- [21] Broussely M, Pistoia G. Industrial applications of batteries. From cars to aerospace and energy storage. Elsevier BV, Amsterdam, London; 2007.
- [22] Brett DLJ, Aguiar P, Brandon NP. System modelling and integration of an intermediate temperature solid oxide fuel cell and ZEBRA battery for automotive applications. *J Power Sourc* 2006; 163: 514–22.
- [23] Sudworth JL. Zebrabatteries. *J Power Sourc* 1994; 51: 105–14.
- [24] Hotza D, Costa JCDd. Fuel cells development and hydrogen production from renewablere sources inBrazil .*Int J Hydrog Energy* 2008; 33: 4915–35.
- [25] Song C. Fuel processing for low-temperature and high temperature fuel cells – challenges and opportunities for sustainable development in the 21st century. *Catal Today* 2002; 77: 17–49.
- [26] Dicks AL, Costa JCDd, Simpson A, McLellan B. Fuel cells, hydrogen and energy supply in Australia. *J Power Sourc* 2004; 131: 1–12.
- [27] European Commission. Hydrogen energy and fuel cells – a vision of our future. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities; 2003.
- [28] Peihgambardoust SJ, Rowshanzamir S, Amjadi M. Review of the proton exchange membranes for fuel cell applications. *Int J Hydrog Energy* 2010; 35: 9349–84.
- [29] Wang C, Mao Z, Bao F, Li X, Xie X. Development and performance of 5kW proton exchange membrane fuel cell stationary power system. *Int J Hydrog Energy* 2005; 30: 1031–4.
- [30] Lin M, Cheng Y, Yen S. Evaluation of PEMFC power systems for UPS base station applications. *J Power Sourc* 2005; 140: 346–9.
- [31] Tuber K, Zobel M, Schmidt H, Hebling C. A polymer electrolyte membrane fuel cell system for powering portable computers. *J Power Sourc* 2003; 122: 1–8.
- [32] Hwang JJ, Wang DY, Shih NC. Development of a light weight fuel cell vehicle. *J Power Sourc* 2005; 141: 108–15.
- [33] Hwang JJ, Wang DY, Shih NC, Lai DY, Chen CK. Development of fuel-cell- powered electric bicycle. *J Power Sourc* 2004; 133: 223–8.
- [34] Folkesson A, Andersson C, Alvofors P, Alakula M, Overgaard L. Real life testing of a hybrid PEM Fuel cell bus. *J Power Sourc* 2003; 118: 349–57.
- [35] Beckhaus P, Dokupil M, Heinzl A, Souzani S, Spitta C. On-board fuel cell power supply for sailing yachts. *J Power Sourc* 2005; 145: 639–43.
- [36] Dimitris Al. Katsaprakakis, Dimitris G. Christakis, 2006, “A wind parks, pumped storage and diesel engines power system for the electric power production in Astypalaia”, European Wind Energy Conference and Exhibition 2006, EWEC 2006 1, pp. 621-636.
- [37] Δημήτρης Παπαντώνης. Μικρά υδροηλεκτρικά έργα. Αθήνα: Εκδόσεις Συμείων, 2001.
- [38] Dimitris Al. Katsaprakakis, Dimitris G. Christakis, Arthouros Zervos, Dimitris Papantonis, Spiros Voutsinas. Pumped storage systems introduction in isolated power production systems. *Renewable Energy* 2008; 33: 467-490.

- [39] Dimitris Al. Katsaprakakis, Dimitris G. Christakis, Kosmas Pavlopoylos, Sofia Stamataki, Irene Dimitrelou, Ioannis Stefanakis, Petros Spanos. Introduction of a wind powered pumped storage system in the isolated insular power system of Karpathos–Kasos. *Applied Energy* 2012; 97: 38-48.
- [40] Dimitris Al. Katsaprakakis, Nikos Papadakis, George Kozirakis, Yiannis Minadakis, Dimitris Christakis, Konstantinos Kondaxakis. Electricity supply on the island of Dia based on renewable energy sources (R.E.S.). *Applied Energy* 2009; 86: 516–527.

Κεφάλαιο

4

Συμπαράγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας

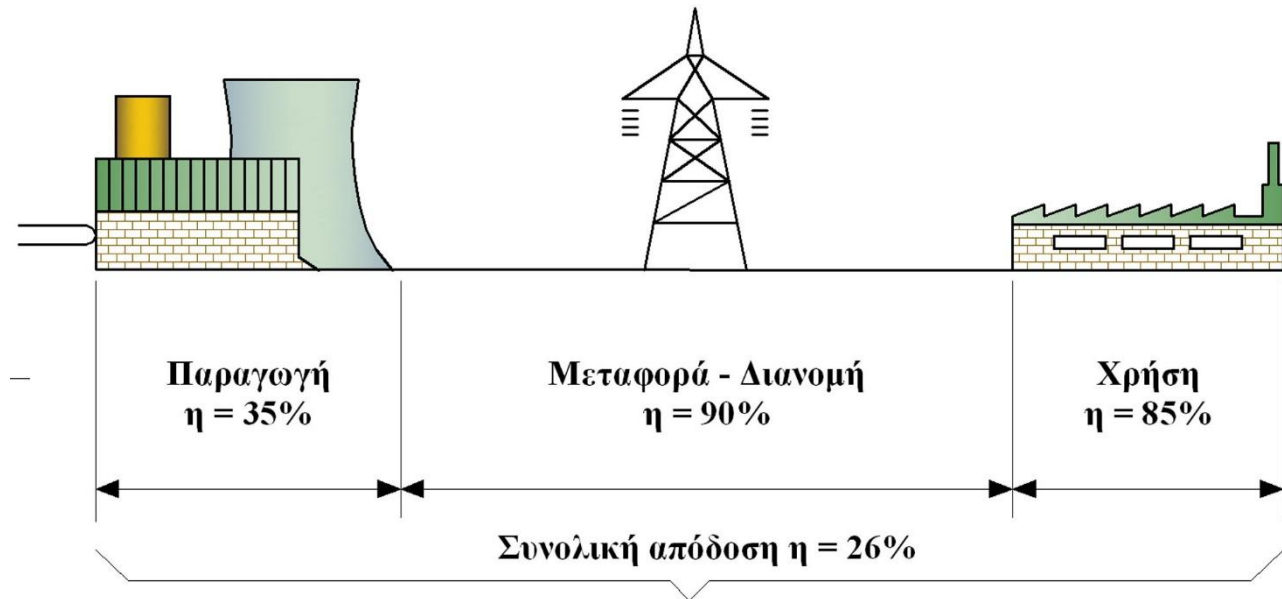
4.1. Εισαγωγή

Τα συστήματα Συμπαράγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας (Σ.Η.Θ. – γνωστή και ως Συμπαράγωγή) παράγουν ταυτόχρονα ηλεκτρική και θερμική ενέργεια σε ένα ενιαίο, ολοκληρωμένο ενεργειακό σύστημα, από την ίδια πηγή πρωτογενούς ενέργειας. Αυτή η συνδυασμένη παραγωγή διαφέρει σε σχέση με την κοινή πρακτική, κατά την οποία η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται συνήθως συγκεντρωμένα σε σταθμούς παραγωγής μεγάλης ισχύος (Κεφάλαια 2 και 3), ενώ για την κάλυψη των αναγκών σε θερμότητα χρησιμοποιούνται αποκεντρωμένα συστήματα παραγωγής θερμικής ισχύος αποκεντρωμένης παραγωγής, τα οποία επιλέγονται κατά βούληση απευθείας από τον τελικό χρήστη (καυστήρες κεντρικής θέρμανσης, αντλίες θερμότητας κλπ).

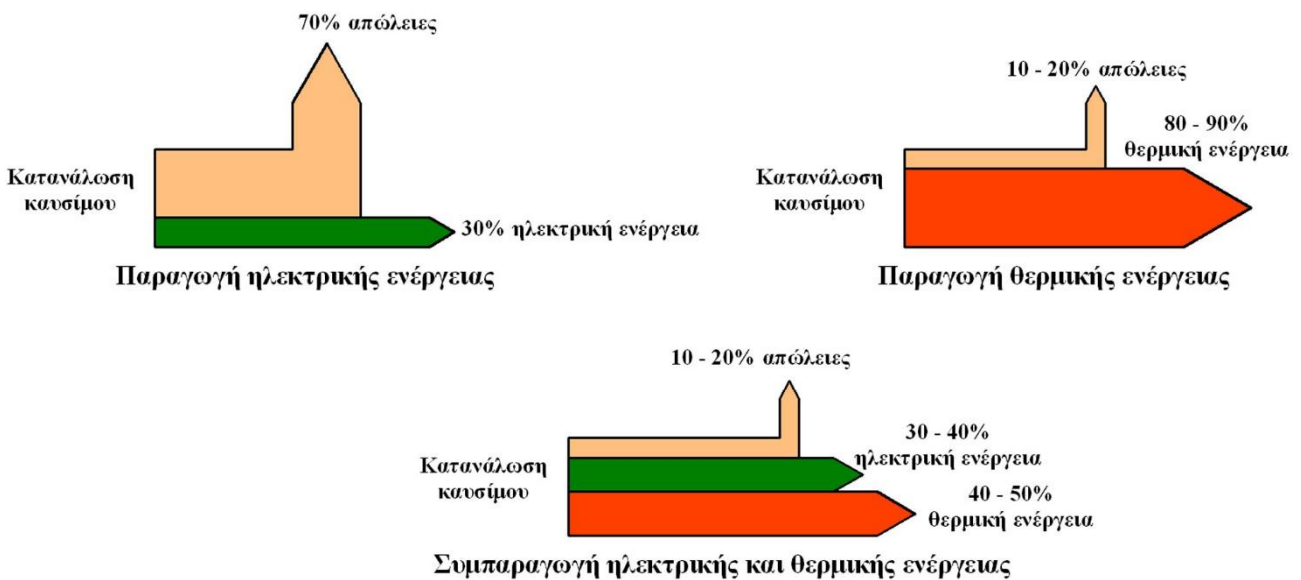
Η έννοια της συμπαράγωγής δεν είναι πρόσφατη. Η Σ.Η.Θ. πρωτοεμφανίστηκε στην Ευρώπη και στις Η.Π.Α. στα τέλη του 19^{ου} αιώνα [1]. Στις αρχές του εικοστού αιώνα, οι περισσότερες βιομηχανίες στις Η.Π.Α. και στην Ευρώπη είχαν ιδιόκτητες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, κυρίως ατμοστρόβιλους που λειτουργούσαν με άνθρακα. Πολλές από αυτές τις μονάδες ήταν συμπαράγωγικές. Στην Ευρώπη, μεγάλη ανάπτυξη της Σ.Η.Θ. αναφέρεται στη Δανία, τη Φιλανδία και στην Ολλανδία [2]. Στις χώρες αυτές, πέρα από τις μονάδες Σ.Η.Θ. σε μεγάλες βιομηχανίες και σε θερμοηλεκτρικούς σταθμούς, οι οποίες αξιοποιούνται για την τηλεθέρμανση πόλεων, καταγράφονται, επίσης, σημαντικές εγκαταστάσεις Σ.Η.Θ. στον τριτογενή τομέα (νοσοκομεία, ξενοδοχεία, αθλητικά κέντρα) και στον οικιακό τομέα.

Οι πρώτες εφαρμογές Σ.Η.Θ. στην Ελλάδα εμφανίζονται στις αρχές του 20^{ου} αιώνα, στα κεραμοποιεία Τσαλαπάτα στο Βόλο, που λειτούργησαν μέχρι και τα τέλη της δεκαετίας του '70. Οι πρώτες σύγχρονες μονάδες Σ.Η.Θ. εγκαταστάθηκαν σε μεγάλες ελληνικές βιομηχανίες στις αρχές της δεκαετίας του '70. Περισσότερο δημοφιλείς ίσως είναι οι εφαρμογές Σ.Η.Θ. που εφαρμόστηκαν την ίδια χρονική περίοδο στα θερμοηλεκτρικά εργοστάσια της Δ.Ε.Η. στο Νομό Κοζάνης για την κάλυψη των αναγκών σε θερμική ενέργεια με δίκτυα τηλεθέρμανσης των παρακείμενων αστικών περιοχών, όπως αυτών της Κοζάνης, της Πτολεμαΐδας και του Αμυνταίου. Τη δεκαετία του '90 εφαρμόστηκε η ίδια τεχνική για τη θέρμανση της Μεγαλόπολης. Οι πρώτες Ελληνικές βιομηχανίες που εγκατέστησαν μονάδες Σ.Η.Θ. ήταν η βιομηχανία ζάχαρης, χαρτοποιίας, χαλυβουργίας, καθώς και βιομηχανίες στον τομέα του πετρελαίου. Την περίοδο 1970-1999 άλλαξε ουσιαστικά η κατάσταση των μονάδων Σ.Η.Θ. στις ελληνικές βιομηχανίες με ποιοτική αλλά και ποσοτική βελτίωσή τους. Ειδικότερα από τα μέσα της δεκαετίας του 1990, με την άφιξη του φυσικού αερίου, αναδείχθηκαν οι δυνατότητες που προσφέρει η Σ.Η.Θ.. Σήμερα στην Ελλάδα λειτουργούν μονάδες Σ.Η.Θ. στη βιομηχανία, στον τριτογενή τομέα (κύρια σε ιδιωτικά νοσοκομεία και ξενοδοχεία) και σε κατοικίες.

Η ανάπτυξη της Σ.Η.Θ. προέκυψε λόγω του χαμηλού βαθμού απόδοσης των συμβατικών θερμοηλεκτρικών συστημάτων. Όπως ήδη παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 2, οι συμβατικές θερμοηλεκτρικές μονάδες παρουσιάζουν βαθμούς απόδοσης που μπορούν να φτάσουν, στην καλύτερη περίπτωση χρήσης συνδυασμένων κύκλων, τιμές της τάξης του 50%, ενώ σε περιπτώσεις μεμονωμένων θερμοηλεκτρικών μονάδων κυμαίνονται μεταξύ 35%, για ατμοστρόβιλους και αεριοστρόβιλους, και 45%, για ντιζελογεννήτριες (σχήμα 4.1). Τα συστήματα Σ.Η.Θ. στηρίζονται στην ανάκτηση του μεγαλύτερου μέρους της παραγόμενης θερμικής ενέργειας, η οποία σε ένα απλό θερμοηλεκτρικό σταθμό απορρίπτεται προς το περιβάλλον. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας με την ίδια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας, μεγιστοποιώντας, συνεπώς, το συνολικό βαθμό απόδοσης του ενεργειακού συστήματος (σχήμα 4.2).



Σχήμα 4.1: Ροή ενέργειας σε συμβατικό σύστημα παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος.



Σχήμα 4.2: Ροή ενέργειας σε συμβατικούς ηλεκτρικούς και θερμικούς σταθμούς και σε σύστημα Σ.Η.Θ.

Από τα ανωτέρω συνάγεται ότι η Σ.Η.Θ. δεν αποτελεί μια νέα ιδιαίτερη τεχνολογία, αλλά περισσότερο μια συνδυασμένη εφαρμογή τεχνολογιών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και ανάκτησης, μεταφοράς και διανομής θερμικής ενέργειας. Παρόλα αυτά, ακριβώς λόγω της σημασίας της στην εξοικονόμηση και ορθολογική χρήση ενέργειας, η σχεδίαση νέων θερμοηλεκτρικών μονάδων (στροβίλων και εμβολοφόρων μηχανών), μέσω εντατικής έρευνας, ανάπτυξης και πιλοτικής λειτουργίας, με τη βοήθεια υπολογιστικών μεθόδων σχεδίασης και προσομοίωσης λειτουργίας, έχει οδηγήσει σε μεγιστοποίηση της απόδοσης της κάθε μηχανής, σε ελαχιστοποίηση του κόστους κατασκευής και λειτουργίας της μονάδας καθώς και των εκπεμπόμενων αερίων ρύπων.

Ο συνολικός βαθμός απόδοσης ενός συστήματος Σ.Η.Θ. προκύπτει ως η συνισταμένη των δύο συνολικών μετατροπών για την παραγωγή των δύο βασικών ενεργειακών προϊόντων, δηλαδή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας. Συνεπώς το όλο σύστημα μπορεί να διακριθεί σε δύο υποσυστήματα, το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος (μία συμβατική θερμοηλεκτρική μονάδα) και το σύστημα ανάκτησης θερμότητας (συνήθως κάποιος τύπος λέβητα ή εναλλάκτη θερμότητας). Αν P_{ch} είναι ο ρυθμός κατανάλωσης

χημικής ενέργειας στο θάλαμο καύσης της θερμοηλεκτρικής μονάδας (χημική ισχύς), P_{el} είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος και P_{th} η ανάκτηση θερμικής ισχύος, τότε:

- Ο βαθμός απόδοσης η_{el} που χαρακτηρίζει την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος θα δίνεται από τη σχέση:
- $$\eta_{el} = \frac{P_{el}}{P_{ch}} \quad (4.1)$$

- Ο βαθμός απόδοσης η_{th} που χαρακτηρίζει την παραγωγή θερμικής ισχύος θα δίνεται από τη σχέση:

$$\eta_{th} = \frac{P_{th}}{P_{ch}} \quad (4.2)$$

- Ο συνολικός βαθμός απόδοσης η_{co} που χαρακτηρίζει τη συνδυασμένη συμπαράγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ισχύος θα δίνεται από τη σχέση:

$$\eta_{co} = \frac{P_{el} + P_{th}}{P_{ch}} \quad (4.3)$$

Ο βαθμός απόδοσης της συμπαράγωγής η_{co} ονομάζεται και *συντελεστής διάθεσης ενέργειας* και συμβολίζεται με EUF (Energy Utilisation Factor). Από τις ανωτέρω σχέσεις είναι προφανής η αύξηση του βαθμού απόδοσης της συνολικής συμπαράγωγής ηλεκτρικής και θερμικής ισχύος σε σχέση με τη διακριτή παραγωγή ηλεκτρικής ή θερμικής ισχύος. Όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 4.2, η συνολική απόδοση συστημάτων Σ.Η.Θ. μπορεί να φτάσει έως και 85%. Θα πρέπει εδώ να αναφερθεί ότι τα αποδοτικότερα συστήματα Σ.Η.Θ., με συνολικό βαθμό απόδοσης μεγαλύτερο του 80%, παρουσιάζουν μεγαλύτερο λόγο παραγόμενης θερμικής ισχύος ως προς παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία της ανακτώμενης θερμικής ενέργειας, τόσο ο λόγος της παραγόμενης θερμικής ισχύος προς την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ αυξάνεται. Η λειτουργία συστημάτων Σ.Η.Θ. σε συνθήκες μειωμένης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας συμβάλλει στην αύξηση της απόδοσης Σ.Η.Θ., καθώς η μεταφορά και διανομή της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος στην αγορά είναι τεχνικά ευκολότερη, ανεξάρτητα από το μέγεθός της, σε αντίθεση με τη διάθεση της ανακτώμενης θερμικής ισχύος στους τελικούς χρήστες, η οποία είναι ευνόητο ότι είναι ευκολότερη υπό υψηλές θερμοκρασίες, ουσιαστικά δηλαδή, σε περιπτώσεις ανάκτησης υψηλής θερμικής ισχύος.

Με δεδομένη την αυξημένη συνολική απόδοση, η Σ.Η.Θ. παρουσιάζει μία σειρά ελκυστικών χαρακτηριστικών, τα οποία δύνανται να ομαδοποιηθούν ως εξής:

- Μείωση της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας ανά μονάδα τελικής παραγωγής ενέργειας.
- Μείωση των εκπομπών αερίων ρύπων ανά μονάδα τελικής παραγωγής ενέργειας.
- Ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής ανά μονάδα τελικού ενεργειακού προϊόντος.
- Μεγιστοποίηση της σκοπιμότητας ανάπτυξης ενεργειακών συστημάτων αποκεντρωμένης παραγωγής, λόγω της ταυτόχρονης παραγωγής ηλεκτρικής και θερμικής ισχύος, οι οποίες δύνανται να ανταποκρίνονται στις ανάγκες των τοπικών καταναλωτών, αυξάνοντας ακόμα περισσότερο την υψηλή απόδοση λόγω ελαχιστοποίησης των απωλειών μεταφοράς. Η συνδυασμένη εισαγωγή αποκεντρωμένων συστημάτων Σ.Η.Θ. με χρήση καυσίμων βιομάζας οδηγεί ταυτόχρονα στην εγγυημένη παροχή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές.

Υπάρχουν τέσσερις κύριοι τομείς εφαρμογής της συστημάτων Σ.Η.Θ.:

1. *Θερμοηλεκτρικοί σταθμοί μεγάλης ισχύος*, οι οποίοι μπορούν να μετατραπούν σε μονάδες συμπαράγωγής και να καλύψουν τις θερμικές ανάγκες παρακείμενων πόλεων, οικισμών, βιομηχανιών, αγροτικών παραγωγικών μονάδων κλπ.

2. *Βιομηχανικός τομέας.* Σημαντικό δυναμικό εισαγωγής συστημάτων Σ.Η.Θ. παρουσιάζεται σε βιομηχανίες τροφίμων και ποτών, σε κλωστοϋφαντουργίες, σε βιομηχανίες χάρτου, σε χημικές βιομηχανίες, στα διυλιστήρια, στα εργοστάσια τσιμέντου και σε βασικές μεταλλουργικές βιομηχανίες.
3. *Κτηριακός τομέας.* Διακρίνεται σε τρεις κύριες υποκατηγορίες: ξενοδοχεία – νοσοκομεία, μεγάλα συγκροτήματα κατοικιών και κτήρια γραφείων. Η καθεμία από τις κατηγορίες αυτές χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένη ημερήσια διακύμανση της ζήτησης ηλεκτρικής και θερμικής ισχύος. Άλλου είδους κτήρια (πανεπιστήμια, εμπορικά κέντρα κλπ) παρουσιάζουν προφίλ ημερήσιας διακύμανσης ζήτησης ηλεκτρικής και θερμικής ισχύος, που προκύπτουν με συνδυασμό των τριών ανωτέρω βασικών κατηγοριών.
4. *Αγροτικός τομέας.* Η ανακτώμενη θερμότητα από παρακείμενους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς δύναται να αξιοποιηθεί σε μία σειρά από γεωργικές διαδικασίες, όπως ξήρανση γεωργικών προϊόντων, θέρμανση αγροτικών οικημάτων, θερμοκηπίων κλπ.

4.2. Δείκτες απόδοσης των συστημάτων Σ.Η.Θ.

Πριν από την περιγραφή των τεχνολογιών της συμπαράγωγής είναι σκόπιμο να παρουσιαστούν συγκεκριμένοι δείκτες, που να προσδιορίζουν τη θερμοδυναμική απόδοση ενός συστήματος συμπαράγωγής και να διευκολύνουν τη σύγκριση των εναλλακτικών επιλογών (συστημάτων). Πολυάριθμοι τέτοιοι δείκτες έχουν εμφανιστεί στη βιβλιογραφία. Οι σημαντικότεροι από αυτούς ορίζονται στα επόμενα.

Ο βαθμός απόδοσης του κύριου κινητήρα του συστήματος Σ.Η.Θ. (π.χ. του αεριοστροβίλου, της μηχανής Diesel ή Otto, του ατμοστροβίλου κλπ) ορίζεται ως εξής:

$$\eta_m = \frac{\dot{W}_s}{P_{ch}} = \frac{\dot{W}_s}{\dot{m}_f \cdot H_u} \quad (4.4)$$

όπου:

- \dot{W}_s : η μηχανική ισχύς στον άξονα του βασικού κινητήρα του συστήματος Σ.Η.Θ.
- P_{ch} : η χημική ισχύς του καυσίμου
- \dot{m}_f : η παροχή μάζας του καυσίμου
- H_u : η κατώτερη θερμογόνο ικανότητα του καυσίμου.

Με βάση τη σχέση 4.4, η σχέση 4.1 για τον ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης του συστήματος συμπαράγωγής γίνεται:

$$\eta_{el} = \frac{P_{el}}{P_{ch}} = \frac{P_{el}}{\dot{m}_f \cdot H_u} \quad (4.5)$$

όπου P_{el} είναι η καθαρή παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος του συστήματος (η ηλεκτρική ισχύς που καταναλώνεται από το βοηθητικό εξοπλισμό αφαιρείται από την ηλεκτρική ισχύ της γεννήτριας).

Επίσης ο θερμικός βαθμός απόδοσης του μέρους παραγωγής της θερμότητας του συστήματος είναι:

$$\eta_{th} = \frac{\dot{Q}}{P_{ch}} = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_f \cdot H_u} \quad (4.6)$$

όπου \dot{Q} είναι η ωφέλιμη θερμική ισχύς του συστήματος συμπαράγωγής.

Τέλος, με βάση τις σχέσεις 4.5 και 4.6, η σχέση 4.3 για το συνολικό ενεργειακό βαθμό απόδοσης του συστήματος συμπαράγωγής, γίνεται:

$$\eta_{co} = \eta_{el} + \eta_{th} = \frac{P_{el} + \dot{Q}}{P_{ch}} = \frac{P_{el} + \dot{Q}}{\dot{m}_f \cdot H_u} \quad (4.7)$$

Η ενέργεια με τη μορφή θερμότητας είναι χαμηλότερης ποιότητας από αυτήν της ηλεκτρικής ενέργειας. Η ποιότητα της θερμικής ενέργειας ελαττώνεται με τη θερμοκρασία στην οποία είναι διαθέσιμη. Για παράδειγμα, η ποιότητα της θερμότητας υπό μορφή ζεστού νερού είναι χαμηλότερη από την ποιότητά της υπό μορφή ατμού. Συνεπώς, η αξιολόγηση ενός συστήματος Σ.Η.Θ. αποκλειστικά μέσω του συνολικού βαθμού απόδοσης, προσθέτοντας στον αριθμητή δύο μορφές ενέργειας ποιοτικά άνισες μεταξύ τους, δεν είναι η πλέον αντικειμενική. Ακόμα κι αν μέχρι τώρα συνήθως χρησιμοποιούνται οι ενεργειακοί βαθμοί απόδοσης, μία θερμοδυναμικά ακριβέστερη αξιολόγηση και μία δικαιότερη σύγκριση μεταξύ των συστημάτων μπορεί να γίνει βάσει των εξεργειακών αποδοτικότητων.

Μία ακόμα σημαντική παράμετρος που χαρακτηρίζει τα συστήματα Σ.Η.Θ. είναι ο λόγος παραγωγής ηλεκτρισμού προς παραγωγή θερμότητας (Power to Heat Ratio – PHR), ο οποίος ορίζεται ως εξής:

$$PHR = \frac{P_{el}}{\dot{Q}} \quad (4.8)$$

Επίσης ορίζεται ο λόγος εξοικονόμησης ενέργειας καυσίμων (Fuel Savings Rate – FSR) από τη σχέση:

$$FSR = \frac{P_{ch-S} - P_{ch-co}}{P_{ch-S}} \quad (4.9)$$

όπου:

P_{ch-S} : η συνολική χημική ισχύς των καυσίμων για ξεχωριστή παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ισχύος
 P_{ch-co} : η συνολική χημική ισχύς των καυσίμων για συνδυασμένη παραγωγή των ίδιων ποσοτήτων ηλεκτρικής και θερμικής ισχύος.

Προκειμένου ένα σύστημα συμπαράγωγής να αποτελεί μια λογική επιλογή από την άποψη της εξοικονόμησης ενέργειας, θα πρέπει να ισχύει $FSR > 0$.

Από τις ανωτέρω εξισώσεις οδηγούμαστε στις ακόλουθες:

$$\eta = \eta_{el} \cdot \left(1 + \frac{1}{PHR} \right) \quad (4.10)$$

$$PHR = \frac{\eta_{el}}{\eta_{th}} = \frac{\eta_{el}}{\eta - \eta_{el}} \quad (4.11)$$

οι οποίες βοηθούν στον καθορισμό αποδεκτών τιμών του λόγου ηλεκτρισμού προς θερμότητα ενός συστήματος, όταν είναι γνωστός ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσής του. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι, σε κάθε συγκεκριμένη εφαρμογή, ο λόγος ηλεκτρισμού προς θερμότητα αποτελεί έναν από τους κύριους παράγοντες για την επιλογή ενός συστήματος συμπαράγωγής.

Εάν θεωρηθεί ότι ένα σύστημα Σ.Η.Θ. αντικαθιστά διακριτές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας με βαθμούς απόδοσης η_{el} και η_{th} , αντίστοιχα, τότε αποδεικνύεται ότι:

$$FSR = 1 - \frac{PHR + 1}{\eta \cdot \left(\frac{PHR}{\eta_{el}} + \frac{1}{\eta_{th}} \right)} \quad (4.12)$$

όπου οι δείκτες e_l και t_h υποδηλώνουν τη διακριτή παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας και της θερμότητας (π.χ. από μία μονάδα ηλεκτροπαραγωγής και ένα λέβητα), αντίστοιχα. Κατά συνέπεια, εάν ένα σύστημα Σ.Η.Θ. με συνολικό βαθμό απόδοσης $\eta=0,80$ και λόγο ηλεκτρισμού προς θερμότητα $PHR=0,60$ υποκαθιστά μια μονάδα ηλεκτροπαραγωγής με απόδοση $\eta_{el}=0,35$ και έναν λέβητα αποδοτικότητας $\eta_{th}=0,85$, τότε από την εξίσωση 4.9 προκύπτει $FSR=0,325$. Αυτό σημαίνει ότι η συμπαράγωγή μειώνει τη συνολική κατανάλωση ενέργειας κατά 32,5%.

Η απόδοση ενός συστήματος εξαρτάται από το φορτίο και από τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Από την άλλη, ο βαθμός χρησιμοποίησης των παραγόμενων ενεργειακών μορφών επηρεάζεται από την αρχική επιλογή (σχεδιασμός) του συστήματος, τη στρατηγική της συμπαράγωγής (λειτουργικός έλεγχος) και τη σύμπτωση μεταξύ της παραγωγής και χρήσης των ωφέλιμων ενεργειακών μορφών. Για τους λόγους αυτούς, οι ολοκληρωτικοί δείκτες για μία χρονική περίοδο, π.χ. οι ετήσιοι δείκτες είναι συχνά σημαντικότεροι από τους στιγμιαίους ή τους ονομαστικούς, δεδομένου ότι είναι περισσότερο αντιπροσωπευτικοί της πραγματικής απόδοσης του συστήματος.

Επιπλέον υπάρχουν νομικά ζητήματα, που καθιστούν σημαντικές τις ολοκληρωτικές τιμές των δεικτών. Παραδείγματος χάριν, σύμφωνα με το σχετικό νόμο για τα θέματα συμπαράγωγής στην Ελλάδα, για να μπορεί ένα σύστημα Σ.Η.Θ. να είναι επιλέξιμο για επιδότηση, πρέπει να έχει ένα ετήσιο συνολικό βαθμό απόδοσης τουλάχιστον 65% στο βιομηχανικό τομέα και τουλάχιστον 60% στον τριτογενή τομέα.

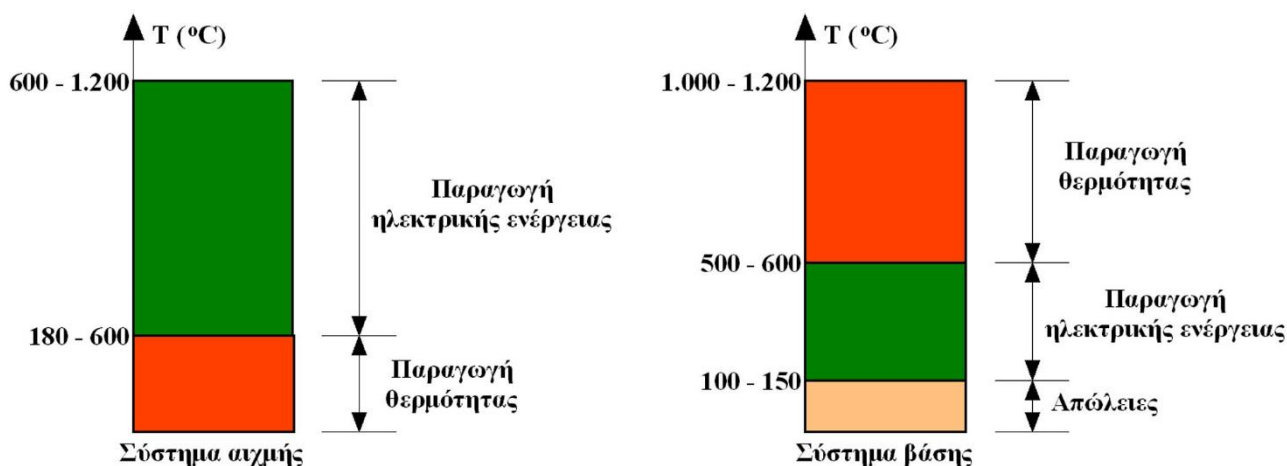
Όλοι οι ανωτέρω ορισμοί ισχύουν, επίσης, εάν η ισχύς αντικατασταθεί από την ενέργεια σε μία ορισμένη χρονική περίοδο. Τότε οι προκύπτουσες ολοκληρωτικές τιμές των δεικτών υποδηλώνουν την απόδοση του συστήματος κατά τη διάρκεια της περιόδου αυτής. Έτσι η σχέση 4.7, για παράδειγμα, μπορεί να γραφτεί, επίσης, με βάση την παραγωγή και κατανάλωση ενέργειας σε μία συγκεκριμένη περίοδο ως εξής:

$$\eta_{co} = \eta_{el} + \eta_{th} = \frac{E_{el} + Q}{E_{ch}} = \frac{E_{el} + Q}{m_f \cdot H_u} \quad (4.13)$$

όπου E_{el} και Q είναι αντίστοιχα η ηλεκτρική και η θερμική ενέργεια που παράγεται από το σύστημα Σ.Η.Θ. κατά τη διάρκεια συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος, ενώ m_f είναι η ποσότητα καυσίμου που καταναλώνεται από το σύστημα στο ίδιο χρονικό διάστημα. Συνεπώς η εξίσωση 4.13 παρέχει τον ολικό βαθμό απόδοσης του συστήματος για το εξεταζόμενο χρονικό διάστημα.

4.3. Συστήματα Σ.Η.Θ.

Τα περισσότερα συστήματα Σ.Η.Θ. μπορούν να χαρακτηριστούν είτε ως συστήματα αιχμής (topping systems) είτε ως συστήματα βάσεως (bottoming systems). Στα συστήματα αιχμής, ρευστό υψηλής θερμοκρασίας χρησιμοποιείται πρωτίστως για την παραγωγή ηλεκτρισμού, ενώ η αποβαλλόμενη θερμότητα χαμηλής θερμοκρασίας χρησιμοποιείται σε θερμικές διεργασίες, θέρμανση χώρων ή ακόμη και για παραγωγή πρόσθετης ηλεκτρικής ενέργειας (συνδυασμένοι κύκλοι). Στα συστήματα βάσεως παράγεται πρωτίστως θερμική ενέργεια υψηλής θερμοκρασίας (όπως, π.χ., σε κάμινους χαλυβουργείων, ναυουργείων και εργοστασίων σκυροδέματος), κατόπιν τα θερμά αέρια διοχετεύονται συνήθως σε λέβητα ανάκτησης θερμότητας, όπου παράγεται ατμός, ο οποίος θέτει σε λειτουργία έναν ατμοστρόβιλο και, εν συνεχεία, μία γεννήτρια. Είναι ακόμη δυνατόν τα θερμά αέρια να διοχετευθούν σε αεριοστρόβιλο, χωρίς την παρεμβολή λέβητα. Το σχήμα 4.3 δίνει ενδεικτικές τιμές θερμοκρασιών για τις δύο κατηγορίες συστημάτων.



Σχήμα 4.3: Ενδεικτικές θερμοκρασιακές στάθμες συστημάτων συμπαράγωγής

Ένα σύστημα συμπαράγωγής αποτελείται από τις ακόλουθες διακριτές συνιστώσες:

- Κύκλωμα θέρμανσης. Το κύκλωμα θέρμανσης έχει σκοπό να δεσμεύσει την απορριπτόμενη θερμότητα και να καλύψει το θερμικό φορτίο. Στο κύκλωμα θέρμανσης περιλαμβάνονται η ανάκτηση θερμότητας, λέβητας ή βοηθητική πηγή θέρμανσης, αντλία θερμότητας κλπ.
- Κύκλωμα ψύξης. Το κύκλωμα ψύξης έχει σκοπό την παροχή ψύξεως προς τις βασικές μονάδες ισχύος του συστήματος συμπαράγωγής. Δύναται να περιλαμβάνει πύργους ψύξης, αντλίες θερμότητας, συμπιεστές, ψύκτες απορρόφησης κλπ.
- Κύκλωμα ισχύος. Στο κύκλωμα ισχύος εκτελείται η βασική παραγωγή ισχύος του συστήματος. Μπορεί να αποτελείται από ατμοστρόβιλους, αεριοστρόβιλους, ντιζελογεννήτριες κλπ.

Οι βασικές τεχνολογίες Σ.Η.Θ. προκύπτουν με βάση τα χρησιμοποιούμενα κυκλώματα ισχύος και είναι οι εξής:

- Συμπαράγωγή με ατμοστρόβιλο: Χρησιμοποιείται ως καύσιμο άνθρακας, λιγνίτης, πετρέλαιο, στερεή βιομάζα, απόβλητα, τύρφη και πυρηνικά καύσιμα. Ο ατμός είναι το μέσο με το οποίο η θερμική ενέργεια μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια.
- Συμπαράγωγή με αεριοστρόβιλο: Το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο είναι τα μόνα κατάλληλα καύσιμα. Το μέσο μεταφοράς της θερμότητας είναι τα καυσαέρια του θαλάμου καύσης.
- Συμπαράγωγή με συνδυασμένο κύκλο: Η υψηλή θερμότητα και περιεκτικότητα σε οξυγόνο των καυσαερίων του αεριοστρόβιλου χρησιμοποιούνται σε μια δεύτερη διεργασία με έναν ατμοστρόβιλο.
- Συμπαράγωγή με εμβολοφόρο μηχανή: Η χημικά δεσμευμένη ενέργεια του φυσικού αερίου ή του πετρελαίου diesel, για παράδειγμα, μετασχηματίζεται άμεσα με την καύση σε μηχανική ενέργεια.

Στον πίνακα 4.1 δίνεται συνοπτική παρουσίαση των διαθέσιμων τεχνολογιών Σ.Η.Θ. και των χαρακτηριστικών πεδίων λειτουργίας τους.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι εναλλακτικές τεχνολογίες Σ.Η.Θ.

Πίνακας 4.1: Κατηγορίες συστημάτων Σ.Η.Θ. και πεδία εφαρμογής.

Τύπος μονάδας	Μονάδες ηλεκτρισμού και θερμότητας		Συνδυασμένες μονάδες ηλεκτρισμού και θερμότητας		
Τύπος μονάδας	Μονάδα Σ.Η.Θ. με ατμοστρόβιλο	Μονάδα Σ.Η.Θ. συνδυασμένου κύκλου με αεριοστρόβιλο	Θερμική μονάδα με αεριοστρόβιλο	Θερμική μονάδα με βιομηχανικό κινητήρα	Μικρής κλίμακας Σ.Η.Θ.
Σύστημα κίνησης	Ατμοστρόβιλος	Ατμοστρόβιλος – αεριοστρόβιλος	Αεριοστρόβιλος	Βιομηχανικός κινητήρας Otto ή κινητήρας Diesel με καταλυτικό μετατροπέα	
Καύσιμο	Κάρβουνο, μαζούτ, ντίζελ, φυσικό αέριο	Φυσικό αέριο, υγραέριο, κηροζίνη, αεριοποιημένος άνθρακας (μελλοντικά)	Φυσικό αέριο, υγραέριο, βιοαέριο, κηροζίνη, βιοκαύσιμα		
Θερμοκρασία	Έως 500°C	Έως 300°C	Έως 550°C	Έως 100°C	Έως 100°C
Εφαρμογή	Τηλεθέρμανση	Τηλεθέρμανση	Θερμότητα διεργασιών για βιομηχανία και νοσοκομεία (ατμός, ζεστό νερό)	Τοπικά δίκτυα θέρμανσης, μεμονωμένα κτήρια (νοσοκομεία, μεγάλα κτήρια)	Ανεξάρτητα συγκροτήματα κατοικιών, μεμονωμένα κτήρια (σχολεία, ξενοδοχεία, εμπορικές επιχειρήσεις)
Δυναμικότητα	0,5 – 1.000MW _e	20 – 100MW _e	1 – 10MW _e	20 – 1.000kW _e	5 – 15kW _e
Δείκτης συμπαράγωγής ⁽¹⁾	0,30 – 0,60	0,80 – 1,20	0,40 – 0,60	0,55 – 0,65	0,35 – 0,45
Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης	0,25 – 0,35 0,30 – 0,40	0,40 – 0,50	0,20 – 0,35	0,30 – 0,40	0,25 – 0,30
Συνολική απόδοση	0,45 – 0,85	0,55 – 0,85	0,75 – 0,85	0,85 – 0,90	0,85 – 0,90
Πλεονεκτήματα	Ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας σε μεγάλους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής	Μικρό κόστος επένδυσης, μεγάλος συντελεστής συμπαράγωγής	Θερμότητα διεργασιών υψηλής θερμοκρασίας	Μικρές διαστάσεις, ολοκληρωμένη κατασκευή, υψηλός συνολικός βαθμός απόδοσης	

(1): Δείκτης συμπαράγωγής = ηλεκτρική / θερμική ενέργεια.

4.3.1. Συστήματα ατμοστροβίλου

Τα συστήματα Σ.Η.Θ. με ατμοστρόβιλο είναι τα πλέον διαδεδομένα, κατάλληλα για απαιτήσεις ισχύος από 500kW_e έως 1.000MW_e. Το συγκριτικό πλεονέκτημα, που εμφανίζουν ως προς τις άλλες διαθέσιμες τεχνολογίες, είναι η δυνατότητα καύσης οποιουδήποτε καυσίμου, ακόμη και στερεά απόβλητα τα οποία καίγονται σε ειδικούς λέβητες, εφοδιασμένους με συστήματα κατακρατήσεως ή και εξουδετερώσεως ρύπων και τοξικών ουσιών, που δημιουργούνται κατά την καύση. Σε περιπτώσεις μικρών αποκεντρωμένων συστημάτων, η καύση βιοκαυσίμων (π.χ. στερεής βιομάζας) μπορεί να οδηγήσει σε εγγυημένη παροχή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές προς την κατανάλωση με το χαμηλότερο δυνατό κόστος.

Ο ολικός βαθμός απόδοσης συμπαράγωγής με συστήματα ατμοστροβίλων είναι της τάξης του 60 – 85%, με το, επίσης, σημαντικό πλεονέκτημα της διατήρησής του σε υψηλές τιμές ακόμα και σε λειτουργία σε μερικό φορτίο. Στα αρνητικά χαρακτηριστικά της λειτουργίας των συστημάτων ατμοστροβίλων είναι ο σχετικά χαμηλός βαθμός απόδοσης για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος, ο οποίος διαμορφώνεται στο 15 – 20%, χαρακτηριστικό που οδηγεί σε μικρό λόγο ηλεκτρισμού προς θερμότητα. Το χαρακτηριστικό αυτό συνεπάγεται τη μειωμένη σκοπιμότητα για τη χρήση των συστημάτων Σ.Η.Θ. με ατμοστρόβιλους σε περιόδους μειωμένων αναγκών σε θερμική ενέργεια (θερινή περίοδος). Αύξηση του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης μπορεί να επιτευχθεί μέχρι ενός σημείου με αύξηση της πίεσεως και της θερμοκρασίας του ατμού στην είσοδο του ατμοστροβίλου.

Τα συστήματα ατμοστροβίλου έχουν υψηλή αξιοπιστία, που φθάνει το 95%, υψηλή διαθεσιμότητα, της τάξεως του 90 – 95% και μεγάλη διάρκεια ζωής (25 – 35 έτη). Παρουσιάζουν, όμως, σχετικά μεγάλο χρόνο εγκατάστασης, που φτάνει τους 12 – 18 μήνες για μικρές μονάδες, ενώ για μεγαλύτερα συστήματα συμπαράγωγής προσεγγίζει τα τρία έτη. Ως αξιοπιστία ορίζεται η πιθανότητα να λειτουργεί ικανοποιητικώς ένα σύστημα για δεδομένο χρονικό διάστημα και με προκαθορισμένες συνθήκες. Αντίστοιχα, με τον όρο *διαθεσιμότητα* ορίζεται η πιθανότητα να λειτουργεί ικανοποιητικώς ένα σύστημα σε τυχαία χρονική στιγμή εντός μιας συγκεκριμένης χρονικής περιόδου (π.χ. ετήσια).

Οι τρεις βασικές διατάξεις συστημάτων ατμοστροβίλων περιγράφονται αναλυτικότερα στη συνέχεια.

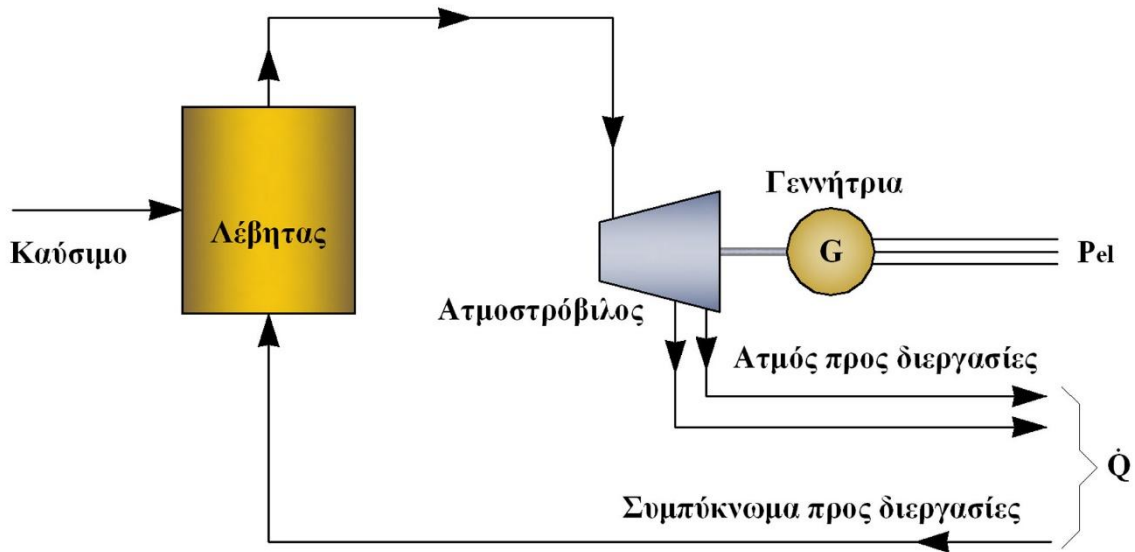
4.3.1.α. Συστήματα συμπαράγωγής με ατμοστρόβιλο αντιθλίψεως

Στα συστήματα αυτά, ο ατμός υψηλής πίεσεως (220 – 100bar) και θερμοκρασίας (480 – 540°C), ο οποίος παράγεται σε λέβητα, αφού εκτονωθεί σε ατμοστρόβιλο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, εξέρχεται του στροβίλου σε πίεση και θερμοκρασία κατάλληλη για τις θερμικές διεργασίες. Ο όρος «αντίθλιψη» περιγράφει το χαρακτηριστικό ότι η πίεση του ατμού, που οδηγείται προς ανάκτηση θερμότητας, είναι ανώτερη της ατμοσφαιρικής (3 – 20bar). Σχετικό διάγραμμα ροής ισχύος και ατμού παρουσιάζεται στο σχήμα 4.4.

Τα συστήματα συμπαράγωγής με ατμοστρόβιλο αντιθλίψεως παρουσιάζουν, σε σχέση με αυτά του ατμοστροβίλου απομαστεύσεως που θα παρουσιαστούν παρακάτω, τα εξής πλεονεκτήματα:

- απλή μορφή,
- μικρότερο κόστος κατασκευής και εγκατάστασης,
- μειωμένη ή και καθόλου ανάγκη σε ψυκτικό υγρό ,
- υψηλότερο ολικό βαθμό απόδοσης (περίπου 85%), κυρίως λόγω του ότι δεν αποβάλλεται θερμότητα στο περιβάλλον μέσω ψυκτών.

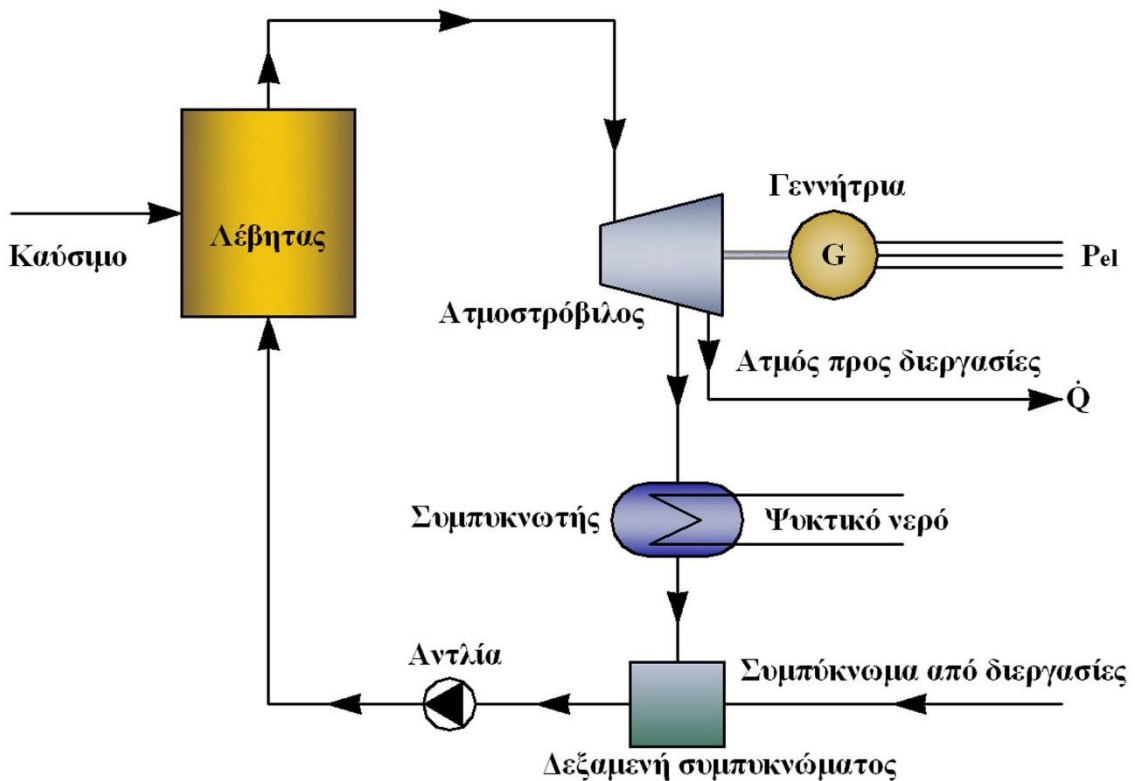
Από την άλλη μεριά, παρουσιάζουν το σημαντικό μειονέκτημα ότι η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την απαιτούμενη θερμότητα. Κατά συνέπεια η παραγωγή θερμικής ισχύος είναι αδύνατη χωρίς την ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Με βάση το δεδομένο αυτό, η εφαρμογή των συστημάτων ατμοστροβίλων αντίθλιψης ευνοείται περισσότερο σε περιπτώσεις μεγάλων θερμοηλεκτρικών σταθμών κεντρικής παραγωγής, στους οποίους η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος και η διάθεσή της προς το δίκτυο μεταφοράς είναι συνεχής, παρά σε αποκεντρωμένα συστήματα.



Σχήμα 4.4: Σύστημα Σ.Η.Θ. με αεριοστρόβιλο αντίθλιψης.

4.3.1.β. Συστήματα συμπαράγωγής με ατμοστρόβιλο απομαστεύσεως

Και στην περίπτωση αυτή, η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας επιτυγχάνεται με όμοιο τρόπο με αυτό στην περίπτωση των συστημάτων με ατμοστρόβιλους αντίθλιψης. Η διαφορά μεταξύ των δύο υλοποιήσεων εμφανίζεται στο ότι στην περίπτωση ατμοστρόβιλου απομαστεύσεως, ποσότητα του ατμού απομαστεύεται (εξάγεται) από μία ή περισσότερες ενδιάμεσες βαθμίδες του στρόβιλου, η οποία χρησιμεύει για την προθέρμανση του τροφοδοτικού νερού και, συγχρόνως, παρέχεται θερμική ισχύς στον εναλλάκτη, ενώ ο υπόλοιπος ατμός εκτονώνεται μέχρι την πίεση του συμπυκνωτή της τάξης των 0,05 – 0,10bar. Σχετικό διάγραμμα ροής ισχύος και ατμού παρουσιάζεται στο σχήμα 4.5.



Σχήμα 4.5: Σύστημα Σ.Η.Θ. με αεριοστρόβιλο απομαστεύσεως.

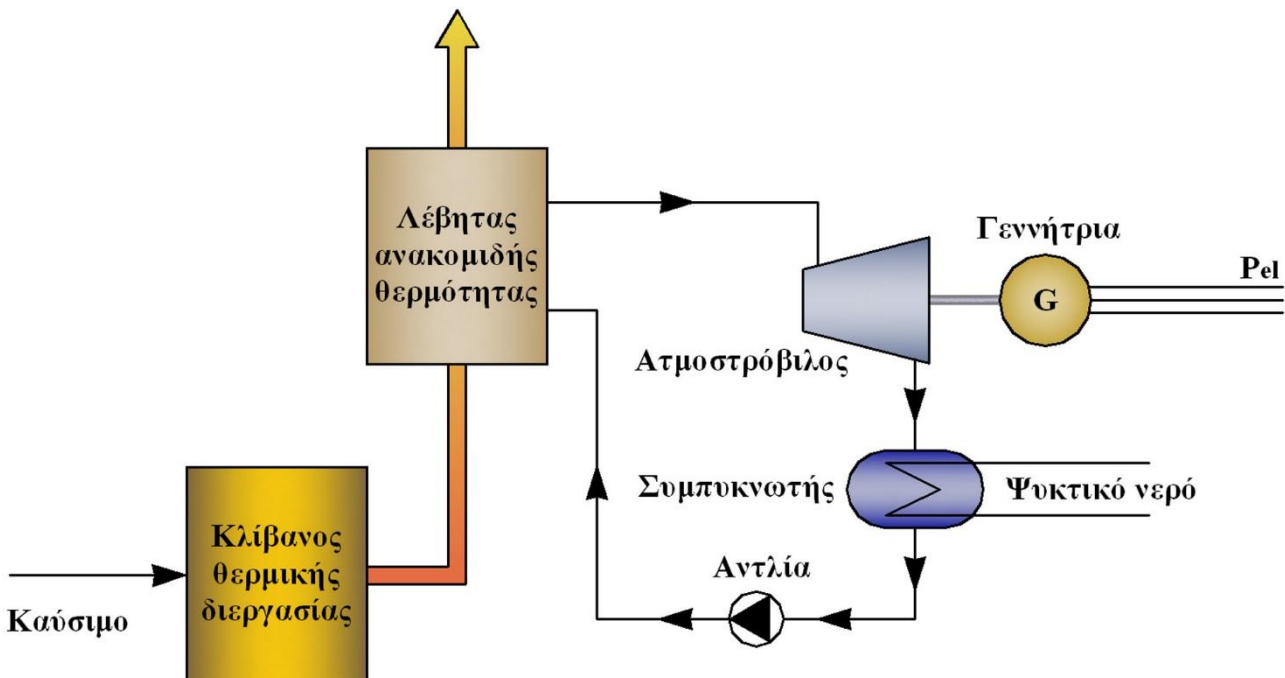
Τα συστήματα απομαστεύσεως μειονεκτούν σε σχέση με τα συστήματα αντίθλιψης στο ότι είναι ακριβότερα και έχουν μικρότερο ολικό βαθμό απόδοσης (περίπου 80 %), λόγω της αποβολής θερμότητας στο συμπυκνωτή ατμού. Από την άλλη μεριά, εμφανίζουν συγκριτικό πλεονέκτημα λόγω της δυνατότητας ανεξάρτητης (εντός ορισμένων ορίων) ρυθμίσεως της ηλεκτρικής και θερμικής ισχύος και, συνεπώς, της μεταβλητής τιμής του λόγου ηλεκτρισμού προς θερμότητα. Αυτό επιτυγχάνεται με ρύθμιση της ολικής παροχής ατμού και, επομένως, της παροχής ατμού προς το συμπυκνωτή.

Τα συστήματα ΣΗΘ με αμοστρόβιλο απομάστευσης:

- Κατασκευάζονται για ισχύ από 0,5 έως 100MW_e.
- Παρουσιάζουν ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης 25 – 30%, θερμικό βαθμό απόδοσης 40 – 60%, ολικό βαθμό απόδοσης Σ.Η.Θ. 65 – 90%.
- Ο λόγος ηλεκτρικής προς θερμική ενέργεια κυμαίνεται από 0,1 έως 0,3 .
- Ο μέσος χρόνος ζωής είναι περίπου 30 έτη.

4.3.1.γ. Συστήματα συμπαράγωγής με αμοστρόβιλο σε κύκλο βάσεως

Στην περίπτωση αυτή το αρχικό προϊόν είναι η θερμική ισχύς, η οποία παράγεται σε ένα κλίβανο ή λέβητα. Τέτοιες περιπτώσεις συναντώνται σε αρκετές βιομηχανίες, όπως χαλυβουργία, υαλουργία, κεραμουργία, εργοστάσια σκυροδέματος, εργοστάσια αλουμινίου, διυλιστήρια πετρελαίου κλπ. Μέσω των θερμικών και χημικών διεργασιών, που συντελούνται κατά την παραγωγική διαδικασία, παράγονται αέρια απόβλητα υψηλής θερμοκρασίας. Σε εφαρμογές συμπαράγωγής, τα αέρια αυτά οδηγούνται σε λέβητα ανάκτησης θερμότητας για την παραγωγή ατμού, ο οποίος, στη συνέχεια, εκτονώνεται σε αμοστρόβιλο για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Με αυτόν τον τρόπο η μονάδα παραγωγής θερμότητας μετατρέπεται σε σύστημα συμπαράγωγής με κύκλο βάσεως ατμού. Σχετικό διάγραμμα ροής ισχύος παρουσιάζεται στο σχήμα 4.6.



Σχήμα 4.6: Σύστημα Σ.Η.Θ. με αμοστρόβιλο σε κύκλο βάσεως.

Σε εφαρμογές αυτού του τύπου ο βαθμός απόδοσης παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος είναι της τάξης του 5 – 15%. Επισημαίνεται, όμως, ότι η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος αποτελεί επιπρόσθετο προϊόν,

προερχόμενο από θερμότητα που διαφορετικά θα απορριπτόταν στο περιβάλλον. Συνεπώς, ακόμα και με αυτή τη χαμηλή απόδοση, η ενεργειακή σκοπιμότητα είναι δεδομένη.

4.3.2. Συστήματα αεριοστρόβιλου

Διακρίνονται δύο βασικές υλοποιήσεις συστημάτων Σ.Η.Θ. με αεριοστρόβιλο, οι ανοιχτού και κλειστού τύπου. Το χρησιμοποιούμενο καύσιμο είναι συνήθως φυσικό αέριο, υγραέριο και ελαφρύ πετρέλαιο.

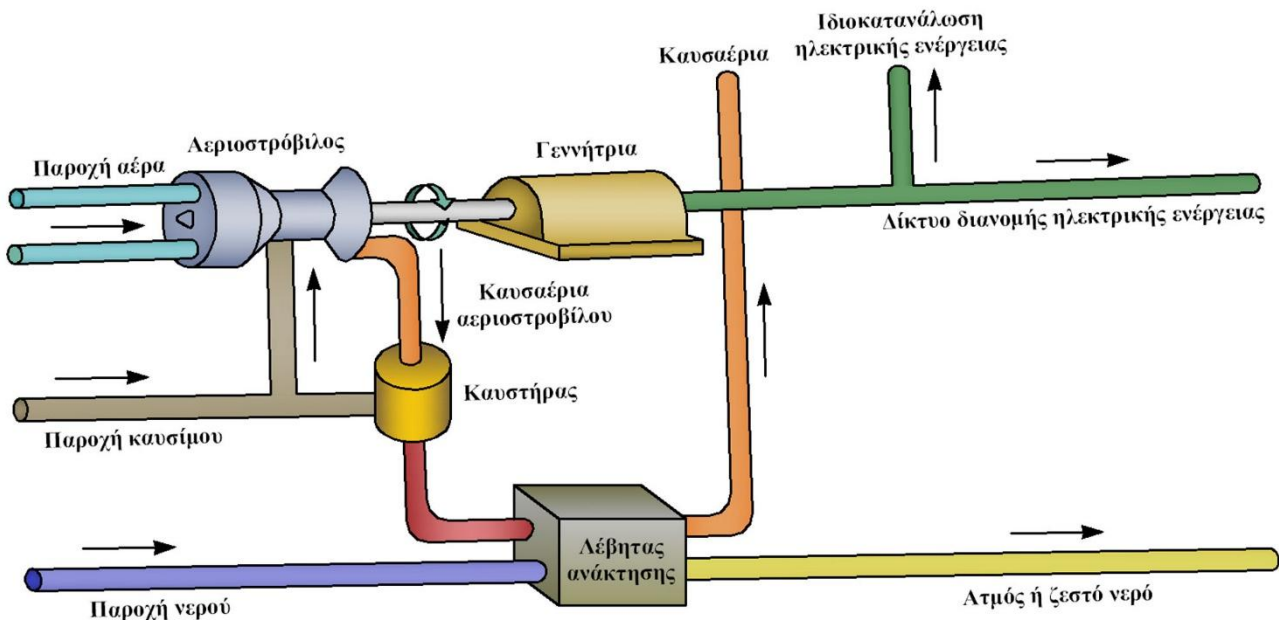
4.3.2.a. Συστήματα συμπαράγωγής με αεριοστρόβιλο ανοιχτού κύκλου

Οι αεριοστρόβιλοι ανοιχτού κύκλου είναι οι κλασσικοί αεριοστρόβιλοι, που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 2. Αέρας αναρροφάται από την ατμόσφαιρα, συμπιέζεται και οδηγείται στο θάλαμο καύσεως. Στη συνέχεια τα καυσαέρια οδηγούνται στον αεριοστρόβιλο, όπου εκτονώνονται, απελευθερώνοντας ενέργεια με την οποία κινείται η ηλεκτρογεννήτρια, και διαφεύγουν από αυτόν σε θερμοκρασία 300 – 600°C.

Η αξιοποίηση της απορριπτόμενης θερμότητας των καυσαερίων σε ένα σύστημα συμπαράγωγής μπορεί να γίνει με δύο τρόπους:

- Με άμεση χρήση τους σε θερμικές διεργασίες (θέρμανση, ξήρανση κλπ).
- Με διοχέτευσή τους σε μονάδες ανακτήσεως θερμότητας, οι οποίες ονομάζονται *λέβητες ανάκτησης θερμότητας* ή απλώς *λέβητες καυσαερίων*. Σ' αυτούς παράγεται ατμός υψηλής ενθαλπίας, ο οποίος είναι κατάλληλος για παραγωγικές διεργασίες, όπως θερμικές, αλλά και για κίνηση ατμοστρόβιλου, συνδεδεμένου με γεννήτρια ή κάποιο άλλο μηχάνημα. Στην τελευταία περίπτωση πρόκειται για την κλασσική περίπτωση συνδυασμένου κύκλου, που παρουσιάστηκε αναλυτικά στο Κεφάλαιο 2.

Στις προαναφερθείσες τεχνικές αξιοποίησης της απορριπτόμενης θερμότητας είναι δυνατή η αύξηση της ειδικής ενθαλπίας των καυσαερίων, και, επομένως, της αποδιδόμενης θερμότητας, λόγω της υψηλής περιεκτικότητάς τους σε οξυγόνο. Αυτό επιτυγχάνεται με την παρεμβολή ενός θαλάμου καύσης ανάμεσα στον αεριοστρόβιλο και στο λέβητα ανακτήσεως θερμότητας, όπου, με την τροφοδοσία επιπλέον καυσίμου ολοκληρώνεται η δέσμευση της περίσσειας του οξυγόνου, δημιουργώντας καλύτερες συνθήκες καύσεως και βελτιώνοντας την ολική απόδοση του συστήματος (σχήμα 4.7).



Σχήμα 4.7: Σύστημα Σ.Η.Θ. με αεριοστρόβιλο ανοιχτού κύκλου.

Τα συστήματα Σ.Η.Θ. με αεριοστρόβιλο ανοιχτού κύκλου και λέβητα ανάκτησης θερμότητας των καυσαερίων:

- Κατασκευάζονται για ισχύ από 100 έως 30.000kW_e.
- Παρουσιάζουν ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης 25 – 35%, θερμικό βαθμό απόδοσης 40 – 50% και ολικό βαθμό απόδοσης 70 – 85%
- Ο λόγος παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος προς θερμική ισχύς είναι της τάξης του 0,25 – 0,80
- Ο μέσος χρόνος ζωής είναι περίπου 15 – 20 έτη.

Τα συστήματα συμπαράγωγής με αεριοστρόβιλο, για εφαρμογές μεσαίου μεγέθους εγκαταστημένης ισχύος (~10MW_e), συναγωνίζονται τις μεγάλες μηχανές εσωτερικής καύσεως και τους ατμοστρόβιλους. Λειτουργούν, συνήθως, με φυσικό αέριο ή ελαφρά αποστάγματα πετρελαίου (π.χ. ελαφρύ καύσιμο). Μπορούν, επίσης, να χρησιμοποιηθούν καύσιμα αέρια, που παράγονται, π.χ. κατά την καταλυτική πυρόλυση (catalytic cracking) υδρογονανθράκων σε διυλιστήρια πετρελαίου. Χρειάζεται, όμως, μεγάλη προσοχή, διότι τα πτερύγια του αεριοστρόβιλου είναι εκτεθειμένα στα προϊόντα της καύσεως. Τα προϊόντα αυτά πρέπει να μην περιέχουν συστατικά που προκαλούν διάβρωση, ενώ τα στερεά σωματίδιά τους πρέπει να είναι αρκετά μικρού μεγέθους, ώστε να μην προκαλούν φθορά κατά την πρόσκρουσή τους στα πτερύγια. Εάν τα καυσαέρια εμπεριέχουν τέτοιου είδους συστατικά, πρέπει να καθαρίζονται με ειδικές διατάξεις πριν οδηγηθούν στον αεριοστρόβιλο. Είναι, επίσης, πιθανόν να απαιτείται καθαρισμός του καυσίμου πριν από την εισαγωγή του στο θάλαμο καύσεως.

Τα συστήματα αεριοστρόβιλου ανοικτού κύκλου έχουν το μειονέκτημα του μικρού βαθμού απόδοσης στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (25 – 35%), διότι απαιτείται σημαντική ισχύς για την κίνηση του συμπιεστή, ενώ η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων είναι υψηλή. Λόγω, όμως, αυτής ακριβώς της υψηλής θερμοκρασίας των καυσαερίων, οι αεριοστρόβιλοι ανοικτού κύκλου καθίστανται ιδανικοί για συμπαράγωγή, με την οποία αυξάνεται ο ολικός βαθμός απόδοσης στο 70 – 85%. Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης, συγκρινόμενος με αυτόν των συστημάτων ατμοστρόβιλου, είναι υψηλότερος τόσο στο πλήρες, όσο και σε μερικό φορτίο, αλλά η μείωσή του σε μερικό φορτίο είναι πιο έντονη. Επίσης ο λόγος ηλεκτρισμού προς θερμότητα είναι υψηλότερος. Ο κύκλος αερίου με αναγεννητική προθέρμανση του αέρα, δηλαδή με χρήση των καυσαερίων για προθέρμανση του αέρα καύσεως, έχει υψηλότερο ηλεκτρικό αλλά χαμηλότερο ολικό βαθμό απόδοσης από ό,τι ο απλός κύκλος.

Ο χρόνος εγκαταστάσεως των συστημάτων συμπαράγωγής με αεριοστρόβιλο κυμαίνεται από 9 – 14μήνες, για ισχύ μέχρι τα 10MW_e, και φθάνει τα δύο έτη για μονάδες μεγαλύτερης ισχύος. Η αξιοπιστία και η μέση ετήσια διαθεσιμότητα συστημάτων αεριοστρόβιλου, που χρησιμοποιούν ως καύσιμο το φυσικό αέριο, είναι συγκρίσιμες με εκείνες των συστημάτων ατμοστρόβιλου. Οι μονάδες που χρησιμοποιούν υγρό καύσιμο απαιτούν πιο συχνές συντηρήσεις, με συνέπεια τη χαμηλότερη διαθεσιμότητα. Η ωφέλιμη διάρκεια ζωής είναι 15 – 20έτη, υπάρχει, όμως, ο κίνδυνος να μειωθεί δραστικά με τη χρήση καυσίμου κακής ποιότητας ή την ανεπαρκή συντήρηση.

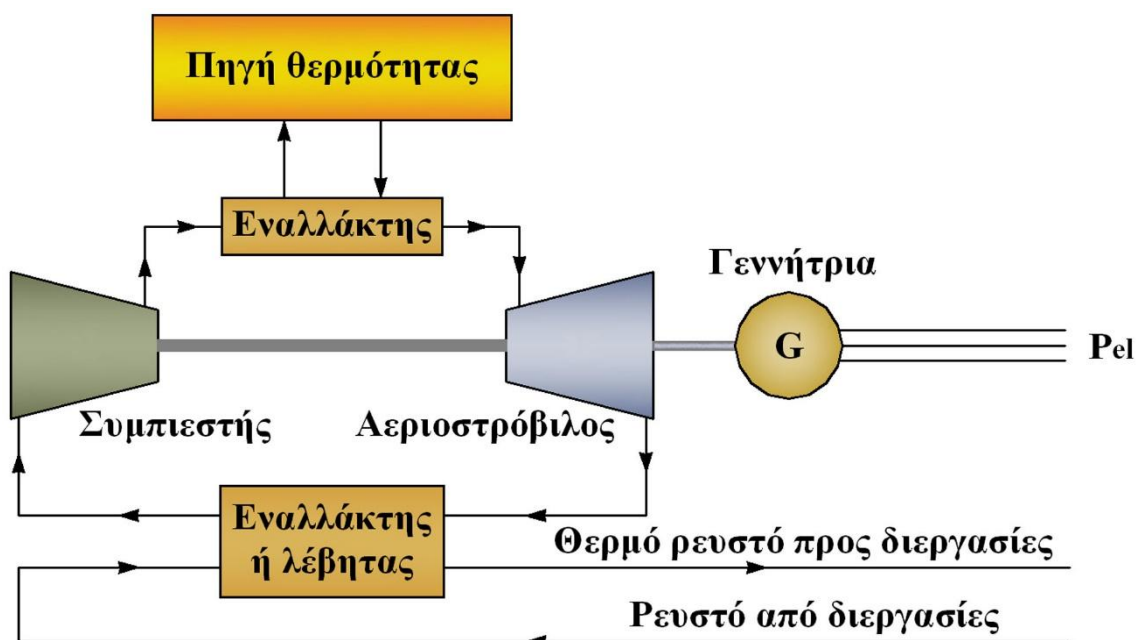
4.3.2.β. Συστήματα συμπαράγωγής με αεριοστρόβιλο κλειστού κύκλου

Στα συστήματα συμπαράγωγής με αεριοστρόβιλους κλειστού κύκλου το εργαζόμενο μέσο (συνήθως ήλιο ή αέρας) κυκλοφορεί σε κλειστό κύκλωμα. Αυτό θερμαίνεται μέχρι την κατάλληλη θερμοκρασία σε εναλλάκτη θερμότητας, πριν από την είσοδό του στον αεριοστρόβιλο, και ψύχεται μετά την έξοδο του από αυτόν. Στο σχήμα 4.8 παρουσιάζεται διάγραμμα ροής ισχύος.

Η υλοποίηση αυτή έχει το πλεονέκτημα ότι το ρευστό, που έρχεται σε επαφή με τα πτερύγια του αεριοστρόβιλου, διατηρείται καθαρό και ανεπηρέαστο από το καύσιμο και τον περιβάλλοντα αέρα στο θάλαμο καύσης, καθώς δε συμμετέχει στην καύση, και, συνεπώς, αποφεύγεται η μηχανική και χημική διάβρωση του αεριοστρόβιλου από τα προϊόντα της καύσεως. Επιπλέον η εξωτερική καύση επιτρέπει τη χρήση οποιουδήποτε καυσίμου, όπως άνθρακα, απόβλητα βιομηχανιών ή πόλεων, βιομάζας, υγρών ή αέριων καυσίμων παραγόμενων από βιομάζα, κλπ, γεγονός που επιτρέπει την παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ισχύος με πολύ χαμηλότερο κόστος.

Οι αεριοστρόβιλοι κλειστού κύκλου παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους αεριοστρόβιλους ανοικτού τύπου, όπως:

- υψηλότερη διαθεσιμότητα χάρη στις μικρότερες απαιτήσεις συντηρήσεως, λόγω της καθαρότητας του εργαζόμενου ρευστού
ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης δύναται να αυξηθεί με την ύπαρξη αναγεννητικής προθερμάνσεως του εργαζόμενου μέσου.



Σχήμα 4.8: Σύστημα Σ.Η.Θ. με αεριοστρόβιλο κλειστού κύκλου.

4.3.3. Συστήματα με εμβολοφόρες μηχανές εσωτερικής καύσεως

Οι Μηχανές Εσωτερικής Καύσεως (Μ.Ε.Κ.) χρησιμοποιούνται, συνήθως, για χαμηλής ισχύος συστήματα συμπαράγωγής (ονομαστική ισχύς 20 – 1.000kW_e), ενώ για μεγαλύτερες επιδώσεις προτιμούνται οι αεριοστρόβιλοι.

Διακρίνονται σε τέσσερις κατηγορίες συστημάτων συμπαράγωγής με Μ.Ε.Κ.:

1. μονάδες πολύ μικρής ισχύος με αεριομηχανή (15 – 250kW_e) ή κινητήρα Diesel αυτοκινήτων (75 – 250kW),
2. μονάδες μικρής κλίμακας με αεριομηχανή ή κινητήρα Diesel ισχύος έως 1.000kW,
3. συστήματα μέσης ισχύος με αεριομηχανή ή κινητήρα Diesel ισχύος έως 6.000kW,
4. συστήματα μεγάλης ισχύος με κινητήρα Diesel άνω των 6.000kW.

Ως αεριομηχανές (gas engines) εννοούνται οι εμβολοφόρες Μ.Ε.Κ. που λειτουργούν με αέριο, π.χ. φυσικό αέριο, βιοαέριο κλπ. Οι εμπορικά διαθέσιμοι τύποι εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ. παρουσιάζονται στις ακόλουθες ενότητες.

4.3.3.a. Βενζινοκινητήρες Otto αυτοκινήτων που έχουν μετατραπεί σε αεριομηχανές.

Είναι συνήθως μικρές μηχανές, ελαφριές, με μεγάλη συγκέντρωση ισχύος. Η μετατροπή επηρεάζει πολύ λίγο το βαθμό απόδοσης, ενώ μειώνει την ισχύ κατά 15 – 20%. Το κόστος κτήσης τους είναι χαμηλό, αλλά η διάρκεια ζωής τους είναι σχετικά μικρή (10.000 – 30.000 ώρες λειτουργίας). Οι κινητήρες Otto χρησιμοποιούν συνήθως καύσιμο αέριο (π.χ. φυσικό αέριο, υγραέριο κλπ) και παράγουν ηλεκτρική ενέργεια μέσω γεννητρίων, ενώ, συγχρόνως, παράγεται χρήσιμη θερμική ενέργεια από ανάκτηση θερμότητας στον εναλλάκτη των χιτωνίων και από τα καυσαέρια, μέσω λέβητα ανάκτησης θερμότητας.

Τα συστήματα Σ.Η.Θ. με κινητήρα Otto:

- Κατασκευάζονται για ισχύ από 15 έως 1.300kW
- Παρουσιάζουν ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης 32 – 35%, θερμικό βαθμό απόδοσης 50 – 60% και ολικό βαθμό απόδοσης 80 – 85%
- Ο λόγος της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος προς την παραγόμενη θερμική ισχύ είναι 0,5 – 0,8
- Ο μέσος χρόνος ζωής είναι περίπου 10 έτη.

4.2.3.β. Κινητήρες Diesel αυτοκινήτων που έχουν μετατραπεί σε αεριομηχανές.

Έχουν ισχύ μέχρι 200kW. Η μετατροπή συνήθως δεν προκαλεί μείωση της ισχύος, καθώς υπάρχει περιθώριο μειώσεως της περιέσεως της αέρα. Η μετατροπή επιτυγχάνεται με τροποποιήσεις των εμβόλων, των κεφαλών και του μηχανισμού βαλβίδων, που επιβάλλονται, διότι η έναυση δε γίνεται πλέον με απλή συμπίεση αλλά με σπινθηριστή.

Τα συστήματα ΣΗΘ με κινητήρα Diesel:

- Κατασκευάζονται για ισχύ από 100 έως 20.000kW.
- Παρουσιάζουν ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης 35 – 45%, θερμικό βαθμό απόδοσης 40 – 45% και ολικό βαθμό απόδοσης 75 – 90%.
- Ο λόγος της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος προς την παραγόμενη θερμική ισχύ είναι 0,70 – 0,90.
- Ο μέσος χρόνος ζωής είναι περίπου 15 – 20 έτη

4.3.3.γ. Μηχανές Diesel παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

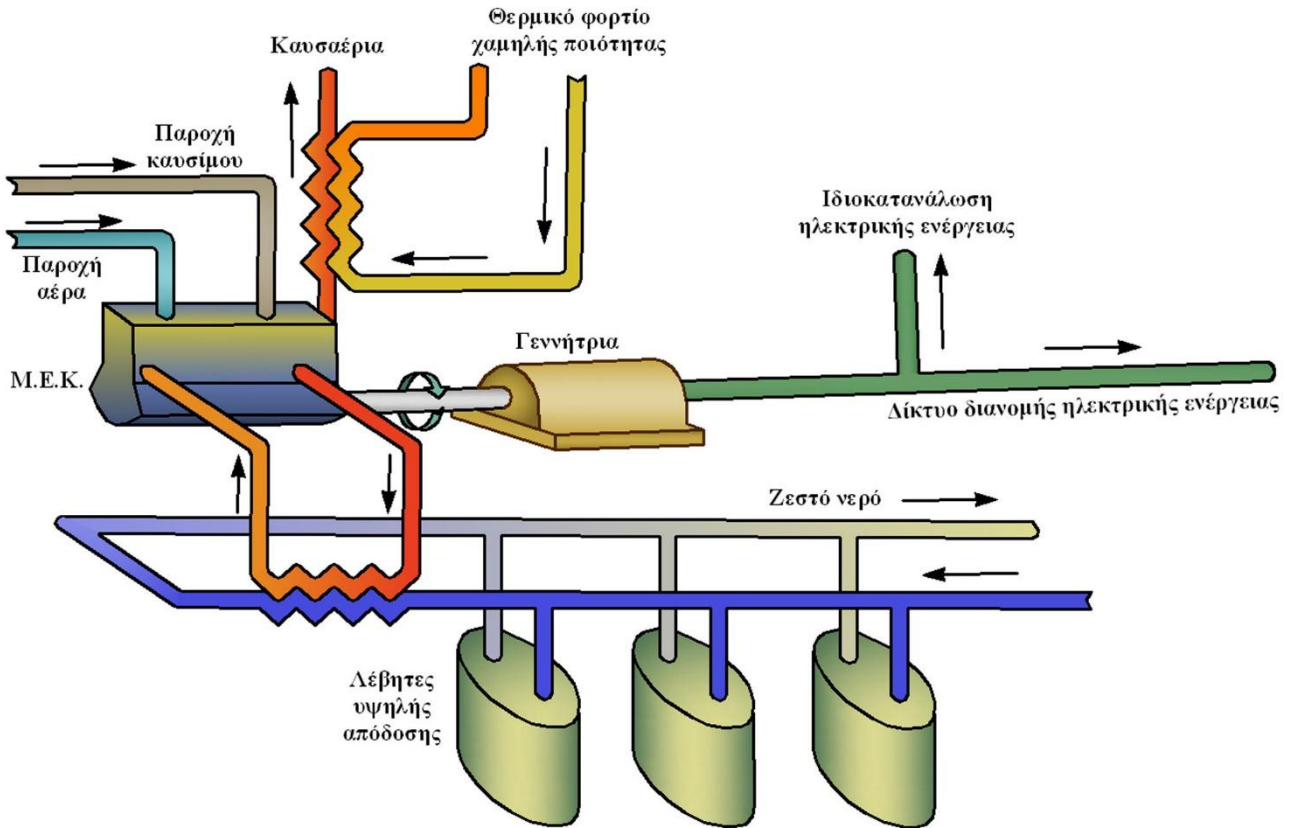
Οι μηχανές αυτές είναι οι γεννήτριες Diesel ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίες παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 2. Είναι βαριές και στιβαρές, ισχύος έως 50.000kW_e. Έχουν μειωμένες απαιτήσεις συντηρήσεως αλλά αυξημένο κόστος αγοράς, και ενδείκνυνται για συνεχή λειτουργία σε μεγάλα φορτία. Μια τυπική διάταξη ενός συστήματος Σ.Η.Θ. με εμβολοφόρο Μ.Ε.Κ. παρουσιάζεται στο σχήμα 4.9.

Η απορριπτόμενη θερμότητα προέρχεται κυρίως από την υψηλή ενθαλπία των καυσαερίων, το χιτώνιο της μηχανής και το σύστημα ψύξεως των λιπαντικών. Ακόμη είναι δυνατή η αξιοποίηση της θερμότητας που προέρχεται από τα συστήματα ψύξεως των υπολοίπων ρευστών, που έχουν σχέση με τη λειτουργία της μηχανής, δηλαδή του κλειστού κυκλώματος ψύξεως του κινητήρα και του αέρα υπερπληρώσεως, με χρήση κατάλληλων εναλλακτών θερμότητας.

Σε περιπτώσεις αποκεντρωμένων συστημάτων συμπαράγωγής, αυτά σχεδιάζονται, κατά κανόνα, για να παράγουν ικανή ποσότητα θερμικής ισχύος, ώστε να καλύπτεται το θερμικό φορτίο βάσεως. Για την αποφυγή της υπερδιαστασιολόγησης της Μ.Ε.Κ., προκειμένου να καλυφθούν ανάγκες για τα θερμικά φορτία αιχμής, επιλέγεται συνήθως η λύση πρόσθετου λέβητα καυσίμου υψηλής απόδοσης. Ο έλεγχος της λειτουργίας ολόκληρου του θερμικού συστήματος πραγματοποιείται με ένα ειδικό σύστημα αυτόματου ελέγχου. Όταν δεν επαρκεί η θερμότητα που παράγεται στο μέγιστο της λειτουργίας της Μ.Ε.Κ., τότε το σύστημα δίνει εντολή εκκινήσεως σε έναν, ή περισσότερους λέβητες, για συμπληρωματική παραγωγή θερμικής ισχύος. Η ολική απόδοση του συστήματος μπορεί να βελτιωθεί περισσότερο με την εγκατάσταση ενός δευτέρου εναλλάκτη θερμότητας (βοηθητικού λέβητα), για την περαιτέρω ανάκτηση θερμότητας από τα καυσαέρια.

Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης μικρών και μεσαίων κινητήρων είναι 35 – 45%, ενώ σε σύγχρονους μεγάλους κινητήρες φθάνει το 50%. Ο ολικός βαθμός απόδοσης του συστήματος συμπαράγωγής με εμβολοφόρο κινητήρα εσωτερικής καύσεως βρίσκεται στην περιοχή του 80%. Δύο από τα πλεονεκτήματα των συστημάτων αυτών είναι ότι ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης, εκτός του ότι είναι υψηλός, επηρεάζεται πολύ λίγο από τις μεταβολές του φορτίου, ενώ η απόκριση του συστήματος στις μεταβολές φορτίου είναι ταχύτατη. Η διάρκεια ζωής του συστήματος είναι 15 – 20 έτη, και εξαρτάται από το μέγεθος της μονάδας, την ποιότητα του καυσίμου και την ποιότητα της συντηρήσεως. Οι παλινδρομικοί κινητήρες απαιτούν

τακτικότερη συντήρηση απ' ό,τι τα προηγούμενα συστήματα, με αποτέλεσμα να έχουν μικρότερη μέση ετήσια διαθεσιμότητα (80 – 90%).



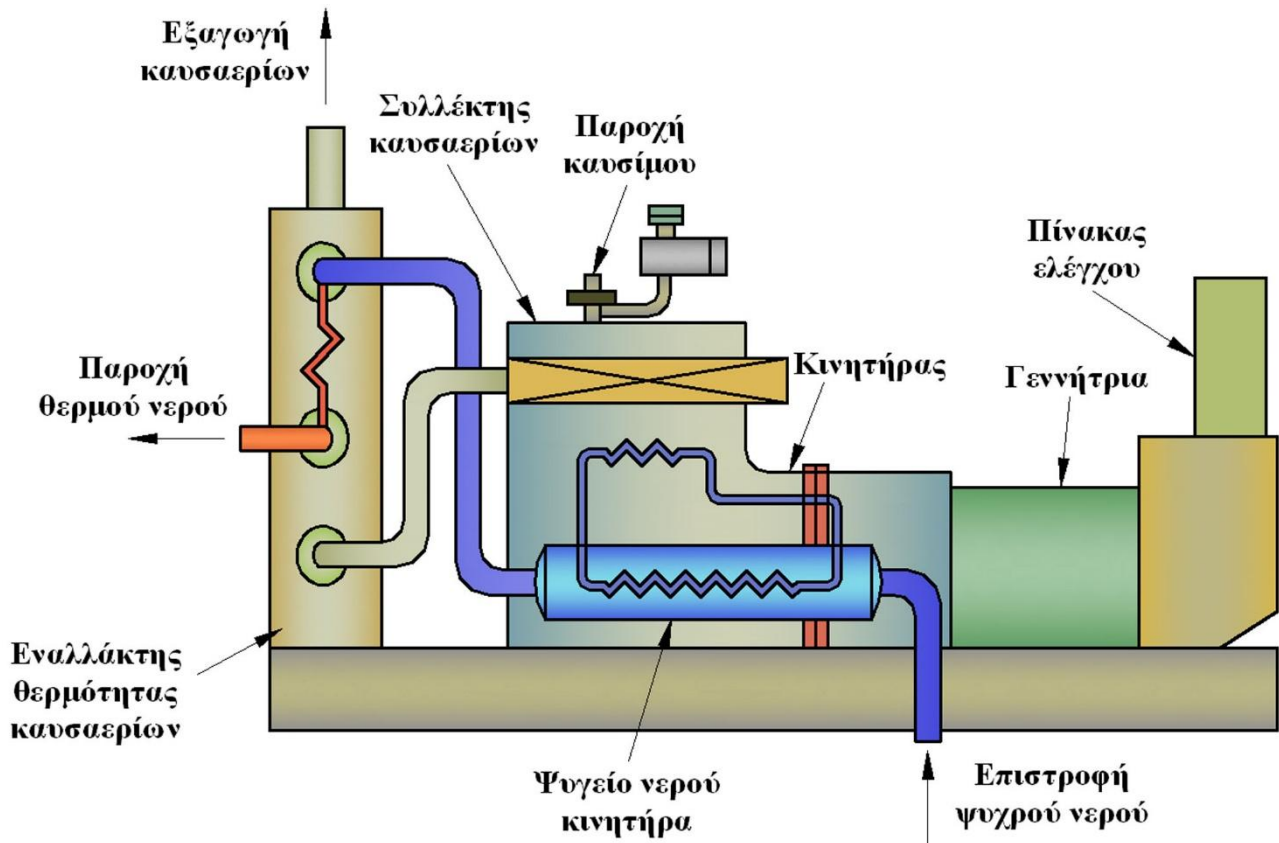
Σχήμα 4.9: Σύστημα Σ.Η.Θ. με εμβολοφόρο Μ.Ε.Κ.

4.3.4. Συστήματα συνδυασμένου κύκλου

Η έννοια του συνδυασμένου κύκλου παρουσιάστηκε αναλυτικά στο Κεφάλαιο 2 για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και την αύξηση του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης. Σε θεωρητική βάση, αναφέρεται σε συστήματα με δύο θερμοδυναμικούς κύκλους, οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους με κάποιο εργαζόμενο μέσο και λειτουργούν σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Ο κύκλος υψηλής θερμοκρασίας (κορυφής) αποβάλλει θερμότητα, που ανακτάται και χρησιμοποιείται από τον κύκλο χαμηλής θερμοκρασίας (βάσεως) για την παραγωγή πρόσθετης ηλεκτρικής ενέργειας, αυξάνοντας έτσι το βαθμό απόδοσης.

Στην περίπτωση εισαγωγής τεχνολογιών συμπαράγωγής σε συνδυασμένο κύκλο, τα θερμικά φορτία, που απομένουν μετά την έξοδο από τον ατμοστρόβιλο και τα οποία βρίσκονται με τη μορφή ατμού χαμηλής πίεσης, είναι κατάλληλα για δέσμευση θερμικής ισχύος. Εναλλακτικά μπορεί να αξιοποιηθεί και η απορριπτόμενη θερμική ισχύς με τα καυσαέρια. Στο σχήμα 4.10 παρουσιάζεται διάγραμμα ροής ισχύος σε σύστημα συμπαράγωγής με συνδυασμένο κύκλο.

Η ολική απόδοση των συστημάτων συνδυασμένου κύκλου υπερέχει αισθητά των αποδόσεων των συστημάτων συμπαράγωγής που χρησιμοποιούν συμβατικές τεχνολογίες. Η ισχύς τους κυμαίνεται, συνήθως, στην περιοχή 20 – 400MW_e, ενώ κατασκευάζονται επίσης και μικρότερες μονάδες ισχύος 4 – 11MW_e. Ο ολικός βαθμός απόδοσης είναι της τάξης του 70 – 85%. Η συγκέντρωση ισχύος (ισχύς ανά μονάδα όγκου) των συστημάτων αυτών είναι υψηλότερη από αυτήν των συστημάτων απλού κύκλου αεριοστροβίλου ή ατμοστροβίλου. Η λειτουργία σε μερικό φορτίο έχει αρνητική επίδραση στο βαθμό απόδοσης του συστήματος. Η υψηλή περιεκτικότητα οξυγόνου στα καυσαέρια του αεριοστροβίλου (περίπου 17% κατά μάζα) επιτρέπει την καύση συμπληρωματικού καυσίμου στο λέβητα καυσαερίων, εάν κριθεί αναγκαία, για την αύξηση ισχύος του συστήματος. Η συμπληρωματική καύση αυξάνει το βαθμό ισχύος του συστήματος



Σχήμα 4.11: Σχηματική απεικόνιση τυποποιημένης μονάδας συμπαράγωγής με εμβολοφόρο M.E.K.

Τα πακέτα συμπαράγωγής με κινητήρα Diesel παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τις εφαρμογές του εμπορικού – κτηριακού τομέα. Το 27 – 35% της προσφερόμενης ενέργειας καταναλώνεται στην παραγωγή ηλεκτρισμού, ενώ το 50 – 55% στη θέρμανση. Επομένως ο λόγος ηλεκτρισμού προς θερμότητα είναι της τάξης του 0,5 – 0,7, ενώ ο ολικός βαθμός απόδοσης κυμαίνεται στο 80%. Όσο αναφορά την αξιοπιστία και τη διαθεσιμότητα των μονάδων αυτών υπολογίζεται στο 90%. Σημαντική συμβολή στην εμπορική επιτυχία των συστημάτων έχει ο υψηλός βαθμός αυτοματισμού του έλεγχου της λειτουργίας τους. Ακόμη η τηλεματική παρακολούθηση της λειτουργίας τους επιτρέπει τη μείωση των δαπανών συντήρησης, καθιστώντας περιττή την ύπαρξη προσωπικού ελέγχου σε σταθερή βάση.

4.3.6. Άλλα συστήματα συμπαράγωγής

Τα συστήματα Σ.Η.Θ., που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους, αποτελούν την πλειοψηφία των συστημάτων που χρησιμοποιούνται σήμερα. Υπάρχει, ωστόσο, μία σειρά από τεχνολογικές λύσεις, που παρουσιάζουν ενδιαφέρον, χωρίς ακόμη να έχουν επιτύχει εμπορικά, είτε για λόγους κόστους είτε για λόγους τεχνικής ωριμότητας. Τα συστήματα αυτά παρουσιάζονται συνοπτικά στις επόμενες παραγράφους.

4.3.6.a. Κύκλοι βάσεως με οργανικά ρευστά

Η παραγωγή ηλεκτρικής, ή μηχανικής, ενέργειας με ανάκτηση θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας (80 – 300°C) είναι δυνατή, εάν αντί του νερού ως εργαζόμενο μέσο χρησιμοποιηθούν οργανικά ρευστά, π.χ. τολουόλη, τα οποία έχουν θερμοκρασία βρασμού αρκετά χαμηλότερη από εκείνη του νερού. Συνεπώς με χρήση κατάλληλων οργανικών ρευστών ως εργαζόμενα μέσα είναι δυνατόν να αξιοποιηθούν πηγές θερμότητας, όπως η ηλιακή ακτινοβολία, τα βιομηχανικά απόβλητα, η γεωθερμική ενέργεια, τα καυσαέρια ή η θερμότητα ψύξεως θερμικών μηχανών.

Η ισχύς των συστημάτων αυτών κυμαίνεται στην περιοχή 2kW – 10MW. Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης είναι μικρός και εξαρτάται από τη θερμοκρασία στην οποία είναι διαθέσιμη η θερμότητα. Για θερμοκρασίες από 75 έως 425°C, ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης κυμαίνεται στην περιοχή 5 – 30%, συνήθως, από 10 έως 20%. Από κατασκευαστικής πλευράς, ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στην επιλογή των υλικών, τα οποία πρέπει να έχουν ισχυρή αντιδιαβρωτική προστασία, ώστε να αντέχουν στο οργανικό ρευστό, καθώς και στη στεγανότητα των στοιχείων του συστήματος, ώστε να μην παρουσιάζεται διαρροή του οργανικού ρευστού προς το περιβάλλον.

Ο χρόνος εγκατάστασης των μικρών συστημάτων (με ισχύ έως 50kW), ιδιαίτερος εκείνων που είναι κατάλληλα για χρήση στον εμπορικό – κτηριακό τομέα, είναι 4 – 8 μήνες, ενώ για μεγαλύτερες μονάδες είναι 1 – 2 έτη. Όσον αναφορά στην αξιοπιστία των συστημάτων αυτών, δεν υπάρχουν αρκετές πληροφορίες, διότι η τεχνολογία αυτή είναι σχετικά νέα. Εκτιμάται ότι η μέση ετήσια διαθεσιμότητα τους είναι της τάξης του 80 – 90%, ενώ η αναμενόμενη διάρκεια ζωής τους είναι περίπου 20 έτη.

4.3.6.β. Κυψέλες καυσίμου (fuel cells)

Από τους διάφορους τύπους κυψελών καυσίμου που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 3, μόνον οι κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέως (Phosphoric Acid Fuel Cell – PAFC) έχουν αναπτυχθεί σε τέτοιο βαθμό, που να είναι κατάλληλες για σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής και να είναι ήδη σήμερα εμπορικά διαθέσιμες. Η θερμοκρασία λειτουργίας τους (περίπου 200°C) περιορίζει τη θερμοκρασία της ανακτώμενης θερμότητας. Επειδή η χημική ενέργεια του καυσίμου μετατρέπεται σε ηλεκτρική χωρίς την παρεμβολή θερμοδυναμικού κύκλου, ο βαθμός απόδοσης δεν περιορίζεται από εκείνον του κύκλου Carnot. Αν και θεωρητικά το άνω όριο είναι η μονάδα, ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης των κυψελών φωσφορικού οξέως κυμαίνεται στην περιοχή του 37 – 45%. Για φορτίο λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου στο 50% του ονομαστικού, ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης είναι ίσος, ή και μεγαλύτερος, από αυτόν σε ονομαστικό φορτίο. Ο ολικός βαθμός απόδοσης φθάνει το 85 – 90%, ενώ ο λόγος ηλεκτρισμού προς θερμότητα βρίσκεται στην περιοχή 0,8 – 1,0.

Οι κυψέλες καυσίμου τηγμένων ανθρακικών αλάτων (Molten Carbonate Fuel Cell – MCFC) και στερεού οξειδίου (Solid Oxide Fuel Cell – SOFC) είναι θεωρητικά περισσότερο κατάλληλες για συμπαράγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας υψηλής θερμοκρασίας (της τάξεως των 600°C), και αναμένεται ότι θα έχουν ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης της τάξης του 50%.

Οι κυψέλες καυσίμου είναι θεωρητικά κατάλληλες για συμπαράγωγή στο βιομηχανικό, εμπορικό και κτηριακό τομέα, διαθέτοντας πλεονεκτήματα, όπως η αρθρωτή (modular) δομή τους, η οποία διευκολύνει την κατασκευή μονάδων με την επιθυμητή ισχύ, η διατήρηση υψηλού ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης, ακόμη και σε μερικό φορτίο, οι χαμηλές εκπομπές ρύπων και η χαμηλή στάθμη θορύβου.

Τα πλεονεκτήματα των κυψελών καυσίμου είναι:

- αρθρωτή (modular) δομή για την επίτευξη μονάδων με επιθυμητή ισχύ,
- υψηλός βαθμός απόδοσης,
- ευκολία αυτοματισμού,
- χαμηλές εκπομπές ρύπων,
- χαμηλή στάθμη θορύβου.

Μειονεκτήματα είναι το υψηλό κόστος κατασκευής και η σχετικά μικρή διάρκεια ζωής.

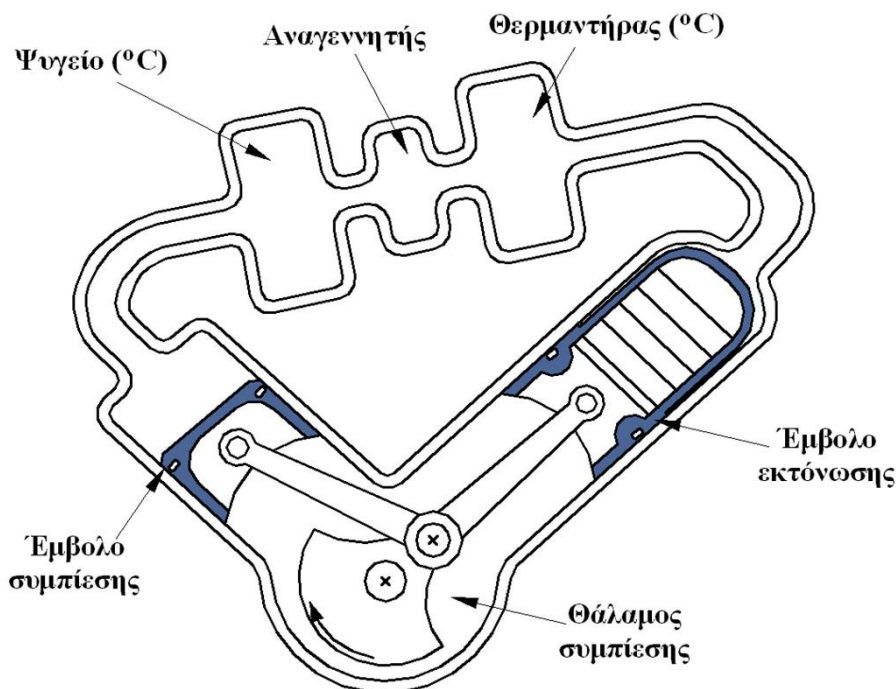
Οι κυψέλες καυσίμου κατασκευάζονται από 3kW_e και άνω, και παρουσιάζουν μέσο χρόνο ζωής περίπου 5 έτη. Είναι φανερό ότι, όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία λειτουργίας, τόσο μεγαλύτερο είναι και το ωφέλιμο θερμικό φορτίο, το οποίο μπορεί να ανακτηθεί από τον εναλλάκτη. Κυψέλες καυσίμου χαμηλής θερμοκρασίας (<80°C) δεν ενδείκνυνται για ΣΗΘ.

Εφόσον η τεχνολογία αυτή ωριμάσει τεχνικά και καταστεί οικονομικά ανταγωνιστική, θα αποτελέσει μία εξαιρετικά ενδιαφέρουσα προοπτική για τη συμπαράγωγή.

4.3.6.γ. Μηχανές Stirling

Η συμπαράγωγή με μηχανές Stirling, παρότι μέχρι σήμερα δεν είναι ευρέως διαδεδομένη, αρχίζει να κερδίζει έδαφος λόγω των σημαντικών πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν οι μηχανές αυτές, σε σχέση με τα συστήματα κινητήρων Diesel, αεριοστροβίλων (κύκλος Joule) και ατμοστροβίλων (κύκλος Rankine), διότι ο κύκλος Stirling πλησιάζει προς τον κύκλο Carnot πολύ περισσότερο απ' ό,τι οι υπόλοιποι.

Ο κινητήρας Stirling ονομάζεται και μηχανή εξωτερικής καύσης. Κατά τη λειτουργία του, αέριο (π.χ. υδρογόνο, ήλιο κλπ) συμπιέζεται και εκτονώνεται σε διάταξη κυλίνδρου δύο εμβόλων, με αποτέλεσμα την περιστροφή στροφαλοφόρου άξονα. Το αέριο θερμαίνεται σε εναλλάκτη θερμότητας, χωρίς να συμμετέχει στην καύση. Η εξωτερική καύση στις μηχανές Stirling επιτρέπει τη χρήση διάφορων καυσίμων, π.χ. υγρά ή αέρια καύσιμα, άνθρακα, αέρια ή υγρά προερχόμενα από άνθρακα, καύσιμα προερχόμενα από βιομάζα, ακόμα και απορρίμματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Η απλοποιημένη λειτουργική διάταξη φαίνεται στο σχήμα 4.12.



Σχήμα 4.12: Απλοποιημένη λειτουργική διάταξη κινητήρα Stirling.

Τα πλεονεκτήματα της μηχανής Stirling είναι ο υψηλός βαθμός απόδοσης, η μεγαλύτερη ευελιξία στην επιλογή καυσίμου, η καλή συμπεριφορά σε συνθήκες μερικού φορτίου, οι χαμηλές εκπομπές ρύπων και η χαμηλή στάθμη θορύβου καθώς και κραδασμών. Επειδή η καύση είναι εξωτερική και ο κύκλος λειτουργίας τους κλειστός, τα κινούμενα μέρη του κινητήρα δεν εκτίθενται στα προϊόντα της καύσεως, με αποτέλεσμα να είναι περιορισμένες οι φθορές του. Απαιτούνται, όμως, πολύ αποτελεσματικές (και δύσκολα επιτεύξιμες) στεγανωτικές διατάξεις για την αποφυγή διαρροών, τόσο του αερίου υψηλής πίεσης προς το εξωτερικό του κυλίνδρου, όσο και του λιπαντικού προς το εσωτερικό του κυλίνδρου. Η κατασκευή αποτελεσματικών διατάξεων στεγάνωσης με ικανοποιητική διάρκεια ζωής είναι ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που πρέπει να αντιμετωπισθούν.

Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης βρίσκεται στην περιοχή του 40%, ενώ εκτιμάται ότι μπορεί να ανέρθει έως και στο 50%. Η απόδοση διατηρείται σταθερή και σε μερικό φορτίο. Ο ολικός βαθμός απόδοσης βρίσκεται στην περιοχή του 60 – 80%, ενώ ο λόγος ηλεκτρισμού προς θερμότητα είναι της τάξης του 1,2 – 1,7. Καθώς τα συστήματα αυτά βρίσκονται στο στάδιο της ανάπτυξης, εκτιμάται ότι είναι δυνατή η επίτευξη τιμών διαθεσιμότητας και αξιοπιστίας που θα είναι συγκρίσιμες με αυτές των συστημάτων Diesel.

Οι μηχανές Stirling:

- Κατασκευάζονται συνήθως για ισχύ από 3 έως 100kW_e
- Παρουσιάζουν ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης 35 – 45%, θερμικό βαθμό απόδοσης 50 – 60% και ολικό βαθμό απόδοσης 60 – 85%
- Αν και ακριβότεροι από τις Μ.Ε.Κ., είναι λιγότερο ρυπογόνοι, τόσο αναφορικά με την ηχορύπανση, όσο και με τη χημική
- Απαιτούν συντήρηση σε μεγάλα χρονικά διαστήματα ,με αποτέλεσμα να λειτουργούν αρκετές χιλιάδες ώρες συνεχώς.

4.4. Αποκεντρωμένα συστήματα Σ.Η.Θ.

Τα αποκεντρωμένα συστήματα Σ.Η.Θ. αποσκοπούν στην κάλυψη ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας σε μικρή, αποκεντρωμένη κλίμακα. Συνήθως εντάσσονται σε κτηριακές εγκαταστάσεις, βιομηχανίες και βιοτεχνίες, αθλητικές και αγροτικές εγκαταστάσεις κλπ, με σκοπό την ταυτόχρονη κάλυψη των υφιστάμενων αναγκών σε ηλεκτρισμό και θερμότητα. Η αποκεντρωμένη δομή τους τα χαρακτηρίζει από ιδιαιτερότητες στη μελέτη, στη διαστασιολόγηση και στον αλγόριθμο λειτουργίας τους, όπως ακριβώς και στην περίπτωση των υβριδικών σταθμών μικρού μεγέθους.

Οι διαφορές μεταξύ των αποκεντρωμένων συστημάτων Σ.Η.Θ. και των υβριδικών σταθμών εντοπίζονται στα εξής:

- Στα αποκεντρωμένα συστήματα Σ.Η.Θ. παράγεται ταυτόχρονα ενέργεια σε δύο τελικές μορφές, δηλαδή ηλεκτρική και θερμική, σε αντίθεση με τους υβριδικούς σταθμούς ηλεκτρικής (Κεφάλαιο 3) ή θερμικής (Κεφάλαιο 5) ενέργειας, στους οποίους παράγεται αποκλειστικά μία τελική μορφή ενέργειας.
- Ένα αποκεντρωμένο σύστημα Σ.Η.Θ. βασίζεται σε πρωτογενή χημική ενέργεια, της οποίας η διαθεσιμότητα θεωρείται εγγυημένη, ακόμα και αν τούτη προέρχεται από εναλλακτικά καύσιμα (στερεή βιομάζα, βιοαέριο κλπ). Συνεπώς ένα αποκεντρωμένο σύστημα Σ.Η.Θ. δεν αποσκοπεί στην εγγυημένη τροφοδοσία μιας συγκεκριμένης ζήτησης ισχύος από μονάδες μη εγγυημένης παραγωγής, όπως οι υβριδικοί σταθμοί.

Ο συνδυασμός υβριδικών σταθμών και συστημάτων Σ.Η.Θ. δε θα πρέπει να θεωρείται δυνατός, καθώς, κατά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τις βασικές μονάδες μη εγγυημένης παραγωγής ενός υβριδικού σταθμού, δηλαδή τα αιολικά πάρκα και τους φωτοβολταϊκούς σταθμούς, δεν παρεμβάλλεται πουθενά η μετατροπή κάποιας μορφής ενέργειας σε θερμότητα, η οποία θα μπορούσε να αξιοποιηθεί σε ένα σύστημα Σ.Η.Θ. Σαφέστατα, βέβαια, είναι δυνατή η συμπαράγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας από άλλες μορφές Α.Π.Ε., όπως η βιομάζα και η γεωθερμία. Στην περίπτωση αυτή, όμως, δεδομένου ότι η διαθεσιμότητα των μορφών αυτών Α.Π.Ε. είναι εγγυημένη, δεν υφίσταται η έννοια του υβριδικού σταθμού.

4.4.1. Εναλλακτικοί αλγόριθμοι λειτουργίας αποκεντρωμένων συστημάτων Σ.Η.Θ.

Ένα αποκεντρωμένο σύστημα Σ.Η.Θ. συνήθως εντάσσεται σε υφιστάμενο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, και, συνεπώς υπάρχει πάντα η δυνατότητα έγχυσης ισχύος από το δίκτυο προς την κατανάλωση, στην περίπτωση αδυναμίας του συστήματος Σ.Η.Θ. να αντεπεξέλθει στη ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος κάποια στιγμή. Επίσης είναι αυτονόητο ότι υπάρχει η δυνατότητα συμπληρωματικής παραγωγής θερμικής ισχύος από μονάδα εγγυημένης παραγωγής (π.χ. ένας πρόσθετος λέβητας), στην περίπτωση που κάποια χρονική στιγμή το σύστημα Σ.Η.Θ. αδυνατεί να αντεπεξέλθει στην κάλυψη της ζήτησης θερμικής ισχύος.

Ο αλγόριθμος λειτουργίας ενός αποκεντρωμένου συστήματος Σ.Η.Θ. καθορίζεται από το βασικό σκοπό για τον οποίο έχει εισαχθεί στο ενεργειακό σύστημα. Οι δυνατές επιλογές είναι οι εξής:

- Κάλυψη του θερμικού φορτίου

Προτεραιότητα σε αυτή την περίπτωση έχει η κάλυψη της ζήτησης θερμικής ισχύος. Συνεπώς, σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή, η ωφέλιμη παραγωγή θερμότητας του συστήματος συμπαραγωγής είναι ίση με το θερμικό φορτίο, προφανώς χωρίς υπέρβαση της δυναμικότητας του συστήματος. Αυτό συνεπάγεται ότι, στη γενική περίπτωση μεταβαλλόμενης ζήτησης θερμικής ισχύος, το σύστημα Σ.Η.Θ. πρέπει να έχει την ικανότητα να παρακολουθεί τις διακυμάνσεις της.

Εάν η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι μεγαλύτερη από το φορτίο, η πλεονάζουσα ενέργεια πωλείται στο δίκτυο, ενώ, εάν είναι μικρότερη από τη ζήτηση, τότε συμπληρωματική ηλεκτρική ενέργεια εγχέεται από το δίκτυο.

- Κάλυψη του θερμικού φορτίου βάσης

Στην περίπτωση αυτή το σύστημα Σ.Η.Θ. διαστασιολογείται, ώστε να παρέχει την ελάχιστη απαιτούμενη θερμική ενέργεια για την εγκατάσταση, η οποία χαρακτηρίζεται ως θερμικό φορτίο βάσης. Για την κάλυψη των θερμικών φορτίων αιχμής και την παραλαβή των διακυμάνσεων της ζήτησης θερμικής ισχύος πάνω από το θερμικό φορτίο βάσης, χρησιμοποιούνται εφεδρικοί λέβητες ή καυστήρες. Ο κύριος κινητήρας της μονάδας λειτουργεί πάντα υπό πλήρες και σταθερό φορτίο. Γίνεται κατανοητό ότι οι απαιτήσεις του συγκεκριμένου συστήματος, κατά τη λειτουργία του, είναι χαμηλότερες από ό,τι στην προηγούμενη περίπτωση.

Εάν η ανάγκη για ηλεκτρική ενέργεια της εγκατάστασης υπερβαίνει αυτήν που μπορεί να παρέχει ο κύριος κινητήρας του συστήματος Σ.Η.Θ., τότε η υπόλοιπη ποσότητα μπορεί να αγοραστεί από το δίκτυο. Αντίστοιχα, η πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να πωληθεί προς το δίκτυο.

- Κάλυψη του ηλεκτρικού φορτίου

Προτεραιότητα σε αυτή την περίπτωση έχει η κάλυψη της ζήτησης ηλεκτρικής ισχύος. Συνεπώς, κάθε χρονική στιγμή η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς είναι ίση με τη ζήτηση, προφανώς χωρίς υπέρβαση της δυναμικότητας του συστήματος Σ.Η.Θ.

Εάν η συμπαραγόμενη θερμότητα είναι μικρότερη από το θερμικό φορτίο, ένας βοηθητικός λέβητας υποβοηθά στην κάλυψη των αναγκών, ενώ, εάν είναι μεγαλύτερη, η πλεονάζουσα θερμότητα απορρίπτεται στο περιβάλλον μέσω συσκευών ψύξης ή μέσω των καυσαερίων. Εναλλακτικά θα μπορούσε να πωληθεί σε γειτονικούς καταναλωτές.

- Κάλυψη του ηλεκτρικού φορτίου βάσης

Σε αυτήν τη διάταξη η μονάδα Σ.Η.Θ. διαστασιολογείται, ώστε να ικανοποιεί την ελάχιστη ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος της εγκατάστασης. Οι υπόλοιπες ανάγκες σε ηλεκτρισμό καλύπτονται από το δίκτυο. Οι θερμικές ανάγκες της εγκατάστασης θα μπορούσαν να καλυφθούν μόνο από το σύστημα συμπαραγωγής, ή με πρόσθετους λέβητες. Εάν η θερμική ενέργεια, που παράγεται σύμφωνα με το ηλεκτρικό φορτίο βάσης, υπερβαίνει τις απαιτήσεις της εγκατάστασης, η πλεονάζουσα θερμική ενέργεια μπορεί να πωληθεί σε γειτονικούς πελάτες ή να απορριφθεί στο περιβάλλον.

- Μικτή κάλυψη

Στην περίπτωση αυτή, σε ορισμένες χρονικές περιόδους προτεραιότητα έχει η κάλυψη του θερμικού φορτίου βάσης ή αιχμής, ενώ σε άλλες περιόδους προτεραιότητα έχει η κάλυψη της ηλεκτρικής ισχύος βάσης ή αιχμής. Η απόφαση βασίζεται στην εκτίμηση παραμέτρων, όπως είναι τα επίπεδα των φορτίων, η τιμή των καυσίμων και το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας κατά την τρέχουσα χρονική περίοδο.

- Αυτόνομη λειτουργία

Στην περίπτωση αυτόνομης λειτουργίας, το σύστημα Σ.Η.Θ. αποσκοπεί στην πλήρη κάλυψη των ηλεκτρικών και θερμικών φορτίων σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή χωρίς σύνδεση με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος λειτουργίας εισάγει απαιτήσεις αντίστοιχες με αυτές για τη λειτουργία υβριδικών σταθμών ηλεκτρικής ισχύος. Η διαφορά στην περίπτωση αυτή είναι, όπως ήδη αναφέρθηκε παραπάνω, η στήριξη της παραγωγής σε εγγυημένες πρωτογενείς πηγές ενέργειας. Αυτό το χαρακτηριστικό δεν απαλλάσσει το σύστημα από την απαίτηση να διαθέτει ηλεκτρική και θερμική δυναμικότητα εφεδρείας, έτσι ώστε, στην περίπτωση που μια μονάδα τεθεί εκτός λειτουργίας για οποιοδήποτε λόγο, οι υπόλοιπες μονάδες να είναι σε θέση να καλύψουν το ηλεκτρικό και το θερμικό φορτίο. Πρακτικά, δηλαδή, η ασφαλής λειτουργία του συστήματος Σ.Η.Θ. προϋποθέτει την εγκατάσταση ενός μικρού αυτόνομου θερμοηλεκτρικού σταθμού παραγωγής, δεδομένο που συνεπάγεται σημαντική αύξηση του αρχικού και του λειτουργικού κόστους του συστήματος.

Γενικά η λειτουργία με προτεραιότητα την κάλυψη του θερμικού φορτίου οδηγεί στον υψηλότερο βαθμό αξιοποίησης του καυσίμου (λόγος εξοικονόμησης ενέργειας καυσίμων – FSR) και, ίσως, στην καλύτερη οικονομική απόδοση της συμπαράγωγής, τόσο στο βιομηχανικό, όσο και στον κτηριακό τομέα.

Εντούτοις, η εφαρμογή γενικών κανόνων δεν είναι η συνετότερη προσέγγιση για την περίπτωση της συμπαράγωγής. Κάθε εφαρμογή έχει τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της, καθώς υπάρχει μια πληθώρα συστημάτων Σ.Η.Θ., ανάλογα με τον τύπο της τεχνολογίας, το μέγεθος, τη διαμόρφωση, ενώ η σχεδίαση ενός συστήματος συμπαράγωγής μπορεί να προσαρμοστεί στις ανάγκες του χρήστη, και έχει επιπτώσεις στους δυνατούς τρόπους λειτουργίας του, και το αντίστροφο. Εξάλλου, κατά τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος, μπορεί να μεταβάλλονται οι διάφορες τεχνικές και οικονομικές παράμετροι με την ημέρα και τη χρονική στιγμή.

Όλες αυτές οι πτυχές καθιστούν αναγκαία τη λήψη αποφάσεων όχι βάσει γενικών κανόνων μόνο, αλλά με τη χρήση συστηματικών διαδικασιών βελτιστοποίησης, τόσο για το σχεδιασμό όσο και για τη λειτουργία του συστήματος.

Ανάλογα με το είδος και το μέγεθος της κατανάλωσης, που καλείται να καλύψει ένα αποκεντρωμένο σύστημα Σ.Η.Θ., η επιλογή βέλτιστης τεχνολογίας διαφέρει. Έτσι, για περιπτώσεις μικρών φορτίων (π.χ. μονοκατοικίες), όπου, πέραν του χαμηλού μεγέθους της ζήτησης, ένα βασικό δεδομένο αποτελεί η ελαχιστοποίηση του εκπεμπόμενου θορύβου και των απορριπτόμενων ρύπων, μεταξύ των βέλτιστων επιλογών συμπεριλαμβάνονται η εγκατάσταση κινητήρων Otto, μηχανής Stirling, τυποποιημένης μονάδας Σ.Η.Θ. μικρού μεγέθους ή ακόμα και κυψέλης καυσίμου. Όσο τα ηλεκτρικά και θερμικά φορτία της εγκατάστασης αυξάνονται, οι επιλογές της μηχανής Stirling και της κυψέλης καυσίμου γίνονται μη βιώσιμες, ενώ προτάσσονται πλέον τεχνολογίες όπως μηχανές Diesel, αεριοστρόβιλοι ή και ατμοστρόβιλοι, σε περιπτώσεις υψηλών φορτίων.

Στον πίνακα 4.2 παρουσιάζεται μία σύνοψη για τους προτεινόμενους τύπους αποκεντρωμένων συστημάτων Σ.Η.Θ. για διαφορετικές κατηγορίες κτηρίων [3].

Πίνακας 4.2: Προτεινόμενα συστήματα Σ.Η.Θ. για διάφορα είδη κτηρίων [3].

A/A	Είδος κτηρίου	Περιοχή ισχύος (kW _e)	Προτεινόμενη μονάδα συμπαράγωγής
1	Μονοκατοικίες	5 – 50	<ul style="list-style-type: none"> • Μ.Ε.Κ. Otto • Μηχανή Stirling • Κυψέλη καυσίμου • Τυποποιημένη μικρή μονάδα
2	Πολυκατοικίες	50 – 250	<ul style="list-style-type: none"> • Μ.Ε.Κ. Otto ή Diesel • Κυψέλη καυσίμου • Τυποποιημένη μονάδα
3	Νοσοκομεία	500 – 2.000	<ul style="list-style-type: none"> • Μ.Ε.Κ. Otto ή Diesel • Αεριοστρόβιλος • Ατμοστρόβιλος (για μεγάλη ισχύ)
4	Ξενοδοχεία	200 – 2.000	<ul style="list-style-type: none"> • Μ.Ε.Κ. Otto ή Diesel • Αεριοστρόβιλος • Ατμοστρόβιλος (για μεγάλη ισχύ)
5	Κτήρια γραφείων	200 – 500	<ul style="list-style-type: none"> • Μ.Ε.Κ. Otto ή Diesel
6	Αθλητικές εγκαταστάσεις – Κολυμβητικές δεξαμενές	100 – 300	<ul style="list-style-type: none"> • Μ.Ε.Κ. Otto ή Diesel • Αεριοστρόβιλος
7	Εμπορικά κέντρα	200 – 1.000	<ul style="list-style-type: none"> • Μ.Ε.Κ. Otto ή Diesel • Αεριοστρόβιλος
8	Εκπαιδευτήρια	200 – 500	<ul style="list-style-type: none"> • Μ.Ε.Κ. Otto ή Diesel • Αεριοστρόβιλος

4.5. Διασυνδεδεμένα συστήματα Σ.Η.Θ.

Στα διασυνδεδεμένα συστήματα Σ.Η.Θ. η φιλοσοφία λειτουργίας και η διαστασιολόγηση είναι απλούστερες διαδικασίες, καθώς η διασύνδεση του συστήματος με ένα μεγαλύτερο δίκτυο κατανάλωσης και παραγωγής ενέργειας μεγιστοποιεί την ευελιξία του. Συνήθως τα διασυνδεδεμένα συστήματα αναπτύσσονται με την εισαγωγή συστημάτων αξιοποίησης της αποβαλλόμενης θερμότητας σε υφιστάμενους κεντρικούς θερμοηλεκτρικούς σταθμούς. Άρα τα διασυνδεδεμένα συστήματα Σ.Η.Θ. είναι συστήματα κεντρικής παραγωγής, και όχι αποκεντρωμένα.

Η λειτουργία των μονάδων ισχύος, δηλαδή των θερμοηλεκτρικών μονάδων, καθορίζεται με βασικό κριτήριο τη ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος, αφού το σύστημα συμπαράγωγής αναπτύσσεται στη βάση ενός υφιστάμενου σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η παραγωγή της θερμότητας μπορεί να υλοποιείται εναλλακτικά:

- Ως παράλληλο προϊόν της παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος, με ισχύ που καθορίζεται από την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος και όχι από το θερμικό φορτίο. Στην περίπτωση αυτή, η όποια υστέρηση παραγωγής θερμικής ισχύος από το σύστημα συμπαράγωγής ως προς το θερμικό φορτίο θα πρέπει να συμπληρώνεται αποκεντρωμένα από τους τελικούς χρήστες θερμότητας. Στην περίπτωση που η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος συνεπάγεται παραγωγή θερμικής ισχύος υψηλότερη από το θερμικό φορτίο, τότε αυτή απορρίπτεται στο περιβάλλον. Αυτή η περίπτωση λειτουργίας είναι η πλέον συνήθης στα διασυνδεδεμένα συστήματα συμπαράγωγής.
- Ως βασικό προϊόν, ανεξάρτητα από τη ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος. Στην περίπτωση αυτή η ισχύς λειτουργίας του συστήματος συμπαράγωγής θα καθοριστεί από την ελάχιστη εκ των ηλεκτρικής και θερμικής ζήτησης ισχύος. Συγκεκριμένα:
 - Στην περίπτωση που η κάλυψη της ζήτησης ηλεκτρικής ισχύος συνεπάγεται παραγωγή θερμικής ισχύος χαμηλότερη του φορτίου, η υστέρηση στην παραγωγή θερμικής ισχύος καλύπτεται με την επιπρόσθετη παραγωγή θερμικής ισχύος είτε από βοηθητική πηγή θερμότητας κεντρικά από το σύστημα συμπαράγωγής είτε με αύξηση της ισχύος των θερμοηλεκτρικών μονάδων. Η ισχύς λειτουργίας του συστήματος, δηλαδή, καθορίζεται από το θερμικό φορτίο. Η δυναμική περίσσεια

παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος εξάγεται, κατά προτίμηση, σε γειτονικά διασυνδεδεμένα συστήματα, ή αποθηκεύεται σε μονάδες αποθήκευσης ή, στην έσχατη περίπτωση, απορρίπτεται σε ωμικές αντιστάσεις.

- Στην περίπτωση που η ζήτηση θερμικής ισχύος συνεπάγεται παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος χαμηλότερη από την αντίστοιχη ζήτηση, τότε η παραγωγή ισχύος του συστήματος συμπαράγωγής καθορίζεται από τη ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος. Η επιπρόσθετη παραγωγή θερμότητας απορρίπτεται στο περιβάλλον.

Με βάση τα ανωτέρω, στα διασυνδεδεμένα συστήματα συμπαράγωγής η παραγωγή θερμότητας πρακτικά ακολουθεί την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Η μέγιστη εν δυνάμει παραγωγή θερμικής ισχύος προκύπτει από τη διαθέσιμη χημική ισχύ του καυσίμου αφαιρουμένης της παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος και της ισχύος των όποιων απωλειών μηχανική ισχύος και θερμικής ισχύος προς το περιβάλλον. Τα ανωτέρω γίνονται κατανοητά με την παρουσίαση παραδείγματος υπολογισμού και διαστασιολόγησης συστήματος συμπαράγωγής θερμότητας και τηλεθέρμανσης, που παρατίθεται στην επόμενη ενότητα.

4.6. Παράδειγμα υπολογισμού: διασυνδεδεμένο σύστημα Σ.Η.Θ.

Στην παρούσα ενότητα θα παρουσιαστεί αναλυτικά η διαδικασία υπολογισμού ενός συστήματος συμπαράγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού. Η παρουσιαζόμενη μεθοδολογία θα παρουσιαστεί κυρίως γενικά, ωστόσο ενίοτε θα γίνεται αναφορά σε συγκεκριμένη περίπτωση που αφορά στο υφιστάμενο θερμοηλεκτρικό σταθμό παραγωγής Αθηνόλακου Κρήτης, με σκοπό την αξιοποίηση της απορριπτόμενης θερμότητας από τις θερμοηλεκτρικές μονάδες. Η δεσμευόμενη θερμότητα από το σύστημα συμπαράγωγής του συγκεκριμένου θερμοηλεκτρικού σταθμού δύναται να διατεθεί με δίκτυο τηλεθέρμανσης για τη θέρμανση γειτονικών στην περιοχή θερμοκηπιακών καλλιέργειών. Ο υπολογισμός θα εκτελεσθεί σε ετήσια βάση, με χρήση χρονοσειρών παραγωγής ισχύος μέσω ωριαίων τιμών.

4.6.1. Απορριπτόμενη θερμότητα από τις θερμοηλεκτρικές μονάδες

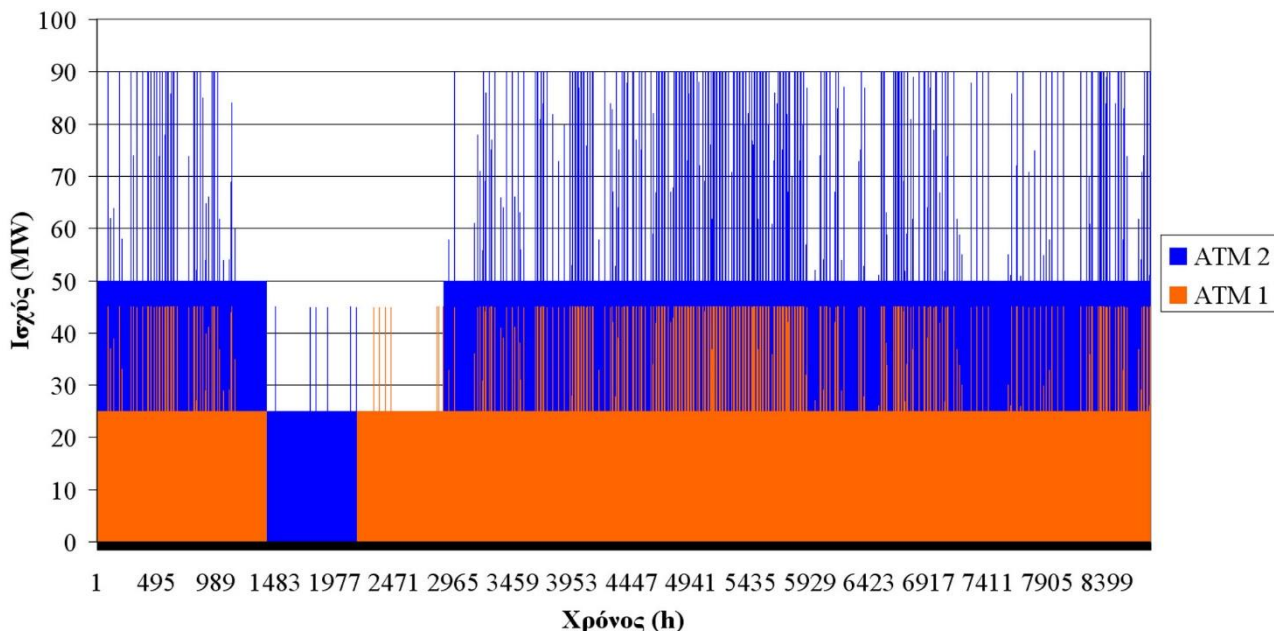
Η διαθέσιμη προς αξιοποίηση θερμική ισχύς προκύπτει με βάση την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος από τις θερμοηλεκτρικές μονάδες του σταθμού και το βαθμό απόδοσης, που χαρακτηρίζει την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος προκύπτει με βάση τη ζήτηση ισχύος στο αυτόνομο Σ.Η.Ε. Κρήτης και τη σειρά ένταξης των θερμοηλεκτρικών μονάδων. Με βάση τα αναφερόμενα στο Κεφάλαιο 2, στο θερμοηλεκτρικό σταθμό Αθηνόλακου είναι εγκατεστημένες οι ακόλουθες μονάδες:

- δύο όμοιοι ατμοστρόβιλοι, με τεχνικό ελάχιστο 25MW και ονομαστική ισχύ 45MW έκαστος
- δύο όμοιες ντιζελογεννήτριες, με τεχνικό ελάχιστο 12MW και ονομαστική ισχύ 45MW έκαστη.

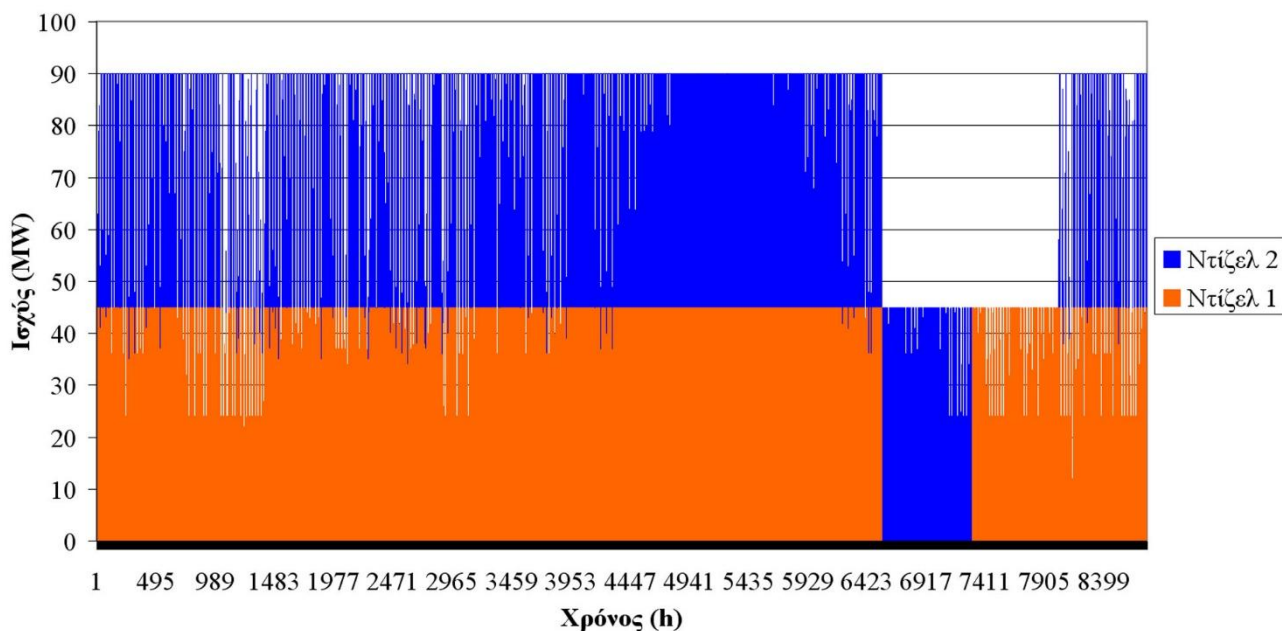
Και οι δύο τύποι μονάδων εντάσσονται στην παραγωγή ως μονάδες βάσης. Το τελευταίο αποτελεί σημαντική ευνοϊκή παράμετρο για την εισαγωγή του συστήματος συμπαράγωγής, καθώς η λειτουργία των μονάδων του θερμοηλεκτρικού σταθμού είναι συνεχής, με συνολική μέγιστη ισχύ που ανέρχεται στα 180MW. Τα ανωτέρω συνεπάγονται ότι θα πρέπει να αναμένεται συνεχής διαθεσιμότητα θερμικής ισχύος από το σταθμό μεγαλύτερη των 100MW. Οι ανωτέρω παράμετροι είναι κρίσιμες για τη λήψη απόφασης εισαγωγής ενός συστήματος Σ.Η.Θ. σε ένα υφιστάμενο θερμοηλεκτρικό σταθμό. Στην αντίθετη περίπτωση, χαμηλής δηλαδή εγκατεστημένης ηλεκτρικής ισχύος σε ένα θερμοηλεκτρικό σταθμό και διακοπτόμενης λειτουργίας των μονάδων, δεδομένα που συνεπάγονται χαμηλή διαθεσιμότητα θερμικής ισχύος, η εισαγωγή συστήματος συμπαράγωγής μπορεί να μην είναι οικονομικά βιώσιμη, ακριβώς λόγω της περιορισμένης δυνατότητας παραγωγής θερμότητας.

Η αριθμητική προσομοίωση της ετήσιας λειτουργίας του Σ.Η.Ε. Κρήτης για συγκεκριμένη ετήσια χρονοσειρά ζήτησης ισχύος, η οποία παρουσιάστηκε αναλυτικά στο Κεφάλαιο 2, επιτρέπει τον ακριβή υπολογισμό της παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος από κάθε μονάδα του συστήματος, συνεπώς και από τις μονάδες του εξεταζόμενου θερμοηλεκτρικού σταθμού. Στα σχήματα 4.13 και 4.14 παρουσιάζονται οι ετήσιες διακυμάνσεις της παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος από τους ατμοστρόβιλους και τις ντιζελογεννήτριες του εξεταζόμενου θερμοηλεκτρικού σταθμού αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι οι ντιζελογεννήτριες λειτουργούν για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα σε πλήρεις φορτίσεις ταυτόχρονα και οι δύο, δίνοντας συνολική ισχύ ίση με

την ονομαστική τους, δηλαδή 90MW. Αντίθετα, αναφορικά με τους ατμοστρόβιλους, μόνο ο ένας από τους δύο λειτουργεί στην ονομαστική ισχύ του για μεγάλο χρονικό διάστημα. Ο έτερος λειτουργεί στο μεγαλύτερο ποσοστό του έτους στην ελάχιστη φόρτιση του τεχνικού ελάχιστου. Και οι δύο μαζί λειτουργούν σε πλήρη φόρτιση ταυτόχρονα, δίνοντας συνολική ισχύ 90MW, κυρίως κατά τη θερινή περίοδο, που ταυτίζεται με την περίοδο εμφάνισης ετήσιας αιχμής ζήτησης ηλεκτρικής ισχύος.



Σχήμα 4.13: Ετήσια διακύμανση παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος από τους ατμοστρόβιλους του εξεταζόμενου θερμοηλεκτρικού σταθμού.



Σχήμα 4.14: Ετήσια διακύμανση παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος από τις ντιζελογεννήτριες του εξεταζόμενου θερμοηλεκτρικού σταθμού.

Με βάση την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος από την κάθε ντιζελογεννήτρια και το βαθμό απόδοσης με τον οποίο τούτη λειτουργεί, είναι δυνατός ο υπολογισμός της απορριπτόμενης θερμότητας από την κάθε μονάδα χωριστά με βάση τη σχέση:

$$Q_{\text{rej}} = \frac{P_m}{\eta_c \cdot \eta_{\text{th}}} \quad (4.14)$$

όπου:

Q_{rej} : η αποβαλλόμενη ενέργεια από τη θερμοηλεκτρική μονάδα με τη μορφή θερμότητας

P_m : η παραγόμενη μηχανική ισχύς

η_c : ο βαθμός απόδοσης καύσης

η_{th} : ο θερμοδυναμικός βαθμός απόδοσης.

Η μηχανική ισχύς P_m συνδέεται με την τελική παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος P_{el} με τη σχέση:

$$P_{\text{el}} = P_m \cdot \eta_m \cdot \eta_{\text{el}} \quad (4.15)$$

όπου:

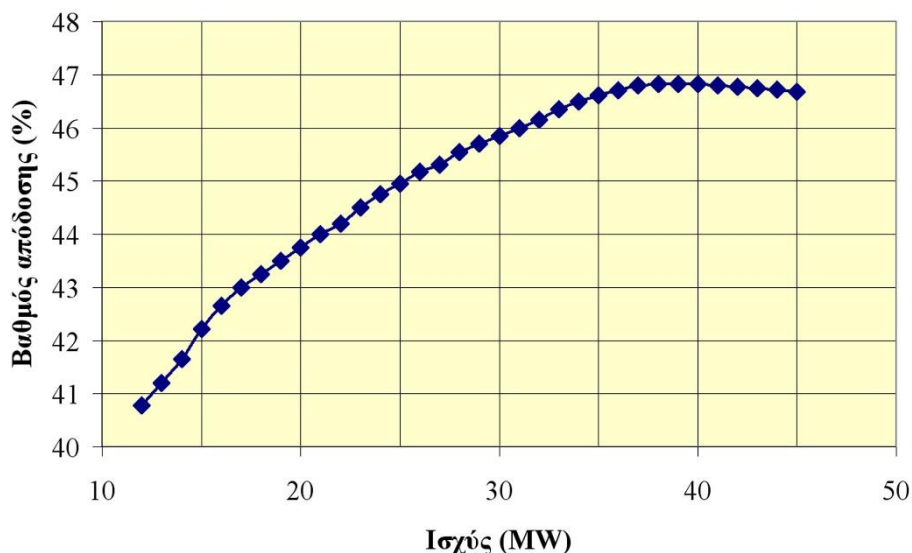
η_m : ο μηχανικός βαθμός απόδοσης της μονάδας

η_{el} : ο βαθμός απόδοσης της επαγωγικής γεννήτριας.

Με βάση τη σχέση 4.15, η σχέση 4.14 γίνεται:

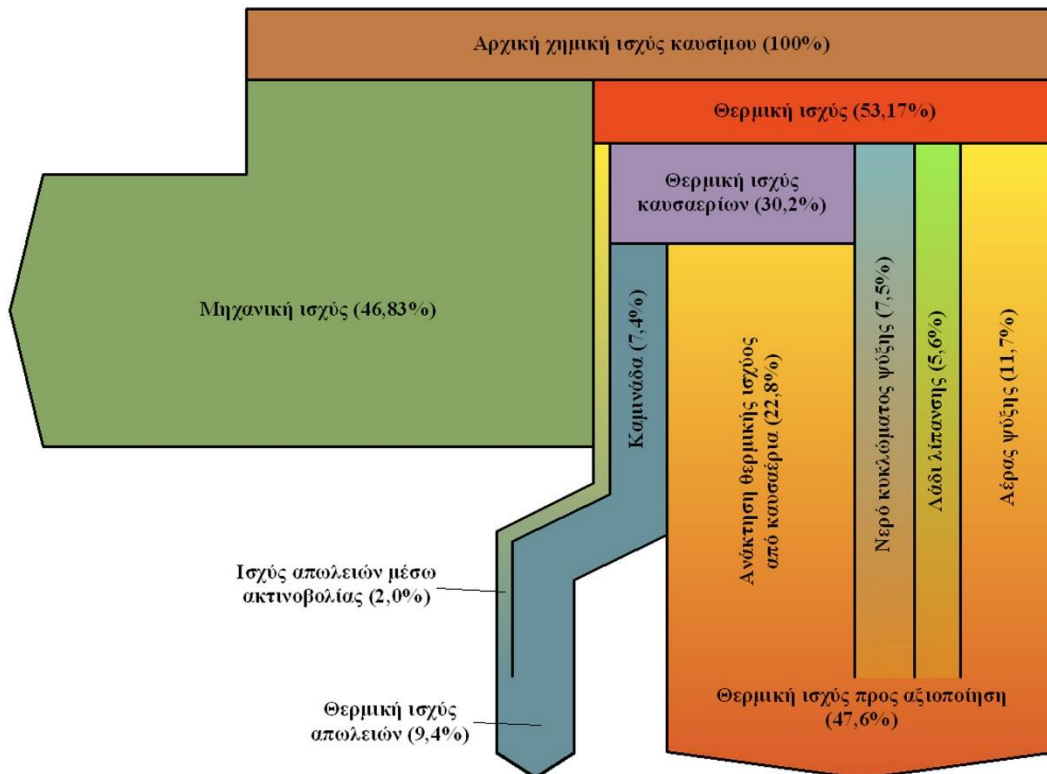
$$Q_{\text{rej}} = \frac{P_{\text{el}}}{\eta_c \cdot \eta_{\text{th}} \cdot \eta_m \cdot \eta_{\text{el}}} \quad (4.16)$$

Το γινόμενο των βαθμών απόδοσης στον παρονομαστή της σχέσης 4.16 αποτελεί το συνολικό βαθμό απόδοσης της θερμοηλεκτρικής μονάδας. Με βάση τα αναφερόμενα στο Κεφάλαιο 2, ο βαθμός απόδοσης μιας θερμοηλεκτρικής μονάδας μεταβάλλεται συναρτήσει της παραγωγής ισχύος, δηλαδή του φορτίου της μονάδας. Για τις ντιζελογεννήτριες του εξεταζόμενου θερμοηλεκτρικού σταθμού, η μεταβολή του βαθμού απόδοσης συναρτήσει της φόρτισης της μονάδας δίνεται στο διάγραμμα του σχήματος 4.15.



Σχήμα 4.15: Διακύμανση βαθμού απόδοσης ντιζελογεννητριών θερμοηλεκτρικού σταθμού συναρτήσει της φόρτισής τους.

Από την απορριπτόμενη θερμότητα ένα μέρος οδηγείται με τα καυσαέρια προς το περιβάλλον, ενώ το υπόλοιπο είναι αξιοποιήσιμο. Στο σχήμα 4.16 παρουσιάζεται ενδεικτικό διάγραμμα της κατανομής απόρριψης θερμότητας από τη ντιζελογεννήτρια MAN Diesel SE / 12K90MC-S. Με βάση το διάγραμμα του σχήματος 4.16, το 47,6% της απορριπτόμενης θερμότητας μπορεί να δεσμευτεί με εναλλάκτη θερμότητας και να αξιοποιηθεί σε ένα σύστημα συμπαράγωγής.



Σχήμα 4.16: Διάγραμμα Shankey απόρριψης θερμότητας από ντιζελογεννήτρια.

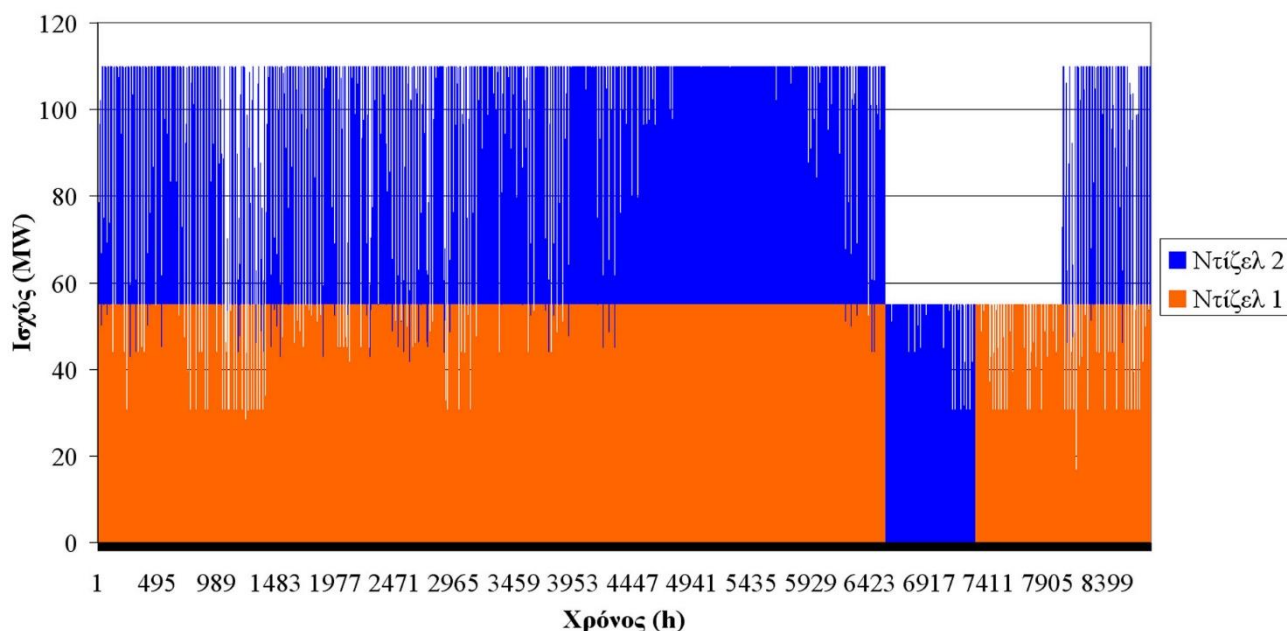
Από την απορριπτόμενη θερμότητα ένα μέρος οδηγείται με τα καυσαέρια προς το περιβάλλον, ενώ το υπόλοιπο είναι αξιοποιήσιμο. Στο σχήμα 4.16 παρουσιάζεται ενδεικτικό διάγραμμα της κατανομής απόρριψης θερμότητας από τη ντιζελογεννήτρια MAN Diesel SE / 12K90MC-S. Με βάση το διάγραμμα του σχήματος 4.16, το 47,6% της απορριπτόμενης θερμότητας μπορεί να δεσμευτεί με εναλλάκτη θερμότητας και να αξιοποιηθεί σε ένα σύστημα συμπαράγωγής.

Μετά τα ανωτέρω, η διαδικασία υπολογισμού της αξιοποιήσιμης απορριπτόμενης θερμότητας από τις ντιζελογεννήτριες του εξεταζόμενου θερμοηλεκτρικού σταθμού έχει ως εξής:

- Αρχικά, με βάση την παραγωγή τελικής ηλεκτρικής ισχύος από την κάθε ντιζελογεννήτρια και το διάγραμμα διακύμανσης του βαθμού απόδοσης της ντιζελογεννήτριας συναρτήσει της φόρτισης, υπολογίζεται η συνολική απορριπτόμενη θερμική ισχύς, από τη σχέση 4.16
- Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας, για χάρin απλότητας, το διάγραμμα κατανομής της απορριπτόμενης θερμικής ισχύος του σχήματος 4.16, υιοθετείται το ποσοστό του $22,8 + 7,5 = 30,3 / 53,17 = 56,99\%$ ως προς τη συνολική απόρριψη θερμικής ισχύος, ως το ποσοστό της αξιοποιήσιμης απορριπτόμενης θερμικής ισχύος, θεωρώντας, δηλαδή, ότι η απορριπτόμενη θερμική ισχύς που θα δεσμεύεται θα προέρχεται από τα αποβαλλόμενα καυσαέρια και από το κύκλωμα ψύξης της μονάδας.

Από τα ανωτέρω γίνεται κατανοητό πόσο μεγάλη εξάρτηση έχει η ακριβής εκτίμηση της αξιοποιήσιμης απορριπτόμενης θερμότητας από μία θερμοηλεκτρική μονάδα από την ίδια τη μονάδα. Για την κατά το δυνατό ακριβή εκτίμηση της θερμότητας αυτής, θα πρέπει να είναι διαθέσιμα στοιχεία από τον κατασκευαστή, ή το χειριστή, της μονάδας σχετικά με τη διακύμανση της συνολικής απόδοσης της μονάδας συναρτήσει της φόρτισής της και με την κατανομή της απορριπτόμενης θερμότητας.

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, η ετήσια διακύμανση της τελικής αξιοποιήσιμης απορριπτόμενης θερμότητας από τις δύο ντιζελογεννήτριες παρουσιάζεται στο σχήμα 4.17. Στο σχήμα αυτό παρατηρείται η σημαντική δυνάμενη να αξιοποιηθεί απόρριψη θερμικής ισχύος από τις δύο ντιζελογεννήτριες, η οποία ανέρχεται κατά μέγιστο περίπου στα 110MW. Η μέγιστη μεταφερόμενη θερμική ισχύς ανά μονάδα υπολογίζεται 54,92MW.



Σχήμα 4.17: Ετήσια διακύμανση της αξιοποιήσιμης απορριπτόμενης θερμικής ισχύος από τις ντιζελογεννήτριες του εξεταζόμενου θερμοηλεκτρικού σταθμού.

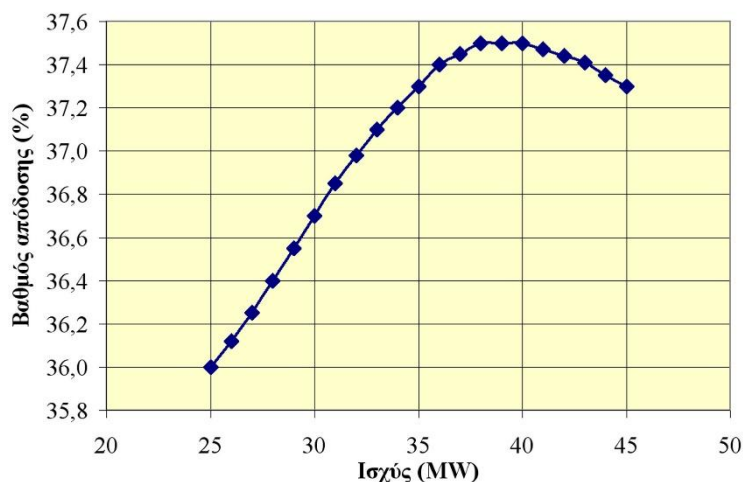
Η ανωτέρω διαδικασία για την εκτίμηση της απορριπτόμενης θερμότητας μπορεί να εφαρμοστεί και στην περίπτωση των ατμοστρόβιλων. Καθώς, όμως, το κύριο ποσοστό θερμότητας αποβάλλεται από τους ατμοστρόβιλους προς το περιβάλλον με τη μορφή ατμού, ο υπολογισμός της απορριπτόμενης θερμότητας μπορεί να προσεγγιστεί, με την προϋπόθεση να είναι γνωστές η πίεση, η θερμοκρασία και η παροχή \dot{m}_{st} απόρριψης του ατμού μετά την εκτόνωσή του προς το περιβάλλον. Με την πίεση και τη θερμοκρασία του ατμού γνωστές, είναι δυνατή η ανάγνωση από το διάγραμμα Mollier της ειδικής ενθαλπίας του ατμού h_{st} . Στη συνέχεια η θερμική ισχύς, που αποβάλλεται με τον ατμό στο περιβάλλον, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Q_{rej} = \dot{m}_{st} \cdot h_{st} \quad (4.17)$$

Η ανωτέρω μεθοδολογία, αν και απολύτως ακριβής, προϋποθέτει τη γνώση της διακύμανσης θερμοκρασίας και πίεσης απορριπτόμενου ατμού προς το περιβάλλον, συναρτήσει της φόρτισης του ατμοστρόβιλου. Συνεπώς προϋποθέτει αναλυτικά στοιχεία από το χειριστή της μονάδας ή τον κατασκευαστή της. Επίσης, συνήθως, ο απορριπτόμενος ατμός από ένα ατμοστρόβιλο αξιοποιείται για κάλυψη εσωτερικών αναγκών του θερμοηλεκτρικού σταθμού, πριν απορριφθεί στο περιβάλλον. Μία περίπτωση αξιοποίησης του εξερχόμενου ατμού από ένα ατμοστρόβιλο είναι η προθέρμανση βαρύ καυσίμου (μαζούτ) πριν την εισαγωγή του σε εμβολοφόρο γεννήτρια (ντιζελογεννήτρια). Τέτοιου είδους χρήσεις μειώνουν τη διαθέσιμη θερμότητα για το σύστημα συμπαράγωγής, και θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τον υπολογισμό της.

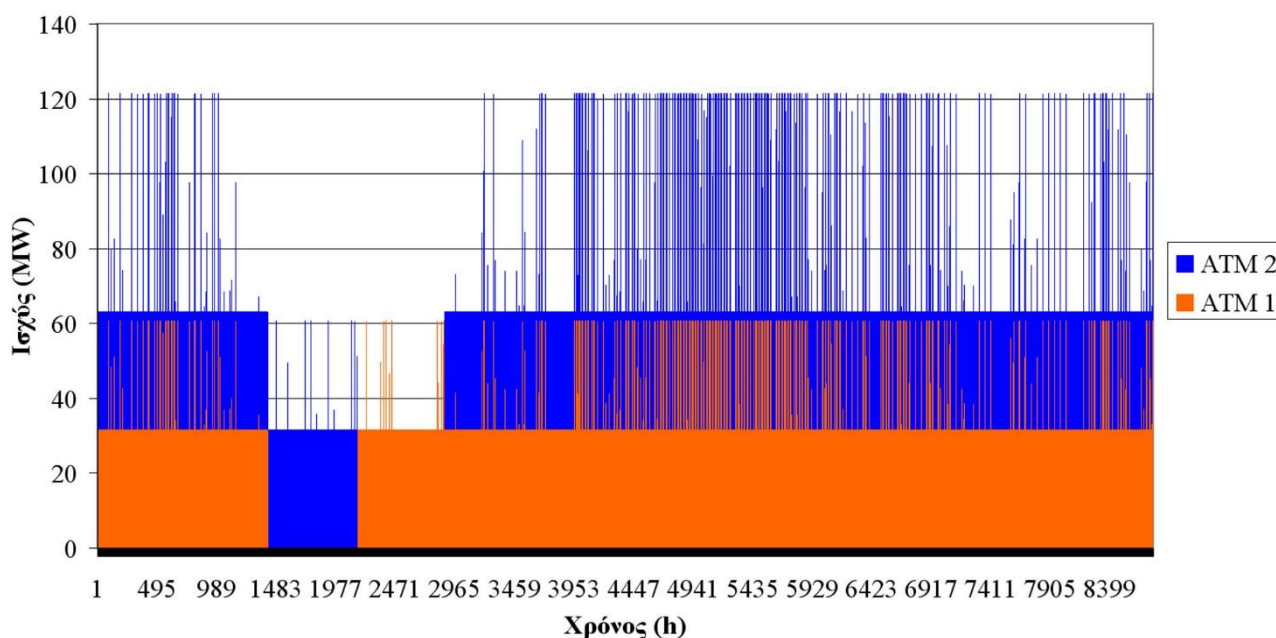
Για την περίπτωση του παρόντος παραδείγματος, ελλείπει αναλυτικών στοιχείων θερμοκρασίας και πίεσης του εξερχόμενου ατμού από τους ατμοστρόβιλους, για την εκτίμηση της αξιοποιήσιμης απορριπτόμενης θερμότητας θα εφαρμοστεί η ίδια μεθοδολογία με αυτήν των ντιζελογεννητριών. Στο σχήμα 4.18 παρουσιάζεται η μεταβολή του βαθμού απόδοσης του καθενός από τους δύο όμοιους ατμοστρόβιλους του θερμοηλεκτρικού σταθμού, συναρτήσει της φόρτισης του.

Επίσης θα θεωρηθεί ότι ένα σταθερό ποσό θερμικής ισχύος ατμού ίσο με 8MW διατίθεται συνεχώς για την προθέρμανση του καυσίμου των ντιζελογεννητριών. Το ποσό αυτό θα πρέπει να αφαιρεθεί από την αξιοποιήσιμη απορριπτόμενη θερμότητα. Τέλος, και στην περίπτωση των ατμοστρόβιλων, το ποσοστό της αξιοποιήσιμης θερμικής ισχύος ως προς τη συνολική απόρριψη θα ληφθεί ίσο με 56,99%.



Σχήμα 4.18: Διακύμανση βαθμού απόδοσης ατμοστρόβιλων θερμοηλεκτρικού σταθμού συναρτήσει της φόρτισής τους.

Εφαρμόζοντας τις ανωτέρω παραδοχές και την περιγραφόμενη παραπάνω μεθοδολογία για την περίπτωση των ντιζελογεννητριών, υπολογίζεται τελική η ετήσια διακύμανση της αξιοποιήσιμης απορριπτόμενης θερμικής ισχύος από τους ατμοστρόβιλους, η οποία παρουσιάζεται στο σχήμα 4.19. Στο σχήμα 4.19 παρατηρείται ότι στην περίπτωση λειτουργίας και των δύο ατμοστρόβιλων στην ονομαστική ισχύ, η απορριπτόμενη θερμική ισχύς μεγιστοποιείται φτάνοντας τα 120MW. Αυτό είναι αναμενόμενο, δεδομένου του σχετικά χαμηλού βαθμού απόδοσης των ατμοστρόβιλων, ο οποίος δεν ξεπερνά στη μέγιστη τιμή του το 37,5%. Ο χαμηλός βαθμός απόδοσης των ατμοστρόβιλων και η μεγάλη απορριπτόμενη θερμική ισχύς μεγιστοποιούν τη σκοπιμότητα εισαγωγής συστήματος συμπαράγωγής, το οποίο, σε τελική ανάλυση, στοχεύει στην αντιστάθμιση του χαμηλού βαθμού απόδοσης παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος, μέσω της παράλληλης παραγωγής θερμικής ισχύος και της συνεπαγόμενης αύξησης της συνολικής απόδοσης του συστήματος. Η μέγιστη μεταφερόμενη θερμική ισχύς ανά μονάδα υπολογίζεται 60,75MW.



Σχήμα 4.19: Ετήσια διακύμανση της αξιοποιήσιμης απορριπτόμενης θερμικής ισχύος από τους ατμοστρόβιλους του εξεταζόμενου θερμοηλεκτρικού σταθμού.

4.6.2. Υπολογισμός εναλλακτών θερμότητας

Με την εκτίμηση της αξιοποιήσιμης απορριπτόμενης θερμικής ισχύος από τις θερμοηλεκτρικές μονάδες, το επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός, η χωροθέτηση και η διαστασιολόγηση του θερμικού υδραυλικού κυκλώματος, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για τη μεταφορά της θερμικής ισχύος από το σταθμό παραγωγής προς τους τελικούς χρήστες. Είναι προφανές ότι το θεωρητικό υπόβαθρο για τη διαστασιολόγηση και τον υπολογισμό του θερμικού υδραυλικού κυκλώματος εμπίπτει στη Μεταφορά Θερμότητας και στη Μηχανική Ρευστών, και όχι στις έννοιες της Σύνθεσης Ενεργειακών Συστημάτων. Παρόλα αυτά, για λόγους πληρότητας της παρουσίασης, και προκειμένου να δοθεί μέσω τους παρόντος συγγράμματος ένα πλήρες παράδειγμα μελέτης συστήματος συμπαράγωγής, στην παρούσα ενότητα θα παρουσιαστούν οι βασικές αρχές μελέτης του θερμικού υδραυλικού κυκλώματος.

Ο υπολογισμός του θερμικού υδραυλικού κυκλώματος ξεκινάει από την παραλαβή της θερμικής ισχύος από τις θερμοηλεκτρικές μονάδες. Για το σκοπό αυτό θα χρησιμοποιηθούν εναλλάκτες θερμότητας. Συγκεκριμένα θα χρησιμοποιηθούν για κάθε θερμοηλεκτρική μονάδα δύο εναλλάκτες θερμότητας, ως εξής:

- ένας εναλλάκτης θερμότητας για την παραλαβή θερμικής ισχύος από τα αποβαλλόμενα καυσαέρια της μονάδας,
- ένας εναλλάκτης θερμότητας για την παραλαβή θερμικής ισχύος από το κύκλωμα ψύξης της μονάδας.

Το βασικό μέγεθος για κάθε εναλλάκτη θερμότητας είναι η μέγιστη θερμική ισχύς που θα χρειαστεί να μεταφέρει. Με βάση το σχήμα 4.16:

- Οι εναλλάκτες, που θα χρησιμοποιηθούν για την αξιοποίηση της απορριπτόμενης θερμικής ισχύος μέσω των καυσαερίων, θα μεταφέρουν το $22,8 / (22,8 + 7,5) = 75,2\%$ της συνολικά μεταφερόμενης θερμικής ισχύος
- Οι εναλλάκτες, που θα χρησιμοποιηθούν για την αξιοποίηση της απορριπτόμενης θερμικής ισχύος μέσω του κυκλώματος ψύξης των μονάδων, θα μεταφέρουν το $7,5 / (22,8 + 7,5) = 24,8\%$ της συνολικά μεταφερόμενης θερμικής ισχύος.

Δεδομένου ότι η μέγιστη μεταφερόμενη θερμική ισχύς από τους αμοστροβίλους υπολογίστηκε 60,75MW και για τις ντιζελογεννήτριες υπολογίστηκε 54,92MW, οι τιμές για την ονομαστική ισχύ των εναλλακτών θερμότητας που θα χρησιμοποιηθούν είναι:

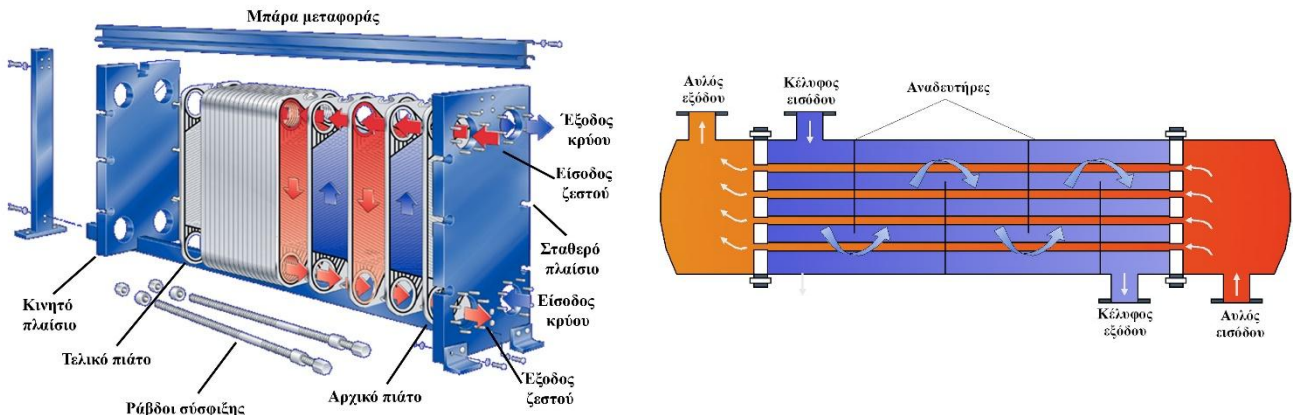
- για τους αμοστροβίλους: 45,68MW για τον εναλλάκτη καυσαερίων και 15,05MW για τον εναλλάκτη κυκλώματος ψύξης,
- για τις ντιζελογεννήτριες: 41,30MW για τον εναλλάκτη καυσαερίων και 13,62MW για τον εναλλάκτη κυκλώματος ψύξης.

Οι τελικές τιμές για την ονομαστική ισχύ των εναλλακτών θερμότητας, που θα χρησιμοποιηθούν, θα προκύψουν προφανώς με βάση τη διαθεσιμότητα συσκευών στο εμπόριο. Συνεπώς οι τιμές αυτές πιθανότατα θα διαφοροποιηθούν με βάση τις ανωτέρω απαιτήσεις.

Για τους εναλλάκτες θερμότητας που θα χρησιμοποιηθούν στα κυκλώματα ψύξης, στους οποίους η μεταφορά θερμότητας θα είναι από υγρό σε υγρό μέσο, η πλέον δόκιμη επιλογή είναι η χρήση πλακοειδών εναλλακτών. Αντιθέτως, για τους εναλλάκτες θερμότητας που θα χρησιμοποιηθούν για τη δέσμευση της θερμότητας των καυσαερίων, στους οποίους η μεταφορά θερμότητας θα είναι από αέριο σε υγρό μέσο, η πλέον δόκιμη επιλογή είναι η χρήση εναλλακτών τύπου αυλών – κελύφους (shell – tube heat exchanger). Στα σχήματα 4.20 παρουσιάζονται σκαριφήματα των δύο αυτών τύπων εναλλακτών θερμότητας.

Στο υπολογιστικό κομμάτι, το τελικό ζητούμενο μετά την εισαγωγή των εναλλακτών θερμότητας είναι ο βαθμός απόδοσης με τον οποίο επιτυγχάνεται η μεταφορά θερμικής ισχύος από τα καυσαέρια ή τα κυκλώματα ψύξης των θερμοηλεκτρικών μονάδων προς το θερμικό υδραυλικό κύκλωμα διάθεσης της θερμότητας προς τους τελικούς χρήστες. Για τον υπολογισμό της απόδοσης εναλλάκτη θερμότητας χρησιμοποιείται η μέθοδος ε-NTU. Απαιτούμενα δεδομένα για την εφαρμογή της μεθόδου είναι:

- οι ειδικές θερμοχωρητικότητες των μέσων συναλλαγής θερμότητας σε $J/(kg \cdot K)$,
- οι παροχές μάζας των μέσων συναλλαγής θερμότητας σε kg/s ,
- το γινόμενο $U \cdot A$ θερμικής διαπερατότητας – επιφάνειας του εναλλάκτη θερμότητας σε W/K ή, εναλλακτικά, η θερμική διαπερατότητα U σε $W/(m^2 \cdot K)$ του εναλλάκτη και η επιφάνεια συναλλαγής A του εναλλάκτη σε m^2 .



Σχήμα 4.20: Σκαριφήματα πλακοειδούς εναλλάκτη θερμότητας και εναλλάκτη θερμότητας τύπου αυλών – κελύφους.

Στην περίπτωση εναλλάκτη θερμότητας ομορροής, η απόδοσή του δίνεται από τη σχέση:

$$\epsilon = \frac{1 - e^{-NTU \cdot (1+C^*)}}{1 + C^*} \tag{4.18}$$

Στην περίπτωση εναλλάκτη θερμότητας αντιρροής, η απόδοσή του δίνεται από τη σχέση:

$$\epsilon = \begin{cases} \frac{1 - e^{-NTU \cdot (1-C^*)}}{1 - C^* \cdot e^{-NTU \cdot (1-C^*)}}, & \text{αν } C^* \neq 1 \\ \frac{NTU}{1 + NTU}, & \text{αν } C^* = 1 \end{cases} \tag{4.19}$$

όπου NTU ορίζεται ως ο Αριθμός Μονάδων Μεταφοράς (Number of Transfer Units) και δίνεται από τη σχέση:

$$NTU = \frac{U \cdot A}{(m \cdot C_p)_{\min}} \tag{4.20}$$

όπου U ο συντελεστής θερμικής διαπερατότητας του εναλλάκτη θερμότητας και A η επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας του εναλλάκτη. Η αδιάστατη παροχή θερμοχωρητικότητας C* δίνεται από τη σχέση:

$$C^* = \frac{(m \cdot C_p)_{\min}}{(m \cdot C_p)_{\max}} \tag{4.21}$$

Με τις ανωτέρω σχέσεις είναι δυνατή η εκτίμηση της απόδοσης λειτουργίας του εναλλάκτη θερμότητας. Αναλυτικό παράδειγμα υπολογισμού δίνεται στην ενότητα 5.6.1 του Κεφαλαίου 5.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, για τον ακριβή υπολογισμό του δικτύου διάθεσης θερμότητας, είναι επιθυμητός ο υπολογισμός των θερμοκρασιών των εργαζόμενων μέσων συναλλαγής θερμικής ισχύος πριν και μετά την είσοδό τους στον εναλλάκτη θερμότητας. Παρακάτω δίνεται η ακριβής μεθοδολογία υπολογισμού των θερμοκρασιών για εναλλάκτες θερμότητας ομορροής και αντιρροής. Συγκεκριμένα:

Η συναλασσόμενη θερμική ισχύς Q_{he} στον εναλλάκτη θερμότητας, με βάση τα γνωστά, δίνεται από τις σχέσεις:

$$Q_{he} = \dot{m}_c \cdot C_c \cdot (\theta_{co} - \theta_{ci}) \tag{4.22}$$

$$Q_{he} = \dot{m}_h \cdot C_h \cdot (\theta_{hi} - \theta_{ho}) \quad (4.23)$$

- Επίσης, ειδικά για εναλλάκτη ομορροής, η ίδια συναλλασσόμενη θερμική ισχύς δίνεται από τη σχέση:

$$Q_{he} = U \cdot A \cdot \frac{(\theta_{hi} - \theta_{ci}) - (\theta_{ho} - \theta_{co})}{\ln \frac{\theta_{hi} - \theta_{ci}}{\theta_{ho} - \theta_{co}}} \quad (4.24)$$

- Κατ' αντιστοιχία, στην περίπτωση εναλλάκτη αντιρροής, η ίδια συναλλασσόμενη θερμική ισχύς δίνεται από τη σχέση:

$$Q_{he} = U \cdot A \cdot \frac{(\theta_{hi} - \theta_{co}) - (\theta_{ho} - \theta_{ci})}{\ln \frac{\theta_{hi} - \theta_{co}}{\theta_{ho} - \theta_{ci}}} \quad (4.25)$$

Στη γενική περίπτωση, οι ανωτέρω σχέσεις αποτελούν σύστημα τριών εξισώσεων με τρεις αγνώστους τα μεγέθη Q_{he} , θ_{co} και θ_{ho} , υπό την προϋπόθεση ότι τα στοιχεία του εναλλάκτη U και A , οι παροχές και οι ειδικές θερμοχωρητικότητες των μέσων και οι θερμοκρασίες εισόδου τους σε αυτόν είναι γνωστά. Στην περίπτωση του συγκεκριμένου παραδείγματος, η συναλλασσόμενη θερμική ισχύς Q_{he} είναι γνωστή, αφού προκύπτει με βάση τη διαθέσιμη προς αξιοποίηση θερμική ισχύ από τις θερμοηλεκτρικές μονάδες και το βαθμό απόδοσης του εναλλάκτη. Οι θερμοκρασίες εξόδου των μέσων συναλλαγής θερμότητας από τον εναλλάκτη δίνονται από τις σχέσεις:

- Εναλλάκτης ομορροής:

$$\theta_{ho} = \theta_{hi} - (\theta_{hi} - \theta_{ci}) \cdot \frac{1 - e^{-U \cdot A \cdot \left(\frac{1}{\dot{m}_h \cdot C_h} + \frac{1}{\dot{m}_c \cdot C_c} \right)}}{1 + \frac{\dot{m}_h \cdot C_h}{\dot{m}_c \cdot C_c}} \quad (4.26)$$

$$\theta_{co} = \theta_{ci} - (\theta_{hi} - \theta_{ci}) \cdot \frac{1 - e^{-U \cdot A \cdot \left(\frac{1}{\dot{m}_h \cdot C_h} + \frac{1}{\dot{m}_c \cdot C_c} \right)}}{1 + \frac{\dot{m}_c \cdot C_c}{\dot{m}_h \cdot C_h}} \quad (4.27)$$

- Εναλλάκτης αντιρροής:

$$\theta_{ho} = \theta_{hi} - (\theta_{hi} - \theta_{ci}) \cdot \frac{1 - e^{-U \cdot A \cdot \left(\frac{1}{\dot{m}_h \cdot C_h} - \frac{1}{\dot{m}_c \cdot C_c} \right)}}{1 - \frac{\dot{m}_h \cdot C_h}{\dot{m}_c \cdot C_c} \cdot e^{-U \cdot A \cdot \left(\frac{1}{\dot{m}_h \cdot C_h} - \frac{1}{\dot{m}_c \cdot C_c} \right)}} \quad (4.28)$$

$$\theta_{co} = \theta_{ci} + (\theta_{hi} - \theta_{ci}) \cdot \frac{1 - e^{-U \cdot A \cdot \left(\frac{1}{\dot{m}_h \cdot C_h} - \frac{1}{\dot{m}_c \cdot C_c} \right)}}{\frac{\dot{m}_c \cdot C_c}{\dot{m}_h \cdot C_h} - e^{-U \cdot A \cdot \left(\frac{1}{\dot{m}_h \cdot C_h} - \frac{1}{\dot{m}_c \cdot C_c} \right)}} \quad (4.29)$$

Στην περίπτωση μελέτης συστημάτων συμπαράγωγής, οι θερμοκρασίες εισόδου των θερμών μέσων στους εναλλάκτες (καυσαέρια ή μέσο κυκλώματος ψύξης) θ_{hi} μπορούν να είναι γνωστές με βάση τα

λειτουργικά χαρακτηριστικά των θερμοηλεκτρικών μονάδων. Γνωρίζοντας τη συναλλασσόμενη θερμική ισχύ Q_{he} , από τη σχέση 4.23, είναι δυνατός ο υπολογισμός της θερμοκρασίας εξόδου από τον εναλλάκτη των θερμών μέσων θ_{ho} . Στη συνέχεια, από τη σχέση 4.26 (εναλλάκτης ομορροής) ή τη σχέση 4.28 (εναλλάκτης αντιρροής), μπορεί να υπολογιστεί η θερμοκρασία εισόδου θ_{ci} του κρύου μέσου στον εναλλάκτη, το οποίο επιστρέφει από το δίκτυο διάθεσης της θερμότητας προς τους τελικούς χρήστες. Τέλος, από τη σχέση 4.27 (εναλλάκτης ομορροής) ή τη σχέση 4.29 (εναλλάκτης αντιρροής), υπολογίζεται η θερμοκρασία εξόδου θ_{co} από τον εναλλάκτη του εργαζόμενου μέσου με την οποία τούτο εισέρχεται στο δίκτυο διάθεσης της θερμότητας στους τελικούς χρήστες.

Οι ανωτέρω σχέσεις οδηγούν:

- Στον υπολογισμό της απόδοσης του εναλλάκτη ϵ , βάσει της οποίας και της διαθέσιμης προς μεταφορά θερμικής ισχύος είναι πλέον εφικτός ο υπολογισμός της μεταφερόμενης θερμικής ισχύος μέσω του εναλλάκτη Q_{he} , η οποία εισάγεται στο δίκτυο διάθεσης της θερμότητας προς τους τελικούς χρήστες.
- Στον υπολογισμό των θερμοκρασιών εισόδου θ_{co} και εξόδου θ_{ci} του μέσου στο δίκτυο διάθεσης θερμικής ισχύος στους τελικούς χρήστες (οι δείκτες «ο» και «i» αναφέρονται σε έξοδο και είσοδο αντίστοιχα στον εναλλάκτη θερμότητας, ουσιαστικά δηλαδή σε είσοδο και έξοδο αντίστοιχα από το δίκτυο διάθεσης θερμότητας).

Ο υπολογισμός των θερμοκρασιών του μέσου στην είσοδο και στην έξοδο του δικτύου διάθεσης θερμότητας προς τους τελικούς χρήστες είναι σημαντικός, αφού καθορίζει την τελική θερμική ισχύ, η οποία θα αποδοθεί στους θερμαινόμενους χώρους, σε συνάρτηση με την επιθυμητή θερμοκρασία σε αυτούς. Επίσης, η θερμοκρασία εισόδου στο δίκτυο διάθεσης θερμότητας, ξανά σε συνάρτηση με την επιθυμητή θερμοκρασία εσωτερικών χώρων, θα καθορίσει την παροχή του μέσου σε αυτό, παράμετρος που, με τη σειρά της, καθορίζει τη διάμετρο των αγωγών μεταφοράς και τον απαιτούμενο αντλητικό εξοπλισμό για την εξασφάλιση της ροής.

4.6.3. Υπολογισμός δικτύου μεταφοράς

Ο υπολογισμός του υδραυλικού δικτύου μεταφοράς θερμικής ισχύος ακολουθεί τις βασικές αρχές που εισάγονται από τη Μηχανική Ρευστών και τη Μεταφορά Θερμότητας. Οι αρχές της Μηχανικής Ρευστών εισάγονται για την ελαχιστοποίηση των υδραυλικών απωλειών ροής, τον ακριβή υπολογισμό του μανομετρικού της υδραυλικής εγκατάστασης και τη βέλτιστη τεχνικο-οικονομική επιλογή της διαμέτρου των σωληνώσεων. Οι αρχές της Μεταφοράς Θερμότητας εισάγονται για τον υπολογισμό των απωλειών θερμότητας κατά τη μεταφορά του μέσου από το θερμοηλεκτρικό σταθμό ως το σημείο τελικής διάθεσης θερμότητας, παράμετρος που θα καθορίσει την παροχή μεταφοράς του μέσου, ώστε η θερμοκρασιακή πτώση από το σταθμό ως την τελική διάθεση θερμότητας να μην υπερβαίνει μία μέγιστη τιμή και να εξασφαλίζεται η ελάχιστη επιθυμητή θερμοκρασία του μέσου κατά την άφιξή του στους θερμαινόμενους εσωτερικούς χώρους. Με τη γνώση του μανομετρικού της υδραυλικής εγκατάστασης και της απαιτούμενης παροχής του εργαζόμενου μέσου στις σωληνώσεις μεταφοράς είναι πλέον εφικτή η σωστή επιλογή του αντλητικού εξοπλισμού της εγκατάστασης. Στη συνέχεια δίνονται συνοπτικά οι βασικές σχέσεις υπολογισμού των ανωτέρω μεγεθών.

Η θερμική ισχύς απωλειών από τις σωληνώσεις μεταφοράς ανά μονάδα μήκους L δίνονται από τη σχέση (βλέπε Κεφάλαιο 5):

$$\frac{q}{L} = \frac{2 \cdot \lambda \cdot \pi}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \cdot (\theta_1 - \theta_2) \quad \text{ή} \quad \frac{q}{L} = \frac{(\theta_1 - \theta_2)}{\frac{1}{2 \cdot \lambda \cdot \pi} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (4.30)$$

όπου:

r_1 και r_2 : η εσωτερική και εξωτερική ακτίνα της σωλήνωσης αντίστοιχα

θ_1 και θ_2 : οι θερμοκρασίες εσωτερικής και εξωτερικής επιφάνειας της σωλήνωσης αντίστοιχα

λ : ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού της σωλήνωσης.

Στην περίπτωση που έχουμε αγωγή διαμέσου σύνθετου κυλινδρικού τοιχώματος με n στρώσεις διαφορετικών υλικών, με σταθερούς συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας $\lambda_1, \lambda_2 \dots \lambda_n$ και υπό την προϋπόθεση ότι οι στρώσεις βρίσκονται σε πολύ καλή επαφή μεταξύ τους, η μεταφερόμενη θερμική ισχύς ανά μονάδα μήκους δίδεται από τη σχέση:

$$\frac{q}{L} = \frac{(\theta_1 - \theta_2)}{\frac{1}{2 \cdot \lambda_1 \cdot \pi} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_2 \cdot \pi} \cdot \ln \frac{d_3}{d_2} + \dots + \frac{1}{2 \cdot \lambda_n \cdot \pi} \cdot \ln \frac{d_{n+1}}{d_n}} \quad (4.31)$$

Οι θερμικές απώλειες συνεπάγονται αντίστοιχη πτώση θερμοκρασίας για κάθε μονάδα μήκους, η οποία υπολογίζεται από τις ακόλουθες σχέσεις για κάθε μονάδα μήκους των σωληνώσεων:

$$\begin{aligned} q_1 &= \dot{m} \cdot C \cdot (\theta_{in-1} - \theta_{out-1}) \\ q_2 &= \dot{m} \cdot C \cdot (\theta_{in-2} - \theta_{out-2}) \\ &\dots \\ q_L &= \dot{m} \cdot C \cdot (\theta_{in-L} - \theta_{out-L}) \end{aligned} \quad (4.32)$$

όπου θ_{in-j} και θ_{out-j} οι θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου του μέσου στη μονάδα μήκους σωληνώσεων j . Επίσης ισχύει $\theta_{out-j} = \theta_{in-j+1}$. Οι σχέσεις 4.31 και 4.32 εφαρμόζονται διαδοχικά και επαναληπτικά ως εξής:

- Αρχικά από τη σχέση 4.31 υπολογίζεται η ισχύς θερμικών απωλειών q_1 για την πρώτη μονάδα μήκους των σωληνώσεων, θεωρώντας ως εσωτερική θερμοκρασία του μέσου τη θερμοκρασία εισαγωγής του από τον εναλλάκτη θερμότητας, δηλαδή $\theta_1 = \theta_{co}$
- Στη συνέχεια, με τη σχέση 4.32, υπολογίζεται η θερμοκρασία του μέσου θ_{out-1} στην έξοδό του από την πρώτη μονάδα μήκους των σωληνώσεων
- Εφαρμόζοντας και πάλι τη σχέση 4.31, υπολογίζονται οι θερμικές απώλειες q_2 για τη δεύτερη μονάδα μήκους, θέτοντας $\theta_1 = \theta_{in-2} = \theta_{out-1}$
- Με τη σχέση 4.32, υπολογίζεται η θερμοκρασία του μέσου θ_{out-2} στην έξοδό του από τη δεύτερη μονάδα μήκους των σωληνώσεων
- Η ανωτέρω διαδικασία εφαρμόζεται επαναληπτικά μέχρι να ολοκληρωθούν οι L μονάδες μήκους των σωληνώσεων μεταφοράς.

Το τελικό αποτέλεσμα της ανωτέρω διαδικασίας είναι ο υπολογισμός της τελικής θερμοκρασίας θ_{out-L} του μέσου κατά την άφιξή του στο σημείο διάθεσης της θερμότητας προς τους τελικούς χρήστες. Η θερμοκρασία θ_{out-L} δε θα πρέπει είναι μικρότερη από κάποια ελάχιστη τιμή, η οποία καθορίζεται με βάση τις απαιτήσεις λειτουργίας του συστήματος θέρμανσης. Συνεπώς η ανωτέρω περιγραφόμενη διαδικασία θα πρέπει να εκτελεστεί επαναληπτικά, με παράμετρο την παροχή \dot{m} του μέσου στο υδραυλικό δίκτυο. Όσο μεγαλύτερη η τιμή της παροχής του μέσου, τόσο μικρότερη θα είναι η θερμοκρασιακή πτώση $\Delta\theta$ από τους εναλλάκτες στο θερμοηλεκτρικό σταθμό έως το σημείο τελικής διάθεσης της μεταφερόμενης θερμικής ισχύος, δηλαδή τόσο υψηλότερη θα είναι η τελική θερμοκρασία θ_{out-L} . Τελικά, γίνεται αντιληπτό ότι, με την ολοκλήρωση της επαναληπτικής διαδικασίας θα υπολογιστούν δύο βασικά μεγέθη που αφορούν στη διαστασιολόγηση του υδραυλικού δικτύου μεταφοράς θερμικής ισχύος:

- η ελάχιστη απαιτούμενη παροχή του εργαζόμενου μέσου
- η τελική θερμοκρασία του εργαζόμενου μέσου στο τελικό σημείο του δικτύου διάθεσης της θερμικής ισχύος προς τους τελικούς χρήστες.

Με γνωστή πλέον την ελάχιστη απαιτούμενη παροχή μάζας εργαζόμενου μέσου στις σωληνώσεις μεταφοράς θερμικής ισχύος, το επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός της διαμέτρου των σωληνώσεων και του συνολικού αντλητικού ύψους της εγκατάστασης, του λεγόμενου μανομετρικού. Στην περίπτωση μεταφοράς νερού σε υδραυλικό δίκτυο με ανοιχτά τα δύο άκρα του στην ατμοσφαιρική πίεση, το συνολικό μανομετρικό της εγκατάστασης ισούται με το άθροισμα των απωλειών ροής στις σωληνώσεις, οι οποίες συνίστανται σε

γραμμικές και τοπικές απώλειες ροής. Οι γραμμικές απώλειες ροής δίνονται από τη σχέση (βλέπε και Κεφάλαιο 3):

$$\delta h_f = f \cdot \frac{L}{D^5} \cdot \frac{8 \cdot Q^2}{g \cdot \pi^2} \quad (4.33)$$

όπου:

- f : ο συντελεστής γραμμικών απωλειών ροής
 D : η διάμετρος των σωληνώσεων μεταφοράς
 L : το μήκος των σωληνώσεων μεταφοράς
 Q : η παροχή όγκου του εργαζόμενου μέσου (είναι γνωστή δεδομένης της παροχής μάζας)
 g : η επιτάχυνση της βαρύτητας.

Οι τοπικές απώλειες ροής δίνονται από τη γενική σχέση:

$$\sum \delta h_k = \sum k \cdot Q^2 \quad (4.34)$$

όπου ο συντελεστής k δίνεται από πίνακες ή διαγράμματα ανάλογα με το υδραυλικό εξάρτημα, στο οποίο αναπτύσσονται οι τοπικές αντιστάσεις ροής.

Γράφοντας την παροχή ως γινόμενο ταχύτητας ρευστού επί διατομή σωλήνωσης, δηλαδή:

$$Q = u \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (4.35)$$

η σχέση 4.33 γράφεται:

$$\delta h_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{u^2}{2 \cdot g} \quad (4.36)$$

στην οποία αναδεικνύεται η άμεση εξάρτηση των γραμμικών απωλειών ροής με την ταχύτητα ροής.

Με βάση τα αναφερόμενα στο Κεφάλαιο 3, η διάμετρος των σωληνώσεων επιλέγεται κατά τρόπο τέτοιο, ώστε οι γραμμικές και οι τοπικές απώλειες ροής να μην υπερβαίνουν ένα μέγιστο όριο. Ένας συνήθης εμπειρικός κανόνας είναι η διατήρηση της ταχύτητας ροής u κάτω από μία μέγιστη τιμή, της τάξης του 1,5 – 2m/s. Συνεπώς η διάμετρος της σωλήνωσης επιλέγεται με μοναδικό στόχο τη διατήρηση των απωλειών ροής, δηλαδή του μανομετρικού της εγκατάστασης, κάτω από ένα μέγιστο όριο. Ισοδύναμο μέτρο προς την ίδια κατεύθυνση είναι η διατήρηση της ταχύτητας ροής κάτω από τις μέγιστες τιμές που αναφέρθηκαν παραπάνω.

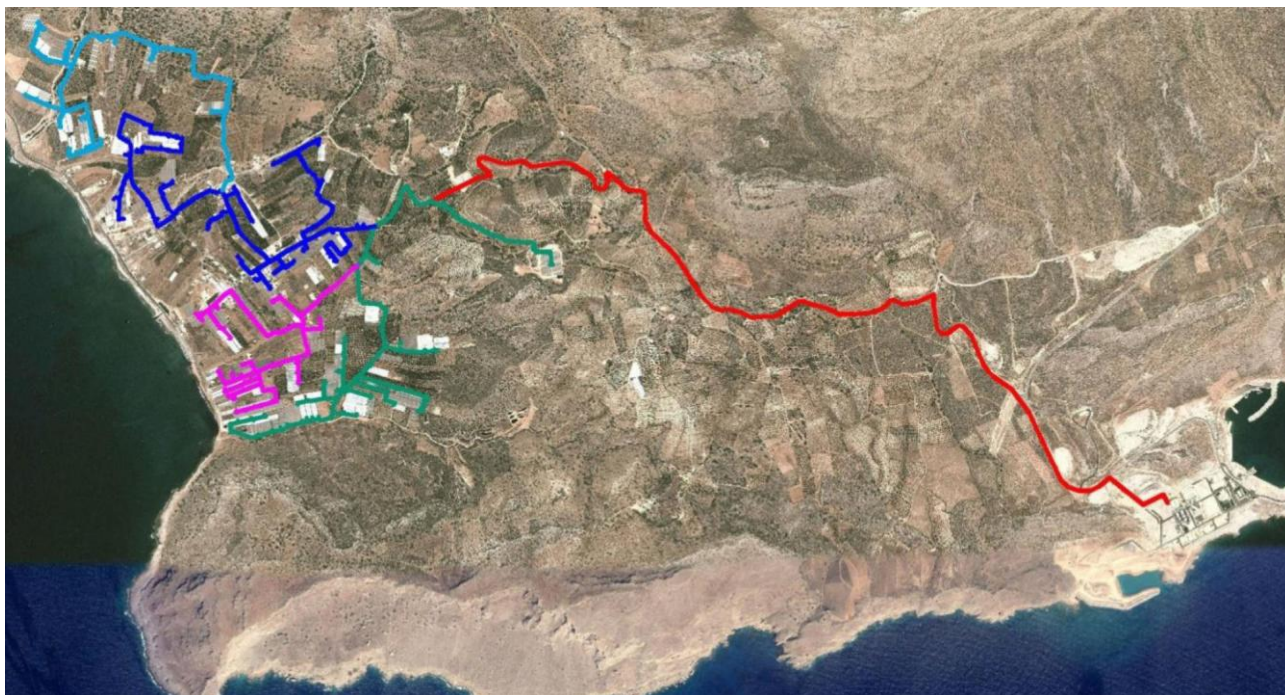
Έχοντας καθορίσει πλέον την ονομαστική διάμετρο των σωληνώσεων μεταφοράς, το συνολικό αντλητικό ύψος της υδραυλικής εγκατάστασης δίνεται από τη σχέση:

$$H_\Sigma = \delta h_f + \sum \delta h_k = f \cdot \frac{L}{D^5} \cdot \frac{8 \cdot Q^2}{g \cdot \pi^2} + \sum k \cdot Q^2 \quad (4.37)$$

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο υπολογισμός του μανομετρικού της υδραυλικής εγκατάστασης θα πρέπει να γίνει με βάση τη δυσμενέστερη διαδρομή, αναφορικά με τις εμφανιζόμενες απώλειες ροής. Με γνωστά την παροχή του μέσου και το συνολικό μανομετρικό της εγκατάστασης, είναι πλέον δυνατή η επιλογή του κατάλληλου μεγέθους για την αντλία που θα εξασφαλίσει τη ροή του μέσου στο υδραυλικό δίκτυο.

4.6.4. Τελική διάθεση θερμότητας

Ο υπολογισμός του υδραυλικού δικτύου διάθεσης της θερμικής ισχύος ολοκληρώνεται στους τελικούς εναλλάκτες θερμότητας, μέσω των οποίων η θερμική ισχύς αποδίδεται στα επιμέρους συστήματα θέρμανσης των θερμαινόμενων χώρων. Για να δοθεί μία παραστατική εικόνα του πώς μπορεί να αναπτύσσεται ένα υδραυλικό δίκτυο τηλεθέρμανσης, στο σχήμα 4.21 παρουσιάζεται κάτοψη του δικτύου μεταφοράς θερμικής ισχύος από το θερμοηλεκτρικό σταθμό Αθρινόλακου Κρήτης (νοτιοανατολική Κρήτη) έως γειτονικές θερμοκηπιακές καλλιέργειες, οι οποίες βρίσκονται σε μέση απόσταση περίπου 5km από το σταθμό.



Σχήμα 4.21: Όδωση δικτύου τηλεθέρμανσης από το θερμοηλεκτρικό σταθμό Αθρινόλακου στη νοτιοανατολική Κρήτη προς γειτονικές θερμοκηπιακές καλλιέργειες.

Στο σχήμα 4.21 παρουσιάζεται μία ενδεικτική εικόνα της πολύπλοκης δομής, που μπορεί να αναπτύξει ένα δίκτυο τηλεθέρμανσης. Στην πραγματικότητα, η ανάπτυξη ενός δικτύου τηλεθέρμανσης μιας πόλης, για παράδειγμα, αναμένεται να είναι πολύ περισσότερο πολύπλοκη από την εικονιζόμενη. Ο υπολογισμός των διακλαδώσεων της βασικής σωλήνωσης μεταφοράς ακολουθεί τη διαδικασία που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα, για τον υπολογισμό των απωλειών ροής και θερμότητας. Επίσης αντίστοιχη διαδικασία με αυτήν της ενότητας 4.6.2. πρέπει να ακολουθηθεί για τον υπολογισμό των εναλλακτών θερμότητας που εισάγονται για τη συναλλαγή θερμότητας με τα επιμέρους συστήματα θέρμανσης των τελικών χρηστών. Τέλος, σε όλο το υδραυλικό δίκτυο τηλεθέρμανσης, θα πρέπει να υπολογιστούν οι απαιτούμενες βοηθητικές υδραυλικές συσκευές, όπως τα δοχεία διαστολής, βαλβίδες ασφάλειας κλπ, που εξασφαλίζουν την ασφαλή λειτουργία του δικτύου έναντι του ενδεχόμενου αστοχίας. Η ονομαστική πίεση των σωληνώσεων του δικτύου εξασφαλίζεται από τη μέγιστη πίεση που αναπτύσσεται σε αυτό, η οποία προκύπτει με βάση τη μεγαλύτερη τιμή από τη μέγιστη υψομετρική διαφορά στο δίκτυο τηλεθέρμανσης και την επιθυμητή πίεση τροφοδοσίας του υδραυλικού δικτύου.

4.7. Συστήματα τριπαραγωγής

4.7.1. Εισαγωγή

Ένα σύστημα συμπαράγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας περιορίζεται σε υψηλούς βαθμούς απόδοσης πρακτικά μόνο κατά τις χρονικές περιόδους που ταυτόχρονα με τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας

υφίσταται και ζήτηση θερμότητας. Στην περίπτωση που η θερμότητα ενός συστήματος συμπαράγωγής αποσκοπεί στη θέρμανση κλιματιζόμενων χώρων, η χρονική περίοδος κατά την οποία το σύστημα αποδίδει το μέγιστο ενεργειακό όφελος, και εμφανίζει τη μέγιστη απόδοση, περιορίζεται κατά τους χειμερινούς μήνες. Πρακτικά κατά την περίοδο μη ύπαρξης ζήτησης θερμικής ισχύος το σύστημα παύει να λειτουργεί ως σύστημα συμπαράγωγής, καθώς πλέον περιορίζεται αποκλειστικά στην παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Στις ανωτέρω περιπτώσεις ανήκουν οι περισσότερες εφαρμογές που υλοποιούνται και στην Ελλάδα, όπου η σκοπιμότητα ύπαρξης συστήματος συμπαράγωγής υφίσταται ετησίως για μία περίοδο της τάξης των 5 έως 8 μηνών για τη νότια και βόρεια Ελλάδα, αντίστοιχα. Συνεπώς η εφαρμογή συστημάτων συμπαράγωγής στον κτηριακό τομέα αποκλειστικά για κάλυψη των θερμικών φορτίων είναι αντιοικονομική, λόγω των περιορισμένων ετήσιων ωρών λειτουργίας. Με βάση τα ανωτέρω και με στόχο τη μεγιστοποίηση της περιόδου λειτουργίας ενός συστήματος συμπαράγωγής, αναπτύσσονται τα συστήματα τριπαραγωγής, στα οποία η παραγόμενη θερμότητα από τις μονάδες ισχύος του συστήματος αξιοποιείται για την παραγωγή ψύξης κατά τους θερινούς μήνες. Ψύξη μπορεί να παραχθεί από τη θερμότητα ενός σταθμού συμπαράγωγής, μέσω των κύκλων απορρόφησης ή προσρόφησης, με μονάδες τριπαραγωγής.

Τριπαραγωγή είναι η ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρισμού, θερμότητας και ψύξης από την ίδια αρχική πηγή ενέργειας. Η μέθοδος της τριπαραγωγής βρίσκει εφαρμογή στον κτηριακό τομέα κυρίως σε νοσοκομεία, ξενοδοχεία, κτήρια γραφείων και εμπορικά κέντρα ή σε συστήματα τηλεθέρμανσης – τηλεψύξης. Γενικά χρησιμοποιείται σε κτήρια με ταυτόχρονες συνεχείς ανάγκες για ηλεκτρισμό και θέρμανση ή/και ψύξη που υπερβαίνουν τις 4.500 – 5.000 ώρες ετησίως. Οι μονάδες τριπαραγωγής βασίζονται κυρίως σε εμβολοφόρες μηχανές εσωτερικής καύσης (ντιζελογεννήτριες) ή μικροστροβίλους, συνδυασμένες με κύκλο απορρόφησης για ψύξη. Σε μελλοντικές εφαρμογές τριπαραγωγής, παρουσιάζει ενδιαφέρον και η χρήση κυψελών καυσίμου.

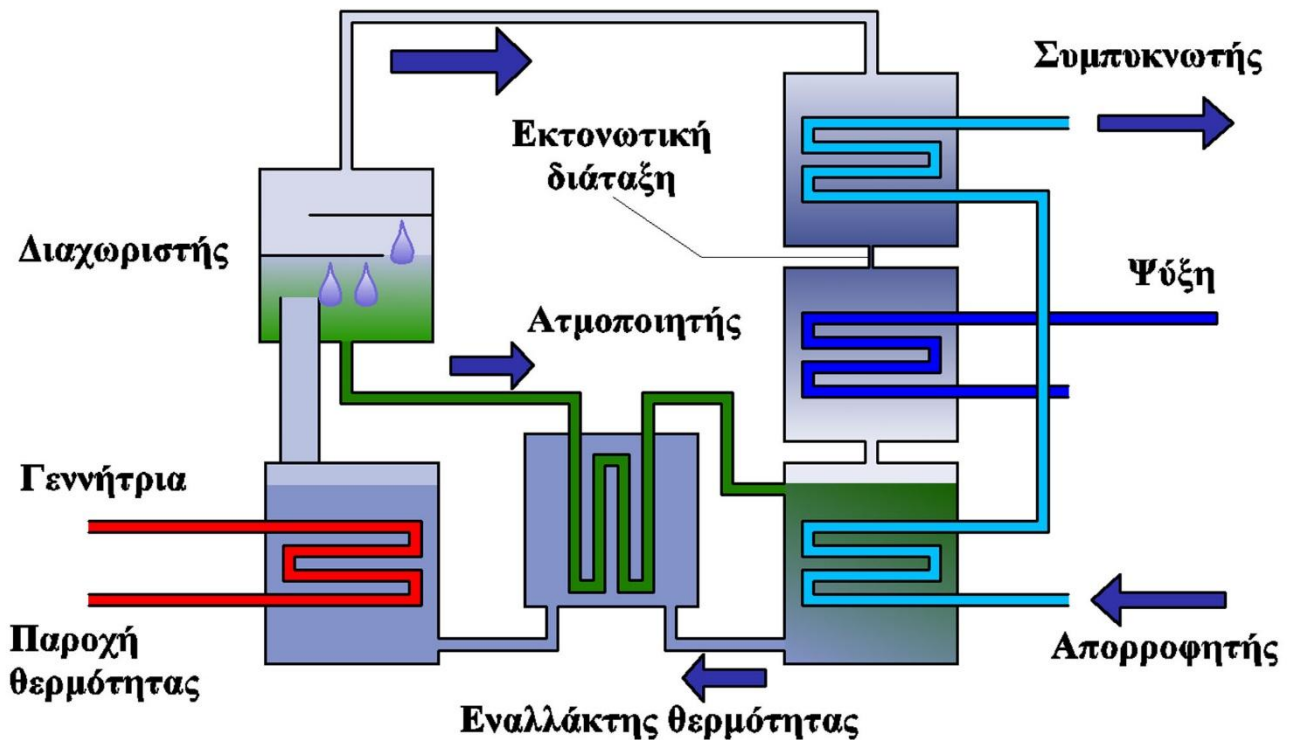
4.7.2. Βασικές αρχές ψύξης με απορρόφηση

Οι ψύκτες απορρόφησης ακολουθούν τις βασικές διεργασίες της συμπύκνωσης – εξάτμισης του βασικού ψυκτικού κύκλου για την παραγωγή ψύξης. Όπως μία συμβατική συσκευή παραγωγή ψύξης, διαθέτουν εξατμιστή και συμπυκνωτή, όπου εκτονώνεται το ψυκτικό μέσο. Ωστόσο, αντί του μηχανικού έργου, οι ψύκτες απορρόφησης χρησιμοποιούν θερμότητα ως ενεργειακή πηγή. Η θερμότητα αυτή παράγεται είτε άμεσα με καύση καυσίμου σε κάποιο καυστήρα, είτε έμμεσα, με χρήση ατμού, ζεστού νερού ή από περίσσεια / ανάκτηση θερμότητας. Οι εφαρμογές ψύξης με απορρόφηση απαιτούν παροχή θερμότητας σε θερμοκρασίες από 100 – 200°C. Ιδιαίτερα δημοφιλής είναι την τελευταία δεκαετία η παραγωγή της θερμότητας που απαιτείται για τη λειτουργία ψύκτη απορρόφησης από ηλιακούς συλλέκτες. Στην περίπτωση αυτή έχει καθιερωθεί η ονομασία της συνολικής διαδικασίας παραγωγής ψύξης με αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας μέσω των ηλιακών συλλεκτών ως «ηλιακός κλιματισμός».

Οι μηχανές απορρόφησης, που είναι διαθέσιμες στο εμπόριο, τροφοδοτούνται με ατμό, ζεστό νερό ή τα αέρια καύσης, που μπορούν να παράγονται και από συστήματα συμπαράγωγής. Στην πιο απλή σχεδίασή της, η μηχανή απορρόφησης αποτελείται από εξατμιστή (ατμοποιητή), συμπυκνωτή, απορροφητή, μια γεννήτρια και μια αντλία διαλύματος. Στον κύκλο απορρόφησης, η συμπίεση ατμού του ψυκτικού μέσου πραγματοποιείται με συνδυασμό του απορροφητή, της αντλίας διαλύματος και της γεννήτριας.

Η βασική αρχή της μηχανής ψύξης με απορρόφηση φαίνεται στο σχήμα 4.22. Κατά τα γνωστά, στον εξατμιστή της συσκευής, θερμότητα απορροφάται από τον κλιματιζόμενο χώρο, παράγοντας ψύξη και ατμοποιώντας το ψυκτικό μέσο. Ο ατμός του ψυκτικού μέσου, που παράγεται στον εξατμιστή, απορροφάται σε ένα απορροφητικό υγρό μέσα στον απορροφητή. Το απορροφητικό μέσο, το οποίο πλέον ονομάζεται «ασθενές απορροφητικό», διοχετεύεται με αντλίες στη γεννήτρια. Εκεί προσδίδεται θερμότητα από την εξωτερική πηγή προς το μίγμα απορροφητικού – ψυκτικού μέσου, με αποτέλεσμα το ψυκτικό μέσο να αποδεσμεύεται ως ατμός υψηλής πίεσης. Γίνεται, συνεπώς, κατανοητό ότι ο συνδυασμός του απορροφητή, της αντλίας ασθενούς απορροφητικού και της γεννήτριας έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή ατμού ψυκτικού μέσου υψηλής πίεσης, όπως ακριβώς και ο μηχανικός συμπιεστής σε μία συμβατική συσκευή παραγωγής ψύξης. Ο ατμός του ψυκτικού μέσου διαχωρίζεται πλήρως από πιθανά υπολείμματα απορροφητικού μέσου σε ένα διαχωριστή. Το αναγεννημένο ή «ασχυρό απορροφητικό» οδηγείται στη συνέχεια πίσω στον απορροφητή, για να συλλέξει εκ νέου ψυκτικό ατμό. Ο ατμός του ψυκτικού μέσου θα συμπυκνωθεί στο συμπυκνωτή για

τη μείωση της θερμοκρασίας του και θα εκτονωθεί σε εκτονωτική διάταξη για την πτώση της πίεσής του και την πλήρη υγροποίησή του, πριν οδηγηθεί και πάλι στον ατμοποιητή για την εκ νέου ατμοποίησή του και την παραγωγή ψύξης.



- Ψυκτικό υγρό
- Συμπυκνωμένο διάλυμα απορροφητικού - ψυκτικού μέσου
- Αραιό διάλυμα απορροφητικού - ψυκτικού μέσου
- Μέσο διανομής ψύξης
- Νερό ψύξης
- Μέσο μεταφοράς θερμότητας

Σχήμα 4.22: Αρχή λειτουργίας ενός ψυκτικού συστήματος απορρόφησης μονού σταδίου [4].

Οι ροές θερμότητας στο βασικό κύκλο (σχήμα 4.22) είναι οι εξής:

- απορρόφηση θερμότητας στον εξατμιστή (ή ατμοποιητή) από τον κλιματιζόμενο χώρο και παραγωγή ψύξης, σε χαμηλό θερμοκρασιακό επίπεδο,
- απόρριψη θερμότητας στο συμπυκνωτή προς το περιβάλλον, σε ενδιάμεσο θερμοκρασιακό επίπεδο,
- απόρριψη θερμότητας από τον απορροφητή, σε ενδιάμεσο θερμοκρασιακό επίπεδο,
- παροχή θερμότητας στη γεννήτρια, σε υψηλό θερμοκρασιακό επίπεδο.

Σε έναν κύκλο απορρόφησης, ψυκτικό μέσο και απορροφητικό συγκροτούν το «ζεύγος εργασίας». Διαχρονικά έχουν δοκιμαστεί πολλά ζεύγη εργασίας. Τα δύο ζεύγη εργασίας που έχουν καθιερωθεί είναι:

- διάλυμα βρωμιούχου λιθίου (Li-Br), ως απορροφητικό, με νερό,
- αμμωνία (NH₃) με νερό.

Για συστήματα ψύξης βρωμιούχου λιθίου– νερού, η πηγή θερμότητας πρέπει να είναι σε ελάχιστη θερμοκρασία των 70-90°C για συστήματα μονού σταδίου. Σε συστήματα που χρησιμοποιούν αμμωνία η θερμική ενέργεια παρέχεται σε θερμοκρασία 100-120°C(μονού σταδίου).Το ζεύγος νερού – διαλύματος βρωμιούχου λιθίου χρησιμοποιείται σε εφαρμογές ψύξης αέρα, όπου απαιτούνται θερμοκρασίες άνω των 0°C. Το ζεύγος αμμωνίας-νερού χρησιμοποιείται ως επί το πλείστον σε εφαρμογές κατάψυξης, με χαμηλές θερμοκρασίες εξάτμισης, μικρότερες των 0°C. Τα επίπεδα πίεσης της μηχανής αμμωνίας – νερού είναι συνήθως υψηλότερα της ατμοσφαιρικής πίεσης, ενώ οι μηχανές νερού – βρωμιούχου λιθίου λειτουργούν κατά κανόνα σε μερικό κενό.

Το σύστημα διπλού σταδίου χρησιμοποιεί δύο συγκροτήματα γεννήτριας – απορροφητήρα σε στάδια (σειρά), προκειμένου να χρησιμοποιήσει τη θερμότητα που παρέχεται περίπου δύο φορές. Η θερμότητα παρέχεται σε περίπου 170°C στην πρώτη γεννήτρια και η θερμότητα που απορρίφθηκε από τον αντίστοιχο συμπυκνωτή χρησιμοποιείται, για να δώσει ενέργεια στη δεύτερη γεννήτρια σε χαμηλότερο επίπεδο, της τάξης των 100°C όπως σε συστήματα μονού σταδίου.

Τα πλεονεκτήματα των ψυκτών απορρόφησης έναντι των συμβατικών κλιματιστικών μηχανημάτων βασισμένα σε κύκλο συμπύεσης είναι:

- πολύ χαμηλή κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας,
- ελάχιστα κινούμενα τμήματα, με αποτέλεσμα το μεγάλο χρόνο ζωής, την αυξημένη αξιοπιστία και το χαμηλό κόστος συντήρησης,
- χαμηλά επίπεδα θορύβου και κραδασμών,
- φιλικά προς το περιβάλλον ψυκτικά μέσα με μηδενικές εκπομπές ρύπων και ουσιών καταστροφής του όζοντος.

Τα μειονεκτήματα των ψυκτών απορρόφησης έναντι των συμβατικών κλιματιστικών μηχανημάτων βασισμένα σε κύκλο συμπύεσης είναι:

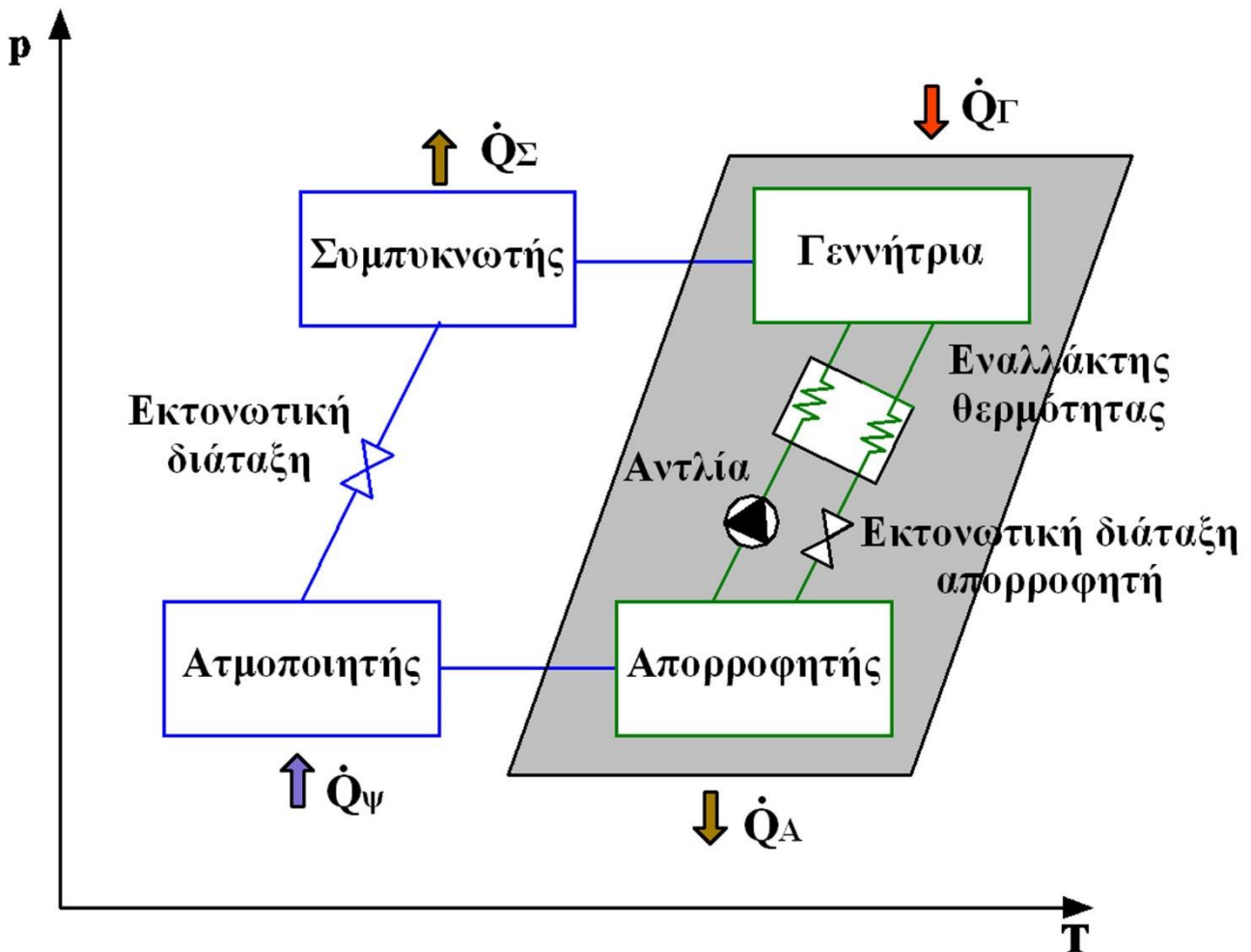
- μονάδες μεγάλης ισχύος με μεγάλο βάρος,
- σχετικά υψηλό αρχικό κόστος,
- κατανάλωση νερού σε πύργους ψύξης,
- χαμηλός συντελεστής συμπεριφοράς.

Κατά αντιστοιχία με το συμβατικό κύκλο ψύξης, ο θεωρητικός συντελεστής συμπεριφοράς (Coefficient of Performance, COP) σε ένα κύκλο απορρόφησης ορίζεται ως ο λόγος της θερμικής ισχύος που απορρίπτεται στον ατμοποιητή, δηλαδή της οφέλιμης ψυκτικής ισχύος Q_{ψ} , προς την απορροφούμενη θερμική ισχύ στη γεννήτρια Q_{th} :

$$COP = \frac{Q_{\psi}}{Q_{th}} \quad (4.38)$$

Ο θεωρητικός συντελεστής συμπεριφοράς σε ένα κύκλο απορρόφησης παίρνει τιμές μεταξύ 0,60 και 0,70, σημαντικά μικρότερες από τις αντίστοιχες σε ένα συμβατικό κύκλο ψύξης.

Στο σχήμα 4.23 απεικονίζεται θερμοδυναμικά ο κύκλος απορρόφησης σε διάγραμμα πίεσης–θερμοκρασίας, όπως περιγράφηκε παραπάνω.



Σχήμα 4.23: Αρχή λειτουργίας ενός ψυκτικού συστήματος απορρόφησης μονού σταδίου.

4.7.3. Ψύξη με απορρόφηση με συστήματα νερού – διαλύματος βρωμιούχου λιθίου (LiBr)

Τα περισσότερα συστήματα απορρόφησης που βασίζονται στο διάλυμα νερού – βρωμιούχου λιθίου έχουν σχεδιαστεί για εφαρμογές ψύξης αέρα. Τα συστήματα αυτά εμφανίστηκαν περί το 1900, πολύ πριν από αυτά του κύκλου συμπίεσης. Για ιστορικούς λόγους, η μονάδα μέτρησης δίνεται σε RT (ψυκτικοί τόνοι – Refrigeration Tons) από τους κατασκευαστές. 1RT αντιστοιχεί σε περίπου 3,52kW ψύξης.

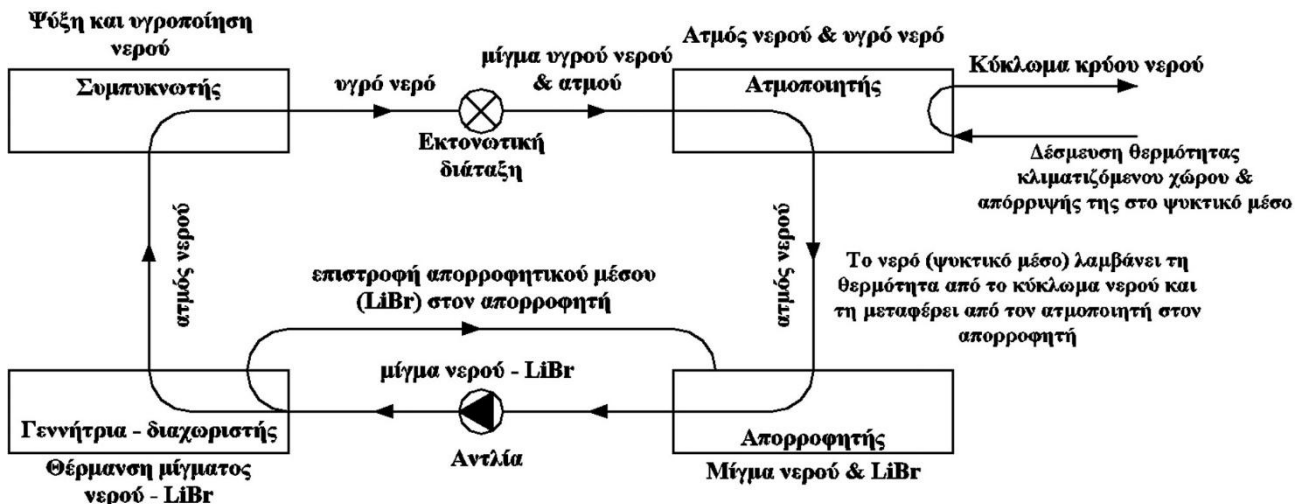
Στο απορροφητικό σύστημα νερού – βρωμιούχου λιθίου χρησιμοποιείται το νερό ως ψυκτικό υγρό και το βρωμιούχο λίθιο ως απορροφητικό υγρό (σχήμα 4.24). Καθώς το νερό, ως ψυκτικό μέσο, ρέει μέσα στις σωληνώσεις του εξατμιστή ψύξης νερού, ένα μέρος του γίνεται ατμός. Κατ' αυτόν τον τρόπο, όμως, το παραμένον νερό ψύχεται και, στη συνέχεια, χρησιμοποιείται, για να ψύξει το χώρο που κλιματίζεται. Η θερμότητα που απορροφά το ψυκτικό νερό, με τον τρόπο αυτό, προκαλεί περισσότερο νερό να εξατμιστεί.

Όταν το ψυκτικό νερό ατμοποιείται, έχοντας απορροφήσει θερμότητα στον εξατμιστή, ρέει προς τον απορροφητήρα, ελκόμενο λόγω της απορρόφησης του από το βρωμιούχο λίθιο. Ως ψυκτικός ατμός συλλέγει τη θερμότητα στον εξατμιστή και την οδηγεί προς το απορροφητικό υγρό. Ο ατμός οδηγείται εκεί από το απορροφητικό βρωμιούχο λίθιο. Κατά την πρόοδο της διαδικασίας, ο ατμός μετατρέπεται πάλι σε νερό. Το μίγμα νερού και υγρού λιθίου ρέει προς τη γεννήτρια – διαχωριστήρα.

Στη γεννήτρια το μίγμα θερμαίνεται, μέχρις ότου αρχίσει ο βρασμός του νερού και η μετατροπή του σε ατμό. Κατ' αυτόν τον τρόπο το ψυκτικό νερό διαχωρίζεται από το απορροφητικό βρωμιούχο λίθιο. Το απορροφητικό υγρό ρέει από πίεση στο συμπυκνωτή.

Στο συμπυκνωτή το νερό ψύχεται και επιστρέφει στην υγρή κατάστασή του, καθώς η θερμότητα μεταδίδεται από τον ατμό του νερού μέσω των τοιχωμάτων του συμπυκνωτή,.. Το ψυκτικό νερό είναι ακόμα υπό υψηλή πίεση.

Στη συνέχεια ο ατμός, διερχόμενος μέσω ενός εκτονωτικού ρυθμιστικού, οδηγείται στον εξατμιστή ψύξης νερού χαμηλής πίεσης. Ένα μέρος του ψυκτικού νερού εξατμίζεται εκεί, και ο ψυκτικός κύκλος επαναλαμβάνεται.



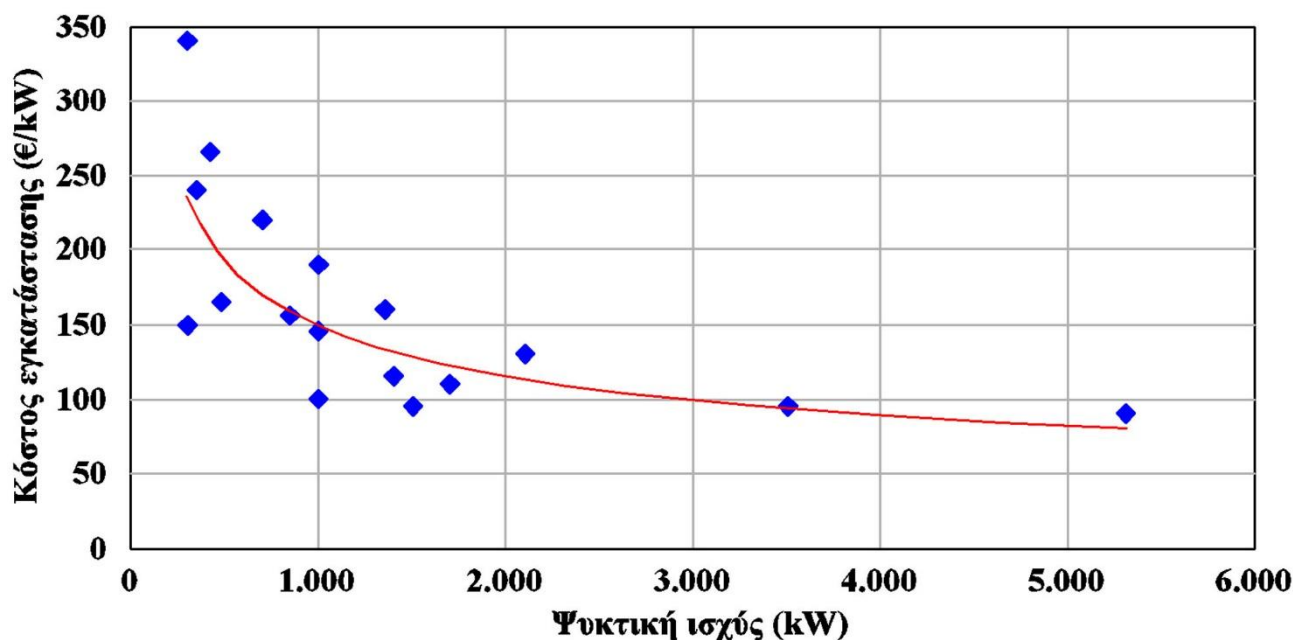
Σχήμα 4.24: Κύκλος απορρόφησης με διάλυμα βρωμιούχου λιθίου - νερού.

Οι περισσότεροι κατασκευαστές προσφέρουν συστήματα μονού σταδίου με ισχύ ψύξης 100 έως 1.500RT, δηλαδή 350kW – 5.200kW. Αυτά μπορούν να τροφοδοτηθούν απευθείας με καυσάερια ή με ατμό θερμοκρασίας από 110 έως 120°C. Εναλλακτικά, μπορούν να τροφοδοτηθούν με υπέρθερμο νερό στους 115 έως 150°C και με μέγιστη πίεση 9bar. Ο θεωρητικός συντελεστής συμπεριφοράς είναι της τάξης του 0,7.

Τα συστήματα διπλού σταδίου είναι περίπου στο ίδιο φάσμα ψυκτικής ισχύος με αυτά του μονού σταδίου. Η ελάχιστη ικανότητα ψύξης, που προσφέρεται στην αγορά, είναι λίγο υψηλότερη από αυτή των συστημάτων μονού σταδίου (περί τα 500kW). Ο ατμός είναι το προτιμώμενο μέσο τροφοδοσίας για ένα τέτοιο σύστημα, σε πιέσεις από 9 – 10bar, που αντιστοιχεί σε περιοχή θερμοκρασιών 175 έως 185°C. Το σύστημα διπλού σταδίου λειτουργεί, επίσης, και με υπέρθερμο νερό, η θερμοκρασία του οποίου κυμαίνεται μεταξύ 155 - 205°C. Ο συντελεστής συμπεριφοράς, σε κάθε περίπτωση, είναι από 0,9 έως 1,2. Αυτό σημαίνει ότι ο πύργος ψύξης που απαιτείται για έναν ψυκτικό διπλού σταδίου είναι μικρότερος από ό,τι για έναν μονού σταδίου κατά περίπου 40%.

Η πολυπλοκότητα των ψυκτικών διπλού σταδίου έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους τους, σε αντίθεση με αυτούς του μονού σταδίου. Όλες οι εμπορικά διαθέσιμες μηχανές συστημάτων κύκλου απορρόφησης απορρίπτουν θερμότητα σε ένα κύκλωμα πύργου ψύξης. Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι θερμοκρασίες στο κύκλωμα πύργου ψύξης είναι 32 – 37°C. Οι μονάδες διπλού σταδίου γενικά προτιμούνται περισσότερο από αυτές του μονού σταδίου, λόγω της αυξημένης ενεργειακής αποδοτικότητας και της μειωμένης κατανάλωσης νερού.

Το κόστος μιας μονάδας ανά kW της ψυκτικής ικανότητας εξαρτάται από το μέγεθός της, αλλά γίνεται σχεδόν σταθερό πάνω από 2.000kW (σχήμα 4.25). Ένας εμπειρικός κανόνας είναι ότι το σύστημα διπλού σταδίου είναι τουλάχιστον 20% ακριβότερο (μπορεί να φθάσει και στο 30-40% ανάλογα με τη χρήση του συστήματος) από το αντίστοιχο σύστημα μονού σταδίου με την ίδια ικανότητα. Ο λόγος για το υψηλότερο κόστος είναι η επιπλέον γεννήτρια και ο συμπυκνωτής κατά το σχεδιασμό. Δεύτερος εμπειρικός κανόνας είναι ότι μια μονάδα τροφοδοτούμενη με ζεστό νερό είναι περίπου 25% πιο ακριβή από ότι μία μονάδα ατμού με την ίδια ικανότητα. Η αιτία είναι ότι το μέγεθος των αγωγών, που απαιτούνται για μια δεδομένη παροχή θερμικής ενέργειας στο μηχανήμα απορρόφησης, είναι μεγαλύτερο με ζεστό νερό από ό,τι με ατμό.



Σχήμα 4.25: Κόστος συστημάτων απορρόφησης Li Br μονού σταδίου (τιμές 2008).

4.7.4. Ψύξη με απορρόφηση με συστήματα Αμμωνίας - Νερού (NH_3-H_2O)

Τα συστήματα αμμωνίας – νερού έχουν σχεδιαστεί κυρίως για βιομηχανικές εφαρμογές ψύξης, π.χ. ψύξη τροφίμων ή διαδικασία κατάψυξης, με θερμοκρασίες εξάτμισης περίπου στους $-60^{\circ}C$. Αυτό το είδος των μηχανών είναι προτιμότερο να χρησιμοποιείται σε θερμοκρασίες κοντά ή χαμηλότερες των $0^{\circ}C$, δεδομένου ότι οι μονάδες νερού – βρωμιούχου λιθίου δεν μπορούν να λειτουργήσουν σε αυτό το εύρος θερμοκρασίας. Η θερμοκρασία στην οποία ο ατμός πρέπει να παρέχεται για την τροφοδοσία της μονάδος εξαρτάται από τη διαθέσιμη θερμοκρασία του ψυκτικού μέσου και τη θερμοκρασία ψύξης, που πρέπει να επιτευχθεί. Τα συστήματα αυτά δεν ενδείκνυνται για εγκαταστάσεις σε κτήρια με μονάδες συμπαραγωγής.

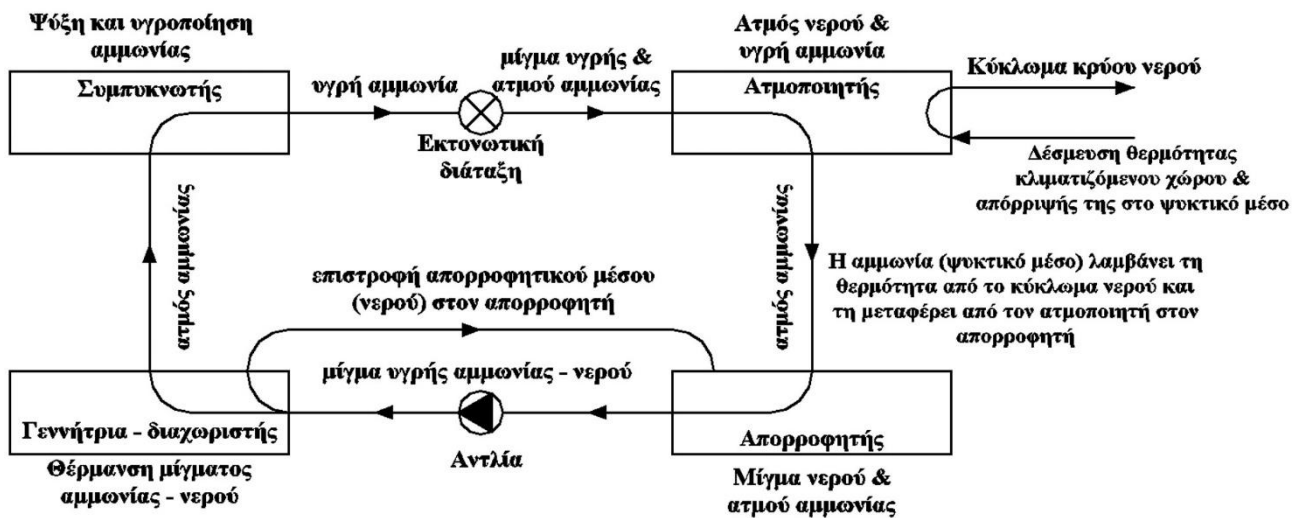
Σ' ένα απορροφητικό σύστημα αμμωνίας – νερού, το οποίο παρουσιάζεται στο σχήμα 4.26, το νερό είναι το απορροφητικό μέσο και η αμμωνία το ψυκτικό υγρό.

Καθώς η υγρή αμμωνία ρέει μέσα στις σωληνώσεις του εξατμιστή ψύξης νερού χαμηλής πίεσης, ένα μέρος της ατμοποιείται, απάγοντας θερμότητα από το νερό που διέρχεται από τον εξατμιστή. Το παραγόμενο ψυχρό νερό χρησιμοποιείται για την ψύξη του κλιματιζόμενου χώρου. Η μεταφορά της θερμότητας από το νερό θερμαίνει την υγρή αμμωνία με αποτέλεσμα να ατμοποιείται μεγαλύτερη ποσότητά της, και έτσι να προκαλείται περισσότερη ψύξη.

Η αμμωνία στον εξατμιστή, έχοντας παραλάβει θερμότητα από το νερό, μετατρέπεται σε ατμό. Ο ατμός της αμμωνίας έλκεται προς τον απορροφητήρα. Ο ατμός της αμμωνίας ενώνεται με το απορροφητικό νερό, για να παράγει ένα υγρό μίγμα. Αυτό το υγρό μίγμα αμμωνίας και νερού ρέει προς τη γεννήτρια – διαχωριστή.

Στη γεννήτρια το μίγμα θερμαίνεται, μέχρι να διαχωριστεί. Το ψυκτικό υγρό – αμμωνία θερμαινόμενο ατμοποιείται, και έτσι διαχωρίζεται από το απορροφητικό νερό. Η αμμωνία, δηλαδή, διαχωρίζεται από το νερό με τη θερμότητα, που προστίθεται στη γεννήτρια. Έτσι η αμμωνία είναι τώρα σε υψηλότερη πίεση απ' ό,τι ήταν, πριν θερμανθεί.

Το απορροφητικό νερό επιστρέφει στον απορροφητήρα. Ο αμμωνιακός ατμός, έχοντας υψηλή πίεση, ρέει προς το συμπυκνωτή. Στο συμπυκνωτή η θερμότητα μεταδίδεται από τον αμμωνιακό ατμό μέσω των τοιχωμάτων του στο ρεύμα αέρα που περνά από το στοιχείο του συμπυκνωτή. Έτσι ο αμμωνιακός ατμός ψύχεται, υγροποιείται και ρέει σε υγρή μορφή και με υψηλή πίεση προς τον εξατμιστή. Η υγρή αμμωνία, πριν εξατμιστεί, περνά από ένα εκτονωτικό ρυθμιστικό μηχανήμα, που ρυθμίζει την ποσότητα και την πίεσή της, και οδηγείται στον εξατμιστή ψύξης νερού χαμηλής πίεσης. Η αμμωνία ως ψυκτικό είναι πάλι ατμός, και έτσι ο κύκλος επαναλαμβάνεται.



Σχήμα 4.26: Κύκλος απορρόφησης με διάλυμα αμμωνίας - νερού.

4.7.5. Λοιπός εξοπλισμός συστημάτων ψύξης απορρόφησης

- Δεξαμενή αποθήκευσης

Η δεξαμενή αποθήκευσης, η οποία είναι ένα θερμομονωμένο δοχείο, αποτελεί βασικό στοιχείο μιας εγκατάστασης ψύξης με απορρόφηση, ειδικά όταν η παροχή θερμικής ισχύος δεν είναι σταθερή. Οι περιπτώσεις αυτές μπορεί να προκύψουν σε συστήματα ηλιακού κλιματισμού, όταν δηλαδή η παροχή θερμότητας βασίζεται σε πεδίο ηλιακών συλλεκτών, αλλά ακόμα και σε συστήματα συμπαράγωγής, όταν η διαθεσιμότητα ισχύος καθορίζεται πρώτιστα από τη ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος και όχι από τη ζήτηση θερμότητας. Η δεξαμενή αποθήκευσης εξομαλύνει τη ροή νερού σταθερής θερμοκρασίας μεταξύ της πηγής θερμότητας και του συστήματος ψύξης, αποθηκεύει θερμότητα από τη μονάδα παραγωγής, όταν αυτή υπερκαλύπτει τη ζήτηση θερμικής ισχύος από το σύστημα ψύξης, και τροφοδοτεί με θερμότητα τον ψύκτη, όταν η συλλεγόμενη ενέργεια δεν είναι αρκετή. Τέλος μειώνει τη ισχύ της εφεδρικής πηγής θερμότητας και ομαλοποιεί τη λειτουργία της.

- Εφεδρική πηγή θερμότητας

Η εφεδρική πηγή θερμότητας είναι ένας καυστήρας πετρελαίου ή αερίου ή ακόμα και βιομάζας, που χρησιμοποιείται, για να καλύψει την απαιτούμενη θερμότητα για κλιματισμό το καλοκαίρι, όταν η διαθέσιμη θερμότητα από το σύστημα συμπαράγωγής δεν είναι επαρκής. Η ίδια πηγή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επιπλέον θερμότητα που απαιτείται για θέρμανση κατά τη χειμερινή περίοδο.

- Πύργος ψύξεως

Ο πύργος ψύξεως είναι ένας ειδικού τύπου εναλλάκτης θερμότητας, στον οποίο το νερό έρχεται σε επαφή με το περιβάλλον, για να μεταφέρει σε αυτό την απορριπτόμενη θερμότητα. Ο πύργος ψύξεως χρησιμοποιείται, για να μεταφέρει την απορριπτόμενη θερμότητα από τον ψύκτη στο περιβάλλον.

- Συστήματα διαχείρισης και αυτοματισμού

Μια εγκατάσταση ψύξης με απορρόφηση, για να επιτυγχάνει τη μέγιστη δυνατή απόδοση με ασφάλεια, πρέπει να είναι εξοπλισμένη με ένα σύστημα αυτοματισμών, όπως αισθητήρες, ηλεκτροβάνες, μικροεπεξεργαστές και πίνακες ελέγχου. Ο σωστός προγραμματισμός του συστήματος αυτοματισμού αποτελεί ζωτικής σημασίας συστατικό για τη σωστή λειτουργία του συστήματος.

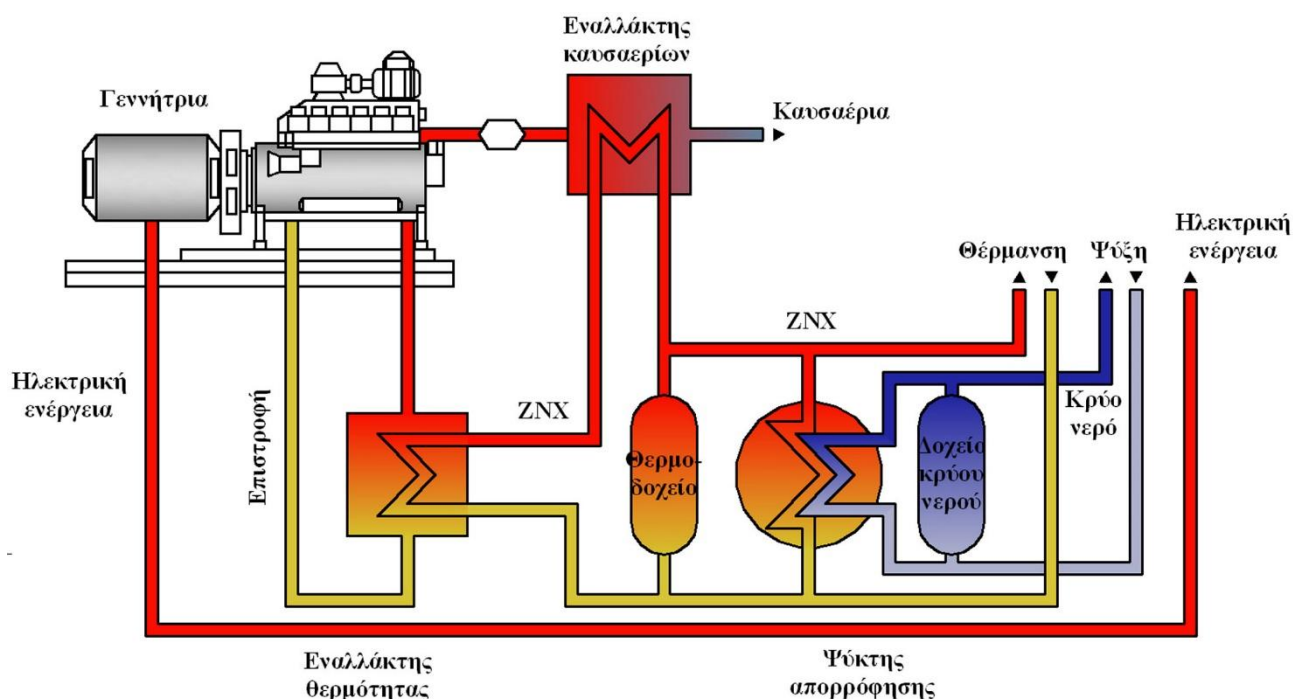
4.7.6. Σύνοψη τεχνολογιών ψύξης με απορρόφηση

Ο πίνακας 4.3 συνοψίζει το φάσμα των βασικών παραμέτρων που αφορούν ψύκτες απορρόφησης.

	Διάλυμα νερού – NH ₃		Διάλυμα νερού – LiBr	
	Μονό	Μονό	Μονό	Διπλό
Εφαρμογή – στάδιο	Μονό	Μονό	Μονό	Διπλό
Ψυκτική ικανότητα (kW)	20 – 2.500	300 – 5.000	300 – 5.000	300 – 5.000
Θεωρητικός συντελεστής συμπεριφοράς	0,6 – 0,7	0,5 – 0,6	0,9 – 1,1	0,9 – 1,1
Εύρος θερμοκρασίας προσδιδόμενης θερμότητας (°C)	120 – 132	120 – 132	150 – 170	150 – 170
Κόστος συστήματος (€/RT)	1.250 – 1.750	870 – 920	930 – 980	930 – 980

Υπάρχουν ψύκτες απορρόφησης που λειτουργούν με θερμό νερό (80–90°C), έστω και αν ο συντελεστής συμπεριφοράς είναι μικρότερος. Το κόστος συντήρησης των μηχανών απορρόφησης διαφοροποιείται σημαντικά, ανάλογα με το είδος της συμφωνίας του κατασκευαστή / εγκαταστάτη με το χρήστη του συστήματος τριπαράγωγής. Στις περισσότερες περιπτώσεις η συμφωνία περιλαμβάνει τη συντήρηση ολόκληρου του συστήματος θέρμανσης / ψύξης / κλιματισμού. Σε ορισμένες περιπτώσεις παρέχει και τη λειτουργία καθώς και συντήρηση όλου του συστήματος, στο πλαίσιο μιας ενιαίας σύμβασης παροχής ενεργειακών υπηρεσιών.

Στο σχήμα 4.27 παρουσιάζεται μια ενδεικτική διάταξη συστήματος συμπαράγωγής με ψύκτη απορρόφησης.



Σχήμα 4.27: Σύστημα συμπαράγωγής με ψύκτη απορρόφησης.

Αναφορές Κεφαλαίου

- [1] Συμπαραγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας. Χρίστος Φραγκόπουλος κα. ΕΛΚΕΠΑ, 1993.
- [2] Ευρωπαϊκός Σύνδεσμος Προώθησης ΣΗΘ – COGEN EUROPE:
www.cogeneurope.eu.
- [3] Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-5/2012: Συμπαραγωγή Ηλεκτρισμού, Θερμότητας & Ψύξης:Εγκαταστάσεις σε κτήρια. Αθήνα, Δεκέμβριος 2012.
- [4] SAVE Programme Action No 4.1031/Z/01-130/2001 “TriGeMed–Trigeneration in the Mediterranean Countries – Technologies and Prospects in the Tertiary Sector”.

Κεφάλαιο 5

Υβριδικοί σταθμοί παραγωγής θερμικής ισχύος

5.1. Εισαγωγή

Οι υβριδικοί σταθμοί παραγωγής θερμικής ισχύος, όπως γίνεται αντιληπτό, έχουν ως τελικό προϊόν την παραγωγή θερμικής ισχύος. Ονομάζονται υβριδικοί σταθμοί καθώς, κατ' αντιστοιχία με τους υβριδικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος, αποσκοπούν στην εγγυημένη παραγωγή του τελικού προϊόντος, η οποία καθορίζεται με στόχο την εξυπηρέτηση συγκεκριμένης διακύμανσης ζήτησης θερμικής ισχύος, και βασιζόμενοι σε μονάδες βάσης μη εγγυημένης παραγωγής.

Όπως και στην περίπτωση των υβριδικών σταθμών ηλεκτρικής ισχύος, ένας υβριδικός σταθμός θερμικής ισχύος αποτελείται από τις ακόλουθες διακριτές συνιστώσες:

- Μονάδες βάσης, μη εγγυημένης παραγωγής. Στην περίπτωση υβριδικών σταθμών θερμικής ισχύος, η πρωτογενής πηγή ενέργειας είναι η ηλιακή ακτινοβολία, η οποία είναι η μόνη μορφή Α.Π.Ε., μη εγγυημένης διαθεσιμότητας, που μπορεί να μετατραπεί απευθείας σε θερμότητα. Οι μονάδες βάσης σε ένα υβριδικό σταθμό θερμικής ισχύος είναι οι ηλιακοί συλλέκτες. Ας σημειωθεί εδώ ότι θερμότητα μπορεί, επίσης, να παραχθεί απευθείας από γεωθερμία και καύσιμα βιομάζας, πρωτογενείς μορφές ενέργειας που επίσης συγκαταλέγονται στις Α.Π.Ε. Ωστόσο, η διαθεσιμότητα των μορφών αυτών δεν μπορεί να θεωρηθεί μη εγγυημένη.
- Μονάδες αποθήκευσης. Για ενεργητικά θερμικά συστήματα, στα οποία σαφώς εντάσσονται και οι υβριδικοί σταθμοί θερμικής ισχύος, η αποθήκευση θερμότητας μπορεί να γίνεται μέσω της μεταφοράς θερμότητας από τη μονάδα μη εγγυημένης παραγωγής σε ένα μέσο με υψηλή θερμοχωρητικότητα. Το πλέον σύνηθες μέσο αποθήκευσης θερμότητας είναι το νερό και οι τεχνολογίες αποθήκευσης συνήθως αποτελούνται από δοχεία ή δεξαμενές αποθήκευσης ζεστού νερού, με πολύ καλή θερμομόνωση (θερμοδοχεία).
- Μονάδες εφεδρείας. Οι μονάδες εφεδρείας σε ένα υβριδικό σταθμό θερμικής ισχύος συνήθως είναι κοινοί καυστήρες κεντρικής θέρμανσης, ενώ σε εξειδικευμένες περιπτώσεις μπορεί να είναι και ατμολέβητες.

Μία σημαντική διαφορά σε σχέση με τους υβριδικούς σταθμούς ηλεκτρικής ισχύος είναι το ότι οι υβριδικοί σταθμοί θερμικής ισχύος αποδίδουν απευθείας τελικό προϊόν προς χρήση. Καθώς, μάλιστα, η θερμότητα αποτελεί μία από τις βασικές τελικές μορφές χρήσης ενέργειας, ίσως με την υψηλότερη κατανάλωση σε σχέση με τις λοιπές τελικές μορφές (μηχανική, φωτεινή, ηλεκτρομαγνητική), η σημασία των υβριδικών σταθμών θερμικής ισχύος είναι εύλογη. Από την άλλη μεριά, δεδομένου ότι το τελικό προϊόν των υβριδικών σταθμών θερμικής ισχύος είναι η τελική προς χρήση μορφή ενέργειας (δεν απαιτείται δηλαδή επιπλέον μετατροπή της έως την κατανάλωση), είναι σκόπιμο η παραγωγή θερμικής ισχύος να γίνεται σε γειτνιάζουσα θέση με το σημείο κατανάλωσής της. Η σκοπιμότητα αυτή επιτείνεται περισσότερο λόγω της δυσκολίας μεταφοράς θερμικής ισχύος και των συνεπαγόμενων απωλειών μεταφοράς. Συνεπώς η κατασκευή υβριδικών σταθμών θερμικής ισχύος είναι σκόπιμο να γίνεται πάντα κοντά στο σημείο που προβλέπεται να καταναλωθεί η παραγόμενη θερμική ισχύς. Το δεδομένο αυτό καθορίζει το μέγεθος και τον τύπο των υβριδικών σταθμών θερμικής ισχύος. Είναι προφανές, με βάση τα ανωτέρω, ότι οι θερμικοί σταθμοί θερμικής ισχύος είναι αποκεντρωμένης λειτουργίας. Ο κάθε υβριδικός σταθμός, δηλαδή, αποσκοπεί στην κάλυψη της ζήτησης θερμικής ισχύος από μία αυτόνομη κατανάλωση, ή στην πιο εξελιγμένη περίπτωση, μιας ομάδας

ομοειδών καταναλώσεων, συνήθως χαμηλής ζήτησης θερμικής ισχύος (π.χ. μονοκατοικίες). Λόγω της φύσης της θερμικής ισχύος, η ανάπτυξη υβριδικών σταθμών συγκεντρωμένης παραγωγής μεγάλου μεγέθους, αντίστοιχων με τους υβριδικούς σταθμούς ηλεκτρικής ισχύος, δεν είναι σκόπιμη. Καταληκτικά, στο παρόν Κεφάλαιο θα εξεταστούν υβριδικοί σταθμοί θερμικής ισχύος αποκεντρωμένης παραγωγής.

Η χρήση υβριδικών σταθμών θερμικής ισχύος επεκτείνεται σε όλες τις περιπτώσεις που απαιτείται η κατανάλωση θερμικής ισχύος. Συνεπώς υβριδικοί σταθμοί θερμικής ισχύος μπορούν να εισαχθούν για τη θέρμανση κτηρίων κατοικιών και επαγγελματικών χώρων, κολυμβητικών δεξαμενών, βιομηχανικών και βιοτεχνικών δραστηριοτήτων, στην ξήρανση αγροτικών προϊόντων κλπ. Λόγω του υψηλού κόστους εγκατάστασης ενός υβριδικού σταθμού θερμικής ισχύος, το οποίο διαμορφώνεται βασικά από το κόστος προμήθειας των μονάδων βάσης και αποθήκευσης, η εισαγωγή τους είναι σκόπιμη σε περιπτώσεις υψηλής κατανάλωσης θερμικής ισχύος (κολυμβητικές δεξαμενές, βιομηχανίες και βιοτεχνίες, αγροτικές διαδικασίες, συγκροτήματα κτηρίων). Στις περιπτώσεις αυτές, λόγω του υψηλού κόστους παραγωγής θερμικής ισχύος με συμβατικές μεθόδους (καυστήρες θέρμανσης με υγρά καύσιμα, αντλίες θερμότητας), η οικονομική σκοπιμότητα εισαγωγής υβριδικών σταθμών μεγιστοποιείται, με τις απαιτούμενες επενδύσεις να εμφανίζουν εξαιρετικούς οικονομικούς δείκτες (περίόδους αποπληρωμής συνολικής επένδυσης μικρότερες των πέντε ετών).

Τα θέματα που θα παρουσιαστούν στο Κεφάλαιο αυτό είναι:

- βασικές τεχνολογίες μονάδων βάσης υβριδικών σταθμών θερμικής ισχύος και ενεργειακή ανάλυση,
- βασικές τεχνολογίες μεταφοράς και αποθήκευσης ενέργειας σε μονάδες αποθήκευσης,
- προσομοίωση λειτουργίας και διαστασιολόγηση υβριδικών σταθμών θερμικής ισχύος,
- βασικές εφαρμογές υβριδικών σταθμών θερμικής ισχύος.

Το Κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την παρουσίαση ενός παραδείγματος διαστασιολόγησης και υπολογισμού ετήσιας λειτουργίας υβριδικού σταθμού παραγωγής θερμικής ισχύος για ένα σχολικό κτήριο στο Νομό Ηρακλείου.

5.2. Ηλιακοί συλλέκτες

Οι ηλιακοί συλλέκτες αποτελούν τη μονάδα μετατροπής της πρωτογενούς ηλιακής ακτινοβολίας σε θερμική ενέργεια, και έχουν το ρόλο της μονάδας βάσης σε ένα υβριδικό σταθμό θερμικής ισχύος. Διακρίνονται στις ακόλουθες τέσσερις βασικές κατηγορίες:

- ηλιακοί συλλέκτες χωρίς κάλυμμα (uncovered solar collectors),
- επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες απλοί, ημι-επιλεκτικοί και επιλεκτικοί (flat-plate solar collectors black painted, semi selective, selective coating collectors),
- συγκεντρωτικοί ή παραβολικοί ηλιακοί συλλέκτες (concentrative solar collectors),
- σωλήνες κενού (vacuum tube solar collectors).

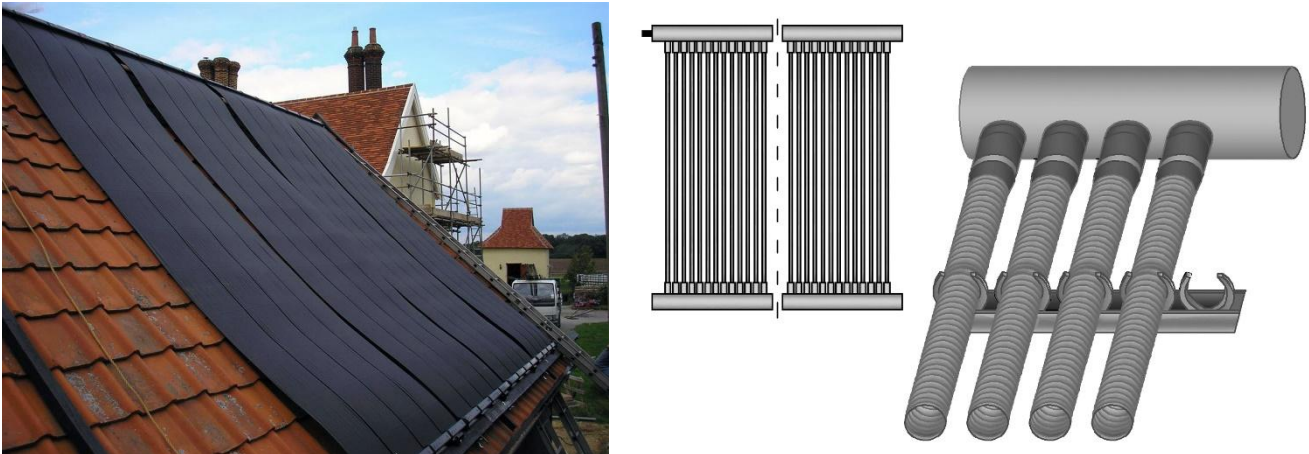
Στις ακόλουθες ενότητες παρουσιάζονται οι διαθέσιμες τεχνολογίες ηλιακών συλλεκτών.

5.2.1. Ηλιακοί συλλέκτες χωρίς κάλυμμα

Στα σχήματα 5.1 παρουσιάζεται ηλιακός συλλέκτης χωρίς κάλυμμα. Η φιλοσοφία κατασκευής και λειτουργίας του είναι απλή. Αποτελείται από ένα σύνολο σωληνώσεων σκούρου χρώματος (συνήθως μαύρου), για μεγιστοποίηση του συντελεστή απορροφητικότητας της ηλιακής ακτινοβολίας, και πλαστικού υλικού, για ελαχιστοποίηση των απωλειών θερμότητας από το θερμαινόμενο μέσο του συλλέκτη προς το περιβάλλον. Το υλικό που χρησιμοποιείται για την κατασκευή των ηλιακών συλλεκτών χωρίς κάλυμμα είναι κάποιο οργανικό πολυμερές (π.χ. Ethylene-Propylene-Diene-M class – EPDM [2]). Η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στον ηλιακό συλλέκτη απορροφάται με τη μορφή θερμότητας από το ρέον μέσο εντός του συλλέκτη. Η δεσμευόμενη θερμότητα αξιοποιείται στη συνέχεια, κατά βούληση.

Με βάση την ανωτέρω περιγραφή και τα σχήματα 5.1, γίνεται αντιληπτό ότι οι ηλιακοί συλλέκτες χωρίς κάλυμμα είναι απλές και οικονομικές κατασκευές, ιδανικές για την περίπτωση που επιδιώκεται η παραγωγή θερμότητας χαμηλών θερμοκρασιών, χωρίς να είναι κρίσιμη η διατήρηση υψηλού βαθμού απόδοσης του συλλέκτη. Για αυτές τις περιπτώσεις, δεδομένου του χαμηλού κόστους προμήθειας των

συλλεκτών και της απλής απαιτούμενης υδραυλικής εγκατάστασης, η συγκεκριμένη επιλογή αποτελεί τη βέλτιστη.



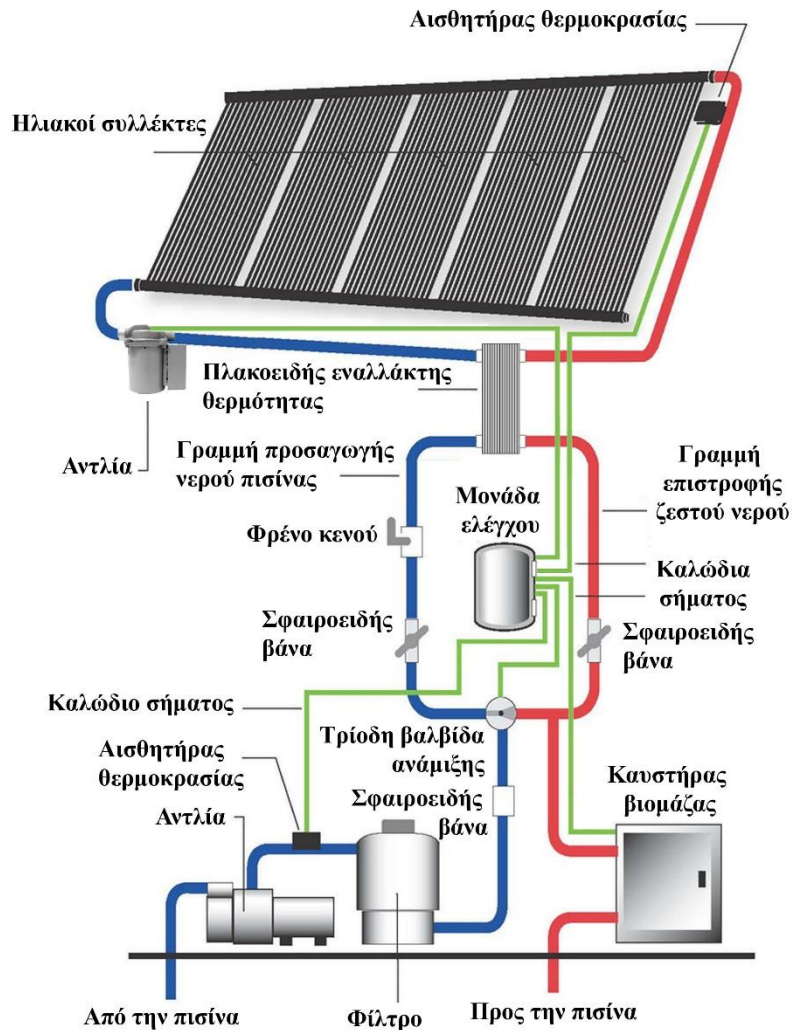
Σχήμα 5.1: Ηλιακοί συλλέκτες χωρίς κάλυμμα.

Η πλέον χαρακτηριστική εφαρμογή ηλιακών συλλεκτών χωρίς κάλυμμα είναι η θέρμανση κολυμβητικών δεξαμενών, κυρίως κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, όταν η διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία μεγιστοποιείται. Στο σχήμα 5.2 παρουσιάζεται διάγραμμα εγκατάστασης ηλιακών συλλεκτών χωρίς κάλυμμα για θέρμανση κολυμβητικής δεξαμενής.

Όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 5.2, το ίδιο το νερό της πισίνας κυκλοφορεί μέσα στον ηλιακό συλλέκτη, θερμαίνεται από τον ήλιο και διοχετεύεται απευθείας στην πισίνα. Συνεπώς αποφεύγεται η εγκατάσταση εναλλάκτη θερμότητας για τη μεταφορά της δεσμευόμενης θερμικής ισχύος από το συλλέκτη προς την τελική χρήση, γεγονός που συμβάλει τόσο στη μείωση του κόστους εγκατάστασης, όσο και στην αύξηση της συνολικής απόδοσης του συστήματος θέρμανσης. Η λειτουργία του συστήματος καθορίζεται από μία μονάδα ελέγχου, η οποία, λαμβάνοντας σήματα θερμοκρασίας από το νερό στους ηλιακούς συλλέκτες και στην κολυμβητική δεξαμενή, αποφασίζει για την έναρξη της ροής του νερού από τους συλλέκτες προς τη δεξαμενή.

Με ηλιακούς συλλέκτες χωρίς κάλυμμα και επιθυμητή θερμοκρασία νερού στην κολυμβητική δεξαμενή περίπου στους 25°C, στα θερμά κλίματα η κολυμβητική περίοδος επεκτείνεται από τον Απρίλιο μέχρι και τον Οκτώβριο. Η αριθμητική διαστασιολόγηση των συστημάτων αυτών, η οποία θα παρουσιαστεί σε επόμενη ενότητα, οδηγεί σε απαιτούμενη επιφάνεια ηλιακών συλλεκτών χωρίς κάλυμμα περίπου ίση με το 80% της ελεύθερης επιφάνειας της κολυμβητικής δεξαμενής, για συνθήκες ετήσιας προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο περί τις 1.600kWh/m² (συνθήκες κεντρικής Ελλάδας).

Η μη ύπαρξη εναλλάκτη θερμότητας και η ροή του νερού της κολυμβητικής δεξαμενής απευθείας μέσα στον ηλιακό συλλέκτη, χαρακτηριστικό που αναφέρθηκε ανωτέρω ως πλεονέκτημα λόγω απλοποίησης της απαιτούμενης εγκατάστασης και μείωσης του συνεπαγόμενου κόστους, αποτελεί, επίσης, εν δυνάμει μειονέκτημα για τον ηλιακό συλλέκτη, λόγω της επίδρασης του χλωρίου των κολυμβητικών δεξαμενών στα τεχνικά και θερμικά χαρακτηριστικά του ηλιακού συλλέκτη. Η σταδιακή κάλυψη της εσωτερικής επιφάνειας του ηλιακού συλλέκτη με στερεές επικαθίσεις από το νερό της δεξαμενής οδηγεί σε αύξηση της τραχύτητας των αγωγών του συλλέκτη, συνεπώς, και των απωλειών ροής λόγω συνεκτικότητας, ενώ ταυτόχρονα μειώνει το συντελεστή θερμικής διαπερατότητας από το πλαστικό υλικό κατασκευής του συλλέκτη προς το νερό. Τα ανωτέρω οδηγούν με την πάροδο του χρόνου σε μείωση της θερμικής απόδοσης του συλλέκτη και σε αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας στην αντλία εξασφάλισης ροής του νερού εντός του υδραυλικού δικτύου. Για να αποφευχθούν οι ανωτέρω αρνητικές συνέπειες, ο ηλιακός συλλέκτης θα πρέπει να καθαρίζεται συχνά (ιδανικά μία φορά πριν την έναρξη και μετά το πέρας χρήσης της δεξαμενής ανά έτος) με την παροχή ροής υψηλής πίεσης διαλύματος διάλυσης στερεών επικαθίσεων.

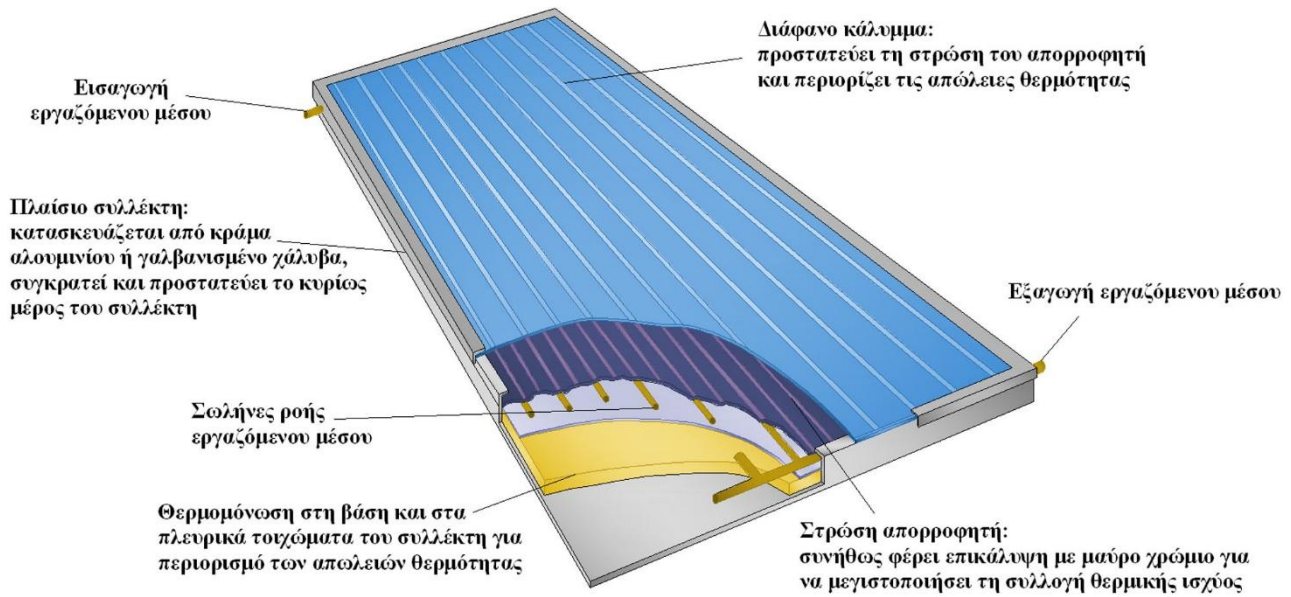


Σχήμα 5.2: Διάγραμμα συστήματος θέρμανσης κολυμβητικής δεξαμενής με ηλιακούς συλλέκτες χωρίς κάλυμμα.

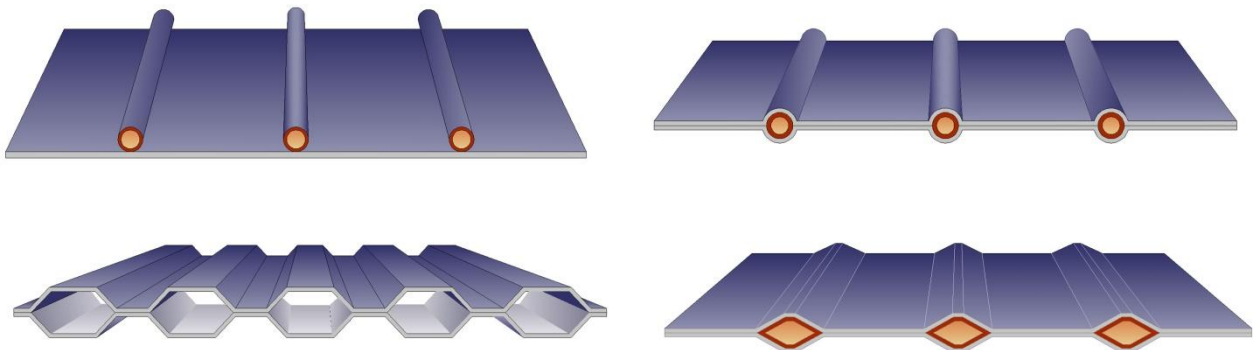
5.2.2. Επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες

Οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες είναι η πλέον διαδεδομένη μορφή αξιοποίησης της ηλιακής ακτινοβολίας προς παραγωγή θερμότητας. Μία γραφική απεικόνιση επίπεδου ηλιακού συλλέκτη παρουσιάζεται στο σχήμα 5.3. Ο συλλέκτης αποτελείται από μία απορροφητική πλάκα, η οποία έχει προσαρμοστεί σε ένα θερμομονωμένο πλαίσιο στη βάση και στις πλευρικές επιφάνειές του. Η κατασκευή κλείνει με την τοποθέτηση ενός ή περισσότερων διαφανών καλυμμάτων, τα οποία τοποθετούνται άνωθεν της απορροφητικής πλάκας.

Η απορροφητική πλάκα μπορεί να είναι επίπεδη, αυλακωμένη ή πρεσσαριστή με τους σωλήνες του εργαζόμενου μέσου προσαρμοσμένους στην επιφάνειά της (σχήμα 5.4). Όταν η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει πάνω στον ηλιακό συλλέκτη, αφού διέλθει μέσα από το απορροφητικό κάλυμμα, απορροφάται από την απορροφητική πλάκα, η οποία χαρακτηρίζεται από υψηλό συντελεστή απορροφητικότητας. Το μεγαλύτερο μέρος από τη θερμότητα που απορροφάται στην απορροφητική πλάκα μεταφέρεται μέσω αγωγής στο εργαζόμενο μέσο που διέρχεται μέσω των προσαρτημένων στην απορροφητική πλάκα σωλήνων. Η απαγόμενη θερμότητα από το εργαζόμενο μέσο στους σωλήνες του ηλιακού συλλέκτη οδηγείται τελικά προς χρήση ή αποθήκευση.



Σχήμα 5.3: Σκαρίφημα επίπεδου ηλιακού συλλέκτη.



Σχήμα 5.4: Τρόποι ενσωμάτωσης σωληνώσεων εργαζόμενου μέσου σε ηλιακό συλλέκτη στην απορροφητική πλάκα.

Ο συντελεστής απορροφητικότητας της απορροφητικής πλάκας καθορίζει και τον τύπο του συλλέκτη. Γενικά οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες διακρίνονται σε δύο τύπους, ανάλογα με το συντελεστή απορροφητικότητας:

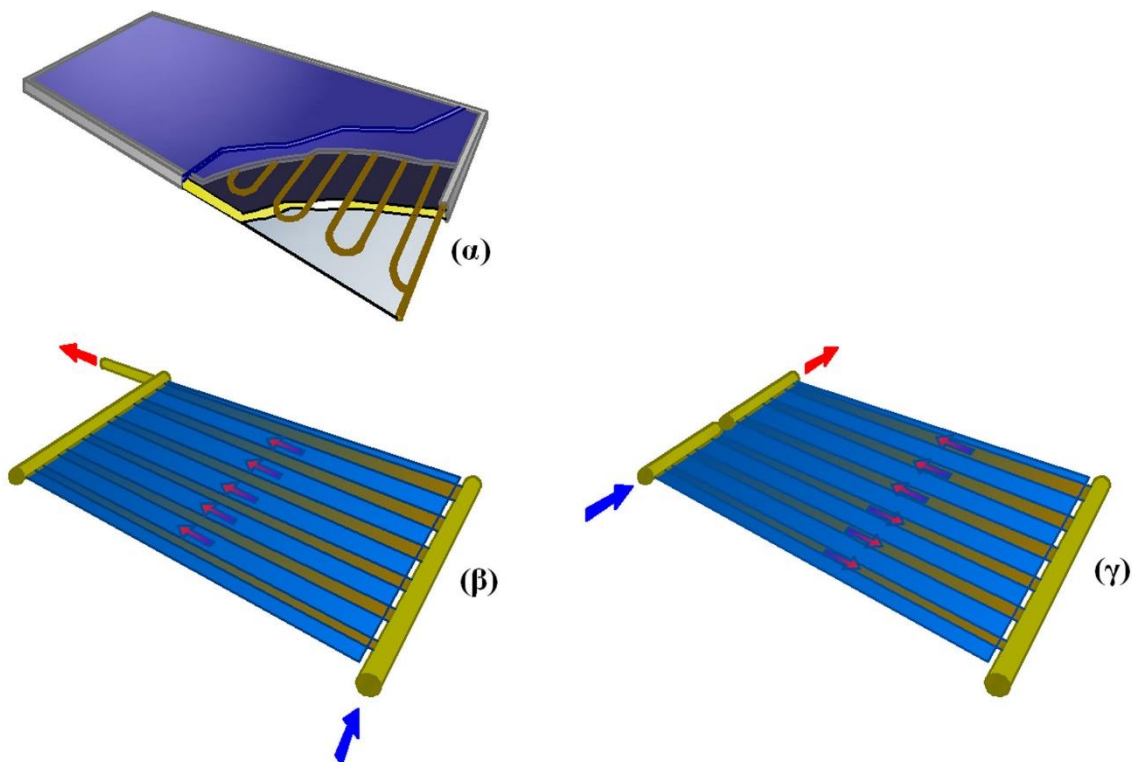
- Απλοί ή ημιεπιλεκτικοί ηλιακοί συλλέκτες, στους οποίους η απορροφητική πλάκα έχει μαύρη ημιεπιλεκτική βαφή και παρουσιάζει συντελεστές απορρόφησης της τάξης του 80%. Οι επίπεδοι συλλέκτες χρησιμοποιούνται για τη θέρμανση νερού χρήσης καθώς και τη θέρμανση χώρου.
- Επιλεκτικοί ηλιακοί συλλέκτες, στους οποίους η απορροφητική πλάκα είναι βαμμένη με επιλεκτική βαφή, η οποία προσδίδει υψηλή απορροφητικότητα (90-95%) και ελάχιστη ανάκλαση (5-15%) στα μικρά μήκη κύματος της ηλιακής ακτινοβολίας. Με τη χρήση επιλεκτικού απορροφητή, επιτυγχάνονται μεγαλύτεροι βαθμοί απόδοσης και υψηλότερες θερμοκρασίες νερού. Οι επίπεδοι επιλεκτικοί συλλέκτες χρησιμοποιούνται για τη θέρμανση νερού χρήσης καθώς και για τη θέρμανση και τον κλιματισμό χώρου.

Το διαφανές κάλυμμα του ηλιακού συλλέκτη θα πρέπει να χαρακτηρίζεται από υψηλό συντελεστή διαπερατότητας στην ηλιακή ακτινοβολία και χαμηλή διαπερατότητα στη θερμική ακτινοβολία. Θα πρέπει, ταυτόχρονα, να διαθέτει αντοχή στις καιρικές συνθήκες (π.χ. χαλάζι) και να έχει χαμηλό κόστος. Συνήθως χρησιμοποιείται επισκληρυμένο γυαλί με χαμηλή περιεκτικότητα σε σίδηρο, με συντελεστή διαπερατότητας χαμηλού μήκους κύματος ηλιακής ακτινοβολίας της τάξης του 0,9, ενώ για την υψηλή μήκους κύματος θερμική ακτινοβολία ο συντελεστής διαπερατότητας είναι σχεδόν μηδέν. Αντι-ανακλαστικές επιστρώσεις επί της επιφάνειας του καλύμματος μπορούν, επίσης, να συμβάλουν στη μεγιστοποίηση του συντελεστή

διαπερατότητας. Επιπλέον το διαφανές κάλυμμα θα πρέπει να διαθέτει χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, για την ελαχιστοποίηση των θερμικών απωλειών λόγω αγωγής – συναγωγής από το εσωτερικό του ηλιακού συλλέκτη προς το περιβάλλον, που προκύπτουν λόγω υπερθέρμανσης της απορροφητικής πλάκας.

Εκτός γυαλιού είναι δυνατή και η χρήση ενός περιορισμένου συνόλου από πλαστικά υλικά για την κατασκευή του διαφανούς κελύφους. Γενικά λίγα πλαστικά υλικά αντέχουν στις μεγάλες διακυμάνσεις της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τις διαφορετικές εποχές του έτους, στις διαστολές – συστολές που αυτές συνεπάγονται και στις φθορές, λόγω της διεξόδου της ηλιακής ακτινοβολίας μέσω της μάζας τους. Τα πλαστικά υλικά, συνήθως, παρουσιάζουν υψηλότερο συντελεστή διαπερατότητας στη θερμική ακτινοβολία, που μπορεί να φτάσει έως 0,40. Από την άλλη μεριά, τα πλαστικά υλικά είναι πολύ ελαφρύτερα, είναι λιγότερο εύθραυστα και περισσότερο ευέλικτα στην τοποθέτηση, ειδικά αν πρόκειται για λεπτές επιφάνειες καλυμμάτων (thin films).

Μία ακόμα σημαντική κατασκευαστική παράμετρος για τους επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες είναι η διαδρομή που ακολουθείται από τις σωληνώσεις εντός του συλλέκτη. Στο σχήμα 5.5 παρουσιάζονται ενδεικτικές διαδρομές του εργαζόμενου μέσου εντός του συλλέκτη.



Σχήμα 5.5: Οδευσεις σωληνώσεων εντός επίπεδου ηλιακού συλλέκτη.

Στο σχήμα 5.5α η απλή διαδρομή συνεπάγεται μεγιστοποίηση της θερμοκρασίας του εργαζόμενου μέσου στην έξοδο από το συλλέκτη. Η υλοποίηση αυτή μεγιστοποιεί την απόδοσή της για υψηλή ηλιακή ακτινοβολία και χρησιμοποιείται, όταν είναι επιθυμητή η επίτευξη υψηλών θερμοκρασιών στο μέσο αξιοποίησης ή αποθήκευσης της παραγόμενης θερμικής ισχύος από τον ηλιακό συλλέκτη. Στο σχήμα 5.5β οι παράλληλες σωληνώσεις συνεπάγονται μεγιστοποίηση της διερχόμενης παροχής μέσω του συλλέκτη, ενώ η τελική θερμοκρασία εξόδου του εργαζόμενου μέσου παραμένει σε χαμηλότερα επίπεδα. Η υλοποίηση αυτή είναι ιδανική για συνθήκες χαμηλότερης θερμοκρασίας, για τις οποίες δύναται να διατηρήσει σε υψηλές τιμές την ολική απόδοση του συλλέκτη. Προφανώς εφαρμόζεται σε περιπτώσεις όπου δεν είναι σημαντική η υψηλή αύξηση της θερμοκρασίας στο μέσο μεταφοράς θερμότητας από τον ηλιακό συλλέκτη (π.χ. παραγωγή ζεστού νερού για οικιακή χρήση). Τέλος η υλοποίηση του σχήματος 5.5γ αποτελεί ενδιάμεση περίπτωση των δύο προηγούμενων. Από τα ανωτέρω συνάγεται το ότι η κατάλληλη επιλογή της οδευσης σωληνώσεων εντός του ηλιακού συλλέκτη αποτελεί συνιστώσα των διαθέσιμων περιβαλλοντικών συνθηκών στη θέση εγκατάστασης και της τελικής χρήσης της παραγόμενης θερμικής ισχύος.

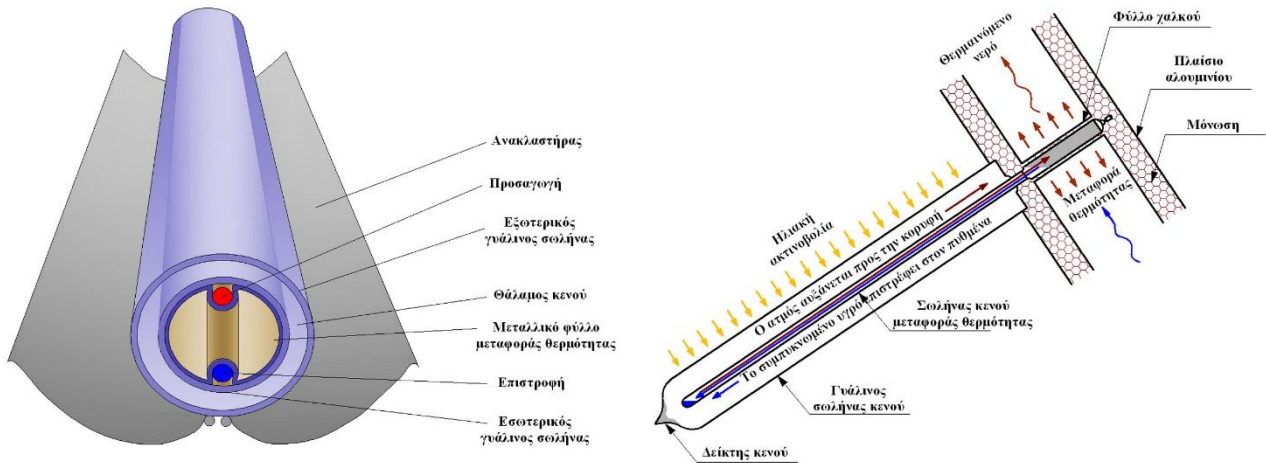
5.2.3. Συλλέκτες κενού

Οι συλλέκτες κενού αποτελούνται από μία απορροφητική επιφάνεια, η οποία έχει εισαχθεί εντός περιβάλλοντος κενού, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες θερμότητας λόγω συναγωγής. Τα πλεονεκτήματα των σωλήνων κενού αναδεικνύονται κυρίως σε μη ευνοϊκά καιρικά φαινόμενα (νεφώσεις, χαμηλή ηλιακή ακτινοβολία, χαμηλή θερμοκρασία περιβάλλοντος, υψηλές ταχύτητες ανέμου) κατά τα οποία, όπως θα αναφερθεί σε επόμενη ενότητα, η απόδοση των επίπεδων ηλιακών συλλεκτών μειώνεται σημαντικά. Σε τέτοιες περιπτώσεις, οι ηλιακοί συλλέκτες κενού έχουν τη δυνατότητα να διατηρούν υψηλή απόδοση. Συνεπώς εμφανίζονται ιδανικοί σε κρύα κλίματα και σε περιοχές με χαμηλή διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία για συνήθεις εφαρμογές θέρμανσης χώρων και παραγωγής ζεστού νερού.

Επιπλέον οι συλλέκτες κενού έχουν τη δυνατότητα να αυξάνουν σημαντικά τη θερμοκρασία του εργαζόμενου μέσου (έως και 300°C). Συνεπώς χρησιμοποιούνται σε εξειδικευμένες χρήσεις στη βιομηχανία, σε βιοτεχνίες κλπ, όπου απαιτούνται ιδιαίτερα υψηλές θερμοκρασίες.

Ο τρόπος λειτουργίας των ηλιακών συλλεκτών κενού διαφέρει σε σχέση με τους επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες (σχήμα 5.6). Αποτελούνται από σειρές παράλληλων ζεύγος γυάλινων σωλήνων. Κάθε ζεύγος σωλήνων αποτελείται από δύο σωλήνες, ο ένας τοποθετημένος μέσα στον άλλο, μεταξύ των οποίων υπάρχει κενό αέρος. Η εξωτερική σωλήνα είναι φτιαγμένη από βιοπυριτικό γυαλί μεγάλης σκληρότητας και αντοχής (αντέχει κρούση από χαλάζι διαμέτρου 25mm που κινείται με ταχύτητα 100km/h). Στο εσωτερικό κάθε σωλήνα υπάρχει επίπεδη ή καμπύλη πλάκα αλουμινίου που συνδέεται με ένα μεταλλικό (συνήθως χάλκινο) σωλήνα. Η πλάκα αυτή είναι βαμμένη με θερμοαπορροφητικό υλικό, χαμηλής αντανάκλασης, με αποτέλεσμα να μετατρέπει πάνω από 92% της ηλιακής ακτινοβολίας σε θερμική ισχύ. Το εργαζόμενο μέσο εντός του χάλκινου σωλήνα μπορεί να είναι ανόργανο μη τοξικό πτητικό ρευστό (σημείο ζέσεως στους 25°C) ή νερό. Το εργαζόμενο μέσο μετατρέπεται σε υπέρθερμο ατμό, ανεβαίνει στην πάνω πλευρά του σωλήνα, που είναι τοποθετημένος μέσα στον εναλλάκτη θερμότητας, και ζεσταίνει το νερό χρήσης. Το ρευστό, μεταφέροντας τη θερμότητα στο νερό, συμπυκνώνεται και κατεβαίνει στην κάτω πλευρά του αυλού, όπου επαναλαμβάνεται η διαδικασία.. Κάποιοι συλλέκτες σωλήνων κενού έχουν εξωτερικά κάτοπτρα πίσω από τους σωλήνες κενού ή μέσα στις γυάλινες σωληνώσεις. Τα εξωτερικά κάτοπτρα αυξάνουν την ακτινοβολία, που συλλέγεται από το συλλέκτη, αφού, συνήθως, η ακτινοβολία, που περνάει μέσα από τον κενό χώρο ανάμεσα στους σωλήνες, οδηγείται πίσω στον απορροφητή.





Σχήμα 5.6: Κατασκευαστική δομή συλλεκτών κενού.

Η υψηλή απόδοση των σωλήνων κενού επιτυγχάνεται από το συνδυασμό της χρήσης των ανακλαστικών φύλων αλουμινίου, του μη αγώγιμου περιβάλλοντος κενού, το οποίο ελαχιστοποιεί τις απώλειες θερμότητας λόγω αγωγής και συναγωγής και της απορροφητικής στρώσης της πλάκας αλουμινίου. Η χρήση του κενού μειώνει τις θερμικές απώλειες των συλλεκτών και αποσκοπεί στην περαιτέρω αύξηση του βαθμού απόδοσης και της θερμοκρασίας νερού. Η σωληνοειδής κατασκευή των συλλεκτών κενού επιτρέπει την αύξηση της παραγόμενης θερμικής ισχύος ακόμα και για χαμηλές γωνίες πρόσπτωσης και χαμηλή ηλιακή ακτινοβολία, επεκτείνοντας την αποδοτική λειτουργία των συλλεκτών καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρα.

5.2.4. Συγκεντρωτικοί συλλέκτες

Οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο εργαζόμενο μέσο σε ένα ηλιακό συλλέκτη μπορούν να αυξηθούν σημαντικά με τους εξής δύο τρόπους:

- Μειώνοντας την επιφάνεια των θερμικών απωλειών από το συλλέκτη προς το περιβάλλον.
- Συγκεντρώνοντας την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε μία μικρή επιφάνεια συλλογής στο συλλέκτη. Τούτο επιτυγχάνεται παρεμβάλλοντας μία οπτική συσκευή ανάμεσα στην πηγή της ακτινοβολίας, δηλαδή τον ήλιο, και στην απορροφητική επιφάνεια του συλλέκτη.

Οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες παρουσιάζουν τα ακόλουθα πλεονεκτήματα σε σχέση με τους συμβατικούς επίπεδους συλλέκτες:

- Οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες μπορούν να δώσουν εργαζόμενο μέσο υψηλότερων θερμοκρασιών σε σχέση με τους επίπεδους συλλέκτες της ίδιας απορροφητικής επιφάνειας.
- Η απόδοση των συγκεντρωτικών συλλεκτών είναι μεγαλύτερη από αυτή των επίπεδων συλλεκτών, εξαιτίας της μικρότερης επιφάνειας απωλειών θερμικής ισχύος από το συλλέκτη προς το περιβάλλον.
- Οι ανακλαστικές επιφάνειες στους συγκεντρωτικούς συλλέκτες απαιτούν μικρότερες ποσότητες υλικών και είναι κατασκευαστικά απλούστερες, από ότι οι επίπεδοι συλλέκτες. Συνεπώς το κόστος ανά μονάδα επιφάνειας ηλιακού συλλέκτη είναι χαμηλότερη στους συγκεντρωτικούς συλλέκτες.
- Εξαιτίας της σχετικά μικρής επιφάνειας του δέκτη ηλιακής ενέργειας ανά μονάδα προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στους συγκεντρωτικούς συλλέκτες, η εφαρμογή τεχνικών περιορισμού των απωλειών θερμικής ισχύος με σκοπό την αύξηση του βαθμού απόδοσης του συλλέκτη είναι οικονομικά σκόπιμη.

Από την άλλη μεριά, οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες παρουσιάζουν τα ακόλουθα μειονεκτήματα σε σχέση με τους συμβατικούς επίπεδους συλλέκτες:

- Η απορρόφηση διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας από τους συγκεντρωτικούς συλλέκτες είναι χαμηλότερη.
- Απαιτείται η εγκατάσταση βάσης προσανατολισμού του συγκεντρωτικού συλλέκτη, ώστε να ανιχνεύει την τροχιά του ήλιου στον ορίζοντα.

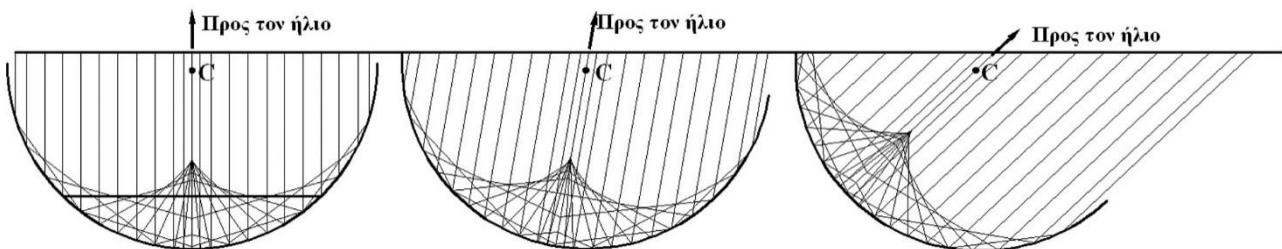
- Η ανακλαστικότητα των ανακλαστικών επιφανειών στους συγκεντρωτικούς συλλέκτες πιθανώς να μειώνεται με το χρόνο. Για το λόγο αυτό, απαιτείται περιοδικός καθαρισμός των επιφανειών ή και αντικατάσταση.

Οι συγκεντρωτικοί μπορεί να είναι δύο τύπων:

- ηλιακοί συλλέκτες εστιακής γραμμής (line focusing collectors),
- δίσκοι εστιακού σημείου (point focusing collectors).

Η λειτουργία των συλλεκτών εστιακής γραμμής και εστιακού σημείου βασίζεται στην αντανάκλαση παράλληλων ακτίνων ηλιακού φωτός από διδιάστατα κυκλικά και παραβολικά κάτοπτρα, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 5.7. Τα χαρακτηριστικά των δύο αυτών κατόπτρων στη συγκέντρωση των παράλληλων ακτίνων της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, οι οποίες είναι κάθετες στην επιφάνεια του ανακλαστήρα, είναι:

- Όλες οι παράλληλες ακτίνες που αντανακλώνται από ένα σφαιρικό κάτοπτρο περνάνε από μια γραμμή που διέρχεται μέσα από το κέντρο του κύκλου και παράλληλα στις προσπίπτουσες ακτίνες
- Όλες οι παράλληλες ακτίνες που αντανακλώνται από ένα παραβολικό κάτοπτρο, όταν είναι παράλληλες στον άξονα συμμετρίας, διασταυρώνονται σε ένα σημείο.



Σχήμα 5.7: Αντανάκλαση και συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας σε σφαιρικά και παραβολικά κάτοπτρα.

Επιπλέον ένα κυκλικό κάτοπτρο είναι συμμετρικό όσο αφορά σε περιστροφές από το κέντρο του. Αυτό σημαίνει ότι, αν οι ηλιακές ακτίνες δεν είναι κάθετες στο άνοιγμα του κατόπτρου, το σχέδιο των ανακλώμενων ακτίνων δείχνει ότι είναι το ίδιο, αλλά είναι περιστραμμένο. Ένα παραβολικό κάτοπτρο από την άλλη, δεν είναι συμμετρικό όσο αφορά σε περιστροφές από το εστιακό σημείο του. Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.8, στην περίπτωση που η προσπίπτουσα δέσμη παράλληλων ακτίνων δεν είναι κάθετη στο άνοιγμα του κατόπτρου, έχουμε ως αποτέλεσμα τη διασπορά της και την εξάπλωση του ειδώλου στο εστιακό σημείο. Για να είναι ακριβής η επικέντρωση σε ένα παραβολικό κάτοπτρο, πρέπει να παρακολουθείται με ακρίβεια η κίνηση του ήλιου, για να κρατά τον άξονα (ή το επίπεδο) της συμμετρίας παράλληλο με τις προσπίπτουσες ηλιακές ακτίνες.

Στους συγκεντρωτικούς ηλιακούς συλλέκτες εισάγεται η έννοια του «λόγου συγκέντρωσης». Ο όρος «λόγος συγκέντρωσης» χρησιμοποιείται, για να περιγράψει το ποσό της συγκεντρωμένης ενέργειας φωτός που επιτυγχάνεται από ένα δεδομένο συλλέκτη. Δύο διαφορετικοί ορισμοί του λόγου συγκέντρωσης είναι γενικά σε χρήση.

- οπτικός λόγος συγκέντρωσης

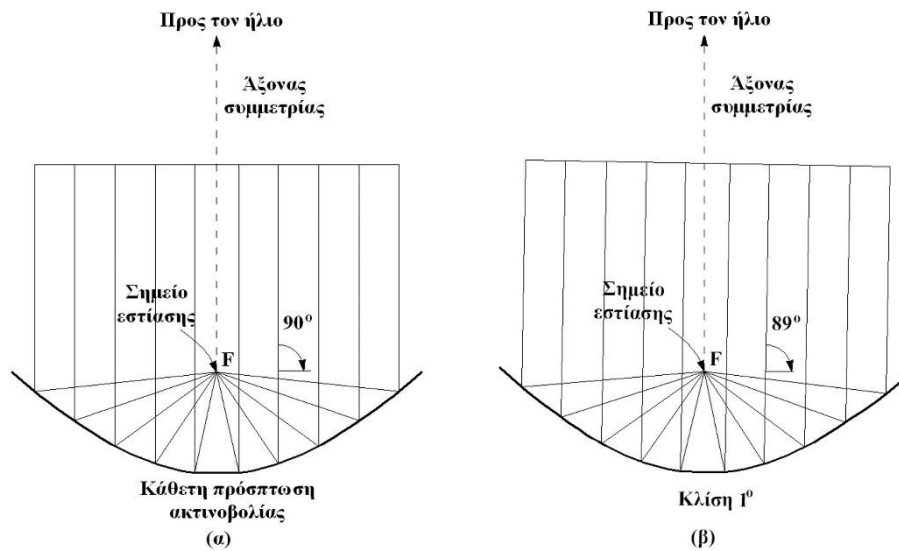
Ορίζεται ως ο λόγος της μέσης ακτινοβολίας (ροή ακτινοβολίας) I_r ολοκληρωμένη στην επιφάνεια του δέκτη A_r , προς την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στο άνοιγμα του ανακλαστικού κατόπτρου I_a :

$$CR_o = \frac{1}{A_r} \cdot \int I_r \cdot dA_r$$

- γεωμετρικός λόγος συγκέντρωσης

Ορίζεται ως ο λόγος της επιφάνειας του ανοίγματος του συλλέκτη A_a προς την επιφάνεια του δέκτη A_r :

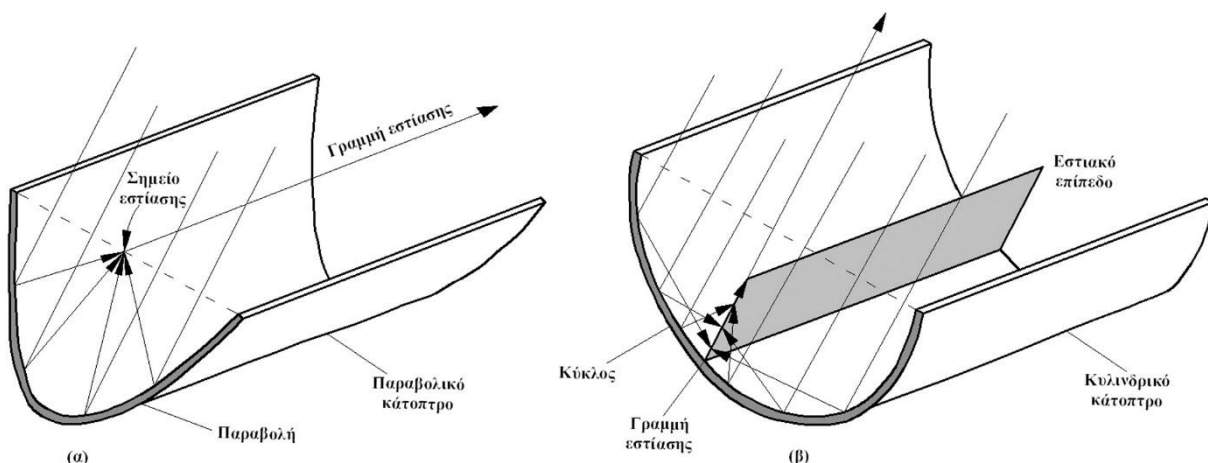
$$CR_g = \frac{A_a}{A_r}$$



Σχήμα 5.8: Χαρακτηριστικά της παραβολικής οπτικής για (α) ακτίνες παράλληλες στον άξονα της συμμετρίας και (β) για ακτίνες με κλίση 1° ως προς τον άξονα συμμετρίας.

5.2.4.α. Συγκεντρωτικοί συλλέκτες εστιακής γραμμής

Οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες εστιακής γραμμής παράγουν υψηλή πυκνότητα ακτινοβολίας σε μία γραμμή εστίασης. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι παραβολικοί κυλινδρικοί συγκεντρωτικοί συλλέκτες. Για να δημιουργηθεί ένα κυλινδρικό ή παραβολικό κοίλο, πρέπει τα διδιάστατα κάτοπτρα του σχήματος 5.7 να επεκταθούν κάθετα στο επίπεδο της καμπυλότητας, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.9. Οι ανάγκες για μηχανισμούς παρακολούθησης είναι οι ίδιες με αυτές των διδιάστατων κατόπτρων, που συζητήθηκαν παραπάνω.



Σχήμα 5.9: Δημιουργία των γραμμικών κοίλων για (α) παραβολικά κοίλα και για (β) κυλινδρικά κοίλα.

Ένα παραβολικό κοίλο έχει γραμμική εστίαση, και πρέπει να έχει μηχανισμό παρακολούθησης κατά το γραμμικό άξονά του, για να μπορεί να διατηρεί την εστίαση. Η κατάλληλη γωνία παρακολούθησης καθορίζεται από τον προσανατολισμό του κοίλου σε σχέση με τη θέση του ήλιου. Το παραβολικό κοίλο

πρέπει να παρακολουθεί κατά το γραμμικό του άξονα, έτσι ώστε οι ηλιακές ακτίνες να είναι κάθετες στο άνοιγμά του.

5.2.4.β. Συγκεντρωτικοί συλλέκτες εστιακού σημείου

Αν τα διδιάστατα κάτοπτρα του σχήματος 5.7 περιστραφούν, αντί να επεκταθούν, το αποτέλεσμα είναι οι σφαιρικοί και παραβολικοί δίσκοι, αντίστοιχα. Ένας παραβολικός δίσκος πρέπει να παρακολουθεί τον ήλιο σε 2 διαστάσεις, για να μπορεί να διατηρεί την προσπίπτουσα ηλιακή δέσμη κάθετη στο άνοιγμα του ανακλαστικού κατόπτρου όλες τις ώρες. Το άνοιγμα ενός σφαιρικού δίσκου δε χρειάζεται παρακολούθηση εξαιτίας της συμμετρίας της σφαίρας (κύκλου). Ωστόσο, είναι απαραίτητος ένας γραμμικός δέκτης, που ανιχνεύει την κινούμενη εστιακή γραμμή.

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι παραβολικοί σφαιρικοί συγκεντρωτικοί συλλέκτες (παραβολοειδή), οι οποίοι, γενικά, παράγουν υψηλότερης πυκνότητας ηλιακή ακτινοβολία πέριξ ενός εστιακού σημείου.

5.2.4.γ. Σύνθετοι παραβολικοί συλλέκτες (CPC)

Οι σύνθετοι παραβολικοί συγκεντρωτές (Compound Parabolic Concentrators) είναι συλλέκτες μέσης θερμοκρασίας και περιέχουν στοιχεία τόσο από συγκεντρωτικούς συλλέκτες όσο και από επίπεδους συλλέκτες. Αυτό συμβαίνει, γιατί δε συγκεντρώνουν απλά την ηλιακή δέσμη στο δέκτη με ένα ανακλαστήρα, αλλά αξιοποιούν και τη διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία, όπως οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες. Η αξιοποίηση γίνεται υπό ευρεία περιοχή γωνιών πρόσπτωσης και έτσι υπάρχουν ελάχιστες απαιτήσεις για παρακολούθηση του ήλιου. Ανήκουν στην κατηγορία των συγκεντρωτών χωρίς είδωλο και επιτυγχάνουν μικρούς λόγους συγκέντρωσης. Οι συγκεντρωτές με δύο άξονες μπορούν να επιτύχουν μεγαλύτερους λόγους συγκέντρωσης, αλλά η επιβάρυνση και τα προβλήματα της συντήρησης του εξοπλισμού τους κάνουν λιγότερο αποδοτικούς οικονομικά. Σύμφωνα με έρευνα του Ronnelid σε ίδιες συνθήκες δοκιμών, οι συντελεστές θερμικών απωλειών ενός επίπεδου συλλέκτη μπορεί να είναι ακόμα και 32% περισσότεροι από αυτούς ενός πρωτότυπου συλλέκτη CPC.



Η συνηθέστερη μορφή των συλλεκτών CPC είναι η διδιάστατη τύπου σκάφης. Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.10, κάθε πλευρά του CPC είναι τμήμα παραβολής. Και οι δύο παραβολικές επιφάνειες εκτείνονται, μέχρι να γίνουν παράλληλες προς τον άξονα συμμετρίας του CPC. Η γωνία που σχηματίζεται από τον άξονα του CPC και την ευθεία που συνδέει την εστία της μιας παραβολής με το απέναντι άκρο του ανοίγματος, ονομάζεται *ημιγωνία αποδοχής* θ_c (acceptance half angle). Αν οι παραβολικές ανακλαστικές επιφάνειες είναι

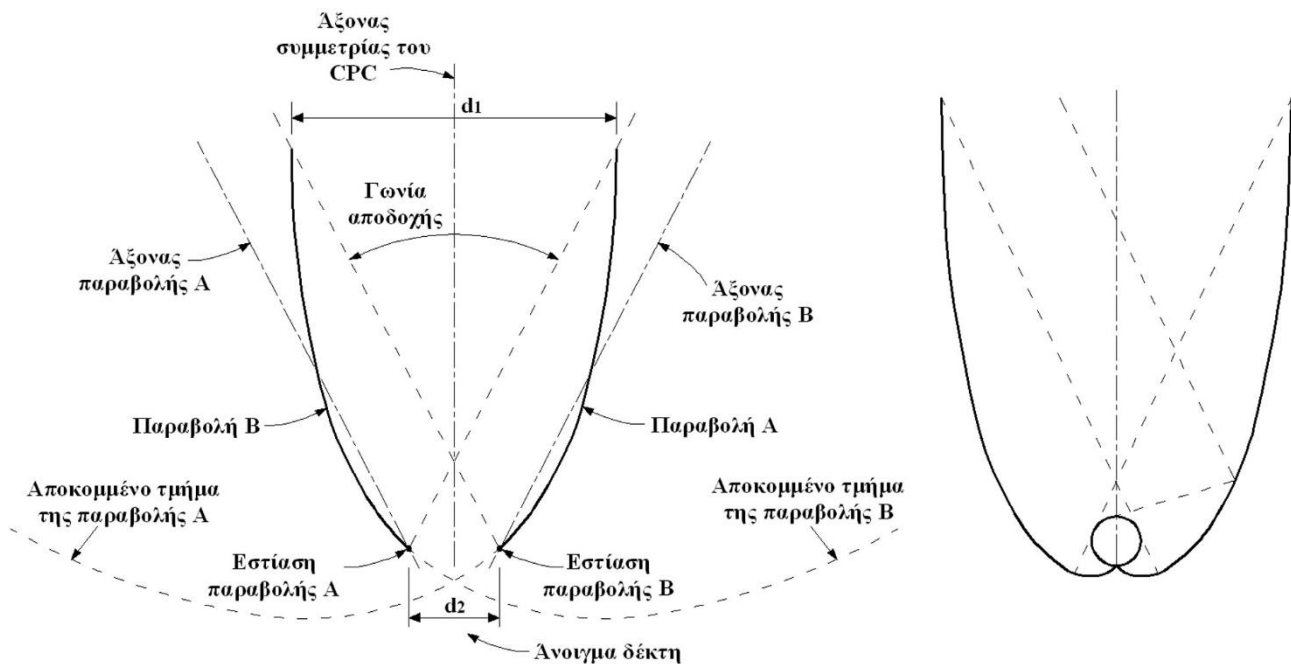
οπτικά τέλειες, τότε η ακτινοβολία που εισέρχεται στο άνοιγμα του κατόπτρου υπό γωνία θ , έτσι ώστε $-\theta_c < \theta < \theta_c$, ανακλάται προς το δέκτη, ο οποίος βρίσκεται στη βάση του CPC. Για $\theta < -\theta_c$ ή $\theta > \theta_c$ η ακτινοβολία δε φτάνει στο δέκτη. Το εύρος αυτό ονομάζεται «γωνία αποδοχής» (acceptance angle), και καθορίζει τις γωνίες πρόσπτωσης υπό τις οποίες γίνεται αξιοποιήσιμη η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία.

Ο λόγος συγκέντρωσης για ένα οπτικά τέλειο επιμήκη συλλέκτη τύπου CPC δίνεται από τη σχέση:

$$C_i = \frac{1}{\sin(\theta_c)}$$

Τα άνω άκρα των παραβολικών πλευρών του CPC συνεισφέρουν ελάχιστα στην ανάκλαση της ακτινοβολίας προς το δέκτη και συνεπώς μπορούν να αποκοπούν έτσι, ώστε το ύψος του CPC μπορεί να μειωθεί με ελάχιστη μείωση στην απόδοση, αλλά σημαντική μείωση στο κόστος κατασκευής.

Στο σχήμα 5.10 δίδεται ένα παράδειγμα συλλέκτη CPC με κυλινδρικό δέκτη, στο οποίο φαίνεται και ο τρόπος γένεσης του σχήματος της ανακλαστικής επιφάνειας που απαιτείται για το δέκτη αυτό. Συγκεκριμένα, στο τυχόν σημείο P της επιφάνειας CE, πρέπει η κάθετος στο κάτοπτρο να διχοτομεί τη γωνία που σχηματίζει η εφαπτομένη στον απορροφητήρα, PT, και η ευθεία που διέρχεται από το P και σχηματίζει γωνία θ_c με τον άξονα του CPC. Η παραπάνω μέθοδος γένεσης της ανακλαστικής επιφάνειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για οποιαδήποτε σχήμα κυρτού δέκτη, δημιουργώντας έτσι συλλέκτες τύπου CPC, οι οποίοι δεν είναι κατ' ανάγκη παραβολικοί.



Σχήμα 5.10: Γεωμετρία συλλέκτη τύπου CPC.

Εκτός από τον παραπάνω ενδεικτικά αναφερόμενο τύπο συγκεντρωτικών συλλεκτών, υπάρχουν μία σειρά, ακόμα, υλοποιήσεις, όπως ο ηλιακός συλλέκτης σταθερού κατόπτρου (FMSC), ο ηλιακός συλλέκτης μετακινούμενου κατόπτρου και στατικού δέκτη (SLATS), ο συλλέκτης σταθερού κατόπτρου και μετακινούμενου εστιακού σημείου (FMDF) και ο συλλέκτης Φρενέλ (FRESNEL). Η εκτενής αναφορά τους ξεφεύγει από τους σκοπούς του Κεφαλαίου. Περισσότερα μπορούν να αντληθούν από την παρεχόμενη βιβλιογραφία [1].

Από μηχανικής απόψεως, οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες παρουσιάζουν συγκεκριμένα προβλήματα σε σχέση με τους επίπεδους συλλέκτες. Καταρχήν απαιτείται η έδρασή τους σε σύστημα ανίχνευσης της τροχιάς του ήλιου στον ορίζοντα, δεδομένο που αυξάνει την πολυπλοκότητα και το κόστος εγκατάστασης. Επιπλέον εμφανίζουν αυξημένες απαιτήσεις συντήρησης, με σκοπό κυρίως τη διατήρηση των οπτικών συστημάτων συλλογής της ηλιακής ακτινοβολίας σε υψηλά επίπεδα, λαμβάνοντας υπόψη την παρουσία σκόνης, τις

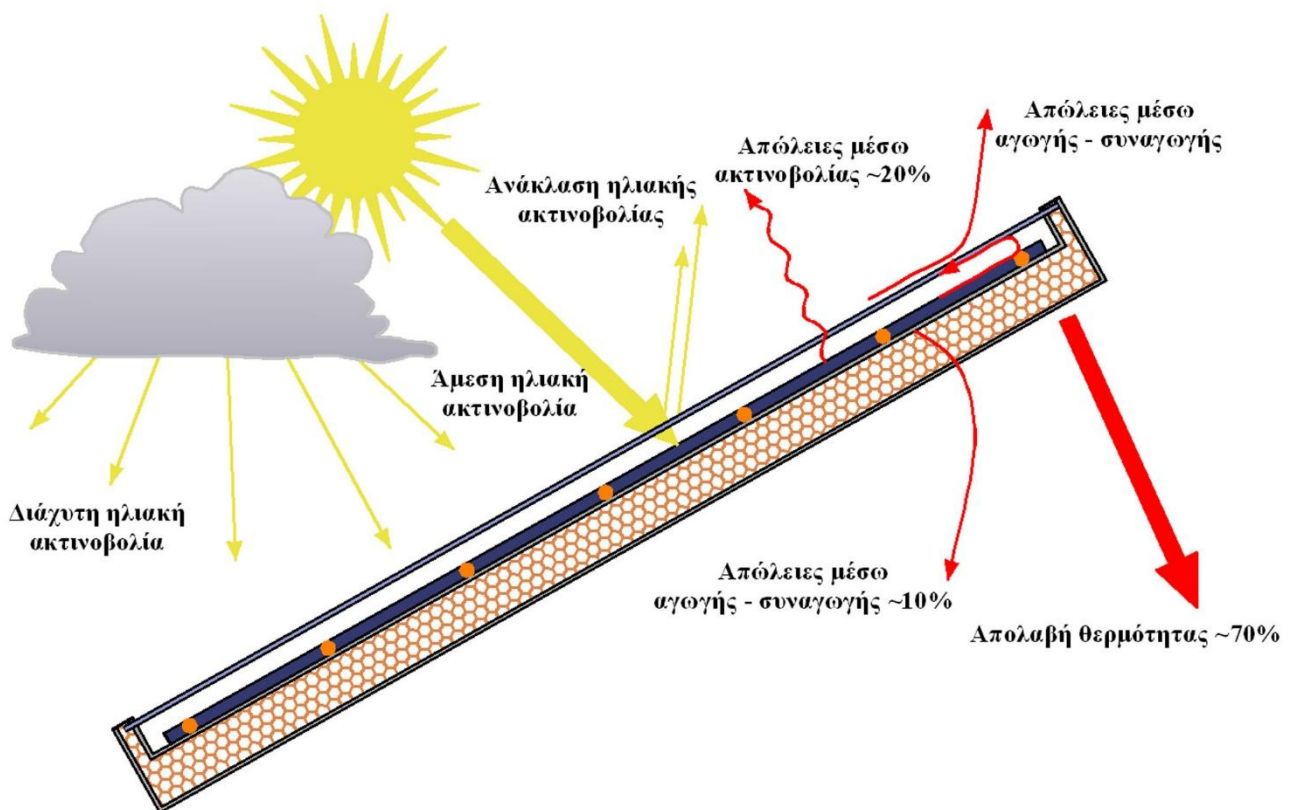
καιρικές συνθήκες και τις διαβρωτικές ατμοσφαιρικές συνθήκες. Για τους ανωτέρω λόγους, η χρήση των συγκεντρωτικών ηλιακών συλλεκτών περιορίζεται σε εξειδικευμένες εφαρμογές, στις οποίες απαιτείται επίτευξη υψηλών θερμοκρασιών και παραγωγή υψηλής θερμικής ισχύος.

5.3. Ενεργειακή ανάλυση επίπεδου ηλιακού συλλέκτη

Σε ένα ηλιακό συλλέκτη υφίστανται οι ακόλουθες ροές ενέργειας:

- μεταφορά θερμότητας μέσω ηλιακής ακτινοβολίας από το περιβάλλον προς την απορροφητική πλάκα του συλλέκτη,
- μεταφορά θερμότητας από την απορροφητική πλάκα προς το εσωτερικό του συλλέκτη και το διαφανές κάλυμμα,
- μεταφορά θερμότητας από τη βάση, τις πλευρικές επιφάνειες και το διαφανές κάλυμμα του συλλέκτη προς το περιβάλλον, μέσω ακτινοβολίας και αγωγής – συναγωγής.

Οι ανωτέρω ροές θερμότητας απεικονίζονται γραφικά στο σχήμα 5.11.



Σχήμα 5.11: Συναλλαγές θερμικής ισχύος από και προς ηλιακό συλλέκτη.

Η παραγωγή θερμικής ισχύος από επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες και συλλέκτες χωρίς κάλυμμα δίνεται από τη σχέση 5.1 [2]:

$$\dot{Q} = A_c \cdot F_R \cdot [G_t \cdot (\tau \cdot \alpha) - U_L \cdot (T_f - T_a)] \quad (5.1)$$

όπου:

- A_c : η ενεργή (effective) επιφάνεια του ηλιακού συλλέκτη σε m^2
 F_R : ο συντελεστής απωλειών θερμικής ισχύος από το συλλέκτη προς το περιβάλλον ή διορθωτικός συντελεστής (heat removal factor – correction factor), ο οποίος ορίζεται παρακάτω
 G_t : η ολική διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία στο συλλέκτη, σε W/m^2
 $\tau \cdot \alpha$: το γινόμενο συντελεστή διαπερατότητας του καλύμματος επί το συντελεστή απορροφητικότητας της πλάκας του ηλιακού συλλέκτη (transmittance – absorbance product)

- $G_t(\tau \cdot \alpha)$: η τελική, καθαρή απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας από το συλλέκτη, σε W/m^2
 U_L : ο συντελεστής θερμικής διαπερατότητας για τη μεταφορά θερμότητας από το συλλέκτη προς το περιβάλλον σε $W/(m^2 \cdot K)$
 T_{fi} : η θερμοκρασία εισαγωγής του εργαζόμενου μέσου στο συλλέκτη σε $^{\circ}C$
 T_a : η θερμοκρασία αέρα περιβάλλοντος σε $^{\circ}C$.

Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται οι υπολογισμοί των παραμέτρων που εμπλέκονται στον υπολογισμό της αποδιδόμενης θερμικής ισχύος από ένα ηλιακό συλλέκτη, με βάση τη σχέση 5.1.

5.3.1. Ο συντελεστής απωλειών θερμικής ισχύος F_R

Ο συντελεστής απωλειών θερμικής ισχύος ορίζεται ως ο λόγος της πραγματικής παραγωγής θερμικής ισχύος από τον ηλιακό συλλέκτη προς τη θερμική ισχύ που θα παραγόταν, αν η θερμοκρασία του εργαζόμενου μέσου εντός του συλλέκτη ήταν σταθερή και ομοιόμορφη και ίση με τη θερμοκρασία εισόδου του σε αυτόν T_i . Η θερμοκρασία εισόδου του εργαζόμενου μέσου στον ηλιακό συλλέκτη εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά και τον τρόπο λειτουργίας του συνολικού συστήματος θέρμανσης και από τη ζήτηση θερμικής ισχύος. Ο συντελεστής απωλειών θερμικής ισχύος εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του ηλιακού συλλέκτη, τον τύπο και την παροχή του εργαζόμενου μέσου, σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση [2]:

$$F_R = \frac{\dot{m} \cdot c_p}{A_c \cdot U_L} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{A_c \cdot U_L \cdot F'}{\dot{m} \cdot c_p}\right) \right] \quad (5.2)$$

όπου:

- \dot{m} : η παροχή μάζας του εργαζόμενου μέσου εντός του συλλέκτη σε kg/s
 c_p : η ειδική θερμοχωρητικότητα του εργαζόμενου μέσου σε $kJ/(kg \cdot K)$
 F' : ο συντελεστής απόδοσης του ηλιακού συλλέκτη (collector efficiency factor).

Ο συντελεστής απόδοσης του ηλιακού συλλέκτη ορίζεται ως ο λόγος της πραγματικά παραγόμενης θερμικής ισχύος προς τη θερμική ισχύ που θα παραγόταν, αν η θερμοκρασία της απορροφητικής επιφάνειας του συλλέκτη ήταν ίση με τη θερμοκρασία του εργαζόμενου μέσου εντός του συλλέκτη [2]. Ο συντελεστής απόδοσης του ηλιακού συλλέκτη, για συλλέκτες χωρίς κάλυμμα, δίνεται από τη σχέση:

$$F' = \frac{1}{U_L \left[\frac{1}{U_L} + \frac{D_o}{D_i \cdot h_f} + \frac{D_o}{2 \cdot k} \cdot \ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right) \right]} \quad (5.3)$$

όπου:

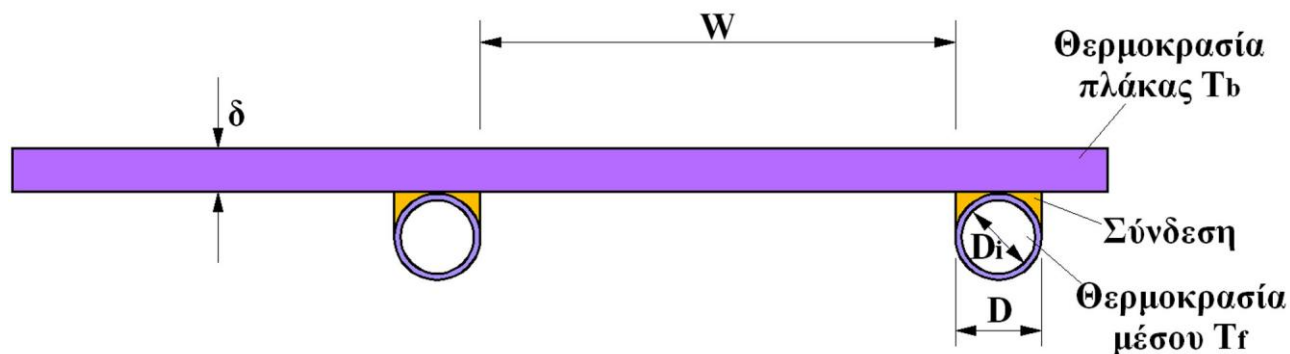
- D_i : η εσωτερική διάμετρος των σωληνώσεων του συλλέκτη σε m
 D_o : η εξωτερική διάμετρος των σωληνώσεων του συλλέκτη σε m
 k : ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού του ηλιακού συλλέκτη σε $W/(m \cdot K)$
 h_f : ο συντελεστής συναγωγής μεταφοράς θερμότητας από τις σωληνώσεις του ηλιακού συλλέκτη προς το εργαζόμενο μέσο σε $W/(m^2 \cdot K)$.

Για επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες, ο συντελεστής απόδοσης F' δίνεται από τη σχέση [2]:

$$F' = \frac{1}{W \cdot \left[\frac{1}{U_L \cdot [D + (W - D) \cdot F]} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi \cdot D_i \cdot h_{fi}} \right]} \quad (5.4)$$

όπου:

- W : η απόσταση ανάμεσα σε δύο διαδοχικές σωληνώσεις του ηλιακού συλλέκτη σε m (βλέπε σχήμα 5.12)
- D : η εξωτερική διάμετρος των σωληνώσεων του συλλέκτη σε m (βλέπε σχήμα 5.12)
- D_i : η εσωτερική διάμετρος των σωληνώσεων του συλλέκτη σε m (βλέπε σχήμα 5.12)
- F : η απόδοση της απορροφητικής πλάκας (standard fin efficiency), η οποία θα οριστεί στη συνέχεια
- C_b : η αγωγιμότητα της σύνδεσης των σωληνώσεων του ηλιακού συλλέκτη στην απορροφητική επιφάνεια, η οποία θα παρουσιαστεί παρακάτω
- h_{fi} : ο συντελεστής συναγωγής μεταφοράς θερμότητας από το εργαζόμενο μέσο προς τις σωληνώσεις του ηλιακού συλλέκτη σε $W/(m^2 \cdot K)$.



Σχήμα 5.12: Εσωτερική κατασκευαστική δομή επίπεδου ηλιακού συλλέκτη.

Η απόδοση απορροφητικής πλάκας F δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$F = \frac{\tanh\left[\frac{m \cdot (W - D)}{2}\right]}{\frac{m \cdot (W - D)}{2}} \quad (5.5)$$

όπου η παράμετρος m ορίζεται συναρτήσει του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας k και του πάχους της πλάκας δ από τη σχέση:

$$m = \sqrt{\frac{U_L}{k \cdot \delta}} \quad (5.6)$$

Η αγωγιμότητα της σύνδεσης των σωληνώσεων του συλλέκτη με την απορροφητική πλάκα μπορεί να εκτιμηθεί από τη σχέση:

$$C_b = \frac{k_b \cdot b}{\gamma} \quad (5.7)$$

όπου:

- k_b : ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού της σύνδεσης σε $W/(m \cdot K)$
- b : το πλάτος της σύνδεσης σε m
- γ : το πάχος της σύνδεσης σε m.

5.3.2. Ο συντελεστής θερμικής διαπερατότητας U_L

Σχετικά με το συντελεστή θερμικής διαπερατότητας U_L από τον ηλιακό συλλέκτη προς το περιβάλλον, για την περίπτωση ηλιακών συλλεκτών χωρίς κάλυμμα, τούτος προσεγγίζεται από την εμπειρική σχέση [3]:

$$U_L = 4,15 + 2,05 \cdot V + 0,655 \cdot \bar{T}_r^{0,25} + 2 \cdot \sigma \cdot \bar{T}_s^3 \cdot \varepsilon + 2 \cdot \sigma \cdot \bar{T}_r^3 \cdot \varepsilon \quad (5.8)$$

όπου:

- V : η μέση ταχύτητα του ανέμου για το υπό μελέτη χρονικό διάστημα σε m/s
- T_r : η μέση θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ συλλέκτη και ατμοσφαιρικού αέρα σε °C
- T_s : η μέση θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ συλλέκτη και επιφάνειας εγκατάστασης σε °C
- σ : η σταθερά Stefan – Boltzmann για την εκπομπή ακτινοβολίας, ίση με $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$
- ε : ο συντελεστής εκπομπής ακτινοβολίας του υλικού των σωληνώσεων του ηλιακού συλλέκτη.

Για την περίπτωση επίπεδων ηλιακών ο συνολικός συντελεστής θερμικής διαπερατότητας U_L αποτελεί σύνθετη συνάρτηση των κατασκευαστικών χαρακτηριστικών στοιχείων του συλλέκτη και των συνθηκών λειτουργίας του. Στη γενική περίπτωση δίνεται από τη σχέση [2]:

$$U_L = U_t + U_b + U_e \quad (5.9)$$

όπου οι δείκτες t, b και e υποδηλώνουν απώλειες θερμικής ισχύος από την κορυφή του συλλέκτη μέσω του διαφανούς καλύμματος, από τη βάση και από τις πλάγιες επιφάνειες αντίστοιχα (t – top, b – bottom, e – edges thermal loss).

Ο συντελεστής θερμικής διαπερατότητας από την κορυφή του ηλιακού συλλέκτη δίνεται από τη σχέση [2]:

$$U_t = \frac{1}{\frac{N}{\frac{C}{T_b} \cdot \left(\frac{T_{pm} - T_a}{N + f} \right)^e + \frac{1}{h_t}} + \frac{1}{\frac{\sigma \cdot (T_{pm} + T_a) \cdot (T_{pm}^2 + T_a^2)}{1 + 0,00591 \cdot N \cdot h_t} + \frac{2 \cdot N + f - 1 + 0,133 \cdot \varepsilon_p}{\varepsilon_g} - N}} \quad (5.10)$$

όπου:

- N : ο αριθμός των προστατευτικών διαφανών καλυμμάτων του ηλιακού συλλέκτη
- h_t : ο συντελεστής θερμικής μετάβασης του αέρα από την κορυφή του συλλέκτη σε $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
- T_{pm} : η μέση θερμοκρασία της απορροφητικής πλάκας σε K
- T_a : η μέση θερμοκρασία του αέρα περιβάλλοντος σε K
- ε_g : ο συντελεστής εκπομπής ακτινοβολίας του υλικού του διαφανούς καλύμματος του ηλιακού συλλέκτη
- ε_p : ο συντελεστής εκπομπής ακτινοβολίας του υλικού της απορροφητικής πλάκας του ηλιακού συλλέκτη
- C, f, e : εμπειρικές παράμετροι που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια.

Η παράμετρος C δίνεται από τη σχέση:

$$C = 520 \cdot (1 - 0,000051 \cdot \beta^2) \quad (5.11)$$

όπου β η κλίση εγκατάστασης του ηλιακού συλλέκτη. Η ανωτέρω σχέση ισχύει για τιμές κλίσεις εγκατάστασης από 0° έως 70° . Στην περίπτωση που η κλίση εγκατάστασης του ηλιακού συλλέκτη είναι μεγαλύτερη από τις 70° , τότε η τιμή της παραμέτρου C προκύπτει από την ανωτέρω σχέση για $\beta = 70^\circ$.

Η παράμετρος f δίνεται από τη σχέση:

$$f = (1 + 0,089 \cdot h_t - 0,1166 \cdot h_t \cdot \varepsilon_p) \cdot (1 + 0,07866 \cdot N). \quad (5.12)$$

Η παράμετρος e δίνεται από τη σχέση:

$$e = 0,430 \cdot \left(1 - \frac{100}{T_{pm}} \right). \quad (5.13)$$

Στην ανωτέρω σχέση υπολογισμού του συντελεστή U_t εμφανίζεται η μέση θερμοκρασία της απορροφητικής πλάκα T_{pm} σε βαθμούς Κ. Η θερμοκρασία αυτή μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$T_{pm} = T_{fi} + \frac{\dot{Q}/A_c}{F_R \cdot U_L} \cdot (1 - F_R). \quad (5.14)$$

όπου T_{fi} η θερμοκρασία εισόδου του εργαζόμενου μέσου στον ηλιακό συλλέκτη.

Οι συντελεστές θερμικής διαπερατότητας από τη βάση και τις πλάγιες επιφάνειες του ηλιακού συλλέκτη δίνονται μέσω των κλασικών σχέσεων μεταφοράς θερμότητας με αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία. Στη γενική περίπτωση μπορούν να θεωρηθούν σταθερές και ίσες με (οι δείκτες e και b στη σχέση υποδηλώνουν την ισχύ της σχέσης για μεταφορά θερμότητας, αντίστοιχα ,μέσω πλαγίων επιφανειών και βάσης συλλέκτη):

$$U_{e,b} = \frac{1}{\frac{t_{e,b}}{k_{e,b}} + \frac{1}{h_{e,b}}}. \quad (5.15)$$

όπου:

- $t_{e,b}$: το πάχος της μόνωσης στις πλάγιες επιφάνειες και στη βάση του συλλέκτη σε m
- $k_{e,b}$: ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας της μόνωσης σε $W/(m \cdot K)$
- $h_{e,b}$: ο συντελεστής θερμικής μετάβασης της μόνωσης σε $W/(m^2 \cdot K)$.

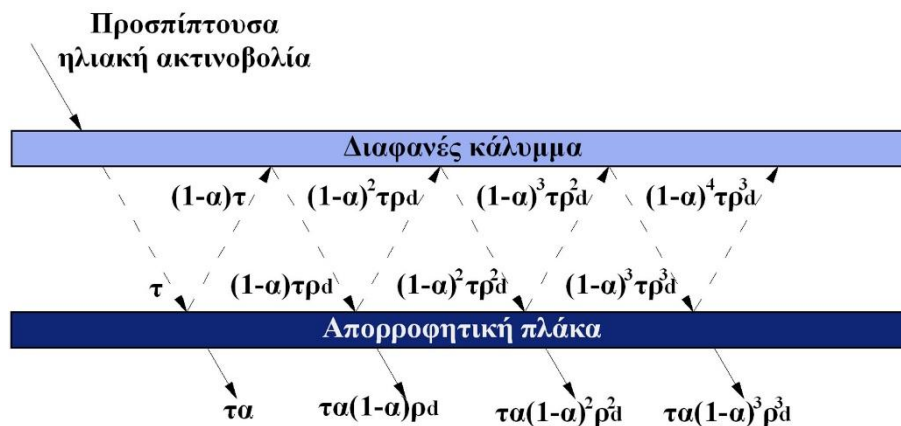
Λόγω της θερμομόνωσης του ηλιακού συλλέκτη στις πλάγιες επιφάνειες και στη βάση του, οι απώλειες θερμικής ισχύος από τις επιφάνειες αυτές αντιστοιχούν περίπου στο 10% των συνολικών απωλειών θερμότητας από τον ηλιακό συλλέκτη προς το περιβάλλον.

Από τις παραπάνω σχέσεις φαίνεται ότι, για τον υπολογισμό διαφόρων μεγεθών που απαιτούνται για τον υπολογισμό του συντελεστή F_R είναι απαραίτητη η γνώση μεγεθών που αναμένονται ως αποτελέσματα από την παραπάνω διαδικασία. Για παράδειγμα, για τον υπολογισμό της ωφέλιμης θερμικής ισχύος \dot{Q} του ηλιακού συλλέκτη, απαιτείται ο υπολογισμός της μέσης θερμοκρασίας της απορροφητικής πλάκας T_{pm} . Όμως στη σχέση υπολογισμού της T_{pm} , η απολαμβανόμενη θερμική ισχύς από το συλλέκτη απαιτείται ως δεδομένο. Είναι προφανές ότι σε αυτές τις περιπτώσεις θα πρέπει να εκτελεσθεί επαναληπτική διαδικασία επίλυσης του προβλήματος, κάνοντας αρχικές υποθέσεις για κάποια από τα εμπλεκόμενα μεγέθη και επαληθευόντάς τις κατά τον επαναληπτικό υπολογισμό. Η αναλυτική διαδικασία υπολογισμού και διαστασιολόγησης ηλιακών συλλεκτών θα παρουσιαστεί σε επόμενη ενότητα.

5.3.3. Το γινόμενο διαπερατότητας – απορροφητικότητας ($\tau\alpha$)

Ο τελευταίος παράγοντας που απαιτείται για τον υπολογισμό της τελικής παραγωγής θερμικής ισχύος από τον ηλιακό συλλέκτη είναι το γινόμενο $G_t \cdot (\tau \cdot \alpha)$, το οποίο περιγράφει την τελική, καθαρή απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας από το συλλέκτη, σε W/m^2 . Ο όρος G_t αναφέρεται στην ολική προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στον ηλιακό συλλέκτη. Ο όρος αυτός αποτελεί το αποτέλεσμα της ολικής διαθέσιμης ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο και στη θέση εγκατάστασης, η οποία μετριέται με πυρανόμετρα, της καθαρότητας της ατμόσφαιρας, του τύπου των περιβαλλουσών επιφανειών την υπό μελέτη επιφάνεια, της θέσης και του προσανατολισμού εγκατάστασης του ηλιακού συλλέκτη. Δύναται να υπολογιστεί με ακρίβεια, ακολουθώντας την αναλυτική μεθοδολογία, που βασίζεται σε έννοιες ηλιακής γεωμετρίας και ακτινοβολίας, η οποία περιγράφεται στο Σύγγραμμα «Θέρμανση – Ψύξη – Κλιματισμός» των Ακαδημαϊκών Συγγραμμάτων «Κάλλιπος».

Το γινόμενο των συντελεστών διαπερατότητας και απορροφητικότητας του ηλιακού συλλέκτη θα πρέπει να λαμβάνεται ως ένα αδιαίρετο μέγεθος, που αναφέρεται στο συνδυασμό καλύμματος και απορροφητικής πλάκας συλλέκτη, και όχι ως το γινόμενο δύο διαφορετικών ιδιοτήτων. Αν θεωρήσουμε ότι το διαφανές κάλυμμα του ηλιακού συλλέκτη έχει συντελεστή διαπερατότητας τ σε συγκεκριμένη γωνία πρόσπτωσης, και η απορροφητική πλάκα έχει συντελεστή απορροφητικότητας α , τότε από την ολική προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία G_t στο συλλέκτη, ένα μέρος αυτής ίσο με $G_t \cdot \tau$ διαπερνάει το διαφανές κάλυμμα, και ένα μέρος από την ακτινοβολία που διαπερνάει το κάλυμμα απορροφάται από την πλάκα, το οποίο εκτιμάται σε $G_t \cdot \tau \cdot \alpha$. Το ποσοστό $\tau \cdot (1-\alpha)$ της ηλιακής ακτινοβολίας που έχει διαπεράσει το κάλυμμα και δεν έχει απορροφηθεί από την πλάκα επιστρέφεται προς το διαφανές κάλυμμα. Ένα ποσοστό $\tau \cdot (1-\alpha) \cdot \rho_d$ όμως από την ακτινοβολία που επιστρέφεται από την πλάκα προς το διαφανές κάλυμμα δε διαφεύγει του ηλιακού συλλέκτη, αλλά ανακλάται από το κάλυμμα πίσω προς την απορροφητική πλάκα, η οποία θα απορροφήσει επιπλέον ένα μέρος της ανακλώμενης από το κάλυμμα ακτινοβολίας και ούτω καθεξής. Το μέγεθος ρ_d είναι ο συντελεστής ανακλαστικότητας του καλύμματος του συλλέκτη για τη διάχυτη ακτινοβολία που ανακλάται από την απορροφητική πλάκα του συλλέκτη προς την εσωτερική επιφάνεια του καλύμματος. Η ανωτέρω επαναλαμβανόμενη διαδικασία παρουσιάζεται γραφικά στο σχήμα 5.13.



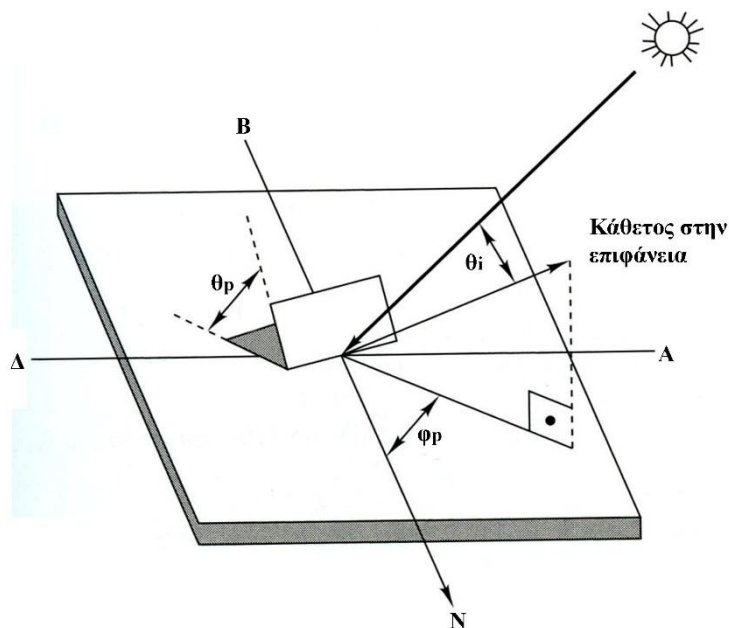
Σχήμα 5.13: Απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας από απορροφητική πλάκα κάτω από διαφανές κάλυμμα.

Η διαδοχική ανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας από την απορροφητική πλάκα προς το διαφανές κάλυμμα και, αντίστροφα, έχει ως αποτέλεσμα το τελικό γινόμενο συντελεστών διαπερατότητας και ανακλαστικότητας καλύμματος και πλάκας, αντίστοιχα, να διαμορφώνεται από μία σχέση της μορφής [2]:

$$(\tau\alpha) = \tau \cdot \alpha \cdot \sum_{n=0}^{\infty} [(1-\alpha) \cdot \rho_d]^n = \frac{\tau \cdot \alpha}{1 - (1-\alpha) \cdot \rho_d} \quad (5.16)$$

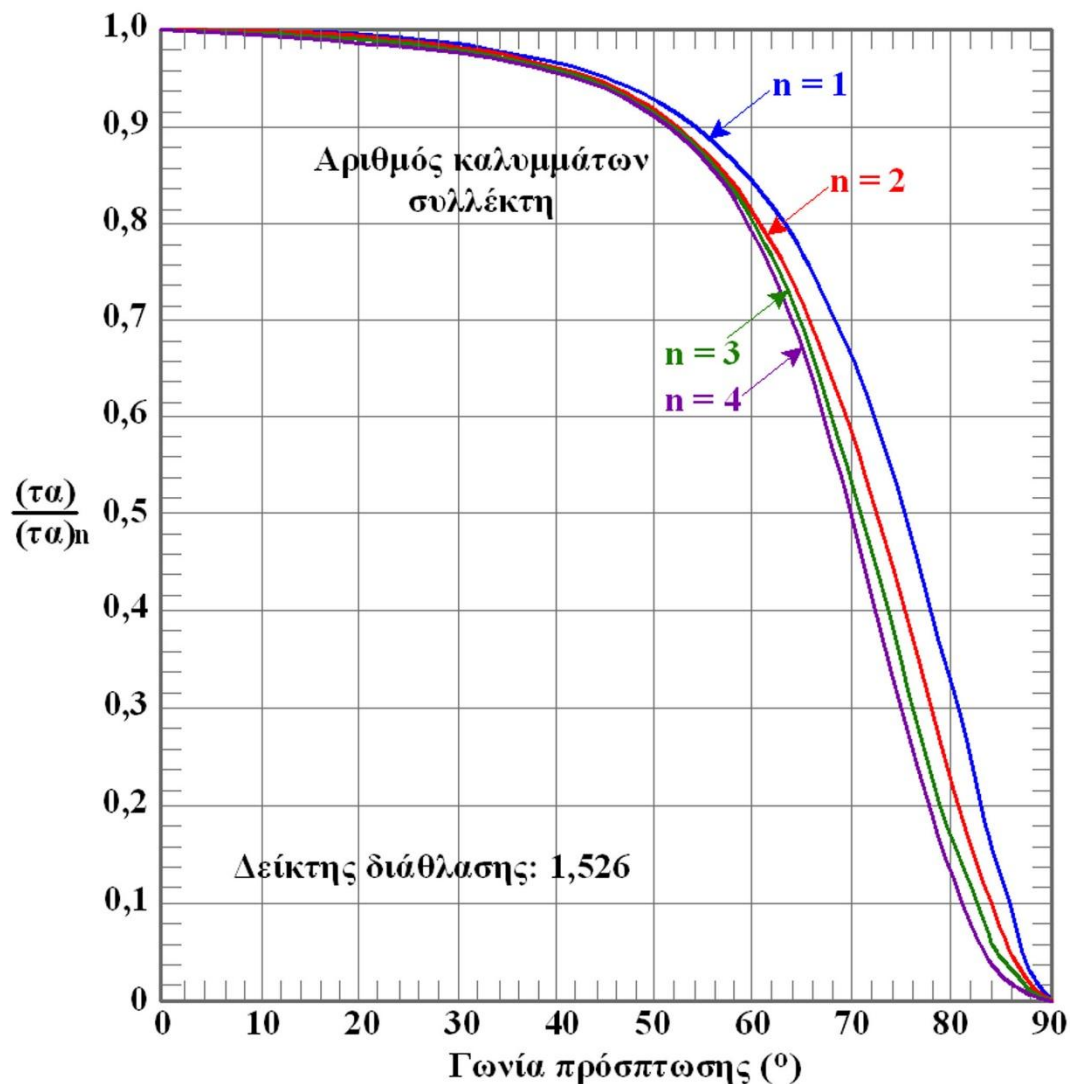
Η διαπερατότητα του διαφανούς καλύμματος και η απορροφητικότητα της απορροφητικής πλάκας ενός ηλιακού συλλέκτη δεν είναι μεγέθη σταθερά. Η βασική παράμετρος από την οποία εξαρτώνται είναι η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας. Η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας υπολογίζεται ως προς την κάθετη στην επιφάνεια του ηλιακού συλλέκτη (σχήμα 5.14).

Η διακύμανση του γινομένου ($\tau\alpha$) ενός ηλιακού συλλέκτη συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας σε αυτό δίνεται στο σχήμα 5.15 [4]. Στο σχήμα αυτό η διακύμανση παρουσιάζεται ανηγμένη ως προς το γινόμενο ($\tau\alpha$)_n που προκύπτει για γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας στον ηλιακό συλλέκτη ίση με 0° (κάθετα στην επιφάνεια του ηλιακού συλλέκτη).



Σχήμα 5.14: Γωνία πρόσπτωσης θ ηλιακής ακτινοβολίας σε επιφάνεια υπό κλίση β ως προς το οριζόντιο επίπεδο.

Οι τιμές της διαπερατότητας και της απορροφητικότητας του ηλιακού συλλέκτη στο ηλιακό φάσμα για μηδενική γωνία πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας (κάθετη πρόσπτωση) δίνονται από τον κατασκευαστή του ηλιακού συλλέκτη.



Σχήμα 5.15: Διακύμανση γινομένου διαπερατότητας – απορροφητικότητας ηλιακού συλλέκτη για διαφορετικούς αριθμούς καλυμμάτων συλλέκτη συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης θ ηλιακής ακτινοβολίας.

Επιπλέον οι καμπύλες του σχήματος ισχύουν για καθαρό γυαλί ως υλικό του καλύμματος του ηλιακού συλλέκτη, με δείκτη διάθλασης 1,526 στο ηλιακό φάσμα. Ωστόσο, έχει αποδειχθεί πειραματικά ότι οι καμπύλες του σχήματος 5.15 ισχύουν για όλα τα υλικά, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή του καλύμματος του ηλιακού συλλέκτη, με δείκτη διάθλασης κοντά σε αυτόν του γυαλιού. Στον πίνακα 5.1 παρουσιάζονται τυπικοί δείκτες διάθλασης στο ηλιακό φάσμα για μερικά χαρακτηριστικά υλικά κατασκευής καλύμματος ηλιακών συλλεκτών [2].

Πίνακας 5.1: Τυπικοί δείκτες διάθλασης στο ηλιακό φάσμα για χαρακτηριστικά υλικά κατασκευής καλύμματος ηλιακών συλλεκτών.

Υλικό κατασκευής καλύμματος	Δείκτης διάθλασης
Γυαλί	1,526
Πολυμεθυλομεθακρυλικό πολυμερές (polymethyl methacrylate)	1,49
Πολυφθοριούχο βινύλιο (polyvinyl fluoride)	1,45
Πολυφθοριούχο αιθυλένιο – προπυλένιο (polyfluorinated ethylene propylene)	1,34
Πολυτετραφθοροαιθυλένιο (polytetrafluoroethylene)	1,37
Πολυανθρακικό πολυμερές (polycarbonate)	1,60

Θα πρέπει να τονιστεί ότι η ανάπτυξη των σχέσεων για τον υπολογισμό του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας βασίστηκε στην παραδοχή ότι το διαφανές κάλυμμα δεν απορροφά καθόλου ηλιακή ακτινοβολία. Στην πραγματικότητα αυτό δεν είναι απόλυτα αληθές, αφού πάντα υπάρχει ένα μικρό ποσοστό απορρόφησης ηλιακής ακτινοβολίας και από το κάλυμμα του ηλιακού συλλέκτη. Για να διορθωθεί αυτό το σφάλμα, εισάγεται το μέγεθος του ενεργού γινομένου διαπερατότητας – απορροφητικότητα (effective transmittance – absorbance product), το οποίο θα υποδεικνύεται με το δείκτη e , δηλαδή $(\tau\alpha)_e$. Η απορροφούμενη ηλιακή ακτινοβολία από το κάλυμμα του ηλιακού συλλέκτη δε χάνεται. Αντιθέτως η ηλιακή ακτινοβολία, που απορροφάται από το κάλυμμα, αποδίδεται εν μέρει αργότερα στην απορροφητική πλάκα. Το τελικό αποτέλεσμα είναι ότι το ενεργό γινόμενο διαπερατότητας – απορροφητικότητας εμφανίζεται ελαφρώς αυξημένο, κατά περίπου 1 – 2%, σε σχέση με το θεωρητικό γινόμενο που ορίσαμε ανωτέρω. Για τον ακριβή υπολογισμό του $(\tau\alpha)_e$ έχει αναπτυχθεί εμπειρική μέθοδος, η παρουσίαση της οποίας όμως δεν εμπίπτει στο αντικείμενο του Κεφαλαίου. Άλλωστε η διαφορά στο τελικό αριθμητικό αποτέλεσμα είναι μικρή. Καταληκτικά, για τον υπολογισμό της ωφέλιμης θερμικής ισχύος του ηλιακού συλλέκτη, θα πρέπει να χρησιμοποιείται το ενεργό γινόμενο διαπερατότητας – απορροφητικότητας, το οποίο μπορεί να λαμβάνεται ως:

$$(\tau\alpha)_e \cong 1,02 \cdot (\tau\alpha) \quad (5.17)$$

- για ηλιακούς συλλέκτες με κάλυμμα από συνηθισμένο γυαλί (υψηλότερη απορροφητικότητα)

$$(\tau\alpha)_e \cong 1,01 \cdot (\tau\alpha) \quad (5.18)$$

- για ηλιακούς συλλέκτες με κάλυμμα από υλικά με χαμηλή απορροφητικότητα.

Οι τιμές του γινομένου $(\tau\alpha)_n$ και των συντελεστών F_R και U_L κυμαίνονται σε συγκεκριμένα πεδία τιμών, ανάλογα με τον τύπο του συλλέκτη. Συνεπώς για γρήγορους, προσεγγιστικούς υπολογισμούς είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν μέσες τιμές για τα μεγέθη αυτά, οι οποίες προκύπτουν από στατιστικά δεδομένα για διαφορετικούς κατασκευαστές ηλιακών συλλεκτών, και για κάθε τύπο ξεχωριστά. Στον πίνακα 5.2 δίνονται ενδεικτικές τιμές για τα γινόμενα $F_R \cdot (\tau\alpha)_n$ και $F_R \cdot U_L$ για διαφορετικούς τύπους ηλιακών συλλεκτών και σε τυπικές χαρακτηριστικές συνθήκες περιβάλλοντος (ήπιες καιρικές συνθήκες, μέσης έντασης άνεμος, ηλιακή ακτινοβολία από 600 – 800W/m²).

Πίνακας 5.2: Ενδεικτικές τιμές παραμέτρων υπολογισμού θερμικής ισχύος από ηλιακούς συλλέκτες.

Τύπος	Περιγραφή	$F_R \cdot (\tau\alpha)_n$	$F_R \cdot U_L$ (W/m ² ·K)
I	Μαύρο χρώμα, ένα τζάμι	0,82	7,50
II	Μαύρο χρώμα, δύο τζάμια ή επιλεκτική επιφάνεια με ένα τζάμι	0,75	5,00
III	Σωλήνες κενού	0,45	1,25
IV	Πλαστικός συλλέκτης χωρίς τζάμι και μόνωση (ταχύτητα ανέμου 2m/s)	0,86	21,50

5.3.4. Βαθμός απόδοσης ηλιακού συλλέκτη

Ο βαθμός απόδοσης ενός ηλιακού συλλέκτη προκύπτει από το λόγο της ωφέλιμης θερμικής ισχύος \dot{Q} του ηλιακού συλλέκτη προς την προσπίπτουσα ολική ηλιακή ακτινοβολία G_t στην συνολική επιφάνεια του συλλέκτη A_c :

$$\eta = \frac{\dot{Q}}{G_t \cdot A_c} = F_R \cdot \left[(\tau \cdot \alpha)_e - \frac{U_L \cdot (T_{fi} - T_a)}{G_t} \right]. \quad (5.19)$$

Εξ ορισμού ο βαθμός απόδοσης του ηλιακού συλλέκτη δίνεται, επίσης, από τη σχέση:

$$\eta = \frac{\dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{fo} - T_{fi})}{G_t \cdot A_c} \quad (5.20)$$

όπου T_{fo} και T_{fi} είναι οι θερμοκρασίες εξόδου και εισόδου αντίστοιχα του εργαζόμενου μέσου στον ηλιακό συλλέκτη.

Με βάση το σχήμα 5.15, για γωνίες πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας κάτω από περίπου 35° το γινόμενο διαπερατότητας – απορροφητικότητας παραμένει περίπου σταθερό, με συνέπεια η μεταβολή του βαθμού απόδοσης συναρτήσει του παράγοντα $(T_{fi} - T_a)/G_t$ να εμφανίζεται περίπου γραμμική, όσο ο συντελεστής θερμικής διαπερατότητας U_L παραμένει σταθερός.

Στο σχήμα 5.16 παρουσιάζεται γραφική παράσταση του βαθμού απόδοσης ηλιακού συλλέκτη συναρτήσει του όρου $(T_{fi} - T_a)/G_t$. Παρατηρείται η πράγματι περίπου γραμμική εξάρτηση των δύο μεγεθών. Ο όρος $(T_{fi} - T_a)/G_t$ ονομάζεται *παράμετρος απωλειών θερμότητας* (heat loss parameter).

Η γραφική παράσταση του βαθμού απόδοσης που παρουσιάζεται στο σχήμα 5.16 είναι το αποτέλεσμα της γραμμικής παρεμβολής μεταξύ μετρήσεων του βαθμού απόδοσης του συλλέκτη από πιστοποιημένο ίδρυμα για διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας. Τα σημεία που αντιστοιχούν στις μετρήσεις έχουν επίσης αποτυπωθεί στο σχήμα. Ο βαθμός απόδοσης τέμνει τον κάθετο άξονα στο σημείο $F_R \cdot (\tau \alpha)_e$ για $(T_{fi} - T_a)/G_t = 0$, δηλαδή για $T_{fi} = T_a$, όταν, δηλαδή, η θερμοκρασία εισαγωγής του εργαζόμενου μέσου στο συλλέκτη είναι ίση με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Όσο ο παράγοντας απωλειών θερμότητας $(T_{fi} - T_a)/G_t$ αυξάνει, ουσιαστικά, δηλαδή, όσο η θερμοκρασία εισαγωγής του ρευστού στον ηλιακό συλλέκτη T_{fi} αυξάνει σε σχέση με τη θερμοκρασία T_a , ο βαθμός απόδοσης του συλλέκτη μειώνεται, ακολουθώντας γραμμική μεταβολή με κλίση $-F_R \cdot U_L$.

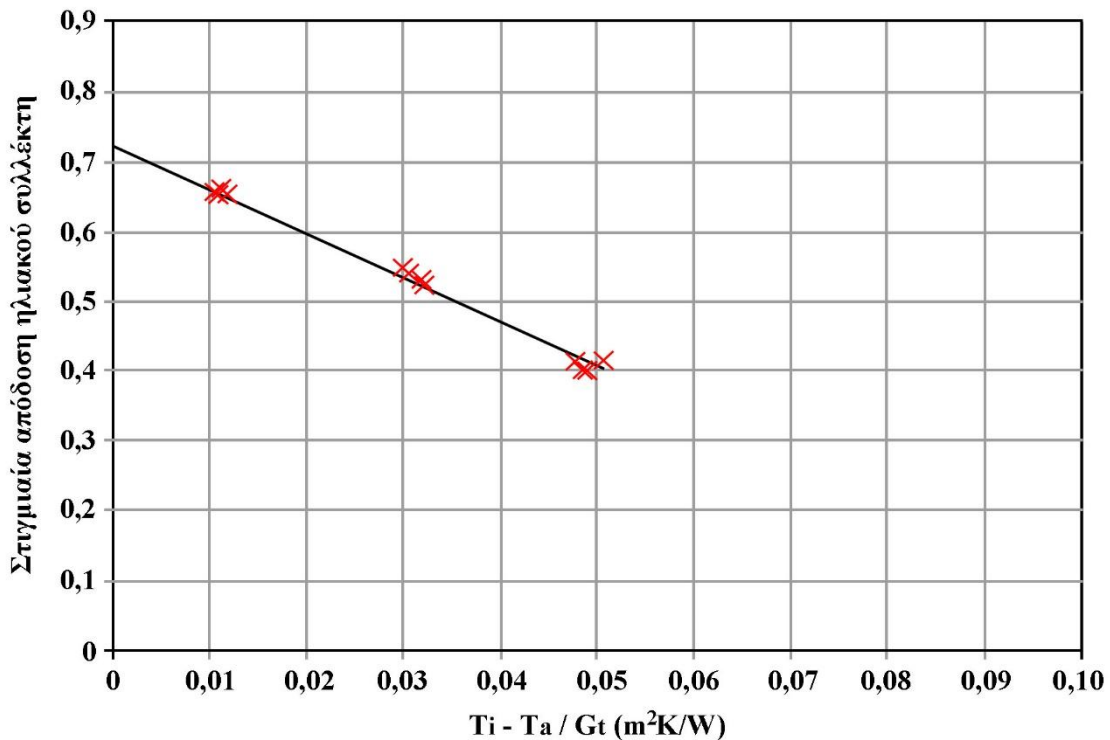
Στην πραγματικότητα ο συντελεστής θερμικής διαπερατότητας U_L του συλλέκτη δεν είναι σταθερός, αλλά εξαρτάται από τη θερμοκρασία του ρευστού στο συλλέκτη και τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Στη γενική περίπτωση η εξάρτηση αυτή ακολουθεί γραμμική μορφή, συνεπώς μπορούμε να γράψουμε:

$$F_R \cdot U_L = c_1 + c_2 \cdot (T_{fi} - T_a) \quad (5.21)$$

Με βάση τη σχέση 5.21, η σχέση 5.19 γράφεται:

$$\eta = F_R \cdot (\tau \cdot \alpha)_e - c_1 \cdot \frac{(T_{fi} - T_a)}{G_t} - c_2 \cdot \frac{(T_{fi} - T_a)^2}{G_t} \quad (5.22)$$

η οποία είναι μία εξίσωση δευτέρου βαθμού ως προς τον παράγοντα απωλειών θερμότητας.



Σχήμα 5.16: Διακύμανση γινομένου διαπερατότητας – απορροφητικότητας ηλιακού συλλέκτη για διαφορετικούς αριθμούς καλυμμάτων συλλέκτη συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης θ ηλιακής ακτινοβολίας.

Οι ανωτέρω εξισώσεις εμπεριέχουν όλους τους παράγοντες που επηρεάζουν τη διαμόρφωση του βαθμού απόδοσης του ηλιακού συλλέκτη, εκτός από την παροχή του ρευστού εντός του συλλέκτη και τη γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας. Η παροχή του ρευστού σαφώς επηρεάζει την απόδοση του συλλέκτη. Χαμηλή παροχή συνεπάγεται αύξηση της θερμοκρασίας του ρευστού, συνεπώς, με βάση τη σχέση 5.19, η απόδοση του συλλέκτη μειώνεται. Συνεπώς χαμηλή παροχή ρευστού εντός του συλλέκτη συνεπάγεται χαμηλότερη θερμική ισχύς απαγωγής θερμότητας από την απορροφητική πλάκα του συλλέκτη, κάτι που επιφέρει αύξηση της θερμοκρασίας της πλάκας. Αυτό, με τη σειρά του, θα προκαλέσει αύξηση της ισχύος θερμικών απωλειών από το συλλέκτη προς το περιβάλλον. Αντίστροφα αποτελέσματα έχει η αύξηση της παροχής του ρευστού στο συλλέκτη.

Ο ολοκληρωμένος υπολογισμός του βαθμού απόδοσης του ηλιακού συλλέκτη απαιτεί την εισαγωγή δύο επιπλέον μεγεθών:

- του συντελεστή τροποποίησης της γωνίας πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας (incidence angle modifier), ο οποίος εισάγει στον υπολογισμό τις οπτικές απώλειες λόγω της επίδρασης της γωνίας πρόσπτωσης,
- της σταθεράς χρόνου συλλέκτη (collector time constant), η οποία εισάγει στον υπολογισμό τη θερμοχωρητικότητα του συλλέκτη, που καθορίζεται από το υλικό που χρησιμοποιείται για την κατασκευή του συλλέκτη, και τη μάζα του.

5.3.4.a. Συντελεστής τροποποίησης γωνίας πρόσπτωσης

Οι σχέσεις υπολογισμού του βαθμού απόδοσης και της παραγόμενης θερμικής ισχύος από τον ηλιακό συλλέκτη, που παρουσιάστηκαν έως τώρα, υποθέτουν κάθετη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του συλλέκτη (γωνία πρόσπτωσης 0°). Κάτι τέτοιο, βέβαια, με δεδομένο ότι οι ηλιακοί συλλέκτες δεν εγκαθίστανται σε βάσεις αντίχενωσης της θέσης του ήλιου στον ορίζοντα, στην πράξη δεν ισχύει, παρά μόνο για ελάχιστες χρονικές στιγμές εντός της ημέρας. Λόγω της γωνίας πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας στον ηλιακό συλλέκτη υφίσταται ανάκλασή της από το κάλυμμα του συλλέκτη, που επηρεάζει το γινόμενο διαπερατότητας – απορροφητικότητας ($\tau\alpha$) του συλλέκτη. Προκειμένου να ποσοτικοποιηθεί η

επίδραση της γωνίας πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας στην τιμή του γινομένου (τ_a), ορίζεται ο συντελεστής τροποποίησης της γωνίας πρόσπτωσης K_{τ_a} , ως ο λόγος του γινομένου διαπερατότητας – απορροφητικότητας (τ_a) _{θ} για γωνία πρόσπτωσης θ , ως προς την αντίστοιχη τιμή του γινομένου για κάθετη πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας (τ_a)₀:

$$K_{\tau_a}(\theta) = \frac{(\tau_a)_{\theta}}{(\tau_a)_0} \quad (5.23)$$

Με τον ορισμό του συντελεστή τροποποίησης της γωνίας πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας, η σχέση του βαθμού απόδοσης γίνεται:

$$\eta = F_R \cdot \left[K_{\tau_a}(\theta) \cdot (\tau_a)_c - \frac{U_L \cdot (T_{fi} - T_a)}{G_t} \right] \quad (5.24)$$

Για τον υπολογισμό του συντελεστή τροποποίησης της γωνίας πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας έχει εισαχθεί η ακόλουθη εμπειρική σχέση [5] για την περίπτωση επίπεδων ηλιακών συλλεκτών:

$$K_{\tau_a}(\theta) = 1 - b_0 \cdot \left(\frac{1}{\cos(\theta)} - 1 \right) - b_1 \cdot \left(\frac{1}{\cos(\theta)} - 1 \right)^2 \quad (5.25)$$

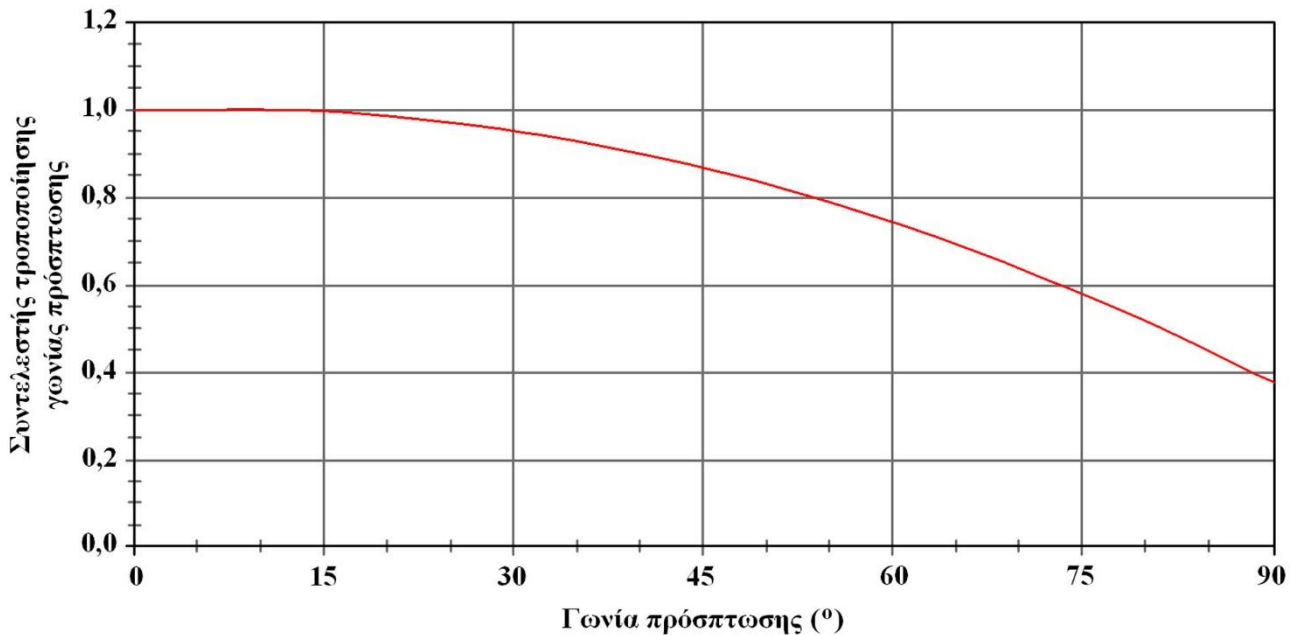
Η σχέση αυτή ισχύει για γωνίες πρόσπτωσης θ της ηλιακής ακτινοβολίας μικρότερες των 60°. Για συλλέκτες με ένα κάλυμμα, μπορεί να τεθεί $b_1 = 0$. Χαρακτηριστικές τιμές του συντελεστή b_0 είναι της τάξης του 0,1.

Μία εναλλακτική σχέση υπολογισμού του συντελεστή $K_{\tau_a}(\theta)$ δίνεται από τη σχέση [6]:

$$K_{\tau_a}(\theta) = 1 - b_0 \cdot \left(\frac{1}{\cos(\theta)} - 1 \right)^n \quad (5.26)$$

η οποία μπορεί να εφαρμοστεί και για γωνίες πρόσπτωσης μεγαλύτερες των 60° με τον κατάλληλο ορισμό των παραμέτρων b_0 και n . Χαρακτηριστικές τιμές του συντελεστή b_0 είναι της τάξης του 0,1.

Για τον υπολογισμό του συντελεστή τροποποίησης της γωνίας πρόσπτωσης του ηλιακού συλλέκτη, ή των παραμέτρων b_0 , b_1 , και n η ASHRAE υποδεικνύει την εκτέλεση πειραματικών μετρήσεων για διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης και τον υπολογισμό του γινομένου (τ_a) _{θ} για καθεμία από αυτές. Μία χαρακτηριστική καμπύλη μεταβολής του συντελεστή τροποποίησης γωνίας πρόσπτωσης παρουσιάζεται στο σχήμα 5.17.



Σχήμα 5.17: Διακύμανση του συντελεστή τροποποίησης γωνίας πρόσπτωσης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας.

5.3.4.β. Σταθερά χρόνου συλλέκτη

Ο τελευταίος όρος, που επηρεάζει την απόδοση του ηλιακού συλλέκτη, είναι η θερμοχωρητικότητα του. Ο όρος αυτός προσεγγίζεται από τη σταθερά χρόνου του συλλέκτη. Η σταθερά χρόνου του συλλέκτη ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται για το ρευστό που εξέρχεται από το συλλέκτη προκειμένου, μετά την απότομη διακοπή της πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας, να μειωθεί η θερμοκρασία του κατά ένα ποσοστό:

$$1 - \frac{1}{e} = 0,632$$

όπου $e = 2,72$ ο φυσικός νεπέριος αριθμός.

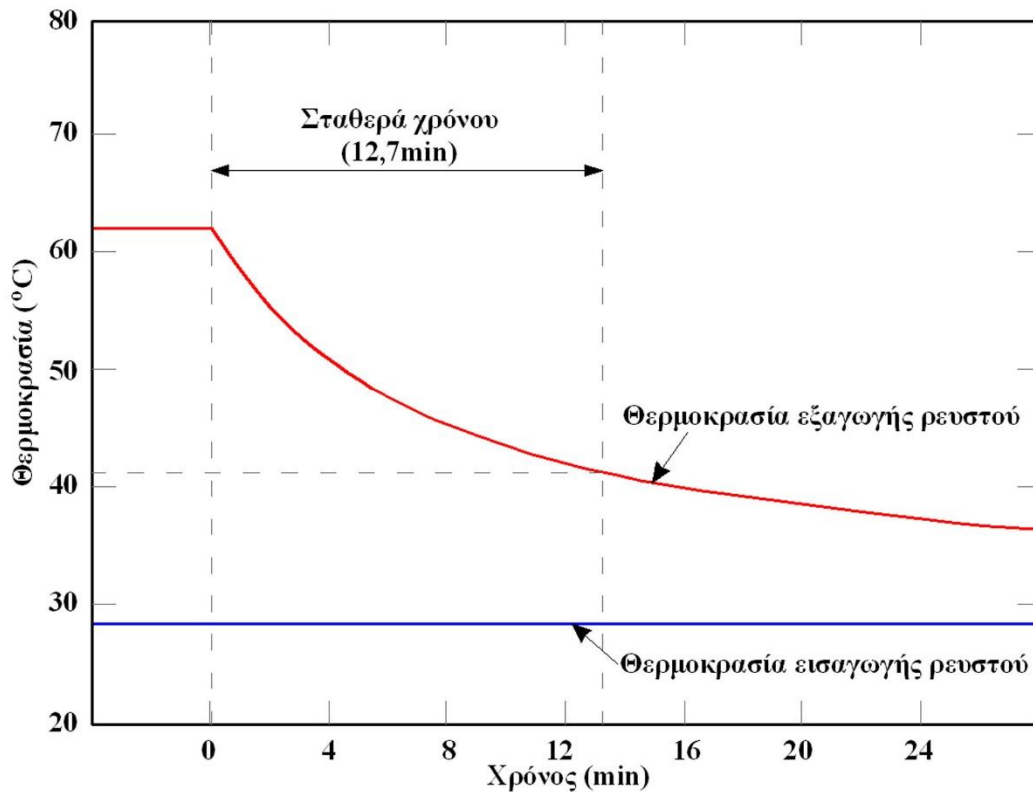
Η σταθερά χρόνου υπολογίζεται πειραματικά ως εξής. Ο ηλιακός συλλέκτης λειτουργεί σε μόνιμες συνθήκες, κατά προτίμηση με θερμοκρασία εισόδου του ρευστού σε αυτό κοντά στη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Κάποια στιγμή η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία διακόπτεται, π.χ. καλύπτοντας το συλλέκτη με ένα αδιαφανές κάλυμμα. Με τη λειτουργία του κυκλοφορητή του υδραυλικού κυκλώματος να συνεχίζεται, μετράται η θερμοκρασία εξόδου του ρευστού από το συλλέκτη. Η σταθερά χρόνου είναι ο χρόνος που απαιτείται, ώστε να ικανοποιηθεί η ακόλουθη σχέση:

$$\frac{T_{o,t} - T_{fi}}{T_{o,init} - T_{fi}} = \frac{1}{e} = 0,368 \quad (5.27)$$

όπου:

- $T_{o,t}$: η θερμοκρασία εξόδου του ρευστού από το συλλέκτη μετά από χρόνο t από τη διακοπή της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας
- $T_{o,init}$: η θερμοκρασία εξόδου του ρευστού από το συλλέκτη τη χρονική στιγμή της διακοπής της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας
- T_{fi} : η θερμοκρασία εισόδου του ρευστού στον ηλιακό συλλέκτη

Στο σχήμα 5.18 παρουσιάζεται τυπική διακύμανση της θερμοκρασίας εξόδου του νερού από ηλιακό συλλέκτη κατά την εκτέλεση μέτρησης σταθεράς χρόνου, με αέρα εργαζόμενο μέσο και διπλό κάλυμμα [7].



Σχήμα 5.18: Διακύμανση θερμοκρασίας εξόδου ρευστού από ηλιακό συλλέκτη αέρα, μετά την απότομη διακοπή της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.

Για θερμοκρασία εισόδου ρευστού 28°C και αρχική θερμοκρασία εξόδου ρευστού από τον ηλιακό συλλέκτη 63°C , η χρονική σταθερά του ηλιακού συλλέκτη θα είναι ο χρόνος που χρειάζεται με παρέλθει μετά τη διακοπή της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στο συλλέκτη, ώστε η θερμοκρασία εξόδου του νερού να μειωθεί στους:

$$\frac{T_{o,t} - T_{fi}}{T_{o,init} - T_{fi}} = 0.368 \Leftrightarrow T_{o,t} = (T_{o,init} - T_{fi}) \cdot 0,368 + T_{fi} \Leftrightarrow T_{o,t} = (63 - 28) \cdot 0,368 + 28$$

$$\Leftrightarrow T_{o,t} = 40,88^{\circ}\text{C}$$

Στην περίπτωση αυτή, η σταθερά χρόνου υπολογίζεται σε 12,7 min.

5.3.5. Διαδικασία υπολογισμού θερμικής ισχύος ηλιακού συλλέκτη

Στην παρούσα ενότητα αναλύεται η διαδικασία υπολογισμού της θερμικής ισχύος από ένα ηλιακό συλλέκτη, με βάση τις σχέσεις που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες. Η παρούσα ενότητα στοχεύει στο να ενοποιήσει όλες τις πληροφορίες που προηγήθηκαν, να διακρίνει τα δεδομένα, τις παραδοχές και τα αποτελέσματα της διαδικασίας υπολογισμού της παραγόμενης θερμικής ισχύος από ένα ηλιακό συλλέκτη, την οποία παρουσιάζει αναλυτικά βήμα προς βήμα.

Σε ένα πραγματικό πρόβλημα υπολογισμού της παραγωγής θερμικής ισχύος από ένα ηλιακό συλλέκτη για ένα χρονικό διάστημα, π.χ. μία ημέρα, ένα μήνα ή ένα έτος, το συνολικό χρονικό διάστημα υπολογισμού διακριτοποιείται σε ένα αριθμό υπολογιστικών χρονικών βημάτων, π.χ. ωριαίων, για κάθε ένα από τα οποία εφαρμόζεται η παρακάτω περιγραφόμενη μεθοδολογία.

Η διαδικασία υπολογισμού της παραγωγής θερμικής ισχύος από ένα ηλιακό συλλέκτη έχει ως εξής:

1. Εισαγωγή βασικών δεδομένων υπολογισμού.

Με βάση τη σχέση 5.1, τα βασικά δεδομένα υπολογισμού που πρέπει να εισαχθούν είναι:

- Η συνολική εγκατεστημένη ενεργός επιφάνεια ηλιακών συλλεκτών A_c σε m^2 . Με τον όρο «ενεργή επιφάνεια» αναφερόμαστε στην καθαρή επιφάνεια του ηλιακού συλλέκτη που αλληλεπιδρά με την ηλιακή ακτινοβολία και όχι τη συνολική, στην οποία συμπεριλαμβάνεται και το πλαίσιο του συλλέκτη. Η ενεργή επιφάνεια του ηλιακού συλλέκτη ταυτίζεται με την επιφάνεια της απορροφητικής πλάκας.
- Η ολική προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία G_i σε W/m^2 , η οποία προκύπτει ως το άθροισμα της άμεσης, της διάχυτης και της ανακλώμενης από γειτονικές επιφάνειες ακτινοβολίας. Η συνολική προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία υπολογίζεται με συγκεκριμένη διαδικασία, βάσει των μεθόδων και της θεωρίας περί ηλιακής γεωμετρίας και ακτινοβολίας. Μία αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας υπολογισμού της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε επιφάνεια υπό κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο δίδεται στο σύγγραμμα «Θέρμανση – Ψύξη – Κλιματισμός» της δράσης «Κάλυψος» (Κατσαπρακάκης – Μονιάκης).
- Η θερμοκρασία περιβάλλοντος T_a , η οποία πρέπει να διατίθεται υπό τη μορφή χρονοσειράς ανά χρονικό βήμα υπολογισμού, με βάση μετρήσεις από μετεωρολογικούς σταθμούς στην ευρύτερη περιοχή ενδιαφέροντος.
- Η ειδική θερμοχωρητικότητα του εργαζόμενου μέσου c_p σε $kJ/(kg \cdot K)$. Στην περίπτωση χρήσης διαλύματος νερού – γλυκόλης ως εργαζόμενου μέσου, η ειδική θερμοχωρητικότητα πρακτικά μπορεί να ληφθεί ίση με αυτήν του νερού, δηλαδή $4,184 kJ/(kg \cdot K)$. Σε περίπτωση χρήσης αέρα, η ειδική θερμοχωρητικότητά του υπό σταθερή πίεση λαμβάνεται ίση με $c_p = 1,006 kJ/(kg \cdot K)$.
- Κατασκευαστικά στοιχεία και ιδιότητες των υλικών του συλλέκτη, όπως:
 - ο αριθμός N των προστατευτικών διαφανών καλυμμάτων του συλλέκτη,
 - το πάχος της μόνωσης του συλλέκτη t_e και t_b στις πλευρικές επιφάνειές του και στη βάση του αντίστοιχα, σε m ,
 - η απόσταση W σε m μεταξύ δύο διαδοχικών σωληνώσεων του ηλιακού συλλέκτη (βλέπε σχήμα 5.12),
 - η εξωτερική διάμετρος D των σωληνώσεων του ηλιακού συλλέκτη σε m ,
 - η εσωτερική διάμετρος D_i των σωληνώσεων του ηλιακού συλλέκτη σε m ,
 - οι συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας της μόνωσης του συλλέκτη k_e και k_b στις πλευρικές επιφάνειές του και στη βάση του αντίστοιχα, σε $W/(m \cdot K)$,
 - ο συντελεστής εκπομπής ακτινοβολίας ε_g του διαφανούς καλύμματος του ηλιακού συλλέκτη,
 - ο συντελεστής εκπομπής ακτινοβολίας ε_p της απορροφητικής πλάκας του ηλιακού συλλέκτη,
 - ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας k της απορροφητικής πλάκας σε $W/(m \cdot K)$,
 - το πάχος δ της απορροφητικής πλάκας σε m ,
 - ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας k_b του υλικού της σύνδεσης των σωληνώσεων του συλλέκτη με την απορροφητική πλάκα σε $W/(m \cdot K)$,
 - το πλάτος b της σύνδεσης των σωληνώσεων του συλλέκτη με την απορροφητική πλάκα σε m ,
 - το πάχος γ της σύνδεσης των σωληνώσεων του συλλέκτη με την απορροφητική πλάκα σε m .

- Στοιχεία της συγκεκριμένης εγκατάστασης του συλλέκτη, όπως:
 - η κλίση β εγκατάστασης του συλλέκτη σε μοίρες,
 - ο συντελεστής συναγωγής μεταφοράς θερμότητας h_{fi} από το εργαζόμενο μέσο προς τις σωληνώσεις του ηλιακού συλλέκτη σε $W/(m^2 \cdot K)$, ο οποίος λαμβάνεται από πίνακες για ροή νερού ή αέρα εντός κυλινδρικών αγωγών, συναρτήσει της ταχύτητας ροής,
 - οι συντελεστές θερμικής μετάβασης h_e και h_b για τη μεταφορά θερμότητας από τις πλευρικές επιφάνειές του και τη βάση του αντίστοιχα, σε $W/(m^2 \cdot K)$, οι οποίοι υπολογίζονται με βάση τους συντελεστές θερμικής συναγωγής του αέρα h_w και ακτινοβολίας των υλικών του συλλέκτη στη θέση εγκατάστασης, [8]
 - η παροχή μάζας του εργαζόμενου μέσου στο υδραυλικό κύκλωμα \dot{m} των ηλιακών συλλεκτών σε kg/s , που καθορίζεται από το θερμικό φορτίο και την αντλία του κυκλώματος.

2. Παραδοχές – υποθέσεις τιμών.

Για την εκτέλεση της διαδικασίας υπολογισμού απαιτείται η αρχική υπόθεση κάποιας τιμής για τη μέση θερμοκρασία T_{pm} της απορροφητικής πλάκας του ηλιακού συλλέκτη. Για επίπεδους ηλιακούς με υγρό εργαζόμενο μέσο και παροχή μάζας μέσου της τάξης των $0,01 - 0,02 \text{ kg}/(m^2 \cdot s)$, μια λογική υπόθεση για τη μέση θερμοκρασία της απορροφητικής πλάκας είναι:

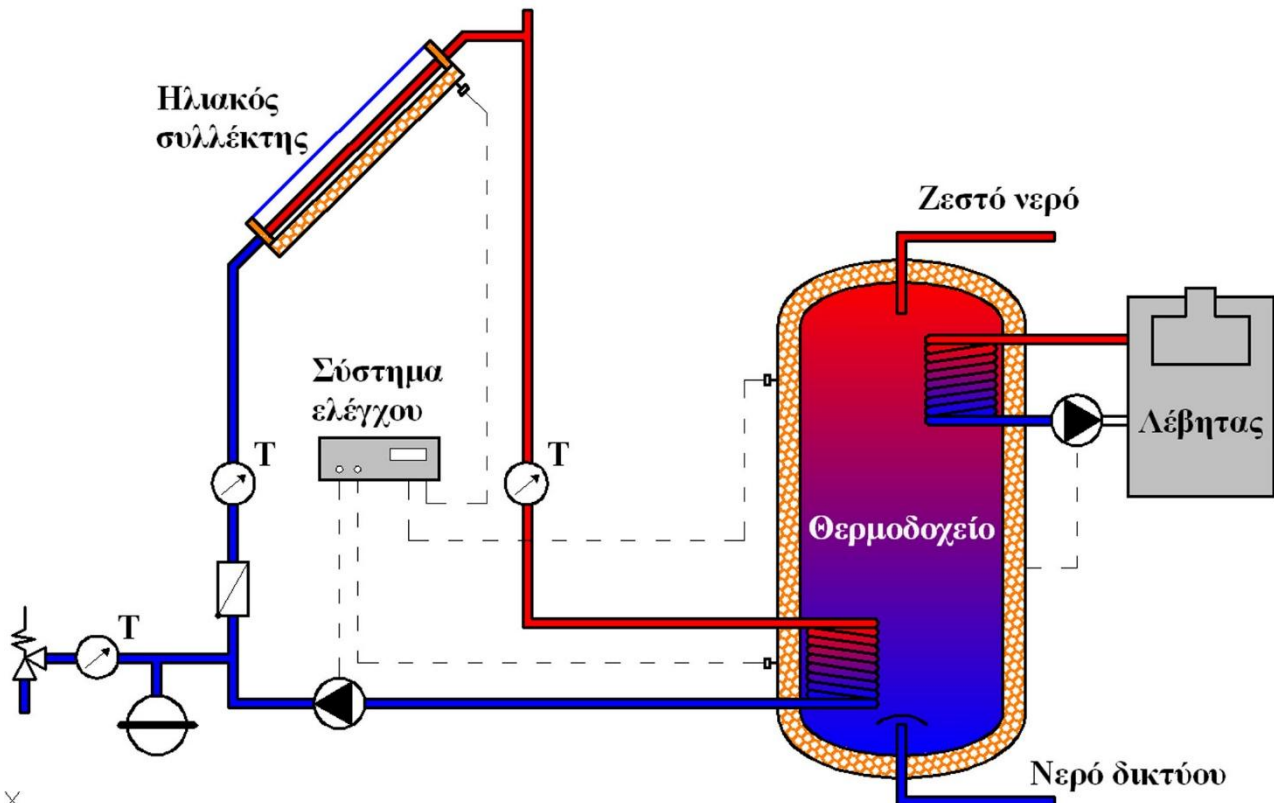
$$T_{pm} = T_{fi} + 10^\circ \text{C} \quad (5.28)$$

όπου T_{fi} η θερμοκρασία εισόδου του εργαζόμενου μέσου στον ηλιακό συλλέκτη. Στην περίπτωση ηλιακών συλλεκτών με εργαζόμενο μέσο αέρα, μια λογική προσέγγιση είναι:

$$T_{pm} = T_{fi} + 20^\circ \text{C}. \quad (5.29)$$

Η θερμοκρασία εισόδου του εργαζόμενου μέσου στον ηλιακό συλλέκτη T_{fi} εξαρτάται από τον τρόπο λειτουργίας του συλλέκτη. Στην περίπτωση ανοιχτού κυκλώματος, κατά το οποίο ο συλλέκτης αντλεί νερό από μία δεξαμενή αποθήκευσης (π.χ. ένα θερμοδοχείο), η θερμοκρασία εισόδου T_{fi} θα ισούται με τη θερμοκρασία του αποθηκευμένου νερού στο θερμοδοχείο.

Στην περίπτωση κλειστού κυκλώματος, κατά την οποία το πρωτεύον υδραυλικό κύκλωμα των ηλιακών συλλεκτών αποδίδει θερμότητα μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας σε μία δεξαμενή θερμικής αποθήκευσης (σχήμα 5.19), τότε η θερμοκρασία εισαγωγής του εργαζόμενου μέσου στους συλλέκτες θα ισούται με τη θερμοκρασία επιστροφής του πρωτεύοντος υδραυλικού κυκλώματος.



× **Σχήμα 5.19:** Υδραυλικό κάθετο διάγραμμα διασύνδεσης ηλιακών συλλεκτών με δεξαμενής θερμικής αποθήκευσης μέσω ανεξάρτητου κυκλώματος.

Στην περίπτωση αυτή, αν \dot{Q}_{tot} είναι η συνολική απορριπτόμενη θερμική ισχύς από το πρωτεύον κύκλωμα των ηλιακών συλλεκτών σε εναλλάκτη θερμότητας και απώλειες υδραυλικού δικτύου, T_{fo} είναι η θερμοκρασία εξόδου του εργαζόμενου μέσου από τους ηλιακούς συλλέκτες και \dot{m} η παροχή μάζας του εργαζόμενου μέσου στο πρωτεύον κύκλωμα, τότε μεταξύ των μεγεθών αυτών ισχύει σχέση:

$$\dot{Q}_{\text{tot}} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{\text{fo}} - T_{\text{fi}}) \quad (5.30)$$

Περισσότερα για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας επιστροφής του εργαζόμενου μέσου στους ηλιακούς συλλέκτες θα παρουσιαστούν στην επόμενη ενότητα, όπου θα γίνει λόγος για τα μέσα αποθήκευσης.

3. Υπολογισμός συντελεστή θερμικής διαπερατότητας U_L .

Ο ολικός συντελεστής θερμικής διαπερατότητας U_L υπολογίζεται από τη σχέση 5.9:

$$U_L = U_t + U_b + U_e.$$

Οι συντελεστές θερμικής διαπερατότητας U_b και U_e από τη βάση (bottom) και από τις πλευρικές επιφάνειες (edges) του συλλέκτη αντίστοιχα δίνονται από τη σχέση 5.15:

$$U_{e,b} = \frac{1}{\frac{t_{e,b}}{k_{e,b}} + \frac{1}{h_{e,b}}}.$$

5.10: Ο συντελεστή θερμικής διαπερατότητας U_t από την κορυφή (top) του συλλέκτη δίνεται από τη σχέση

$$U_t = \frac{1}{\frac{C}{T_{pm}} \cdot \left(\frac{T_{pm} - T_a}{N + f} \right)^e + \frac{1}{h_t}} + \frac{\sigma \cdot (T_{pm} + T_a) \cdot (T_{pm}^2 + T_a^2)}{\frac{1}{\varepsilon_p + 0,00591 \cdot N \cdot h_t} + \frac{2 \cdot N + f - 1 + 0,133\varepsilon_p}{\varepsilon_g} - N}$$

Στην ανωτέρω σχέση:

- Η παράμετρος C υπολογίζεται από τη σχέση 5.11 συναρτήσει της κλίσης εγκατάστασης β των ηλιακών συλλεκτών.
- Η παράμετρος f υπολογίζεται από τη σχέση 5.12 συναρτήσει του αριθμού N των διαφανών καλυμμάτων των ηλιακών συλλεκτών, του συντελεστή εκπομπής ακτινοβολίας ε_p της απορροφητικής πλάκας και του συντελεστή θερμικής μετάβασης του αέρα h_t .
- Η παράμετρος e υπολογίζεται από τη σχέση 5.13 συναρτήσει της μέσης θερμοκρασίας της απορροφητικής πλάκας T_{pm} .
- Η παράμετρος σ είναι η σταθερά Stefan – Boltzmann για την εκπομπή ακτινοβολίας ίση με $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$.

4. Υπολογισμός συντελεστή απωλειών θερμικής ισχύος F_R .

Ο συντελεστής απωλειών θερμικής ισχύος F_R υπολογίζεται από τη σχέση 5.2:

$$F_R = \frac{\dot{m} \cdot c_p}{A_c \cdot U_L} \left[1 - \exp \left(- \frac{A_c \cdot U_L \cdot F'}{\dot{m} \cdot c_p} \right) \right]$$

Στην ανωτέρω σχέση όλα τα μεγέθη είναι γνωστά. Η παράμετρος F' υπολογίζεται από τη σχέση 5.3 για ανοιχτό ηλιακό συλλέκτη (χωρίς κάλυμμα) και από τη σχέση 5.4 για επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες:

$$F' = \frac{\frac{1}{U_L}}{W \cdot \left[\frac{1}{U_L \cdot [D + (W - D) \cdot F]} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi \cdot D_i \cdot h_{fi}} \right]}$$

Στην ανωτέρω σχέση, η απόδοση της απορροφητικής πλάκας του συλλέκτη F δίνεται από τη σχέση 5.5, συναρτήσει των διαστάσεων του συλλέκτη W και D και μίας νέας παραμέτρου m . Η νέα αυτή παράμετρος m δίνεται από τη σχέση 5.6, συναρτήσει του ολικού συντελεστή θερμικής διαπερατότητας του συλλέκτη U_L , του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας k και του πάχους δ της πλάκας. Η αγωγιμότητα C_b της σύνδεσης των σωληνώσεων του συλλέκτη με την απορροφητική πλάκα υπολογίζεται από τη σχέση 5.7 συναρτήσει του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας k_b του υλικού της σύνδεσης, του πλάτους της σύνδεσης b σε m και του πάχους της σύνδεσης γ σε m .

5. Υπολογισμός γινομένου διαπερατότητας – απορροφητικότητας.

Το γινόμενο διαπερατότητας – απορροφητικότητας θα πρέπει να υπολογίζεται για κάθε χρονικό βήμα υπολογισμού συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας. Για το σκοπό αυτό, απαιτείται η γνώση της διακύμανσης του γινομένου συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία παρέχεται από τον κατασκευαστή του συλλέκτη σε μορφή διαγράμματος ή πίνακα (βλέπε σχήμα 5.12).

Απαραίτητη είναι, επίσης, η γνώση του γινομένου $(\tau)_n$ για κάθετη πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας στον ηλιακό συλλέκτη.

Για μεγαλύτερη ακρίβεια, δύναται να χρησιμοποιηθεί τελικά το ενεργό γινόμενο διαπερατότητας – απορροφητικότητας, το οποίο υπολογίζεται, ανάλογα με τον τύπο του διαφανούς καλύμματος του ηλιακού συλλέκτη, από τη σχέση 5.17 ή τη σχέση 5.18.

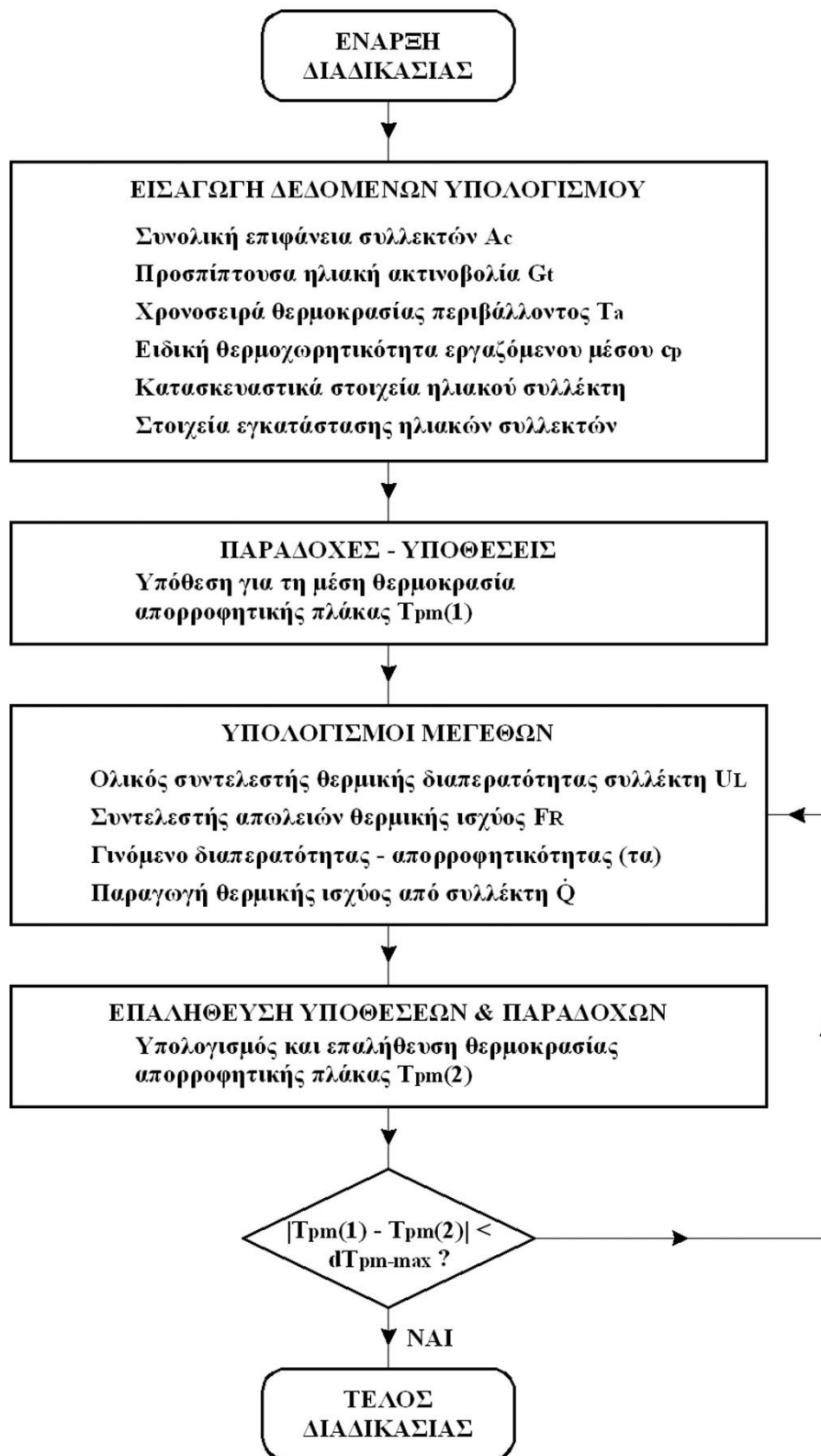
6. Υπολογισμός της παραγωγής θερμικής ισχύος από τον ηλιακό συλλέκτη.

Η παραγόμενη θερμική ισχύς από τον ηλιακό συλλέκτη δίνεται τελικά από τη σχέση 5.1. Όλα τα μεγέθη που εμφανίζονται στη σχέση αυτή έχουν είτε υποτεθεί είτε υπολογιστεί, και, συνεπώς, είναι γνωστά. Άρα είναι πλέον δυνατός ο υπολογισμός της παραγόμενης θερμικής ισχύος από τον ηλιακό συλλέκτη.

7. Επαλήθευση αρχικών υποθέσεων.

Έχοντας πλέον υπολογίσει την παραγωγή θερμικής ισχύος από τους ηλιακούς συλλέκτες, θα πρέπει να επαληθευτεί η αρχική υπόθεση για τη μέση θερμοκρασία της απορροφητικής πλάκας T_{pm} , μέσω της σχέσης 5.14. Αν υπάρχει σημαντική απόκλιση ανάμεσα στην αρχική υπόθεση για τη θερμοκρασία T_{pm} και σε αυτή που υπολογίζεται μετά την ολοκλήρωση της υπολογιστικής διαδικασίας, τότε επαναλαμβάνονται τα βήματα 3 – 6 με τη νέα υπολογισθείσα τιμή της T_{pm} . Η επαναληπτική διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου υπάρξει σύγκλιση της αρχικής και τελικής υπολογισθείσας τιμής της T_{pm} .

Η παραπάνω περιγραφείσα μεθοδολογία υπολογισμού παρουσιάζεται γραφικά στο σχήμα 5.20.



Σχήμα 5.20: Διάγραμμα ροής υπολογιστικής διαδικασίας θερμικής ισχύος ηλιακού συλλέκτη.

Παράδειγμα 5.1.

Υπολογισμός παραγόμενης θερμικής ισχύος από επίπεδο ηλιακό συλλέκτη

Να υπολογιστεί η παραγωγή τελικής θερμικής ισχύος και ο βαθμός απόδοσης επίπεδου ηλιακού συλλέκτη με τα παρακάτω κατασκευαστικά στοιχεία και για τις παρακάτω συνθήκες λειτουργίας.

συνολική εγκατεστημένη ενεργός επιφάνεια A_c :	2m^2
ολική προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία G_i :	$700\text{W}/\text{m}^2$
θερμοκρασία περιβάλλοντος T_a :	20°C
εργαζόμενο μέσο:	νερό
εισαγωγή μέσου:	δίκτυο ύδρευσης
αριθμός N των προστατευτικών διαφανών καλυμμάτων του συλλέκτη:	1
πάχος μόνωσης του συλλέκτη t_e και t_b στις πλευρικές επιφάνειές του και στη βάση του αντίστοιχα:	0,007m
συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας της μόνωσης του συλλέκτη k_e και k_b στις πλευρικές επιφάνειές του και στη βάση του αντίστοιχα:	$0,0245\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
απόσταση W μεταξύ δύο διαδοχικών σωληνώσεων του ηλιακού συλλέκτη:	0,115m
εξωτερική διάμετρος D των σωληνώσεων του ηλιακού συλλέκτη:	0,011m
εσωτερική διάμετρος D_i των σωληνώσεων του ηλιακού συλλέκτη:	0,010m
συντελεστής εκπομπής ακτινοβολίας ε_p της απορροφητικής πλάκας του ηλιακού συλλέκτη:	0,95
συντελεστής εκπομπής ακτινοβολίας ε_g του διαφανούς καλύμματος του ηλιακού συλλέκτη:	0,88
συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας k της απορροφητικής πλάκας:	$350\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
πάχος δ της απορροφητικής πλάκας:	0,0005m
συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας k_b του υλικού της σύνδεσης των σωληνώσεων του συλλέκτη με την απορροφητική πλάκα:	$1.000\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
πλάτος b της σύνδεσης των σωληνώσεων του συλλέκτη με την απορροφητική πλάκα	0,120m
πάχος γ της σύνδεσης των σωληνώσεων του συλλέκτη με την απορροφητική πλάκα	0,060m
κλίση β εγκατάστασης του συλλέκτη:	35°
συντελεστής συναγωγής μεταφοράς θερμότητας h_{fi} από το εργαζόμενο μέσο προς τις σωληνώσεις του ηλιακού συλλέκτη:	$3.000\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
συντελεστές θερμικής μετάβασης h_i , h_e και h_b για τη μεταφορά θερμότητας από την κορυφή του, τις πλευρικές επιφάνειές του και τη βάση του αντίστοιχα:	$10\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
παροχή μάζας του εργαζόμενου μέσου στο υδραυλικό κύκλωμα:	$0,02\text{kg}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$
δείκτης διάθλασης καλύμματος συλλέκτη:	1,526
διαπερατότητα καλύμματος σε κάθετη πρόσπτωση ακτινοβολίας:	0,941
απορροφητικότητα πλάκας για κάθετη πρόσπτωση ακτινοβολίας:	0,890
γωνία πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας:	20° .

Λύση

Ακολουθώντας τη μεθοδολογία που περιγράφεται παραπάνω, η διαδικασία υπολογισμού έχει ως εξής:

1. **Αρχική υπόθεση για θερμοκρασία απορροφητικής πλάκας:**

Με δεδομένο ότι η θερμοκρασία εισαγωγής T_{fi} του εργαζόμενου μέσου στους συλλέκτες είναι η θερμοκρασία του νερού στο δίκτυο ύδρευσης, η οποία μπορεί να ληφθεί ίση με 16°C , η αρχική υπόθεση για τη θερμοκρασία της απορροφητικής πλάκας προκύπτει από τη σχέση 5.28:

$$T_{pm} = T_{fi} + 10^{\circ}\text{C} \Leftrightarrow T_{pm} = 16 + 10^{\circ}\text{C} \Leftrightarrow T_{pm} = 26^{\circ}\text{C} = 299\text{K}$$

2. **Υπολογισμός συντελεστή θερμικής διαπερατότητας U_L .**

Ο ολικός συντελεστής θερμικής διαπερατότητας U_L υπολογίζεται από τη σχέση 5.9:

$$U_L = U_t + U_b + U_e.$$

Οι συντελεστές θερμικής διαπερατότητας U_b και U_e από τη βάση (bottom) και από τις πλευρικές επιφάνειες (edges) του συλλέκτη αντίστοιχα δίνονται από τη σχέση 5.15:

$$U_{e,b} = \frac{1}{\frac{t_{e,b}}{k_{e,b}} + \frac{1}{h_{e,b}}} \Leftrightarrow U_{e,b} = \frac{1}{\frac{0,007\text{m}}{0,0245\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})} + \frac{1}{10\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})}} \Leftrightarrow U_{e,b} = 2,593\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}).$$

Ο συντελεστής θερμικής διαπερατότητας U_t από την κορυφή (top) του συλλέκτη δίνεται από τη σχέση 5.10, όπου:

$$C = 520 \cdot (1 - 0,000051 \cdot \beta^2) \Leftrightarrow C = 520 \cdot (1 - 0,000051 \cdot 35^2) \Leftrightarrow C = 487,513 \quad (\text{σχέση 5.11})$$

$$f = (1 + 0,089 \cdot h_t - 0,1166 \cdot h_t \cdot \varepsilon_p) \cdot (1 + 0,07866 \cdot N) \Leftrightarrow$$

$$f = (1 + 0,089 \cdot 10 - 0,1166 \cdot 10 \cdot 0,95) \cdot (1 + 0,07866 \cdot 1) \Leftrightarrow f = 0,844 \quad (\text{σχέση 5.12})$$

$$e = 0,430 \cdot \left(1 - \frac{100}{T_{pm}}\right) \Leftrightarrow e = 0,430 \cdot \left(1 - \frac{100}{299}\right) \Leftrightarrow e = 0,286. \quad (\text{σχέση 5.13})$$

Τελικά ο συντελεστής θερμικής διαπερατότητας από την κορυφή του επίπεδου συλλέκτη υπολογίζεται από τη σχέση 5.10 ως εξής:

$$U_i = \frac{1}{\frac{N}{\frac{C}{T_{pm}} \cdot \left(\frac{T_{pm} - T_a}{N+f}\right)^e + \frac{1}{h_t}} + \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_p + 0,00591 \cdot N \cdot h_t} + \frac{\sigma \cdot (T_{pm} + T_a) \cdot (T_{pm}^2 + T_a^2)}{2 \cdot N + f - 1 + 0,133 \cdot \varepsilon_p - N}} \Leftrightarrow$$

$$U_i = \frac{1}{\frac{1}{\frac{487,513}{299} \cdot \left(\frac{299 - 293}{1 + 0,844}\right)^{0,286} + \frac{1}{10}} + \frac{1}{\frac{1}{0,95 + 0,00591 \cdot 1 \cdot 10} + \frac{5,67 \cdot 10^{-8} \cdot (299 + 293) \cdot (299^2 + 293^2)}{2 \cdot 1 + 0,844 - 1 + 0,133 \cdot 0,95 - 1}} \Leftrightarrow$$

$$U_i = 4,498 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Πλέον, ο ολικός συντελεστής θερμικής διαπερατότητας U_L υπολογίζεται από τη σχέση 5.9:

$$U_L = U_i + U_b + U_e \Leftrightarrow U_L = 4,498 + 2,593 + 2,593 \Leftrightarrow U_L = 9,684 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

3. Υπολογισμός συντελεστή απωλειών θερμικής ισχύος F_R .

Αρχικά η παράμετρος F' υπολογίζεται από τη σχέση 5.4 για επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες:

$$F' = \frac{1}{U_L \cdot \left[\frac{1}{U_L \cdot [D + (W - D) \cdot F]} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi \cdot D_i \cdot h_{fi}} \right]}$$

όπου η απόδοση της απορροφητικής πλάκας F δίνεται από τη σχέση:

$$F = \frac{\tanh\left[\frac{m \cdot (W - D)}{2}\right]}{m \cdot (W - D)} \cdot 2 \quad (\text{σχέση 5.5})$$

με την παράμετρο m να ορίζεται συναρτήσει του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας k και του πάχους της πλάκας δ από τη σχέση:

$$m = \sqrt{\frac{U_L}{k \cdot \delta}} \Leftrightarrow m = \sqrt{\frac{9,684}{350 \cdot 0,0005}} \Leftrightarrow m = 23,523 \frac{1}{\text{m}} \quad (\text{σχέση 5.6})$$

Η παράμετρος F υπολογίζεται πλέον από τη σχέση:

$$F = \frac{\tanh\left[\frac{m \cdot (W - D)}{2}\right]}{m \cdot (W - D)} \Leftrightarrow F = \frac{\tanh\left[\frac{23,523 \cdot (0,115 - 0,011)}{2}\right]}{23,523 \cdot (0,115 - 0,011)} \Leftrightarrow F = 0,687 \quad (\text{σχέση 5.5})$$

Η αγωγιμότητα της σύνδεσης των σωληνώσεων του συλλέκτη με την απορροφητική πλάκα εκτιμάται από τη σχέση:

$$C_b = \frac{k_b \cdot b}{\gamma} \Leftrightarrow C_b = \frac{1.000 \cdot 0,120}{0,060} \Leftrightarrow C_b = 2.000 \frac{W}{m \cdot K} \quad (\text{σχέση 5.7})$$

Πλέον η παράμετρος F' υπολογίζεται από τη σχέση 5.4:

$$F' = \frac{\frac{1}{U_L}}{W \cdot \left[\frac{1}{U_L \cdot [D + (W - D) \cdot F]} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi \cdot D_i \cdot h_{fi}} \right]} \Leftrightarrow$$

$$F' = \frac{\frac{1}{9,684}}{0,115 \cdot \left[\frac{1}{9,684 \cdot [0,011 + (0,115 - 0,011) \cdot 0,687]} + \frac{1}{2.000} + \frac{1}{\pi \cdot 0,010 \cdot 3.000} \right]} \Leftrightarrow F' = 0,711$$

Πλέον είναι δυνατός ο υπολογισμός του συντελεστή απωλειών θερμικής ισχύος F_R . Η συνολική παροχή μάζας για επιφάνεια $2m^2$ προκύπτει $0,04kg/s$.

$$F_R = \frac{\dot{m} \cdot c_p}{A_c \cdot U_L} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{A_c \cdot U_L \cdot F'}{\dot{m} \cdot c_p}\right) \right] \Leftrightarrow$$

$$F_R = \frac{0,04 \cdot 4.184}{2 \cdot 9,684} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{2 \cdot 4,498 \cdot 0,711}{0,04 \cdot 4,184}\right) \right] \Leftrightarrow F_R = 0,682 \quad (\text{σχέση 5.2})$$

4. Υπολογισμός γινομένου διαπερατότητας - απορροφητικότητας ($\tau\alpha$).

Με βάση τα δεδομένα της άσκησης, για κάθετη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας η διαπερατότητα του καλύμματος δίνεται $0,941$ και η απορροφητικότητα της πλάκας δίνεται $0,890$. Συνεπώς το γινόμενο διαπερατότητας – απορροφητικότητας προκύπτει για κάθετη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας ίσο με:

$$(\tau\alpha)_n = 0,941 \cdot 0,890 = 0,837.$$

Με δεδομένο το συντελεστή διάθλασης του καλύμματος ($1,526$), από το σχήμα 5.15 για γωνία πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας 20° και ένα κάλυμμα υπολογίζεται ο λόγος $(\tau\alpha)/(\tau\alpha)_n = 0,99$. Άρα το γινόμενο $(\tau\alpha)$ για γωνία πρόσπτωσης 20° υπολογίζεται:

$$(\tau\alpha) = (\tau\alpha)/(\tau\alpha)_n \cdot (\tau\alpha)_n = 0,99 \cdot 0,837 = 0,829.$$

Τέλος, προκειμένου να ληφθεί υπόψη η επίδραση της απορρόφησης ακτινοβολίας από το κάλυμμα του ηλιακού συλλέκτη, υπολογίζεται τελικά το ενεργό γινόμενο διαπερατότητας – απορροφητικότητας για απλό τζάμι από τη σχέση:

$$(\tau\alpha)_e = 1,02 \cdot (\tau\alpha) \Leftrightarrow (\tau\alpha)_e = 1,02 \cdot 0,829 \Leftrightarrow (\tau\alpha)_e = 0,846 \quad (\text{σχέση 5.17})$$

5. Υπολογισμός παραγωγής θερμικής ισχύος από τον ηλιακό συλλέκτη.

Πλέον είναι δυνατός ο υπολογισμός της παραγωγής θερμικής ισχύος από τον ηλιακό συλλέκτη:

$$\dot{Q} = A_c \cdot F_R \cdot [G_t \cdot (\tau \cdot \alpha) - U_L \cdot (T_{fi} - T_a)] \Leftrightarrow \dot{Q} = 2 \cdot 0,682 \cdot [700 \cdot 0,846 - 9,684 \cdot (16 - 20)] \Leftrightarrow$$

$$\dot{Q} = 861,06 \text{ W}$$

6. Επαλήθευση μέσης θερμοκρασίας απορροφητικής πλάκας.

Επαληθεύεται η μέση θερμοκρασία της απορροφητικής πλάκας από τη σχέση:

$$T_{pm} = T_{fi} + \frac{\dot{Q}/A_c}{F_R \cdot U_L} \cdot (1 - F_R) \Leftrightarrow T_{pm} = 16 + \frac{861,06/2}{0,682 \cdot 9,684} \cdot (1 - 0,682) \Leftrightarrow$$

$$T_{pm} = 36,70^\circ \text{ C}$$

7. Επανάληψη διαδικασίας.

Η τιμή της μέσης θερμοκρασίας για την απορροφητική πλάκα απέχει σημαντικά από την αρχική υπόθεση. Συνεπώς, με τη νέα αυτή τιμή για τη μέση θερμοκρασία απορροφητικής πλάκας, επαναλαμβάνεται η διαδικασία υπολογισμού. Τα αποτελέσματα της επαναληπτικής διαδικασίας υπολογισμού ανά επανάληψη παρουσιάζονται στον πίνακα 5.3:

Πίνακας 5.3: Αποτελέσματα επαναληπτικού υπολογισμού παραδείγματος υπολογισμού παραγωγής θερμικής ισχύος ηλιακού συλλέκτη.				
	1 ^{ος} υπολογισμός	2 ^{ος} υπολογισμός	3 ^{ος} υπολογισμός	4 ^{ος} υπολογισμός
U_t (W/m ² ·K)	4,498	5,087	5,071	5,071
U_e (W/m ² ·K)	2,593	2,593	2,593	2,593
U_b (W/m ² ·K)	2,593	2,593	2,593	2,593
U_L (W/m ² ·K)	9,684	10,272	10,256	10,256
F_R	0,682	0,700	0,671	0,671
Q (W)	861,06	849,629	849,943	849,934
T_{pm} (°C)	36,695	36,29	36,31	36,30539

Στον τέταρτο επαναληπτικό υπολογισμό η απόκλιση στον υπολογισμό της παραγόμενης θερμικής ισχύος είναι μικρότερη του 0,01W. Πρακτικά ο υπολογισμός θα μπορούσε να σταματήσει νωρίτερα (στο 2^ο ή στον τρίτο υπολογισμό).

8. Απόδοση συλλέκτη.

Η απόδοση του ηλιακού συλλέκτη υπολογίζεται πλέον από τη σχέση:

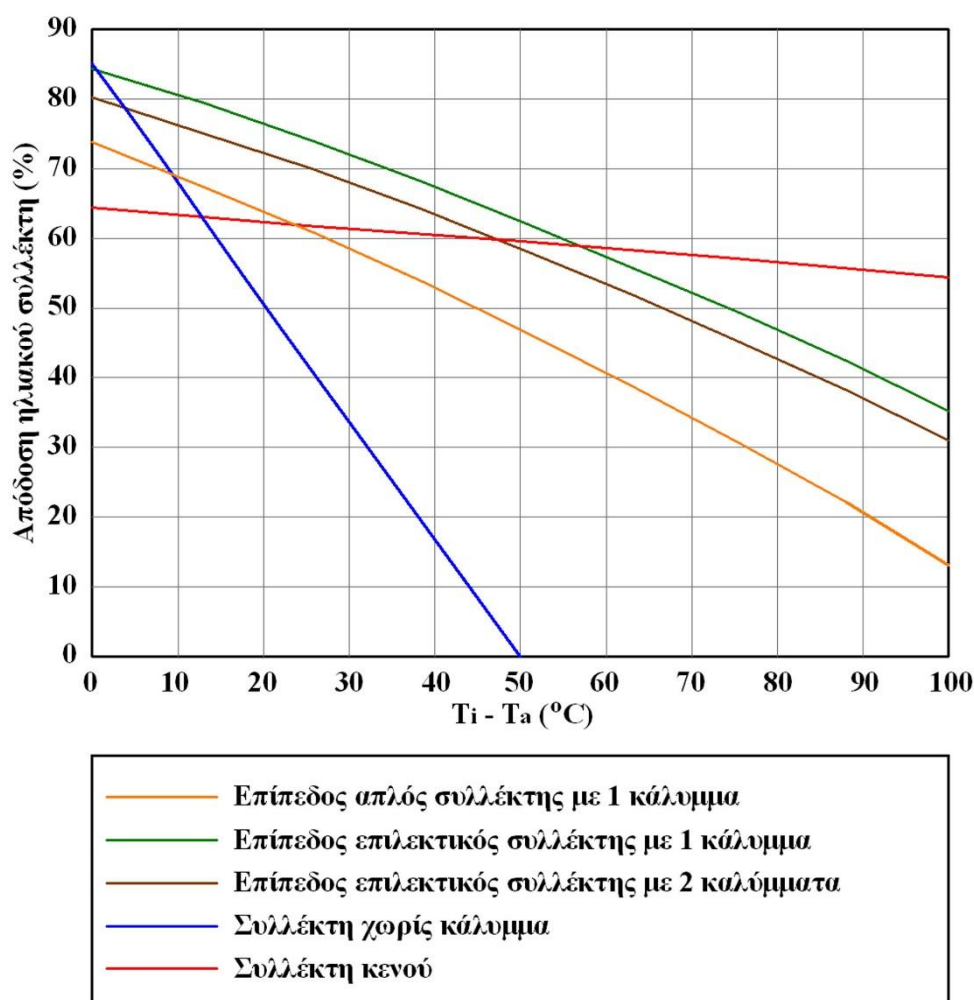
$$\eta = \frac{\dot{Q}}{G_t \cdot A_c} \Leftrightarrow \eta = \frac{849,934 \text{ W/m}^2}{700 \text{ W} \cdot 2 \text{ m}^2} \Leftrightarrow \eta = 60,71\%$$

5.3.6. Χαρακτηριστικά λειτουργίας ηλιακών συλλεκτών

Οι ηλιακοί συλλέκτες ελέγχονται σε πιστοποιημένα Εργαστήρια και Ιδρύματα, προκειμένου να επαληθευτεί η λειτουργία τους υπό διαφορετικές συνθήκες. Οι διαδικασίες ελέγχου, που ακολουθούνται, ορίζονται σε συγκεκριμένα πρότυπα πιστοποίησης (π.χ. EN 12975-2). Ο πλέον βασικός τύπος ελέγχου

λειτουργίας ηλιακού συλλέκτη είναι η μέτρηση του στιγμιαίου βαθμού απόδοσης του συλλέκτη για διαφορετικούς συνδυασμούς προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, θερμοκρασίας περιβάλλοντος και θερμοκρασίας εισαγωγής του ρευστού στο συλλέκτη. Για το σκοπό αυτό, απαιτείται συνεχής μέτρηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και απολαμβανόμενης θερμικής ισχύος από το ρευστό εντός του συλλέκτη, σε μόνιμες (ή σχεδόν μόνιμες) συνθήκες λειτουργίας. Η διαδικασία γίνεται αυτόματα και ελέγχεται μέσω συστήματος ηλεκτρονικής καταγραφής μετρήσεων σε υπολογιστή.

Στο σχήμα 5.21, παρουσιάζονται καμπύλες βαθμού απόδοσης διαφορετικών τύπων ηλιακών συλλεκτών συναρτήσει της θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ εισερχόμενου ρευστού στο συλλέκτη και περιβάλλοντος. Οι καμπύλες αυτές αποτελούν το αποτέλεσμα της διαδικασίας πιστοποίησης των ηλιακών συλλεκτών. Παρατηρείται το περιορισμένο πεδίο λειτουργίας για τους συλλέκτες χωρίς κάλυμμα και η περίπου σταθερή απόδοση των συλλεκτών κενού, ανεξάρτητα από την προαναφερόμενη θερμοκρασιακή διαφορά.



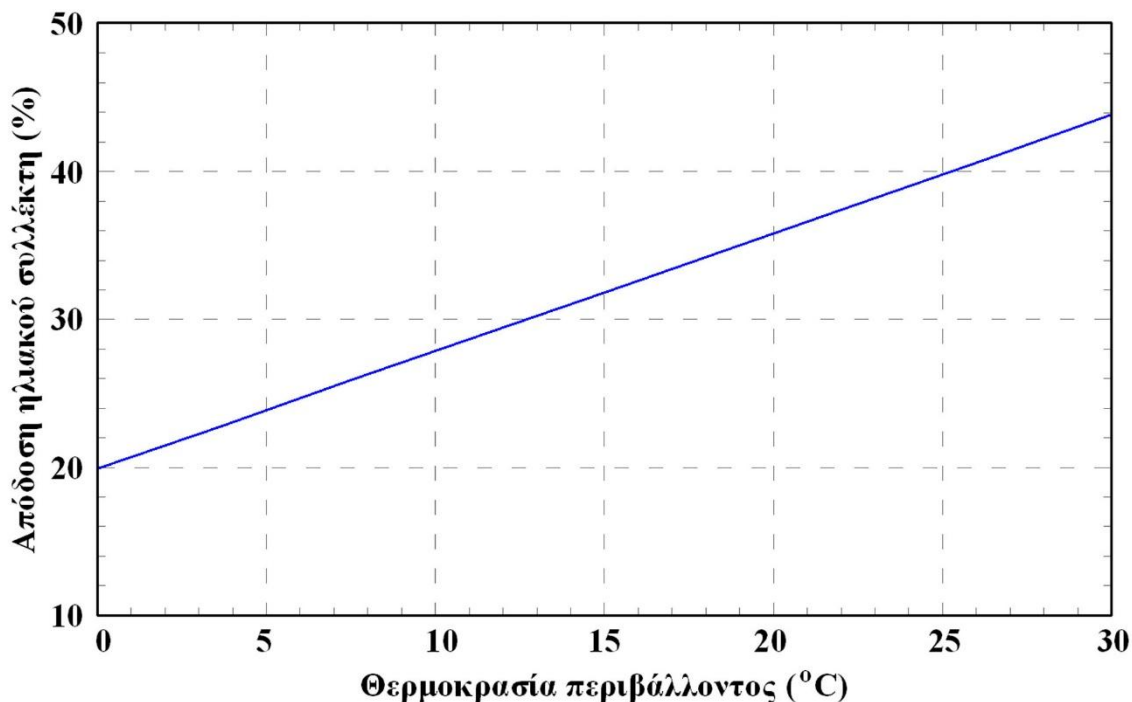
Σχήμα 5.21: Διακύμανση θερμοκρασίας εξόδου ρευστού από ηλιακό συλλέκτη αέρα, μετά την απότομη διακοπή της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.

Επιπρόσθετοι έλεγχοι αφορούν στη μέτρηση των απωλειών θερμότητας από το συλλέκτη προς το περιβάλλον, στην εκτίμηση της επίδρασης της γωνίας πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας στην παραγωγή θερμικής ισχύος από το συλλέκτη, στην εκτίμηση της σταθεράς χρόνου του συλλέκτη κλπ.

Επίσης παρατηρείται ότι με την αύξηση της θερμοκρασιακής διαφοράς εισερχόμενου ρευστού στο συλλέκτη και περιβάλλοντος, η απόδοση του συλλέκτη μειώνεται. Το τελευταίο αποτελεί ένα από τα πλέον χαρακτηριστικά γνωρίσματα λειτουργίας των ηλιακών συλλεκτών. Έτσι, σε ένα κλειστό υδραυλικό κύκλωμα ηλιακού συλλέκτη, η απόδοση του ηλιακού συλλέκτη θα παρουσιάζεται αυξημένη κατά τις πρωινές ώρες, με την έναρξη της ροής του ρευστού εντός του κλειστού υδραυλικού κυκλώματος, όταν η θερμοκρασία του είναι

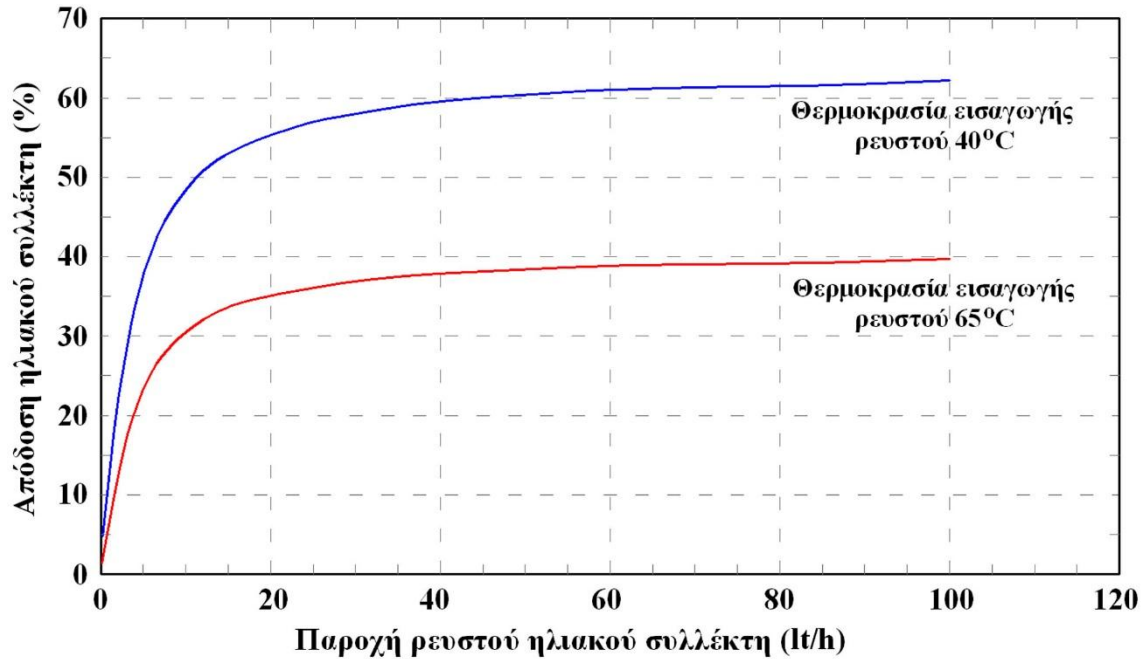
ακόμα κοντά σε αυτή του περιβάλλοντος. Αντιθέτως, με την πάροδο του χρόνου και την αύξηση της θερμοκρασίας του ρευστού εντός του κλειστού υδραυλικού κυκλώματος, συνεπώς την αύξηση της θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ ρευστού και περιβάλλοντος, η απόδοση του ηλιακού συλλέκτη μειώνεται.

Άμεση συνέπεια του ανωτέρω είναι η αύξηση της απόδοσης του συλλέκτη με την αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, καθώς υψηλότερη θερμοκρασία περιβάλλοντος T_a συνεπάγεται μείωση της θερμοκρασιακής διαφοράς $T_i - T_a$, όταν η θερμοκρασία ρευστού T_i αυξάνεται (σχήμα 5.22) [9, 10].



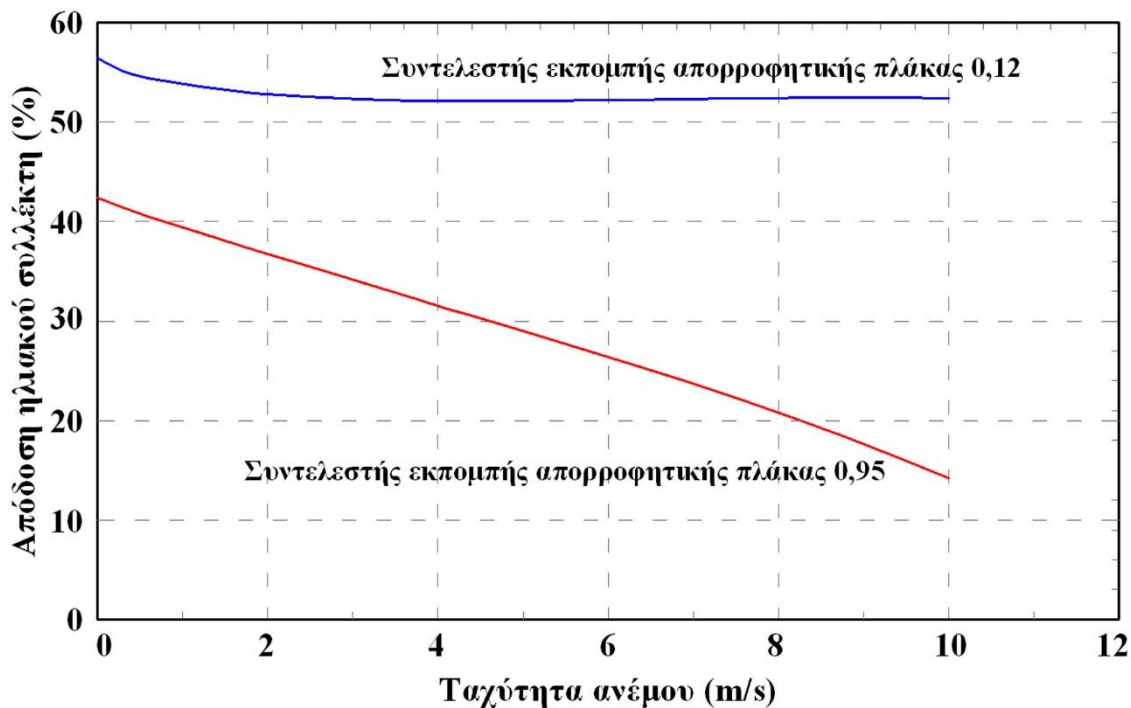
Σχήμα 5.22: Διακύμανση βαθμού απόδοσης ηλιακού συλλέκτη συναρτήσει θερμοκρασίας περιβάλλοντος.

Μία ακόμα άμεση συνέπεια του ανωτέρω χαρακτηριστικού είναι η αύξηση της απόδοσης του ηλιακού συλλέκτη με την αύξηση της παροχής του ρευστού εντός του συλλέκτη (σχήμα 5.23) [9, 10]. Αυτό προκύπτει εξαιτίας του ότι η αύξηση της παροχής του ρευστού εντός του συλλέκτη συνεπάγεται ανάπτυξη χαμηλότερης θερμοκρασίας ρευστού T_o κατά την έξοδό του από το συλλέκτη, οπότε σε ένα κλειστό υδραυλικό κύκλωμα, αντίστοιχα χαμηλότερη θα είναι και η αύξηση της θερμοκρασίας του εισερχόμενου ρευστού στο συλλέκτη.



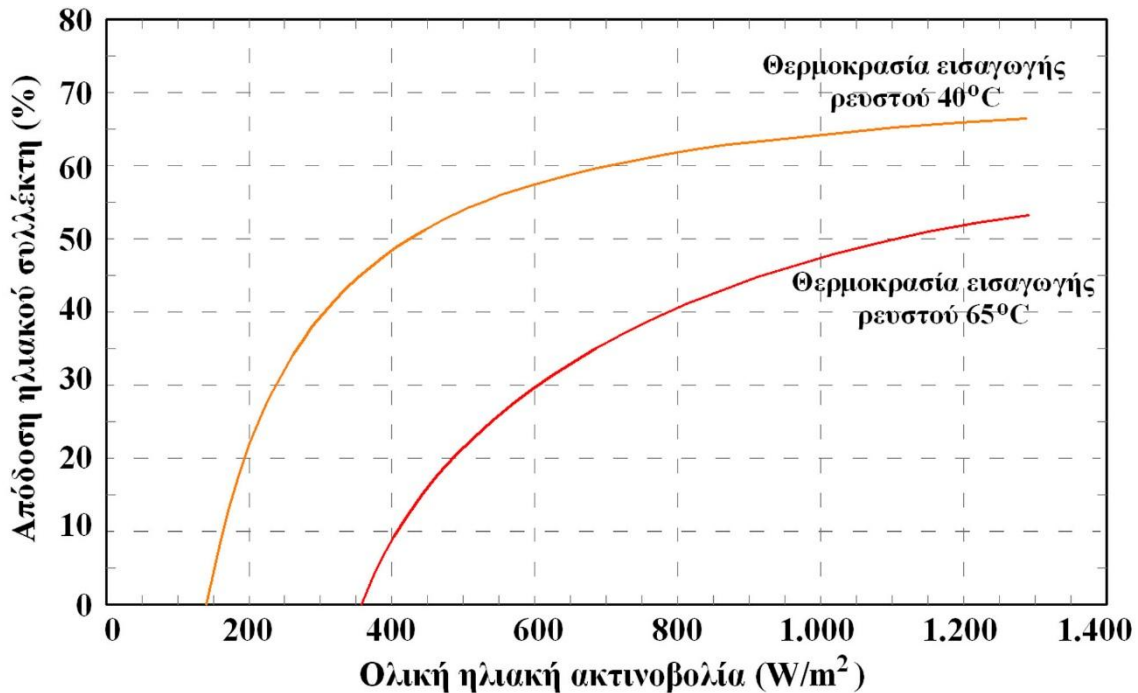
Σχήμα 5.23: Διακύμανση βαθμού απόδοσης ηλιακού συλλέκτη συναρτήσει παροχής ρευστού στο συλλέκτη.

Η απόδοση των ηλιακών συλλεκτών μειώνεται με την αύξηση της ταχύτητας του πνέοντος ανέμου, καθώς τούτη συνεπάγεται υψηλότερο συντελεστή θερμικής μετάβασης για τη μεταφορά θερμότητας από τον ηλιακό συλλέκτη προς το περιβάλλον, και, άρα, σημειώνεται υψηλότερη θερμική ισχύ απωλειών. Η επίδραση αυτή είναι περισσότερο έντονη για απορροφητικές πλάκες συλλέκτη με υψηλό συντελεστή εκπομπής ακτινοβολίας. Για απορροφητικές πλάκες με χαμηλό συντελεστή εκπομπής (της τάξης του 0,10) η επίδραση της ταχύτητας ανέμου στο βαθμό απόδοσης του ηλιακού συλλέκτη είναι μικρή (σχήμα 5.24) [9, 10].



Σχήμα 5.24: Διακύμανση βαθμού απόδοσης ηλιακού συλλέκτη συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου.

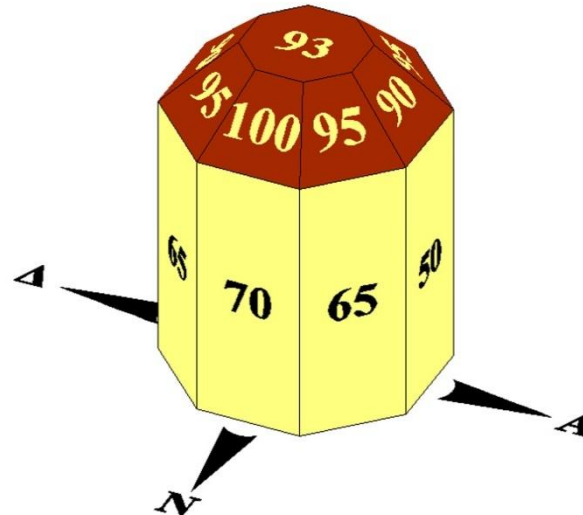
Σημαντική είναι η επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας στην απόδοση του συλλέκτη (σχήμα 5.25) [9, 10]. Με την αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας αυξάνεται η απόδοση του συλλέκτη ακολουθώντας περίπου εκθετική μορφή, ενώ, κάτω από μία κρίσιμη τιμή ηλιακής ακτινοβολίας, η απόδοση μηδενίζεται.



Σχήμα 5.25: Διακύμανση βαθμού απόδοσης ηλιακού συλλέκτη συναρτήσει ολικής προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.

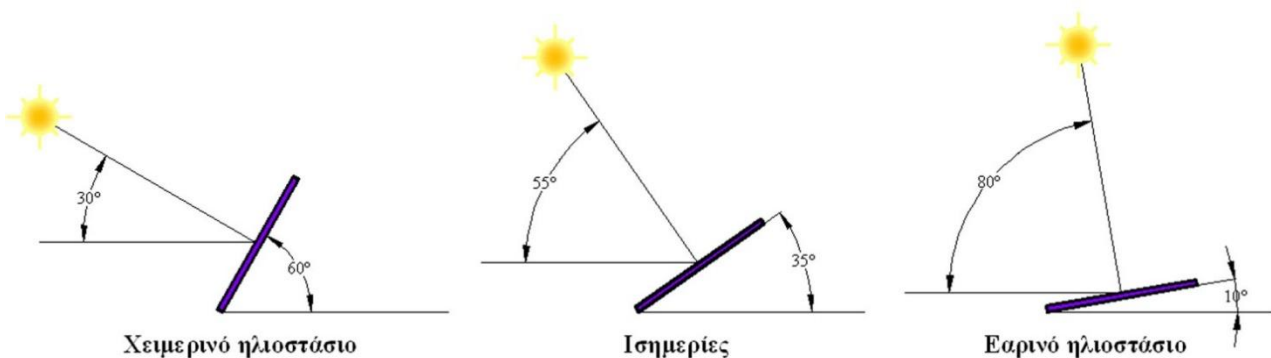
5.3.7. Βέλτιστη κλίση ηλιακών συλλεκτών

Πέρα από τις ανωτέρω παραμέτρους, η παράμετρος εκείνη, που περισσότερο ίσως από οποιαδήποτε άλλη επηρεάζει την απολαμβανόμενη θερμική ισχύ από ένα ηλιακό συλλέκτη, είναι η κλίση εγκατάστασής του ως προς το οριζόντιο επίπεδο. Πριν από την κλίση εγκατάστασης, βέβαια, θα πρέπει να ληφθεί μέριμνα ως προς το σωστό προσανατολισμό του ηλιακού συλλέκτη. Είναι προφανές ότι ο βέλτιστος πάντα προσανατολισμός είναι ο νότιος, για το βόρειο ημισφαίριο, δηλαδή το αζιμούθιο της επιφάνειας φ_p θα πρέπει είναι μηδέν. Αντίστοιχα, για το νότιο ημισφαίριο ο βέλτιστος προσανατολισμός επιφανειών συλλογής ηλιακής ακτινοβολίας είναι ο βόρειος. Οποιοσδήποτε άλλος προσανατολισμός εγκατάστασης επιφάνειας συνεπάγεται μείωση της προσλαμβανόμενης από αυτήν ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία αυξάνει όσο ο προσανατολισμός της επιφάνειας αποκλίνει από το νότιο (ή το βόρειο) προς τα ανατολικά ή τα δυτικά. Ενδεικτικά, στο σχήμα 5.26, παρουσιάζονται τα ποσοστά της συνολικής ετήσιας προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε επιφάνειες διαφορετικών προσανατολισμών και κλίσεων, ως προς τη μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια με το βέλτιστο προσανατολισμό και τη βέλτιστη κλίση (ποσοστό 100%).



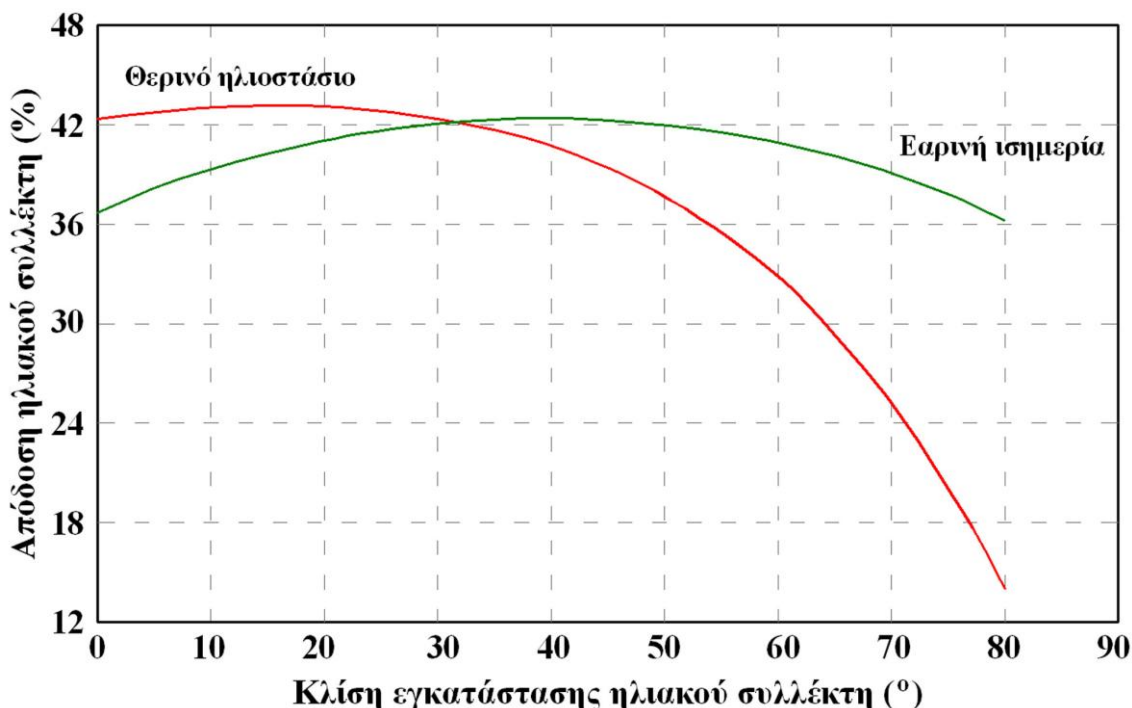
Σχήμα 5.26: Διακύμανση ετήσιας προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της κλίσης και του προσανατολισμού της επιφάνειας.

Αναφορικά με την κλίση εγκατάστασης ως προς το οριζόντιο επίπεδο μίας επιφάνειας συλλογής ηλιακής ακτινοβολίας, οι επιλογές δεν είναι εκ των προτέρων προφανείς και δεδομένες. Η βέλτιστη κλίση εγκατάστασης επιφάνειας ως προς το οριζόντιο επίπεδο εξαρτάται από τη χρήση της επιφάνειας, η οποία, συνήθως, συνεπάγεται την ανάγκη για τη μεγιστοποίηση της προσλαμβανόμενης ηλιακής ακτινοβολίας συγκεκριμένες περιόδους του έτους. Για παράδειγμα, η εγκατάσταση ηλιακών συλλεκτών για παραγωγή ζεστού νερού σε ένα ξενοδοχείο, το οποίο λειτουργεί αποκλειστικά τη θερινή περίοδο, συνεπάγεται ότι η ηλιακή ακτινοβολία θα πρέπει να μεγιστοποιηθεί, όταν τα ηλιακά ύψη είναι υψηλά. Δεδομένου ότι η ηλιακή ακτινοβολία μεγιστοποιείται, όταν προσπίπτει κάθετα στην επιφάνεια, για υψηλά ηλιακά ύψη (της τάξης των $70 - 80^\circ$), η κλίση εγκατάστασης της επιφάνειας θα πρέπει να προσεγγίζει το οριζόντιο επίπεδο. Αντίθετα η εγκατάσταση ενός πεδίου ηλιακών συλλεκτών με σκοπό τη θέρμανση ενός κτηρίου κατά τη διάρκεια του χειμώνα, συνεπάγεται ανάγκη για μεγιστοποίηση της προσλαμβανόμενης ηλιακής ακτινοβολίας κατά τους χειμερινούς μήνες, όταν τα ηλιακά ύψη είναι χαμηλά (της τάξης των $30 - 40^\circ$). Συνεπώς, για να προσεγγιστεί η κάθετη πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τους χειμερινούς μήνες στους ηλιακούς συλλέκτες, η κλίση εγκατάστασής τους ως προς το οριζόντιο επίπεδο θα πρέπει να αυξηθεί. Τα ανωτέρω απεικονίζονται στο σχήμα 5.27.



Σχήμα 5.27: Βέλτιστη κλίση εγκατάστασης επιφάνειας συναρτήσει του ηλιακού ύψους για τη μεγιστοποίηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.

Στο σχήμα 5.28 παρουσιάζεται η επίδραση της κλίσης εγκατάστασης του ηλιακού συλλέκτη στη συνολική απόδοσή του [9, 10]. Το σχήμα αναφέρεται στην περιοχή της Αττικής. Παρατηρείται ότι, κατά το θερινό ηλιοστάσιο (μεγάλα ηλιακά ύψη), η απόδοση μεγιστοποιείται για χαμηλές γωνίες εγκατάστασης (της τάξης των 20°), ενώ κατά την εαρινή ισημερία, η απόδοση του συλλέκτη μεγιστοποιείται για κλίση εγκατάστασης περίπου 40° .



Σχήμα 5.28: Διακύμανση βαθμού απόδοσης ηλιακού συλλέκτη συναρτήσει της κλίσης εγκατάστασής του.

Στον πίνακα 5.4 παρουσιάζονται μετρήσεις παραγωγής τελικής θερμικής ενέργειας ανά μονάδα εγκατεστημένης επιφάνειας ηλιακών συλλεκτών στην περιοχή της Αττικής, συναρτήσει της κλίσης εγκατάστασής τους ως προς το οριζόντιο επίπεδο.

Από τον πίνακα 5.4 παρατηρούνται τα εξής:

- Η ετήσια παραγωγή τελικής θερμικής ενέργειας μεγιστοποιείται με κλίση εγκατάστασης ηλιακών συλλεκτών 30°.
- Η παραγωγή τελικής θερμικής ενέργειας κατά την περίοδο από Απρίλιο έως Οκτώβριο μεγιστοποιείται με κλίση εγκατάστασης ηλιακών συλλεκτών 20°
- Η παραγωγή τελικής θερμικής ενέργειας κατά την περίοδο από Νοέμβριο έως Μάρτιο μεγιστοποιείται με κλίση εγκατάστασης ηλιακών συλλεκτών 50-55°
- Ειδικά τους θερινούς μήνες, δηλαδή από Ιούνιο έως Αύγουστο, η παραγωγή τελικής θερμικής ενέργειας μεγιστοποιείται με κλίση εγκατάστασης ηλιακών συλλεκτών 10°.
- Ειδικά τους χειμερινούς μήνες, δηλαδή από Δεκέμβριο έως Φεβρουάριο, η παραγωγή τελικής θερμικής ενέργειας μεγιστοποιείται με κλίση εγκατάστασης ηλιακών συλλεκτών 55-60°.

Οι μετρήσεις του πίνακα 5.4 καταδεικνύουν τη βέλτιστη κλίση εγκατάστασης επιφάνειας ως προς το οριζόντιο επίπεδο, προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η παραγωγή ενέργειας από την ηλιακή ακτινοβολία σε διαφορετικές περιόδους του έτους. Η βέλτιστη κλίση εγκατάστασης των ηλιακών συλλεκτών ως προς το οριζόντιο επίπεδο μπορεί να διαφέρει από 10° έως 60°, αναλόγως αν στόχος είναι η μεγιστοποίηση της παραγωγής τελικής θερμικής ενέργειας το καλοκαίρι ή το χειμώνα.

Πίνακας 5.4: Παραγωγή θερμικής ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας ηλιακών συλλεκτών συναρτήσει της κλίσης εγκατάστασής τους στην περιοχή της Αττικής.

Χρονικό διάστημα	Κλίση ηλιακών συλλεκτών (°)																
	0	10	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
	Παραγωγή τελικής θερμικής ηλιακών συλλεκτών (kWh/m ²)																
Ιανουάριος	66	80	91	96	100	104	107	109	111	112	113	112	111	109	107	104	100
Φεβρουάριος	75	84	91	93	96	97	99	99	99	99	98	96	94	91	88	84	80
Μάρτιος	104	112	116	118	119	119	119	118	116	114	111	108	104	99	94	89	83
Απρίλιος	146	151	152	152	151	149	147	143	139	134	129	123	116	108	101	92	84
Μάιος	182	183	181	178	175	170	165	159	153	145	137	128	119	109	100	90	79
Ιούνιος	200	200	195	191	185	180	173	166	158	149	139	128	118	108	96	85	75
Ιούλιος	213	214	210	205	199	194	187	180	171	162	151	139	128	117	105	91	80
Αύγουστος	200	206	206	204	202	199	194	188	182	174	165	155	144	132	121	109	96
Σεπτέμβριος	156	168	176	179	180	181	180	178	175	171	166	161	154	146	138	128	118
Οκτώβριος	106	120	130	134	138	140	142	143	142	142	140	137	134	130	125	119	113
Νοέμβριος	66	77	86	90	94	96	99	100	101	102	102	101	99	97	95	92	88
Δεκέμβριος	53	63	72	76	79	82	85	87	88	89	89	89	88	87	85	83	90
Ετήσια παραγωγή	1.567	1.658	1.706	1.716	1.718	1.711	1.697	1.670	1.635	1.593	1.540	1.477	1.409	1.333	1.255	1.166	1.086
Παραγωγή από Απρίλιο έως Οκτώβριο	1.203	1.242	1.250	1.243	1.230	1.213	1.188	1.157	1.120	1.077	1.027	971	913	850	786	714	645
Παραγωγή από Νοέμβριο έως Μάρτιο	364	416	456	473	488	498	509	513	515	516	513	506	496	483	469	452	441
Παραγωγή από Δεκέμβριο έως Φεβρουάριο	194	227	254	265	275	283	291	295	298	300	300	297	293	287	280	271	270
Παραγωγή από Ιούνιο έως Αύγουστο	613	620	611	600	586	573	554	534	511	485	455	422	390	357	322	285	251

Θα πρέπει να τονιστεί ότι οι τιμές αυτές ισχύουν για την περιοχή της Αττικής, με γεωγραφικό πλάτος $37 - 38^\circ$. Τα αποτελέσματα του πίνακα 5.4 επιβεβαιώνουν τους ακόλουθους εμπειρικούς κανόνες:

- Η βέλτιστη κλίση εγκατάστασης επιφάνειας, προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η συλλογή άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας σε αυτήν σε ετήσια βάση, θα πρέπει να είναι περίπου ίση με το γεωγραφικό πλάτος της θέσης εγκατάστασης.
- Αν προτεραιότητα έχει η μεγιστοποίηση της συλλογής ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου, η βέλτιστη κλίση εγκατάστασης της επιφάνειας θα πρέπει να είναι περίπου $10-15^\circ$ μικρότερη από το γεωγραφικό πλάτος της θέσης εγκατάστασης.
- Αν προτεραιότητα έχει η μεγιστοποίηση της συλλογής ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου, η βέλτιστη κλίση εγκατάστασης της επιφάνειας θα πρέπει να είναι περίπου $10-15^\circ$ μεγαλύτερη από το γεωγραφικό πλάτος της θέσης εγκατάστασης. Αν η περιοχή εγκατάστασης περιβάλλεται από επιφάνειες με μεγάλο συντελεστή ανάκλασης (π.χ. χιόνι), απαιτείται μεγαλύτερη κλίση εγκατάστασης της επιφάνειας, προκειμένου να συλλεχθεί μεγαλύτερο ποσοστό από την υψηλή ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία.

5.4. Ενεργειακή ανάλυση συγκεντρωτικού ηλιακού συλλέκτη

Ο υπολογισμός της παραγωγής θερμικής ισχύος από συγκεντρωτικούς ηλιακούς συλλέκτες ακολουθεί σε γενικές γραμμές την ίδια φιλοσοφία με τους επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες. Οι βασικές διαφορές έγκεινται στο ότι θα πρέπει αρχικά να υπολογιστεί η ηλιακή ακτινοβολία, η οποία εισέρχεται από το άνοιγμα του ανακλαστικού κατόπτρου του συλλέκτη επιφάνειας S (ή διάφραγμα – aperture), από την οποία τελικά θα προκύψει η συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας στο δέκτη του συλλέκτη, με βάση τις οπτικές ιδιότητες συλλέκτη και δέκτη. Έχοντας υπολογίσει τη θερμική ισχύ, που διατίθεται στο δέκτη, θα πρέπει, στη συνέχεια, να εκτιμηθεί ο ολικός συντελεστής θερμικής διαπερατότητας U_L που περιγράφει τις απώλειες θερμότητας από το δέκτη προς το περιβάλλον. Τέλος, και στην περίπτωση των συγκεντρωτικών ηλιακών συλλεκτών, εισάγεται ο συντελεστής απωλειών θερμικής ισχύος F_R , προκειμένου να επιτραπεί ο υπολογισμός των απωλειών θερμικής ισχύος με βάση τις θερμοκρασίες του εργαζόμενου μέσου εντός του συλλέκτη. Με τους συντελεστές U_L και F_R γνωστούς είναι πλέον δυνατός ο υπολογισμός της παραγωγής θερμικής ισχύος από τον ηλιακό συλλέκτη από σχέση όμοια με αυτή που χρησιμοποιήθηκε για τους επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες (σχέση 5.1). Μία, ωστόσο, βασική διαφορά μεταξύ συγκεντρωτικών και επίπεδων ηλιακών συλλεκτών προκύπτει εξαιτίας των υψηλών αναπτυσσόμενων θερμοκρασιών στο δέκτη ενός συγκεντρωτικού συλλέκτη. Οι υψηλές αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες συνεπάγονται σημαντικές θερμικές απώλειες μέσω ακτινοβολίας. Συνεπώς ο συντελεστής θερμικής διαπερατότητας U_L επηρεάζεται και μεταβάλλεται συναρτήσει της θερμοκρασίας του εργαζόμενου μέσου.

5.4.1. Ολικός συντελεστής θερμικής διαπερατότητας U_L θερμικών απωλειών δέκτη

Οι απώλειες θερμικής ισχύος από δέκτες συγκεντρωτικών ηλιακών συλλεκτών διέπονται από τους ίδιους φυσικούς νόμους που χαρακτηρίζουν τις απώλειες θερμικής ισχύος από επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες. Οι δέκτες μπορεί να έχουν διαφανή καλύμματα. Προκειμένου να ληφθεί υπόψη η επίδραση της διαπερατότητας του καλύμματος και της απορροφητικότητας του δέκτη, εισάγεται και στην περίπτωση των συγκεντρωτικών ηλιακών συλλεκτών το ενεργό γινόμενο διαπερατότητας – απορροφητικότητας. Λόγω της υψηλής συγκέντρωσης ηλιακής ακτινοβολίας από το συλλέκτη προς το δέκτη, το υλικό του καλύμματος του ηλιακού συλλέκτη θα πρέπει να εμφανίζει πολύ χαμηλή απορροφητικότητα, προκειμένου να αποφευχθεί η φθορά του από την ηλιακή ακτινοβολία.

Γενικότερα ο συντελεστής θερμικής διαπερατότητας θερμικών απωλειών δέκτη U_L εξαρτάται από τη γεωμετρία και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συγκεντρωτικού συλλέκτη, όπως ακριβώς και στους επίπεδους συλλέκτες. Αναλυτικές εκφράσεις μπορούν να προκύψουν, εφαρμόζοντας τους βασικούς νόμους μεταφοράς θερμότητας. Για παράδειγμα, στην περίπτωση κυλινδρικού δέκτη, χωρίς εξωτερικό διαφανές κάλυμμα, η απώλεια θερμικής ισχύος προς το περιβάλλον προκύπτει ως το αποτέλεσμα μεταφοράς ισχύος λόγω αγωγής, συναγωγής και ακτινοβολίας και δίνεται από τη σχέση:

$$\begin{aligned}\frac{\dot{Q}_{\text{loss}}}{A_r} &= h_w \cdot (T_r - T_a) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_r^4 - T_{\text{sky}}^4) + U_{\text{cond}} \cdot (T_r - T_a) \Leftrightarrow \\ \frac{\dot{Q}_{\text{loss}}}{A_r} &= (h_w + h_r + U_{\text{cond}}) \cdot (T_r - T_a) \Leftrightarrow \frac{\dot{Q}_{\text{loss}}}{A_r} = U_L \cdot (T_r - T_a)\end{aligned}\quad (5.31)$$

όπου:

- \dot{Q}_{loss} : η θερμική ισχύς απωλειών από το δέκτη προς το περιβάλλον
- A_r : η συνολική κυλινδρική επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας από το δέκτη προς το περιβάλλον
- h_w : ο συντελεστής συναγωγής για τη μεταφορά θερμότητας από το δέκτη προς το περιβάλλον
- T_r : η θερμοκρασία του εργαζόμενου μέσου στο δέκτη
- T_a : η θερμοκρασία του περιβάλλοντος έξω από το δέκτη
- ε : ο λόγος εκπομπής ακτινοβολίας του υλικού του δέκτη
- T_{sky} : η θερμοκρασία του περιβάλλοντος πολύ μακριά από το δέκτη
- U_{cond} : ο συντελεστής θερμικής διαπερατότητας που περιγράφει τη μεταφορά θερμότητας μέσω αγωγής

Με βάση την ανωτέρω σχέση, ο συνολικός συντελεστής θερμικής διαπερατότητας προκύπτει ίσος με:

$$U_L = h_w + h_r + U_{\text{cond}} \quad (5.32)$$

όπου ο συντελεστής h_r που περιγράφει τη μεταφορά θερμότητας μέσω ακτινοβολίας προκύπτει από τη σχέση:

$$h_r = \frac{\varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_r^4 - T_{\text{sky}}^4)}{T_r - T_a} \quad (5.33)$$

Αν ο κυλινδρικός δέκτης συγκεντρωτικού ηλιακού συλλέκτη είναι εξωτερικά προστατευμένος με διαφανές κάλυμμα, τότε οι απώλειες θερμικής ισχύος:

1. αρχικά από το δέκτη θερμοκρασίας T_r προς το εσωτερικό του καλύμματος θερμοκρασίας T_{ci} ,
2. από την εσωτερική επιφάνεια του καλύμματος θερμοκρασίας T_{ci} προς την εξωτερική επιφάνειά του θερμοκρασίας T_{co} ,
3. τελικά από την εξωτερική επιφάνεια του καλύμματος προς το περιβάλλον θερμοκρασίας T_a και T_{sky}

δίνονται αντίστοιχα από τις σχέσεις:

$$\dot{Q}_{\text{loss}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot k_{\text{eff}} \cdot L}{\ln(D_{ci}/D_r)} \cdot (T_r - T_{ci}) + \frac{\pi \cdot D_r \cdot L \cdot \sigma \cdot (T_r^4 - T_{ci}^4)}{\frac{1}{\varepsilon_r} + \frac{1 - \varepsilon_c}{\varepsilon_c} \cdot \left(\frac{D_r}{D_{ci}}\right)} \quad (5.34)$$

$$\dot{Q}_{\text{loss}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot k_c \cdot L \cdot (T_{ci} - T_{co})}{\ln(D_{co}/D_{ci})} \quad (5.35)$$

$$\dot{Q}_{\text{loss}} = \pi \cdot D_{co} \cdot L \cdot h_w \cdot (T_{co} - T_a) + \varepsilon_c \cdot \pi \cdot D_{co} \cdot L \cdot \sigma \cdot (T_{co}^4 - T_{\text{sky}}^4) \quad (5.36)$$

όπου:

- D_r : η εξωτερική διάμετρος του δέκτη
- D_{ci} : η εσωτερική διάμετρος του καλύμματος του δέκτη
- D_{co} : η εξωτερική διάμετρος του καλύμματος του δέκτη
- L : το μήκος του κυλινδρικού δέκτη
- k_c : ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του δέκτη
- k_{eff} : ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας μεταξύ δέκτη και καλύμματος
- ε_r : ο λόγος εκπομπής ακτινοβολίας του υλικού του δέκτη

ϵ_c : ο λόγος εκπομπής ακτινοβολίας του υλικού του καλύμματος.

Στην περίπτωση κυλινδρικών σωληνώσεων, ο συντελεστής θερμικής συναγωγής h_w μπορεί να υπολογιστεί ως εξής. Αρχικά υπολογίζεται ο αριθμός Reynolds της ροής του ανέμου έξω από το κάλυμμα του συλλέκτη:

$$Re = \frac{u \cdot D_{co}}{\nu} \quad (5.37)$$

όπου ν η κινηματική συνεκτικότητα του αέρα. Στη συνέχεια μπορεί να υπολογιστεί ο αριθμός Nusselt της που χαρακτηρίζει τη μεταφορά θερμότητας συναρτήσει του αριθμού Reynolds από τις ακόλουθες εμπειρικές σχέσεις [11]:

$$\begin{aligned} Nu &= 0,40 + 0,54 \cdot Re^{0,52} && \text{για } 0,10 < Re < 1.000 \\ Nu &= 0,30 \cdot Re^{0,60} && 1.000 < Re < 50.000 \end{aligned} \quad (5.38)$$

Τονίζεται ότι οι ανωτέρω σχέσεις ισχύουν για ροή αέρα γύρω από κυλινδρικό σωλήνα σε συνθήκες περιβάλλοντος. Έχοντας υπολογίσει τον αριθμό Nusselt, μπορεί πλέον να υπολογιστεί ο συντελεστής θερμικής συναγωγής h_w από τη σχέση ορισμού του αριθμού Nusselt:

$$Nu = \frac{h_w \cdot D_{co}}{k} \quad (5.39)$$

όπου k ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας της σωλήνωσης, που είναι άμεσα εκτεθειμένη στη ροή αέρα περιβάλλοντος (σωλήνωση δέκτη ή κάλυμμα, ανάλογα με την ύπαρξη καλύμματος ή όχι).

Με τις ανωτέρω σχέσεις διαθέσιμες, ακολουθεί η παρακάτω διαδικασία για τον υπολογισμό της θερμικής ισχύος απωλειών από το δέκτη προς το περιβάλλον:

1. Ως δεδομένα του προβλήματος θεωρούνται οι θερμοκρασίες περιβάλλοντος T_a και T_{sky} , τα μεγέθη που περιγράφουν τη γεωμετρία του δέκτη L , D_r , D_{ci} , D_{co} και οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας μέσω αγωγής k_c και k_{eff} , συναγωγής h_w και ακτινοβολίας ϵ_r και ϵ_c .
2. Αρχικά υποτίθεται μία τιμή για τη θερμοκρασία της εξωτερικής θερμοκρασίας του καλύμματος T_{co} . Η θερμοκρασία αυτή λαμβάνεται συνήθως πιο κοντά στη θερμοκρασία περιβάλλοντος T_a παρά στη θερμοκρασία του ρευστού στο δέκτη T_r .
3. Από τη σχέση 5.36 υπολογίζεται μία πρώτη προσέγγιση για τη θερμική ισχύ απωλειών \dot{Q}_{loss} .
4. Στη συνέχεια, με την υπολογισθείσα τιμή \dot{Q}_{loss} χρησιμοποιείται η σχέση 5.35 για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας της εσωτερικής επιφάνειας του καλύμματος T_{ci} .
5. Από τη σχέση 5.31 υπολογίζεται με δοκιμές η μέση θερμοκρασία του δέκτη T_r .
6. Χρησιμοποιείται, τέλος, η σχέση 5.34, προκειμένου να επαληθευτεί η θερμική ισχύς απωλειών του δέκτη, της οποίας ο υπολογισμός βασίστηκε στην αρχική υπόθεση για τη θερμοκρασία T_{co} . Στην περίπτωση που υπάρχει σημαντική απόκλιση ανάμεσα στα δύο αποτελέσματα, τότε η διαδικασία επαναλαμβάνεται ξανά με νέο υπολογισμό της θερμοκρασίας T_{co} από τη σχέση 5.36 με βάση την υπολογισθείσα ισχύ \dot{Q}_{loss} .

Παράδειγμα 5.2.

Υπολογισμός ολικού συντελεστή θερμικής διαπερατότητας θερμικών απωλειών σε συγκεντρωτικό συλλέκτη

Να υπολογιστεί ο ολικός συντελεστής θερμικής διαπερατότητας θερμικών απωλειών κυλινδρικού δέκτη με κάλυμμα σε συγκεντρωτικό ηλιακό συλλέκτη, εξωτερικής διαμέτρου 60mm, θερμοκρασίας 250°C. Ο λόγος εκπομπής ακτινοβολίας του δέκτη ισούται με 0,30. Το κάλυμμα του δέκτη έχει εξωτερική διάμετρο

95mm και πάχος 5mm. Στο χώρο μεταξύ δέκτη και καλύμματος δημιουργείται κενό αέρος. Η ταχύτητα του ανέμου είναι 5m/s και οι θερμοκρασίες περιβάλλοντος πλησίον και μακριά από το συλλέκτη ισούνται με 15°C και 5°C αντίστοιχα. Η θερμική αγωγιμότητα του υλικού του καλύμματος να ληφθεί 0,026W/(m·K). Ο λόγος εκπομπής ακτινοβολίας καλύμματος δίνεται ίσος με 0,88 και ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του δέκτη 1,4W/(m·K). Ο υπολογισμός να γίνει ανά μονάδα μήκους του δέκτη.

Λύση

Καταρχήν ο συντελεστής θερμικής συναγωγής που περιγράφει τη μεταφορά θερμότητας από το δέκτη προς το περιβάλλον μπορεί να υπολογιστεί με βάση τις ανωτέρω εμπειρικές σχέσεις. Η κινηματική συνεκτικότητα του αέρα για θερμοκρασία 13°C ισούται με $1,456 \cdot 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$. Ο αριθμός Reynolds ισούται με:

$$Re = \frac{u \cdot D_{co}}{\nu} \Leftrightarrow Re = \frac{5 \cdot 0,095}{1,456 \cdot 10^{-5}} \Leftrightarrow Re = 32.624$$

Από τη σχέση 5.38 υπολογίζεται ο αριθμός Nusselt:

$$Nu = 0,30 \cdot Re^{0,60} \Leftrightarrow Nu = 0,30 \cdot 32.624^{0,60} Nu = 153,195$$

Τέλος, από τη σχέση 5.39 υπολογίζεται ο συντελεστής θερμικής συναγωγής για τη ροή του αέρα έξω από το δέκτη:

$$Nu = \frac{h_w \cdot D_{co}}{k} \Leftrightarrow h_w = \frac{Nu \cdot k}{D_{co}} \Leftrightarrow h_w = \frac{153,195 \cdot 0,026}{0,095} \Leftrightarrow h_w = 41,93 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Από τη σχέση 5.36 μπορεί να υπολογιστεί η ισχύς θερμικών απωλειών. Για το σκοπό αυτό, δεδομένου ότι η θερμοκρασία περιβάλλοντος δίνεται 15°C = 288K, υποτίθεται θερμοκρασία εξωτερικής επιφάνειας καλύμματος ίση με 20°C = 293K. Η εφαρμογή της σχέσης 5.36 δίνει, λαμβάνοντας υπόψη μας ότι ο υπολογισμός γίνεται ανά μονάδα μήκους του δέκτη (L = 1m):

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{loss} &= \pi \cdot D_{co} \cdot L \cdot h_w \cdot (T_{co} - T_a) + \varepsilon_c \cdot \pi \cdot D_{co} \cdot L \cdot \sigma \cdot (T_{co}^4 - T_{sky}^4) \Leftrightarrow \\ \dot{Q}_{loss} &= \pi \cdot 0,095 \cdot 1 \cdot 41,93 \cdot (293 - 288) + 0,88 \cdot \pi \cdot 0,095 \cdot 1 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot (293^4 - 278^4) \Leftrightarrow \\ \dot{Q}_{loss} &= 83,38 \text{W} \end{aligned}$$

Επειτα υπολογίζεται η θερμοκρασία στην εσωτερική επιφάνεια του καλύμματος από τη σχέση 5.35:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{loss} &= \frac{2 \cdot \pi \cdot k_c \cdot L \cdot (T_{ci} - T_{co})}{\ln(D_{co} / D_{ci})} \Leftrightarrow T_{ci} = \frac{\dot{Q}_{loss}}{2 \cdot \pi \cdot k_c \cdot L} \cdot \ln\left(\frac{D_{co}}{D_{ci}}\right) + T_{co} \Leftrightarrow \\ T_{ci} &= \frac{83,38 \text{W}}{2 \cdot \pi \cdot 1,4 \cdot 1} \cdot \ln\left(\frac{0,095}{0,085}\right) + 293 \Leftrightarrow T_{ci} = 294,05 \text{K} \end{aligned}$$

Τέλος χρησιμοποιείται η σχέση 5.34, για να γίνει επαλήθευση της αρχικής υπόθεσης για τη θερμοκρασία T_{co} . Καθώς αναφέρεται ότι μεταξύ δέκτη και καλύμματος υπάρχει κενό αέρος, ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας k_{eff} λαμβάνεται ίσος με μηδέν.

$$\dot{Q}_{\text{loss}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot k_{\text{eff}} \cdot L}{\ln(D_{\text{ci}}/D_{\text{r}})} \cdot (T_{\text{r}} - T_{\text{ci}}) + \frac{\pi \cdot D_{\text{r}} \cdot L \cdot \sigma \cdot (T_{\text{r}}^4 - T_{\text{ci}}^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{r}}} + \frac{1 - \varepsilon_{\text{c}}}{\varepsilon_{\text{c}}} \cdot \frac{D_{\text{r}}}{D_{\text{ci}}}} \Leftrightarrow$$

$$\dot{Q}_{\text{loss}} = \frac{\pi \cdot 0,060 \cdot 1 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot (523^4 - 294,05^4)}{\frac{1}{0,31} + \frac{1 - 0,88}{0,88} \cdot \frac{0,060}{0,085}} \Leftrightarrow \dot{Q}_{\text{loss}} = 216,65 \text{ W}$$

Παρατηρείται ότι υπάρχει μεγάλη απόκλιση ανάμεσα στον αρχικό και στον τελικό υπολογισμό για την ισχύ θερμικών απωλειών. Συνεπώς η διαδικασία επαναλαμβάνεται εισάγοντας νέα υπόθεση για τη θερμοκρασία T_{co} στη σχέση 5.35. Στον πίνακα 5.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επαναληπτικής διαδικασίας υπολογισμού:

Πίνακας 5.5: Αποτελέσματα επαναληπτικής διαδικασίας υπολογισμού ισχύος θερμικών απωλειών δέκτη.				
	1 ^{ος} υπολογισμός	2 ^{ος} υπολογισμός	3 ^{ος} υπολογισμός	4 ^{ος} υπολογισμός
Θερμοκρασία T_{co} (°C / K)	20 / 293	27 / 300	29 / 302	29,2 / 302,2
Αρχική εκτίμηση για θερμική ισχύ \dot{Q}_{loss} (W)	83,38	181,85	210,12	212,95
Θερμοκρασία T_{ci} (°C / K)	21,04 / 294,05	29,30 / 302,30	31,66 / 304,66	31,89 / 304,89
Τελική εκτίμηση για θερμική ισχύ \dot{Q}_{loss} (W)	216,65	213,84	212,99	212,90

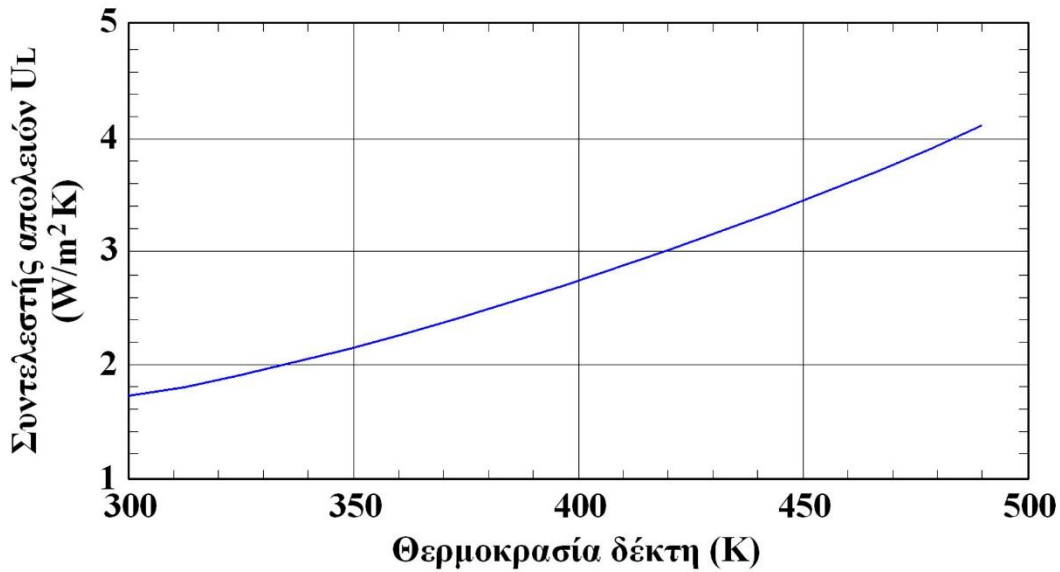
Με την ισχύ θερμικών απωλειών να υπολογίζεται στα 212,90W, υπολογίζεται πλέον ο ολικός συντελεστής θερμικής διαπερατότητας από τη σχέση 5.31:

$$\frac{\dot{Q}_{\text{loss}}}{A_{\text{r}}} = U_{\text{L}} \cdot (T_{\text{r}} - T_{\text{a}}) \Leftrightarrow U_{\text{L}} = \frac{\dot{Q}_{\text{loss}}}{A_{\text{r}} \cdot (T_{\text{r}} - T_{\text{a}})} \Leftrightarrow U_{\text{L}} = \frac{\dot{Q}_{\text{loss}}}{\pi \cdot D_{\text{r}} \cdot L \cdot (T_{\text{r}} - T_{\text{a}})} \Leftrightarrow$$

$$U_{\text{L}} = \frac{212,90}{\pi \cdot 0,060 \cdot 1 \cdot (523 - 288)} \Leftrightarrow U_{\text{L}} = 4,81 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Στο ανωτέρω παράδειγμα θεωρήθηκε ότι από το χώρο ανάμεσα στο δέκτη και στο εξωτερικό κάλυμμα έχει αφαιρεθεί ο αέρας και έχει δημιουργηθεί κενό. Στην περίπτωση αυτή δεν υφίσταται συναγωγή μέσα διαμέσου του χώρου αυτού. Στη γενική περίπτωση, όπου στο χώρο αυτό υπάρχει αέρας, η μεταφορά θερμότητας μέσω συναγωγής δεν μπορεί να αγνοηθεί. Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας k_{eff} διαμέσου του χώρου ανάμεσα σε δέκτη και κάλυμμα λαμβάνεται για τον αέρα ή, στη γενικότερη περίπτωση, για το παρεμβαλλόμενο μέσο, από πίνακες ή διαγράμματα.

Επίσης, στο ανωτέρω παράδειγμα, υπολογίστηκε μία μόνο τιμή για τον ολικό συντελεστή θερμικής διαπερατότητας U_{L} . Στο σχήμα 5.29 παρουσιάζεται η διακύμανση του συντελεστή U_{L} συναρτήσει της θερμοκρασίας του δέκτη, η οποία είναι σημαντική, συνεπώς, δεν μπορεί να αγνοηθεί. Στην περίπτωση αυτή, όταν δηλαδή η θερμοκρασία του δέκτη μεταβάλλεται σημαντικά κατά μήκος, γεγονός που συνεπάγεται διαφορετική θερμική διαπερατότητας για διαφορετικά τμήματα του δέκτη, θα πρέπει ο δέκτης να διαιρείται σε επιμέρους τμήματα και σε κάθε ένα από αυτά να λαμβάνεται μία διαφορετική τιμή για τη θερμική διαπερατότητα.



Σχήμα 5.29: Διακύμανση ολικού συντελεστή θερμικής διαπερατότητας θερμικών απωλειών συγκεντρωτικού ηλιακού συλλέκτη συναρτήσει της θερμοκρασίας του δέκτη.

5.4.2. Παραγωγή ισχύος από συγκεντρωτικούς ηλιακούς συλλέκτες

Ο συνολικός συντελεστής θερμικής διαπερατότητας U_o που περιγράφει τη μεταφορά θερμικής ισχύος από το δέκτη προς το εργαζόμενο μέσο εντός των σωληνώσεων του δέκτη δίνεται από τη σχέση:

$$U_o = \left(\frac{1}{U_L} + \frac{D_o}{h_{fi} \cdot D_i} + \frac{D_o}{2 \cdot k} \cdot \ln \left(\frac{D_o}{D_i} \right) \right)^{-1} \quad (5.40)$$

όπου:

D_o : η εξωτερική διάμετρος της σωλήνωσης του δέκτη

D_i : η εσωτερική διάμετρος της σωλήνωσης του δέκτη

h_{fi} : ο συντελεστής θερμικής μετάβασης για τη μεταφορά θερμότητας από τη σωλήνωση προς το ρευστό

k : ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού της σωλήνωσης του δέκτη.

Η ειδική παραγωγή θερμικής ισχύος ανά μονάδα μήκους του δέκτη δίνεται από τη σχέση:

$$q'_u = \frac{A_a \cdot S}{L} - \frac{A_r \cdot U_L}{L} \cdot (T_r - T_a) \quad (5.41)$$

όπου:

A_a : η μη σκιασμένη επιφάνεια του ανοίγματος του συλλέκτη σε m^2

A_r : η επιφάνεια του δέκτη σε m^2 , η οποία για κυλινδρικό δέκτη ισούται με $\pi \cdot D_o \cdot L$

L : το μήκος του δέκτη σε m

S : η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε W/m^2 .

Η παραγωγή θερμικής ισχύος από το συγκεντρωτικό συλλέκτη εκφρασμένη συναρτήσει της θερμοκρασίας του ρευστού T_f εντός της σωλήνωσης του δέκτη έχει ως εξής:

$$q'_u = \frac{(A_r / L) \cdot (T_r - T_f)}{\frac{D_o}{h_{fi} \cdot D_i} + \frac{D_o}{2 \cdot k} \cdot \ln \left(\frac{D_o}{D_i} \right)} - \frac{U_L}{L} \quad (5.42)$$

Απαλείφοντας τη θερμοκρασία του δέκτη T_r από τις δύο τελευταίες ανωτέρω σχέσεις, έχουμε:

$$q'_u = F' \cdot \frac{A_a}{L} \cdot \left[S - \frac{A_r}{A_a} \cdot U_L \cdot (T_f - T_a) \right] \quad (5.43)$$

όπου ο συντελεστής απόδοσης του συγκεντρωτικού συλλέκτη F' δίνεται από τη σχέση:

$$F' = \frac{1/U_L}{\frac{1}{U_L} + \frac{D_o}{h_{fi} \cdot D_i} + \frac{D_o}{2 \cdot k} \cdot \ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)} \quad (5.44)$$

ή εναλλακτικά:

$$F' = \frac{U_o}{U_L} \quad (5.45)$$

Κατ' αντιστοιχία με τη σχέση 5.1, η παραγωγή θερμικής ισχύος από συγκεντρωτικό ηλιακό συλλέκτη μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\dot{Q}_u = A_a \cdot F_R \cdot \left[S - \frac{A_r}{A_a} \cdot U_L \cdot (T_i - T_a) \right] \quad (5.46)$$

όπου T_i η θερμοκρασία του δέκτη και T_a η θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

Επίσης, κατ' αντιστοιχία με τη σχέση 5.2, ο συντελεστής θερμικής ισχύος του συλλέκτη F_R υπολογίζεται από τη σχέση:

$$F_R = \frac{\dot{m} \cdot c_p}{A_r \cdot U_L} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{A_r \cdot U_L \cdot F'}{\dot{m} \cdot c_p}\right) \right] \quad (5.47)$$

Οι ανωτέρω σχέσεις εφαρμόζονται τόσο για δέκτες με ή χωρίς κάλυμμα. Οι διαφορές στις δύο περιπτώσεις εισάγονται μέσω των μεγεθών S και U_L .

Παράδειγμα 5.3.

Παραγωγή ωφέλιμης θερμικής ισχύος από συγκεντρωτικό ηλιακό συλλέκτη

Ο συγκεντρωτικός συλλέκτης, που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο παράδειγμα, εμφανίζει ολικό συντελεστή θερμικής διαπερατότητας θερμικών απωλειών ίσο με $4,81 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Ο συγκεντρωτικός συλλέκτης έχει άνοιγμα κατόπτρου διαστάσεων $2,5 \text{ m}$ πλάτους και μήκους 10 m . Η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία ισούται με $500 \text{ W}/\text{m}^2$. Εντός της σωλήνωσης του δέκτη ρέει ρευστό με ειδική θερμοχωρητικότητα ίση με $3,25 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$. Το ρευστό εισέρχεται εντός του δέκτη σε θερμοκρασία 150°C με παροχή $0,055 \text{ kg}/\text{s}$. Ο συντελεστής συναγωγής θερμότητας εντός της σωλήνωσης του δέκτη ισούται με $400 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Η σωλήνωση του δέκτη είναι κατασκευασμένη από ανοξείδωτο χάλυβα, με συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας $16 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ και πάχος τοιχώματος 4 mm . Αν η θερμοκρασία του περιβάλλοντος είναι 15°C , να υπολογιστούν η ωφέλιμη παραγωγή θερμικής ισχύος και η θερμοκρασία εξόδου του ρευστού από το δέκτη. Για το κάλυμμα και το δέκτη ισχύουν οι διαστάσεις του παραδείγματος 5.2, δηλαδή εξωτερική διάμετρος δέκτη 60 mm , εξωτερική διάμετρος καλύμματος 95 mm , πάχος καλύμματος 5 mm . Υπενθυμίζεται ότι η μέση θερμοκρασία λειτουργίας του δέκτη ισούται με 250°C .

Λύση

Η εξωτερική επιφάνεια του δέκτη ισούται με:

$$A_r = \pi \cdot D_r \cdot L \Leftrightarrow A_r = \pi \cdot 0,060 \cdot 10 \Leftrightarrow A_r = 1,88\text{m}^2.$$

Λαμβάνοντας υπόψη τη σκίαση που ο συλλέκτης δέχεται από το δέκτη, η ωφέλιμη επιφάνεια του συλλέκτη ισούται με:

$$A_a = (W - D_r) \cdot L \Leftrightarrow A_a = (2,5 - 0,095) \cdot 10 \Leftrightarrow A_a = 24,05\text{m}^2.$$

Στη συνέχεια υπολογίζεται ο συντελεστής F' από τη σχέση 5.44:

$$F' = \frac{1/U_L}{\frac{1}{U_L} + \frac{D_o}{h_{fi} \cdot D_i} + \frac{D_o}{2 \cdot k} \cdot \ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)} \Leftrightarrow F' = \frac{1/4,81}{\frac{1}{4,81} + \frac{0,060}{400 \cdot 0,052} + \frac{0,060}{2 \cdot 16} \cdot \ln\left(\frac{0,060}{0,052}\right)} \Leftrightarrow F' = 0,985$$

Έπειτα υπολογίζεται ο συντελεστής F_R από τη σχέση 5.47:

$$F_R = \frac{\dot{m} \cdot c_p}{A_r \cdot U_L} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{A_r \cdot U_L \cdot F'}{\dot{m} \cdot c_p}\right) \right] \Leftrightarrow F_R = \frac{0,055 \cdot 3.250}{1,88 \cdot 4,81} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{1,88 \cdot 4,81 \cdot 0,985}{0,055 \cdot 3.250}\right) \right] \Leftrightarrow F_R = 0,961$$

Από τη σχέση 5.46 υπολογίζεται η ωφέλιμη παραγωγή θερμικής ισχύος από το συγκεντρωτικό ηλιακό συλλέκτη:

$$\dot{Q}_u = A_a \cdot F_R \cdot \left[S - \frac{A_r}{A_a} \cdot U_L \cdot (T_i - T_a) \right] \Leftrightarrow \dot{Q}_u = 24,05 \cdot 0,961 \cdot \left[500 - \frac{1,88}{24,05} \cdot 4,81 \cdot (250 - 15) \right] \Leftrightarrow \dot{Q}_u = 9.507,045\text{W}$$

Η αύξηση της θερμοκρασίας του ρευστού του δέκτη και η θερμοκρασία εξόδου του από το δέκτη υπολογίζονται από τη σχέση:

$$\dot{Q}_u = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{fo} - T_{fi}) \Leftrightarrow T_{fo} - T_{fi} = \frac{\dot{Q}_u}{\dot{m} \cdot c_p} \Leftrightarrow T_{fo} - T_{fi} = \frac{9.507,045}{0,055 \cdot 3.250} \Leftrightarrow T_{fo} - T_{fi} = 53,19^\circ\text{C} \\ \Leftrightarrow T_{fo} = 53,19^\circ\text{C} + T_{fi} \Leftrightarrow T_{fo} = 53,19^\circ\text{C} + 150^\circ\text{C} \Leftrightarrow T_{fo} = 203,19^\circ\text{C}$$

Η πτώση θερμοκρασίας από την εξωτερική επιφάνεια του δέκτη ως το ρευστό μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$\dot{Q}_u = \frac{\bar{T}_{ro} - \bar{T}_{fi}}{\frac{1}{\pi \cdot D_{ri} \cdot L \cdot h_{fi}} + \frac{\ln(D_{ro}/D_{ri})}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot L}} \Leftrightarrow \bar{T}_{ro} - \bar{T}_{fi} = \dot{Q}_u \cdot \left[\frac{1}{\pi \cdot D_{ri} \cdot L \cdot h_{fi}} + \frac{\ln(D_{ro}/D_{ri})}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot L} \right] \Leftrightarrow \\ \bar{T}_{ro} - \bar{T}_{fi} = 9.507,045 \cdot \left[\frac{1}{\pi \cdot 0,052 \cdot 10 \cdot 400} + \frac{\ln(0,060/0,052)}{2 \cdot \pi \cdot 16 \cdot 10} \right] \Leftrightarrow \bar{T}_{ro} - \bar{T}_{fi} = 15,91^\circ\text{C}$$

5.4.3. Απορροφούμενη ακτινοβολία από συγκεντρωτικό ηλιακό συλλέκτη

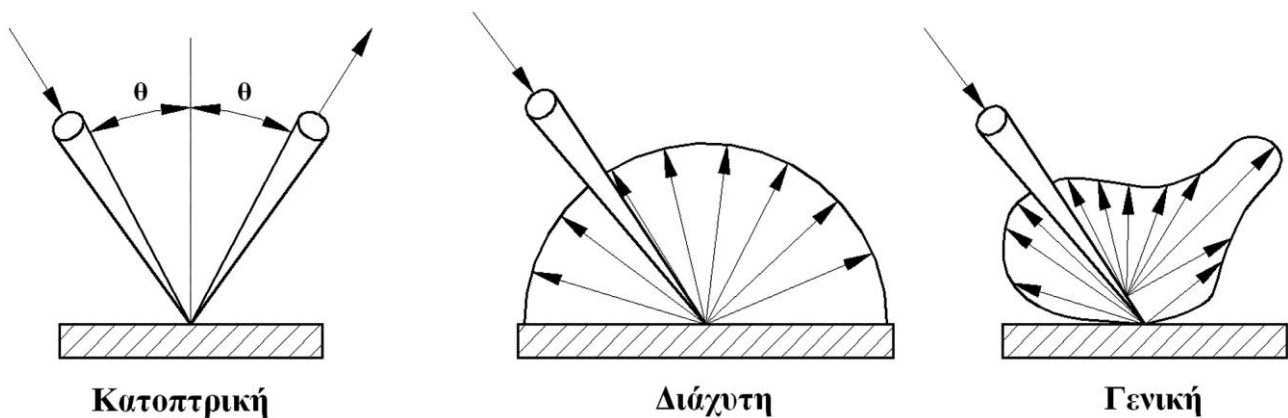
Η απορροφούμενη ηλιακή ακτινοβολία από συγκεντρωτικό ηλιακό συλλέκτη εμφανίζει ισχυρή εξάρτηση, σε γενικές γραμμές, από τη γεωμετρία και τα οπτικά χαρακτηριστικά του συλλέκτη. Μια γενική σχέση υπολογισμού της απορροφούμενης ηλιακής ακτινοβολίας S στη μη σκιασμένη επιφάνεια ανοίγματος ενός ηλιακού συγκεντρωτικού συλλέκτη έχει ως εξής:

$$S = I_b \cdot \rho \cdot (\gamma \cdot \tau \cdot \alpha)_n \cdot K_{\gamma\tau\alpha} \quad (5.48)$$

Στην ανωτέρω σχέση I_b είναι η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στη μη σκιασμένη επιφάνεια του συγκεντρωτικού ηλιακού συλλέκτη, η οποία συνίσταται κυρίως μόνο από άμεση ηλιακή ακτινοβολία, εκτός των συλλεκτών με λόγο συγκέντρωσης χαμηλότερο του 10, στους οποίους η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία συμπληρώνεται και από ένα ποσό διάχυτης ακτινοβολίας, το μέγεθος του οποίου εξαρτάται από τη γωνία προσανατολισμού του ηλιακού συλλέκτη.

Ο συντελεστής ρ είναι η κατοπτρική ανακλαστικότητα (specular reflectance) του ηλιακού συλλέκτη. Στην περίπτωση συνδυασμένης χρήσης διαχυτικών ανακλαστών με κυλινδρικούς απορροφητές, ο συντελεστής ρ θα είναι η διάχυτη ανακλαστικότητα. Αν ο ηλιακός συλλέκτης είναι ένας διαθλαστήρας, τότε ο συντελεστής ρ θα ταυτίζεται με τη διαπερατότητα του διαθλαστήρα.

Η διάχυτα ανακλώμενη ακτινοβολία διαδίδεται ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις, ενώ η κατοπτρική προς την αντίθετη κατεύθυνση αλλά με την ίδια γωνία πρόσπτωσης θ . Το είδος της ανάκλασης εξαρτάται από τη στιλπνότητα του υλικού. Στην πράξη καμία ανάκλαση δεν είναι αμιγώς κατοπτρική, ή διάχυτη, αλλά ένας συνδυασμός και των δύο, που ονομάζεται *γενική ανάκλαση*. Στη γενική ανάκλαση, το μέγεθος της ανακλώμενης έντασης της ακτινοβολίας σε μία συγκεκριμένη κατεύθυνση, και για μία δεδομένη επιφάνεια, είναι συνάρτηση του μήκους κύματος και της χωρικής κατανομής της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Στο σχήμα 5.30 παρουσιάζονται οι διαφορετικές περιπτώσεις προέλευσης της ηλιακής ακτινοβολίας που αναφέρονται παραπάνω.



Σχήμα 5.30: Κατοπτρική, διάχυτη και γενική ανάκλαση ακτινοβολίας.

Οι επόμενοι τρεις συντελεστές γ , τ και α είναι συναρτήσεις της γωνίας πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας στο άνοιγμα του ανακλαστικού κατόπτρου του ηλιακού συλλέκτη.

Ο συντελεστής αναχαίτισης γ (intercept factor) ορίζεται ως το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας, που ανακλώμενο από το ανακλαστικό κάτοπτρο, προσπίπτει στο δέκτη. Ο βασικός σκοπός ανάπτυξης συγκεντρωτικών ηλιακών συλλεκτών είναι ο περιορισμός των απωλειών θερμικής ισχύος από το συλλέκτη προς το περιβάλλον, που επιτυγχάνεται λόγω μείωσης της επιφάνειας του δέκτη. Οι περισσότεροι συγκεντρωτικοί συλλέκτες κατασκευάζονται με επιφάνεια δέκτη αρκετά μεγάλη, ώστε να αναχαίτσει ένα μεγάλο ποσοστό της ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας από το συλλέκτη. Συνήθως ο συντελεστής αναχαίτισης γ παίρνει τιμές μεγαλύτερες του 0,90.

Όπως και στους επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες, τ είναι η διαπερατότητα του καλύμματος του δέκτη και α είναι η απορροφητικότητα του υλικού κατασκευής του απορροφητή του δέκτη. Ο καθορισμός των δύο

αυτών μεγεθών ενδέχεται να παρουσιάζει δυσκολίες, λόγω της μεταβλητότητας της γωνίας πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας από τον ηλιακό συλλέκτη προς το δέκτη.

Στη σχέση 5.48 το γινόμενο των συντελεστών γ , τ και α αναφέρεται σε κάθετη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας στο δέκτη. Προκειμένου να ληφθεί υπόψη η επίδραση της γωνίας πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας, εισάγεται ο συντελεστής μετατροπής της γωνίας πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας στο παραβολικό κάτοπτρο $K_{\gamma\tau\alpha}$ ή μετατροπέας γωνίας πρόσπτωσης (incidence angle modifier). Στη γενική περίπτωση, όσο αυξάνει η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας στο συλλέκτη, η ανακλώμενη ακτινοβολία προς το δέκτη θα μειώνεται.

5.4.4. Απορροφούμενη ακτινοβολία από σύνθετο συγκεντρωτικό ηλιακό συλλέκτη (CPC)

Οι σύνθετοι συγκεντρωτικοί ηλιακοί συλλέκτες παρουσιάστηκαν στην ενότητα 5.2.4.γ, στην οποία αναφέρθηκε ότι ο συλλέκτης δέχεται ηλιακή ακτινοβολία αν η γωνία πρόσπτωσης θ είναι μεταξύ των ορίων $-\theta_c < \theta < \theta_c$, όπου θ_c η ημιγωνία αποδοχής του σύνθετου ηλιακού συλλέκτη (βλέπε σχήμα 5.10). Στην περίπτωση αυτή η απορροφούμενη ηλιακή ακτινοβολία από τον ηλιακό συλλέκτη δίνεται από τη σχέση:

$$S = C \cdot (G_{b,CPC} \cdot \tau_{c,b} \cdot \tau_{CPC,b} \cdot \alpha_b + G_{d,CPC} \cdot \tau_{c,d} \cdot \tau_{CPC,d} \cdot \alpha_d + G_{g,CPC} \cdot \tau_{c,g} \cdot \tau_{CPC,g} \cdot \alpha_g) \quad (5.49)$$

όπου:

$$G_{b,CPC} = F \cdot G_{bn} \cdot \cos(\theta) \quad (5.50)$$

$$G_{d,CPC} = \begin{cases} \frac{G_d}{C} & \text{για } \beta + \theta_c < 90^\circ \\ \frac{G_d}{2} \cdot \left(\frac{1}{C} + \cos(\beta) \right) & \text{για } \beta + \theta_c > 90^\circ \end{cases} \quad (5.51)$$

$$G_{g,CPC} = \begin{cases} 0 & \text{για } \beta + \theta_c < 90^\circ \\ \frac{G_d}{2} \cdot \left(\frac{1}{C} - \cos(\beta) \right) & \text{για } \beta + \theta_c > 90^\circ \end{cases} \quad (5.52)$$

Στη σχέση 5.49 ο πρώτος όρος εκφράζει τη συμβολή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας στη συνολική απορροφούμενη ακτινοβολία από τον ηλιακό συλλέκτη. Αντίστοιχα, ο δεύτερος και ο τρίτος όρος εκφράζουν τη συμβολή της διάχυτης και της ανακλώμενης από το έδαφος ηλιακής ακτινοβολίας στην απορροφούμενη ακτινοβολία από τον ηλιακό συλλέκτη.

Στον πρώτο όρο της σχέσης 5.49:

- Το μέγεθος $G_{b,CPC}$ είναι η άμεση ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο άνοιγμα του ανακλαστικού κατόπτρου εντός των αποδεκτών ορίων της γωνίας πρόσπτωσης.
- Το μέγεθος $\tau_{c,b}$ είναι η διαπερατότητα στην άμεση ηλιακή ακτινοβολία του καλύμματος που πιθανώς περιβάλλει το δέκτη του ηλιακού συλλέκτη.
- Το μέγεθος α_b είναι η απορροφητικότητα στην άμεση ηλιακή ακτινοβολία του δέκτη του ηλιακού συλλέκτη.
- Ο συντελεστής $\tau_{CPC,b}$ εκφράζει την επίπτωση στη διαπερατότητα του ηλιακού συλλέκτη λόγω των διαδοχικών ανακλάσεων στο κάτοπτρο του συλλέκτη, πριν η ακτινοβολία οδηγηθεί στο δέκτη και είναι συνάρτηση του αριθμού των ανακλάσεων αυτών.

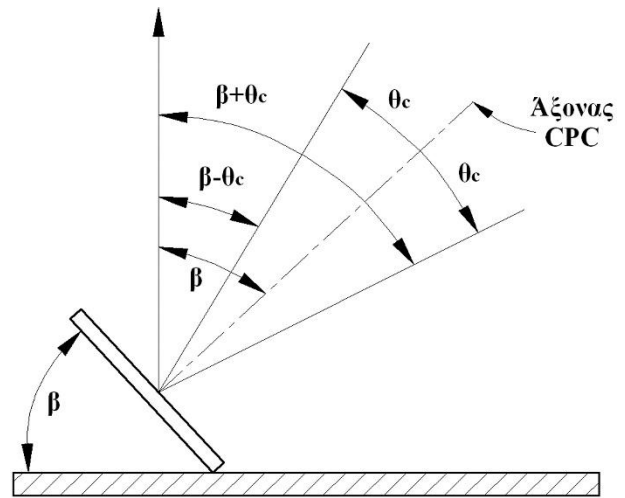
Τα μεγέθη, που εμφανίζονται στο δεύτερο και στον τρίτο όρο της σχέσης 5.49 για τη διάχυτη και την ανακλώμενη από το έδαφος ηλιακή ακτινοβολία αντίστοιχα, είναι ανάλογα με αυτά που περιγράφηκαν μόλις πριν, για την άμεση προσπίπτουσα ακτινοβολία.

Το μέγεθος G_{bn} στη σχέση 5.50 αναπαριστά την ολική διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο στη θέση εγκατάστασης του ηλιακού συλλέκτη. Το μέγεθος G_d στις σχέσεις 5.51 και 5.52

αναπαριστά τη διάχυτη ακτινοβολία στη θέση εγκατάστασης του ηλιακού συλλέκτη. Το μέγεθος C στις σχέσεις 5.51 και 5.52 είναι ο λόγος συγκέντρωσης του ηλιακού συλλέκτη ενώ το μέγεθος θ στη σχέση 5.50 είναι η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας στο άνοιγμα του συλλέκτη.

Με βάση τη σχέση 5.52, η ανακλώμενη από το έδαφος ηλιακή ακτινοβολία είναι σημαντική, μόνο αν ισχύει η σχέση $\beta + \theta_c > 90^\circ$, συνθήκη που συνεπάγεται ότι το κάτοπτρο του ηλιακού συλλέκτη έχει άμεση οπτική επαφή με το έδαφος. Υπενθυμίζεται ότι, στις ανωτέρω σχέσεις, η γωνία β είναι η κλίση εγκατάστασης του ηλιακού συλλέκτη ως προς το οριζόντιο επίπεδο. Γενικότερα οι γωνίες που εμφανίζονται στις ανωτέρω σχέσεις παρουσιάζονται στο σχήμα 5.31.

Επίσης, προκειμένου να συμβάλει η άμεση ηλιακή ακτινοβολία στην απορρόφηση ακτινοβολίας από τον ηλιακό συλλέκτη, έχει αποδειχτεί ότι πρέπει να ισχύει η ακόλουθη σχέση [12], όπου θ_z η γωνία ζενίθ του ήλιου και φ_s το αζιμούθιο ήλιου:



Σχήμα 5.31: Αποδεκτό εύρος γωνιών πρόσπτωσης σε συλλέκτη CPC και κλίση εγκατάστασης.

$$\beta - \theta_c \leq \tan^{-1}(\tan(\theta_z) \cdot \cos(\varphi_s)) \leq \beta + \theta_c \quad (5.53)$$

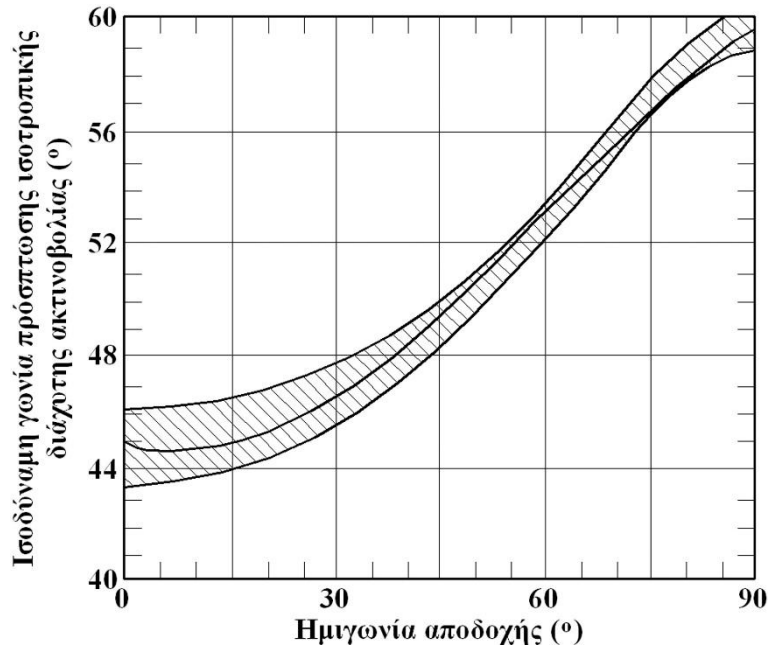
Το κριτήριο της σχέσης 5.53 εισάγεται στον υπολογισμό της άμεσης προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας μέσω της σχέσης 5.50 με τη συνάρτηση ελέγχου F , η οποία παίρνει την τιμή 1, αν ικανοποιείται το ανωτέρω κριτήριο, και την τιμή 0 στην αντίθετη περίπτωση.

Οι συντελεστές διαπερατότητας $\tau_{c,d}$ και $\tau_{c,g}$ εκφράζουν τη διαπερατότητα του καλύμματος του συλλέκτη στη διάχυτη και στην ανακλώμενη από το έδαφος ηλιακή ακτινοβολία αντίστοιχα.

Σχετικά με τη διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία, μόνο ένα ποσοστό από τη συνολική διαθέσιμη διάχυτη ακτινοβολία στην ατμόσφαιρα εισέρχεται εντός του ανακλαστικού κατόπτρου. Το ποσοστό αυτό είναι συνάρτηση της ημιγωνίας αποδοχής θ_c . Στην περίπτωση που η διάχυτη ακτινοβολία στην ατμόσφαιρα μπορεί να θεωρηθεί ως ισοτροπική, τότε η σχέση ανάμεσα στη θ_c και στην εισερχόμενη στο ανακλαστικό κάτοπτρο διάχυτη ακτινοβολία μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση ενός νέου μεγέθους, που ονομάζεται «ισοδύναμη γωνία πρόσπτωσης» θ_e της ισοτροπικής διάχυτης ακτινοβολίας. Η διαπερατότητα του καλύμματος στη διάχυτη ακτινοβολία θα καθοριστεί τελικά με βάση την ισοδύναμη γωνία πρόσπτωσης θ_e . Η σχέση αυτή εξαρτάται από το υλικό του καλύμματος. Για υλικά καλύμματος με δείκτες διάθλασης από 1,34 έως 1,526 (γυαλί), μπορεί να διατυπωθεί η ακόλουθη πολυωνμική προσέγγιση μεταξύ θ_c και θ_e :

$$\theta_e = 44,86 - 0,0716 \cdot \theta_c + 0,00512 \cdot \theta_c^2 - 0,00002798 \cdot \theta_c^3 \quad (5.54)$$

Για παράδειγμα, αν σε ένα ηλιακό συλλέκτη η ημιγωνία αποδοχής είναι 25° , τότε η ισοδύναμη γωνία πρόσπτωσης της ισοτροπικής διάχυτης ακτινοβολίας υπολογίζεται $45,83^\circ$. Στην περίπτωση αυτή, η διαπερατότητα του καλύμματος του δέκτη στη διάχυτη ακτινοβολία θα καθοριστεί για γωνία πρόσπτωσης ίση με $45,83^\circ$. Ισοδύναμα, η ισοδύναμη γωνία πρόσπτωσης της ισοτροπικής διάχυτης ακτινοβολίας δίνεται γραφικά συναρτήσει της ημιγωνίας αποδοχής από το διάγραμμα του σχήματος 5.32 [13].



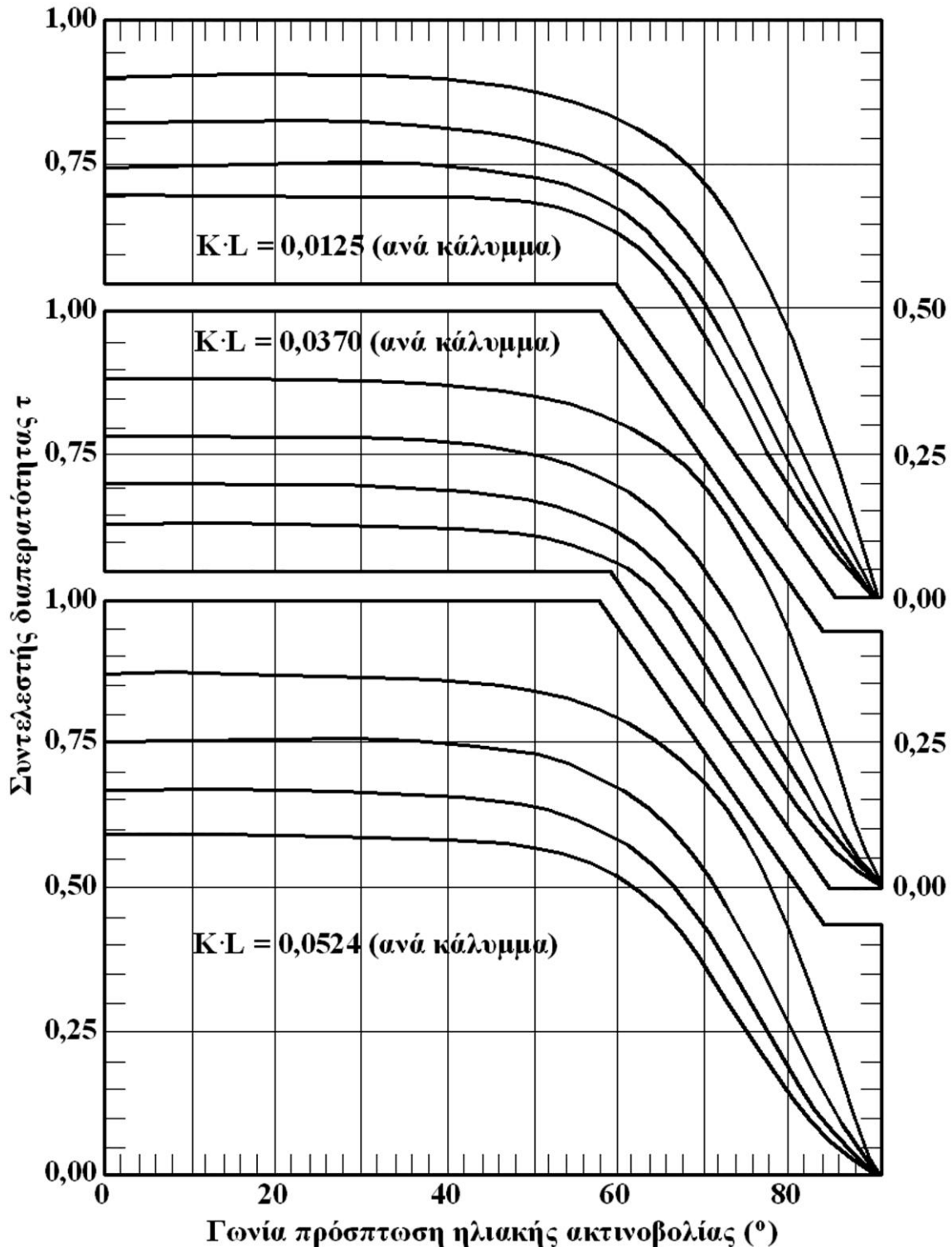
Σχήμα 5.32: Διακύμανση ισοδύναμης γωνίας πρόσπτωσης ισοτροπικής διάχυτης ακτινοβολίας σε CPC συλλέκτη συναρτήσει της ημιγωνίας αποδοχής.

Οι συντελεστές διαπερατότητας στην άμεση και στη διάχυτη ακτινοβολία δύναται να εκτιμηθούν με βάση το σχήμα 5.33, συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης. Στην περίπτωση διάχυτης ακτινοβολίας, ως γωνία πρόσπτωσης θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί η ισοδύναμη γωνία πρόσπτωσης, όπως ορίστηκε προηγουμένως.

Στο σχήμα 5.33 οι συντελεστές διαπερατότητας δύνονται συναρτήσει, πέρα από τη γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας, και του γινομένου $K \cdot L$. Στο γινόμενο αυτό εμφανίζονται το πάχος του καλύμματος L σε m και ένας συντελεστής αναλογίας K , ο οποίος ονομάζεται *συντελεστής εξάλειψης* (extinction coefficient), και μετριέται σε m^{-1} . Ο συντελεστής εξάλειψης εξαρτάται αποκλειστικά από το υλικό του καλύμματος, συνεπώς για το ίδιο υλικό παραμένει αμετάβλητος. Για το γυαλί παίρνει τιμές από $4m^{-1}$, για το «άσπρο» γυαλί, δηλαδή για το γυαλί, το οποίο εμφανίζεται ως άσπρο ιδωμένο από την ακμή του, έως $32m^{-1}$ για γυαλί με υψηλή περιεκτικότητα σε σίδηρο, το οποίο εμφανίζεται ως πράσινο ιδωμένο από την ακμή του. Συνεπώς το γινόμενο $K \cdot L$ αποτελεί χαρακτηριστικό στοιχείο του καλύμματος, συνυπολογίζοντας το πάχος και το υλικό του καλύμματος. Ας σημειωθεί, τέλος, ότι η ισχύς του σχήματος 5.33 είναι γενική, δηλαδή δύναται να εφαρμοστεί για την εκτίμηση του συντελεστή διαπερατότητας σε άμεση ή διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία σε οποιοδήποτε είδος συλλέκτη (επίπεδους ή συγκεντρωτικούς).

Οι $\tau_{CPC,b}$, $\tau_{CPC,d}$ και $\tau_{CPC,g}$ στη σχέση 5.49 εκφράζουν απώλειες στην απορροφούμενη ηλιακή ακτινοβολία από το δέκτη του ηλιακού συλλέκτη λόγω διαδοχικών κατοπτρικών ανακλάσεων στο κάτοπτρο του συλλέκτη, πριν η ακτινοβολία φτάσει τελικά στο δέκτη. Οι τρεις αυτοί όροι συνήθως λαμβάνονται ίσοι μεταξύ τους και υπολογίζονται με βάση τον αριθμό n_i των κατοπτρικών ανακλάσεων της ηλιακής ακτινοβολίας και του συντελεστή ανακλαστικότητας του κατόπτρου ρ από τη σχέση:

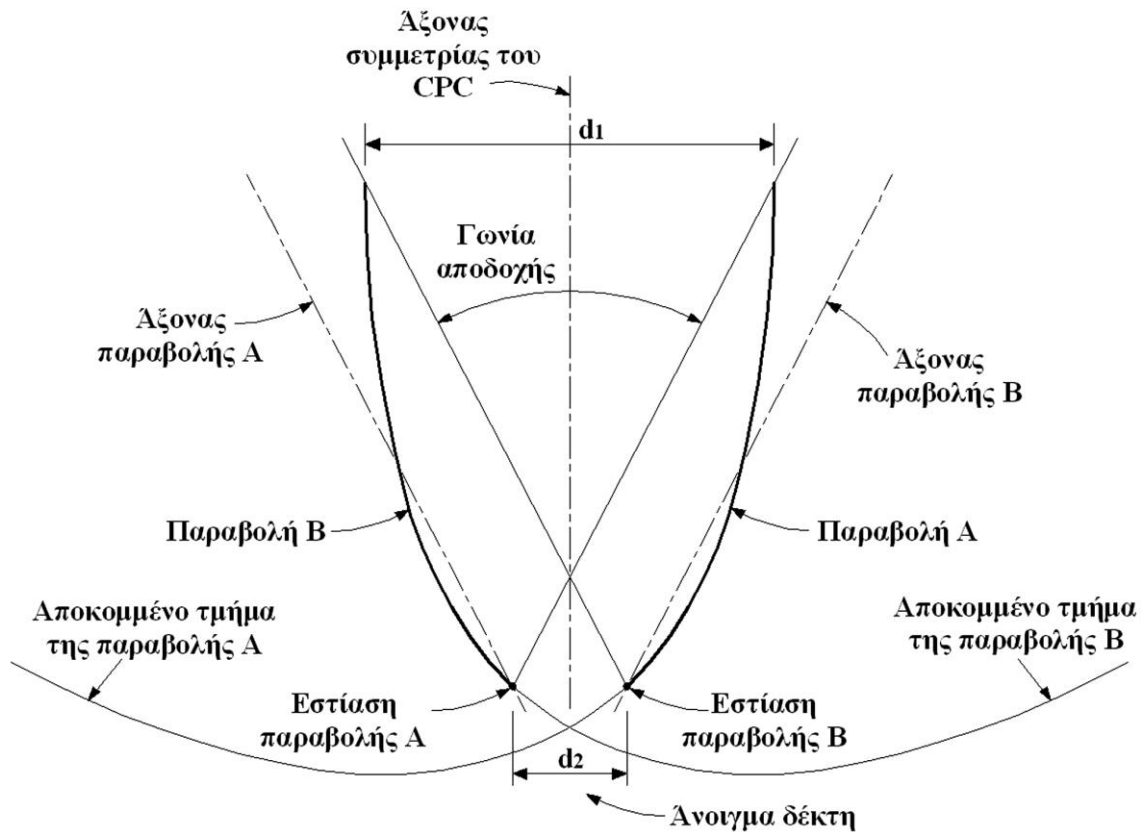
$$\tau_{CPC} = \rho^{n_i} \cdot \quad (5.55)$$



Σχήμα 5.33: Συντελεστές διαπερατότητας για διαφορετικούς τύπους καλύμματος συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης στον ηλιακό συλλέκτη.

Στο σχήμα 5.34 παρουσιάζεται ο τρόπος σχεδίασης ενός σύνθετου παραβολικού ηλιακού συλλέκτη. Οι δύο πλευρές του συλλέκτη ακολουθούν τη μορφή παραβολής. Στο σχήμα εμφανίζονται οι παραβολές και οι άξονές τους και για τις δύο πλευρές του συλλέκτη. Το ύψος h του συλλέκτη καθορίζεται από την τομή της παράλληλης με τον άξονα της μίας παραβολής (αριστερής ή δεξιάς παραβολής), που διέρχεται από το κατώτατο μέρος του αντίστοιχου τμήματος του συλλέκτη (αριστερού ή δεξιού), με την προέκταση της παραβολής από το απέναντι τμήμα του συλλέκτη. Στο ίδιο σχήμα εμφανίζεται η ημιγωνία αποδοχής του

συλλέκτη θ_c , η οποία ορίζεται από τον άξονα του συλλέκτη και την παράλληλη του άξονα της παραβολής που ενώνει το κατώτατο μέρος της μίας πλευράς του συλλέκτη με το ανώτατο μέρος της απέναντι πλευράς του.

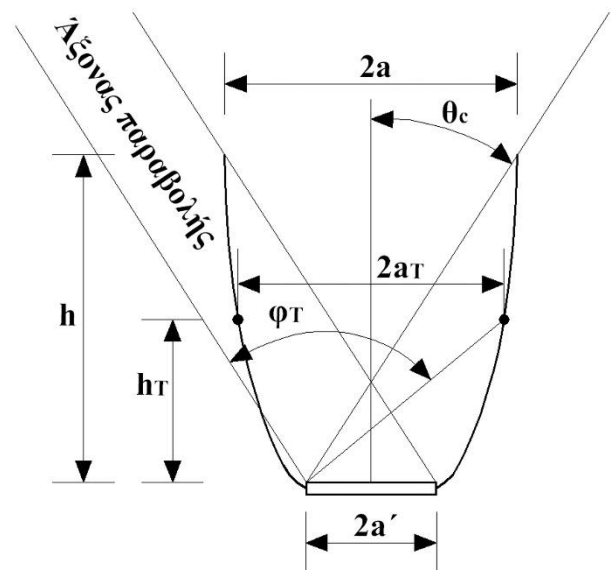


Σχήμα 5.34: Γεωμετρική ανάπτυξη σύνθετου παραβολικού ηλιακού συλλέκτη.

Συνήθως οι σύνθετοι παραβολικοί ηλιακοί συλλέκτες κατασκευάζονται με ύψος h_T μικρότερο από το ύψος h , όπως αυτό ορίστηκε ανωτέρω. Ο λόγος για την μείωση του ύψους προκύπτει από το γεγονός ότι με την παρέμβαση αυτή επιτυγχάνεται σημαντική μείωση του κόστους κατασκευής του συλλέκτη με πολύ μικρή μείωση της απορροφούμενης ηλιακής ακτινοβολίας από τον ηλιακό συλλέκτη. Στην περίπτωση αυτή, ο ηλιακός συλλέκτης ονομάζεται *κόλουρος* και η γεωμετρία του περιγράφεται στο σχήμα 5.35.

Με βάση το σχήμα 5.35:

- h είναι το θεωρητικό ύψος του συλλέκτη, το οποίο ορίζεται με βάση την ανωτέρω περιγραφόμενη μεθοδολογία σχεδίασης,
- h_T είναι το νέο ύψος με το οποίο τελικά κατασκευάζεται ο ηλιακός συλλέκτης,
- a' είναι το ήμισυ του πλάτους του δέκτη του συλλέκτη,
- a είναι το ήμισυ του ανοίγματος του συλλέκτη για ύψος h ,
- a_T είναι το ήμισυ του ανοίγματος του συλλέκτη για ύψος h_T ,
- θ_c η ημιγωνία αποδοχής του συλλέκτη,
- φ_T είναι η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στον άξονα της παραβολής της μίας από τις πλευρές του συλλέκτη και την ευθεία που ενώνει το σημείο τομής του άξονα της παραβολής με το δέκτη και την απέναντι πλευρά του κατόπτρου στο ύψος h_T .



Σχήμα 5.35: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά κόλουρος συλλέκτη CPC.

Με δεδομένα το ήμισυ πλάτος a' του δέκτη του συλλέκτη, τη ημιγωνία αποδοχής θ_c και τη γωνία φ_T (ή εναλλακτικά το λόγο h_T/h), είναι δυνατός ο αναλυτικός υπολογισμός του μέσου αριθμού των ανακλάσεων n_i από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$f = a' \cdot (1 + \sin\theta_c) \quad (5.56)$$

$$a = \frac{a'}{\sin\theta_c} \quad (5.57)$$

$$h = \frac{f \cdot \cos(\theta_c)}{\sin^2(\theta_c)} \quad (5.58)$$

$$a_T = \frac{f \cdot \sin(\varphi_T - \theta_c)}{\sin^2(\varphi_T/2)} \quad (5.59)$$

$$h_T = \frac{f \cdot \cos(\varphi_T - \theta_c)}{\sin^2(\varphi_T/2)} \quad (5.60)$$

$$C = \frac{a_T}{a'} \text{ ή για πλήρη ηλιακό συλλέκτη } (h_T = h) \quad C = \frac{a}{a'} = \frac{1}{\sin(\theta_c)} \quad (5.61)$$

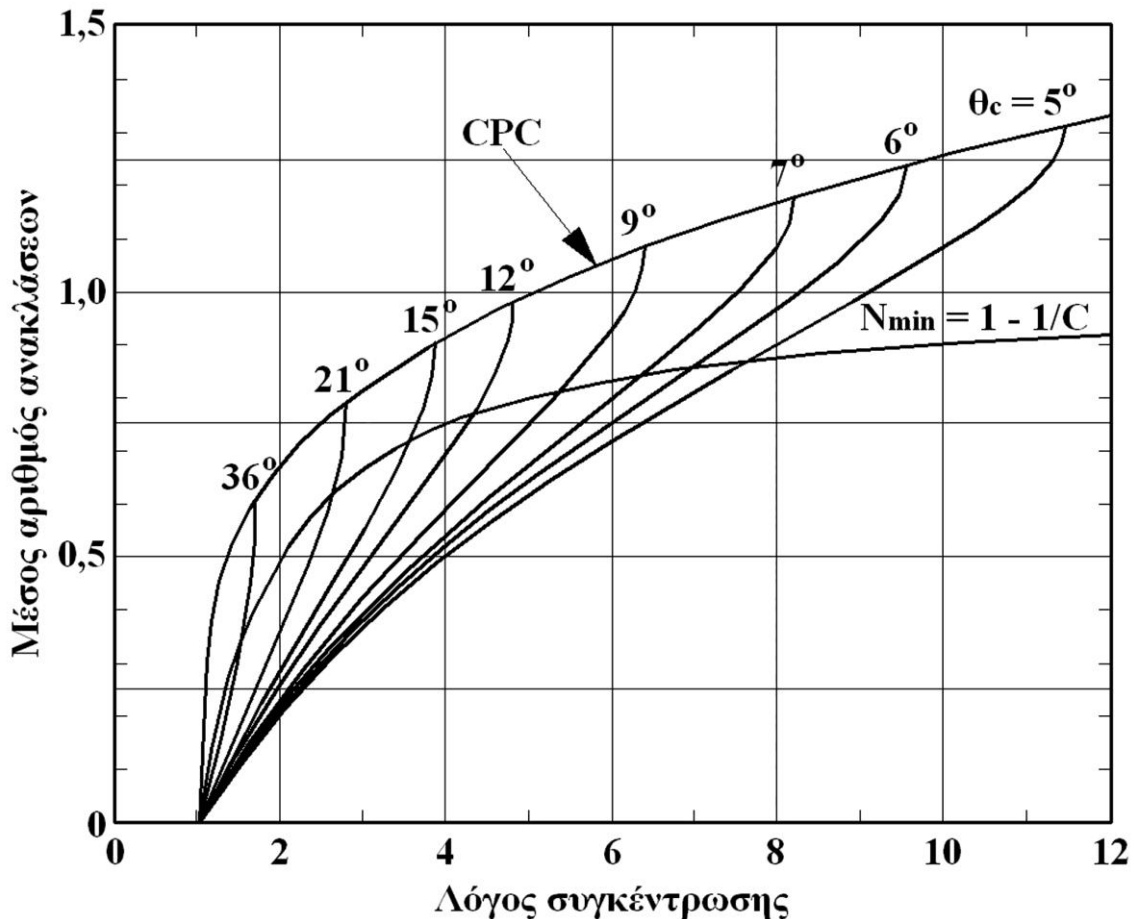
$$\frac{A_{RT}}{2 \cdot a_T} = \frac{f}{2} \cdot \left[\frac{\cos(\varphi/2)}{\sin^2(\varphi/2)} + \ln \left(\cot \left(\frac{\varphi}{4} \right) \right) \right] \Bigg|_{\varphi=\theta_c+\pi/2}^{\varphi=\varphi_T} \quad (5.62)$$

$$x = \frac{1 + \sin(\theta)}{\cos(\theta)} \cdot \left[-\sin(\theta) + \sqrt{1 + \frac{h_T}{h} \cdot \cot^2(\theta)} \right] \quad (5.63)$$

$$n_i = \max \left[C \cdot \frac{A_{RT}}{4 \cdot a_T} - \frac{x^2 - \cos^2(\theta)}{2 \cdot (1 + \sin(\theta))}, 1 - \frac{1}{C} \right] \quad (5.64)$$

Στις ανωτέρω σχέσεις το μέγεθος A_{RT} είναι η περιοχή ανάκλασης ανά μονάδα βάθους του κόλουρου συλλέκτη. Στην περίπτωση που $h = h_T$, τότε $\varphi_T = 2 \cdot \theta_c$ και $A_{RT} = A_R$. Επίσης ως θ συμβολίζεται η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας στο άνοιγμα του ηλιακού συλλέκτη.

Ισοδύναμα, αντί της χρήσης των ανωτέρω σχέσεων, ο μέσος αριθμός ανακλάσεων της ηλιακής ακτινοβολίας στο κάτωπλευρο του ηλιακού συλλέκτη μπορεί να βρεθεί από το διάγραμμα του σχήματος 5.36 συναρτήσει του λόγου συγκέντρωσης του συλλέκτη και της ημιγωνίας αποδοχής.



Σχήμα 5.36: Διακύμανση μέσου αριθμού ανακλάσεων ηλιακής ακτινοβολίας συλλέκτη CPC συναρτήσει του λόγου συγκέντρωσης C και της ημιγωνίας αποδοχής θ_c του συλλέκτη.

Παράδειγμα 5.4.

Υπολογισμός προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε σύνθετο συγκεντρωτικό παραβολικό ηλιακό συλλέκτη

Να υπολογιστεί η συνολική προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε κόλουρο ηλιακό συλλέκτη CPC (σύνθετο συγκεντρωτικό παραβολικό συλλέκτη), ο οποίος είναι εγκατεστημένος στην περιοχή του Ηρακλείου Κρήτης (γεωγραφικό πλάτος 35°B) και με κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο $\beta = 25^\circ$, σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή κατά την οποία η διαθέσιμη ολική ηλιακή ακτινοβολία ισούται με $G_{\text{bn}} = 800\text{W/m}^2$, η διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία ισούται με $G_d = 350\text{W/m}^2$, η γωνία ζενίθ του ήλιου ισούται με $\theta_z = 32^\circ$, το αζιμούθιο του ήλιου ισούται με $\varphi_s = -65^\circ$ και η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας στο άνοιγμα του ηλιακού συλλέκτη ισούται με $\theta = 30^\circ$. Η ημιγωνία αποδοχής ισούται με $\theta_c = 12^\circ$ και ο λόγος συγκέντρωσης του ηλιακού συλλέκτη ισούται με $C = 4$. Το κάλυμμα του συλλέκτη έχει γινόμενο $K \cdot L$ ίσο με 0,0125. Η ανακλαστικότητα του ηλιακού συλλέκτη δίνεται με $\rho = 0,88$ και η απορροφητικότητα του δέκτη δίνεται με $\alpha = 0,95$.

Λύση:

Καταρχήν θα πρέπει να ελεγχθεί αν ικανοποιείται το κριτήριο της σχέσης 5.53:

$$\beta - \theta_c \leq \tan^{-1}(\tan(\theta_z) \cdot \cos(\varphi_s)) \leq \beta + \theta_c \Leftrightarrow 25 - 12 \leq \tan^{-1}(\tan(32) \cdot \cos(-65)) \leq 25 + 12 \Leftrightarrow$$

$$13 \leq \tan^{-1}(\tan(32) \cdot \cos(-65)) \leq 37 \Leftrightarrow 13 \leq 14,79 \leq 37$$

Συνεπώς το κριτήριο της σχέσης 5.53 ικανοποιείται και η συνάρτηση ελέγχου F στη σχέση 5.50 παίρνει την τιμή 1. Η άμεση ηλιακή ακτινοβολία, που προσπίπτει στον ηλιακό συλλέκτη, υπολογίζεται από τη σχέση 5.50:

$$G_{b,CPC} = F \cdot G_{bn} \cdot \cos(\theta) \Leftrightarrow G_{b,CPC} = 1 \cdot 800 \cdot \cos(30) \Leftrightarrow G_{b,CPC} = 692,82 \text{ W/m}^2.$$

Καθώς το άθροισμα $\beta + \theta_c$ ισούται με 37° , δηλαδή είναι μικρότερο των 90° , η προσπίπτουσα διάχυτη ακτινοβολία στον ηλιακό συλλέκτη θα δίνεται από την πρώτη από τις σχέσεις 5.51:

$$G_{d,CPC} = \frac{G_d}{C} \Leftrightarrow G_{d,CPC} = \frac{350}{4} \Leftrightarrow G_{d,CPC} = 87,5 \text{ W/m}^2.$$

Επίσης, από τη σχέση 5.52, για $\beta + \theta_c = 37^\circ < 90^\circ$, η ανακλώμενη από το έδαφος ακτινοβολία $G_{g,CPC}$ λαμβάνεται ίση με 0.

Για γωνία πρόσπτωσης ίση με 30° και γινόμενο $K \cdot L$ ίσο με 0,0125, από το σχήμα 5.33 εκτιμάται συντελεστής διαπερατότητας στην άμεση ακτινοβολία $\tau_{c,b} = 0,90$. Επίσης, για γωνία πρόσπτωσης 30° από το σχήμα 5.32, εκτιμάται ισοδύναμη γωνία πρόσπτωσης ισοτροπικής διάχυτης ακτινοβολίας 46° . Στη συνέχεια, ξανά από το σχήμα 5.33, για την ισοδύναμη γωνία πρόσπτωσης της ισοτροπικής διάχυτης ακτινοβολίας των 46° εκτιμώνται οι συντελεστές διαπερατότητας στη διάχυτη και στην ανακλώμενη από το έδαφος ακτινοβολία ίσοι με $\tau_{c,d} = \tau_{c,g} = 0,89$. Τέλος, από το σχήμα 5.36, για λόγο συγκέντρωσης του ηλιακού συλλέκτη ίσο με 4 και για ημιγωνία αποδοχής 12° , ο μέσος αριθμός ανακλάσεων εκτιμάται στο 0,68. Μετά τα ανωτέρω είναι δυνατός ο υπολογισμός της συνολικής απορροφούμενης ηλιακής ακτινοβολίας από τον ηλιακό συλλέκτη με βάση τη σχέση 5.49:

$$\begin{aligned} S &= C \cdot (G_{b,CPC} \cdot \tau_{c,b} \cdot \tau_{CPC,b} \cdot \alpha_b + G_{d,CPC} \cdot \tau_{c,d} \cdot \tau_{CPC,d} \cdot \alpha_d + G_{g,CPC} \cdot \tau_{c,g} \cdot \tau_{CPC,g} \cdot \alpha_g) \Leftrightarrow \\ S &= C \cdot (G_{b,CPC} \cdot \tau_{c,b} \cdot \rho^{ni} \cdot \alpha_b + G_{d,CPC} \cdot \tau_{c,d} \cdot \rho^{ni} \cdot \alpha_d + G_{g,CPC} \cdot \tau_{c,g} \cdot \rho^{ni} \cdot \alpha_g) \Leftrightarrow \\ S &= 4 \cdot (692,82 \cdot 0,90 \cdot 0,88^{0,68} \cdot 0,95 + 87,5 \cdot 0,89 \cdot 0,88^{0,68} \cdot 0,95 + 0 \cdot 0,89 \cdot 0,88^{0,68} \cdot 0,95) \Leftrightarrow \\ S &= 2.443,46 \text{ W/m}^2 \end{aligned}$$

5.5. Αποθήκευση θερμικής ενέργειας

Όπως και στους υβριδικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 3, απαραίτητη συνιστώσα και για τους σταθμούς παραγωγής θερμικής ενέργειας είναι η μονάδα αποθήκευσης. Μετά την παρουσίαση των βασικών τεχνολογιών παραγωγής θερμικής ενέργειας από Α.Π.Ε., πρακτικά των εναλλακτικών τύπων ηλιακών συλλεκτών, που προηγήθηκε στις προηγούμενες ενότητες του παρόντος Κεφαλαίου, στην παρούσα ενότητα θα γίνει αναφορά στις βασικές τεχνολογίες αποθήκευσης θερμικής ισχύος. Ειδικότερα θα παρουσιαστούν οι βασικές αναλυτικές σχέσεις που απαιτούνται για την προσομοίωση της λειτουργίας θερμοδοχείων αποθήκευσης ενέργειας με εργαζόμενο μέσο νερό, καθώς η τεχνολογία αυτή είναι η βασική και πλέον εφαρμόσιμη τεχνολογία αποθήκευσης θερμότητας στα συνήθη ενεργητικά συστήματα παραγωγής θερμικής ισχύος.

Η αποθήκευση θερμικής ενέργειας μπορεί να γίνει με τη μορφή είτε αισθητής είτε λανθάνουσας θερμότητας, αυξάνοντας τη θερμοκρασία ή αλλάζοντας τη φάση αντίστοιχα του μέσου αποθήκευσης. Η επιλογή του μέσου αποθήκευσης εξαρτάται από το είδος της εφαρμογής. Για παράδειγμα, για την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης, είναι αυτονόητη η αποθήκευση θερμότητας στο ίδιο το τελικό προϊόν. Το νερό, λόγω της υψηλής θερμοχωρητικότητάς του, της διαθεσιμότητάς του σε χαμηλό κόστος και πλήθος άλλων ελκυστικών ιδιοτήτων (άοσμο, ασφαλές κλπ), αποτελεί ιδανικό μέσο αποθήκευσης θερμότητας σε περίπτωση εφαρμογών θέρμανσης κτηριακών χώρων. Στην περίπτωση αερόθερμων ηλιακών συλλεκτών, η αποθήκευση θερμικής ενέργειας μπορεί να γίνει με τη μορφή αισθητής ή λανθάνουσας θερμότητας σε στερεά ή ρευστά μέσα αντίστοιχα. Κλασικό παράδειγμα αποτελεί η αποθήκευση θερμότητας σε στρώμα με βότσαλα –

χαλίκια (pebble ή rock bed). Τέλος, στην περίπτωση παθητικών ηλιακών συστημάτων, η θερμότητα αποθηκεύεται ως αισθητή θερμότητα στα ίδια τα δομικά στοιχεία του κτηριακού κελύφους.

Τα βασικά χαρακτηριστικά ενός συστήματος αποθήκευσης θερμότητας είναι:

- η χωρητικότητα αποθήκευσης ανά μονάδα όγκου του μέσου αποθήκευσης, γνωστή ως θερμοχωρητικότητα,
- το πεδίο θερμοκρασιών του μέσου αποθήκευσης στο οποίο εκτελείται η αποθήκευση και η διάθεση της θερμότητας από το σύστημα αποθήκευσης,
- το εργαζόμενο μέσο με το οποίο επιτυγχάνεται η μεταφορά θερμότητας προς και από το μέσο αποθήκευσης
- η θερμοκρασιακή διαβάθμιση του μέσου αποθήκευσης με την οποία αποθηκεύεται η θερμότητα,
- το κόστος κτήσης, εγκατάστασης και λειτουργίας.

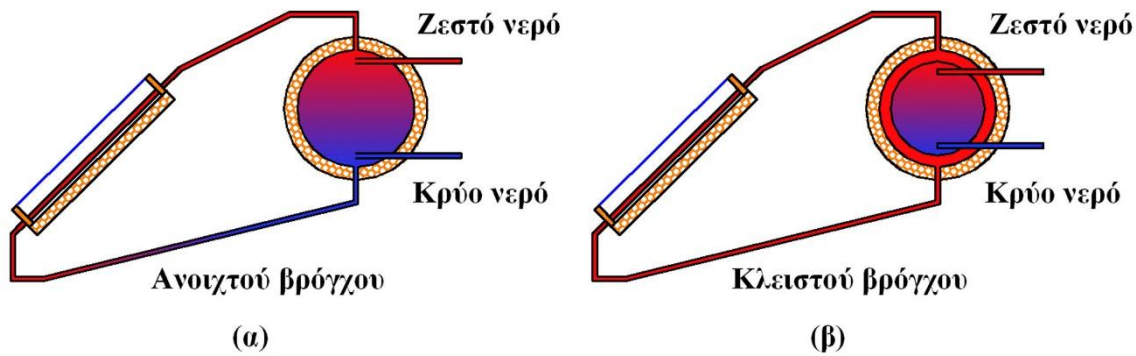
Τα ανωτέρω χαρακτηριστικά είναι αυτά που διαμορφώνουν, σε συνάρτηση με το είδος της εφαρμογής, την τελική επιλογή για το βέλτιστο σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας που πρέπει να εφαρμοστεί.

Μία σημαντική ιδιαιτερότητα των υβριδικών σταθμών θερμικής ισχύος έχει να κάνει με τη φυσική διεργασία της μεταφοράς θερμότητας πάντα από ένα μέσο υψηλής θερμοκρασίας προς ένα μέσο χαμηλής θερμοκρασίας. Τούτο συνεπάγεται ότι, για να προκύψει αποθήκευσης θερμότητας, η θερμοκρασία του μέσου από τη μονάδα βάσης του υβριδικού σταθμού, π.χ. το μίγμα νερού – γλυκόλης από το πρωτεύον κύκλωμα των ηλιακών συλλεκτών, θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία του αποθηκευμένου μέσου στη μονάδα αποθήκευσης, π.χ. ένα θερμοδοχείο. Αν δεν ικανοποιείται η συνθήκη αυτή, τότε ακόμα και αν υπάρχει παραγωγή και περίσσεια θερμικής ισχύος από τις μονάδες βάσης, τούτη δεν θα είναι δυνατόν να αποθηκευτεί.

Στην πραγματικότητα η θερμοκρασία, με την οποία το εργαζόμενο μέσο φτάνει στη μονάδα αποθήκευσης, είναι μικρότερη από τη θερμοκρασία με την οποία εξέρχεται από τη μονάδα βάσης, π.χ. τους ηλιακούς συλλέκτες, εξαιτίας των απωλειών θερμότητας κατά τη διαδρομή του μέσου στο δίκτυο μεταφοράς από τη μονάδα βάσης (ηλιακούς συλλέκτες) προς τη μονάδα αποθήκευσης (θερμοδοχεία νερού). Συνεπώς το κριτήριο, που θα καθορίσει αν είναι δυνατή η αποθήκευση θερμότητας, είναι η θερμοκρασία με την οποία το μέσο μεταφοράς θερμότητας εισέρχεται στον εναλλάκτη θερμότητας της μονάδας αποθήκευσης, η οποία θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία του μέσου εντός μονάδας. Ο ανωτέρω περιορισμός, όπως θα δούμε σε επόμενη ενότητα, επιχειρείται να αντιμετωπιστεί με την εισαγωγή μονάδων διαστρωματικής αποθήκευσης θερμότητας, δηλαδή αποθήκευσης θερμότητας σε διαφορετικές θερμοκρασίες.

5.5.1. Αποθήκευση θερμότητας σε δεξαμενές νερού

Η χρήση δεξαμενών νερού για αποθήκευση θερμότητας είναι η ιδανική και πλέον διαδεδομένη τεχνολογία αποθήκευσης θερμότητας σε συνήθεις εφαρμογές ενεργητικών θερμικών συστημάτων. Η βασική φιλοσοφία παρουσιάζεται στα σχήματα 5.37. Στο σχήμα 5.37α το εργαζόμενο μέσο στους ηλιακούς συλλέκτες ταυτίζεται με το εργαζόμενο μέσο στη δεξαμενή αποθήκευσης. Αντίθετα, στο σχήμα 5.37β, το εργαζόμενο μέσο στους ηλιακούς συλλέκτες ρέει σε αυτόνομο και ανεξάρτητο κύκλωμα από το μέσο αποθήκευσης θερμότητας. Τα δύο μέσα δεν έρχονται σε επαφή σε κανένα σημείο του υδραυλικού δικτύου. Η μεταφορά θερμότητας επιτυγχάνεται με εναλλάκτη θερμότητας, μέσω του οποίου τα δύο κυκλώματα έρχονται σε επαφή.



Σχήμα 5.37: Αποθήκευση θερμότητας από ηλιακό συλλέκτη σε δεξαμενή νερού ανοιχτού και κλειστού βρόχου.

Η υλοποίηση στο σχήμα 5.37α είναι περισσότερο απλή στην κατασκευή, και, συνεπώς έχει μικρότερο κόστος. Επιπλέον η αποθήκευση θερμότητας είναι άμεση. Άρα εξαλείφονται οι απώλειες μεταφοράς θερμικής ισχύος από το κύκλωμα των ηλιακών συλλεκτών στη δεξαμενή αποθήκευσης μέσω του εναλλάκτη θερμότητας, μεγιστοποιώντας έτσι την απόδοση του συστήματος αποθήκευσης. Η υλοποίηση στο σχήμα 5.37β είναι περισσότερο ασφαλής, καταρχήν ως προς το ίδιο το σύστημα, αφού δύναται να χρησιμοποιηθεί διάλυμα γλυκόλης με χαμηλότερο σημείο τήξης, άρα η πιθανότητα παγώματος του εργαζόμενου μέσου εντός του συλλέκτη σε περιόδους και γεωγραφικές περιοχές πολύ χαμηλών θερμοκρασιών μειώνεται, απομακρύνοντας το ενδεχόμενο καταστροφής των συλλεκτών. Επίσης, το κλειστό κύκλωμα των ηλιακών συλλεκτών, περιορίζει την ανανέωση του νερού εντός αυτών και τη φθορά τους λόγω χημικής διάβρωσης, επικάθισης αλάτων κλπ. Τέλος το σύστημα είναι περισσότερο ασφαλές και ως προς τον ίδιο το χρήστη, αφού ανεξαρτητοποιείται το μέσο με το οποίο πιθανώς ο ίδιος έρχεται σε επαφή, π.χ. σε περίπτωση ζεστού νερού χρήσης, από το κύκλωμα των ηλιακών συλλεκτών.

Αν το εργαζόμενο μέσο αποθήκευσης θερμοχωρητικότητας C_p παραλαμβάνει θερμική ισχύ με παροχή μάζας \dot{m} και η θερμοκρασία του αυξάνεται ομοιόμορφα στη μάζα του κατά ΔT_s , τότε η αποδιδόμενη σε αυτό θερμική ισχύς θα ισούται με \dot{Q}_s :

$$\dot{Q}_s = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T_s \quad (5.65)$$

Τονίζεται ότι η ανωτέρω σχέση ισχύει για την περίπτωση δεξαμενών θερμικής αποθήκευσης (θερμοδοχείων) μη διαστρωματικής αποθήκευσης, δηλαδή στα οποία η αποθήκευση θερμικής ισχύος προκαλεί ομοιόμορφη αύξηση της θερμοκρασίας σε όλη τη μάζα του αποθηκευμένου εργαζόμενου μέσου.

Η ισχύς \dot{Q}_s , που τελικά θα αποθηκευτεί στο θερμοδοχείο, αποτελεί ένα μέρος από τη διαθέσιμη ισχύ \dot{Q}_u από τη μονάδα βάσης του υβριδικού σταθμού. Ένα άλλο ποσό ισχύος \dot{Q}_d από την ισχύ \dot{Q}_u θα αποδοθεί απευθείας για κάλυψη της ζήτησης θερμικής ισχύος, ενώ, επίσης, ένα μέρος \dot{Q}_L από την αρχικά διαθέσιμη ισχύ θα χαθεί προς το περιβάλλον με τη μορφή θερμικών απωλειών από τη μονάδα αποθήκευσης. Ο ισολογισμός θερμικής ισχύος κατά τη διαδικασία αποθήκευσης γράφεται:

$$\dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T_s = \dot{Q}_s = \dot{Q}_u - \dot{Q}_d - U_s \cdot A_s \cdot (T_s - T_a) \quad (5.66)$$

όπου:

- U_s : ο συνολικός συντελεστής θερμικής διαπερατότητας, που χαρακτηρίζει τη μεταφορά θερμότητας από το θερμοδοχείο προς το περιβάλλον
- A_s : η συνολική επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας από το θερμοδοχείο προς το περιβάλλον
- T_s : η ομοιόμορφη θερμοκρασία του μέσου αποθήκευσης θερμότητας εντός του θερμοδοχείου
- T_a : η θερμοκρασία περιβάλλοντος προς το οποίο χάνεται θερμότητα από το θερμοδοχείο.

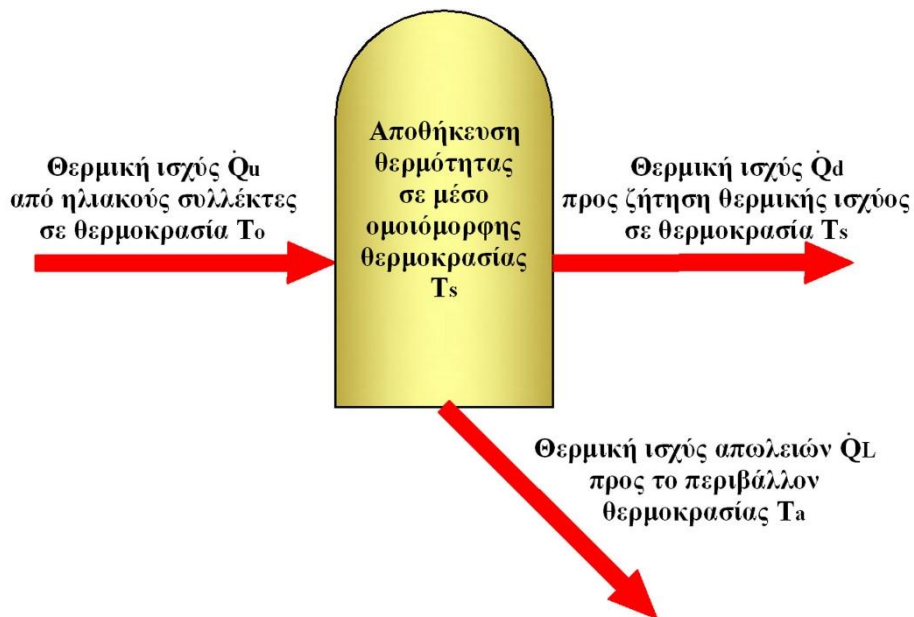
Ο ανωτέρω ισολογισμός θερμικής ενέργειας παρουσιάζεται γραφικά στο σχήμα 5.38.

Η θερμοκρασιακή διαφορά ΔT_s στον ανωτέρω ισολογισμό θερμικής ενέργειας παριστάνει τη διαφορά θερμοκρασίας του μέσου στο θερμοδοχείο πριν και μετά την αποθήκευση ισχύος \dot{Q}_s . Καθώς στην ανωτέρω εξίσωση όλα τα μεγέθη είναι γνωστά, το πρόβλημα ανάγεται στον υπολογισμό της θερμοκρασίας του μέσου στο θερμοδοχείο μετά την αποθήκευση θερμικής ισχύος \dot{Q}_s . Η διαδικασία υπολογισμού περιλαμβάνει τη διακριτοποίηση του συνολικού χρονικού διαστήματος σε επιμέρους χρονικά βήματα υπολογισμού, συνήθως ωριαίας διάρκειας. Υποθέτοντας μία αρχική θερμοκρασία $T_s(0)$ του μέσου στο θερμοδοχείο για το χρονικό βήμα έναρξης υπολογισμών, στο τέλος του κάθε χρονικού βήματος i υπολογίζεται η θερμοκρασία του μέσου στο θερμοδοχείο από τη σχέση:

$$\dot{m} \cdot C_p \cdot (T_s(i) - T_s(i-1)) = \dot{Q}_s = \dot{Q}_u - \dot{Q}_d - U_s \cdot A_s \cdot (T_s(i-1) - T_a) \Leftrightarrow$$

$$T_s(i) = \frac{\dot{Q}_u - \dot{Q}_d - U_s \cdot A_s \cdot (T_s(i-1) - T_a)}{\dot{m} \cdot C_p} + T_s(i-1) \tag{5.67}$$

Η ζήτηση θερμικής ισχύος \dot{Q}_d θα πρέπει να έχει υπολογιστεί ως χρονοσειρά ανά χρονικό βήμα ίσο με το βήμα υπολογισμού. Αντίστοιχα, θα πρέπει να έχει υπολογιστεί και η παραγωγή θερμικής ισχύος από τους ηλιακούς συλλέκτες \dot{Q}_u , εφαρμόζοντας τις διαδικασίες που περιγράφηκαν στις ενότητες 5.3 και 5.4, ανάλογα με τον τύπο του συλλέκτη. Ο υπολογισμός της θερμοκρασίας του μέσου αποθήκευσης θερμότητας στο θερμοδοχείο σε κάθε χρονικό βήμα είναι βασικό βήμα για την προσομοίωση της λειτουργίας του συνολικού υβριδικού σταθμού θερμικής ισχύος και τον υπολογισμό των σχετικών ενεργειακών μεγεθών.



Σχήμα 5.38: Συναλλαγές θερμικής ενέργειας κατά την αποθήκευση σε θερμοδοχείο.

Παράδειγμα 5.5.

Υπολογισμός θερμοκρασίας μέσου αποθήκευσης θερμικής ισχύος σε θερμοδοχείο

Σε ένα σύστημα παραγωγής θερμικής ισχύος από ηλιακούς συλλέκτες και αποθήκευσης σε θερμοδοχείο, η χρονική αλληλουχία μεταξύ παραγωγής και ζήτησης θερμικής ισχύος παρουσιάζεται στον πίνακα 5.6 για τις 12 πρώτες ώρες ενός εικοσιτετράωρου.

Πίνακας 5.6: Αλληλουχία παραγωγής και ζήτησης θερμικής ισχύος σε ένα θερμικό ενεργειακό σύστημα.

Χρόνος (h)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Παραγωγή θερμικής ισχύος (kW)	0	0	0	0	0	0	0	0	7	13	17	21

Ζήτηση θερμικής ισχύος (kW)	3	3	2	2	5	3	4	4	5	6	7	6
-----------------------------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Το θερμοδοχείο έχει συνολικό όγκο 1.000lt και παρουσιάζει γινόμενο συντελεστή θερμικής διαπερατότητας επί επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας με το περιβάλλον $U_s \cdot A_s = 10,5 \text{ W/K}$. Κατά την αρχή της πρώτης ώρας του χρονικού διαστήματος μελέτης η θερμοκρασία του μέσου στο θερμοδοχείο έχει διαμορφωθεί στους 50°C , ενώ η θερμοκρασία περιβάλλοντος διατηρείται σταθερή καθ' όλο το εν λόγω χρονικό διάστημα και ίση με 20°C . Να υπολογιστεί η θερμοκρασία του μέσου αποθήκευσης θερμότητας στο θερμοδοχείο στο τέλος της κάθε ώρας και για όλο το χρονικό διάστημα των 12 ωρών. Να θεωρηθεί ότι στο τέλος της κάθε ώρας προκύπτει ομοιόμορφη θερμοκρασία του μέσου σε όλο τον όγκο του. Η πυκνότητα του μέσου αποθήκευσης να ληφθεί 1.000 kg/m^3 και η ειδική θερμοχωρητικότητα του να ληφθεί ίση με $4,184 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$.

Λύση:

Η διαδικασία επίλυσης ακολουθεί την επαναληπτική εφαρμογή της σχέσης 5.67 για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας του μέσου στο θερμοδοχείο στο τέλος της κάθε ώρας υπολογισμού. Όλα τα μεγέθη στη σχέση 5.67 είναι γνωστά. Σε κάθε νέο χρονικό βήμα υπολογισμού i η θερμοκρασία $T_s(i-1)$ ισούται με τη θερμοκρασία $T_s(i)$ που έχει υπολογιστεί από το προηγούμενο χρονικό βήμα. Για το πρώτο χρονικό βήμα υπολογισμού, δηλαδή για την πρώτη ώρα, η θερμοκρασία $T_s(i-1)$ δίνεται ίση με 50°C .

Στην περίπτωση του παρόντος παραδείγματος, η παροχή μάζας πρακτικά δεν υφίσταται, καθώς δεν αναφέρεται ροής μάζας προς το θερμοδοχείο. Ο υπολογισμός αναφέρεται στην αποθήκευση ή αφαίρεση θερμικής ισχύος από συγκεκριμένη μάζα μέσου και για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Στην περίπτωση αυτή η παροχή μάζας που εμφανίζεται στη σχέση 5.67 γράφεται ως:

$$\dot{m} = \frac{m}{\Delta t}$$

όπου $m = V \cdot \rho = 1.000 \text{ kg}$ και $\Delta t = 1 \text{ h} = 3.600 \text{ s}$.

Ενδεικτικά παρουσιάζεται αναλυτικά ο υπολογισμός για το πρώτο χρονικό βήμα:

$$T_s(i) = \frac{\dot{Q}_u - \dot{Q}_d - U_s \cdot A_s \cdot (T_s(i-1) - T_a)}{\dot{m} \cdot C_p} + T_s(i-1) \Leftrightarrow$$

$$T_s(i) = \frac{\dot{Q}_u - \dot{Q}_d - U_s \cdot A_s \cdot (T_s(i-1) - T_a)}{m \cdot C_p / \Delta t} + T_s(i-1) \Leftrightarrow$$

$$T_s(i) = \frac{0 - 3.000 \text{ W} - 10,5 \text{ W/}^\circ\text{C} \cdot (50 - 20)^\circ\text{C}}{1.000 \text{ kg} \cdot 4.184 \text{ J/kg}\cdot^\circ\text{C}} \cdot 3.600 \text{ s} + 50^\circ\text{C} \Leftrightarrow T_s(i) = 47,15^\circ\text{C}$$

Στον πίνακα 5.7 παρουσιάζονται τα συνολικά αποτελέσματα για όλο το χρονικό διάστημα των 12 ωρών.

Πίνακας 5.7: Αποτελέσματα υπολογισμού θερμοκρασίας θερμοδοχείου.

Χρόνος (h)	Παραγωγή θερμικής ισχύος Q_u (kW)	Ζήτηση θερμικής ισχύος Q_d (kW)	Θερμοκρασία θερμοδοχείου $T_s(i-1)$	Θερμοκρασία θερμοδοχείου $T_s(i)$
1	0	3	50,00	47,15
2	0	3	47,15	44,32
3	0	2	44,32	42,38
4	0	2	42,38	40,46
5	0	5	40,46	35,97
6	0	3	35,97	33,25

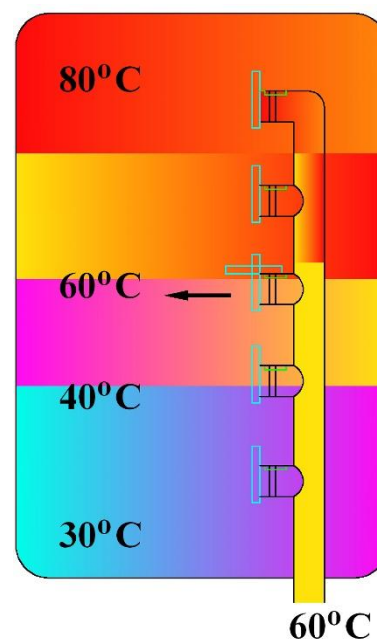
7	0	4	33,25	29,68
8	0	4	29,68	26,15
9	7	5	26,15	27,82
10	13	6	27,82	33,77
11	17	7	33,77	42,25
12	21	6	42,25	54,96

5.5.2. Διαστρωματική αποθήκευση θερμότητας σε δεξαμενές νερού

Αναφέρθηκε προηγουμένως ότι η αποθήκευση θερμικής ισχύος από ηλιακούς συλλέκτες σε θερμοδοχεία νερού μπορεί να μεγιστοποιηθεί με διαστρωματική αποθήκευση θερμότητας. Με τη διαστρωματική αποθήκευση θερμότητας επιτυγχάνεται μία διακριτή κατανομή θερμοκρασίας στο μέσο αποθήκευσης, ώστε τα κατώτερα τμήματα του μέσου να εμφανίζουν χαμηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με τα υψηλότερα. Η διαστρωματική αποθήκευση θερμότητας επιτυγχάνεται αυτόματα, μέσω της μετακίνησης θερμότερων και ελαφρύτερων μαζών μέσου αποθήκευσης προς υψηλότερα στρώματα εντός του θερμοδοχείου με φυσική και όχι εξαναγκασμένη κυκλοφορία.

Το αποτέλεσμα της διαστρωματικής αποθήκευσης θερμότητας σε ένα θερμοδοχείο παρουσιάζεται στο σχήμα 5.39. Στο σχήμα αυτό είναι διακριτή η διακύμανση της θερμοκρασίας του μέσου αποθήκευσης θερμότητας από χαμηλές τιμές, στα κατώτερα στρώματα του θερμοδοχείου, προς υψηλότερες τιμές, στα ανώτερα στρώματα. Η θερμότητα αποδίδεται προς τη ζήτηση ισχύος πάντα μέσω εξαγωγής του μέσου αποθήκευσης από τα ανώτερα και θερμότερα στρώματα. Την ίδια στιγμή, αντίστοιχη μάζα μέσου εισέρχεται σε χαμηλή θερμοκρασία στην κατώτατη στάθμη του θερμοδοχείου. Το τελικό αποτέλεσμα είναι η διαβάθμιση της θερμοκρασίας του σχήματος.

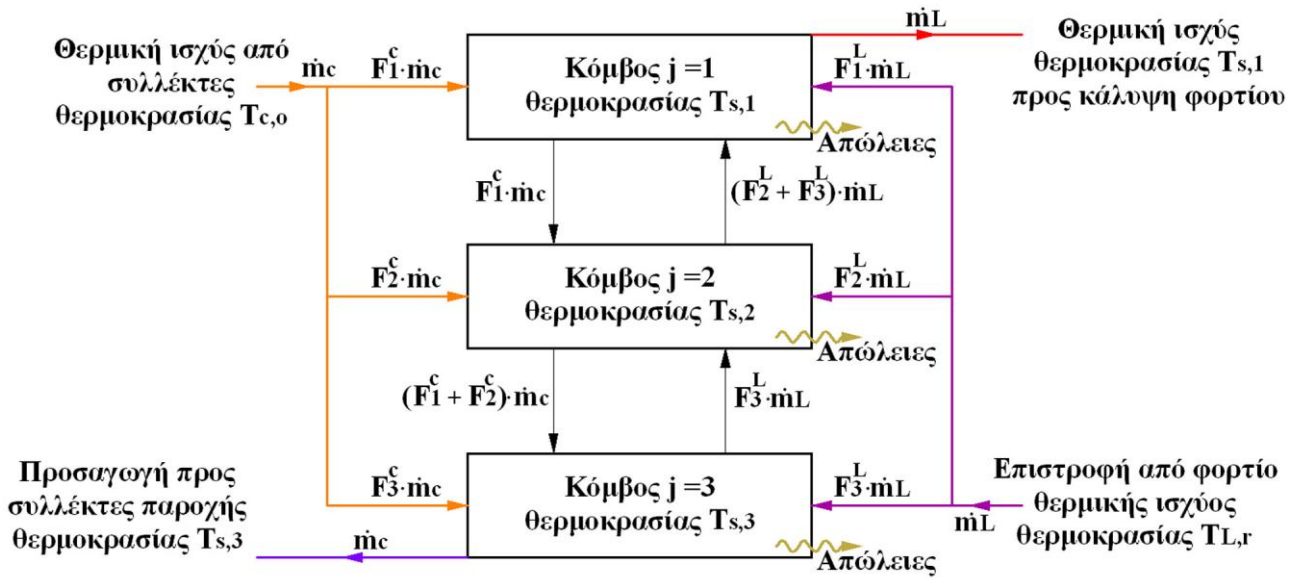
Γίνεται αντιληπτό ότι η διαστρωματική αποθήκευση διευκολύνει τη μεγιστοποίηση της αποθήκευσης της παραγωγής θερμικής ισχύος από τους ηλιακούς συλλέκτες, καθώς τούτη είναι εφικτό να εξασφαλιστεί, ακόμα κι αν η διαθέσιμη προς αποθήκευση θερμική ισχύ διατίθεται σε χαμηλές θερμοκρασίες. Προφανώς, προϋπόθεση, για να συμβεί κάτι τέτοιο είναι οι χαμηλές αυτές θερμοκρασίες, οι οποίες αποδίδονται από τους ηλιακούς συλλέκτες στο μέσο μεταφοράς ισχύος, να είναι υψηλότερες από τη θερμοκρασία που εμφανίζει το μέσο αποθήκευσης σε κάποια στάθμη του θερμοδοχείου.



Σχήμα 5.39: Διαστρωματική αποθήκευση θερμότητας σε θερμοδοχείο.

Στο ίδιο σχήμα παρουσιάζεται τεχνική για την υποβοήθηση της επίτευξης διαστρωματικής αποθήκευσης που εφαρμόζεται σε σύγχρονες τεχνολογίες θερμοδοχείων. Το απεικονιζόμενο θερμοδοχείο διαθέτει πέντε εναλλακτικές θυρίδες εισαγωγής ζεστού μέσου από τη μονάδα παραγωγής θερμικής ισχύος, π.χ. ηλιακοί συλλέκτες, σε διαφορετικές στάθμες. Με μέτρηση της θερμοκρασίας του μέσου μεταφοράς θερμικής ισχύος από τη μονάδα παραγωγής (στο σχήμα τούτη μετριέται στους 60°C), εξασφαλίζεται η εισαγωγή του στη θυρίδα του θερμοδοχείου όπου η υφιστάμενη θερμοκρασία του μέσου αποθήκευσης είναι μικρότερη ή ίση από αυτή του μέσου μεταφοράς.

Η προσομοίωση της διαστρωματικής αποθήκευσης θερμότητας σε ένα θερμοδοχείο είναι διαδικασία σχετικά απλή στη φιλοσοφία. Ωστόσο η επίλυσή είναι εφικτή μόνο με την αριθμητική προσομοίωση του προβλήματος. Στο σχήμα 5.40 παρουσιάζεται η διακριτοποίηση ενός θερμοδοχείου αποθήκευσης θερμότητας σε τρεις διακριτούς κόμβους. Κάθε κόμβος θεωρείται διακριτός και ανεξάρτητος από τους διπλανούς του, ενώ η μάζα του μέσου αποθήκευσης εντός του κάθε κόμβου έχει ομοιόμορφη και σταθερή ανά χρονικό βήμα θερμοκρασία. Η θερμοκρασία στον κατώτατο κόμβο είναι η χαμηλότερη και, αντίστοιχα, η θερμοκρασία στον ανώτατο κόμβο είναι η υψηλότερη.



Σχήμα 5.40: Διακριτοποίηση σε τρεις κόμβους διαστρωματικής αποθήκευσης θερμότητας σε θερμοδοχείο.

Το εργαζόμενο μέσο αφήνει το θερμοδοχείο με κατεύθυνση προς τους ηλιακούς συλλέκτες πάντα από τον κατώτατο κόμβο με τη χαμηλότερη θερμοκρασία, με παροχή μάζας \dot{m}_c . Επίσης, η θερμική ισχύς προς ικανοποίηση της ζήτησης αφαιρείται πάντα από τον ανώτατο κόμβο του θερμοδοχείου, με την υψηλότερη θερμοκρασία, με παροχή μάζας \dot{m}_L . Η επιστροφή του εργαζόμενου μέσου από τους ηλιακούς συλλέκτες ή μετά την ικανοποίηση της ζήτησης προς το θερμοδοχείο θα γίνει στον κόμβο με την αμέσως χαμηλότερη θερμοκρασία.

Η διαδικασία αποθήκευσης θερμικής ισχύος στο θερμοδοχείο προσομοιώνεται με την εισαγωγή μιας συνάρτησης ελέγχου F^c , η οποία περιγράφει τον κόμβο j που θα αποθηκευτεί η διαθέσιμη από τους συλλέκτες θερμική ισχύς και ορίζεται ως εξής:

$$F_j^c = \begin{cases} 1 & \text{αν } j = 1 \text{ και } T_{c,o} > T_{s,1} \\ 1 & \text{αν } j = 2 \text{ ή } 3 \text{ και } T_{s,j-1} \geq T_{c,o} > T_{s,j} \\ 0 & \text{σε κάθε άλλη περίπτωση} \end{cases} \quad (5.68)$$

όπου $T_{c,o}$ η θερμοκρασία του εργαζόμενου μέσου με την οποία διατίθεται η θερμική ισχύς από τους ηλιακούς συλλέκτες προς αποθήκευση.

Με τον ανωτέρω ορισμό εξασφαλίζεται ότι στην περίπτωση που υπάρχει παραγωγή ισχύος από τους συλλέκτες, η συνάρτηση ελέγχου θα έχει μη μηδενική τιμή μόνο για ένα κόμβο. Για παράδειγμα, αν η θερμοκρασία στους τρεις κόμβους είναι αντίστοιχα 40, 50 και 60°C και η θερμοκρασία του νερού από τους συλλέκτες είναι $T_{c,o} = 55^\circ\text{C}$, τότε:

- Για $j = 1$: $T_{c,o} = 55^\circ\text{C} < T_{s,1} = 60^\circ\text{C}$, άρα $F_1^c = 0$.
- Για $j = 2$: $T_{s,j-1} = T_{s,1} = 60^\circ\text{C} > T_{c,o} = 55^\circ\text{C} > T_{s,j} = T_{s,2} = 55^\circ\text{C}$, άρα $F_2^c = 1$.
- Για $j = 3$: $T_{s,j-1} = T_{s,2} = 50^\circ\text{C} < T_{c,o} = 55^\circ\text{C}$, άρα $F_3^c = 0$.

Συνεπώς, όπως ήταν αναμενόμενο, η διαθέσιμη θερμική ισχύς από τους ηλιακούς συλλέκτες θα αποθηκευτεί στον κόμβο 2, δηλαδή σε αυτόν με την αμέσως χαμηλότερη θερμοκρασία.

Αντίστοιχα, προσομοιώνεται η διαδικασία επιλογής κόμβου για την επιστροφή του εργαζόμενου μέσου μετά την κάλυψη της ζήτησης ισχύος. Η σχετική συνάρτηση ελέγχου F^L ορίζεται ως εξής, στη γενική περίπτωση διακριτοποίησης του θερμοδοχείου σε N αριθμό κόμβων:

$$\begin{cases} 1 & \text{αν } j = N \text{ και } T_{L,r} < T_{s,N} \end{cases} \quad (5.69)$$

$$\text{αν } j < N \text{ και } T_{s,j-1} \geq T_{L,r} > T_{s,j}$$

σε κάθε άλλη περίπτωση

όπου $T_{L,r}$ η θερμοκρασία με την οποία επιστρέφει στο θερμοδοχείο το εργαζόμενο μέσο μετά τη διάθεση θερμικής ισχύος προς κάλυψη των θερμικών φορτίων.

Πέρα από την εισαγωγή θερμικής ισχύος από τους συλλέκτες και την επιστροφή της παροχής εργαζόμενου μέσου μετά τη διάθεση θερμικής ισχύος προς τη ζήτηση, εντός του θερμοδοχείου εμφανίζεται ροή μάζας μεταξύ των κόμβων. Η ροή αυτή μπορεί να είναι προς τα πάνω ή προς τα κάτω, ανάλογα με το μέγεθος των παροχών μέσου από τους συλλέκτες και την επιστροφή από τη ζήτηση. Προκειμένου να προσομοιωθεί η ροή μάζας μεταξύ των κόμβων, ορίζεται μία συνολική, αθροιστική παροχή μάζας μίγματος \dot{m}_m προς τον κόμβο j από τον κόμβο $j-1$, η οποία αποτελεί το αλγεβρικό άθροισμα των παροχών μάζας \dot{m}_c και \dot{m}_L , από τους κόμβους που προηγούνται ή έπονται:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{m,1} &= 0 \\ \dot{m}_{m,j} &= \dot{m}_c \cdot \sum_{n=1}^{j-1} F_n^c - \dot{m}_L \cdot \sum_{n=j+1}^N F_n^L \end{aligned} \quad (5.70)$$

Στην ανωτέρω σχέση έχουν ληφθεί με θετικό πρόσημο οι παροχές μάζας από τον κόμβο 1 προς τον κόμβο N και με αρνητικό πρόσημο οι παροχές μάζας με αντίθετη κατεύθυνση, δηλαδή από τον κόμβο N προς τον κόμβο 1.

Μετά τον ορισμό των ανωτέρω συναρτήσεων ελέγχου και μεγεθών, ο ισολογισμός ενέργειας για τον κόμβο j γράφεται ως εξής:

$$\begin{aligned} \dot{m}_j \cdot C_p \cdot (T_{s,j}(i) - T_{s,j}(i-1)) &= \dot{Q}_{s,j} = F_i^c \cdot \dot{m}_c \cdot C_p \cdot (T_{c,o}(i) - T_{s,j}(i-1)) \\ &+ F_i^L \cdot \dot{m}_L \cdot C_p \cdot (T_{L,r}(i) - T_{s,j}(i-1)) - U_{s,j} \cdot A_{s,j} \cdot (T_{s,j}(i-1) - T_a) \\ &+ \begin{cases} \dot{m}_{m,j} \cdot (T_{s,j-1}(i-1) - T_{s,j}(i-1)), \text{ αν } \dot{m}_{m,j} > 0 \\ \dot{m}_{m,j+1} \cdot (T_{s,j}(i-1) - T_{s,j+1}(i-1)), \text{ αν } \dot{m}_{m,j+1} < 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (5.71)$$

Η εφαρμογή της ανωτέρω σχέσης σε δεξαμενές νερού αποθήκευσης θερμότητας με διακριτοποίηση της διαστρωματικής αποθήκευσης σε ένα αριθμό 3 – 4 κόμβων είναι ικανή για να περιγράψει το πρόβλημα ικανοποιητικά.

Στην ανωτέρω σχέση δεν έχουν ληφθεί δύο σημαντικές διαδικασίες, που εμφανίζονται στην πράξη κατά την αποθήκευση θερμότητας σε δεξαμενές νερού και επηρεάζουν την τελική κατανομή θερμοκρασίας εντός της δεξαμενής:

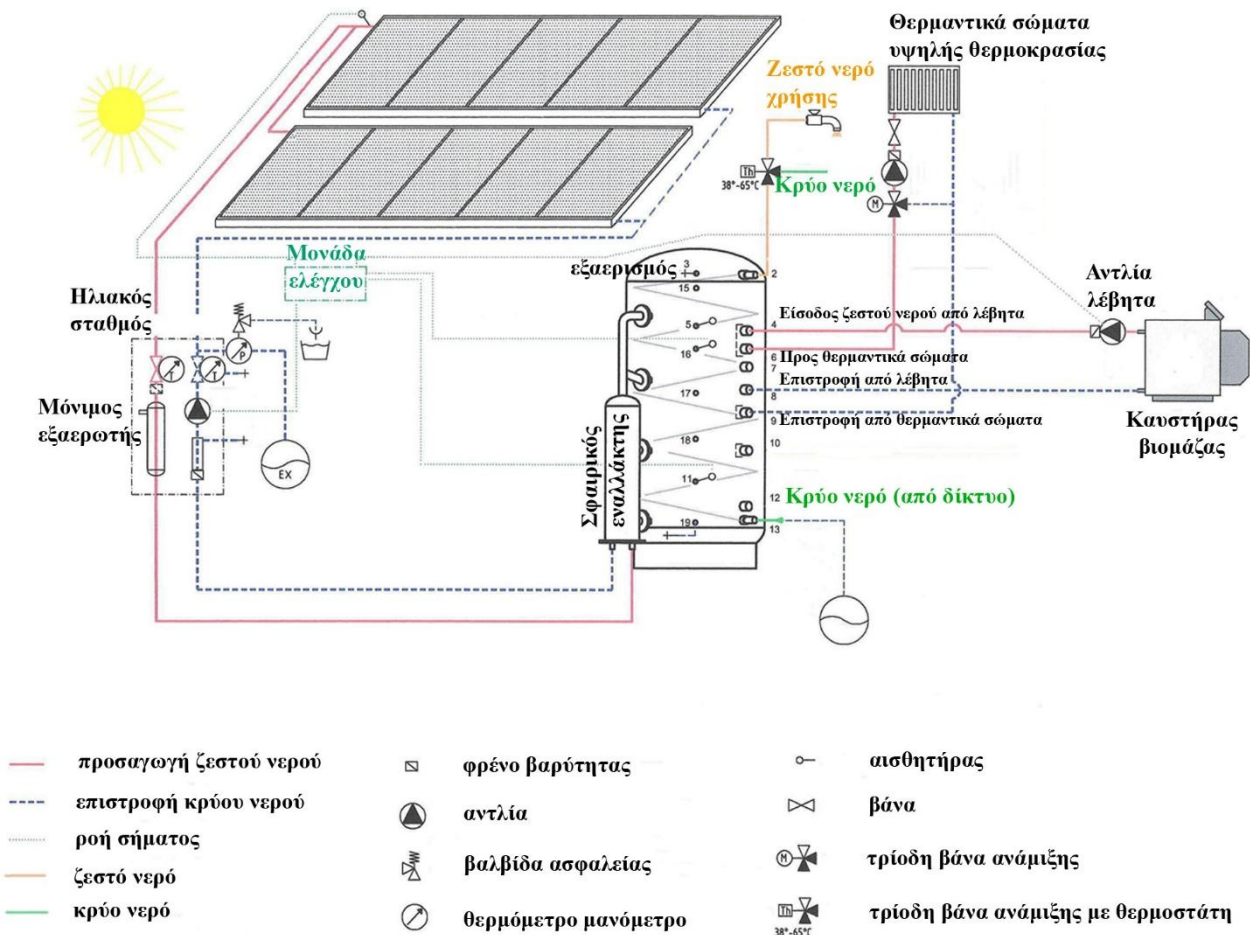
- Στην πραγματικότητα η διαστρωματική αποθήκευση θερμότητας είναι περισσότερο αισθητή όσο διαρκεί αποθήκευση και αφαίρεση θερμότητας στο θερμοδοχείο. Στην περίπτωση αδράνειας λειτουργίας του θερμοδοχείου, για παράδειγμα από τα μεσάνυχτα ως τις πρώτες πρωινές ώρες, όταν ούτε παραγωγή θερμικής ισχύος προκύπτει από τους ηλιακούς συλλέκτες, πιθανότατα, ούτε και κατανάλωση θερμικής ισχύος, οι θερμοκρασίες εντός του θερμοδοχείου τείνουν να εξισωθούν, μέσω μεταφοράς θερμότητας με αγωγή εντός της μάζας του μέσου αποθήκευσης και, κατά συνέπεια, η διαστρωματική αποθήκευση εξομαλύνεται.
- Τα περισσότερα θερμοδοχεία συνδυάζουν δύο ή τρεις εναλλακτικές πηγές θέρμανσης, πέραν της βασικής. Τα θερμοδοχεία αυτά, γνωστά ως *θερμοδοχεία διπλής ή τριπλής ενέργειας*, συνδυάζουν, συνήθως, τη δυνατότητα αποθήκευσης θερμότητας από μία μη εγγυημένη πηγή, όπως π.χ. οι ηλιακοί συλλέκτες, και άλλη μία ή άλλες δύο πηγές εγγυημένης παραγωγής, όπως πηγή καυστήρας κεντρικής θέρμανσης ή / και ηλεκτρική αντίσταση. Οι πρόσθετες αυτές πηγές θέρμανσης είναι συνδεδεμένες με τα ανώτερα στρώματα αποθήκευσης του θερμοδοχείου, όπου εμφανίζονται οι υψηλότερες θερμοκρασίες, με σκοπό να εξασφαλίσουν τη διαθεσιμότητα θερμικής ισχύος αιχμής για άμεση κάλυψη φορτίου. Στην περίπτωση αυτή, στον ανωτέρω ενεργειακό ισολογισμό, θα πρέπει να

προσθεθεί ένας ακόμα όρος αποθήκευσης θερμικής ισχύος προς το θερμοδοχείο, ο οποίος θα πρέπει να εισαχθεί στη σχέση ισολογισμού του κόμβου με αριθμό $j = 1$.

Η επίλυση των ανωτέρω εξισώσεων, ακόμα και αριθμητικά, απαιτεί την ανάπτυξη πολύπλοκων μοντέλων και αλγορίθμων. Συνήθως η επίλυσή τους προσεγγίζεται με διάφορες αριθμητικές μεθόδους, όπως οι μέθοδοι explicit Euler, implicit Crank-Nicholson, Runge-Kutta και η μέθοδος πρόβλεψης – διόρθωσης (predictor – corrector).

5.6. Προσομοίωση λειτουργίας υβριδικών σταθμών θερμικής ισχύος

Έχοντας ολοκληρώσει την παρουσίαση των βασικών σχέσεων και μεθόδων υπολογισμού παραγωγής θερμικής ισχύος από επίπεδους και συγκεντρωτικούς ηλιακούς συλλέκτες και αποθήκευσης θερμικής ισχύος σε θερμοδοχεία νερού, πλέον είναι δυνατή η ανάλυση της διαδικασίας προσομοίωσης της λειτουργίας υβριδικών σταθμών παραγωγής θερμικής ισχύος. Ένας τέτοιος υβριδικός σταθμός παρουσιάζεται στο σχήμα 5.41.



Σχήμα 5.41: Διάγραμμα συνδεσμολογίας υβριδικού σταθμού θερμικής ισχύος με θερμοδοχείο διπλής ενέργειας.

Ο υβριδικός σταθμός θερμικής ισχύος του σχήματος 5.41 αποσκοπεί στην κάλυψη αναγκών θέρμανσης εσωτερικών χώρων και αποτελείται από τις ακόλουθες διακριτές συνιστώσες:

- ηλιακούς συλλέκτες, ως μονάδες βάσης,
- θερμοδοχεία διπλής ενέργειας, ως μονάδες αποθήκευσης,
- καυστήρα κεντρικής θέρμανσης, ως εφεδρική μονάδα παραγωγής θερμικής ισχύος,
- ηλεκτρονική μονάδα κεντρικού ελέγχου, για τον έλεγχο της λειτουργίας του συστήματος,

- υδραυλικές συσκευές και λοιπά εξαρτήματα για την εξασφάλιση της ροής του μέσου και της ασφάλειας λειτουργίας του υδραυλικού δικτύου.

Η κεντρική μονάδα ελέγχου εκτελεί τους απαιτούμενους ελέγχους που θα καθορίσουν τη λειτουργία του συστήματος. Συγκεκριμένα τα μεγέθη, που ελέγχονται, και οι συνεπαγόμενες εντολές λειτουργίας είναι:

- Θερμοκρασία $T_{c,o}$ προσαγωγής εργαζόμενου μέσου από τους ηλιακούς συλλέκτες και θερμοκρασίες $T_{s,j}$ αποθήκευσης μέσου σε διάφορα επίπεδα στο θερμοδοχείο.

Αν η θερμοκρασία $T_{c,o}$ είναι μεγαλύτερη από κάποια από τη θερμοκρασία $T_{s,j}$, τότε επιτελείται αποθήκευση στο θερμοδοχείο θερμικής ισχύος από τους ηλιακούς συλλέκτες. Η θερμική ισχύς αποθηκεύεται στον κόμβο j του θερμοδοχείου που εμφανίζει την αμέσως χαμηλότερη θερμοκρασία από την $T_{c,o}$. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η θερμοκρασία $T_{c,o}$ μετράται όχι στην έξοδο από τους ηλιακούς συλλέκτες, αλλά στον εναλλάκτη θερμότητας του θερμοδοχείου, προκειμένου να ληφθούν υπόψη οι απώλειες θερμότητας στο υδραυλικό δίκτυο μεταφοράς του μέσου από τους συλλέκτες προς το θερμοδοχείο.

- Απαίτηση για παροχή θερμικής ισχύος και μέγιστη θερμοκρασία $T_{s,1}$ στο θερμοδοχείο.

Η απαίτηση για παροχή θερμικής ισχύος μπορεί να δηλωθεί με δύο τρόπους:

- είτε μέσω της υφιστάμενης θερμοκρασίας των εσωτερικών χώρων, στην περίπτωση αυτόματης λειτουργίας του συστήματος θέρμανσης μέσω θερμοστάτη,
- είτε μέσω της λειτουργίας του κυκλοφορητή του κυκλώματος των τερματικών θερμαντικών σωμάτων, στην περίπτωση χειροκίνητης λειτουργίας του συστήματος θέρμανσης.

Στην περίπτωση που υφίσταται απαίτηση για παροχή θερμικής ισχύος και η μέγιστη θερμοκρασία $T_{s,1}$ του μέσου αποθήκευσης στο θερμοδοχείο είναι μικρότερη από την ελάχιστη απαιτούμενη θερμοκρασία $T_{d,min}$ για τη λειτουργία των τερματικών θερμαντικών σωμάτων, τότε λαμβάνει εντολή η εφεδρική μονάδα για παραγωγή θερμικής ισχύος, η οποία αποδίδεται στα ανώτερα στρώματα του θερμοδοχείου.

Στο σχήμα 5.42 παρουσιάζεται γραφικά ο ανωτέρω αλγόριθμος λειτουργίας του συστήματος.

Οι σχέσεις που απαιτούνται για τον υπολογισμό των εμπλεκόμενων μεγεθών στην ανωτέρω διαδικασία συνοψίζονται στη συνέχεια.

Για τον υπολογισμό της παραγωγής θερμικής ισχύος από τους ηλιακούς συλλέκτες χρησιμοποιείται η σχέση 5.1 για επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες και η σχέση 5.46 για συγκεντρωτικούς ηλιακούς συλλέκτες. Οι δύο αυτές σχέσεις μπορούν να γραφούν στη γενική μορφή:

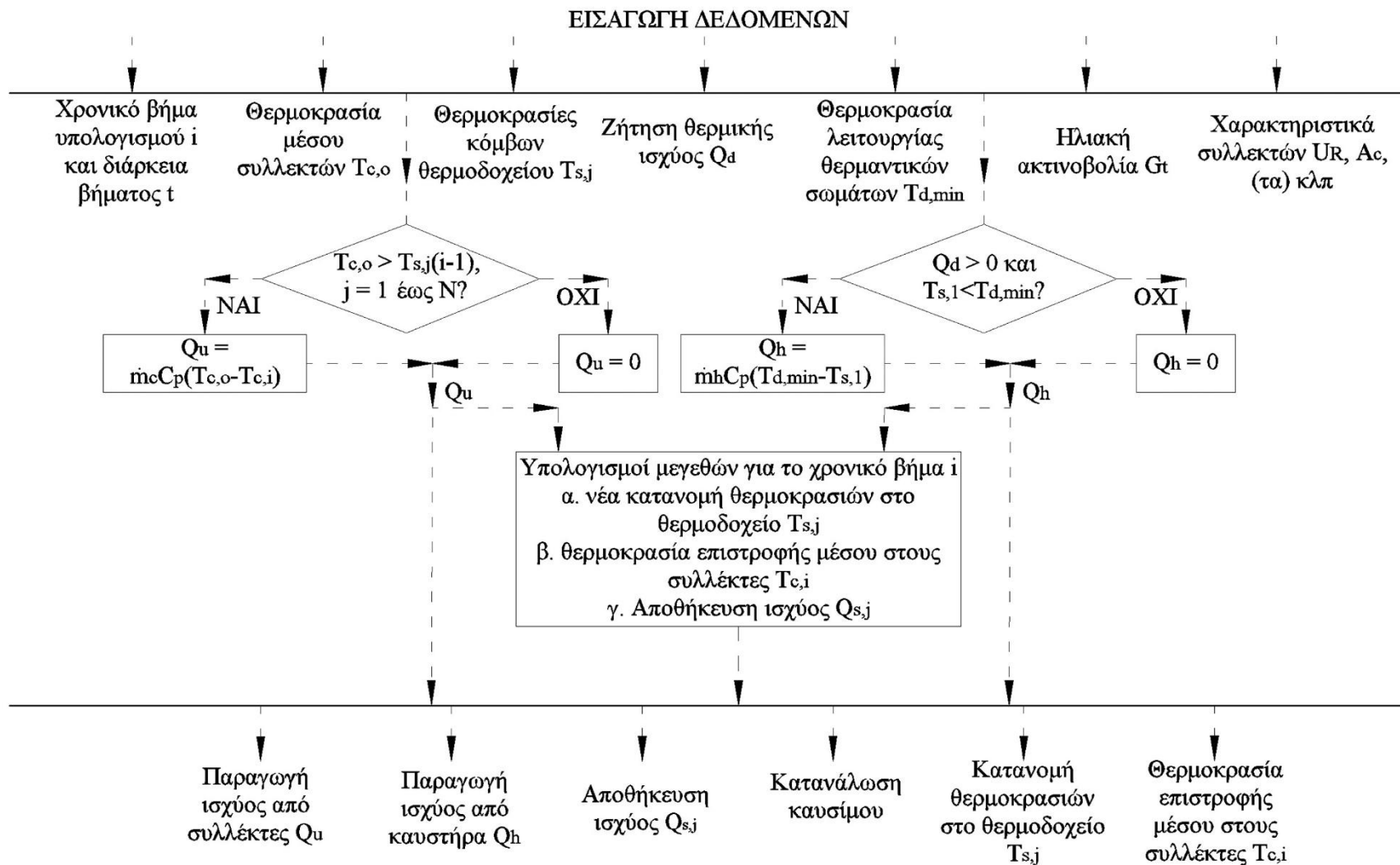
$$\dot{Q}_u = A_c \cdot F_R \cdot [S - U_L \cdot (T_i - T_a)] \quad (5.72)$$

Η ανωτέρω ισχύς θα αποδίδεται προς αποθήκευση μόνο αν $T_{c,o} > T_{s,j}$, για κάποιο κόμβο του θερμοδοχείου $j = 1$ έως N .

Η ίδια θερμική ισχύς δίνεται, επίσης, και από τη σχέση:

$$\dot{Q}_u = \dot{m}_c \cdot C_p \cdot (T_{c,o} - T_{c,i}) \quad (5.73)$$

όπου \dot{m}_c η παροχή μάζας του εργαζόμενου μέσου στο πρωτεύον κύκλωμα των ηλιακών συλλεκτών, $T_{c,o}$ και $T_{c,i}$ οι θερμοκρασίες εξόδου και εισόδου αντίστοιχα του εργαζόμενου μέσου στους ηλιακούς συλλέκτες.



Σχήμα 5.42: Αλγόριθμος λειτουργίας υβριδικού σταθμού θερμικής ισχύος.

Η θερμική ισχύς που αποδίδεται από τον καυστήρα κεντρικής θέρμανσης στην περίπτωση μη επάρκειας της αποθηκευμένης θερμότητας για την κάλυψη της ζήτησης δίδεται από τη σχέση:

$$\dot{Q}_h = \dot{m}_h \cdot C_p \cdot (T_{d,\min} - T_{s,1}) \quad (5.74)$$

όπου \dot{m}_h η παροχή του εργαζόμενου μέσου από το θερμοδοχείο προς τα θερμαντικά σώματα.

Τέλος η αποθήκευση θερμικής ισχύος στο θερμοδοχείο περιγράφεται από τη σχέση 5.67 για ομοιόμορφη θερμοκρασία μέσου ή από τη σχέση 5.71 για διαστρωματική αποθήκευση θερμότητας.

Στην ανωτέρω διαδικασία υπάρχουν ακόμα κάποια σημαντικά δεδομένα που καθορίζουν τη λειτουργία του υβριδικού σταθμού και πρέπει να ληφθούν υπόψη στην προσομοίωση λειτουργίας του. Αυτά είναι:

- η ύπαρξη εναλλάκτη θερμότητας για τη συναλλαγή θερμότητας μεταξύ κυκλώματος ηλιακών συλλεκτών και θερμοδοχείου,
- οι απώλειες θερμότητας που εμφανίζονται κατά τη μεταφορά του εργαζόμενου μέσου από τους συλλέκτες προς το θερμοδοχείο και από το θερμοδοχείο προς τα τερματικά θερμαντικά σώματα,
- η θερμική ισχύς σε ένα πραγματικό πρόβλημα παράγεται από ένα αριθμό ηλιακών συλλεκτών εν σειρά ή παράλληλα συνδεδεμένων μεταξύ τους και όχι από ένα μόνο ηλιακό συλλέκτη,
- η αποθήκευση θερμότητας σε μία πραγματική εγκατάσταση μπορεί να γίνεται σε έναν αριθμό θερμοδοχείων.

Τα ανωτέρω θέματα εξετάζονται στις επόμενες ενότητες.

5.6.1. Συντελεστής εναλλάκτη θερμότητας

Εναλλάκτες θερμότητας χρησιμοποιούνται συνήθως για τη μεταφορά θερμότητας από το κύκλωμα των ηλιακών συλλεκτών, στο οποίο χρησιμοποιείται μίγμα νερού – γλυκόλης για λόγους αποφυγής παγώματος του μίγματος σε χαμηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος, προς το θερμοδοχείο. Στα σχήματα 5.19 και 5.41 έχουν παρουσιαστεί σχετικά σκαριφήματα. Η επίδραση του εναλλάκτη θερμότητας στο κύκλωμα μεταφοράς θερμότητας από τους συλλέκτες προς το θερμοδοχείο ουσιαστικά προκαλεί μείωση της απόδοσης μεταφοράς κατά ένα βαθμό απόδοσης ε .

Στη γενική περίπτωση, η μεταφερόμενη θερμική ισχύς μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας δίνεται από τη σχέση [14]:

$$\dot{Q}_{he} = \varepsilon \cdot (\dot{m} \cdot C_p)_{\min} \cdot (T_{c,o} - T_i) \quad (5.75)$$

όπου:

- $(\dot{m} \cdot C_p)_{\min}$: η ελάχιστη από τις παροχές θερμοχωρητικότητας (fluid capacitance rates) του μέσου των ηλιακών συλλεκτών $(\dot{m} \cdot C_p)_e$ και του θερμοδοχείου $(\dot{m} \cdot C_p)_i$ στον εναλλάκτη θερμότητας
- $T_{c,o}$: η θερμοκρασία εισόδου του μέσου των ηλιακών συλλεκτών στον εναλλάκτη θερμότητας
- T_i : η θερμοκρασία εισόδου του μέσου από το θερμοδοχείο (νερό) στον εναλλάκτη θερμότητας
- ε : ο βαθμός απόδοσης του εναλλάκτη θερμότητας.

Στην περίπτωση εναλλάκτη θερμότητας αντίστροφης ροής, η απόδοσή του δίνεται από τη σχέση:

$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{1 - e^{-NTU \cdot (1-C^*)}}{1 - C^* \cdot e^{-NTU \cdot (1-C^*)}}, & \text{αν } C^* \neq 1 \\ \frac{NTU}{1 + NTU}, & \text{αν } C^* = 1 \end{cases} \quad (5.76)$$

όπου NTU ορίζεται ως ο αριθμός μονάδων μεταφοράς (number of transfer units) και δίνεται από τη σχέση:

$$NTU = \frac{U \cdot A}{(\dot{m} \cdot C_p)_{\min}} \quad (5.77)$$

όπου U ο συντελεστής θερμικής διαπερατότητας του εναλλάκτη θερμότητας και A η επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας του εναλλάκτη. Η αδιάστατη παροχή θερμοχωρητικότητας C^* δίνεται από τη σχέση:

$$C^* = \frac{(\dot{m} \cdot C_p)_{\min}}{(\dot{m} \cdot C_p)_{\max}} \quad (5.78)$$

Στην περίπτωση εισαγωγής εναλλάκτη θερμότητας για την αποθήκευση θερμότητας από ηλιακούς συλλέκτες σε θερμοδοχείο, η χρησιμοποιείται η σχέση 5.1, όπου όμως στη θέση του συντελεστή F_R έχει τώρα εισαχθεί ένας νέος συντελεστής F_R' :

$$\dot{Q}_u = A_c \cdot F_R' \cdot [S - U_L \cdot (T_i - T_a)] \quad (5.79)$$

όπου ο νέος συντελεστής F_R' εισάγεται ακριβώς, για να περιγράψει την επίδραση του εναλλάκτη θερμότητας στην τελική αποδιδόμενη θερμική ισχύ. Ο νέος αυτός συντελεστής δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{F_R'}{F_R} = \left[1 + \frac{A_c \cdot F_R \cdot U_L}{(\dot{m} \cdot C_p)_c} \cdot \left(\frac{(\dot{m} \cdot C_p)_c}{\varepsilon \cdot (\dot{m} \cdot C_p)_{\min}} - 1 \right) \right]^{-1} \quad (5.80)$$

Η παρουσία του εναλλάκτη θερμότητας ουσιαστικά επιβάλλει στον ηλιακό συλλέκτη να αποδίδει στο εργαζόμενο μέσο υψηλότερες θερμοκρασίες, από ό,τι αν δεν υπήρχε ο εναλλάκτης θερμότητας. Τούτο, όπως είναι γνωστό, συνεπάγεται τη μείωση της απόδοσης του συλλέκτη που οδηγεί σε μείωση της απόδοσης λειτουργίας του συνολικού υβριδικού σταθμού. Αυτή η μειωμένη απόδοση του σταθμού θερμικής ισχύος εκφράζεται μέσω του λόγου F_R'/F_R .

Παράδειγμα 5.6.

Υπολογισμός βασικών μεγεθών εναλλάκτη θερμότητας

Ένας εναλλάκτης θερμότητας χρησιμοποιείται για τη μεταφορά θερμότητας από ηλιακό συλλέκτη σε θερμοδοχείο. Το ρευστό στο κύκλωμα του συλλέκτη είναι ένα αντιπηκτικό μίγμα νερού – γλυκόλης με ειδική θερμοχωρητικότητα $3.850 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$. Η παροχή του ρευστού στο κύκλωμα του συλλέκτη είναι $1,3 \text{ kg/s}$. Το μέσο αποθήκευσης στο θερμοδοχείο είναι νερό, με ειδικής θερμοχωρητικότητας $4.184 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ και παροχή $0,90 \text{ kg/s}$. Το γινόμενο θερμικής διαπερατότητας – επιφάνειας του εναλλάκτη θερμότητας δίνεται 6.700 W/K . Να υπολογιστεί η μεταφερόμενη θερμική ισχύς μέσω του εναλλάκτη θερμότητας. Δίνονται η θερμοκρασία εισαγωγής του μίγματος γλυκόλης στον εναλλάκτη $T_{c,o} = 60^\circ\text{C}$ και η θερμοκρασία εισόδου του νερού από το θερμοδοχείο στον εναλλάκτη $T_i = 30^\circ\text{C}$. Να υπολογιστούν, επίσης, οι θερμοκρασίες εξόδου μίγματος γλυκόλης και νερού από τον εναλλάκτη θερμότητας.

Αν το γινόμενο $F_R \cdot U_L$ είναι ίσο με $3,80 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ και η ενεργός επιφάνεια του συλλέκτη ισούται με $A_c = 2 \text{ m}^2$, να υπολογιστεί, τέλος, ο λόγος F_R'/F_R .

Λύση

Οι παροχές θερμοχωρητικότητας των δύο κυκλωμάτων υπολογίζονται ως εξής (χρησιμοποιούνται οι δείκτες c – collectors και t – tanks για το κύκλωμα συλλεκτών και θερμοδοχείου αντίστοιχα):

$$C_c = \dot{m}_c \cdot C_{p,c} = 1,30 \text{ kg/s} \cdot 3.850 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \Leftrightarrow C_c = 5.005 \text{ W/K}$$

$$C_t = \dot{m}_t \cdot C_{p,t} = 0,90 \text{ kg/s} \cdot 4.184 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)} \Leftrightarrow C_t = 3.765,6 \text{ W/K} \cdot$$

Από τις ανωτέρω παροχές θερμοχωρητικότητας η μικρότερη είναι αυτή του νερού από το θερμοδοχείο. Η αδιάστατη παροχή θερμοχωρητικότητα υπολογίζεται συνεπώς:

$$C^* = \frac{(m \cdot C_p)_{\min}}{(m \cdot C_p)_{\max}} \Leftrightarrow C^* = \frac{3.765,6 \text{ W/K}}{5.005 \text{ W/K}} \Leftrightarrow C^* = 0,75.$$

Το μέγεθος NTU υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\text{NTU} = \frac{U \cdot A}{(m \cdot C_p)_{\min}} \Leftrightarrow \text{NTU} = \frac{6.700 \text{ W/K}}{3.765,6 \text{ W/K}} \Leftrightarrow \text{NTU} = 1,78.$$

Στη συνέχεια υπολογίζεται η απόδοση του εναλλάκτη, για $C^* \neq 1$ από τη σχέση:

$$\varepsilon = \frac{1 - e^{-\text{NTU}(1-C^*)}}{1 - C^* \cdot e^{-\text{NTU}(1-C^*)}} \Leftrightarrow \varepsilon = \frac{1 - e^{-1,78(1-0,75)}}{1 - 0,75 \cdot e^{-1,78(1-0,75)}} \Leftrightarrow \varepsilon = 0,69.$$

Η μεταφερόμενη θερμική ισχύς από τον εναλλάκτη θερμότητας υπολογίζεται πλέον από τη σχέση:

$$\dot{Q}_{\text{he}} = \varepsilon \cdot (\dot{m} \cdot C_p)_{\min} \cdot (T_{c,o} - T_i) \Leftrightarrow \dot{Q}_{\text{he}} = 0,69 \cdot 3.765,6 \text{ W/K} \cdot (60 - 30) \text{ K} \Leftrightarrow \dot{Q}_{\text{he}} = 77,948 \text{ kW}.$$

Η θερμοκρασία εξόδου μίγματος γλυκόλης από τον εναλλάκτη δίνεται από τη σχέση:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{he}} &= \dot{m}_c \cdot C_{p,c} \cdot (T_{ci} - T_{co}) \Leftrightarrow T_{co} = T_{ci} - \frac{\dot{Q}_{\text{he}}}{\dot{m}_c \cdot C_{p,c}} \Leftrightarrow T_{co} = 60^\circ \text{C} - \frac{77.948 \text{ W}}{1,30 \text{ kg/s} \cdot 3.850 \text{ J/kg} \cdot \text{K}} \\ &\Leftrightarrow T_{co} = 44,43^\circ \text{C} \end{aligned}$$

Αντίστοιχα, η θερμοκρασία εξόδου νερού από τον εναλλάκτη δίνεται από τη σχέση:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{he}} &= \dot{m}_t \cdot C_{p,t} \cdot (T_{to} - T_{ti}) \Leftrightarrow T_{to} = T_{ti} + \frac{\dot{Q}_{\text{he}}}{\dot{m}_t \cdot C_{p,t}} \Leftrightarrow T_{to} = 30^\circ \text{C} + \frac{77.948 \text{ W}}{0,90 \text{ kg/s} \cdot 4.184 \text{ J/kg} \cdot \text{K}} \\ &\Leftrightarrow T_{to} = 50,70^\circ \text{C} \end{aligned}$$

Ο λόγος F'_R / F_R δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{F'_R}{F_R} = \left[1 + \frac{2 \text{ m}^2 \cdot 3,80 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}}{5.005 \text{ W/K}} \cdot \left(\frac{5.005 \text{ W/K}}{0,69 \cdot 3.765,6 \text{ W/K}} - 1 \right) \right]^{-1} \Leftrightarrow \frac{F'_R}{F_R} = 0,99$$

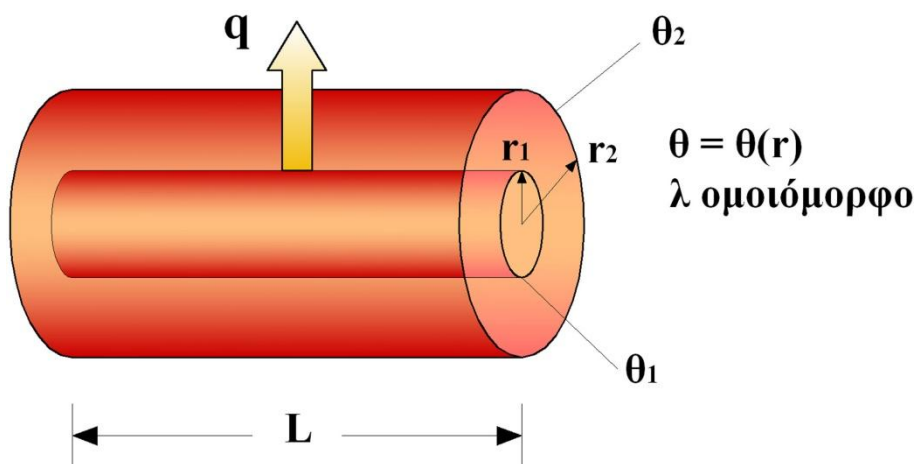
5.6.2. Απώλειες θερμότητας στα δίκτυα μεταφοράς

Κατά τη μεταφορά της παραγόμενης θερμότητας από τους ηλιακούς συλλέκτες είτε προς την τελική χρήση είτε προς τις μονάδες αποθήκευσης, εμφανίζονται απώλειες θερμότητας από το κύκλωμα μεταφοράς, δηλαδή από τις σωληνώσεις νερού ή από τους αεραγωγούς. Στην περίπτωση των αεραγωγών, λόγω έλλειψης μόνωσης, συνήθως οι απώλειες θερμότητας είναι υψηλότερες. Οι απώλειες θερμότητας έχουν ως αποτέλεσμα το εργαζόμενο μέσο:

- Να φτάνει σε μικρότερη θερμοκρασία στην τελική χρήση ή στη μονάδα αποθήκευσης από τη θερμοκρασία με την οποία εξέρχεται από τους ηλιακούς συλλέκτες,
- Να επιστρέφει σε μικρότερη θερμοκρασία στους ηλιακούς συλλέκτες από εκείνη με την οποία εξέρχεται από τους εναλλάκτες τελικής διάθεσης θερμότητας ή στις μονάδες αποθήκευσης.

Οι απώλειες μεταφοράς θερμότητας συνήθως δεν μπορούν να αγνοηθούν, εκτός ειδικών περιπτώσεων, που αφορούν σε δίκτυα μεταφοράς μικρού μήκους, με καλή θερμομόνωση και με σχετικά υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος, δηλαδή υπό συνθήκες που δεν ευνοούν τη μεταφορά θερμότητας από το δίκτυο μεταφοράς προς το περιβάλλον. Στις περιπτώσεις που δεν συνδράμουν οι προαναφερόμενες προϋποθέσεις, οι απώλειες θερμότητας κατά τη μεταφορά της θερμικής ισχύος από και προς τους ηλιακούς συλλέκτες θα πρέπει να υπολογιστούν.

Για τον υπολογισμό των απωλειών θερμότητας από δίκτυα μεταφοράς χρησιμοποιούνται οι βασικές σχέσεις μεταφοράς θερμότητας σε αγωγούς κυκλικής ή ορθογωνικής διατομής. Οι απώλειες θερμότητας από σωληνώσεις θέρμανσης των κτηρίων μπορούν ιδανικά να παρασταθούν όπως φαίνεται στο σχήμα 5.43 με ακτινική ροή θερμότητας διαμέσου ενός κυλινδρικού κελύφους.



Σχήμα 5.43: Ακτινική θερμική αγωγιμότητα διαμέσου απλού κυλινδρικού τοιχώματος.

Το πρόβλημα στην περίπτωση αυτή είναι να προσδιοριστεί η κατανομή της θερμοκρασίας και ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας σε ένα μακρύ κοίλο κύλινδρο μήκους L , εάν η εσωτερική και εξωτερική θερμοκρασία επιφανείας του είναι θ_1 και θ_2 αντίστοιχα, και με την παραδοχή ότι δεν υπάρχει εσωτερική παραγωγή θερμότητας. Δεδομένου ότι οι θερμοκρασίες στα όρια είναι σταθερές, η κατανομή της θερμοκρασίας δε μεταβάλλεται με το χρόνο και η σχέση αγωγιμότητας του Fourier παίρνει τη μορφή:

$$q = -\lambda \cdot A \cdot \frac{d\theta}{dr} = -\lambda \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot L \cdot \frac{d\theta}{dr} \quad (5.81)$$

όπου λ ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού του κυλινδρικού αγωγού.

Με ολοκλήρωση της σχέσης 5.81 με άκρα τις ακτίνες r_1 , r_2 (ή τις διαμέτρους d_1 , d_2 που χρησιμοποιούνται συχνότερα για σωληνώσεις) και τις επιφανειακές θερμοκρασίες θ_1 , θ_2 καταλήγουμε στην ακόλουθη σχέση για τη θερμική ροή:

$$q = \frac{2 \cdot \lambda \cdot \pi \cdot L}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \cdot (\theta_1 - \theta_2) \quad \text{ή} \quad q = \frac{(\theta_1 - \theta_2)}{\frac{1}{2 \cdot \lambda \cdot \pi \cdot L} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (5.82)$$

Η μεταφερόμενη θερμική ισχύς ανά μονάδα μήκους L είναι:

$$\frac{q}{L} = \frac{2 \cdot \lambda \cdot \pi}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \cdot (\theta_1 - \theta_2) \quad \text{ή} \quad \frac{q}{L} = \frac{(\theta_1 - \theta_2)}{\frac{1}{2 \cdot \lambda \cdot \pi} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (5.83)$$

Οι παραπάνω σχέσεις μπορούν ισοδύναμα να γραφούν και ως προς τις διαμέτρους d_1 και d_2 :

$$q = \frac{(\theta_1 - \theta_2)}{\frac{1}{2 \cdot \lambda \cdot \pi \cdot L} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1}} \quad \text{ή} \quad \frac{q}{L} = \frac{(\theta_1 - \theta_2)}{\frac{1}{2 \cdot \lambda \cdot \pi} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1}} \quad (5.84)$$

Ο παράγοντας $R = \frac{1}{2 \cdot \lambda \cdot \pi} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1}$ ονομάζεται «*συντελεστής θερμικής αντίστασης κυλινδρικής*

στρώσης» με μονάδα mK/W , ενώ ο παράγοντας $R_\theta = \frac{1}{2 \cdot \lambda \cdot \pi \cdot L} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1}$ ονομάζεται «*θερμική αντίσταση κυλινδρικής στρώσης*», με μονάδα K/W .

Τέλος, στην περίπτωση που έχουμε αγωγή διαμέσου σύνθετου κυλινδρικού τοιχώματος με n στρώσεις διαφορετικών υλικών, με σταθερούς συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας $\lambda_1, \lambda_2 \dots \lambda_n$ και υπό την προϋπόθεση ότι οι στρώσεις βρίσκονται σε πολύ καλή επαφή μεταξύ τους, η μεταφερόμενη θερμική ισχύς ανά μονάδα μήκους δίδεται από τη σχέση:

$$\frac{q}{L} = \frac{(\theta_1 - \theta_2)}{\frac{1}{2 \cdot \lambda_1 \cdot \pi} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_2 \cdot \pi} \cdot \ln \frac{d_3}{d_2} + \dots + \frac{1}{2 \cdot \lambda_n \cdot \pi} \cdot \ln \frac{d_{n+1}}{d_n}} \quad (5.85)$$

όπου d_1 είναι η εσωτερική διάμετρος του κυλινδρικού τοιχώματος, d_2 η διάμετρος της 1^{ης} στρώσης (π.χ. πάχος σωλήνα), d_3 η διάμετρος της 2^{ης} στρώσης (π.χ. μονωτικό υλικό) και d_{n+1} η διάμετρος της n -οστής στρώσης υλικού, ενώ θ_1 είναι η θερμοκρασία επιφανείας στην εσωτερική πλευρά του σωλήνα (αναφέρεται στην επιφάνεια της d_1) και θ_2 η θερμοκρασία επιφανείας στην εξωτερική πλευρά της n -οστής στρώσης, δηλαδή στην εξωτερική πλευρά της d_{n+1} .

Ο υπολογισμός των απωλειών θερμότητας από αγωγό ορθογωνικής διατομής προς το περιβάλλον εκτελείται, εφαρμόζοντας τέσσερις φορές – μία φορά για κάθε πλευρά της ορθογωνικής διατομής – τις βασικές σχέσεις μεταφοράς θερμότητας διαμέσου επίπεδων επιφανειών μέσω αγωγής, συναγωγής και ακτινοβολίας.

Παράδειγμα 5.7

Υπολογισμός απωλειών κυλινδρικού αγωγού

Αγωγός έχει εσωτερική διάμετρο $d_1=3,81cm$ και εξωτερική διάμετρο $d_2=4,83cm$. Οι θερμοκρασίες στην εσωτερική και στην εξωτερική επιφάνειά του είναι αντίστοιχα ίσες με $97^\circ C$ και $87^\circ C$. Ο αγωγός έχει μήκος $3m$ και ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητάς του είναι $\lambda=42,9W/mK$. Να βρεθεί η θερμική ισχύς (q) καθώς και η θερμοροή ανά μονάδα μήκους (q/L) για τον εν λόγω αγωγό.

Λύση

Ο νόμος του Fourier για κυλινδρικό αγωγό δίδει:

$$q = -\lambda \cdot A \cdot \frac{d\theta}{dr} = -\lambda \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot L \cdot \frac{d\theta}{dr} \Leftrightarrow q \cdot dr = -2 \cdot \lambda \cdot \pi \cdot r \cdot L \cdot d\theta \Leftrightarrow$$

$$q \cdot \frac{dr}{r} = -2 \cdot \lambda \cdot \pi \cdot L \cdot d\theta \Leftrightarrow q \cdot \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = -2 \cdot \lambda \cdot \pi \cdot L \cdot \int_{\theta_1}^{\theta_2} d\theta \Leftrightarrow$$

$$q \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} = -2 \cdot \lambda \cdot \pi \cdot L \cdot (\theta_2 - \theta_1) \Leftrightarrow q = \frac{2 \cdot \lambda \cdot \pi \cdot L \cdot (\theta_1 - \theta_2)}{\ln \frac{d_2}{d_1}}$$

$$\Leftrightarrow q = \frac{2 \cdot 42,9 \cdot \pi \cdot 3 \cdot (97 - 87)}{\ln \frac{4,83}{3,81}} \Leftrightarrow q = 34,08 \text{ kW}$$

Επομένως οι απώλειες ανά μονάδα μήκους είναι:

$$\frac{q}{L} = \frac{34,08 \text{ kW}}{3 \text{ m}} = 11,36 \text{ kW/m}.$$

Αν λάβουμε υπόψη μας ότι:

$$A_1 = \pi \cdot d_1 \cdot L = \pi \cdot 0,0381 \cdot 3 = 0,359 \text{ m}^2$$

και

$$A_a = \pi \cdot d_2 \cdot L = \pi \cdot 0,0483 \cdot 3 = 0,455 \text{ m}^2$$

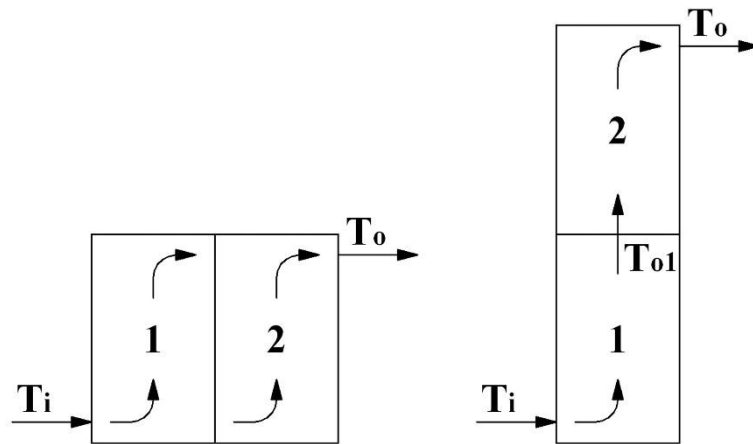
τότε οι απώλειες ανά μονάδα επιφανείας (πυκνότητα θερμορροής) είναι:

$$\frac{q}{A_1} = \frac{34,08}{0,359} = 94,93 \text{ kW/m}^2 \text{ και } \frac{q}{A_a} = \frac{34,08}{0,455} = 74,90 \text{ kW/m}^2.$$

5.6.3. Διασύνδεση ηλιακών συλλεκτών

Στις περισσότερες περιπτώσεις εγκατάστασης υβριδικών σταθμών θερμικής ισχύος, εγκαθίστανται περισσότεροι του ενός ηλιακοί συλλέκτες, συνδεδεμένοι μεταξύ τους σε σειρά ή παράλληλα ή και με συνδυασμό των δύο συνδεσμολογιών, ανάλογα με τις απαιτήσεις της κατανάλωσης σε θερμική ισχύ και θερμοκρασία τελικής χρήσης. Στο σχήμα 5.44 παρουσιάζεται συνδεσμολογία δύο ηλιακών συλλεκτών σε σειρά και παράλληλα. Στην παράλληλη συνδεσμολογία η συνολική παροχή του εργαζόμενου μέσου διαμοιράζεται στους δύο ηλιακούς συλλέκτες. Στην εν σειρά συνδεσμολογία η παροχή στους δύο συλλέκτες είναι κοινή και ίση με την αρχική παροχή εισόδου του εργαζόμενου μέσου στο ηλιακό πεδίο. Επίσης, στην εν σειρά συνδεσμολογία, η έξοδος της παροχής από τον πρώτο συλλέκτη αποτελεί την είσοδο στο δεύτερο συλλέκτη. Γίνεται, έτσι, κατανοητό ότι στην εν σειρά συνδεσμολογία επιτυγχάνεται υψηλότερη τελική θερμοκρασία εξόδου του εργαζόμενου μέσου από το ηλιακό πεδίο, αφού η ίδια παροχή εργαζόμενου μέσου θα διέλθει μέσα από δύο ηλιακούς συλλέκτες, σε αντίθεση με την παράλληλη συνδεσμολογία που η κάθε παροχή διέρχεται μέσα από ένα συλλέκτη.

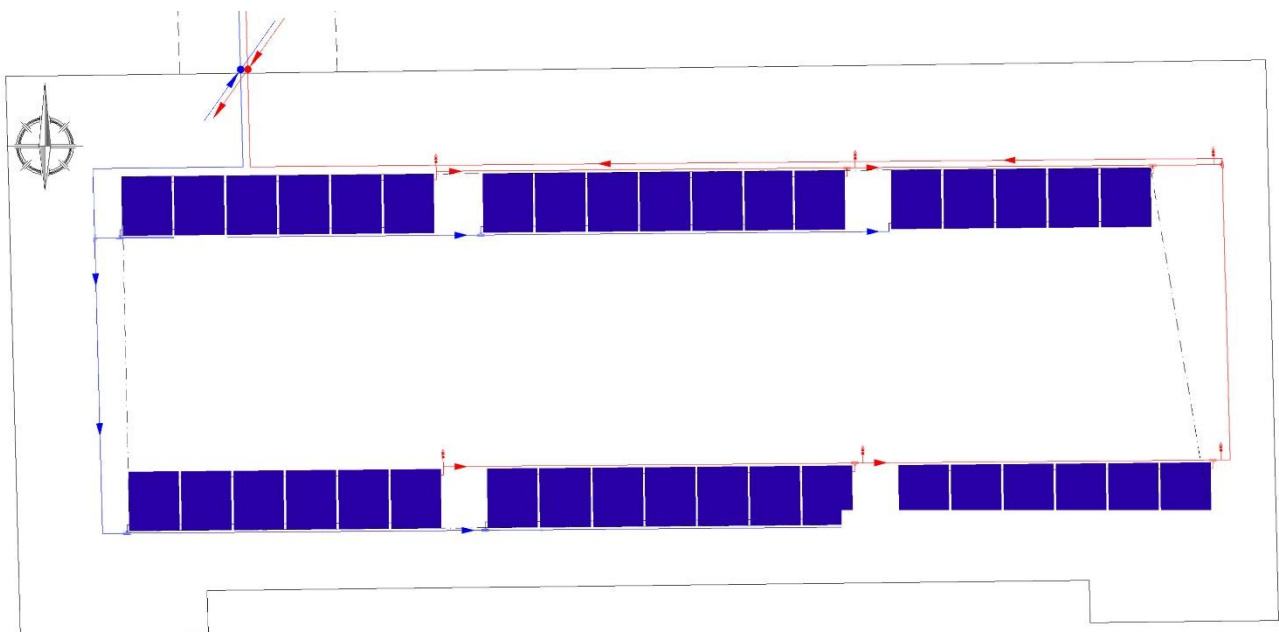
Επίσης, με βάση τα όσα αναφέρθηκαν στις προηγούμενες ενότητες, το σημείο λειτουργίας και η απόδοση των δύο ηλιακών συλλεκτών στην παράλληλη συνδεσμολογία αναμένεται να είναι η ίδια, ή έστω περίπου η ίδια, δεδομένου του ότι η παροχή και η θερμοκρασία εισόδου του εργαζόμενου μέσου ταυτίζονται στους δύο συλλέκτες και υπό την προϋπόθεση ότι και οι δύο συλλέκτες δέχονται την ίδια ηλιακή ακτινοβολία, έχουν τον ίδιο προσανατολισμό, την ίδια κλίση εγκατάστασης και δέχονται την ίδια σκίαση. Αντίθετα, στην εν σειρά συνδεσμολογία, ακόμα και αν ισχύουν οι ανωτέρω προϋποθέσεις, οι δύο ηλιακοί συλλέκτες δε θα λειτουργήσουν στο ίδιο σημείο και δεν θα εμφανίσουν την ίδια απόδοση, αφού η θερμοκρασία εισόδου του εργαζόμενου μέσου στο δεύτερο συλλέκτη είναι υψηλότερη από αυτήν στον πρώτο.



Σχήμα 5.44: Βασικές συνδεσμολογίες ηλιακών συλλεκτών σε σειρά και παράλληλα.

Οι δύο βασικές συνδεσμολογίες ηλιακών συλλεκτών στις περισσότερες εφαρμογές συνδυάζονται, προκειμένου να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. Μία τέτοια περίπτωση παρουσιάζεται στο σχήμα 5.45, όπου το ηλιακό πεδίο αποτελείται από πέντε ομάδες ηλιακών των έξι συλλεκτών και μία ομάδα των πέντε συλλεκτών. Σε κάθε επιμέρους ομάδα οι ηλιακοί συλλέκτες είναι σε σειρά συνδεδεμένοι μεταξύ τους, ενώ όλες οι ομάδες είναι μεταξύ τους παράλληλα συνδεδεμένες. Τούτο σημαίνει ότι:

- Ο πρώτος συλλέκτης της κάθε ομάδας δέχεται το εργαζόμενο μέσο, όπως αυτό προσάγεται στους συλλέκτες από τις μονάδες αποθήκευσης ή την επιστροφή του από τη διάθεση θερμότητας προς τελική χρήση
- Ο τελευταίος συλλέκτης της κάθε ομάδας επιστρέφει το εργαζόμενο μέσο στο κοινό υδραυλικό δίκτυο με το οποίο η παραγόμενη θερμότητα θα οδηγηθεί προς αποθήκευση ή προς διάθεσή της για τελική χρήση.



Σχήμα 5.45: Συνδυαστική συνδεσμολογία ηλιακών συλλεκτών σε σειρά και παράλληλα.

Στο σχήμα 5.45 παρατηρείται, επίσης, ο τρόπος χωροθέτησης των ηλιακών συλλεκτών στη στέγη του κτηρίου. Οι ηλιακοί συλλέκτες είναι προσανατολισμένοι προς το νότο και εγκατεστημένοι σε δύο παράλληλες σειρές. Η απόσταση των ηλιακών συλλεκτών στη διεύθυνση ανατολικής – δύσης είναι μικρή, για να ελαχιστοποιηθούν τα μήκη του υδραυλικού δικτύου, κάτι που συνεπάγεται μικρότερο κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας, μέσω της μείωσης των απωλειών ροής και θερμότητας. Αντιθέτως, η απόσταση των δύο παράλληλων σειρών εγκατάστασης είναι σημαντική, περίπου ίση με το τριπλάσιο του μήκους της προβολής του ηλιακού συλλέκτη στο οριζόντιο επίπεδο, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι

απώλειες σκίασης της πλησιέστερης προς το νότο σειράς προς την άλλη σειρά ηλιακών συλλεκτών. Ας σημειωθεί, τέλος, ότι οι ηλιακοί συλλέκτες στο σχήμα 5.45 είναι χωροθετημένοι υπό κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο, και, συνεπώς στην κάτοψη του σχήματος αυτού αποτυπώνεται το μήκος της προβολής των ηλιακών συλλεκτών ως προς το οριζόντιο επίπεδο.

Στην παράλληλη συνδεσμολογία οι συνθήκες λειτουργίας του κάθε ηλιακού συλλέκτη είναι κοινές, συνεπώς, για τον υπολογισμό της συνολικής θερμικής ισχύος από το ηλιακό πεδίο, οι μέθοδοι που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους εφαρμόζονται μία φορά για ένα τυπικό συλλέκτη της εγκατάστασης. Η παραγωγή θερμική ισχύος από τον ένα συλλέκτη πολλαπλασιαζόμενη επί το συνολικό αριθμό των παράλληλα συνδεδεμένων συλλεκτών θα δώσει τη συνολική παραγωγή θερμικής ισχύος του πεδίου. Προϋπόθεση, για να ισχύσει η ανωτέρω προσέγγιση, είναι όλοι οι συλλέκτες να λειτουργούν υπό τις ίδιες συνθήκες σκίασης, να έχουν τον ίδιο προσανατολισμό και κλίση εγκατάστασης και να δέχονται την ίδια ηλιακή ακτινοβολία.

Στην εν σειρά συνδεσμολογία, όπως ήδη επεξηγήθηκε ανωτέρω, οι συνθήκες λειτουργίας του κάθε ηλιακού συλλέκτη είναι διαφορετικές. Συνεπώς η παραγωγή θερμικής ισχύος από τον κάθε συλλέκτη θα είναι διαφορετική. Σε πρώτη προσέγγιση, ας υποθέσουμε ηλιακό πεδίο από δύο ηλιακούς συλλέκτες στη σειρά. Η συνολική παραγωγή θερμικής ισχύος, με βάση τα γνωστά, θα δίνεται από μία σχέση της μορφής:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 = & A_{c1} \cdot F_{R1} \cdot [G_t \cdot (\tau \cdot \alpha)_1 - U_{L1} \cdot (T_{f1} - T_a)] \\ & + A_{c2} \cdot F_{R2} \cdot [G_t \cdot (\tau \cdot \alpha)_2 - U_{L2} \cdot (T_{f01} - T_a)] \end{aligned} \quad (5.86)$$

όπου T_{f1} είναι η θερμοκρασία εισόδου του εργαζόμενου μέσου στον πρώτο συλλέκτη και T_{f01} η θερμοκρασία εξόδου του εργαζόμενου μέσου από τον πρώτο συλλέκτη και εισόδου στο δεύτερο συλλέκτη. Η θερμοκρασία αυτή, κατά τα γνωστά, μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$\dot{Q}_1 = \dot{m}_f \cdot c_p \cdot (T_{f01} - T_{f1}) \Leftrightarrow T_{f01} = T_{f1} + \frac{\dot{Q}_1}{\dot{m}_f \cdot c_p} \quad (5.87)$$

Απαλείφοντας τη θερμοκρασία T_{f01} από τις ανωτέρω σχέσεις, παίρνουμε:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 = & [A_{c1} \cdot F_{R1} \cdot (\tau \cdot \alpha)_1 \cdot (1 - K) + A_{c2} \cdot F_{R2} \cdot (\tau \cdot \alpha)_2] \cdot G_t - \\ & [A_{c1} \cdot F_{R1} \cdot U_{L1} \cdot (1 - K) + A_{c2} \cdot F_{R2} \cdot U_{L2}] \cdot (T_{f1} - T_a) \end{aligned} \quad (5.88)$$

όπου το μέγεθος K ισούται με:

$$K = \frac{A_{c2} \cdot F_{R2} \cdot U_{L2}}{\dot{m} \cdot c_p} \quad (5.89)$$

Η μορφή της σχέσης 5.88, η οποία είναι αντίστοιχη με αυτήν της σχέσης 5.1, μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι δύο συλλέκτες μπορούν να θεωρηθούν ως ένας συλλέκτης με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

$$A_c = A_{c1} + A_{c2} \quad (5.90)$$

$$F_R \cdot (\tau \cdot \alpha) = \frac{A_{c1} \cdot F_{R1} \cdot (\tau \cdot \alpha)_1 \cdot (1 - K) + A_{c2} \cdot F_{R2} \cdot (\tau \cdot \alpha)_2}{A_c} \quad (5.91)$$

$$F_R \cdot U_L = \frac{A_{c1} \cdot F_{R1} \cdot U_{L1} \cdot (1 - K) + A_{c2} \cdot F_{R2} \cdot U_{L2}}{A_c} \quad (5.92)$$

Στην περίπτωση τριών ηλιακών συλλεκτών σε σειρά συνδεδεμένων, οι ανωτέρω σχέσεις μπορούν να εφαρμοστούν αρχικά για τους δύο πρώτους συλλέκτες, από τους οποίους θα προκύψει ένας νέος ισοδύναμος

συλλέκτης, και, στη συνέχεια, οι σχέσεις εφαρμόζονται ξανά ανάμεσα στον ισοδύναμο συλλέκτη και στον τρίτο εν σειρά συνδεδεμένο συλλέκτη. Η διαδικασία αυτή μπορεί να εφαρμοστεί επαναληπτικά για περισσότερους συλλέκτες, οδηγώντας τελικά σε ένα ισοδύναμο συλλέκτη για το σύνολο των εν σειρά συνδεδεμένων.

Στην περίπτωση πλήθους N όμοιων ηλιακών συλλεκτών συνδεδεμένων εν σειρά, αποδεικνύεται ότι για τον ισοδύναμο συλλέκτη ισχύουν οι σχέσεις:

$$F_R \cdot (\tau \cdot \alpha) = F_{R1} \cdot (\tau \cdot \alpha)_1 \cdot \frac{1 - (1 - K)^N}{N \cdot K} \quad (5.93)$$

$$F_R \cdot U_L = F_{R1} \cdot U_{L1} \cdot \frac{1 - (1 - K)^N}{N \cdot K} \quad (5.94)$$

Παράδειγμα 5.8

Υπολογισμός ισοδύναμου ηλιακού συλλέκτη

Να υπολογιστούν τα μεγέθη $F_R \cdot (\tau \alpha)$ και $F_R \cdot U_L$ για τον ισοδύναμο συλλέκτη τεσσάρων όμοιων ηλιακών συλλεκτών συνδεδεμένων σε σειρά. Η παροχή του εργαζόμενου μέσου είναι $0,080 \text{ kg/s}$. Τα χαρακτηριστικά για κάθε ένα από τους όμοιους συλλέκτες για τη συγκεκριμένη παροχή ισούνται με $F_{R1} \cdot (\tau \alpha) = 0,70$ και $F_{R1} \cdot U_{L1} = 3,8 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$. Οι διαστάσεις του κάθε συλλέκτη είναι $2 \text{ m} \times 1,2 \text{ m}$, ενώ η ειδική θερμοχωρητικότητα του εργαζόμενου μέσου να ληφθεί ίση με $c_p = 4.184 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$.

Λύση

Αρχικά υπολογίζεται το μέγεθος K από τη σχέση 5.89:

$$K = \frac{A_c \cdot F_R \cdot U_L}{\dot{m} \cdot c_p} \Leftrightarrow K = \frac{2 \text{ m} \cdot 1,2 \text{ m} \cdot 3,8 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}}{0,080 \text{ kg/s} \cdot 4.184 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}} \Leftrightarrow K = 0,0272$$

Στη συνέχεια υπολογίζονται τα χαρακτηριστικά του ισοδύναμου συλλέκτη από τις σχέσεις 5.93 και 5.94:

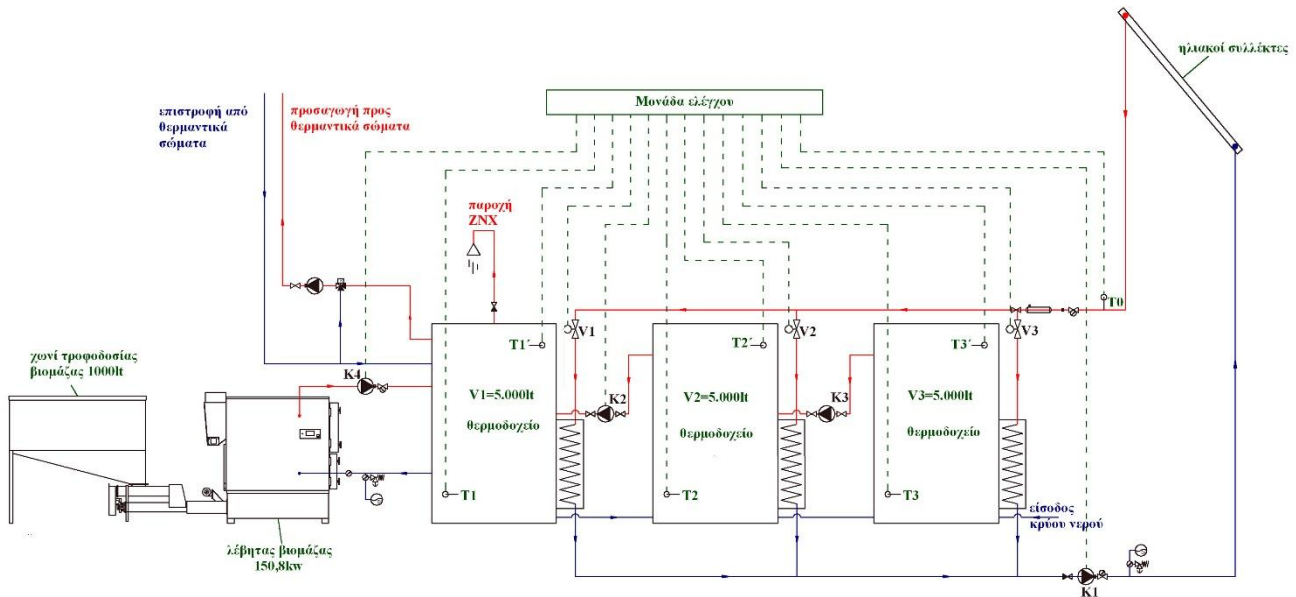
$$F_R \cdot (\tau \cdot \alpha) = F_{R1} \cdot (\tau \cdot \alpha)_1 \cdot \frac{1 - (1 - K)^N}{N \cdot K} \Leftrightarrow F_R \cdot (\tau \cdot \alpha) = 0,70 \cdot \frac{1 - (1 - 0,0272)^4}{4 \cdot 0,0272} \Leftrightarrow F_R \cdot (\tau \cdot \alpha) = 0,6719$$

$$F_R \cdot U_L = F_{R1} \cdot U_{L1} \cdot \frac{1 - (1 - K)^N}{N \cdot K} \Leftrightarrow F_R \cdot U_L = 3,8 \cdot \frac{1 - (1 - 0,0272)^4}{4 \cdot 0,0272} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \Leftrightarrow F_R \cdot U_L = 3,65 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

5.6.4. Αποθήκευση θερμότητας σε πολλαπλά θερμοδοχεία

Σε εφαρμογές υβριδικών σταθμών μεγάλης ισχύος, όπως για παράδειγμα η θέρμανση εσωτερικών χώρων, η απαιτούμενη χωρητικότητα των δεξαμενών νερού, που θα χρησιμοποιηθούν για αποθήκευση θερμότητας, συνήθως υπερβαίνει τη μέγιστη χωρητικότητα ενός θερμοδοχείου διαθέσιμου στο εμπόριο. Στην περίπτωση αυτή, προκειμένου να καλυφθούν οι απαιτήσεις της διαστασιολόγησης του υβριδικού σταθμού, θα πρέπει να εγκατασταθούν περισσότερα του ενός θερμοδοχεία. Η εγκατάσταση περισσότερων του ενός θερμοδοχείων αυξάνει την πολυπλοκότητα του σταθμού, αναφορικά με τη συνδεσμολογία τους και τον αλγόριθμο αποθήκευσης, δηλαδή σε ποιο θερμοδοχείο αποθηκεύεται κάθε φορά η διαθέσιμη προς αποθήκευση θερμική ισχύς.

Η λειτουργία ενός υβριδικού σταθμού με αποθήκευση θερμότητας σε περισσότερα του ενός θερμοδοχεία θα αναλυθεί με τη βοήθεια ενός παραδείγματος. Στο σχήμα 5.46 παρουσιάζεται μία περίπτωση εγκατάστασης τριών θερμοδοχείων σε ένα υβριδικό σταθμό θέρμανσης.



Σχήμα 5.46: Συνδεσμολογία τριών θερμοδοχείων αποθήκευσης σε υβριδικό σταθμό θερμότητας.

Στο προηγούμενο σχήμα, παρατηρείται ότι τα τρία θερμοδοχεία είναι ταυτόχρονα σε σειρά και παράλληλα συνδεδεμένα μεταξύ τους ως προς τους ηλιακούς συλλέκτες. Η εν σειρά συνδεσμολογία εξασφαλίζει ότι νερό και θερμότητα μπορούν να μεταφέρονται από το ένα θερμοδοχείο στο άλλο, ενώ η παράλληλη συνδεσμολογία ως προς τους ηλιακούς συλλέκτες συνεπάγεται ότι η παραγόμενη θερμότητα από τους συλλέκτες μπορεί να αποθηκεύεται σε οποιοδήποτε από τα θερμοδοχεία, χωρίς να επηρεάζεται η υφιστάμενη κατάσταση σε κάποιο άλλο. Η θερμότητα μεταφέρεται από τους συλλέκτες στα θερμοδοχεία μέσω κλειστών υδραυλικών κυκλωμάτων στα οποία η ροή του μέσου εξασφαλίζεται μέσω του κυκλοφορητή K1.

Ο καυστήρας θέρμανσης είναι συνδεδεμένος αποκλειστικά στο πρώτο θερμοδοχείο, το οποίο αποτελεί το θερμοδοχείο αιχμής. Από το ίδιο θερμοδοχείο τροφοδοτείται το δίκτυο διάθεσης θερμότητας προς τελική χρήση στα θερμαντικά σώματα και το δίκτυο διάθεσης ζεστού νερού προς χρήση. Η θερμότητα από τον καυστήρα μεταφέρεται στο πρώτο θερμοδοχείο μέσω κλειστού υδραυλικού κυκλώματος, στο οποίο η ροή του μέσου εξασφαλίζεται μέσω του κυκλοφορητή K4.

Η ροή της θερμότητας είναι δυνατή από το τρίτο προς το δεύτερο θερμοδοχείο, μέσω του κυκλοφορητή K3 και από το δεύτερο προς το πρώτο θερμοδοχείο μέσω του κυκλοφορητή K2.

Η λειτουργία του υβριδικού σταθμού θέρμανσης εξασφαλίζεται και ελέγχεται από μία κεντρική ηλεκτρονική μονάδα ελέγχου. Ο αλγόριθμος αποθήκευσης θερμικής ισχύος από τους ηλιακούς συλλέκτες θα πρέπει να αποσκοπεί:

- Στην εξασφάλιση της μέγιστης δυνατής θερμοκρασίας στο θερμοδοχείο αιχμής, γεγονός που θα ελαχιστοποιήσει τη λειτουργία του συμβατικού καυστήρα θέρμανσης.
- Στη μεγιστοποίηση της αξιοποίησης της παραγόμενης θερμικής ισχύος από τους ηλιακούς συλλέκτες.

Και οι δύο ανωτέρω στόχοι προσεγγίζονται μέσω της επιδίωξης της διατήρησης διαβάθμισης θερμοκρασίας κατά αύξουσα φορά από το τρίτο θερμοδοχείο προς το πρώτο θερμοδοχείο. Τούτο επιτυγχάνεται με την κατάλληλη εγκατάσταση κυκλοφορητών και ηλεκτροβανών στο υδραυλικό δίκτυο του υβριδικού σταθμού, οι οποίες λειτουργούν αυτόματα με βάση τις εντολές που δέχονται από τη μονάδα ελέγχου. Ωστόσο, πριν από την παροχή εντολών λειτουργίας, η μονάδα ελέγχου δέχεται σήματα θερμοκρασίας από συγκεκριμένα σημεία του συστήματος. Συγκεκριμένα τα δεδομένα που εισάγονται στη μονάδα ελέγχου κάθε χρονική στιγμή είναι:

- θερμοκρασία προσαγωγής κυκλώματος ηλιακών συλλεκτών T0,
- θερμοκρασία T1 χαμηλών στρωμάτων αποθήκευσης θερμοδοχείου 1,
- θερμοκρασία T1' υψηλών στρωμάτων αποθήκευσης θερμοδοχείου 1,
- θερμοκρασία T2 χαμηλών στρωμάτων αποθήκευσης θερμοδοχείου 2,

- θερμοκρασία $T2'$ υψηλών στρωμάτων αποθήκευσης θερμοδοχείου 2,
- θερμοκρασία $T3$ χαμηλών στρωμάτων αποθήκευσης θερμοδοχείου 3,
- θερμοκρασία $T3'$ υψηλών στρωμάτων αποθήκευσης θερμοδοχείου 3.

Αντίστοιχα, η μονάδα ελέγχου δίνει εντολές για τη λειτουργία των ακόλουθων συσκευών:

- κυκλοφορητή κυκλώματος ηλιακών συλλεκτών $K1$,
- κυκλοφορητή κυκλώματος θερμοδοχείων 1 & 2 $K2$,
- κυκλοφορητή κυκλώματος θερμοδοχείων 2 & 3 $K3$,
- κυκλοφορητή κυκλώματος καυστήρα $K4$,
- ηλεκτροβάνια $V1$ προσαγωγής θερμοδοχείου 1,
- ηλεκτροβάνια $V2$ προσαγωγής θερμοδοχείου 2,
- ηλεκτροβάνια $V3$ προσαγωγής θερμοδοχείου 3.

Ο αλγόριθμος λειτουργίας έχει σκοπό να καθορίσει πρακτικά σε ποιο θερμοδοχείο θα αποθηκευτεί η παραγόμενη θερμική ισχύς από τους ηλιακούς συλλέκτες, και αν θα λειτουργήσει ο καυστήρας κεντρικής θέρμανσης. Η εντολή για την έναρξη του καυστήρα θέρμανσης δίνεται, αν υπάρχει απαίτηση για παραγωγή θερμικής ισχύος και αν η μέγιστη θερμοκρασία του μέσου στο θερμοδοχείο αιχμής είναι μικρότερη από την ελάχιστη θερμοκρασία λειτουργίας των θερμαντικών σωμάτων. Ο απαιτούμενος έλεγχος και η σχετική εντολή έχουν ως εξής:

- αν $T1' < T_{d,min}$ και $Q_d > 0$, τότε: $K4$: ON, διαφορετικά $K4$: OFF.

Προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι θα μεγιστοποιηθεί η αποθήκευση θερμότητας από το θερμοδοχείο, και ταυτόχρονα η διαβάθμιση της θερμοκρασίας στα μέσα αποθήκευσης θα είναι αύξουσα με φορά από το τρίτο προς το πρώτο θερμοδοχείο, θα πρέπει να ελέγχεται, κατά σειρά προτεραιότητας, αν είναι δυνατή η αποθήκευση θερμότητας στο πρώτο, στο δεύτερο ή στο τρίτο θερμοδοχείο. Πρακτικά, αν η θερμοκρασία εξόδου του μέσου από τους ηλιακούς συλλέκτες είναι μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία του θερμοδοχείου αιχμής, τότε η θερμότητα αποθηκεύεται στο πρώτο θερμοδοχείο. Αν όχι, τότε η θερμότητα θα αποθηκευτεί στο θερμοδοχείο με την αμέσως χαμηλότερη θερμοκρασία αποθηκευμένου μέσου, με προτεραιότητα αν αποδίδεται στο δεύτερο έναντι του τρίτου θερμοδοχείο. Η διαδικασία αποθήκευσης, που περιγράφηκε, υλοποιείται με τους ακόλουθους ελέγχους και τις αντίστοιχες εντολές:

- αν $T0 > T1$, τότε $K1$: ON, $V1$: open, $V2$: close, $V3$: close, διαφορετικά:
- αν $T0 < T1$ και $T0 > T2$, τότε $K1$: ON, $V1$: close, $V2$: open, $V3$: close, διαφορετικά:
- αν $T0 < T1$ και $T0 < T2$ και $T0 > T3$, τότε $K1$: ON, $V1$: close, $V2$: close, $V3$: open, διαφορετικά:
- αν $T0 < T1$ και $T0 < T2$ και $T0 < T3$, τότε $K1$: OFF, $V1$: close, $V2$: close, $V3$: close.

Η τελευταία εντολή εξασφαλίζει ότι δε θα προκύψει ροή του μέσου από τους συλλέκτες προς οποιοδήποτε θερμοδοχείο, αν σε κανένα επίπεδο των θερμοδοχείων δεν ανιχνεύεται θερμοκρασία μικρότερη από αυτήν του μέσου στην έξοδό του από τους ηλιακούς συλλέκτες.

Τέλος, στην περίπτωση που μέσω της αποθήκευσης θερμότητας στο δεύτερο ή στο τρίτο θερμοδοχείο προκύψει αύξηση της θερμοκρασίας του μέσου σε σχέση με τη θερμοκρασία του μέσου στο πρώτο ή στο δεύτερο θερμοδοχείο αντίστοιχα, θα πρέπει να εξασφαλιστεί μεταφορά του μέσου και τη θερμότητας από το τρίτο ή το δεύτερο θερμοδοχείο προς το δεύτερο ή το πρώτο αντίστοιχα. Τούτη η λειτουργία εξασφαλίζεται μέσω των ακόλουθων δύο ελέγχων και εντολών:

- αν $T2' > T1$, τότε $K2$: ON
- αν $T3' > T2$, τότε $K3$: ON.

Αναφορές Κεφαλαίου

- [1] Κωνστάντιος Ιωάννης. Συγκεντρωτικοί Ηλιακοί Συλλέκτες. Διπλωματική εργασία. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Θερμότητας. Αθήνα 2010.
- [2] ASTM D1418 - 10a, Standard Practice for Rubber and Rubber Latices-Nomenclature.
- [3] John A. Duffie, William A. Beckman. Solar engineering of thermal processes. Wiley. Fourth Edition. ISBN: 978-0-470-87366-3.
- [4] L.N. Cunio, A.B. Sproul. Performance characterisation and energy savings of uncovered swimming pool solar collectors under reduced flow rate conditions. *Solar Energy* 2012; 86: 1511–1517.
- [5] S. A. Klein. Calculation of monthly-average transmittance-absorptance product. *Solar Energy* 1979; 23: 547-551.
- [6] A.F. Souka, H.H. Safwat. Determination of the optimum orientations for the double-exposure, flat-plate collector and its reflectors. *Solar Energy* 1966; 10: 170-174.
- [7] T. Tesfamichael, E. Wäckelgård. Angular solar absorptance and incident angle modifier of selective absorbers for solar thermal collectors. *Solar Energy* 2000; 68: 335-341.
- [8] J. E. Hill, J. E. Jenkins, D. E. Jones. Experiment verification of a standard test procedure for solar collectors. NBS building science series 117. U.S. Department of Commerce. 1979.
- [9] Κτενιαδάκης Μιχάλης. Εφαρμογές μετάδοσης θερμότητας. Εκδόσεις Ζήτη. Αθήνα Ιούνιος 2010. ISBN10: 9604562142. ISBN13: 9789604562145.
- [10] P. Axaopoulos, G. Pitsilis, P. Panagakis. Multimedia education program for an active solar hot water system. *International Journal of Solar Energy* 2002; 22: 83-92.
- [11] P. Axaopoulos, G. Pitsilis. Energy software programs for educational use. *Renewable Energy* 2007; 32: 1045-1058.
- [12] W. H. McAdams. Heat Transmission. 3rd edition, McGraw-Hill, New York, 1954.
- [13] J. C. Mitchell. Personal communication. 1979.
- [14] M. J. Brandemuehl, W. A. Beckman. Transmission of diffuse radiation through CPC and flat-plate collector glazings. *Solar Energy* 1980; 24: 511 – 513.
- [15] W. M. Kays, A. L. London. Compact heat exchangers. McGraw-Hill, New York 1964.

Κεφάλαιο

6

Η ενέργεια ως καταναλωτικό αγαθό

6.1. Εισαγωγή

Ένα σύγγραμμα αφιερωμένο στην ενέργεια και στις τεχνολογίες μετατροπής της οφείλει να την προσεγγίσει όχι μόνο ως τεχνικό – φυσικό μέγεθος, αλλά και ως καταναλωτικό αγαθό – προϊόν, το οποίο μάλιστα αποτελεί είδος πρώτης ανάγκης στο σύγχρονο αναπτυγμένο και αναπτυσσόμενο κόσμο, και είδος χωρίς υποκατάστατο. Ο τελευταίος χαρακτηρισμός, το ότι δηλαδή η ενέργεια δεν έχει υποκατάστατο, προσδιορίζει ακριβώς την ιδιότητά της να αποτελεί το μοναδικό μέσο υλοποίησης έργων, το οποίο δεν μπορεί να υποκατασταθεί από κάποιο άλλο εναλλακτικό μέσο, συνεπώς χωρίς τη διαθεσιμότητά του, η επίτευξη των έργων αυτών καθίσταται ανέφικτη. Για παράδειγμα, για την ανάγνωση ενός βιβλίου τη νύχτα απαιτείται η διάθεση ενέργειας με τη μορφή ακτινοβολίας. Επίσης για τη μεταφορά ή την ανύψωση ενός σώματος απαιτείται η διάθεση μηχανικής ενέργειας. Κανένα από τα ανωτέρω έργα δεν μπορεί να υλοποιηθεί χωρίς τη διαθεσιμότητα της αντίστοιχης μορφής ενέργειας.

Η ανωτέρω ιδιότητα της ενέργειας ως καταναλωτικό αγαθό, το ότι δηλαδή δεν μπορεί να υποκατασταθεί από άλλα μέσα, της προσδίδει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά. Καταρχήν την καθιστά απαραίτητη για την εξασφάλιση του σύγχρονου τρόπου επιβίωσης, ενίοτε δε και για την ίδια την επιβίωσή μας. Για την ακρίβεια, η ενέργεια, σε συγκεκριμένες μορφές της, αποτελούσε προϋπόθεση τόσο για την επιβίωση, όσο και για την εξέλιξη του ανθρώπινου είδους, εδώ και μερικές εκατοντάδες χιλιάδες χρόνια. Συγκεκριμένα, η ανακάλυψη της φωτιάς από τον *homo heidelbergensis* είναι δεδομένο ότι αφενός του παρείχε θερμότητα, επιτρέποντας την αύξηση των πληθυσμών και του μέσου όρου ζωής, και αφετέρου συνέβαλε στην καλλιέργεια της φαντασίας του, απαραίτητο εφόδιο για την ερμηνεία της φύσης και την ανάπτυξη της γνώσης.

Επιπλέον η σημασία της ενέργειας ως καταναλωτικό αγαθό αποτυπώνεται περισσότερο παραστατικά στο διεθνή αγώνα, στον οποίο επιδίδονται τα κράτη και οι εθνότητες για τον έλεγχο των αποθεμάτων των πρωτογενών μορφών της, πρακτικά στον έλεγχο του πλούτου που τούτα συνεπάγονται. Πράγματι η μοναδικότητα και η μη υποκατάσταση της ενέργειας ως καταναλωτικό αγαθό μεταφράζονται σε τεράστια ποσά υλικού πλούτου για όποιον ελέγχει τη διαθεσιμότητα των αποθεμάτων των πρωτογενών μορφών της. Σειρά διεθνών και εμφύλιων πολεμικών συρράξεων εκδηλώθηκαν κατά τον εικοστό αιώνα για τον έλεγχο των αποθεμάτων της πρωτογενούς μορφής ενέργειας που κυριάρχησε, δηλαδή του πετρελαίου. Τεράστια οικονομικά συμφέροντα συνεχίζουν να εξελίσσονται στο πεδίο ανάπτυξης των σύγχρονων εναλλακτικών – ανανεώσιμων πηγών ενέργειας τις τελευταίες περίπου δύο δεκαετίες για τη δέσμευση και τον έλεγχο των περιοχών με το υψηλότερο διαθέσιμο δυναμικό Α.Π.Ε.

Τα ανωτέρω επιτείνονται ακόμα περισσότερο από τους ρυθμούς με τους οποίους η ενέργεια καταναλώνεται στο σύγχρονο κόσμο. Το έτος 2000 η ενέργεια που κατανάλωσαν οι Έλληνες αντιστοιχούσε, κατά μέσο όρο, σε 2,7 τόνους πετρελαίου περίπου κατά άτομο ή κάτω, από μια διαφορετική προσέγγιση, για τον κάθε Έλληνα λειτουργούσε αδιάκοπα μια μέση πηγή ισχύος γύρω στα 3,5kW. Με την υπόθεση ότι η ισχύς που διαθέτει ένας μέσος ενήλικας άντρας είναι της τάξεως των 100W, προκύπτει ότι το σημερινό επίπεδο της ζωής μας στηρίζεται σε 35 ρωμαλέους «ενεργειακούς σκλάβους», που προσφέρουν τις υπηρεσίες τους αδιάκοπα στον καθένα μας σε εικοσιτετράωρη βάση.

Οι σημερινές γενιές θεωρούν τη ροή της ενέργειας, με το απλό γύρισμα ενός διακόπτη, ως κάτι το αυτονόητο και εντελώς φυσιολογικό. Οι περισσότεροι δε συνειδητοποιούν ότι, για να ζεσταθεί, για παράδειγμα, το νερό στο μπάνιο, πρέπει να εξορυχτούν 10kg λιγνίτη στην Πτολεμαΐδα ή να μεταφερθεί 1m³ φυσικού αερίου από τη μακρινή Σιβηρία. Πολύ περισσότερο, ελάχιστοι είναι αυτοί που αντιλαμβάνονται ότι πίσω από το γύρισμα του διακόπτη βρίσκεται ο αγώνας των ισχυρών και ανεπτυγμένων χωρών της γης για τον έλεγχο των ενεργειακών πόρων και ο λυσσαλέος ανταγωνισμός των μεγάλων πολυεθνικών εταιρειών, που, από τη μία μεριά, ωθεί την τεχνολογική πρόοδο και, από την άλλη, είναι η κύρια αιτία των σοβαρών διεθνών κρίσεων και των καταστροφικών συγκρούσεων που εκδηλώνονται στον πλανήτη. Η διατήρηση του σημερινού συστήματος αξιών και η επέκτασή του και στα υπόλοιπα αναπτυσσόμενα κράτη της γης, οδηγεί σε μια αδιάκοπη αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας, σε ένταση των ανταγωνισμών, στην ταχεία εξάντληση των ορυκτών καυσίμων και, σύμφωνα με την κυρίαρχη επιστημονική αντίληψη, στην περαιτέρω ένταση των ακραίων καιρικών φαινομένων.

Η ενέργεια επηρεάζει και διαμορφώνει τις παγκόσμιες τάσεις και καθορίζει τον τρόπο ζωής, την κουλτούρα και τα χαρακτηριστικά των ανθρώπων όσο κανένα άλλο αγαθό στον κόσμο. Για να γίνει αυτό αντιληπτό, φανταστείτε πόσο διαφορετική θα ήταν η ζωή μας, αν δεν είχε ανακαλυφθεί, για παράδειγμα, η ηλεκτρική ενέργεια. Μία σειρά από ηλεκτρικές συσκευές μιας τυπικής σύγχρονης οικιακής θα εξέλειπαν. Μεταξύ αυτών τα μέσα μαζικής επικοινωνίας, προεξέχοντος της τηλεόρασης, με άμεσες επιπτώσεις στην άρση της διεθνοποίησης ενός ενιαίου και ομογενούς τρόπου ζωής, απαλλαγμένου από τοπικά ήθη και έθιμα, στον περιορισμό της ενημέρωσης κλπ. Οι επικοινωνίες, επίσης, θα πλήττονταν δραματικά. Μπορούμε να φανταστούμε άραγε τη ζωή μας σήμερα χωρίς τη διάχυση της πληροφορίας, που εξασφαλίζεται από το διαδίκτυο; Μπορούμε να φανταστούμε ότι, ελλείψει διαδικτύου, η αποστολή και του απλούστατου μηνύματος θα απαιτούσε ίσως χρονικό διάστημα μερικών ημερών; Η αδυναμία εκτέλεσης των ανωτέρω ενδεικτικών διεργασιών μας επιτρέπει να αντιληφθούμε πόσο διαφορετικά θα ήταν η ζωή μας, ο τρόπος σκέψης μας, οι συνήθειές μας και, τελικά, ο πολιτισμός μας, αν η ενέργεια δεν ήταν διαθέσιμη στις διάφορες μορφές που την έχουμε σήμερα.

Άρα λοιπόν η ενέργεια ως αγαθό επηρεάζει και διαμορφώνει από τον τρόπο σκέψης των απλών πολιτών έως τις εξωτερικές πολιτικές των κρατών και των εθνοτήτων. Ταυτόχρονα όμως η τελική προς διάθεση μορφή ενέργειας, ως προϊόν που «παράγεται» από κάποια τεχνολογία μετατροπής και διατίθεται μέσω μιας εμπορικής συναλλαγής στον τελικό χρήστη – καταναλωτή, δύναται να αποτελέσει ένα μέσο οικονομικής και, κατ' επέκταση, κοινωνικής ανάπτυξης κρατών και τοπικών κοινωνιών. Τούτο απορρέει από την εν δυνάμει διάθεση των κερδών, ή μέρους αυτών, που προκύπτουν από την εμπορική διάθεση του ενεργειακού προϊόντος για την εθνική ή τοπική ανάπτυξη. Ως παράδειγμα αναφέρεται η εντυπωσιακή ανάπτυξη που έχει σημειωθεί τις τελευταίες δεκαετίες στις χώρες της αραβικής χερσονήσου, η οποία βασίστηκε εξολοκλήρου στις εξαγωγές των εγχώριων αποθεμάτων πετρελαίου.

Από την άλλη μεριά, κάθε παραγωγική δραστηριότητα συνεπάγεται, άλλοτε περισσότερο κι άλλοτε λιγότερο, κάποια περιβαλλοντική επιβάρυνση. Οι τεχνολογίες μετατροπής ενέργειας δεν εξαιρούνται από αυτό τον κανόνα. Αντίθετα κάποιες από αυτές ευθύνονται για μερικές από τις πλέον σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις από οποιαδήποτε παραγωγική δραστηριότητα έχει αναπτυχθεί από τον άνθρωπο.

Στο παρόν Κεφάλαιο επιχειρείται η κριτική παρουσίαση των τεχνολογιών μετατροπής και διάθεσης τελικών μορφών προς χρήση ενέργειας, οι οποίες τεχνολογίες παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα Κεφάλαια, με βάση τα ακόλουθα κριτήρια:

- τη συμβολή τους στην ανάπτυξη των κρατών και ιδιαίτερα των τοπικών κοινωνιών στη γεωγραφική έκταση των οποίων τούτες αναπτύσσονται,
- το περιβαλλοντικό αποτύπωμά τους από την εγκατάσταση και τη λειτουργία τους.

Μέσα από την κριτική παρουσίαση αναδεικνύεται ο ρόλος της ενέργειας ως εν δυνάμει αγαθού ανάπτυξης, καθορισμού διεθνών οικονομικών παραμέτρων και πρόκλησης, εν δυνάμει, σημαντικής περιβαλλοντικής επιβάρυνσης. Απώτερος στόχος του παρόντος Κεφαλαίου είναι η παροχή της απαιτούμενης συνολικής γνώσης, που θα επιτρέψει τη διαμόρφωση ολοκληρωμένης και έγκυρης κριτικής σκέψης από τον επαγγελματία Μηχανικό, αλλά και τον οποιονδήποτε ενδιαφερόμενο πολίτη σχετικά με την ανάπτυξη τεχνολογιών μετατροπής ενέργειας και τον αναπτυξιακό και περιβαλλοντικό ρόλο που τούτες μπορεί να έχουν.

6.2. Πετρέλαιο και ανάπτυξη

6.2.1. Η πετρελαϊκή κρίση του 1973

Στις 16 Οκτωβρίου 1973 ο Οργανισμός Πετρελαιοπαραγωγών Εξαγωγών Κρατών (Ο.Π.Ε.Κ. – Organization of the Petroleum Exporting Countries O.P.E.C.) ανακοίνωσε την απόφαση να αυξήσει τις ονομαστικές τιμές του πετρελαίου κατά 70%, σε 5,11 δολάρια το βαρέλι [1]. Την επόμενη ημέρα, οι υπουργοί πετρελαίου συμφώνησαν στο εμπάργκο, σε μείωση της παραγωγής κατά 5% κάτω από το αποτέλεσμα του Σεπτεμβρίου και την περαιτέρω μείωση της παραγωγής σε βήματα του 5%, μέχρι να ικανοποιηθούν οι οικονομικοί και πολιτικοί στόχοι τους [1]. Οι αραβικές χώρες προχώρησαν στις ανωτέρω μονομερείς ενέργειες ως μέσο πίεσης προς τις Η.Π.Α. για την ανάληψη πρωτοβουλιών σχετικά με την εκτόνωση της κρίσης στις σχέσεις των αραβικών κρατών με το Ισραήλ, η οποία έχει κορυφωθεί με τον πόλεμο των έξι ημερών του 1967. Για την αντιμετώπιση αυτών των εξελίξεων, ο πρόεδρος των Η.Π.Α. Ρίτσαρντ Νίξον ξεκίνησε παράλληλες διαπραγματεύσεις με τις αραβικές πετρελαιοπαραγωγές χώρες για τον τερματισμό του εμπάργκο και με την Αίγυπτο, τη Συρία, το Ισραήλ, για να οργανώσουν μια ισραηλινή οπισθοχώρηση από το Σινά και τα Υψίπεδα του Γκολάν. Μέχρι την 18^η Ιανουαρίου 1974, ο Αμερικανός Υπουργός Εξωτερικών Χένρυ Κίσινγκερ είχε διαπραγματευθεί την αποχώρηση των ισραηλινών στρατευμάτων από μέρη του Σινά. Η υπόσχεση για διευθέτηση μέσω διαπραγματεύσεων μεταξύ του Ισραήλ και της Συρίας ήταν αρκετή, για να πείσει τις αραβικές πετρελαιοπαραγωγές χώρες να άρουν το εμπάργκο το Μάρτιο του 1974.

Οι επιπτώσεις του εμπάργκο ήταν άμεσες. Η τιμή του πετρελαίου τετραπλασιάστηκε μέχρι το 1974 σε περίπου \$12 το βαρέλι (75\$/m³), σε σχέση με την προ του 1973 τιμή του μαύρου χρυσού [1].

Αυτή η αύξηση στην τιμή του πετρελαίου είχε δραματική επίδραση στις χώρες που εξήγαγαν πετρέλαιο, καθώς οι χώρες της Μέσης Ανατολής, οι οποίες κυριαρχούνταν για καιρό από τις πολυεθνικές επιχειρήσεις εκμετάλλευσης των αποθεμάτων πετρελαίου, φάνηκε ότι απέκτησαν τον έλεγχο ενός αγαθού ζωτικής σημασίας. Η παραδοσιακή ροή των κεφαλαίων αντιστράφηκε, καθώς οι εξαγωγείς πετρελαίου συσσώρευαν τεράστιο πλούτο. Μερικά από τα έσοδα διανεμήθηκαν με τη μορφή της ενίσχυσης σε άλλες υπανάπτυκτες χώρες, των οποίων οι οικονομίες είχαν εγκλωβιστεί μεταξύ των νέων υψηλότερων τιμών του πετρελαίου και των χαμηλότερων τιμών των δικών τους εξαγόμενων προϊόντων και πρώτων υλών, εν μέσω συρρίκνωσης της ζήτησης για τα προϊόντα τους από τη Δύση. Μεγάλο ποσοστό των κερδών απορροφήθηκε, επίσης, σε μαζικές αγορές όπλων, που επιδείνωσαν τις πολιτικές εντάσεις, ιδιαίτερα στη Μέση Ανατολή.

Η επίδραση του αραβικού εμπάργκο είχε αρνητική επίδραση στην οικονομία των Η.Π.Α., καθώς προκάλεσε την άμεση ανάγκη αντιμετώπισης των απειλών κατά της αμερικανικής ενεργειακής ασφάλειας [2]. Σε διεθνές επίπεδο, οι αυξήσεις των τιμών του πετρελαίου διατάραξαν τα συστήματα της αγοράς, αλλάζοντας τον ανταγωνισμό. Σε μακροοικονομικό επίπεδο, τα οικονομικά προβλήματα αποτελούνταν τόσο από πληθωριστικές, όσο και από αποπληθωριστικές επιπτώσεις στις εγχώριες οικονομίες [2]. Το αραβικό εμπάργκο οδήγησε πολλές αμερικανικές εταιρείες να αναζητήσουν την εξόρυξη νέου, ακριβού πετρελαίου σε εχθρικά, ακόμη και αρκτικά περιβάλλοντα. Το πρόβλημα, που αντιμετώπιζαν πολλές από αυτές τις εταιρείες, ήταν ότι η εύρεση πετρελαίου και η εκμετάλλευση νέων κοιτασμάτων συνήθως απαιτούν μια χρονική υστέρηση από 5 έως 10 έτη μεταξύ της διαδικασίας σχεδιασμού και της ποσοτικώς ουσιαστικής παραγωγής [3].

Τα κράτη-μέλη του Ο.Π.Ε.Κ. στον αναπτυσσόμενο κόσμο διεξήγαγαν εθνικοποιήσεις εταιρειών στις χώρες τους, για τις οποίες γίνεται εκτενής λόγος στην επόμενη ενότητα. Το πιο αξιοσημείωτο παράδειγμα ήταν η ανάκτηση από τους Σαουδάραβες του λειτουργικού ελέγχου της Aramco, την οποία εθνικοποίησαν πλήρως το 1980, υπό την ηγεσία του Ahmed Zaki Yamani. Καθώς το παράδειγμα αυτό το ακολούθησαν και άλλες χώρες του Ο.Π.Ε.Κ., τα έσοδα των χωρών μελών του Ο.Π.Ε.Κ. εκτινάχθηκαν στα ύψη. Η Σαουδική Αραβία, πλημμυρισμένη με τα κέρδη από τις πωλήσεις, ανέλαβε μια σειρά φιλόδοξων πενταετών σχεδίων ανάπτυξης. Άλλα μέλη του Ο.Π.Ε.Κ. διεξήγαγαν μείζονα προγράμματα οικονομικής ανάπτυξης.

Εν τω μεταξύ, το σοκ προκάλεσε χάος στη Δύση. Στις Ηνωμένες Πολιτείες η λιανική τιμή ενός γαλονιού βενζίνης αυξήθηκε από τον εθνικό μέσο όρο των 38,5 σεντς το Μάιο του 1973 σε 55,1 σεντς τον Ιούνιο του 1974. Κυβερνητικές πολιτείες ζήτησαν από τους πολίτες να μην κρεμάσουν χριστουγεννιάτικα λαμπιόνια ενώ η πολιτεία του Όρεγκον απαγόρευσε ολοκληρωτικά τον ειδικό φωτισμό για τα Χριστούγεννα,

αλλά και για εμπορικούς σκοπούς [4]. Πολιτικοί έκαναν έκκληση για ένα εθνικό πρόγραμμα χορήγησης βενζίνης με δελτίο. Ο Νίξον ζήτησε από τα πρατήρια βενζίνης, σε εθελοντική βάση, να μην πωλούν βενζίνη τις νύχτες του Σαββάτου και τις Κυριακές – το 90% των πρατηριούχων συμμορφώθηκε, κάτι που είχε ως αποτέλεσμα να δημιουργούνται ουρές τις καθημερινές.

Οι αυξήσεις των τιμών είχαν πολύ μεγαλύτερο αντίκτυπο στην Ευρώπη από ό,τι το εμπάργκο, ιδιαίτερα στο Ηνωμένο Βασίλειο, όπου, σε συνδυασμό με τις απεργίες των ανθρακωρύχων και των εργαζομένων σιδηροδρόμου, προκάλεσαν ενεργειακή κρίση κατά το χειμώνα του 1973-1974, ένας σημαντικός παράγοντας που ώθησε στην αλλαγή της κυβέρνησης [5]. Το Ηνωμένο Βασίλειο, η Γερμανία, η Ιταλία, η Ελβετία και η Νορβηγία απαγόρευαν πτήσεις, οδήγηση και ιδιωτική ακτοπλοΐα τις Κυριακές. Η Σουηδία επέβαλε δελτίο στη χορήγηση της βενζίνης και του πετρελαίου θέρμανσης. Η Ολλανδία θέσπισε ποινές φυλάκισης για όσους χρησιμοποιούσαν περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια από αυτή που τους αναλογούσε. Ο Sir Edward Heath, πρωθυπουργός της Βρετανίας από το 1970 έως το 1974, ζήτησε από τους Βρετανούς να θερμαίνουν μόνο ένα δωμάτιο στα σπίτια τους κατά τη διάρκεια του χειμώνα.

Λίγους μήνες αργότερα, η κρίση υποχώρησε. Το εμπάργκο ήρθη το Μάρτιο του 1974, μετά από διαπραγματεύσεις στη Πετρελαϊκή Σύνοδο Κορυφής της Ουάσιγκτον, αλλά οι επιπτώσεις της ενεργειακής κρίσης παρέμειναν καθ' όλη τη δεκαετία του 1970. Η τιμή της ενέργειας συνέχισε την αυξητική πορεία της το επόμενο έτος, εν μέσω της αποδυνάμωσης της ανταγωνιστικής θέσης του δολαρίου στις παγκόσμιες αγορές.

6.2.2. Η κρατικοποίηση – εθνικοποίηση των αποθεμάτων πετρελαίου

6.2.2.α. Πολιτικό υπόβαθρο

Με τον όρο «κρατικοποίηση – εθνικοποίηση» των αποθεμάτων πετρελαίου περιγράφεται η διαδικασία της δήμευσης των επιχειρήσεων εξόρυξης πετρελαίου από τις εκάστοτε τοπικές κυβερνήσεις, με στόχο τη μεγιστοποίηση των κρατικών εσόδων από την αξιοποίηση και την εξαγωγή πετρελαίου. Η διαδικασία αυτή σηματοδοτεί ένα ορόσημο στη διαμόρφωση πολιτικής πετρελαίου. Η εθνικοποίηση – κρατικοποίηση πρακτικά εκμηδενίζει την οποιαδήποτε ιδιωτική επιχειρηματική πρωτοβουλία και επιτρέπει στα εθνικά κράτη να ανακτήσουν πλήρη έλεγχο στην αξιοποίηση αποθεμάτων πετρελαίων και εγκαταστάσεων εξόρυξης, παραβιάζοντας συχνά υφιστάμενες συμφωνίες. Σήμερα εκτιμάται ότι περίπου το 7% των παγκόσμιων αποθεμάτων πετρελαίου και αερίου ανήκουν σε χώρες που επιτρέπουν την εκμετάλλευση ενεργειακών αποθεμάτων από τον ιδιωτικό τομέα.

Η εθνικοποίηση των αρχικά ιδιωτικών συμφερόντων επιχειρήσεων εκμετάλλευσης των ενεργειακών πηγών επιτελέστηκε σταδιακά. Πριν την ανακάλυψη του πετρελαίου και την αναγωγή του στη σημαντικότερη ενεργειακή πηγή, οι χώρες της Μέσης Ανατολής, όπως το Ιράκ, το Ιράν, η Σαουδική Αραβία και το Κουβέιτ ήταν χώρες φτωχές και υποανάπτυκτες. Στην πράξη ήταν Βασιλεια της ερήμου με λιγοστές φυσικές πηγές, χωρίς επαρκείς οικονομικούς πόρους για τη συντήρηση του κράτους. Η πλειοψηφία του πληθυσμού αποτελούνταν κυρίως από φτωχούς χωρικούς [6]. Όταν ανακαλύφθηκε το πετρέλαιο στις χώρες της Μέσης Ανατολής, στις αρχές του εικοστού αιώνα, οι χώρες αυτές δε διέθεταν την απαιτούμενη υποδομή και τεχνογνωσία για την εξόρυξη και αξιοποίησή του [6]. Οι μεγάλες πετρελαϊκές εταιρείες είδαν την αδυναμία αυτή ως μία μοναδική ευκαιρία οικονομικού κέρδους, και προχώρησαν σε διαπραγματεύσεις με τα συγκεκριμένα κράτη για την αξιοποίηση των αποθεμάτων. Κατάφεραν τελικά τη σύναψη συμφωνιών αποκλειστικής παραχώρησης διερεύνησης και αξιοποίησης των αποθεμάτων πετρελαίου. Οι συμφωνίες παραχώρησης ανάμεσα στο κράτος και στην ιδιωτική επιχείρηση αναφέρονταν σε μία περιορισμένη γεωγραφική έκταση και για ένα πεπερασμένο χρονικό διάστημα, εντός των οποίων μπορούσε να δραστηριοποιηθεί η επιχείρηση. Ανάμεσα στις υποχρεώσεις της επιχείρησης ήταν η επιβάρυνση με όλα τα οικονομικά έξοδα, η ανάληψη του επιχειρηματικού ρίσκου και η πληρωμή προς το κράτος των προβλεπόμενων φόρων. Ταυτόχρονα, το κράτος διατηρούσε το δικαίωμα να διεκδικήσει μέρος από το παραγόμενο πετρέλαιο [6]. Αποτέλεσμα των ανωτέρω ήταν το μεγαλύτερο ποσοστό από τα παγκόσμια αποθέματα πετρελαίου να περιέλθει στην κυριότητα επτά επιχειρήσεων με έδρα στις Η.Π.Α. και στην Ευρώπη [7]. Πέντε από τις επιχειρήσεις αυτές ήταν Αμερικάνικες (Chevron, Exxon, Gulf, Mobil και Texaco), μία Βρετανική (British Petroleum) και μία Αγγλο – Ολλανδική (Shell). Οι επιχειρήσεις αυτές έχουν σήμερα συγχωνευτεί στις εξής τέσσερις: Shell, Exxon Mobil, Chevron και BP [7].

Οι συμφωνίες ανάμεσα στα κράτη με αποθέματα πετρελαίου και στις ιδιωτικές επιχειρήσεις έφερε τις τελευταίες σε πλεονεκτική θέση, επιτρέποντάς τους παρεμβάσεις ακόμα και στις εθνικές νομοθεσίες. Μεταξύ άλλων οι επιχειρήσεις διεκδίκησαν και κατάφεραν να πετύχουν, ώστε η όποια διαφωνία ανάμεσα σε αυτές και στα κράτη αναφορικά με τους όρους και τις λεπτομέρειες των μεταξύ τους συμφωνιών, να διευθετείται από τρίτο πρόσωπο, και όχι από τη δικαιοσύνη του κράτους. Ο μόνος τρόπος πλέον για τα κράτη να ελέγξουν, ή έστω να τροποποιήσουν, όρους επί των συμφωνιών ήταν μέσω της εθνικοποίησης των αποθεμάτων πετρελαίου. Έτσι, παρόλο που αρχικά τα περισσότερα υποανάπτυκτα κράτη καλωσόρισαν τις συμφωνίες παραχώρησης αξιοποίησης των αποθεμάτων στις ιδιωτικές επιχειρήσεις, σταδιακά ξεκίνησε, αρχής γενομένης από ομάδες εθνικιστών, να επικρατεί η άποψη ότι οι ιδιωτικές αυτές επιχειρήσεις νέμονται τον εθνικό πλούτο. Με οδηγό τη Βενεζουέλα, οι πετρελαιοπαραγωγές χώρες συνειδητοποίησαν ότι μπορούν να ελέγξουν την τιμή του πετρελαίου διεθνώς μέσω της διακύμανσης της διαθεσιμότητάς του. Οι πετρελαιοπαραγωγές χώρες ενώθηκαν μεταξύ τους μέσω του Ο.Π.Ε.Κ. και σταδιακά επανέκτησαν τον έλεγχο επί των αποθεμάτων πετρελαίου.

6.2.2.β. Ιστορικό υπόβαθρο

Εξαιτίας ακριβώς της παρουσίας του πετρελαίου, η Μέση Ανατολή αποτέλεσε το κέντρο διεθνών εντάσεων, ακόμα και πριν την εθνικοποίηση των αποθεμάτων πετρελαίου. Η Μεγάλη Βρετανία ήταν η πρώτη χώρα που επέδειξε ενδιαφέρον για το πετρέλαιο της Μέσης Ανατολής το 1908, όταν ανακαλύφθηκε πετρέλαιο στην Περσία από την Αγγλο-Περσική εταιρεία πετρελαίου, υπό την ώθηση της βρετανικής κυβέρνησης. Η Βρετανία διατηρούσε τότε στρατηγική και στρατιωτική κυριαρχία σε περιοχές της Μέσης Ανατολής, έως το τέλος του πρώτου παγκοσμίου πολέμου, όταν η πρώην Τουρκική Αυτοκρατορία διαιρέθηκε ανάμεσα στη Βρετανική και στη Γαλλική αυτοκρατορία. Συμπτωματικά, οι περιοχές ελέγχου της Γαλλικής αυτοκρατορίας δεν ήταν ιδιαίτερα πλούσιες σε αποθέματα πετρελαίου. Από την άλλη μεριά, η Βρετανία συνέχιζε να διατηρεί το ενδιαφέρον της σε περιοχές του ευρύτερου Περσικού Κόλπου. Παρόλο που είχαν ανακαλυφθεί σημαντικά κοιτάσματα πετρελαίου στο Κουβέιτ, η χαμηλή ακόμα ζήτηση πετρελαίου δε δικαιολόγησε τότε την ανάπτυξη σχετικών δραστηριοτήτων στη συγκεκριμένη περιοχή.

Μέσω πολιτικών και εμπορικών πιέσεων, οι Η.Π.Α. δεν άργησαν να εισέλθουν στις δραστηριότητες αξιοποίησης των αποθεμάτων πετρελαίου της Μέσης Ανατολής. Η Βρετανική κυβέρνηση αναγκάστηκε να επιτρέψει την είσοδο των Η.Π.Α. στο Ιράκ και στα κράτη του Περσικού Κόλπου. Το Ιράκ κατέληξε να κυριαρχείται από τις Αμερικάνικες πετρελαϊκές εταιρείες, ενώ στο Κουβέιτ οι Η.Π.Α. και η Μεγάλη Βρετανία απέκτησαν ίσα μερίδια στα διαθέσιμα αποθέματα πετρελαίου [9].

Έως το 1939 η σημασία του πετρελαίου στη διεθνή οικονομία ήταν ακόμα περιορισμένη, με τη Μέση Ανατολή να συνεισφέρει τότε ως το 5% της παγκόσμιας ζήτησης πετρελαίου. Οι εξαγωγές πετρελαίου από τη Μέση Ανατολή περιορίζονταν σε γειτονικές χώρες και, μέσω της διώρυγας του Σουέζ, στις χώρες της Δυτικής Ευρώπης [9]. Η πραγματική σημασία των όποιων εξελίξεων πριν από το 1939 ήταν ότι προετοίμασαν το έδαφος για την εξάπλωση της χρήσης του πετρελαίου μετά το 1945.

Μετά τον πρώτο παγκόσμιο πόλεμο, η ζήτηση πετρελαίου αυξήθηκε σημαντικά, ως αποτέλεσμα της αδυναμίας κάλυψης των αυξανόμενων ενεργειακών αναγκών εναλλακτικά. Παρόλα αυτά, εξαιτίας του γενικότερου πολεμικού κλίματος της εποχής, η ανακάλυψη αποθεμάτων πετρελαίου στη Μέση Ανατολή συνοδεύτηκε από διστακτικότητα για την επένδυση κεφαλαίων σε έρευνα και εξόρυξη πετρελαίου στη συγκεκριμένη περιοχή.

Αντιθέτως επενδύθηκαν τεράστια κεφάλαια για τη βελτίωση των υποδομών μεταφοράς πετρελαίου από τη Μέση Ανατολή προς την Ευρώπη. Για παράδειγμα, επενδύσεις έγιναν στη διαμόρφωση της διώρυγας του Σουέζ, ώστε να επιτραπεί η διέλευση μεγαλύτερων πετρελαιοφόρων πλοίων. Σημειώθηκε, επίσης, σημαντική αύξηση στις κατασκευές αγωγών πετρελαίου. Η επέκταση των υποδομών παραγωγής και μεταφοράς πετρελαίου από τη Μέση Ανατολή εκτελέστηκε κυρίως από τις επτά διεθνείς εταιρείες εκμετάλλευσης των αποθεμάτων πετρελαίου της περιοχής.

Έως το 1970 έντεκα χώρες είχαν προχωρήσει σε εθνικοποιήσεις των αποθεμάτων πετρελαίου: η Σοβιετική Ένωση το 1917 μέσω της Οκτωβριανής Επανάστασης, η Βολιβία το 1937 και το 1969, το Μεξικό το 1938, το Ιράν το 1951, η Βραζιλία το 1953, το Ιράκ το 1961, η Βιρμανία και η Αίγυπτος το 1962, η

Αργεντινή και η Ινδονησία το 1963 και το Περού το 1968 [7]. Παρόλο που οι ανωτέρω χώρες είχαν εθνικοποιήσει τα διαθέσιμα αποθέματα πετρελαίου, οι μεγάλες και σημαντικές βιομηχανίες άντλησης και επεξεργασίας πετρελαίου συνέχιζαν να ελέγχονται από αλλοδαπές επιχειρήσεις. Επίσης έως το 1971 μόνο το Μεξικό και το Ιράν αποτελούσαν σημαντικές εξαγωγικές χώρες πετρελαίου.

6.2.3.γ. Οι αιτίες των εθνικοποιήσεων

- Η διαμόρφωση της κοινής γνώμης

Οι υπέρμαχοι των εθνικοποιήσεων υποστήριξαν ότι οι αρχικές συμφωνίες ανάμεσα σε κράτη και ιδιωτικές επιχειρήσεις ήταν άδικες για τα κράτη. Μεταξύ άλλων, οι συμφωνίες αυτές δεν μπορούσαν να τροποποιηθούν, κάλυπταν τεράστιες εκτάσεις γης και είχαν πολύ μεγάλες χρονικές διάρκειες. Οι απόψεις αυτές σταδιακά καλλιέργησαν στο κοινό τη γνώμη ότι το κράτος γίνεται αντικείμενο εκμετάλλευσης από τις ιδιωτικές επιχειρήσεις και ανέπτυξαν ένα γενικό μέτωπο υπέρ των εθνικοποιήσεων.

- Η διαμόρφωση της τιμής του πετρελαίου

Η επίσημη τιμή του πετρελαίου (oil posted price) ήταν αρχικά η βασική παράμετρος καθορισμού των φόρων προς τις επιχειρήσεις για την εκμετάλλευση των αποθεμάτων πετρελαίου. Η ρύθμιση αυτή ήταν ευνοϊκή για τις ιδιωτικές επιχειρήσεις, καθώς ήταν οι ίδιες αυτές που διαμόρφωναν την επίσημη τιμή του πετρελαίου. Στην πραγματικότητα, οι επιχειρήσεις μπορούσαν να αυξάνουν την πραγματική τιμή του πετρελαίου στην αγορά, χωρίς να μεταβάλλουν την επίσημη, αποφεύγοντας έτσι την αύξηση της καταβολής φόρων προς τις πετρελαιοπαραγωγές χώρες. Οι πετρελαιοπαραγωγές χώρες δε συνειδητοποίησαν ότι οι ιδιωτικές επιχειρήσεις προσάρμοζαν τις τιμές του πετρελαίου, μέχρι τη μείωση στο κόστος παραγωγής του πετρελαίου που σημειώθηκε στο τέλος της δεκαετίας του '50, κάτι που οδήγησε τις επιχειρήσεις σε συχνές μειώσεις της επίσημης τιμής του πετρελαίου. Ο κύριος λόγος μείωσης της τιμής του πετρελαίου ήταν οι αλλαγές στην παγκόσμια ενεργειακή αγορά, που προκλήθηκε από συνθήκες ανταγωνισμού ανάμεσα στις διαφορετικές πρωτογενείς πηγές ενέργειας.

Από την άλλη μεριά, ήταν αναμενόμενο οι πετρελαιοπαραγωγές χώρες να δυσανασχετήσουν, όσο οι ιδιωτικές επιχειρήσεις μείωναν τις τιμές του πετρελαίου χωρίς προηγούμενη συνεννόηση. Οι μεγαλύτερες αντιδράσεις από τις πετρελαιοπαραγωγές χώρες εκδηλώθηκαν το 1960, όταν οι μειώσεις που ανακοινώθηκαν στην τιμή του πετρελαίου, της τάξης του 10 – 15%, οδήγησε σε μείωση των εισοδημάτων των κρατών σε ποσοστά 5 – 7,5%.

- Αλλαγές στη δομή των πετρελαιοπαραγωγών χωρών

Οι χώρες του τρίτου κόσμου βίωσαν δραματικές αλλαγές στο χρονικό διάστημα από τη στιγμή που ανακαλύφθηκε το πετρέλαιο (αρχές του εικοστού αιώνα) έως τα μέσα του εικοστού αιώνα. Ο ολοένα αυξανόμενος εθνικισμός και η ανάδειξη μια κοινής συνείδησης στις χώρες του τρίτου κόσμου οδήγησαν στο τέλος της αποικιοκρατίας τις δεκαετίες του '50 και του '60. Η κοινή συνείδηση μεταξύ των πετρελαιοπαραγωγών κρατών οδήγησε στην ίδρυση του Ο.Π.Ε.Κ., στην εδραίωση τακτικής και γόνιμης επικοινωνίας και συνεννόησης και στις προσπάθειες για κοινή δράση στα τέλη της δεκαετίας του '60.

- Στρατηγικός έλεγχος

Αρχικά, οι πετρελαιοπαραγωγές χώρες ήταν φτωχές και χωρίς την απαιτούμενη υποδομή και γνώση, για να αξιοποιήσουν τα διαθέσιμα αποθέματα πετρελαίου. Όσο οι χώρες αυτές αναπτύσσονταν, οι απαιτήσεις τους σε έσοδα από την αξιοποίηση του πετρελαίου αυξάνονταν. Προς αυτή την κατεύθυνση, οι πετρελαιοπαραγωγές χώρες απαίτησαν σταδιακά στρατηγικό έλεγχο στην τιμολόγηση και στο ρυθμό άντλησης των αποθεμάτων πετρελαίου. Από την άλλη μεριά, η νέα αυτή τάση από τη μεριά των κρατών έπληξε την εμπιστοσύνη των ξένων επενδυτών για την τοποθέτηση κεφαλαίων στη βιομηχανία άντλησης πετρελαίου.

- Αυξημένες δυνατότητες διαπραγμάτευσης

Επιπλέον οι τεχνολογικές καινοτομίες και οι τεχνικές ηγεσίας και διαχείρισης επιχειρήσεων που αναπτύχθηκαν εντυπωσιακά μετά το δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο, αύξησαν σημαντικά τη διαπραγματευτική ισχύ των πετρελαιοπαραγωγών χωρών, η οποία, σειριακά, ανάγκασε τις επιχειρήσεις να αλλάξουν τον τρόπο λειτουργία τους.

- Επέκταση της βιομηχανίας πετρελαίου

Ενώ έως το 1953 στο χώρο της άντλησης και επεξεργασίας πετρελαίου δραστηριοποιούνταν οι ανωτέρω αναφερόμενες επτά ιδιωτικές επιχειρήσεις, μεταξύ του 1953 και του 1972, με την έκρηξη στην κατανάλωση του πετρελαίου, περισσότερες από τριακόσιες νέες εταιρείες εισήλθαν. Οι νέες αυτές ανεξάρτητες επιχειρήσεις διατάραζαν την ισορροπία ανάμεσα στις επτά αρχικές επιχειρήσεις και στα πετρελαιοπαραγωγά κράτη, τα οποία πλέον συνειδητοποίησαν ότι μπορούσαν να επιτύχουν καλύτερους όρους στις συμφωνίες αξιοποίησης των αποθεμάτων πετρελαίου με τις νεοεισερχόμενες στο χώρο επιχειρήσεις.

- Διάχυση ιδεών μεταξύ των πετρελαιοπαραγωγών χωρών

Ανάμεσα στις προσπάθειες εθνικοποίησης των αποθεμάτων πετρελαίου, εκείνες στο Μεξικό το 1938 και στο Ιράν το 1951, οι οποίες εκδηλώθηκαν πριν από τις βασικές αλλαγές στη βιομηχανία του πετρελαίου της δεκαετίας του '50, είχαν σημαντική επίδραση στις υπόλοιπες πετρελαιοπαραγωγές χώρες. Η εθνικοποίηση στο Μεξικό απέδειξε ότι, παρόλο που η εθνικοποίηση των αποθεμάτων πετρελαίου ήταν εφικτή, οδηγούσε σε διεθνή απομόνωση από τη διεθνή αγορά πετρελαίου, η οποία ακόμα τότε ελεγχόταν από τις ιδιωτικές επιχειρήσεις. Επίσης η εθνικοποίηση στο Ιράν απέτυχε λόγω της αδυναμίας συνεργασίας της Ιρανικής κυβέρνησης με τη διεθνή αγορά πετρελαίου. Αυτές οι δύο προσπάθειες κατέδειξαν στις υπόλοιπες πετρελαιοπαραγωγές χώρες ότι οι εθνικοποιήσεις των αποθεμάτων πετρελαίου συνοδεύονται από υψηλό ρίσκο και σημαντική πιθανότητα αποτυχίας, όσο η διεθνής αγορά πετρελαίου βασίζεται και ελέγχεται από τις ιδιωτικές επιχειρήσεις.

Με την αλλαγή στη δομή της παγκόσμιας αγοράς πετρελαίου τη δεκαετία του '50, η δυνατότητα επιτυχίας των προσπαθειών εθνικοποίησης των αποθεμάτων πετρελαίου αυξήθηκαν. Η ίδρυση του Ο.Π.Ε.Κ. παρείχε για τις πετρελαιοπαραγωγές χώρες το μέσο ταχείας διάχυσης πληροφοριών και άμεσης επικοινωνίας.

Η πρώτη χώρα που προέβη σε επιτυχή εθνικοποίηση των αποθεμάτων πετρελαίου ήταν η Αλγερία, η οποία εθνικοποίησε το 51% των Γαλλικών επιχειρήσεων το 1971, ενώ αργότερα κατάφερε να αυξήσει το ποσοστό αυτό στο 100%. Η εθνικοποίηση στην Αλγερία ώθησε τη Λιβύη να εθνικοποιήσει την British Petroleum το 1971, καθώς και τις υπόλοιπες ιδιωτικές επιχειρήσεις το 1974. Οι εθνικοποιήσεις εξελίχθηκαν στη συνέχεια με τη μορφή ντόμινο, ξεκινώντας αρχικά από χώρες με περισσότερο επιθετική πολιτική, όπως το Ιράκ, για να ακολουθήσουν, στη συνέχεια, οι περισσότερο συντηρητικές περιοχές, όπως η Σαουδική Αραβία. Ως το 1976 σχεδόν κάθε βασικό πετρελαιοπαραγωγό κράτος στη Μέση Ανατολή, στην Ασία, στη Αφρική και στη Λατινική Αμερική είχε υιοθετήσει κάποια μορφή εθνικοποίησης, με σκοπό είτε να αποσπάσει κάποιο ποσοστό επί των κερδών από την άντληση και την πώληση πετρελαίου, είτε να αναλάβει τον πλήρη έλεγχο των εγχώριων αποθεμάτων μαύρου χρυσού.

6.2.3.δ. Οι συνέπειες των εθνικοποιήσεων

Εξαιτίας της αστάθειας στη διαδικασία άντλησης και αξιοποίησης αποθεμάτων πετρελαίου, το πετρέλαιο, ως πρωτογενής μορφή ενέργειας, χρησιμοποιήθηκε συχνά από τα πετρελαιοπαραγωγά κράτη ως μέσο άσκησης εξωτερικής πολιτικής. επίσης, με την ανάκτηση του ελέγχου των αποθεμάτων πετρελαίου από τις πετρελαιοπαραγωγές χώρες, εξέλειψε η όποια μορφή μονοπωλίου. Συγκεκριμένα οι χώρες του Ο.Π.Ε.Κ. απέκτησαν πλήρη έλεγχο στις διαδικασίες άντλησης και προώθησης του αργού πετρελαίου, ενώ οι εταιρείες διατήρησαν τον έλεγχό τους στη μεταφορά, στην επεξεργασία, στη διανομή και στην πώληση των προϊόντων

πετρελαίου. Η εμπλοκή κρατών και εταιρειών στη συνολική γραμμή παραγωγής και διάθεσης προϊόντων πετρελαίου οδήγησε στη μεταξύ τους σύναψη μακροχρόνιων συμφωνιών.

Η εθνικοποίηση των αποθεμάτων πετρελαίου και η ίδρυση του Ο.Π.Ε.Κ. είχαν ως συνέπεια χώρες όπως η Μεγάλη Βρετανία, οι Η.Π.Α., ο Καναδάς να επενδύσουν στη διερεύνηση των εγχώριων αποθεμάτων πετρελαίου, δημιουργώντας έτσι μία εναλλακτική αγορά πετρελαίου. Σταδιακά η εναλλακτική αυτή αγορά άρχισε να επεκτείνεται σε αντικείμενο, καλύπτοντας, εκτός του αργού πετρελαίου, και προϊόντα διύλισης. Ταυτόχρονα, με την κατά καιρούς αύξηση των τιμών του πετρελαίου από τις χώρες του Ο.Π.Ε.Κ. ή την επιβολή εμπάργκο (π.χ. κρίση του 1973), η εναλλακτική αγορά πετρελαίου αυξανόταν σε μέγεθος. Άμεση συνέπεια της δημιουργίας και της σταδιακής επέκτασης σε αντικείμενο και μέγεθος της εναλλακτικής αγοράς πετρελαίου ήταν η ρευστότητα στις διεθνείς τιμές, αυξάνοντας το συνεπαγόμενο επενδυτικό ρίσκο σε έργα εκμετάλλευσης αποθεμάτων πετρελαίου. Όλα τα ανωτέρω συνέβαλαν στην αύξηση του ανταγωνισμού και στον περιορισμό των ολιγοπωλίων. Επίσης επηρέασαν τις χώρες του Ο.Π.Ε.Κ. ως εξής:

- Λόγω της γενικότερης αβεβαιότητας τα ίδια τα μέλη του Ο.Π.Ε.Κ. συχνά αθετούσαν τις μεταξύ τους συμφωνίες, αν δεν τις έκριναν ευνοϊκές.
- Από την άλλη μεριά, η γενικότερη διεθνής τάση μείωσης των τιμών του πετρελαίου συνέδραμε στην ισχυροποίηση των σχέσεων των μελών του Ο.Π.Ε.Κ., με σκοπό την από κοινού διεκδίκηση καλύτερων όρων διάθεσης στην αγορά του πετρελαίου τους, μέσα από τη χάραξη και την υιοθέτηση κοινής και καθολικής διαπραγματευτικής πολιτικής.

6.2.3.ε. Πετρέλαιο και ανάπτυξη ανά πετρελαιοπαραγωγό κράτος

Η αναφορά στη συμβολή του πετρελαίου στην ανάπτυξη των κρατών ολοκληρώνεται με την παρούσα υποενότητα, στην οποία επιχειρείται η συνοπτική παρουσίαση της διαδρομής και των αποτελεσμάτων για χαρακτηριστικές πετρελαιοπαραγωγές χώρες, προς την προσέγγιση της εθνικής ανάπτυξης, μέσω της αξιοποίησης των διαθέσιμων εγχώριων αποθεμάτων πετρελαίου.

- Ισημερινός (Εκουαδόρ)

Ο Ισημερινός (Εκουαδόρ) είχε μία από τις πλέον μεταβαλλόμενες πολιτικές πετρελαίου στη Λατινική Αμερική, διαμορφωμένη, κατά μεγάλο ποσοστό, από τη γενικότερη ρευστή πολιτική κατάσταση στην περιοχή. Η κρατική επιχείρηση Petroecuador ελέγχει περισσότερο από τη μισή παραγωγή πετρελαίου της χώρας, ωστόσο, ως συνέπεια χρηματοδοτικών υποχρεώσεων συνδυαζόμενων με πτώση της τιμής του πετρελαίου, οι ιδιωτικές επενδύσεις στη βιομηχανία πετρελαίου στο Εκουαδόρ αυξήθηκαν. Στις αρχές της δεκαετίας του '90 οι ετήσιες αλλοδαπές επενδύσεις στη βιομηχανία πετρελαίου ήταν χαμηλότερες των 200 εκατομμυρίων δολαρίων, ενώ δέκα χρόνια αργότερα, στις αρχές του 2000, οι επενδύσεις αυτές ξεπέρασαν το 1 δις δολάρια. Οι αλλαγές στο πολιτικό σκηνικό της χώρας, συγκεκριμένα η εκλογή του προέδρου Rafael Correa το 2007, οδήγησαν σε νέο επανέλεγχο των αποθεμάτων πετρελαίου.

Η χώρα παραμένει φτωχή με το δεύτερο χαμηλότερο κατά κεφαλή εισόδημα στη Λατινική Αμερική και μεγάλες οικονομικές ανισότητες. Το πλουσιότερο 20% του πληθυσμού της χώρας κατέχει το 58% του πλούτου, ενώ το φτωχότερο 40% του πληθυσμού κατέχει το 1% του πλούτου. Οι συνολικές εξαγωγές της χώρας είναι σήμερα περίπου 23,5 δις δολάρια, εκ των οποίων το μεγαλύτερο μέρος προέρχεται από εξαγωγές πετρελαίου. Τα τελευταία χρόνια η χώρα έχει διανύσει δύο ισχυρότατες οικονομικές κρίσεις. Η μία ήταν την περίοδο 1998 – 2000, η οποία οφείλεται σε διάφορες αστάθμητες παραμέτρους, όπως τον πόλεμο με το Περού το 1995, ο τυφώνας El Nino το 1997, η ρωσική – ασιατική κρίση το 1997-98 και οι χαμηλές τιμές του πετρελαίου. Αποτελέσματα της πρώτης αυτής κρίσης ήταν η αύξηση του πληθωρισμού στο 60% το 1999 και σχεδόν στο 100% το 2000, η υποτίμηση του εθνικού νομίσματος κατά 30% το 1998 και κατά 67% το επόμενο έτος, το πάγωμα των τραπεζικών λογαριασμών, η κατάρρευση του ΑΕΠ κατά 30% μέσα σε ένα έτος, ο τριπλασιασμός των υπερβολικά φτωχών και η μετανάστευση περίπου 200.000 πολιτών στις Η.Π.Α., στην Ιταλία και στην Ισπανία. Η εισαγωγή του δολαρίου ως εθνικού νομίσματος, η διαγραφή σημαντικού ποσοστού του δημόσιου χρέους το 2000, η υιοθέτηση σκληρών μέτρων λιτότητας και η αθρόα μετανάστευση

είχαν τελικά ως αποτέλεσμα η χώρα να επανέλθει σε υψηλούς ρυθμούς ανάπτυξης από το 2002 έως το 2007, της τάξης του 5 – 7%, η οποία στηρίχθηκε κυρίως στις αυξημένες τιμές του πετρελαίου.

Με την εκλογή του προέδρου Rafael Correa, η χώρα δήλωσε στάση πληρωμών προς τους διεθνείς δανειστές της και το ΔΝΤ, θεωρώντας το χρέος επαχθές, ουσιαστικά προχωρώντας σε άτακτη χρεοκοπία. Τελικά η χώρα απομονωμένη από τις διεθνείς αγορές, αναζήτησε και πέτυχε τη λήψη δανείων από την Κίνα, επιστρέφοντας σε ρυθμούς ανάπτυξης από το 0,5% περίπου το 2010 σε 5% το 2011.

- Ιράν

Από την ανακάλυψη των αποθεμάτων πετρελαίου στο Ιράν, η βιομηχανία πετρελαίου στη χώρα γνώρισε περιόδους ανάπτυξης και ύφεσης. Η ταχεία ανάπτυξη κατά την περίοδο του πρώτου παγκοσμίου πολέμου παρήκμασε αμέσως με την έναρξη του δεύτερου παγκοσμίου πολέμου, για να δώσει τη θέση της και πάλι στην ανάκαμψη το 1943, με την εκ νέου αποκατάσταση της προμήθειας πετρελαίου από το Ιράν προς τη Μεγάλη Βρετανία. Ο έλεγχος και η αξιοποίηση των αποθεμάτων πετρελαίου εκτελούνταν έως και την περίοδο αμέσως μετά το δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο από την Αγγλο-Ιρανική Εταιρεία Πετρελαίου (Anglo-Iranian Oil Company – AIOC).

Το Ιράν αναζήτησε την απεξάρτησή του από την βρετανική πολιτική και την εκμετάλλευσή του από την AIOC. Οι διαπραγματεύσεις ανάμεσα στην ιρανική κυβέρνηση και στην AIOC το 1951 απέτυχαν, με αποτέλεσμα την εθνικοποίηση των αποθεμάτων πετρελαίου. Ακολούθησε βρετανικό μποϊκοτάζ στις εξαγωγές πετρελαίου από το Ιράν και ο στρατιωτικός αποκλεισμός από τους Βρετανούς της πλούσιας σε αποθέματα και υποδομές άντλησης πετρελαίου περιοχής Abadan, από το 1951 έως το 1954, γεγονός που έμεινε στην ιστορία ως η κρίση του Abadan. Οι δύο αυτές κινήσεις από τους Βρετανούς οδήγησαν στο σχεδόν μηδενισμό της παραγωγής πετρελαίου από το Ιράν. Επίσης, με πρωτοβουλία των Βρετανών, η CIA ανέτρεψε τον Πρωθυπουργό του Ιράν Mosaddegh στην επιχείρηση Ajax το 1953, μέσω πραξικοπήματος. Παρόλο που επίσημα η εθνικοποίηση των αποθεμάτων πετρελαίου παρέμενε ενεργή, στην πράξη εδραιώθηκε μία συμμετοχή κράτους και AIOC στην εκμετάλλευσή τους σε ποσοστά 50/50%.

Η όλη εξέλιξη άφησε στη Μεγάλη Βρετανία ένα σημαντικό μερίδιο στα συνολικά εξωτερικά περιουσιακά στοιχεία της. Την ίδια στιγμή παρεμπόδισε την ομαλή μετάβαση στη δημοκρατία στο Ιράν, αφήνοντας τις συνέπειές της στις επερχόμενες δεκαετίες. Εκτιμάται, επίσης, ότι σημαντική ήταν η συμβολή του πραξικοπήματος στην ιρανική επανάσταση του 1979, μετά από την οποία οι επιχειρήσεις πετρελαίου στο Ιράν εθνικοποιήθηκαν ξανά.

Σήμερα η οικονομία της χώρας βασίζεται και ελέγχεται σε μεγάλο βαθμό από το ίδιο το κράτος, με το πετρέλαιο να είναι ο σημαντικότερος οικονομικός πόρος της χώρας. Το Ιράν είναι η τέταρτη μεγαλύτερη παραγωγός χώρα πετρελαίου παγκοσμίως και η παραγωγή του αντιστοιχεί στο 11% της συνολικής παραγωγής των χωρών του Ο.Π.Ε.Κ. Οι εξαγωγές αργού πετρελαίου συνιστούν το 85% της συνολικής αξίας των εξαγωγών.

- Νιγηρία

Η ανακάλυψη πετρελαίου στη Νιγηρία προκάλεσε σημαντικές συγκρούσεις στο εσωτερικό της χώρας. Η ανέλιξη της εμπορικής παραγωγής πετρελαίου από το 1958 και έπειτα σηματοδότησε την έναρξη του αγώνα των αυτόχθονων για τον έλεγχο των αποθεμάτων πετρελαίου [10]. Η βόρεια ηγεμονία, υπό την καθοδήγηση των HausakaiFulani, επέβαλε στρατιωτική δικτατορία και επέβαλε έλεγχο επί της διαχείρισης των αποθεμάτων πετρελαίου. Με σκοπό να ικανοποιήσει τη λαϊκή απαίτηση για φθηνή τροφή κατά τη διάρκεια της πληθωριστικής περιόδου αμέσως μετά τον εμφύλιο πόλεμο (1967 – 1970), η κυβέρνηση δημιούργησε ένα νέο κρατικό φορέα, την Εθνική Νιγηριανή Εταιρεία Προμήθειας (National Nigerian Supply Company – NNSC) [11]. Παρόλο που η παραγωγή πετρελαίου ήταν σε εξέλιξη, η χώρα παρέμενε μία από τις πιο φτωχές και υποανάπτυκτες χώρες παγκοσμίως έως το 1990 [10]. Οι τοπικές κοινότητες αντέδρασαν με διαμαρτυρίες και σειρά από προσπάθειες με σκοπό τη διακοπή της άντλησης πετρελαίου από τη χώρα τους, αν δεν δοθούν εύλογα ανταποδοτικά οφέλη. Ως το Σεπτέμβριο του 1999, είχαν απαχθεί και αφηθεί στη συνέχεια ελεύθεροι περίπου 50 εργαζόμενοι της εταιρείας Shell που δραστηριοποιείται στη χώρα [10].



Εικόνες 6.1 & 6.2: Συνθήκες περιβάλλοντος και ζωής στην περιοχή εξόρυξης πετρελαίου στη Νιγηρία.

Δεν είναι μόνο ο λαός της Νιγηρίας που πλήττεται από την μονόπλευρη αξιοποίηση των αποθεμάτων πετρελαίου στην περιοχή, αλλά και το περιβάλλον και η γενικότερη περιοχή εξαιτίας της εκτεταμένης αποψίλωσης και υποβάθμισης δασών και της ακατάλληλης διάθεσης των αποβλήτων. Σημαντικό είναι,

επίσης, το θέμα που ανακύπτει σχετικά με την παράνομη διάθεση του επεξεργασμένου πετρελαίου στην μαύρη αγορά, η οποία ελέγχεται από οργανωμένους εμπόρους σε συνεργασία με συνδικάτα λαθρεμπορίου [10]. Οι τοπικές δράσεις κατά της άντλησης πετρελαίου οδήγησαν στην αναστολή της κατά 35 εκατομμύρια βαρέλια το 2000 και 35 εκατομμύρια βαρέλια το 2001 [10]. Το κράτος φαίνεται αδύναμο να ελέγξει τις ανωτέρω δραστηριότητες, όπως και να ανακτήσει σημαντικό ποσοστό ελέγχου επί της αξιοποίησης των αποθεμάτων πετρελαίου.

- Σαουδική Αραβία

Από το 1950, η Σαουδική Αραβία έχει αναδειχτεί σε μία ιδιαίτερα επιτυχημένη πετρελαιοπαραγωγική περιοχή, διατηρώντας ταυτόχρονα ένα ακόμα μεγαλύτερο αναξιοποίητο δυναμικό αποθεμάτων πετρελαίου. Εξαιτίας ευνοϊκών γεωλογικών συνθηκών και της γειννίας των γεωτρήσεων άντλησης πετρελαίου με την ακτογραμμή, το κόστος άντλησης πετρελαίου στην περιοχή διαμορφώθηκε σε χαμηλές τιμές. Η αμερικανική εταιρεία στην οποία αρχικά παραχωρήθηκε η αξιοποίηση των αποθεμάτων η Aramco, συμφώνησε με την απαίτηση της κυβέρνησης να καθορίσει την τιμή του πώλησης πετρελαίου με βάση την επιθυμητή στάθμη κερδών, και όχι με βάση το κόστος άντλησης. Η διανομή κερδών ανάμεσα στο κράτος και στην ιδιωτική επιχείρηση αρχικά διαμοιράστηκε σε ίσα μερίδια (50 – 50). Τελικά, το 1980, η Σαουδική Αραβία ανέκτησε πλήρη έλεγχο της ιδιωτικής επιχείρησης, μετονομάζοντάς την σε Saudi Aramco.





Εικόνες 6.3 & 6.4: Τα αποτελέσματα της εντυπωσιακής ανάπτυξης μέσω της αξιοποίησης των αποθεμάτων πετρελαίου στη Ντόχα του Κατάρ και στο Ντουμπάι.

- Βενεζουέλα

Το 1958 η Βενεζουέλα, μέσω επανάστασης, έθεσε τέλος στη στρατιωτική δικτατορία που κρατούσε από το 1948. Ο νεοεκλεγείς Υπουργός Ορυχείων και Υδρογονανθράκων Juan Pablo Pérez Alfonso ενήργησε προς την αύξηση του φόρου εισοδήματος των επιχειρήσεων πετρελαίου. Η εθνικοποίηση των αποθεμάτων πετρελαίου επετεύχθη το 1976. Οι κυρίαρχες εταιρείες στη Βενεζουέλα Exxon Mobil και Conoco Philips ανακοίνωσαν οικειοθελώς την αποχώρησή τους από την περιοχή Orinoco λόγω της υψηλής φορολογίας εισοδήματος και της πολιτικής της Βενεζουέλας να επιβάλει στις ιδιωτικές επιχειρήσεις μειωμένη συμμετοχή στα κέρδη από την εκμετάλλευση του πετρελαίου, σε σχέση με την κρατική επιχείρηση Petróleos de Venezuela (PDVSA). Στις ιδιωτικές αλλοδαπές επιχειρήσεις προσφέρθηκαν έργα αξιοποίησης αποθεμάτων πετρελαίου με υψηλό κόστος άντλησης. Στα τέλη της δεκαετίας του '90 αυξήθηκαν και πάλι οι ιδιωτικές επιχειρήσεις στη χώρα, προσθέτοντας περίπου 1,2 εκατομμύρια βαρέλια στην ετήσια εγχώρια παραγωγή πετρελαίου. Στα χρόνια που ακολούθησαν η παραγωγή πετρελαίου από τις ιδιωτικές επιχειρήσεις σημείωσε συνεχή και σταθερή αύξουσα πορεία, σε αντίθεση με την παραγωγή της κρατικής PDVSA, που λόγω εσωτερικών προβλημάτων, έβαινε μειούμενη. Η Βενεζουέλα προχώρησε σε νέα αύξηση του φόρου εισοδήματος των ιδιωτικών πετρελαϊκών επιχειρήσεων, χωρίς όμως αυτό να ανατρέψει τη φθίνουσα πορεία της PDVSA. Τα σημαντικά λειτουργικά προβλήματα της PDVSA ώθησαν μία συντεταγμένη προσπάθεια για την απαξίωση και το τελικό κλείσιμό της. Η πρωτοβουλία αυτή έδωσε στην Κυβέρνηση την ευκαιρία να αναλάβει και πάλι τον έλεγχο της διαχείρισης των συνολικών αποθεμάτων πετρελαίου, επαναφέροντας σημαντικές πολιτικές ελέγχου επί της λειτουργίας των ιδιωτικών επιχειρήσεων.

Η οικονομία της Βενεζουέλας βασίζεται σε μεγάλο ποσοστό στις εξαγωγές πετρελαίου. Με δεδομένο τον έλεγχο των αποθεμάτων από την κρατική επιχείρηση, από τις αρχές της δεκαετίας του 1970 η χώρα γνώρισε τεράστια οικονομική ανάπτυξη. Ωστόσο, τα πράγματα άλλαξαν ριζικά από τις αρχές της δεκαετίας του 1980, όταν η πτώση των διεθνών τιμών του μαύρου χρυσού έφερε οικονομική λιτότητα και κοινωνική αναταραχή. Παρόλο που η Βενεζουέλα σημείωσε σημαντικά ποσοστά ανάπτυξης έως και το 2014, η πτώση της τιμής του πετρελαίου το 2015 κατά 60% περίπου έχει επιδράσει σημαντικά την οικονομία της χώρας, η οποία εμφανίζει πληθωρισμό που ξεπερνά το 60% το 2015.

- Αργεντινή

Η εθνικοποίηση των αποθεμάτων πετρελαίου στην Αργεντινή ξεκίνησε το 1907, όταν με την ανακάλυψη του πρώτου πεδίου πετρελαίου αξιόλογου μεγέθους της χώρας στην περιοχή Comodoro Rivadavia, ο Πρόεδρος José Figueroa Alcorta ανακήρυξε την περιοχή κοντά στο εν λόγω πεδίο ως κρατική

ιδιοκτησία. Το 1922 ιδρύθηκε από τον Πρόεδρο Hipólito Yrigoyen και το Στρατηγό Enrique Mosconi η επιχείρηση YPF, η πρώτη επιχείρηση αξιοποίησης πετρελαίου, η οποία μάλιστα ήταν κρατική. Οι ορυκτοί πόροι του έθνους εθνικοποιήθηκαν το με το άρθρο 40 του Συντάγματος της χώρας, το οποίο διακήρυξε ο Πρόεδρος Juan Perón. Παρόλο που το άρθρο αυτό καταργήθηκε το 1956, τα αποθέματα πετρελαίου και αερίου εθνικοποιήθηκαν ξανά το 1958 από τον Πρόεδρο Arturo Frondizi. Η πρώτη εταιρεία πετρελαίου YPF ιδιωτικοποιήθηκε το 1993, ενώ η ισπανική Repsol ανέκτησε ένα πλειοψηφικό μετοχικό πακέτο της YPF το 1999. Από τότε η παραγωγή πετρελαίου και φυσικού αερίου μειώθηκαν σταδιακά με ταυτόχρονη αύξηση της ζήτησης, οδηγώντας τη χώρα το 2011 στο πρώτο έλλειμμα ενέργειας από το 1987.

Από το 2010 η Πρόεδρος της χώρας Cristina Fernández de Kirchner ξεκίνησε τις διαδικασίες για την επανεθνικοποίηση της YPF.

- Καναδάς

Το 2010 ο Καναδάς αποτελούσε το βασικό παροχές πετρελαίου των Η.Π.Α., εξάγοντας ετησίως περίπου 707.316.000 βαρέλια (112.454.300m³) ή 1.937.852 βαρέλια ημερησίως (308.093.8m³), ποσότητα που αναλογεί στο 99% των ετήσιων εξαγωγών πετρελαίου της χώρας. Μετά από το εμπάργκο πετρελαίου από τις χώρες του Ο.Π.Ε.Κ. το 1973, ο Καναδάς πήρε την πρωτοβουλία να ελέγξει τα αποθέματα πετρελαίου. Το αποτέλεσμα της πρωτοβουλίας αυτής ήταν η δημιουργία της κρατικής εταιρείας Petro-Canada. Η εταιρεία Petro-Canada πρότεινε συγκεκριμένους εθνικούς στόχους, ανάμεσα στους οποίους ήταν η αυξημένη συμμετοχή του κράτους στον έλεγχο των αποθεμάτων πετρελαίου, η αξιοποίηση αποθεμάτων εκτός των δυτικών περιοχών της χώρας, δηλαδή αποθεμάτων σε περιοχές στο βορρά και στη θάλασσα, διαρκή ενημέρωση για τις εξελίξεις και την πρόοδο στη βιομηχανία πετρελαίου, εξασφάλιση της ασφάλειας παραγωγής, ελαχιστοποίηση της εξάρτησης από τις μεγάλες πολυεθνικές εταιρείες πετρελαίου και αύξηση των εισοδημάτων προς το κράτος από την αξιοποίηση αποθεμάτων πετρελαίου και φυσικού αερίου.

Η εταιρεία Petro-Canada ήρθε σε αντιπαράθεση με την ιδιωτική εταιρεία Alberta, μία από τις βασικές ιδιωτικές επιχειρήσεις πετρελαίου στον Καναδά. Μετά από διαπραγματεύσεις σχετικά με τη διαμόρφωση της τιμής του πετρελαίου και του φυσικού αερίου, η εταιρεία Alberta αποτελεί το βασικό παραγωγό πετρελαίου στον Καναδά από τη δεκαετία του '70.

- Μεξικό

Το Μεξικό εθνικοποίησε τη βιομηχανία πετρελαίου το 1938 χωρίς να την ιδιωτικοποιήσει ποτέ από τότε, αποτρέποντας, με αυτόν τον τρόπο, κάθε ξένη επένδυση. Σημαντικές αυξήσεις στα αποθέματα πετρελαίου τη δεκαετία του '70 επέτρεψαν σημαντικές αυξήσεις στην παραγωγή και στις εξαγωγές, συνοδευόμενες από την περίοδο απότομων αυξήσεων στην τιμή του πετρελαίου. Σήμερα το Μεξικό αποτελεί τη χώρα με τις μεγαλύτερες εξαγωγές πετρελαίου στη Λατινική Αμερική.

Πριν από τρεις δεκαετίες, το Μεξικό είχε μια εσωστρεφή οικονομία, στην οποία κυριαρχούσε το πετρέλαιο. Το Θεσμικό Επαναστατικό Κόμμα (PRI), που κυβέρνησε τη χώρα επί 71 χρόνια, κράτησε σε ασφυκτικό κλοιό την οικονομία και τη χώρα συνολικά. Οι προερχόμενοι από αυτό το κόμμα πρόεδροι προστάτευαν τις εγχώριες βιομηχανίες με υψηλούς δασμούς, γενναιόδωρες εγχώριες επιδοτήσεις και ποσοστώσεις στις εξαγωγές και στην παραγωγή. Αυτές οι πολιτικές περιόρισαν το εμπόριο του Μεξικού στο εξής σχήμα: εισαγωγές, κυρίως μηχανημάτων, χημικών προϊόντων και μετάλλων – εξαγωγές πετρελαίου (75% επί της αξίας των εξαγομένων προϊόντων). Οι κρατικές επιχειρήσεις έλεγχαν μια πλειάδα τομέων της οικονομίας, όπως τις τηλεπικοινωνίες, τη ζάχαρη, τις αερογραμμές, τα ξενοδοχεία, το χάλυβα και την κλωστοϋφαντουργία. Αυτά τα επιχορηγούμενα από το κράτος μονοπώλια έδιναν δουλειά σε πάνω από ένα εκατομμύριο Μεξικανούς, καθώς, επίσης, και πολιτική προστασία σε κομματικούς αξιωματούχους και συνδικαλιστικές ηγεσίες. Όμως, συνέθλιψαν την οικονομία της χώρας με υπερτιμημένα προϊόντα, αναποτελεσματικές πολιτικές και διαφθορά, προκαλώντας επανειλημμένους κλυδωνισμούς.

Σήμερα το Μεξικό έχει απομακρυνθεί από αυτό το ασταθές παρελθόν και έχει γίνει μια από τις πιο ανοιχτές και παγκοσμιοποιημένες οικονομίες. Έχει συνάψει σύμφωνα ελεύθερου εμπορίου με περισσότερες από 40 χώρες. Το εμπόριο της χώρας ως ποσοστό του ΑΕΠ (ένας χρήσιμος δείκτης της ανοιχτής οικονομίας) είναι στο 65%. Αντίστοιχα, στην Κίνα είναι 59%, στις ΗΠΑ 32%, στη Βραζιλία 25%. Η οικονομία του

Μεξικού δεν είναι πια εξαρτημένη από το πετρέλαιο και στις εξαγωγές της χώρας κυριαρχεί η βιομηχανία, κυρίως αυτοκινήτων, ηλεκτρονικών υπολογιστών και ηλεκτρικών συσκευών. Η μετάβαση από τα βασικά αγαθά και τη γεωργία στις υπηρεσίες και τη μεταποίηση, έχει εκτοξεύσει τη χώρα προς τα εμπρός, με αποτέλεσμα το Μεξικό να έχει ξεπεράσει άλλες χώρες με αναδυόμενες αγορές, όπως η Κίνα, η Ινδία και η Ρωσία, στην υλοποίηση αυτής της οικονομικής μετάβασης.

- Ρωσία

Με την εκλογή του Προέδρου Putin τον Ιανουάριο του 2000, έχει προκύψει μία αναρριχώμενη επανεθνικοποίηση της ρωσικής βιομηχανίας πετρελαίου [12]. Η κυβέρνηση του Vladimir Putin έπεισε τη Royal Dutch Shell να παραχωρήσει στην κρατική εταιρεία Gazprom τον έλεγχο του βασικού έργου αξιοποίησης αποθεμάτων πετρελαίου στο νησί Sakhalin. Επίσης ο ιδρυτής της πρώην ιδιωτικής επιχείρησης Yukos φυλακίστηκε και η επιχείρηση απορροφήθηκε από την κρατική εταιρεία Rosneft. Οι κινήσεις αυτές κλόνισαν την εμπιστοσύνη των πολυεθνικών επιχειρήσεων πετρελαίου προς τη Ρωσία. Η Ρωσία αντιλήφθηκε την πολιτική που ακολουθήθηκε από τις πολυεθνικές επιχειρήσεις σε επενδύσεις στη βιομηχανία πετρελαίου σε άλλες χώρες, ειδικά σε χώρες μέλη της πρώην Σοβιετικής Ένωσης. Η βιομηχανία πετρελαίου στη Ρωσία αποτελεί μία από τις μεγαλύτερες στον κόσμο, ωστόσο τα τεκμηριωμένα αποθέματα στη χώρα δεν είναι τόσο υψηλά όσο σε άλλες περιοχές. Επιπλέον, με την κατάρρευση της Σοβιετικής Ένωσης, η Ρωσία έχει αποκοπεί από παλαιότερα προσβάσιμες περιοχές πλούσιες σε πετρέλαιο (Κασπία θάλασσα, χώρες της Κεντρικής Ασίας και Αζερμπαϊτζάν).

6.3. Αναπτυξιακές προοπτικές μέσω της πυρηνικής ενέργειας

Η πυρηνική ενέργεια ενίοτε αναφέρεται ως καθαρή και οικονομικά ανταγωνιστική πηγή ενέργειας, σε σχέση με τα συμβατικά ορυκτά καύσιμα. Για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις θα αναφερθούμε σε επόμενη ενότητα. Στην παρούσα ενότητα θα αξιολογηθεί η δυνατότητα συμβολής της πυρηνικής ενέργειας στην ανάπτυξη των κρατών. Λέμε αποκλειστικά των κρατών, καθώς, σε αντίθεση με τους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής από Α.Π.Ε., το μέγεθος των Πυρηνικών Σταθμών Ηλεκτροπαραγωγής (ΠΗΣ) είναι τέτοιο, της τάξης των εκατοντάδων MW ή και GW, ώστε δεν μπορεί να νοείται η αποκεντρωμένη ανάπτυξη μικρών απομονωμένων κοινοτήτων, μέσω της κατασκευής μικρών ΠΗΣ.

Προκειμένου η κάθε τεχνολογία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας να συνεισφέρει ουσιαστικά στην οικονομική και κοινωνική ανάπτυξη ενός κράτους, θα πρέπει να πληρούνται συγκεκριμένες βασικές προϋποθέσεις:

- Η τεχνολογία ανάπτυξης των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής να είναι απλή και ασφαλής.
- Το κόστος κατασκευής και λειτουργίας των σταθμών να είναι χαμηλό και ανταγωνιστικό, ώστε να εξασφαλίζεται η δημιουργία κερδών, μέσω της οικονομικά αποδοτικής λειτουργίας τους.

Η απαιτούμενη τεχνολογία για τη λειτουργία ενός πυρηνικού ηλεκτρικού εργοστασίου, κάθε άλλο παρά απλή είναι. Η αναγκαιότητα υψηλού τεχνολογικού επιπέδου στην κατασκευή και λειτουργία ενός ΠΗΣ υπαγορεύεται, κυρίως, από την απαίτηση για την εξασφάλιση της κατά το δυνατό μέγιστης ασφαλούς λειτουργίας. Αυτό προϋποθέτει την εισαγωγή σύγχρονων ηλεκτρονικών συστημάτων ελέγχου και εποπτείας, καθώς και την κατασκευή των ΠΗΣ με τέσσερα προηγμένα επίπεδα θωράκισης, ξεκινώντας από το περίβλημα του αντιδραστήρα και φτάνοντας έως το κέλυφος του κτηρίου του σταθμού.

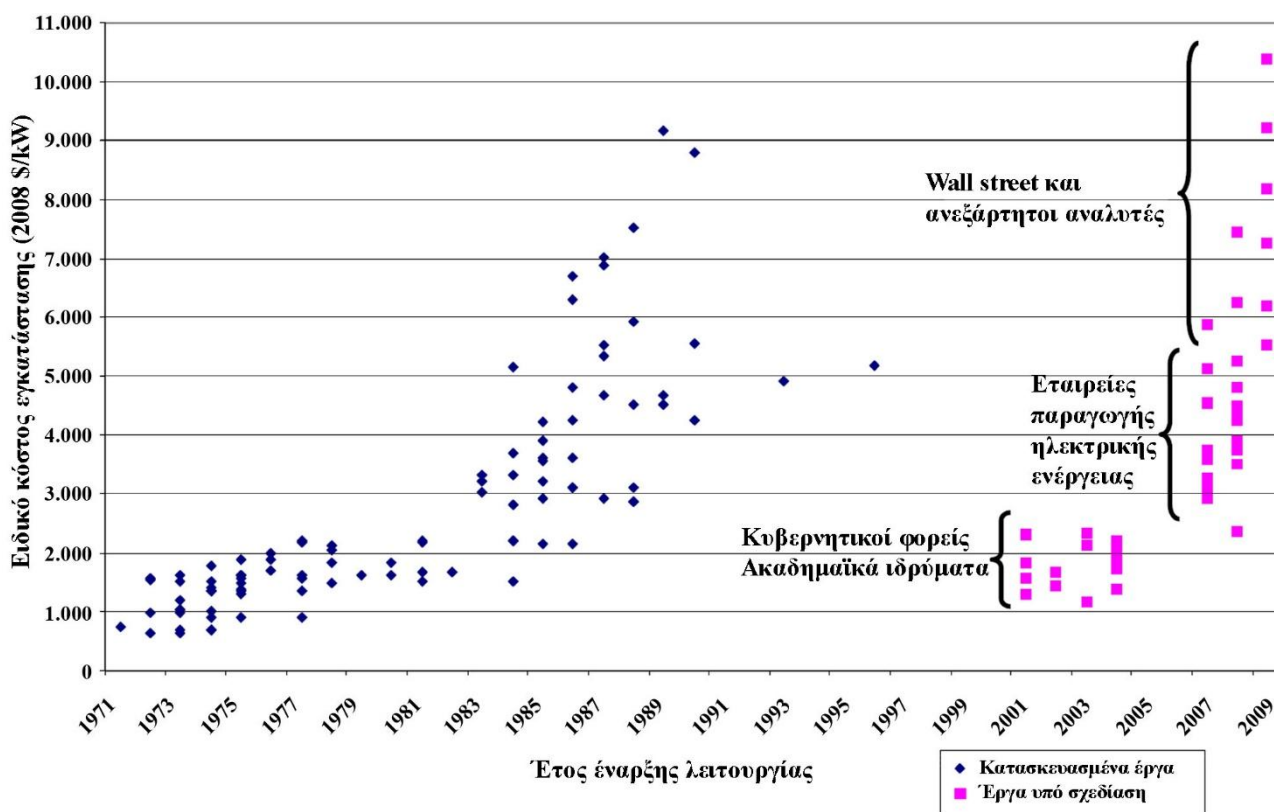
Άμεση συνέπεια των απαιτήσεων και του χρόνου κατασκευής ενός ΠΗΣ σταθμού είναι η σημαντική αύξηση του κόστους κατασκευής και λειτουργίας. Επιχειρώντας μια ανάλυση του κόστους κατασκευής ενός ΠΗΣ, μπορούν να αναφερθούν τα παρακάτω:

- κύριο κόστος κατασκευής (overnigh cost): 2.021\$/kW στην Κορέα έως 6.215\$/kW στην Ουγγαρία
Πυρηνικών [3]),

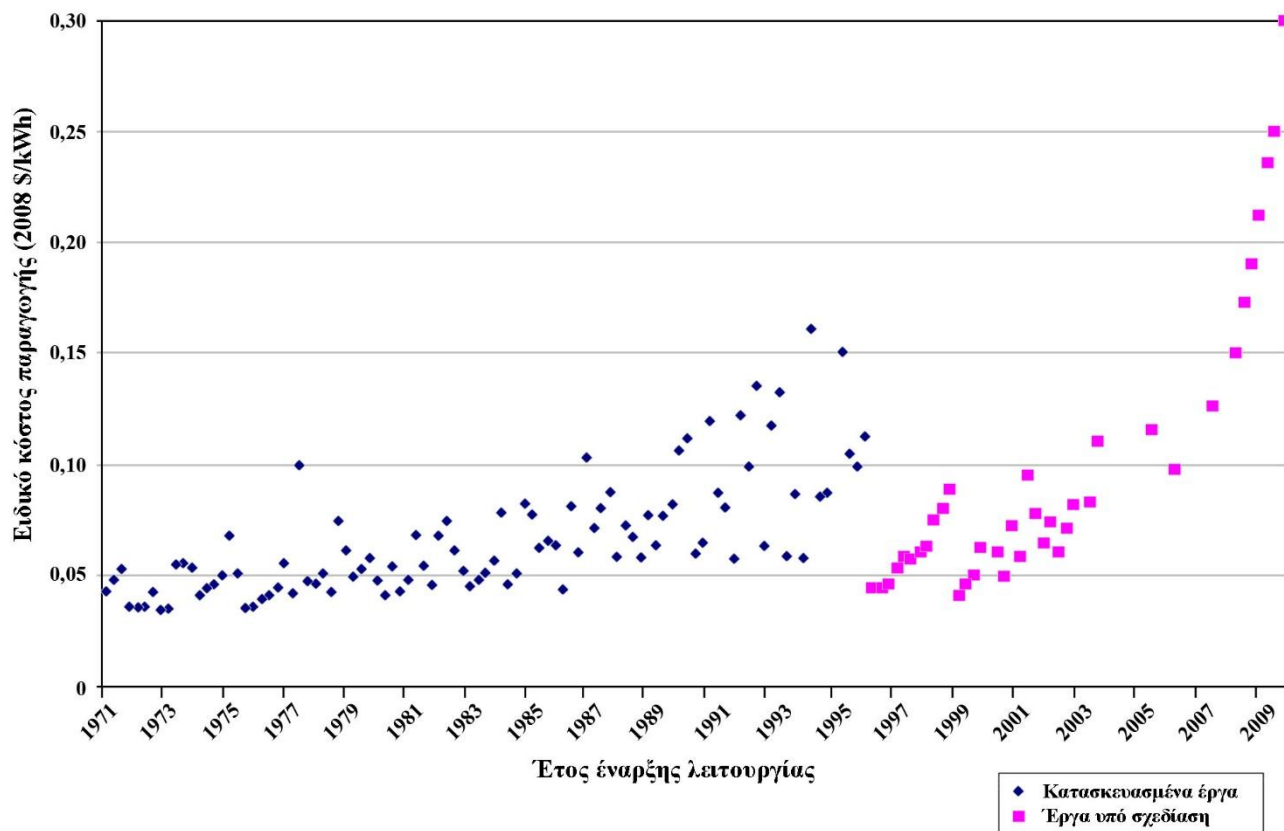
- συνολικό κόστος (με προσαυξήσεις και κόστος κεφαλαίου κατά τη διάρκεια κατασκευής): 8.500-10.500\$/kW,
- διάρκεια κατασκευής: 7 έτη,
- κόστος υποδομών για διαχείριση αποβλήτων: 950\$/kW,
- κόστος αποσυναρμολόγησης πυρηνικού σταθμού μετά από 40 έτη: 700-1.800\$/kW (15,5-40\$/kW σε σημερινές τιμές)
- χρόνος ζωής πυρηνικού σταθμού: 40 έτη,
- λειτουργικά κόστη: 5 US cents/kWh,
- μέσος συντελεστής φόρτισης μονάδας: 85%,
- επιτόκιο προεξόφλησης: 10%.

Με βάση τα παραπάνω, το ανηγμένο κόστος παραγωγής (levelized cost) της πυρηνικής κλινοβατόρας ανέρχεται σε 0,18 – 0,208\$/kWh ή αντίστοιχα σε 0,129 – 0,148€/kWh. Η εκτίμηση αυτή συμφωνεί με τα αποτελέσματα από την πράξη, τα οποία συνοψίζονται στα σχήματα 6.1 και 6.2 [14].

Από τα ανωτέρω συνάγεται το συμπέρασμα ότι ένας ΠΗΣ παρουσιάζει ιδιαίτερα υψηλό ειδικό κόστος εγκατάστασης, συγκρινόμενος μάλιστα με το αντίστοιχο κόστος κατασκευής των συμβατικών θερμοηλεκτρικών σταθμών ή και των μονάδων Α.Π.Ε.



Σχήμα 6.1: Η εξέλιξη του κόστους κατασκευής ΠΗΣ συναρτήσει του χρόνου.



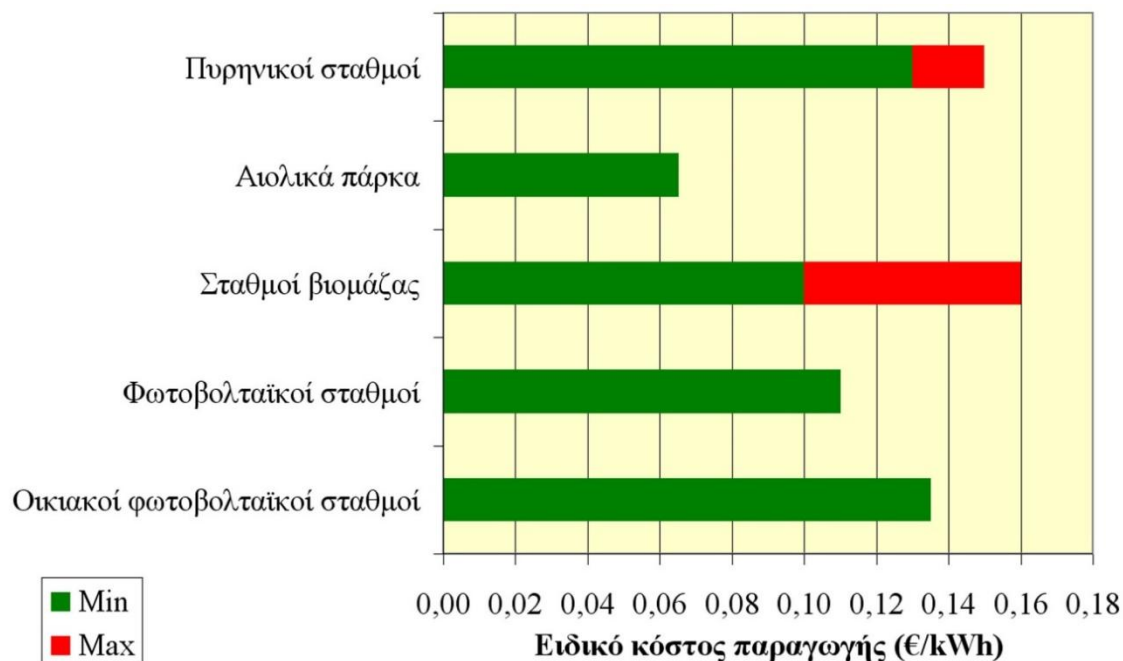
Σχήμα 6.2: Η εξέλιξη του κόστους λειτουργίας ενός ΠΗΣ συναρτήσει του χρόνου.

Προς τεκμηρίωση των ανωτέρω, στον πίνακα 6.1 παρουσιάζονται τα ειδικά κόστη εγκατάστασης από διαφορετικές συμβατικές και ανανεώσιμες τεχνολογίες. Παρατηρείται ότι το κόστος εγκατάστασης ενός ΠΗΣ εμφανίζεται υψηλότερο ακόμα και από τεχνολογίες που θεωρούνται ακόμα σήμερα όχι ιδιαίτερα διαδεδομένες ή υβριδικές, πολύ μικρότερου μεγέθους, όπως οι υβριδικοί σταθμοί.

Πίνακας 6.1: Σύγκριση κόστους εγκατάστασης διαφορετικών τεχνολογιών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

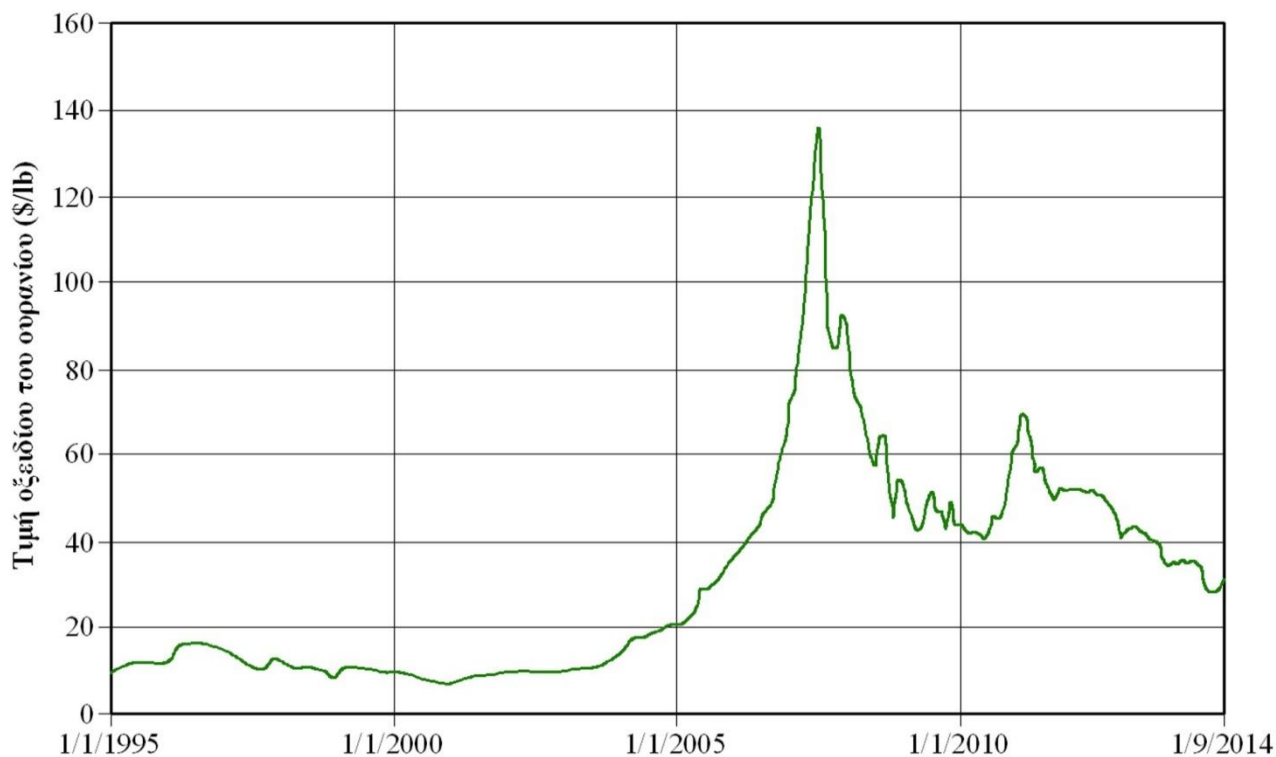
Τεχνολογία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας	Μέσο ειδικό κόστος εγκατάστασης (€/kW)	Μέση ετήσια παραγωγή (kWh/kW)	Μέσο ετήσιο κόστος λειτουργίας (€/kW)	Διάρκεια ζωής (έτη)
Αιολικά πάρκα	1.500	2.500 – 3.500	25	25
Συμβατικοί θερμοηλεκτρικοί σταθμοί	2.000	8.000	900 – 1.200	30
Σταθμοί βιομάζας	3.000	7.500	450 – 900	25
Φωτοβολταϊκοί σταθμοί	1.300	1.200 – 1.400	25	25
Οικιακοί φωτοβολταϊκοί σταθμοί	2.000	1.300		25
Υβριδικοί σταθμοί μεγάλου μεγέθους	2.000	3.000 – 3.500	50 – 100	25
Υβριδικοί σταθμοί μικρού μεγέθους	4.000	5.000	100	25

Τέλος, στο σχήμα 6.3, παρουσιάζεται συγκριτικό διάγραμμα του ειδικού κόστους παραγωγής διαφορετικών βασικών τεχνολογιών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Με βάση το σχήμα αυτό, το 2020 το ειδικό κόστος παραγωγής από ένα ΠΗΣ εμφανίζεται μη ανταγωνιστικό ακόμα και με το αντίστοιχο κόστος από τα μικρής κλίμακας οικιακά φωτοβολταϊκά. Σε ό,τι αφορά στα αιολικά πάρκα και ορισμένες εφαρμογές της βιομάζας, τα ειδικά κόστη παραγωγής παρουσιάζονται ήδη μικρότερα από τα αντίστοιχα των ΠΗΣ.



Σχήμα 6.3: Εκτιμώμενη διαμόρφωση ειδικού κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας το 2020 από διαφορετικές τεχνολογίες.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το ειδικό κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ένα ΠΗΣ είναι συνάρτηση του κόστους του καυσίμου, δηλαδή του ορυκτού οξειδίου του ουρανίου (UO₂). Η τιμή του οξειδίου του ουρανίου, όπως και κάθε άλλη πρωτογενούς πηγής ενέργειας, δεν είναι σταθερή, αντίθετα παρουσιάζει διακυμάνσεις, ενίοτε έντονες, συναρτήσει του χρόνου. Στο σχήμα 6.4 παρουσιάζεται η διακύμανση της τιμής του ορυκτού οξειδίου του ουρανίου από το 1995 έως το 2014.



Σχήμα 6.4: Διακύμανση τιμής ορυκτού οξειδίου του ουρανίου συναρτήσει του χρόνου.

Για να παραχθεί μία kWh ηλεκτρικής ενέργειας, απαιτούνται κατά μέσο όρο 0,0255gr οξειδίου του ουρανίου. Αν η τιμή του ορυκτού οξειδίου του ουρανίου στη διεθνή αγορά διαμορφώνεται περί τα 60\$/lb (156\$/kg), η συμβολή του κόστους καυσίμου στο ειδικό κόστος παραγωγής ενός ΠΗΣ ανέρχεται στα 0,004\$/kWh [15]. Σε ό,τι αφορά στα λοιπά λειτουργικά κόστη, των εύρος των εκτιμήσεων κυμαίνεται από 0,014 – 0,046\$/kWh. Άρα το σύνολο των λειτουργικών δαπανών (περιλαμβανομένου του κόστους καυσίμου) εκτιμάται στα 0,018 – 0,05\$/kWh [14]. Καταλήγουμε λοιπόν στο συμπέρασμα ότι το ειδικό κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ένα ΠΗΣ διαμορφώνεται περίπου κατά τα 2/3 από τις αποσβέσεις του εξοπλισμού, ενώ τα τρέχοντα λειτουργικά κόστη του σταθμού συμβάλουν περίπου κατά το 1/3.

Αναδεικνύεται πλέον, μετά την ανωτέρω ανάλυση, ότι η αξιοποίηση της πυρηνικής τεχνολογίας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αφενός απαιτεί τη χρήση προηγμένης τεχνολογίας, για την, κατά το δυνατόν, προσέγγιση της ασφαλούς λειτουργίας του σταθμού, αφετέρου παρουσιάζει αρχικό και λειτουργικό κόστος υψηλότερα ακόμα και από μη ώριμες υβριδικές τεχνολογίες. Συνεπώς δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελεί την πλέον ενδεδειγμένη τεχνολογία στην οποία μπορεί μία αναπτυσσόμενη χώρα να βασίσει την ανάπτυξή της.

Σήμερα παγκοσμίως ελάχιστες είναι οι χώρες οι οποίες βασίζουν την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε πυρηνικούς σταθμούς, με πρώτη τις Η.Π.Α., δεύτερη τη Γαλλία, στην οποία το 75% της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας προέρχεται από πυρηνικούς σταθμούς, ενώ σε αναδυόμενες δυνάμεις στο χώρο της πυρηνικής ενέργειας εξελίσσονται η Κίνα και η Νότια Κορέα. Ωστόσο, ήδη η Γαλλία από τον Ιούλιο του 2015 ενέκρινε σχέδιο νόμου με στόχο τη μείωση της εξάρτησής της από την πυρηνική ενέργεια από το 75 στο 50%.

6.4. Α.Π.Ε. και ανάπτυξη

Οι τεχνολογίες Α.Π.Ε. προβάλλονται ως μία ενδεδειγμένη ενεργειακή και αναπτυξιακή προοπτική, άκρως φιλική προς το περιβάλλον. Η δυνατότητα προσαρμογής του μεγέθους ενός σταθμού ηλεκτροπαραγωγής από Α.Π.Ε. ανάλογα με τις δυνατότητες του επενδυτή ή με τους κάθε τύπου περιορισμούς που τίθενται (περιβαλλοντικούς, αναπτυξιακούς κλπ), επιτρέπει την ανάπτυξη έργων Α.Π.Ε. από κάθε μεγέθους επενδυτή. Συνεπώς ένας σταθμός Α.Π.Ε. δύναται να έχει μέγεθος της τάξης των δεκάδων ή και εκατοντάδων MW, οπότε μπορεί να συμβάλει γενικότερα στην ανάπτυξη ενός κράτους ή μιας μεγάλης περιοχής, ενώ μπορεί να έχει μέγεθος της τάξης των μερικών kW ή MW, οπότε μπορεί να ελέγχεται από μικρή επενδυτική ομάδα και να απευθύνεται σε μία μικρή κοινωνία.

Δεδομένου ότι οι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής από Α.Π.Ε. συνήθως απαιτούν για την εγκατάστασή τους εκτεταμένες εκτάσεις με εν δυνάμει επιπτώσεις, που θα εξεταστούν σε επόμενη ενότητα, για να συμβάλουν στην ανάπτυξη μιας περιοχής, και όχι την υποβάθμισή της, θα πρέπει να πληρούνται συγκεκριμένες προϋποθέσεις, όπως:

- Μελετημένη χωροθέτηση που εκτός της διαθεσιμότητας του δυναμικού Α.Π.Ε. θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τις όποιες πιθανές επιπτώσεις από την εγκατάσταση και τη λειτουργία του σταθμού σε φυσικό και ανθρωπογενές περιβάλλον.
- Μεγιστοποίηση των οικονομικών ανταποδοτικών οφελών προς τις τοπικές κοινωνίες, κατά αντιστοιχία με τις επιδιώξεις των κρατών μέσω των εθνικοποιήσεων επιχειρήσεων αξιοποίησης αποθεμάτων πετρελαίου, που αναφέρθηκαν σε προηγούμενη ενότητα.

Οι ανωτέρω δύο γενικές προϋποθέσεις αναλύονται σε επόμενη ενότητα σε εξειδικευμένα μέτρα.

Όπως ακριβώς και στην περίπτωση του πετρελαίου, η αξιοποίηση του δυναμικού Α.Π.Ε. δεν έχει πάντα προσεγγιστεί με τήρηση των ανωτέρω προϋποθέσεων. Μάλιστα, όσο ανέτοιμο, από κάθε άποψη, κυρίως όμως νομική, εμφανίστηκε ένα κράτος, για να προχωρήσει στην ανάπτυξη σταθμών ηλεκτροπαραγωγής από Α.Π.Ε., τόσο περισσότερο οι όποιες εγκαταστάσεις Α.Π.Ε. δεν ακολούθησαν την πλέον ευνοϊκή για το κράτος και τα αναμενόμενα αναπτυξιακά οφέλη διαδικασία. Ενδεικτική τέτοια περίπτωση αποτελεί η Ελλάδα, για την οποία γίνεται εκτενής λόγος αμέσως παρακάτω. Μέσα από την παρουσίαση της υφιστάμενης κατάστασης αναφορικά με την ανάπτυξη έργων αξιοποίησης Α.Π.Ε. στην Ελλάδα και προτάσεων προς τη μεγιστοποίηση των αναμενόμενων οφελών, καταδεικνύονται οι ελλοχεύοντες

κίνδυνοι και τεκμηριώνονται τρόποι και διαδικασίες για την ορθολογική ανάπτυξη μέσω αξιοποίησης των Α.Π.Ε. Τα συμπεράσματα από την παρουσίαση, που θα ακολουθήσει, προφανώς επεκτείνονται σε κάθε γεωγραφική περιοχή του πλανήτη.

6.4.1. Η ανάπτυξη των Α.Π.Ε. στην Ελλάδα

6.4.1.a. Οι Α.Π.Ε. ως μοχλός ανάπτυξης

Οι πιστοποιημένες μετρήσεις κατά την τελευταία τριακονταετία από εκατοντάδες μετρητικούς σταθμούς σε όλη τη χώρα έχουν καταγράψει αιολικό δυναμικό και ηλιακή ακτινοβολία που καθιστούν την Ελλάδα μία από τις πιο πλούσιες χώρες στον κόσμο σε ενεργειακές πηγές, στη συγκεκριμένη περίπτωση, μάλιστα, ανανεώσιμες [16 – 24]. Οι ετήσια απολαμβανόμενες ποσότητες ενέργειας στην Ελλάδα, αφενός υπερκαλύπτουν τις εγχώριες ανάγκες σε ζήτηση τελικής ενέργειας, αφετέρου δύνανται να αποτελέσουν βασικό εξαγωγίμο προϊόν, ικανό να αποτελέσει τον κινητήριο μοχλό για την ανάκαμψη της εθνικής οικονομίας.

Η επιτυχής προσέγγιση των ανωτέρω στόχων (εθνική ενεργειακή αυτονομία και οικονομική ανάπτυξη μέσω αξιοποίησης εγχώριων πηγών ενέργειας) διαμέσου των παράπλευρων περιβαλλοντικών, κοινωνικών και οικονομικών περιορισμών μπορεί να επιτευχθεί μέσω της ιχνηλάτησης των ακόλουθων βημάτων:

1. Τη σύνταξη κεντρικού χωροταξικού πλαισίου για εγκαταστάσεις αξιοποίησης Α.Π.Ε., προκειμένου να αποφευχθούν οι όποιες αρνητικές επιδράσεις των έργων αυτών σε ανθρωπογενές και φυσικό περιβάλλον
2. Κατά περίπτωση, τη σύνταξη ειδικού χωροταξικού πλαισίου για αυτόνομες γεωγραφικές οντότητες (π.χ. νησιά)
3. Τη θέσπιση σαφούς, πλήρους και αντικειμενικού νομικού πλαισίου, σχετικά με τη διαδικασία αδειοδότησης έργων αξιοποίησης Α.Π.Ε., απαλλαγμένο από ασάφειες και διφορούμενες έννοιες
4. Σε ειδικές περιπτώσεις έργων Α.Π.Ε., όπως η ανάπτυξη υπεράκτιων αιολικών πάρκων, τη θέσπιση περιοχών εγκατάστασης των τεχνολογιών αυτών
5. Τη λήψη μέτρων για τη μεγιστοποίηση των οικονομικών και λοιπών οφελών για τις τοπικές κοινωνίες στις οποίες αναπτύσσονται τα έργα αξιοποίησης Α.Π.Ε.
6. Τη θέσπιση ειδικού νομοθετικού πλαισίου και την εισαγωγή κινήτρων για την επενδυτική συμμετοχή των Οργανισμών Τοπικής Αυτοδιοίκησης (Ο.Τ.Α.) στην ανάπτυξη έργων αξιοποίησης Α.Π.Ε.
7. Την προστασία ειδικά των νησιωτικών περιοχών από την κατασκευή έργων Α.Π.Ε. μεγάλης ισχύος, τα οποία, υπερκαλύπτοντας τις τοπικές ανάγκες σε ενέργεια ή και την ικανότητα μεταφοράς του πιθανώς υφιστάμενου ή μελλοντικού καλωδίου διασύνδεσης με το ηπειρωτικό σύστημα, ενισχύουν την ανάπτυξη ενεργειακών μονοπωλίων και αποκλείουν τη συμμετοχή τοπικών φορέων και επενδυτών στην αξιοποίηση των γηγενών ενεργειακών πόρων και στην άμεση στήριξη των τοπικών οικονομιών.

Ανατρέχοντας στα ανωτέρω βήματα, διαπιστώνεται ότι το μόνο που έχει εισαχθεί στη διαδικασία ανάπτυξης και αδειοδότησης έργων Α.Π.Ε. στην Ελλάδα, είναι η θέσπιση του Ειδικού Χωροταξικού Πλαισίου (Ε.Χ.Π.), το οποίο στην παρούσα μορφή του δίνει ένα σαφές πλαίσιο συνύπαρξης των έργων Α.Π.Ε. με λοιπές χρήσεις γης και ανθρώπινες δραστηριότητες και αποτελεί ένα ολοκληρωμένο εργαλείο χωροθέτησης των έργων αυτών.

6.4.1.β. Η υφιστάμενη κατάσταση στην Ελλάδα

Τα τελευταία χρόνια έχει παρατηρηθεί μία άναρχη πολιτική υποβολής αιτήσεων από τον επενδυτικό κόσμο για την έκδοση αδειών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από Α.Π.Ε. Η γεωγραφική αποτύπωση των αιτήσεων και των αδειών στον ιστότοπο της Ρυθμιστικής Αρχής Ενέργειας (Ρ.Α.Ε.) δίνει παραστατικά το

αποτέλεσμα της πολιτικής αυτής. Αιτήσεις εγκατάστασης σταθμών ηλεκτροπαραγωγής από Α.Π.Ε. χωρίς σχεδιασμό, συνήθως πολύ μεγάλου μεγέθους σε μικρά νησιωτικά συστήματα, με σωρεία παραβιάσεων του Ειδικού Χωροταξικού Πλαισίου για τις Α.Π.Ε. Αιτήσεις που έγιναν χωρίς την ενημέρωση των τοπικών κοινωνιών, αγνοώντας τις όποιες υφιστάμενες δραστηριότητες, τις ιδιοκτησίες γης και που, μοιραία, προκάλεσαν το κοινό αίσθημα, στις περισσότερες δε περιπτώσεις αντέστρεψαν την άκρως θετική κοινή γνώμη που είχε καταγραφεί και που επικρατούσε πριν το 2008 για τις Α.Π.Ε. σε όλη τη χώρα. Για πρώτη φορά στην Ελλάδα είδαμε μετά το 2010 διαδηλώσεις κατά της ανάπτυξης τεχνολογιών Α.Π.Ε. στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής, όπως και ολόκληρες κοινωνίες να δηλώνουν την αντίθεσή τους στην κατασκευή έργων Α.Π.Ε. στην περιοχή τους.

Στο γεωπληροφοριακό χάρτη της Ρ.Α.Ε. [25] αποτυπώνεται η χωροθέτηση όλων των υφιστάμενων αιτήσεων και αδειών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τεχνολογίες Α.Π.Ε. στην Ελλάδα. Μία σύνοψη των αδειών παραγωγής ανά τεχνολογία παρουσιάζεται στον πίνακα 6.2, με βάση το αντίστοιχο μητρώο της Ρ.Α.Ε.

Πίνακας 6.2: Συνολική ισχύς αδειών παραγωγής ανά τεχνολογία Α.Π.Ε. (MW).			
Αιολικά	Βιομάζα	Γεωθερμία	Ηλιοθερμικά
23.250,66	479,23	8,00	481,70
Μικρά υδροηλεκτρικά	Φωτοβολταϊκά	Υβριδικοί σταθμοί	Σύνολο
968,07	4.422,04	421,85	30.031,54

Η συνολική αδειοδοτηθείσα ισχύς, βάσει των στοιχείων του πίνακα 6.2, ξεπερνάει τα 30GW, όταν η ετήσια αιχμή ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στη χώρα είναι της τάξης των 11GW. Το γεγονός αυτό σαφώς αντικατοπτρίζει τον έντονο ανταγωνισμό του επενδυτικού κόσμου για την εγκατάσταση έργων ηλεκτροπαραγωγής από Α.Π.Ε. στη χώρα.

Αξιοσημείωτες είναι, επίσης, οι αιτήσεις ή οι άδειες παραγωγής που αφορούν σε εγκαταστάσεις έργων Α.Π.Ε. (κυρίως αιολικά πάρκα) σε νησιά με ταυτόχρονη διασύνδεσή τους με το ηπειρωτικό σύστημα. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση της Κρήτης, όπου υφίστανται πέντε ανεξάρτητες μεταξύ τους αιτήσεις – άδειες, ισχύος 1GW περίπου έκαστη, οι τέσσερις με αιολικά πάρκα και η μία με φωτοβολταϊκούς σταθμούς, οι οποίες προτείνουν πέντε ανεξάρτητες μεταξύ τους διασυνδέσεις της νήσου με το ηπειρωτικό σύστημα. Υπενθυμίζεται ότι η μέγιστη ετήσια ζήτηση ισχύος στο νησί δεν ξεπερνά τα 700MW.

Χαρακτηριστικές είναι, επίσης, οι περιπτώσεις αιτήσεων – αδειών που έχουν υποβληθεί – εκδοθεί σε συγκροτήματα μικρών νησιών, οι οποίες, λόγω του ότι είναι δυσανάλογα μεγάλες με το ενεργειακό και γεωγραφικό μέγεθος των νησιών, αν μη τι άλλο έχουν προκαλέσει το κοινό αίσθημα. Ενδεικτικά αναφέρονται οι ακόλουθες περιπτώσεις, στις οποίες η εγκατάσταση των τεχνολογιών Α.Π.Ε. συνοδεύεται με ταυτόχρονη πρόταση διασύνδεσης των νήσων μεταξύ τους και με το ηπειρωτικό σύστημα [25]:

- άδεια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από αιολικά πάρκα στις νήσους Ανάφη, Αστυπάλαια, Αμοργό, Ίο, συνολικής ισχύος 317,4MW,
- άδεια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από αιολικά πάρκα στις νήσους Κάλυμνο, Κω, Λέρο, συνολικής ισχύος 348MW,
- άδεια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από αιολικά πάρκα στη νήσο Ικαρία, συνολικής ισχύος 330MW,
- αίτηση για άδεια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από αιολικά πάρκα στις νήσους Μήλο, Κίμωλο, Σίκινο, Φολέγανδρο, Αστυπάλαια, συνολικής ισχύος 1.047MW.

Οι ανωτέρω χαρακτηριστικές περιπτώσεις αιτήσεων αποδεικνύουν σαφέστατα ότι οι προσπάθειες εγκατάστασης έργων ηλεκτροπαραγωγής από Α.Π.Ε. στην Ελλάδα γίνονται χωρίς κανένα συγκεκριμένο πλαίσιο ανάπτυξης, χωρίς κεντρικούς στόχους και στρατηγικούς σχεδιασμούς.

Σε αρκετές από τις ανωτέρω περιπτώσεις σημειώνονται σημαντικές ασυμφωνίες με το Ε.Χ.Π. Πέραν όμως των παραβιάσεων αυτών, η χωροθέτηση έργων Α.Π.Ε. σε περιορισμένους γεωγραφικούς χώρους, όπως η νησιωτική, η οποία ενίοτε καταλαμβάνει όλη την έκταση του νησιού, σαφέστατα επηρεάζει τις υφιστάμενες ανθρώπινες δραστηριότητες και, πολύ περισσότερο, μετατρέπει την παραδοσιακή νησιωτική φυσιογνωμία σε

βιομηχανική περιοχή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ενδεικτικά παρουσιάζονται στα σχήματα 6.5 η γεωγραφική απεικόνιση των αιτήσεων ή των αδειών παραγωγής αιολικών πάρκων στις νήσους Αστυπάλεια και Αμοργό. Ανάλογες είναι οι εικόνες που παρουσιάζουν τα περισσότερα ελληνικά νησιά (Ιος, Μήλος, Κίμωλος, Κρήτη, Άνδρος, Ικαρία, Κάσος).



Σχήμα 6.5α: Γεωγραφική απεικόνιση υφιστάμενων αιτήσεων – αδειών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από αιολικά πάρκα στην Αστυπάλεια.



Σχήμα 6.5β: Γεωγραφική απεικόνιση υφιστάμενων αιτήσεων – αδειών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από αιολικά πάρκα στην Αμοργό.

Αμφίβολο είναι επίσης αν κάποιος από τους φορείς των αιτήσεων – αδειών προέβη σε έγκαιρη ενημέρωση των τοπικών νησιωτικών και μη κοινωνιών για την πρότασή του. Στις περισσότερες περιπτώσεις οι αιτήσεις – άδειες αυτές γνωστοποιούνται έμμεσα στις τοπικές κοινωνίες και στους επίσημους εκπροσώπους τους (Δημοτικά Συμβούλια, Σύλλογοι κλπ) μέσω των μαζικών μέσων ενημέρωσης, του χάρτη της Ρ.Α.Ε. κλπ. Είναι πλέον αυτονόητο ότι, δεδομένου της ανύπαρκτης πολιτικής προσέγγισης και του

μεγέθους των αιτήσεων – αδειών, στην αντίληψη των κατοίκων των νησιών τούτες περισσότερο ομοιάζουν με επεκτατικές επιδρομές παρά με αναπτυξιακά έργα.

Επίσης, είναι μαθηματικά βέβαιο, κυρίως λόγω των τεράστιων γεωγραφικών εκτάσεων των αιτήσεων – αδειών αυτών αλλά και λόγω της σχετικής κείμενης νομοθεσίας, ότι σε καμία από τις περιπτώσεις αυτές δεν έχει επιλυθεί το θέμα της εξασφάλισης του δικαιώματος επέμβασης στις απαιτούμενες εκτάσεις, ούτε καν έχουν ενημερωθεί οι όποιοι ιδιοκτήτες. Σε περιπτώσεις λοιπόν που οι ιδιοκτήτες ενημερώνονται έμμεσα για τις αιτήσεις επί των εκτάσεών τους, αισθάνονται απειλούμενοι από δυνάμεις που ούτε γνωρίζουν, ούτε δύνανται να εντοπίσουν, ενώ προκαλείται το δικαίωμα επί των ιδιοκτησιών τους, καθώς και το αίσθημα της υπερηφάνειας και της αυτοτέλειας.

Ως προφανείς και αναμενόμενες συνέπειες των ανωτέρω είναι η σταδιακή αντιστροφή του άκρως θετικού κλίματος υπέρ της αξιοποίησης των Α.Π.Ε. το οποίο επικρατούσε έως και το 2008 – 2009 στην Ελλάδα [26]. Μετά το 2009, για πρώτη φορά είδαμε στη χώρα σημαντικές αντιδράσεις κατά των Α.Π.Ε., οι οποίες εκφράστηκαν είτε μέσω λαϊκών κινητοποιήσεων, είτε μέσω επίσημων αποφάσεων των Δημοτικών και Περιφερειακών Συμβουλίων. Αναμφίβολα λοιπόν, η συμβολή των υφιστάμενων αιτήσεων – αδειών μεγάλου μεγέθους στη διαμόρφωση της κοινής γνώμης για την αξιοποίηση των Α.Π.Ε. στην Ελλάδα, ήταν άκρως αρνητική.

Είναι δεδομένο ότι η απρόσκοπτη υλοποίηση του οποιουδήποτε έργου προϋποθέτει την ύπαρξη θετικής κοινής γνώμης για αυτό. Το αρνητικό κλίμα που, για τους προαναφερόμενους λόγους, έχει διαμορφωθεί κατά των υφιστάμενων αιτήσεων – αδειών μεγάλου μεγέθους, ιδιαίτερα στο νησιωτικό χώρο, αποτελεί την πρώτη, βασική αρνητική παράμετρο σχετικά με την υλοποίησή τους.

Η αρνητική κοινή γνώμη, σε συνδυασμό με το μέγεθος των προϋπολογισμών των υφιστάμενων αιτήσεων – αδειών μεγάλου μεγέθους, καθιστά εξαιρετικά αμφίβολη την εξασφάλιση της χρηματοδότησης του έργου, ιδιαίτερα σε οικονομικά αβέβαιες περιόδους όπως η τρέχουσα.

Επιπλέον το στρεβλωμένο υφιστάμενο νομοθετικό πλαίσιο στην Ελλάδα προτάσσει τη χρονική προτεραιότητα μιας αίτησης για λήψη άδειας παραγωγής στη Ρ.Α.Ε., ακόμα κι αν αυτή στερείται της οποιασδήποτε στοιχειώδους ωριμότητας. Ενίοτε λοιπόν έχουν καταγραφεί ώριμες αιτήσεις, με πιστοποιημένες μετρήσεις δυναμικού Α.Π.Ε. εντός της θέσης εγκατάστασης, με εξασφαλισμένο το δικαίωμα επέμβασης επί των εκτάσεων των έργων, με το σύνολο των θετικών γνωμοδοτήσεων από τις εμπλεκόμενες Υπηρεσίες στην αδειοδότηση του έργου, με εξασφαλισμένη ακόμα και τη θετική κοινή γνώμη για την υλοποίηση του έργου, να μην αξιολογούνται λόγω του ότι υπάρχει εδαφική επικάλυψη με αιτήσεις χωρίς ίχνος ωριμότητας, μόνο και μόνο λόγω της χρονικής προτεραιότητας των τελευταίων. Έχουν παρατηρηθεί περιπτώσεις αιτήσεων ή αδειών παραγωγής στη Ρ.Α.Ε. αιολικών πάρκων σε νησιωτικά συμπλέγματα με ταυτόχρονη διασύνδεση που υπερβαίνουν την πενταετία χωρίς να έχουν λάβει ακόμα άδεια παραγωγής ή άδεια εγκατάστασης αντίστοιχα, προφανώς λόγω των σημαντικών προβλημάτων που παρουσιάζουν. Οι αιτήσεις ή οι άδειες αυτές, για πλέον των πέντε ετών, δεσμεύουν τις ευθύς – εξαρχής περιορισμένες γεωγραφικά εκτάσεις, αποτρέποντας την υποβολή ώριμων αιτήσεων, μικρότερου μεγέθους και περισσότερο ρεαλιστικών για να υλοποιηθούν.

Εν κατακλείδι, η συμβολή των υφιστάμενων αιτήσεων μεγάλου μεγέθους προς τον εθνικό στόχο της μεγιστοποίησης της αξιοποίησης των Α.Π.Ε. είναι επίσης αρνητική.

Σε πολλές περιπτώσεις έργων Α.Π.Ε. μεγάλου μεγέθους με άδεια παραγωγής, οι φορείς τους, στη γενικότερη πολιτική προώθησης και προβολής τους, αναφέρονται σε αυτά ως έργα δημοσίου συμφέροντος, ύψιστης εθνικής σημασίας, προβάλλοντας σειρά θετικών συνεπειών από την υλοποίησή τους, όπως:

- Την αποφυγή εκπομπής σημαντικών ποσοτήτων αερίων ρύπων, λόγω του περιορισμού λειτουργίας των θερμοηλεκτρικών σταθμών.
- Τη στήριξη της εθνικής οικονομίας μέσω της φορολόγησης των εσόδων από την πώληση της παραγόμενης ενέργειας και της μείωσης των εκπομπών αερίων ρύπων.
- Τη δημιουργία θέσεων εργασίας κυρίως κατά την κατασκευή των έργων και, δευτερευόντως, κατά τη μόνιμη λειτουργία τους, οι οποίες συνήθως δεν αριθμούνται.
- Την ετήσια καταβολή του 3% των ακαθάριστων εσόδων των έργων ως δημοτικά τέλη προς τους οικείου Ο.Τ.Α.

Είναι ευνόητο ότι οι ανωτέρω αναφερόμενες και συνήθως προβεβλημένες θετικές συνέπειες είναι οι αυτονόητες, οι προφανείς που θα περίμενε κανείς από ένα έργο αξιοποίησης Α.Π.Ε. Σαφώς η παραγωγή ενέργειας από Α.Π.Ε. συμβάλει στον περιορισμό των θερμοηλεκτρικών μονάδων και στη μείωση των αερίων ρύπων. Σαφώς τα έργα αυτά, ως έργα εμπορικά, υπόκεινται στην καταβολή εθνικού φόρου, όπως κάθε άλλη εμπορική δραστηριότητα.

Από την άλλη όμως μεριά, σε καμία περίπτωση δεν αριθμήθηκε ο αναμενόμενος αριθμός θέσεων εργασίας. Είναι κοινό μυστικό ότι ο αριθμός των απαιτούμενων εργαζόμενων για τη λειτουργία των έργων ηλεκτροπαραγωγής από Α.Π.Ε. είναι δυσανάλογα μικρός σε σχέση με το μέγεθος των έργων και τον προϋπολογισμό τους. Ουσιαστική δημιουργία νέων θέσεων εργασίας μπορεί να προκύψει από έργα ηλεκτροπαραγωγής Α.Π.Ε. μόνο έμμεσα, αξιοποιώντας δηλαδή τα οικονομικά οφέλη από τα έργα αυτά για τη δημιουργία νέων υποδομών και την ανάπτυξη νέων επαγγελματικών δραστηριοτήτων.

Επίσης ποτέ δεν ετέθη το ερώτημα, γιατί το ύψος των ανταποδοτικών τελών έχει περιοριστεί στο 3% και κατά πόσο είναι εφικτό να αυξηθεί.

Τέλος ένα μεγάλο ερώτημα είναι από πού προέρχονται τα απαιτούμενα κεφάλαια για την υλοποίηση των μεγάλων έργων Α.Π.Ε. και πού θα καταλήξουν τα έσοδα από τη λειτουργία τους. Θα μείνουν και θα επανασπενδυθούν στη χώρα, πολλαπλασιάζοντας την προστιθέμενη αξία των έργων, ή θα διατεθούν για την αποπληρωμή υπέρογκων δανείων από εξωτερικούς χρηματοδότες, ελαχιστοποιώντας έτσι τα οικονομικά οφέλη από την κατασκευή και τη λειτουργία τους στα ελάχιστα δυνατά για την εθνική και την τοπική οικονομία;

Είναι αυτονόητο ότι η οικονομική δυσπραγία και η έλλειψη ρευστότητας που καταγράφεται την τρέχουσα χρονική περίοδο οικονομικής κρίσης στην Ελλάδα οδηγεί μοιραία στην αναζήτηση κεφαλαίων από το εξωτερικό. Συνεπώς η κατασκευή και η λειτουργία των προτεινόμενων έργων Α.Π.Ε. επί της ουσίας θα αλλάξει τον τελικό προορισμό του εθνικού συναλλάγματος για την αγορά ενέργειας από τις πετρελαιοπαραγωγές χώρες προς τους χρηματοδοτικούς οργανισμούς, τα λεγόμενα “funds”, ανά τον κόσμο.

Επίσης είναι αναμενόμενο ότι όπως απουσίασαν οι τοπικές κοινωνίες από το σχεδιασμό των έργων αυτών, αντίστοιχα ελάχιστα θα είναι τα αναμενόμενα οφέλη για αυτές.

Καταληκτικά, η συμβολή των υφιστάμενων αιτήσεων και αδειών Α.Π.Ε. στην ανάταση της εθνικής οικονομίας και στην ανάπτυξη των τοπικών κοινωνιών και οικονομιών, με τον τρόπο που έχουν σχεδιαστεί και αναμένεται να υλοποιηθούν είναι η ελάχιστη δυνατή. Ταυτόχρονα, με την εγκατάσταση των μεγάλων αυτών αιτήσεων, το χαρτί που λέγεται «οικονομική ανάπτυξη μέσω της αξιοποίησης Α.Π.Ε. στην Ελλάδα» πρακτικά καίγεται, αφού πρακτικά δεσμεύεται το σύνολο του γεωγραφικού και ενεργειακού χώρου, στερώντας από τη χώρα μία από τις βασικές προοπτικές υγιούς κοινωνικής και οικονομικής ανάπτυξης.

Η παραπάνω περιγραφόμενη πραγματικότητα προέκυψε μέσα από συγκεκριμένες αδυναμίες του υφιστάμενου νομοθετικού πλαισίου. Ενδεικτικά αναφέρονται οι παρακάτω:

- Η ασάφεια του νομοθετικού πλαισίου έχει οδηγήσει στην έκδοση αδειών παραγωγής αιολικών πάρκων με πιστοποιημένες μετρήσεις αιολικού δυναμικού κατά τεκμήριο μη επαρκείς, αναφορικά με τη θέση εγκατάστασης του ιστού ως προς τη θέση του αιολικού πάρκου. Το παράδοξο αυτό έχει προκύψει από το γεγονός ότι πουθενά στο κείμενο νομοθετικό πλαίσιο δεν έχει οριστεί μέγιστη απόσταση, ενδεχομένως συναρτήσει του γεωγραφικού ανάγλυφου, από το σημείο λήψης των ανεμολογικών μετρήσεων έως τη θέση ανάπτυξης του αιολικού πάρκου.
- Με τον υφιστάμενο Κανονισμό Αδειών Παραγωγής [27] ο αιτών για έκδοση άδειας παραγωγής δεν υποχρεούται να τεκμηριώσει την κυριότητά του επί της έκτασης εγκατάστασης του έργου. Το δεδομένο αυτό, σε συνδυασμό με την προαναφερόμενη ασάφεια για την τεκμηρίωση του διαθέσιμου δυναμικού Α.Π.Ε., ουσιαστικά επιτρέπει την υποβολή αιτήσεων για έκδοση άδειας παραγωγής από τον οποιοδήποτε, οπουδήποτε, χωρίς την ελάχιστη απαιτούμενη ωριμότητα της αίτησης.
- Πουθενά στο νομοθετικό πλαίσιο δεν ορίζονται μέγιστοι χρόνοι αξιολόγησης αιτήσεων για έκδοση άδειας παραγωγής από τη Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (Ρ.Α.Ε.). Παρατηρούνται έτσι αιτήσεις με χαμηλό βαθμό ωριμότητας να δεσμεύουν εκτάσεις επί σειρά ετών καθυστερώντας έτσι την υποβολή νέων ώριμων αιτήσεων στη Ρ.Α.Ε. και κωλυσιεργώντας τη γενικότερη πρόοδο στην αξιοποίηση των Α.Π.Ε. στη χώρα.

- Με υπευθυνότητα των τοπικών φορέων, χωροτακτικός σχεδιασμός σε αυτόνομες γεωγραφικές περιοχές δεν έχει προκύψει παρά σε ελάχιστες, μετρημένες περιπτώσεις (π.χ. Σάμος).
- Η κεντρική χωροθέτηση των υπεράκτιων αιολικών πάρκων ανακοινώθηκε το 2011 – 2012 από το Υ.Π.Ε.Κ.Α., για να αποσυρθεί τελικά μετά από μικρό χρονικό διάστημα.
- Τα προβλεπόμενα ανταποδοτικά οφέλη (3% επί των ακαθάριστων εσόδων) προς τους οικείους Οργανισμούς Τοπικής Αυτοδιοίκησης (Ο.Τ.Α.) είναι τα ελάχιστα δυνατά, και όπως θα τεκμηριωθεί παρακάτω, μπορούν να αυξηθούν σημαντικά χωρίς να βλάπτεται η βιωσιμότητα της επένδυσης.
- Δεν υπάρχει κανένα μέτρο ή κίνητρο ή ειδική νομοθετική ρύθμιση για τη συμμετοχή των Ο.Τ.Α. σε επενδύσεις Α.Π.Ε. Οι Ο.Τ.Α. αντιμετωπίζονται όπως ένας ιδιωτικός φορέας, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη ο Κανονισμός Λειτουργίας τους και, πολύ περισσότερο, η οικονομική δυσπραγία που χαρακτηρίζει τη συντριπτική πλειοψηφία τους, στερώντας τους έτσι τη δυνατότητα για συμμετοχή σε κάθε είδους επενδύσεις.
- Τέλος δεν υπάρχει κανένα μέτρο προστασίας των αυτόνομων ή διασυνδεδεμένων νησιωτικών συστημάτων από υπερεπενδύσεις σε έργα Α.Π.Ε. μεγάλης ισχύος, που θα δεσμεύουν όλο το δυναμικό Α.Π.Ε. που δύναται να αξιοποιηθεί στο σύστημα, όπως αυτό περιορίζεται είτε από γεωγραφικούς – χωροτακτικούς όρους, είτε από όρους μέγιστης δυνάμενης να απορροφηθεί ισχύος από το αυτόνομο ενεργειακό σύστημα ή από τη μέγιστη δυνατότητα μεταφοράς του καλωδίου διασύνδεσης.

6.4.1.γ. Προτάσεις προς μεγιστοποίησης συμβολής Α.Π.Ε. στην εθνική ανάπτυξη

- Διαχείριση υφιστάμενων αδειών και αιτήσεων παραγωγής

Βάσει του Ν. Ν.4152/13. Φ.Ε.Κ. 107Α/9-5-2013, για τις άδειες παραγωγής που υφίστανται για περισσότερα από τέσσερα έτη και δεν έχει εκδοθεί άδεια εγκατάστασης, προβλέπεται η ετήσια καταβολή τέλους 1.000€/MW αδειοδοτημένης ισχύος. Το μέτρο αυτό είναι θετικό και θα συμβάλει σε ξεκαθάρισμα του τοπίου, παρόλο που μέχρι να εφαρμοστεί θα έχει παρέλθει ένα διάστημα διατήρησης αδειών παραγωγής που υπό περιπτώσεις μπορεί να ξεπεράσει τα οκτώ έτη από την έκδοση του νόμου.

Δεν υπάρχει πρόβλεψη, ωστόσο για τις αιτήσεις μεγάλου μεγέθους στη Ρ.Α.Ε., για πολλές από τις οποίες η αξιολόγηση καθυστερεί πλέον των τριών ετών. Ο αριθμός των αιτήσεων αυτών είναι μεγάλος, δεσμεύοντας εξίσου σημαντικές εκτάσεις. Η θέσπιση ενός μέγιστου χρονικού διαστήματος, της τάξης των δύο ετών, για την αξιολόγηση των αιτήσεων αυτών, σαφέστατα θα βοηθήσει. Η Ρ.Α.Ε. θα οφείλει να αξιολογήσει την αίτηση εντός του διαστήματος. Αν η αίτηση δε δύναται να αξιολογηθεί λόγω ελλείψεων του φακέλου σαφέστατα αρμοδιότητας του αιτούντα, τότε μετά την παρέλευση του μέγιστου χρονικού διαστήματος, τούτη θα πρέπει να απορρίπτεται.

- Ανταποδοτικά τέλη προς τους οικείους Ο.Τ.Α.

Ένα αιολικό πάρκο που εγκαθίσταται σε θέση με τελικό συντελεστή απασχόλησης (μετά απωλειών) της τάξης του 40% (τέτοιο αιολικό δυναμικό διαθέτουν οι περισσότερες περιοχές στη νησιωτική χώρα), παρουσιάζει αρχικό κόστος εγκατάστασης 1.100€/kW, εμπορεύεται την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια με τιμή 0,090€/kWh, υφίσταται 10% ετήσια απόρριψη ενέργειας και αποδίδει 3% των ετήσιων ακαθάριστων εσόδων του στον οικείο Ο.Τ.Α., παρουσιάζει περίοδο αποπληρωμής περίπου 3 έτη και εσωτερικό βαθμό απόδοσης περίπου 27% επί των ιδίων κεφαλαίων (χρηματοδοτικό σχήμα 40% ίδια κεφάλαια και 60% δάνειο με περίοδο αποπληρωμής 10 ετών και επιτόκιο 7,0%). Για το ίδιο έργο και με τις ίδιες υποθέσεις εργασίας, αν τα τέλη Ο.Τ.Α. αυξηθούν στο 15%, τότε η περίοδος αποπληρωμής αυξάνεται σε 5,5 έτη και ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης μειώνεται σε 18%. Συνεπώς με την αύξηση των ανταποδοτικών τελών προς τους οικείους Ο.Τ.Α. από το 3% στο 15% των ακαθάριστων εσόδων η επένδυση συνεχίζει να παρουσιάζει υψηλή οικονομική απόδοση. Το ποσοστό ανταποδοτικών τελών δύναται να αυξηθεί πολύ περισσότερο στις περιπτώσεις που η επένδυση έχει λάβει κάποιο είδους επιδότηση. Γενικά το ύψος των ανταποδοτικών τελών θα πρέπει να εξεταστεί ανά περίπτωση συναρτήσει της τεχνολογίας παραγωγής, του μεγέθους του έργου, της λήψης επιδότησης κλπ.

Παρόλο που ενίοτε έχει τεθεί είτε από την Τοπική Αυτοδιοίκηση είτε από τον ακαδημαϊκό και μελετητικό κόσμο η δυνατότητα αύξησης των ανταποδοτικών τελών, χωρίς ουδέποτε να υιοθετηθεί, το ελληνικό κράτος επέβαλλε ειδικές εισφορές στους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής από Α.Π.Ε. που κυμαίνονται από 10% για τα αιολικά πάρκα έως άνω του 30% για τους φωτοβολταϊκούς σταθμούς, προκειμένου να συμβάλουν με αυτό τον τρόπο στις εθνικές δανειακές υποχρεώσεις. Οι εισφορές αυτές αποδίδονται για κάλυψη δανειακών οφειλών, χωρίς να προσφέρουν τίποτα περισσότερο στον εθνικό προϋπολογισμό. Είναι όμως αυτονόητο ότι, αν τα χρήματα αυτά επενδυθούν αποδοτικά στην ανάπτυξη των τοπικών κοινωνιών, μέσω της κατασκευής υποδομών και αναπτυξιακών έργων στη γεωργία, στον τουρισμό, στη μεταποίηση, στην προστασία και ανάδειξη του περιβάλλοντος, τα έμμεσα εθνικά έσοδα από τη φορολόγηση των νέων δραστηριοτήτων, από τη δημιουργία εκατοντάδων νέων θέσεων εργασίας ανά έργο, θα είναι πολύ υψηλότερα. Απαραίτητη προϋπόθεση για την επιτυχή εφαρμογή μιας τέτοιας πολιτικής είναι η δημιουργία ειδικών κωδικών στους προϋπολογισμούς των Ο.Τ.Α. για τη διαχείριση των κεφαλαίων αυτών και ο αυστηρός έλεγχος για τη διάθεσή τους σε συγκεκριμένα αναπτυξιακά έργα.

Τέλος ο επενδυτικός κόσμος θα πρέπει να συνειδητοποιήσει ότι η στήριξη της ανάπτυξης των τοπικών κοινωνιών θα προκαλέσει άμεσα αύξηση στη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, συνεπώς περιορισμό της ετήσιας απόρριψης και αύξηση των ακαθάριστων εσόδων από έργα Α.Π.Ε. Επιπλέον η ανάπτυξη της ελληνικής επαρχίας θα οδηγήσει σε πολλαπλασιασμό των προοπτικών για επιπλέον επενδύσεις, όχι μόνο στον τομέα της ενέργειας, συνεπώς θα διευρύνει το πεδίο δραστηριοποίησης του επενδυτικού κόσμου. Ουσιαστικά δηλαδή είναι πιθανή μελλοντικά η επιστροφή στους ίδιους τους επενδυτές σε πολλαπλάσια μεγαλύτερο ύψος των ανταποδοτικών τελών.

- Στήριξη της τοπικής επιχειρηματικότητας στον τομέα των Α.Π.Ε.

Πολύ περισσότερα, ωστόσο, είναι τα οφέλη που αναμένονται για την ελληνική επαρχία στην περίπτωση που στα έργα ηλεκτροπαραγωγής από Α.Π.Ε. προκύψει επενδυτική συμμετοχή τοπικών φορέων. Δεκάδες παραδείγματα ανάπτυξης έργων Α.Π.Ε. από εταιρείες λαϊκής βάσης ή δημοτικές επιχειρήσεις συναντώνται στον ευρωπαϊκό χώρο, στην Αυστραλία και στις Η.Π.Α. [14-19]. Στις περιπτώσεις αυτές είναι ευνόητο ότι τα οικονομικά οφέλη από τα έργα Α.Π.Ε. μεγιστοποιούνται, αφού τα έσοδα από τη λειτουργία τους επιστρέφουν σε φορείς που εδρεύουν και δραστηριοποιούνται στην ευρύτερη περιοχή ανάπτυξής τους.

Ιδιαίτερα σημαντική είναι η συμμετοχή των Ο.Τ.Α. σε τέτοιους είδους επενδύσεις. Η εγγυημένη οικονομική απόδοση των έργων δύναται να αποτελέσει τη βέλτιστη λύση – ίσως και μοναδική – για την έξοδό τους από τη δεινή οικονομική κατάσταση στην οποία βρίσκονται οι περισσότεροι. Η οικονομική αδυναμία των περισσότερων Ο.Τ.Α. αποτελεί το βασικό εμπόδιο για τη συμμετοχή τους σε επενδύσεις με, για τα δεδομένα τους, υψηλά αρχικά κόστη. Για το σκοπό αυτό, είναι απαραίτητη η θέσπιση βοηθητικών μέτρων, όπως:

- Απαλλαγή από την υποχρέωση τεκμηρίωσης της οικονομικής δυνατότητας για την υλοποίηση του έργου κατά τη φάση λήψης άδειας παραγωγής από τη Ρ.Α.Ε. Μετά τη λήψη άδειας παραγωγής ο Ο.Τ.Α. – κάτοχος άδειας παραγωγής, μπορεί να διαπραγματευτεί με εξωτερικούς επενδυτές τη χρηματοδότηση του έργου.
- Χρηματοδότηση των έργων από τον κρατικό προϋπολογισμό και αποπληρωμή τους με την έναρξη της λειτουργίας τους.

Προφανώς η συμμετοχή των Ο.Τ.Α. σε επενδύσεις Α.Π.Ε. θα πρέπει γενικότερα να στηριχτεί σε ένα εξειδικευμένο νομικό πλαίσιο, θα πρέπει να συνοδευτεί με ένα ευρύ πρόγραμμα ενημέρωσης για τις επενδυτικές δυνατότητες, θα πρέπει να υλοποιηθεί κάτω από ένα αυστηρό πλαίσιο ελέγχου και ειδικό καθεστώς λειτουργίας, και θα πρέπει να στηριχτεί κατά την αδειοδοτική διαδικασία κατά προτεραιότητα σε σχέση με λοιπά έργα.

Τέλος η τοπική επιχειρηματικότητα, δημόσια ή ιδιωτική, θα πρέπει να προστατευτεί από τις επενδύσεις μεγάλου μεγέθους, οι οποίες καταλαμβάνουν μεγάλα ποσοστά από τη δυνάμενη να εγκατασταθεί ισχύ σε ένα γεωγραφικό χώρο, όπως τούτη περιορίζεται από χωροτακτικούς και ενεργειακούς όρους, ειδικά όταν ο γεωγραφικός χώρος είναι νησιωτικό σύστημα, διασυνδεδεμένο ή μη με το ηπειρωτικό. Ειδικά για τα νησιά θα μπορούσαν να θεσπιστούν περιορισμοί μέγιστης επιτρεπόμενης ισχύος ανά αίτηση, το μέγεθος της οποίας θα καθορίζεται ως ένα ποσοστό της αιχμής ζήτησης του νησιωτικού συστήματος. Σε πολύ μικρά

συστήματα, με αιχμή ζήτησης κάτω των 10MW, τούτος ο περιορισμός δεν μπορεί να εφαρμοστεί, αφού το μικρό μέγεθος της επένδυσης, σε συνδυασμό με τη χαμηλή ετήσια κατανάλωση, ενδεχομένως να την καθιστούν μη βιώσιμη ή, έστω, μη ελκυστική.

- Βασικά σημεία επί του υφιστάμενου πλαισίου

Η έκδοση αδειών παραγωγής μετά το 2011 για έργα ανώριμα, οδήγησε σε σημαντικές καθυστερήσεις για την ανάπτυξη των Α.Π.Ε., όπως τεκμηριώθηκε ανωτέρω. Φαίνεται λοιπόν ότι η άρση της υποχρέωσης εξασφάλισης του δικαιώματος χρήσης γης, ακόμα και από την πρώτη φάση της έκδοσης άδειας παραγωγής, ήταν μάλλον εσφαλμένη και θα πρέπει να αναιρεθεί, αν όχι για το σύνολο των συνοδών έργων (οδοποιία, δίκτυο διασύνδεσης κλπ), τουλάχιστον για τις κύριες εκτάσεις εγκατάστασης του έργου Α.Π.Ε.

Ειδικά για τα αιολικά πάρκα, η κατοχή μετρήσεων αιολικού δυναμικού από τον επενδυτή σε θέσεις εντός του γηπέδου εγκατάστασης ή, ανάλογα με τη μορφολογία του εδάφους, σε απόσταση που σε καμία περίπτωση δε θα υπερβαίνει τα 5km, θα πρέπει να απαιτείται για την έκδοση της άδειας παραγωγής.

Τέλος απαιτούνται νομοθετικές ρυθμίσεις για όλα τα θέματα που θίχτηκαν ανωτέρω, όπως:

- Η διευκόλυνση των Ο.Τ.Α. για την επενδυτική συμμετοχή τους σε έργα Α.Π.Ε.
- Η ρύθμιση του ανταποδοτικού τέλους ανάλογα με παραμέτρους, όπως το συντελεστή απασχόλησης του έργου, το μέγεθός του, την τεχνολογία, το αν έχει λάβει ή όχι κάποιου είδους επιδότηση κλπ
- Η προστασία των νησιωτικών περιοχών από μεγάλα έργα Α.Π.Ε., και η ενίσχυση της τοπικής επιχειρηματικότητας και της σύστασης εταιρειών λαϊκής βάσης
- Η απόρριψη των αιτήσεων μεγάλου μεγέθους με ταυτόχρονη πρόταση διασύνδεσης με περίοδο αξιολόγησης για λήψη άδειας παραγωγής άνω των τριών ετών.

- Αναστροφή αρνητικού κλίματος

Η αποκατάσταση του προϋπάρχοντος θετικού κλίματος για τις Α.Π.Ε. είναι ουσιώδης προϋπόθεση για την ταχεία και ομαλή αξιοποίησή τους. Αυτή η αναγκαία αποκατάσταση του κλίματος σαφώς προϋποθέτει την καλλιέργεια αισθήματος εμπιστοσύνης στις τοπικές κοινωνίες προς το επίσημο κράτος και τον επενδυτικό κόσμο. Είναι προφανές ότι η κοινή γνώμη δεν είναι κατά των Α.Π.Ε., αλλά κατά συγκεκριμένων προτεινόμενων έργων μεγάλου μεγέθους. Συνεπώς αναγκαία συνθήκη για την αναστροφή του σημερινά υφιστάμενου αρνητικού κλίματος είναι η ανάκληση και η απόρριψη όλων των αδειών και αιτήσεων μεγάλου μεγέθους, ειδικά εκείνων που αναφέρονται σε νησιωτικά συστήματα με ταυτόχρονες προτάσεις διασύνδεσης. Στη συνέχεια θα πρέπει να ληφθούν όλα τα ανωτέρω προτεινόμενα μέτρα στήριξης των συμφερόντων των τοπικών κοινωνιών. Με δεδομένα τα ανωτέρω ρηξικέλευθα, για τα ελληνικά δεδομένα, πλην όμως αυτονόητα μέτρα, μία σωστή πολιτική ενημέρωσης και προβολής των έργων Α.Π.Ε. είναι δυνατό να επαναφέρει το θετικό κλίμα για τις Α.Π.Ε. στην Ελλάδα.

6.4.2. Το Σκανδιναβικό πρότυπο

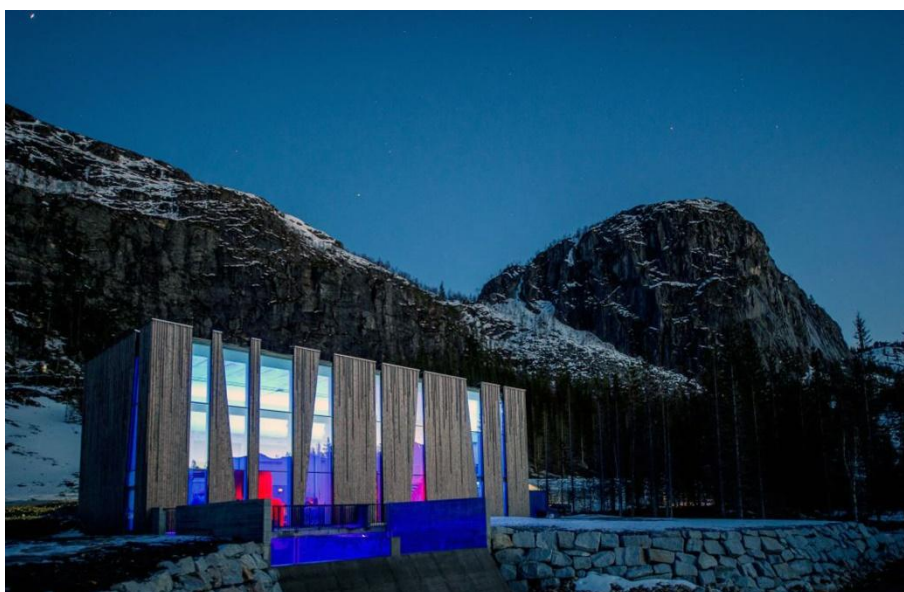
Οι χώρες της Σκανδιναβίας αποτελούν πρότυπο στην αξιοποίηση των διαθέσιμων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Η Δανία ήδη επιδιώκει να εφαρμόσει την πιο φιλόδοξη πολιτική κόντρα στην κλιματική αλλαγή, σκοπεύοντας να σταματήσει παντελώς τη χρήση ορυκτών καυσίμων, όχι μόνο στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας όπως ευελπιστούν άλλες χώρες, αλλά και στον τομέα των μεταφορών. Η Σκανδιναβική χώρα αποτελεί πρωτοπόρο της αιολικής ενέργειας και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχουν ήδη μερίδιο 40 τοις εκατό στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, με στόχο το 50 τοις εκατό ως το 2020. Η εντατικοποίηση της εφαρμογής αυτής της φιλόδοξης πολιτικής τυγχάνει σχεδόν ολικής αποδοχής, όπως και στη γειτονική Γερμανία, στην οποία οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αναμένεται να φτάσουν μερίδιο 30 τοις εκατό φέτος.

Η επικράτηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας εκτιμάται πως θα ρίξει δραματικά την τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά θα αυξήσει ιδιαίτερα το κόστος λειτουργίας των παραδοσιακών

σταθμών παραγωγής. Οι σταθμοί αυτοί λειτουργούν με άνθρακα, φυσικό αέριο ή και ουράνιο, και θα χρειάζονται ως εναλλακτική πηγή ενέργειας σε περίπτωση ανάγκης.

Για αυτό το λόγο οι κύριες εταιρείες παροχής ηλεκτρικής ενέργειας σκοπεύουν να κλείσουν τους παραδοσιακούς σταθμούς το συντομότερο δυνατό, αλλά η κυβέρνηση της Δανίας δεν επιθυμεί να πάρει αυτό το ρίσκο και επιδοτεί προς το παρόν τις εταιρείες να τους κρατήσουν ανοικτούς, χωρίς να αρχίσουν να έχουν ζημιές.



Εικόνες 6.5: Εντυπωσιακή αρχιτεκτονική εναρμονισμένη με το εκπληκτικό φυσικό τοπίο στον υδροηλεκτρικό σταθμό του Øvre Forsland στη Νορβηγία.

Αντίστοιχα, στη Νορβηγία το 2011 από τις 128.000GWh που παρήχθησαν, οι 122.000GWh προήλθαν από υδροηλεκτρικά έργα, οι 4.795GWh από θερμοηλεκτρικούς σταθμούς και οι 1.283GWh από αιολικά πάρκα. Η ετήσια εγχώρια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας την ίδια χρονιά ήταν 114.000GWh. Η συμμετοχή των υδροηλεκτρικών σταθμών στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανέρχεται στο 95%, συμβάλλοντας σημαντικά στην εξασφάλιση φθηνής ηλεκτρικής ενέργειας. Την πενταετία 2004 – 2009 οι μέση ετήσια ειδική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στη Νορβηγία ήταν 26-27MWh ανά κάτοικο, το αντίστοιχο νούμερο το 2009 για στην Ευρωπαϊκή Ένωση ήταν 7,4MWh ανά κάτοικο. Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ανά κάτοικο στη Νορβηγία εμφανίζεται περίπου 4 φορές υψηλότερη από ό,τι στην

Ευρωπαϊκή Ένωση, γεγονός που αντικατοπτρίζει το ότι η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στη Νορβηγία προωθείται εις βάρος των συμβατικών ορυκτών καυσίμων ,π.χ. πετρελαίου, ακριβώς εξαιτίας του ότι είναι φθηνή και άφθονη.

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ισλανδία βασίζεται αποκλειστικά σε Α.Π.Ε., συγκεκριμένα σε υδροηλεκτρική ενέργεια (περίπου 70%) και γεωθερμία υψηλής ενθαλπίας (περίπου 30%). Οι θερμοηλεκτρικοί σταθμοί συμβάλουν στην ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας λιγότερο από 0,2%. Όπως και στη Νορβηγία, η ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στην Ισλανδία το 2008 ήταν περίπου επτά φορές υψηλότερη από την Ευρωπαϊκή Ένωση των 15 μελών.

Όπως ήδη αναπτύχθηκε παραπάνω, οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από Α.Π.Ε. προσφέρονται περισσότερο από οποιαδήποτε άλλη τεχνολογία για τοπική ανάπτυξη μέσω της επενδυτικής συμμετοχής μικρών επενδυτών στο χρηματοδοτικό σχήμα τους. Αναμφίβολα, η τεχνολογία Α.Π.Ε. με τις περισσότερες εγκαταστάσεις στον κόσμο είναι τα αιολικά πάρκα. Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν κάποιες χαρακτηριστικές περιπτώσεις ενεργής συμμετοχής ντόπιων επενδυτών στην κατασκευή αιολικών πάρκων.

Τα αιολικά πάρκα κοινοτήτων (communities wind parks) έχουν αναπτυχθεί και ανήκουν σε ντόπιους επενδυτές, όπως αγρότες, επιχειρηματίες, σχολικούς οργανισμούς, εταιρείες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και άλλου είδους νομικά πρόσωπα του ιδιωτικού ή δημόσιου τομέα. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό στις περιπτώσεις αυτές είναι ότι οι συμμετέχοντες από τις τοπικές κοινότητες στο έργο έχουν έναν ενεργό επενδυτικό ρόλο σε αυτό, πέρα από τα όποια οφέλη προκύπτουν από την πιθανή ενοικίαση γης ή τα ανταποδοτικά δημοτικά τέλη από τη λειτουργία του έργου, τα οποία προβλέπονται στη νομοθεσία. Τα διάφορα έργα που έχουν αναπτυχθεί αφορούν είτε στην τοπική παραγωγή ενέργειας, για κάλυψη των τοπικών αναγκών και τη μείωση του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας για το ντόπιο καταναλωτή, είτε στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα, με σκοπό την εμπορία της προς εταιρείες διανομής. Στη συνέχεια παρουσιάζονται μερικές τέτοιες χαρακτηριστικές περιπτώσεις.

- Αιολικό πάρκο Herburn, Αυστραλία

Το αιολικό πάρκο Herburn στην Αυστραλία βρίσκεται στο λόφο Leonards Hill, στην περιοχή Daylesford, Victoria, βορειοδυτικά της Μελβούρνης. Αποτελείται από 2 ανεμογεννήτριες ονομαστικής ισχύος 2MW έκαστη. Η ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας επαρκεί για να καλύψει τις ανάγκες περίπου 2.300 νοικοκυριών. Το αιολικό πάρκο ξεκίνησε την εμπορική λειτουργία του τον Ιούνιο του 2011.

Το συγκεκριμένο αιολικό πάρκο είναι το πρώτο αιολικό πάρκο κοινοτήτων στην Αυστραλία. Η πρωτοβουλία προέκυψε εξαιτίας του ότι επικράτησε η άποψη ανάμεσα στους κάτοικους της περιοχής ότι η κυβέρνηση της Αυστραλίας δεν έκανε τις απαιτούμενες κινήσεις για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής.



Εικόνα 6.6: Το αιολικό πάρκο Herburn στην Αυστραλία.

- Δανία

Στη Δανία έχει θεσπιστεί φοροαπαλλαγή για οικογένειες και ντόπια νοικοκυριά τα οποία συμβάλουν στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω μονάδων Α.Π.Ε. για την ίδια την κοινότητά τους. Από το 2001 πάνω από 100.000 συμμετέχουν σε εταιρείες λαϊκής βάσης ανάπτυξης αιολικών πάρκων, στις οποίες τελικά οφείλεται περίπου το 86% των ανεμογεννητριών που έχουν εγκατασταθεί στη Δανία. Αποτέλεσμα της μαζικής συμμετοχής των Δανών πολιτών στην ανάπτυξη των αιολικών πάρκων είναι τα έργα αξιοποίησης αιολικής ενέργειας στη χώρα να απολαμβάνουν ευρείας κοινωνικής αποδοχής.

Το 1997 το νησί Samsø επιλέχθηκε ως μοντέλο πράσινου νησιού. Μεταξύ των αποτελεσμάτων των δράσεων που ακολούθησαν ήταν η κατασκευή ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου από 10 ανεμογεννήτριες, ισχύος 2,3MW έκαστη, το οποίο χρηματοδοτήθηκε 100% από τους κατοίκους του νησιού. Επί του εδάφους του νησιού έχουν εγκατασταθεί άλλες 11 ανεμογεννήτριες. Το 100% των αναγκών σε ηλεκτρισμό στο νησί παράγεται από το αιολικό πάρκο, ενώ το 75% των αναγκών σε θερμότητα προέρχεται από ηλιακούς συλλέκτες και βιομάζα.



Εικόνα 6.7: Το υπεράκτιο αιολικό πάρκο στο νησί Samsø.

- Γερμανία

Στη Γερμανία εκατοντάδες χιλιάδες πολιτών έχουν επενδύσει στην κατασκευή αιολικών πάρκων κοινοτήτων, ενώ χιλιάδες μικρομεσαίες επιχειρήσεις δραστηριοποιούνται με επιτυχία στο χώρο ανάπτυξης αιολικών πάρκων, ο οποίος το 2008 απασχολούσε 90.000 εργαζομένους και συνέβαλε κατά 8% στην κάλυψη της ετήσιας εγχώριας κατανάλωσης ηλεκτρισμού. Όπως και στη Δανία, η αξιοποίηση αιολικής ενέργειας στη Γερμανία έχει, επίσης, τύχει ευρείας αποδοχής, με τη συμβολή των αιολικών πάρκων κοινοτήτων προς αυτή την κατεύθυνση να είναι οπωσδήποτε σημαντική.

Στη Γερμανική επαρχία North Frisia έχουν αναπτυχθεί περισσότερα από 69 αιολικά πάρκα με συνολική ονομαστική ισχύ 700MW, με ποσοστιαία συμμετοχή των ντόπιων επενδυτών που ξεπερνάει το 90%.

- Αιολικό πάρκο De Zuidlob, Ολλανδία

Το αιολικό πάρκο De Zuidlob στην Ολλανδία κατασκευάστηκε με τη συνεργασία 63 ντόπιων επενδυτών (κυρίως αγρότες), του Δήμου του Zeewolde, της Περιφέρειας Flevoland, του κράτους και της ιδιωτικής εταιρείας Nuon. Το αποτέλεσμα ήταν η κατασκευή ενός από τα μεγαλύτερα αιολικά πάρκα στον κόσμο, με συνολική ονομαστική ισχύ στα 122,4MW.

Το αιολικό πάρκο αποτελείται από 36 ανεμογεννήτριες με ονομαστική ισχύ 3,4MW έκαστη. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια επαρκεί για την κάλυψη της κατανάλωσης από 90.000 νοικοκυριά. Η έναρξη της εμπορικής λειτουργίας του αιολικού πάρκου ξεκίνησε το Δεκέμβριο του 2012.



Εικόνα 6.8: Εντυπωσιακή αρμονία ανεμογεννητριών και καλλιέργειας τουλίπας στην Ολλανδία.

- Μεγάλη Βρετανία

Έως το 2012 είχαν ήδη δραστηριοποιηθεί 43 εταιρείες λαϊκής βάσης στο χώρο της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στη Μεγάλη Βρετανία. Οι εταιρείες αυτές ιδρύθηκαν και ανήκουν σε απλούς πολίτες, στην πλειοψηφία τους κάτοικοι των περιοχών στις οποίες εδρεύουν, οι οποίοι επενδύουν χρόνο και χρήμα για την εγκατάσταση ανεμογεννητριών μεγάλου μεγέθους, φωτοβολταϊκών πλαισίων, υδροηλεκτρικών σταθμών για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για τις κοινότητές τους.

Η εταιρεία Bay wind Energy Co-operative ήταν η πρώτη εταιρεία λαϊκής βάσης που αναπτύχθηκε στη Μεγάλη Βρετανία, στα πρότυπα ανάλογων εταιρειών που ήδη λειτουργούσαν στη Σκανδιναβία. Η εταιρεία ιδρύθηκε το 1996 και έφτασε να αριθμεί 1.300 μετόχους, με δικαίωμα μιας ψήφου ο καθένας.

Ένα ποσοστό από τα κέρδη της εταιρείας επενδύεται σε έργα κοινής ωφέλειας για την τοπική κοινότητα, κυρίως περιβαλλοντικής προστασίας και αναβάθμισης. Το 2006 η Baywind είχε ήδη υπό την κατοχή της ένα αιολικό πάρκο πέντε ανεμογεννητριών, συνολικής ονομαστικής ισχύος 2,5MW, στη θέση Harlock Hill, κοντά στο Ulverston, το οποίο ξεκίνησε την εμπορική λειτουργία του το 1997, ενώ ακόμα κατέχει μία ανεμογεννήτρια ισχύος 600kW στο αιολικό πάρκο HaveriggII, κοντά στο Millom.

Στη Σκωτία έχει κατασκευαστεί το αιολικό πάρκο στο Isle of Gigha από την εταιρεία λαϊκής βάσης Gigha Renewable Energy. Το αιολικό πάρκο αποτελείται από τρεις ανεμογεννήτριες με συνολική ονομαστική ισχύ 675kW, οι οποίες είναι γνωστές ως «*The Dancing Ladies*»(οι κυρίες που χορεύουν). Η εμπορική λειτουργία του έργου ξεκίνησε τον Ιανουάριο του 2005. Το αιολικό πάρκο ανήκει εξ' ολοκλήρου στους κατοίκους του Gigha, οι οποίοι επανεπενδύουν τα κέρδη από τη λειτουργία του σε αναπτυξιακά έργα της κοινότητάς τους.

Ένα ακόμα αιολικό πάρκο κοινότητας είναι αυτό της εταιρείας Westmill Wind Farm Cooperative, το οποίο λειτουργεί από το Μάιο του 2008, στο χωριό Oxfordshire της περιοχής Watchfield. Αποτελείται από 5 ανεμογεννήτριες ισχύος 1,3MW έκαστη και είναι το μεγαλύτερο αιολικό πάρκο κοινότητας στη Μεγάλη Βρετανία. Χρηματοδοτήθηκε 100% από τους κατοίκους της περιοχής.



Εικόνα 6.9: Το αιολικό πάρκο Westmill στη Μεγάλη Βρετανία.

6.5. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις θερμοηλεκτρικών σταθμών

Η βασική περιβαλλοντική επίπτωση των θερμοηλεκτρικών σταθμών είναι οι εκπομπές αερίων ρύπων, που προέρχονται από την καύση των ορυκτών καυσίμων, στερεών, υγρών και αερίων. Οι κυριότεροι αέριοι ρύποι που εκπέμπονται από ένα θερμοηλεκτρικό σταθμό είναι τα οξείδια του άνθρακα (μονοξείδιο CO και διοξείδιο CO₂), οξείδια του θείου (μονοξείδιο SO και διοξείδιο SO₂), οξείδια του αζώτου NO_x, άκαυστοι υδρογονάνθρακες HC και σωματίδια (στάχτες).

Οι ειδικές εκπομπές των κυριότερων αερίων ρύπων από ένα θερμοηλεκτρικό σταθμό συναρτήσε του καυσίμου που χρησιμοποιείται παρουσιάζονται στον πίνακα 6.3 (βλέπε Κεφάλαιο 2), με βάση τα οριζόμενα στο Φ.Ε.Κ. 1526B/27-7-1999. Από τον πίνακα αυτό παρατηρείται ότι ο κυριότερος σε ποσότητα αέριος ρύπος είναι το CO₂, το οποίο αποτελεί το βασικό προϊόν, μαζί με το νερό, της τέλει καύσης υδρογονανθράκων.

Πίνακας 6.3: Εκπομπές αερίων ρύπων ανά ορυκτό καύσιμο σύμφωνα με το Φ.Ε.Κ. 1526B/27-7-1999.

Καύσιμο	Εκπομπές αερίων ρύπων (gr/kgρ καυσίμου)					
	CO ₂	SO	CO	NO	HC	Σωματίδια
Μαζούτ Νο 1(1500) Χαμηλού Θείου	3.175	14	0,585	5,363	0,188	1,832
Μαζούτ Νο 1(1500) Υψηλού Θείου	3.109	70	0,553	6,251	0,184	1,832
Μαζούτ Νο 3 (3500) Χαμηλού Θείου	3.175	14	0,585	5,363	0,188	1,832
Μαζούτ Νο 3 (3500) Υψηλού Θείου	3.091	80	0,550	5,221	0,183	1,832
Ντίζελ	3.142	6	0,572	2,384	0,191	0,286
Υγραέριο	3.030	0	0,332	2,102	0,080	0,100
Φυσικό Αέριο	2.715	0	0,332	2,102	0,080	0,100

Η εκτεταμένη χρήση των ορυκτών καυσίμων στις βιομηχανικές δραστηριότητες, και ειδικότερα στον τομέα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, έχει οδηγήσει σε αύξηση της περιεκτικότητας της γήινης ατμόσφαιρας σε CO₂. Στο Κεφάλαιο 2 είδαμε ότι, με βάση την προσομοίωση της ετήσιας λειτουργίας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας της Κρήτης, οι ετήσιες εκπομπές CO₂ ανέρχονται σε 1.725.113tn, ποσότητα που αντιστοιχεί σε 2,97tn ανά κάτοικο του νησιού.

Στον πίνακα 6.4 παρουσιάζονται οι ετήσιες εκπομπές CO₂ ανά ήπειρο στον πλανήτη, με ειδικές αναφορές σε συγκεκριμένες χώρες και γεωγραφικές περιοχές. Από τον πίνακα 6.4 αξίζει να παρατηρήσουμε τη σαφή τάση μείωσης των εκπομπών CO₂ που καταγράφεται από το 2008 έως το 2012 από τις αναπτυγμένες περιοχές του πλανήτη, δηλαδή Βόρεια Αμερική, Ευρώπη και Αυστραλία. Αντίθετα, στις αναπτυσσόμενες περιοχές εμφανίζεται αύξηση των εκπομπών CO₂.

Πίνακας 6.4: Ανάλυση παγκόσμιων εκπομπών CO₂ (σε εκατομμύρια τόνους).

Ήπειρος / Περιοχή / Χώρα	2008	2009	2010	2011	2012
Βόρεια Αμερική	6.869,070	6.397,257	6.563,769	6.482,327	6.298,306
Η.Π.Α.	5.840,549	5.429,795	5.580,015	5.483,212	5.270,422
Καναδάς	574,243	544,890	547,925	551,587	550,829
Μεξικό	452,794	421,124	434,023	446,228	453,833
Κεντρική & Νότια Αμερική	1.220,357	1.197,999	1.310,845	1.335,237	1.399,618
Βραζιλία	427,399	406,962	461,357	476,600	500,228
Αργεντινή	170,432	169,461	188,425	194,610	195,999
Ανταρκτική	0,264	0,245	0,245	0,142	0,099
Ευρώπη	4.581,150	4.279,517	4.386,991	4.348,063	4.263,257
Ρωσία	1.629,087	1.479,044	1.685,071	1.710,029	1.781,720
Γερμανία	812,606	758,178	796,956	784,378	788,321
Μεγάλη Βρετανία	563,872	516,191	529,451	488,310	498,877
Ιταλία	449,749	407,630	419,811	411,562	385,813
Γαλλία	421,560	386,372	385,590	374,324	364,538
Ισπανία	354,700	327,801	312,588	318,232	312,442
Ουκρανία	342,403	245,535	277,727	298,136	290,380
Πολωνία	294,700	286,470	304,608	308,104	289,455
Τουρκία	272,900	269,063	268,547	294,909	296,932
Ολλανδία	229,527	222,931	234,310	239,739	239,605
Καζακστάν	196,671	172,831	188,228	206,858	224,220
Ελλάδα	106,041	99,827	93,545	92,084	87,558
Μέση Ανατολή	1.630,848	1.740,677	1.863,308	1.959,433	2.035,652
Ιράν	512,049	562,579	566,563	594,465	603,586
Σαουδική Αραβία	421,636	437,685	506,596	551,389	582,670
Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα	193,941	208,794	218,778	228,666	234,060
Ιράκ	104,167	112,590	115,300	119,952	130,742
Αφρική	1.152,383	1.145,849	1.179,972	1.168,656	1.205,703

Πίνακας 6.4: Ανάλυση παγκόσμιων εκπομπών CO₂ (σε εκατομμύρια τόνους).

Ήπειρος / Περιοχή / Χώρα	2008	2009	2010	2011	2012
Νότια Αφρική	489,970	477,558	478,794	471,516	473,165
Αίγυπτος	181,291	185,023	186,139	199,420	206,293
Αλγερία	106,925	113,991	117,796	122,131	133,921
Νιγηρία	99,159	78,956	79,376	83,131	86,398
Ασία και Ωκεανία	11.656,211	12.462,340	13.383,783	14.309,904	14.435,771
Κίνα	6.166,566	6.816,095	7.388,502	8.126,694	8.106,430
Ινδία	1.448,991	1.642,933	1.714,907	1.752,675	1.830,938
Ιαπωνία	1.216,252	1.104,914	1.177,286	1.200,269	1.259,058
Νότια Κορέα	521,770	524,439	584,018	650,454	657,093
Αυστραλία	429,615	434,757	431,090	426,455	420,633
Ινδονησία	370,191	405,701	431,094	450,077	456,210
Ταϊβάν	290,383	259,557	292,881	311,344	307,147
Ταϊλάνδη	255,085	267,885	287,269	293,363	290,717
Μαλαισία	171,317	175,330	194,034	195,701	198,785
Σιγκαπούρη	155,240	192,378	191,045	205,442	207,960
Πακιστάν	136,314	138,833	143,206	141,968	146,889
Βιετνάμ	104,755	109,815	138,048	135,087	131,731
Παγκόσμιες εκπομπές	29.644,602	29.435,620	31.154,836	32.154,990	32.310,287

Για την εξαγωγή περισσότερο αντικειμενικών συμπερασμάτων, ωστόσο, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ο πίνακας 6.5, στον οποίο παρουσιάζονται οι ειδικές εκπομπές CO₂ για το 2012 ανηγμένες στον πληθυσμό της κάθε χώρας. Από τον πίνακα 6.5 μπορούμε να σημειώσουμε τα εξής:

- Οι χώρες της Ευρώπης παρουσιάζουν ετήσιες εκπομπές CO₂ που περιορίζονται σε τιμές κάτω των 10tn ανά κάτοικο, εκτός της Ολλανδίας και του Καζακστάν. Ο μέσος όρος ετήσιων ειδικών εκπομπών διαμορφώνεται στους 5,74tn ανά κάτοικο το 2012.
- Οι χώρες με τις υψηλότερες ειδικές εκπομπές είναι η Σιγκαπούρη και το Μεξικό με 38,52 και 37,11tnCO₂ ανά κάτοικο αντίστοιχα. Ακολουθούν η Σαουδική Αραβία και τα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα με ειδικές εκπομπές άνω του 25 και 20tn ανά κάτοικο αντίστοιχα.
- Υψηλές ειδικές εκπομπές CO₂ παρουσιάζουν επίσης αναπτυσσόμενες χώρες όπως οι Η.Π.Α., ο Καναδάς, η Αυστραλία, με τιμές πάνω των 15tn ανά κάτοικο.
- Οι εκπομπές CO₂ σε χώρες όπως η Κίνα και η Ινδία, οι οποίες εμφανίζονται ιδιαίτερα υψηλές στον πίνακα 6.4, εάν ανηχθούν στον πληθυσμό της κάθε χώρας οδηγούν σε χαμηλές ειδικές εκπομπές, της τάξης των 1 – 5tn ανά κάτοικο.
- Χαμηλές ειδικές εκπομπές, επίσης, παρουσιάζουν οι χώρες της Αφρικής (με εξαίρεση τη Νότια Αφρική), οι χώρες της Λατινικής Αμερικής και οι περισσότερες χώρες της Ασίας.
- Οι ειδικές εκπομπές CO₂ στις αναπτυσσόμενες χώρες (Ευρώπη, Βόρεια Αμερική, Αυστραλία) παρουσιάζουν σημαντική τάση μείωσης από το 2008 στο 2012.
- Οι παγκόσμιες ειδικές εκπομπές CO₂ παρουσιάζουν αυξητική τάση από 4,03 το 2008 σε 4,40tn ανά κάτοικο το 2012.

Από τους πίνακες 6.4 και 6.5 θα μπορούσαμε να πούμε ότι οι υψηλές εκπομπές CO₂ αποτυπώνουν χαρακτηριστικά το βιοτικό επίπεδο της κάθε χώρας, ειδικά σε περιπτώσεις όπως οι Η.Π.Α., ο Καναδάς, η Σαουδική Αραβία και τα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα. Το συμπέρασμα αυτό ισχύει και αντίστροφα, για τις χώρες με χαμηλό βιοτικό επίπεδο (Αφρική, Λατινική Αμερική, Ασία).

Οι προσπάθειες απεξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα, μέσω της εισαγωγής των δικαιωμάτων εκπομπής ρύπων, των νέων τεχνικών εξοικονόμησης ενέργειας και της στροφής προς τις τεχνολογίες ηλεκτροπαραγωγής από Α.Π.Ε., έχει αρχίσει να αφήνει αποτελέσματα στις αναπτυσσόμενες χώρες. Οι χώρες της Ευρώπης, παρά το υψηλό βιοτικό επίπεδο, παρουσιάζουν μειωμένες ειδικές εκπομπές, με συνεχή τάση

περαιτέρω μείωσης. Στις Η.Π.Α., τον Καναδά και την Αυστραλία καταγράφεται, επίσης, τάση μείωσης των εκπομπών, ωστόσο το φθηνό διαθέσιμο πετρέλαιο στις περιοχές αυτές και το υψηλό βιοτικό επίπεδο διατηρούν ακόμα τις ειδικές εκπομπές σε υψηλές τιμές. Συνεπώς απαιτείται περισσότερη ακόμα προσπάθεια.

Πίνακας 6.5: Ανάλυση παγκόσμιων ειδικών εκπομπών CO₂ (σε τόνους ανά κάτοικο).

Ήπειρος / Περιοχή / Χώρα	2008	2009	2010	2011	2012
Βόρεια Αμερική	12,99	12,10	12,41	12,26	11,91
Η.Π.Α.	18,31	17,03	17,50	17,19	16,53
Καναδάς	16,33	15,50	15,58	15,69	15,67
Μεξικό	37,02	34,43	35,49	36,49	37,11
Κεντρική & Νότια Αμερική					
Βραζιλία	2,13	2,03	2,30	2,38	2,50
Αργεντινή	4,11	4,09	4,55	4,70	4,73
Ανταρκτική					
Ευρώπη	6,17	5,76	5,91	5,86	5,74
Ρωσία	11,35	10,31	11,74	11,92	12,42
Γερμανία	10,08	9,40	9,89	9,73	9,78
Μεγάλη Βρετανία	8,80	8,05	8,26	7,62	7,78
Ιταλία	7,52	6,81	7,02	6,88	6,45
Γαλλία	6,38	5,85	5,84	5,67	5,52
Ισπανία	7,58	7,01	6,68	6,80	6,68
Ουκρανία	7,53	5,40	6,11	6,55	6,38
Πολωνία	7,65	7,43	7,91	8,00	7,51
Τουρκία	3,64	3,59	3,58	3,94	3,96
Ολλανδία	13,66	13,27	13,95	14,27	14,26
Καζακστάν	11,54	10,14	11,05	12,14	13,16
Ελλάδα	9,61	9,05	8,48	8,35	7,94
Μέση Ανατολή					
Ιράν	6,61	7,26	7,32	7,68	7,79
Σαουδική Αραβία	14,62	15,18	17,57	19,13	20,21
Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα	20,75	22,34	23,41	24,47	25,04
Ιράκ	3,12	3,37	3,45	3,59	3,91
Αφρική	1,04	1,03	1,06	1,05	1,09
Νότια Αφρική	9,25	9,01	9,04	8,90	8,93
Αίγυπτος	2,21	2,25	2,27	2,43	2,51
Αλγερία	2,73	2,91	3,00	3,11	3,42
Νιγηρία	0,57	0,45	0,46	0,48	0,50
Ασία και Ωκεανία					
Κίνα	4,54	5,02	5,44	5,99	5,97
Ινδία	1,16	1,31	1,37	1,40	1,46
Ιαπωνία	9,55	8,68	9,25	9,43	9,89
Νότια Κορέα	10,39	10,44	11,63	12,95	13,08
Αυστραλία	18,57	18,80	18,64	18,44	18,19
Ινδονησία	1,48	1,62	1,73	1,80	1,83
Ταϊβάν	12,43	11,11	12,53	13,32	13,14
Ταϊλάνδη	3,81	4,00	4,29	4,38	4,34
Μαλαισία	5,76	5,90	6,53	6,58	6,69
Σιγκαπούρη	28,75	35,63	35,39	38,05	38,52
Πακιστάν	0,75	0,76	0,79	0,78	0,81
Βιετνάμ	1,17	1,22	1,54	1,51	1,47
Παγκόσμιες ειδικές εκπομπές	4,03	4,00	4,24	4,37	4,40

6.6. Επιπτώσεις πυρηνικής ενέργειας

Η πυρηνική ενέργεια απελευθερώνεται κατά τη σχάση βαρέων πυρήνων. Κατά την πυρηνική σχάση ένας ασταθής ατομικός πυρήνας, ο οποίος προκύπτει από τη συνένωση ενός πυρήνα, π.χ. Ουρανίου-235 (U-235) με ένα νετρόνιο, χωρίζεται (σχάται) σε δύο ή περισσότερους (μικρότερους) πυρήνες και σε μερικά παραπροϊόντα σωμάτια (όπως νετρόνια). Εφόσον οι πυρηνικές σχάσεις είναι ελεγχόμενες, όπως συμβαίνει στην καρδιά ενός πυρηνικού αντιδραστήρα, η απελευθερωμένη ενέργεια με τη μορφή θερμότητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί, για να καλύψει ενεργειακές ανάγκες. Ωστόσο, η ανωτέρω διαδικασία συνοδεύεται με την πρόκληση σημαντικών επιπτώσεων, οι οποίες ομαδοποιούνται και παρουσιάζονται στις ακόλουθες ενότητες.

6.6.1. Πυρηνικά Απόβλητα

Η ύπαρξη των πυρηνικών αποβλήτων αποτελεί το σοβαρότερο πρόβλημα που προκύπτει με την αξιοποίηση της πυρηνικής ενέργειας. Σε αντίθεση με το κάρβουνο, το πετρέλαιο ή το αέριο, τα πυρηνικά καύσιμα δεν καίγονται πλήρως. Αυτό οφείλεται στο ότι κατά τη διαδικασία της καύσης δημιουργείται ένας αριθμός πυρήνων που απορροφά ισχυρά τα νετρόνια, δηλαδή δε μεταπίπτει σε ασταθή κατάσταση, που είναι η κατάσταση του πυρήνα που δημιουργείται μετά τη συνένωσή του με το νετρόνιο και η οποία οδηγεί τελικά στη σχάση του. Με την πάροδο του χρόνου, ο αριθμός τέτοιων πυρήνων αυξάνεται μέσα στο σχάσιμο υλικό και εμποδίζει την αλυσιδωτή αντίδραση. Τότε το καύσιμο παύει να λειτουργεί σαν καύσιμο και γίνεται υψηλής ραδιενέργειας πυρηνικό απόβλητο. Πολλές φορές, ο χρόνος υποδιπλασιασμού των στοιχείων που παράγονται κατά τη σχάση, γνωστός ως χρόνος ημιζωής, είναι της τάξης των δεκάδων ή ακόμα και εκατοντάδων χιλιάδων ετών. Έτσι πρέπει να λαμβάνεται ειδική μέριμνα στην αποθήκευση αυτών των αποβλήτων για πάρα πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα. Αυτό δημιουργεί τα σοβαρά κοινωνικά, πολιτικά και ρυθμιστικά προβλήματα για την απόρριψη αυτών των αποβλήτων.

Η διαχείριση των αποβλήτων είναι το μεγαλύτερο, ίσως, και έως τώρα άλυτο πρόβλημα της πυρηνικής ενέργειας. Τα πυρηνικά απόβλητα διακρίνονται σε απόβλητα χαμηλής, μεσαίας και υψηλής ραδιενέργειας, τα οποία ανάλογα με την κατηγορία τους πρέπει να φυλάσσονται για μερικές δεκάδες έως μερικές χιλιάδες χρόνια υπό ελεγχόμενες συνθήκες. Ποιο σύστημα είναι ικανό να εγγυηθεί μια τέτοια λειτουργία για τα επόμενα 20.000 χρόνια ή, αλλιώς, η υποθήκη στις επόμενες γενιές είναι πραγματικά τεράστια. Κάποτε τα απόβλητα οδηγούνταν προς τις υπανάπτυκτες χώρες, σήμερα όμως αυτά πρέπει να αποθηκεύονται στη χώρα παραγωγής τους.

Ένα σύνηθες πυρηνικό εργοστάσιο ισχύος 1.000MW παράγει ετησίως 30 τόνους απόβλητα υψηλής ραδιενέργειας, 300 τόνους μέσης και 450 τόνους χαμηλής ραδιενέργειας. Σε κάθε τόνο πυρηνικού απόβλητου περιέχονται 10 κιλά πλουτωνίου, ποσότητα αρκετή για την κατασκευή μίας πυρηνικής βόμβας. Το απεμπλουτισμένο ουράνιο που περιέχεται στα απόβλητα χρησιμοποιείται για την κατασκευή συμβατικών και ραδιενεργών όπλων μεγάλης αποτελεσματικότητας. Επίσης, πολύ σημαντικός όγκος πυρηνικών αποβλήτων είναι τα ίδια τα πυρηνικά εργοστάσια, των οποίων η μέση διάρκεια ζωής είναι 30 έτη, μετά πρέπει να αποσυναρμολογηθούν και να αντιμετωπισθούν ως πυρηνικό απόβλητο. Για το θέμα αυτό δεν υπάρχει τεκμηριωμένη επιστημονική λύση.

Από την έως τώρα λειτουργία των πυρηνικών εργοστασίων έχουν συσσωρευθεί ανά τον κόσμο περίπου 150.000 τόνοι αποβλήτων, εκ των οποίων μόνο το 1/3 έχει υποβληθεί σε επεξεργασία και ειδικούς όρους φύλαξης. Τελικά όλα τα απόβλητα καταλήγουν (ή πρέπει να καταλήγουν) σε αποθήκευση στα πετρώματα υποβάθρου βαθιά μέσα στη γη. Η διαδικασία επεξεργασίας (υποχρεωτική για τα απόβλητα υψηλής και μεσαίας ραδιενέργειας) και ελεγχόμενης αποθήκευσης στην πραγματικότητα είναι εξαιρετικά ακριβή και δύσκολη, γι' αυτό και υπάρχουν μέχρι και «ηθελημένα ατυχήματα» για να τα ξεφορτωθούμε στο βάθος της θάλασσας ή σε άλλα απομακρυσμένα σημεία του πλανήτη, όμως σχεδόν πάντα υπάρχουν αντιδράσεις από το κόσμο ή από περιβαλλοντικές οργανώσεις. Πρωτοπόροι στην οργάνωση και στην τεχνολογία διάθεσης των πυρηνικών αποβλήτων είναι η Σουηδία και η Φινλανδία, σχετικά ερευνητικά προγράμματα τρέχουν σε Γαλλία, Γερμανία, Ελβετία και Βρετανία, ενώ χώρες όπως η Εσθονία και η Ρωσία με μεγάλη εμπειρία στην πυρηνική ενέργεια αδυνατούν να τα διαχειρισθούν με ασφάλεια λόγω έλλειψης σχετικών κονδυλίων.

6.6.2. Ο κίνδυνος πυρηνικού ατυχήματος

Τα πυρηνικά εργοστάσια παρουσιάζουν σύμφωνα με το Διεθνή Οργανισμό Ατομικής Ενέργειας (ΙΑΕΑ) το χαμηλότερο δείκτη ατυχημάτων σε σχέση με άλλα εργοστάσια παραγωγής κάθε είδους καθώς και κάθε άλλης ομάδας τεχνολογικής ανθρώπινης δραστηριότητας. Ακόμη και αν δεχθούμε ότι αυτό είναι αληθινό, η πιθανότητα ατυχήματος από μόνη της δεν αποτελεί επιστημονικό δείκτη ασφάλειας. Η πραγματική παράμετρος που περιγράφει τεχνοκρατικά το θέμα της ασφάλειας μιας διεργασίας είναι ο λεγόμενος «μαθηματικός κίνδυνος», ο οποίος χονδρικά είναι το γινόμενο της πιθανότητας ατυχήματος επί τον παράγοντα «έτη χαντιδραστήρα» επί το αναμενόμενο αποτέλεσμα του ατυχήματος, και αυτό ολοκληρωμένο σε όλα τα πιθανά ατυχήματα, μικρά ή μεγάλα. Υπολογίζοντας έτσι τον πραγματικό κίνδυνο, τα πυρηνικά εργοστάσια πρώτης, δεύτερης και τρίτης γενιάς αποτελούν τις πλέον ανασφαλείς εγκαταστάσεις ανά τον κόσμο.

Κανένας διεθνής οργανισμός ή εταιρεία δεν μπορεί να εγγυηθεί την ανυπαρξία κινδύνου ατυχήματος, γι' αυτό και λειτουργούν πάντα ανασφάλιστα. Η εγκατεστημένη πυρηνική βιομηχανία έχει συντελεστή «ατυχήματος βάσης» (δηλαδή ατυχήματος τύπου Τσέρνομπιλ) 1:10.000 και παρουσιάζει σε πλανητικό επίπεδο συσσωρευμένο παράγοντα «έτη x αντιδραστήρα» πάνω από 12.000, δηλαδή έχει μπει ήδη στην πιθανότητα δημιουργίας ενός τέτοιου ατυχήματος. Το ότι οι σχεδιαζόμενοι νέοι πυρηνικοί αντιδραστήρες θα έχουν συντελεστές ασφάλειας στο επίπεδο 1:100.000 ή 1:1.000.000 είναι κάτι που αφενός δεν έχει ελεγχθεί, αφετέρου οδηγεί σε υπέρογκο κόστος αρχικής εγκατάστασης, δηλαδή η ασφάλεια της πυρηνικής τεχνολογίας προσκρούει στα όρια της οικονομικής δυνατότητας της ανθρωπότητας να επενδύσει αυτά τα τεράστια ποσά. Εκτός αυτού, κίνδυνοι – και πραγματικά ατυχήματα (εκτός των γνωστών στο Three Mile Island των Η.Π.Α., στο Τσέρνομπιλ της Ε.Σ.Σ.Δ. και στη Φουκοσίμα της Ιαπωνίας) καταγράφονται (ή και εν μέρει αποκρύπτονται) σ' όλες τις μονάδες εξόρυξης, επεξεργασίας, εμπλουτισμού, μεταφοράς και αποθήκευσης των πυρηνικών καυσίμων και αποβλήτων. Κάθε σύστημα αυτοματισμού απαιτεί και τον ακριβή ανθρώπινο χειρισμό, υπόθεση που δεν επαληθεύθηκε στα προαναφερθέντα μεγάλα πυρηνικά ατυχήματα καθώς και σε πλήθος άλλων μικρότερων.

- Το πυρηνικό ατύχημα του Τσέρνομπιλ

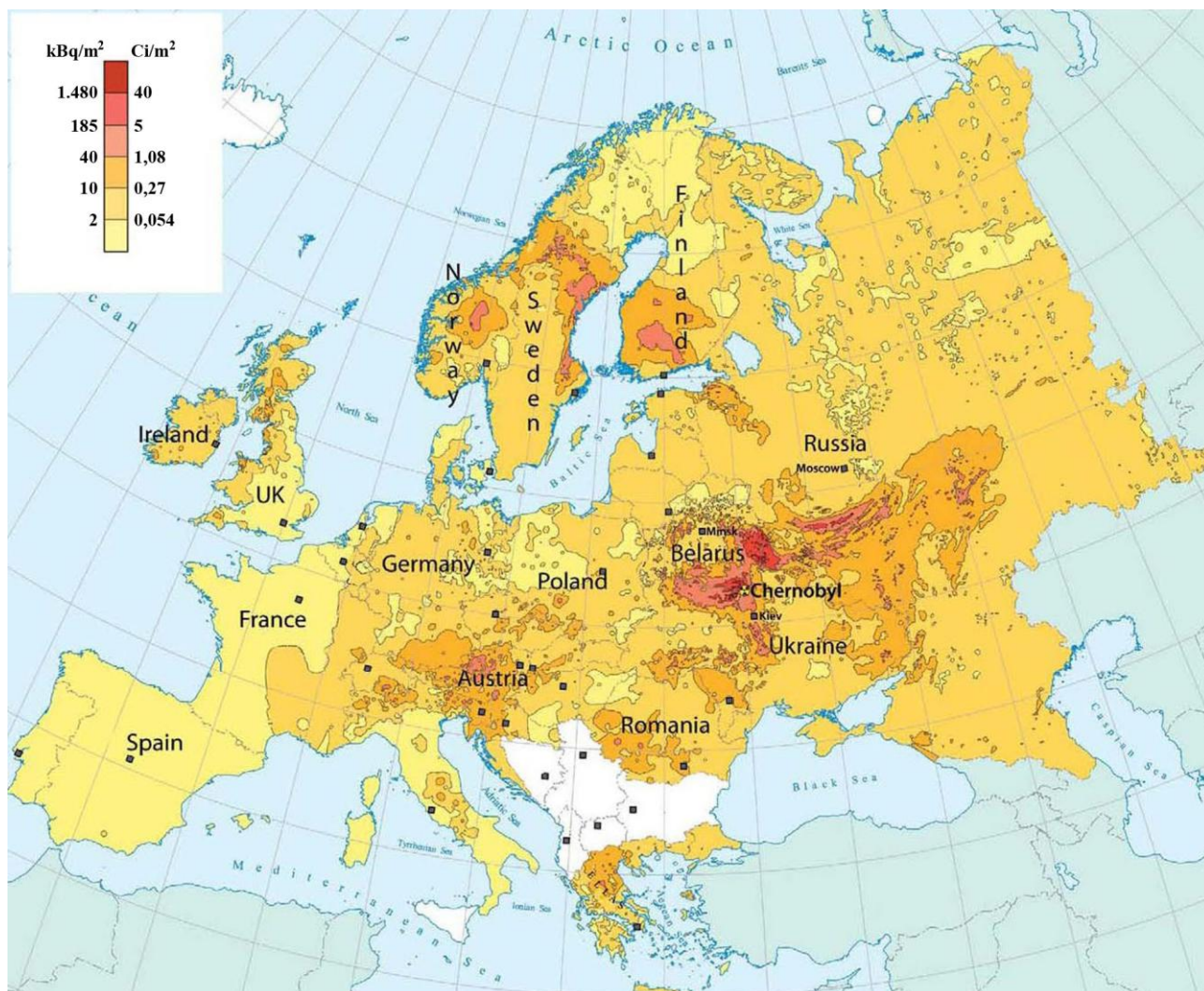
Το πυρηνικό ατύχημα του Τσέρνομπιλ έλαβε χώρα στις 26 Απριλίου του 1986, στον αντιδραστήρα Νο. 4 του Πυρηνικού Σταθμού Παραγωγής Ενέργειας του Τσέρνομπιλ της Σοβιετικής Ένωσης, ο οποίος σήμερα βρίσκεται σε εδάφη της Ουκρανίας. Το ατύχημα ήταν της τάξης του μέγιστου προβλεπόμενου ατυχήματος στην Διεθνή Κλίμακα Πυρηνικών Γεγονότων, διατάραξε σοβαρότατα τις οικονομικές και κοινωνικές συνθήκες που επικρατούσαν στις γύρω περιοχές και είχε σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον και στην υγεία. Από το ατύχημα πέθαναν επιτόπου δυο από τους εργάτες του σταθμού. Μέσα σε τέσσερις μήνες, από τη ραδιενέργεια και από εγκαύματα λόγω της θερμότητας, πέθαναν 28 πυροσβέστες που έσπευσαν στο χώρο του ατυχήματος και διαπιστώθηκαν 19 επιπλέον θάνατοι ως το 2004. Επιπλέον υπολογίζεται ότι επηρεάστηκε η υγεία εκατοντάδων χιλιάδων ανθρώπων εξαιτίας της επιβάρυνσης του περιβάλλοντος με ραδιενέργεια. Οι ποσοστιαίες αυξήσεις των καρκίνων ήταν άνω του 15% στους πληθυσμούς που εκτέθηκαν, με χιλιάδες θανάτους από καρκίνο και λευχαιμία να συνδέονται με το ατύχημα.

Το ατύχημα στο Τσέρνομπιλ είχε επιπτώσεις στις περισσότερες χώρες της Ευρώπης, με τη δυτική, ανατολική και βόρεια Ευρώπη να δέχεται το μεγαλύτερο ποσοστό ραδιενεργών ισοτόπων (περισσότερα από τα μισά ραδιενεργά σωματίδια που απελευθερώθηκαν από το ατύχημα κατέληξαν σε περιοχές εκτός ΕΣΣΔ). Πρώην Γιουγκοσλαβία, Φινλανδία, Σουηδία, Γερμανία, Βουλγαρία, Νορβηγία, Ρουμανία, Αυστρία και Πολωνία δέχθηκαν η κάθε μια περισσότερα από ένα πεταμπεκερέλ (1PBq=10¹⁵Bq) Καισίου 137. Η περιοχή που μολύνθηκε με πάνω από 4.000Bq/m² καλύπτει το 40% της επιφάνειας της Ευρώπης, ενώ το 2,3% δέχτηκε πάνω από 40.000Bq/m². Υπολογίζεται ότι από τη συνολική δόση ραδιενέργειας που έλαβε ο πληθυσμός της γης λόγω του ατυχήματος, το 36% αντιστοιχεί στους κατοίκους Ρωσίας, Ουκρανίας και Λευκορωσίας και το 53% στους υπόλοιπους Ευρωπαίους. Ακόμα και σήμερα υπάρχουν περιορισμοί στη διακίνηση τροφίμων σε χώρες της Ευρώπης.

Εκτιμάται ότι περισσότερο από το μισό του ιωδίου 131 που διέφυγε από το Τσέρνομπιλ κατέληξε εκτός ΕΣΣΔ. Το ραδιενεργό ιώδιο προκαλεί αύξηση των περιπτώσεων καρκίνου του θυρεοειδούς και

σύμφωνα με εκτιμήσεις, παρουσιάστηκε αύξηση αυτής της μορφής καρκίνου σε Ηνωμένο Βασίλειο και Τσεχία, χρειάζονται όμως περισσότερες έρευνες για να υπάρξει συνολική εικόνα για την Ευρώπη. Κάποιες άλλες μελέτες αναφέρουν, επίσης, αύξηση της παιδικής λευχαιμίας σε Δυτική Γερμανία, Ελλάδα και Λευκορωσία. Έχοντας υπόψη ότι τα περισσότερα είδη καρκίνου χρειάζονται 20 με 60 χρόνια μεταξύ έκθεσης στο αίτιο και εκδήλωσης της ασθένειας, είναι προφανές ότι είναι ακόμα νωρίς, για να εκτιμήσουμε τις πραγματικές διαστάσεις των επιπτώσεων του ατυχήματος.

Μέρος του ραδιενεργού νέφους από το Τσερνόμπιλ έφτασε και στην Ελλάδα μετά από μερικές μέρες. Προκλήθηκε πανικός στον ελληνικό πληθυσμό, συγκεκριμένα σχετικά με την ασφάλεια των τροφίμων, με τον κρατικό μηχανισμό να κάνει συστάσεις για αποφυγή του φρέσκου γάλακτος και το καλό πλύσιμο φρούτων και λαχανικών από τις 5 Μαΐου και μετά. Το ραδιενεργό νέφος επηρέασε κυρίως τη Βόρεια Ελλάδα και τη Θεσσαλία, όπου χρόνια αργότερα ανιχνεύονταν ποσά ραδιενέργειας υψηλότερα του κανονικού. Μετρήσεις που έγιναν το 1996 έδειξαν εκπομπές καισίου στα 65kBq/m^2 με το όριο επικινδυνότητας να βρίσκεται στα 5kBq/m^2 . Σύμφωνα με στατιστικά στοιχεία δεν παρατηρήθηκε αύξηση στη συχνότητα της λευχαιμίας, εκτός από τη σπάνια βρεφική λευχαιμία, αλλά ούτε και στον καρκίνο του θυρεοειδούς. Από την άλλη όμως υπολογίζεται από έρευνα της Ελληνικής Ψυχιατρικής Εταιρείας ότι έγιναν περίπου 2.500 τεχνητές εκτρώσεις το 1986 από γονείς οι οποίοι φοβήθηκαν τις πιθανές επιπτώσεις της ραδιενέργειας στο έμβρυο. Επίσης ιατρικοί κύκλοι αποδίδουν 1.500 περιπτώσεις καρκίνου (τη δεκαετία 1986-1996) που δεν δικαιολογούνταν από το ιστορικό του ασθενούς, σε πιθανές επιπτώσεις του Τσερνόμπιλ.



Σχήμα 6.6: Χάρτης διάδοσης της εκλύομενης ραδιενέργειας στην Ευρώπη από το ατύχημα στο Τσερνόμπιλ.

6.7. Επιπτώσεις αιολικών και φωτοβολταϊκών πάρκων

Οι ανεμογεννήτριες και τα φωτοβολταϊκά εκμεταλλεύονται την ανανεώσιμη κινητική ενέργεια του ανέμου και την ηλιακή ακτινοβολία αντίστοιχα. Δεν παράγουν αέριους ή άλλου τύπου ρύπους, ούτε απαιτείται η μεταφορά ρυπογόνων καυσίμων για τη λειτουργία τους, κατά την οποία είναι πιθανή η μόλυνση του περιβάλλοντος. Η ενέργεια, η οποία απαιτείται για την κατασκευή μιας ανεμογεννήτριας, αποδίδεται από την ανεμογεννήτρια σε διάστημα 3-9 μηνών, ανάλογα με το αιολικό δυναμικό της περιοχής εγκατάστασής της. Για τα φωτοβολταϊκά ο χρονικό αυτό διάστημα κυμαίνεται από 1 έως 4 χρόνια, ανάλογα με την τεχνολογία κατασκευής και τη διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία. Επίσης μια ανεμογεννήτρια ή ένα φωτοβολταϊκό απεγκαθίστανται μετά το πέρας της διάρκειας ζωής τους, χωρίς να αφήνουν υπολείμματα και με τα περισσότερα από τα υλικά τους να είναι ανακυκλώσιμα. Σήμερα η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανεμογεννήτριες ή φωτοβολταϊκά είναι ο περισσότερο φιλικός περιβαλλοντικά τρόπος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Οποιαδήποτε άλλη μέθοδος παραγωγής έχει περισσότερο σοβαρές επιπτώσεις στο περιβάλλον.

Στον πίνακα 6.6 ανακεφαλαιώνονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις κατά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από διαφορετικές πρωτογενείς πηγές ενέργειας.

<i>Πίνακας 6.6: Περιβαλλοντικές επιπτώσεις κατά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από διάφορες τεχνολογίες.</i>			
Πρωτογενής μορφή ενέργειας	Τεχνολογία παραγωγής	Εκπομπή αερίων ρύπων	Άλλες περιβαλλοντικές επιπτώσεις
Άνθρακας, πετρέλαιο, φυσικό αέριο	Θερμοηλεκτρικά εργοστάσια	CO ₂ , NO _x , SO _x , VOC, τέφρα	Εξάντληση αποθεμάτων, ρύπανση κατά τη μεταφορά
Πυρηνικό καύσιμο	Πυρηνικοί αντιδραστήρες ισχύος	-	Πυρηνικά απόβλητα, πυρηνικά όπλα, πυρηνικά ατυχήματα
Βιομάζα	Θερμοηλεκτρικά εργοστάσια	CO ₂ , SO _x , VOC, τέφρα	Αποξήλωση δασών
Υδατόπτωση	Υδροηλεκτρικά εργοστάσια	-	Επιδράσεις σε βιοτόπους, κίνδυνοι πρόκλησης σεισμών ή ατυχημάτων από αστοχία φραγμάτων
Αιολική ενέργεια	Αιολικά πάρκα	-	Οπτική όχληση, εκπομπές θορύβου, επιδράσεις σε πουλιά, σκίαση, χρήσεις γης
Ηλιακή ακτινοβολία	Φωτοβολταϊκά πάρκα	-	Δέσμευση μεγάλων εκτάσεων γης, οπτική όχληση

Η συμβολή των ανεμογεννητριών και των φωτοβολταϊκών στην προστασία του περιβάλλοντος έγκειται στην αποφυγή εκπομπών αερίων ρύπων από ηλεκτρική ενέργεια που, σε διαφορετική περίπτωση, θα παραγόταν από θερμοηλεκτρικά εργοστάσια. Έτσι συρρικνώνονται οι επιδράσεις στην αλλαγή του κλίματος που επέρχεται μέσω του φαινομένου του θερμοκηπίου και οι όποιες συνέπειές της στη ζωή στον πλανήτη.

Η αιολική ενέργεια και η ηλιακή ακτινοβολία μπορούν συμπερασματικά να θεωρηθούν ως καθαρές και ήπιες μορφές ενέργειας. Παρόλα αυτά, οι επιδράσεις οι οποίες παρουσιάζονται στον πίνακα 6.6 μπορούν να προκαλέσουν σημαντικά προβλήματα κατά τη διάρκεια της φάσης αδειοδότησης ή λειτουργίας ενός αιολικού ή φωτοβολταϊκού πάρκου, τα οποία μπορούν να αντιμετωπιστούν μόνο με προσεκτικά σχεδιασμένες δράσεις. Στη συνέχεια ακολουθεί μία περιληπτική παρουσίαση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των αιολικών και φωτοβολταϊκών πάρκων [26].

- Οπτική όχληση

Η οπτική όχληση των ανεμογεννητριών ή των φωτοβολταϊκών συνίσταται στην αλλοίωση της οπτικής ενός φυσικού τοπίου, μέσω της εγκατάστασής τους σε περιοχές χωρίς άλλες ανθρώπινες παρεμβάσεις. Η οπτική αλλοίωση του περιβάλλοντος συμπληρώνεται και από τα δίκτυα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας τα οποία συνοδεύουν απαραίτητα την εγκατάσταση ενός αιολικού πάρκου.

Το μέγεθος των ανεμογεννητριών ενός αιολικού πάρκου, σε συνδυασμό πιθανώς και με τη θέση εγκατάστασής του (σε υψώματα ή κορυφογραμμές) το καθιστούν ορατό σε πολλές περιπτώσεις από μεγάλες αποστάσεις. Η επίδραση συνεπώς στην οπτική του ευρύτερου τοπίου και στο χαρακτήρα της περιοχής είναι αναμφισβήτητη. Ωστόσο, δεν είναι δυνατό να οριστεί κατά απόλυτο και καθολικό τρόπο το αν η επίδραση αυτή μπορεί να χαρακτηριστεί ως θετική ή αρνητική, αφού κάτι τέτοιο είναι σε μεγάλο βαθμό υποκειμενικό και εξαρτάται από την οπτική γωνία που ο καθένας εξετάζει το θέμα. Έτσι οι ανεμογεννήτριες άλλοτε θεωρούνται ως ογκώδεις και άσχημες μηχανές, οι οποίες μετατρέπουν σε βιομηχανική ζώνη φυσικά τοπία στα οποία δεν υπήρξε καμία άλλη ανθρώπινη παρέμβαση, άλλοτε θεωρούνται ως κομψές, έξυπνες και, συνεπώς, αποδεκτές κατασκευές που αξιοποιούν την δωρεάν προσφερόμενη ισχύ της φύσης, κι άλλοτε θεωρούνται ως η λύση περιορισμού ή και υποκατάστασης της λειτουργίας των θερμοηλεκτρικών ή πυρηνικών σταθμών παραγωγής, γεγονός που τις καθιστά αναγκαίες και αναντικατάστατες.

Η επίδραση της εγκατάστασης ενός αιολικού πάρκου στην αλλοίωση της οπτικής μιας περιοχής είναι πολύ δύσκολο να εκτιμηθεί. Πέραν του υποκειμενικού χαρακτήρα του θέματος, διαφορετικές εγκαταστάσεις αιολικών πάρκων έχουν, αντικειμενικά, διαφορετικές επιδράσεις. Οι εν γένει αντικειμενικοί συντελεστές βαρύτητας της εκτίμησης της οπτικής όχλησης ενός αιολικού πάρκου είναι οι εξής:

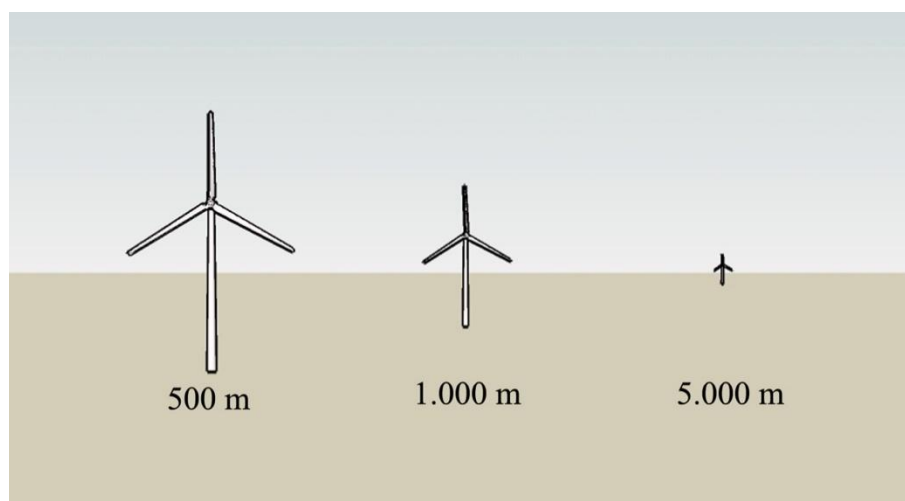
- **Η θέση εγκατάστασης του αιολικού πάρκου.** Η εγκατάσταση ενός αιολικού πάρκου, για παράδειγμα, σε μία πεδινή έκταση της κεντρικής Ευρώπης, συνεπάγεται πολύ πιο περιορισμένο πεδίο οπτικής επαφής από το αντίστοιχο πεδίο οπτικής επαφής ενός άλλου αιολικού πάρκου, το οποίο έχει εγκατασταθεί σε μία κορυφογραμμή ενός νησιού του Αιγαίου. Από την άλλη μεριά, η οπτική αισθητική επίδραση μπορεί να θεωρηθεί περισσότερο έντονη σε περιπτώσεις εγκαταστάσεων ανεμογεννητριών μεγάλων διαστάσεων (άνω των 500kW, ύψους πυλώνα άνω των 50 m, και διαμέτρου πτερωτής μεγαλύτερης των 40m) σε σχετικά κλειστές περιοχές. Αντίθετα η εγκατάσταση ενός αιολικού πάρκου σε ανοικτές περιοχές δε φαίνεται να επηρεάζει αρνητικά την οπτική αισθητική της περιοχής.
- **Ο χαρακτήρας της θέσης εγκατάστασης του αιολικού πάρκου.** Η εγκατάσταση ενός αιολικού πάρκου σε μία κατάφυτη δασική περιοχή σαφώς θα προκαλέσει περισσότερο αρνητικές κριτικές, οι οποίες πιθανώς θα συνδυαστούν από τις συνοδευόμενες επεμβάσεις στη δασική περιοχή που απαιτήθηκαν για την κατασκευή του έργου (αποψιλώσεις περιοχών, διανοίξεις δρόμων, κλπ). Αντίθετα, η εγκατάσταση ενός αιολικού πάρκου σε μία βραχώδη και άγονη περιοχή, με ασήμαντη βλάστηση, πιθανώς δεν θα προκαλέσει καμία αρνητική αντίδραση.
- **Ο χαρακτηρισμός των περιοχών περίξ του αιολικού πάρκου.** Η ύπαρξη τουριστικών καταλυμάτων σε περιοχές από τις οποίες ένα αιολικό πάρκο μπορεί να είναι ορατό πιθανώς να εντείνει τις αρνητικές αντιδράσεις για την εγκατάστασή του.
- **Η κανονική λειτουργία των ανεμογεννητριών.** Όταν οι ανεμογεννήτριες περιστρέφονται, το ανθρώπινο μάτι τις θεωρεί χρήσιμες με αποτέλεσμα να γίνονται ευκολότερα οπτικά αποδεκτές, καθώς φαίνεται να εξυπηρετούν κάποιο σκοπό. Αντίθετα, όταν σημαντικός αριθμός ανεμογεννητριών δε δουλεύει, ενώ πνέουν άνεμοι, η προσδοκία του παρατηρητή για χρησιμότητα των αιολικών μηχανών παραβιάζεται.
- **Ο τύπος της εγκατεστημένης ανεμογεννήτριας και ο χρωματισμός της.** Γενικότερα έχει γίνει αποδεκτό ότι η χρησιμοποίηση απλών σωληνωτών πύργων σε χρωματισμό που συμφωνεί με το περιβάλλον φαίνεται να παρουσιάζει καλύτερη οπτική αποδοχή από τη χρησιμοποίηση δικτυωτού πύργου που θυμίζει πυλώνες μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας υψηλής τάσης. Παράλληλα, η επίτευξη οπτικής ομοιομορφίας έχει αποδειχθεί ότι δεν διαταράσσει την αρμονία της περιοχής. Η οπτική ομοιομορφία περιλαμβάνει ομοιότητα διαστάσεων δρομέα και υπερκατασκευής (όχι αναγκαστικά ίδιου τύπου μηχανές), καθώς και ύψους πύργου στήριξης. Επιπλέον, οι ανεμογεννήτριες που διαθέτουν τρία πτερύγια δίνουν ένα αισθητικά αρμονικότερο αποτέλεσμα, ενώ ο χρωματισμός των πύργων στήριξης και των πτερυγίων διαδραματίζει ουσιαστικό ρόλο στην ομαλή ενσωμάτωση των μηχανών στον περιβάλλοντα χώρο, με επικρατέστερη επιλογή το

λευκό χρώμα και σαν εναλλακτική λύση το γκρι. Τελευταία έχει υιοθετηθεί η σταδιακή μετάβαση από το πράσινο χρώμα κοντά στο έδαφος στο λευκό (εικόνα 6.10).



Εικόνα 6.10: Ανεμογεννήτριες με χρωματισμό σύμφωνα με το περιβάλλον.

- **Το μέγεθος της εγκατεστημένης ανεμογεννήτριας.** Η οπτική επίδραση μιας ανεμογεννήτριας μειώνεται όσο η απόσταση θέασής της αυξάνεται. Ένας εμπειρικός κανόνας καθορίζει ότι η σημαντική οπτική όχληση μιας ανεμογεννήτριας στο τοπίο εκτείνεται σε μία απόσταση ίση με δέκα φορές το ύψος του πυλώνα. Για μία ανεμογεννήτρια με πυλώνα 50 m, η σημαντική οπτική όχληση εκτείνεται σε κύκλο ακτίνας 500 m. Μέσα στον κύκλο αυτό η ανεμογεννήτρια δεσπόζει στο χώρο και χαρακτηρίζει το τοπίο. Μια ανεμογεννήτρια μπορεί, κάτω από προϋποθέσεις (καθαρότητα ατμόσφαιρας, απουσία οπτικών εμποδίων), να είναι ορατή σε απόσταση ίση με 400 φορές το ύψος του πυλώνα, δηλαδή ίση με 20 km. Ωστόσο, σε αποστάσεις μεγαλύτερες από 5 km, η ανεμογεννήτρια θα ενσωματώνεται σταδιακά στο τοπίο, χωρίς να επηρεάζει την αισθητική του (σχήμα 6.7).



Σχήμα 6.7: Η επίδραση στην οπτική ενός τοπίου συναρτίζεται της απόστασης από τη θέση εγκατάστασης του αιολικού πάρκου.

Για τα φωτοβολταϊκά πάρκα η οπτική αλλοίωση παρουσιάζει το πλεονέκτημα ότι δεν είναι αισθητή από απόσταση, εκτός των περιπτώσεων εγκατάστασής τους σε trackers. Ωστόσο, από κοντινή απόσταση, η αλλοίωση του τοπίου μπορεί να υπερβαίνει την αντίστοιχη από ένα αιολικό πάρκο.



Εικόνα 6.11: Ολική οπτική αλλοίωση έκτασης λόγω εγκατάστασης μεγάλου φωτοβολταϊκού σταθμού.

- Εκπομπές θορύβου

Οι εκπομπές θορύβου αφορούν προφανώς μόνο στα αιολικά πάρκα. Ο εκπεμπόμενος θόρυβος από τις ανεμογεννήτριες σε κάποια απόσταση από αυτές δεν είναι σημαντικός, και συνήθως καλύπτεται από το θόρυβο που προκαλεί ο ίδιος ο άνεμος. Εξάλλου συνήθως οι ανεμογεννήτριες εγκαθίστανται σε περιοχές όπου πνέουν άνεμοι σημαντικής έντασης για μεγάλο χρονικό διάστημα, και κοντά σε αυτές τις περιοχές η εμπειρία έχει δείξει ότι δεν υπάρχουν οικισμοί, πράγμα που θα καθιστούσε το θόρυβος ενοχλητικό.

Ο εκπεμπόμενος θόρυβος από μία ανεμογεννήτρια διακρίνεται στον **αεροδυναμικό θόρυβο** και στο **μηχανικό θόρυβο**.

Ο **αεροδυναμικός θόρυβος** σχετίζεται με την ταχύτητα του πνέοντος ανέμου και την αεροδυναμική σχεδίαση του πτερυγίου. Ο αεροδυναμικός θόρυβος πρέπει να αντιμετωπιστεί κατά το στάδιο του σχεδιασμού και κατασκευής της μηχανής, αποτελείται δε από το θόρυβο περιστροφής και το θόρυβο τύρβης. Ο θόρυβος περιστροφής περιλαμβάνει όλους τους θορύβους, οι οποίοι έχουν διακριτές συχνότητες και παράγονται σε πολλαπλάσιες αρμονικές της συχνότητας της διέλευσης των πτερυγίων, (δηλαδή το γινόμενο του αριθμού των πτερυγίων επί την τιμή της γωνιακής ταχύτητας). Η στάθμη του θορύβου περιστροφής αυξάνεται με τη διάμετρο, τη μείωση του αριθμού των πτερυγίων, τη μεγαλύτερη ταχύτητα των ακροπτερυγίων και την αεροδυναμική φόρτιση των πτερυγίων (αύξηση απορροφούμενης ισχύος).

Ο θόρυβος τύρβης συνδέεται με το στροβιλισμό στο χείλος εκφυγής των ακροπτερυγίων αλλά και με το γενικό πεδίο τύρβης πίσω από την περωτή. Για να μειωθεί ο θόρυβος τύρβης, πρέπει να ελαττωθεί η ταχύτητα των ακροπτερυγίων, περιορίζοντας ταυτόχρονα την αποδιδόμενη αιολική ισχύ.

Κατά την τελευταία δεκαετία, έχει δοθεί ιδιαίτερη βαρύτητα στη σχεδίαση των πτερυγίων των ανεμογεννητριών έτσι, ώστε να μειώνεται ο αεροδυναμικός θόρυβος, με πολύ καλά αποτελέσματα. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι οι ανεμογεννήτριες τελευταίας γενιάς παράγουν θόρυβο έντασης μικρότερης από το 10% της έντασης που παρήγαγαν οι ανεμογεννήτριες που κατασκευάστηκαν τη δεκαετία του 1980.

Ο **μηχανικός θόρυβος** προκαλείται από τα κινούμενα ηλεκτρομηχανολογικά μέρη της ανεμογεννήτριας. Κύριες πηγές είναι το κιβώτιο μετάδοσης, η ηλεκτρογεννήτρια και τα έδρανα στήριξης. Η αντιμετώπιση του μηχανικού θορύβου γίνεται είτε στην πηγή είτε στη διαδρομή του. Ο μηχανικός θόρυβος στην πηγή μειώνεται είτε με επέμβαση στα στοιχεία που θορυβούν ,π.χ χρησιμοποιώντας οδοντωτούς τροχούς στο κιβώτιο μετάδοσης με πλάγια οδόντωση αντί ευθείας οδόντωσης, είτε με εσωτερική ηχομονωτική επένδυση στο κέλυφος της κατασκευής. Επίσης ο μηχανικός θόρυβος αντιμετωπίζεται και στη διαδρομή του, χρησιμοποιώντας ηχομονωτικά πετάματα καθώς και αντικραδασμικά πέλαμα στήριξης.

Η εκπομπή ήχου από τις νέες ανεμογεννήτριες κυμαίνεται από 95 – 105dB και προέρχεται κυρίως από αεροδυναμικό θόρυβο. Ο μηχανικός θόρυβος έχει περιοριστεί σημαντικά, είτε λόγω μονωτικών ή αντικραδασμικών υλικών είτε λόγω απαλοιφής του κιβωτίου ταχυτήτων. Ο μηχανικός θόρυβος στις νέες ανεμογεννήτριες μπορεί να γίνει αντιληπτός μόνο σε περίπτωση βλάβης κάποιου εξαρτήματος. Ο αεροδυναμικός θόρυβος των ανεμογεννητριών μειώνεται συνεχώς από τους κατασκευαστές μέσω βελτιωμένης σχεδίασης της αεροδυναμικής σχεδίασης των πτερυγίων.

Για τον υπολογισμό της διάχυσης θορύβου από τις ανεμογεννήτριες έχουν αναπτυχθεί διάφορες μεθοδολογίες. Ακριβείς υπολογισμοί διάχυσης θορύβου μπορεί να απαιτούν ιδιαίτερους υπολογισμούς κατά τη νύχτα. Στον πίνακα 6.7 παρουσιάζεται η διάχυση του εκπεμπόμενου θορύβου από τις νέες ανεμογεννήτριες συναρτήσει της απόστασης από τη θέση εγκατάστασής τους.

Πίνακας 6.7: Διάχυση ήχου από ανεμογεννήτρια.

Εκπομπή ήχου από την ανεμογεννήτρια (dB)	Διάχυση ήχου 45 dB	Διάχυση ήχου 40dB	Διάχυση ήχου 35 dB
105	350 m	575 m	775 m
100	200 m	350 m	575 m
95	120 m	200 m	350 m

Στον πίνακα 6.8 παρουσιάζονται οι εντάσεις ήχου εκπεμπόμενου από διάφορες δραστηριότητες.

Πίνακας 6.8: Εντάσεις εκπεμπόμενου ήχου από διάφορες δραστηριότητες.

Δραστηριότητα	Ένταση εκπεμπόμενου ήχου (dB)
Ανθρώπινη ομιλία	65
Ηλεκτρικό ψυγείο	35 – 40
Κέντρο πόλης	75
Κέντρο διασκέδασης	100
Κρεβατοκάμαρα σε ώρα ησυχίας	30

Το ανώτατο επιτρεπτό όριο εκπεμπόμενου θορύβου από ανεμογεννήτριες σε κατοικημένες περιοχές διαφέρουν από χώρα σε χώρα. Στη Δανία το όριο αυτό είναι 45dBκαι στη Σουηδία 40dB. Στη Μεγάλη Βρετανία ο εκπεμπόμενος θόρυβος από μία ανεμογεννήτρια δεν επιτρέπεται να είναι μεγαλύτερος από 5dB από το θόρυβο που επικρατεί κατά μέσο όρο στην περιοχή. Στην Ελλάδα το όριο αυτό είναι 40dB.

Ο θόρυβος των ανεμογεννητριών μπορεί να γίνει αντιληπτός μόνο κάτω από προϋποθέσεις. Σε πολύ χαμηλές ταχύτητες ανέμου οι ανεμογεννήτριες δε λειτουργούν και δεν παράγεται καθόλου θόρυβος. Όταν πάλι ο άνεμος έχει ταχύτητα μεγαλύτερη των 8m/s, ο θόρυβος των ανεμογεννητριών καλύπτεται από τον ίδιο τον άνεμο και όλους τους προκαλούμενους ήχους από αυτό (φύλλα δέντρων, κλπ). Ο θόρυβος των ανεμογεννητριών μπορεί να γίνει αντιληπτός, μόνο όταν επικρατούν άνεμοι ταχύτητας 3 – 8m/s. Η διάχυση του θορύβου είναι μεγαλύτερη κατά την κατεύθυνση πνοής του ανέμου. Κατά τις άλλες διευθύνσεις, η διάχυση του θορύβου είναι σημαντικά ελαττωμένη.

Τέλος μία σημαντική παράμετρος, που μπορεί να επηρεάσει την ηχητική όχληση που τελικά γίνεται αντιληπτή, είναι η άμεση οπτική επαφή με την πηγή του ήχου, δηλαδή τις ανεμογεννήτριες.

- Επιδράσεις στην ορνιθοπανίδα

Επίσης οι επιδράσεις στην ορνιθοπανίδα αφορούν μόνο τα αιολικά πάρκα. Τα περιβαλλοντικά προβλήματα, που συνδέθηκαν με την αλληλεπίδραση πτηνών με τις ανεμογεννήτριες, εμφανίζονται στις Ηνωμένες Πολιτείες προς το τέλος της δεκαετίας του '80. Συγκεκριμένα, διαπιστώθηκε ότι ενδημικά είδη πτηνών, ειδικά προστατευμένοι χρυσαετοί και γεράκια, σκοτώθηκαν από τις ανεμογεννήτριες και τις γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης στα αιολικά πάρκα στο πέρασμα του Άλταμοντ της Καλιφόρνιας (εικόνα 6.12). Σημαντικές απώλειες πτηνών αναφέρθηκαν επίσης στην περιοχή της Ταρίφα στην Ισπανία, ένα σημαντικό πέρασμα της πορείας μετανάστευσης πτηνών πέρα από τη Μεσόγειο.



Εικόνα 6.12: Αεροφωτογραφία του αιολικού πάρκου στο Άλταμοντ στην Καλιφόρνια.

Η ανάπτυξη της χρήσης της αιολικής ενέργειας μπορεί να έχει επιπτώσεις στα πτηνά με τους ακόλουθους τρόπους:

- θνησιμότητα λόγω ηλεκτροπληξίας ή σύγκρουσης πτηνών με ανεμογεννήτρια,
- επέμβαση σε περιοχές αναζήτησης τροφής (θήρευσης),
- επέμβαση σε πορείες μετανάστευσης πτηνών,
- μείωση του υπάρχοντος βιοτόπου των πτηνών,
- εγκατάσταση ανεμογεννητριών σε περιοχές αναπαραγωγής των πτηνών.

Υπάρχει στενός συσχετισμός μεταξύ μιας τοποθεσίας και της ορνιθοπανίδας της. Πολλά είδη πουλιών είναι ιδιαίτερα εξαρτημένα από το βίοτοπο και συχνά ευαίσθητα στις μεταβολές του. Από την άλλη μεριά, υπάρχει αντίστοιχα στενός συσχετισμός μεταξύ μίας περιοχής και της χωροθέτησης των ανεμογεννητριών, ο οποίος εξαρτάται κυρίως από το αιολικό δυναμικό. Ο κίνδυνος σύγκρουσης είναι η προφανέστερη άμεση επίδραση και οι πολυάριθμες μελέτες έχουν εστιάσει σε αυτό το γεγονός.

Ένας σημαντικός αριθμός μελετών έχει εκπονηθεί σχετικά με τις επιδράσεις των ανεμογεννητριών στα πουλιά. Σε γενικές γραμμές, οι ανεμογεννήτριες, κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, μπορεί να αποτελούν σημαντικό κίνδυνο για τα πουλιά. Έχει αποδειχθεί ότι περιοχές με ισχυρά ρεύματα χρησιμοποιούνται από πουλιά, ιδιαίτερα τα αποδημητικά. Η εγκατάσταση ανεμογεννητριών σε τέτοιες περιοχές συνεπάγεται σημαντικό ρίσκο για την ασφάλεια των διερχόμενων πουλιών. Ανάλογη απειλή μπορεί να αποτελέσει, επίσης, η εγκατάσταση ανεμογεννητριών σε βιότοπους που κατοικούνται από είδη ορνιθοπανίδας απειλούμενα από εξαφάνιση.

Από την άλλη μεριά, ένας μεγάλος αριθμός μελετών καταλήγει στο συμπέρασμα ότι οι ανεμογεννήτριες δεν αποτελούν απειλή για τα πουλιά, εξαιτίας του ότι τα πουλιά καταδεικνύουν την ικανότητα να αντιλαμβάνονται την ύπαρξη των ανεμογεννητριών εγκαίρως και να τις αποφεύγουν. Άλλο ένα συχνά απαντούμενο επιχείρημα είναι ότι οι ανεμογεννήτριες επηρεάζουν τα πουλιά σε πολύ μικρότερο βαθμό

από άλλες ανθρώπινες κατασκευές ή δραστηριότητες (συγκρούσεις πουλιών με υαλοκτάρια, ατυχήματα ηλεκτροπληξίας με αγωγούς μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, συγκρούσεις με οχήματα, κλπ).

Σε κάθε περίπτωση, και οι δύο κατηγορίες μελετών καταλήγουν στο ότι, προκειμένου να εξαλειφθεί ή να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα πρόκλησης σημαντικών διαταραχών σε πληθυσμούς ορνιθοπανίδας από ανεμογεννήτριες, θα πρέπει το υπό εγκατάσταση αιολικό πάρκο να μελετάται και να σχεδιάζεται καταλλήλως, λαμβανομένων υπόψη όλων των πιθανών επιπτώσεων στην υφιστάμενη ορνιθοπανίδα εκ των προτέρων. Εάν κριθεί αναγκαίο, θα πρέπει να ληφθούν ειδικά μέτρα για την προστασία των πτηνών κατά τη λειτουργία του αιολικού πάρκου.

- Σκίαση

Κατά τη διάρκεια συγκεκριμένων περιόδων του έτους, και σε συγκεκριμένες ώρες της ημέρας, είναι δυνατό να προκληθεί το φαινόμενο της σκίασης σε οικισμούς κοντινούς στη θέση εγκατάστασης ενός αιολικού πάρκου. Το πρόβλημα της σκίασης προκαλείται από τα περιστρεφόμενα πτερύγια του ρότορα της ανεμογεννήτριας, τα οποία είναι δυνατό να ρίχνουν περιοδικά τη σκιά τους καθώς περιστρέφονται στο παράθυρο ενός κτιρίου, δημιουργώντας έτσι ένα ανεπιθύμητο ή ενοχλητικό συναίσθημα.

Ο κίνδυνος πρόκλησης σκίασης είναι μεγαλύτερος σε αιολικά πάρκα που έχουν εγκατασταθεί αρκετά κοντά σε κατοικήσιμες περιοχές. Η ελάχιστη απόσταση που, βάσει της ελληνικής νομοθεσίας, ένα αιολικό πάρκο μπορεί να έχει από ένα οικισμό είναι 500m. Η απόσταση αυτή αυτομάτως μειώνει τον κίνδυνο πρόκλησης του φαινομένου της σκίασης. Ωστόσο, κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, ένα αιολικό πάρκο εγκατεστημένο στην ελάχιστη απόσταση από έναν οικισμό, είναι δυνατό να προκαλέσει σκίαση στα πλησιέστερα κτήρια. Η σκιά του πτερυγίου της ανεμογεννήτριας εξασθενεί μέσα στην ατμόσφαιρα και αποσβένεται τελικά μετά από κάποια απόσταση. Θεωρητικά, η σκιά ενός πτερυγίου μήκους 22m μπορεί να γίνει ορατή σε απόσταση 4,8km. Τούτο συμβαίνει αμέσως μετά την ανατολή ή λίγο πριν τη δύση του ηλίου. Στην πραγματικότητα, για μία ανεμογεννήτρια με ονομαστική ισχύ 2MW, με μήκος πτερυγίου 45m και πάχος πτερυγίου 2m, η σκιά του περιστρεφόμενου πτερυγίου μπορεί να γίνει αισθητά ορατή σε απόσταση 1,4km, παρόλο που φαινόμενα σκίασης μπορούν να καταγραφούν σε απόσταση 2km.

Από την ανατολή ως τη δύση του ηλίου, η σκιά μιας ανεμογεννήτριας ακολουθεί τη διαδρομή ενός ηλιακού ρολογιού, ξεκινώντας δυτικά και καταλήγοντας ανατολικά. Καθώς η ώρα της ανατολής του ηλίου διαφέρει μέσα στο έτος, όπως και η θέση ανατολής και δύσης του, η διαδρομή της σκιάς μιας ανεμογεννήτριας θα είναι διαφορετική σε διαφορετικές εποχές του έτους. Η θέση και ώρα ανατολής και δύσης του ηλίου για μια συγκεκριμένη τοποθεσία είναι γνωστές. Συνεπώς, η διαδρομή της σκιάς της ανεμογεννήτριας μπορεί να προβλεφθεί. Επιπλέον, κατά τη διάρκεια του έτους, η θέση της σκιάς της ανεμογεννήτριας μεταβάλλεται.

- Χρήσεις γης

Θα μπορούσε κανείς να ισχυριστεί ότι τα αιολικά πάρκα απαιτούν περισσότερη έκταση ανά εγκατεστημένη μονάδα ισχύος από ότι οι συμβατικές τεχνολογίες παραγωγής (θερμοηλεκτρικά ή πυρηνικά εργοστάσια). Ωστόσο, μετά από μία στοιχειώδη ανάλυση, θα δει κανείς ότι ο ανωτέρω ισχυρισμός δεν είναι και τόσο προφανής. Και τούτο γιατί τόσο τα θερμοηλεκτρικά όσο και τα πυρηνικά εργοστάσια χρησιμοποιούν μεγάλες εκτάσεις γης καθ' όλη την παραγωγική διαδικασία, από την εξόρυξη ή την άντληση του ορυκτού καυσίμου έως τη διάθεση των αποβλήτων. Σε όλη αυτή τη διαδικασία χρησιμοποιούνται ορυχεία, σταθμοί άντλησης, διυλιστήρια, λιμάνια, αποθηκευτικοί χώροι και σταθμοί παραγωγής. Πέραν των χώρων αυτών περιοχές μεγάλης έκτασης γύρω από τις θέσεις εγκατάστασης των θερμοηλεκτρικών ή πυρηνικών σταθμών παραγωγής επηρεάζονται από τη λειτουργία τους, με αποτέλεσμα πλήθος δραστηριοτήτων να μην είναι πλέον δυνατό να υλοποιηθούν εντός των ορίων τους.

Η έκταση η οποία δεσμεύεται από μία ανεμογεννήτρια ονομαστικής ισχύος 2MW και στην οποία δεν είναι δυνατή η εκπόνηση κάποιας άλλης δραστηριότητας είναι ένας χώρος διαστάσεων περίπου 40m x 40m = 1,6 στρέμματα, γύρω από την ανεμογεννήτρια. Οι υπόλοιπες εκτάσεις, γύρω από τις ανεμογεννήτριες ενός αιολικού πάρκου, είναι διαθέσιμες προς εκπόνηση των υφιστάμενων δραστηριοτήτων πριν την εγκατάσταση του αιολικού πάρκου (εικόνες 6.13 – 6.15).



Εικόνα 6.13: Αγροτικές καλλιέργειες σε περιοχή αιολικού πάρκου.



Εικόνα 6.14: Εγκατάσταση αιολικού πάρκου σε αγροτική καλλιεργήσιμη έκταση.



Εικόνα 6.15: Βοσκή βοοειδών εντός αιολικού πάρκου στην ηπειρωτική Ευρώπη.

Σε αντίθεση με τα αιολικά πάρκα, οι φωτοβολταϊκοί σταθμοί έχουν σημαντική επίπτωση στη δέσμευση γης, ακριβώς εξαιτίας της χαμηλής πυκνότητας ισχύος την οποία εμφανίζουν (περίπου 25 στρέμματα γης ανά 1MW). Η επίπτωση αυτή μπορεί να έχει σοβαρές κοινωνικές και οικονομικές συνέπειες, όταν η εγκατάσταση επιλέγεται να γίνει σε περιοχές με συγκεκριμένη προγενέστερη χρήση (π.χ. καλλιεργήσιμες εκτάσεις, εικόνα 6.16). Πρακτικά οι επιπτώσεις στις χρήσεις γης αποτελούν σοβαρή περιβαλλοντική επίδραση των φωτοβολταϊκών σταθμών.



Εικόνα 6.16: Δέσμευση καλλιεργήσιμων εκτάσεων λόγω εγκατάστασης φωτοβολταϊκού σταθμού.

6.8. Επιπτώσεις υδροηλεκτρικών σταθμών

Στην ενότητα αυτή ολοκληρώνεται η αναφορά στις επιπτώσεις των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με την παρουσίαση των επιπτώσεων των υδροηλεκτρικών σταθμών. Οι επιπτώσεις των υδροηλεκτρικών σταθμών, παρόλο που σε κάθε περίπτωση είναι τοπικού χαρακτήρα, μπορεί να είναι υπό συνθήκες σημαντικές. Ακολουθεί αναλυτική περιγραφή των επιπτώσεων αυτών και οι δυνατοί τρόποι αντιμετώπισής τους [35].

- Έδαφος

Οι πρώτες επιπτώσεις ενός υδροηλεκτρικού σταθμού αφορούν στο έδαφος. Όταν η κατασκευή ενός υδροηλεκτρικού σταθμού συνδυάζεται και με την κατασκευή υδροταμιευτήρα, οι σημαντικότερες επιπτώσεις που μπορούν να προκύψουν είναι οι εξής:

- Με τη δημιουργία του φράγματος και των λοιπών συνοδευτικών έργων κατακλύζονται εκτάσεις γης (συνήθως γεωργικές), και έτσι μεταβάλλονται οι χρήσεις γης της περιοχής.
- Παρατηρείται σημαντική ποιοτική μεταβολή, κατά την οποία μία χερσαία έκταση και ένας ποτάμιος υγρότοπος μετατρέπονται σε λιμναίο βιότοπο, ενώ το προηγούμενο φυσικό περιβάλλον μετατρέπεται κατά μεγάλο ποσοστό σε ανθρωπογενές.
- Μεταβολή στη μορφολογία του εδάφους από την κατασκευή τόσο του ορύγματος του ταμιευτήρα, όσο και του ίδιου του φράγματος, καθώς και αλλοίωση του ανάγλυφου από την κατασκευή της λίμνης και των υπόλοιπων οικοδομικών έργων.
- Κατά την πλήρωση του ταμιευτήρα μπορεί να προκληθούν κάποιες σεισμικές δραστηριότητες ή κατολισθήσεις, ενώ από την άνοδο του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα στην περιοχή του ταμιευτήρα μπορούν να προκληθούν στατικά προβλήματα.

Όταν δεν κατασκευάζεται υδροταμιευτήρας, τότε, επίσης, ενδεχομένως να προκύψουν οι εξής επιπτώσεις:

- Αλλοίωση του εδάφους από την κατασκευή πιθανού αποθεσιοθάλαμου για την επακόλουθη απόθεση των υλικών που θα προκύψουν από την κατασκευή του ορύγματος, που θα δημιουργηθεί από τον αγωγό μεταφοράς και πτώσης του νερού, καθώς και από όλα τα υπόλοιπα βοηθητικά κατασκευαστικά έργα
- Μεταβολή της μορφολογίας του εδάφους από τις προαναφερθείσες κατασκευές.

Τα συνήθη μέτρα για τον περιορισμό ή την αντιμετώπιση των ανωτέρω επιπτώσεων είναι τα εξής:

- μείωση των κατακλυζόμενων εκτάσεων,
- διάνοιξη δανειοθάλαμου μέσα στη λεκάνη,
- χρήση πιθανώς υπάρχοντος λατομείου,
- εκπόνηση γεωτεχνικών μελετών κατά τη φάση του σχεδιασμού για αποφυγή σεισμικών δονήσεων και κατολισθήσεων με συνοδευτικά έργα ενίσχυσής του,
- αποφυγή διατήρησης σε υψηλή στάθμη του νερού του ταμιευτήρα και μικρότερη διακύμανση των μεταβολών της,
- διάθεση των αποβλήτων των φερτών υλών που κατακρατεί το φράγμα στις κατάντη καλλιέργειες ως εδαφοβελτιωτικό,
- δενδροφυτεύσεις και τεχνητή φυτοκάλυψη.

- Νερό

Σημαντικές, επίσης, μπορεί να είναι οι επιπτώσεις του υδροηλεκτρικού σταθμού στα υδατικά αποθέματα της περιοχής, αναφορικά τόσο ως προς την ποσότητά τους, όσο και ως προς την ποιότητά τους.

Αναφορικά με τις εν δυνάμει επιπτώσεις στην ποσότητα των υδατικών αποθεμάτων, όταν η κατασκευή του υδροηλεκτρικού σταθμού συνδυάζεται και με την κατασκευή υδροταμιευτήρα, μπορεί να προκύψουν οι εξής:

- μεταβολή της ποσότητας του νερού στα κατάντη του φράγματος με εναλλαγές περιόδων ξηρασίας και πλημμυρών,
- επιβράδυνση της ροής του ποταμού στο φράγμα και επιτάχυνση της ροής του κατάντη του φράγματος,

- έντονες αυξομειώσεις της στάθμης του ταμιευτήρα, διαφορετικές από αυτές που σημειώνονται σε μια φυσική λίμνη,
- μεταβολές στον υδροφόρο ορίζοντα της περιοχής.

Οι δύο πρώτες επιπτώσεις ισχύουν με κάποιες μικρές τροποποιήσεις και στην περίπτωση που δεν κατασκευάζεται υδροταμιευτήρας συνοδευτικά με την κατασκευή του υδροηλεκτρικού σταθμού.

Επίσης, αναφορικά με τις επιπτώσεις στην ποιότητα των υδατικών αποθεμάτων, το νερό που υπερχειλίζει από το φράγμα είναι «φτωχό» σε φερτές ύλες λόγω της κατακράτησης των υλών αυτών στο φράγμα, με αποτέλεσμα τη διάβρωση της παλιάς κοίτης του ποταμού. Επίσης:

- Στην περίπτωση μη αποψίλωσης της βλάστησης μέσα από το χώρο που κατακλύζεται, παρατηρείται μείωση του οξυγόνου στο νερό λόγω βιοαποδόμησης των οργανικών και έκλυση μεθανίου εξαιτίας της συνεπακόλουθης δημιουργίας αναερόβιων συνθηκών στον πυθμένα.
- Τα αναπτυσσόμενα αναερόβια βακτήρια μπορούν να μετατρέψουν τον αβλαβή ανόργανο υδράργυρο, που προϋπάρχει στο έδαφος, σε μεθυλϋδράργυρο που είναι τοξικός και βιοσυσσωρεύσιμος, καθώς μέσω της τροφικής αλυσίδας μπορεί να μεταβιβαστεί τελικά και στους ανώτερους οργανισμούς.
- Επίσης μπορεί να παρατηρηθεί μείωση του διαλυμένου οξυγόνου και αλλαγή στη θερμοκρασία του νερού, όπου το νερό της λίμνης στα ανώτερα στρώματα είναι πιο ζεστό λόγω της στασιμότητας, ενώ το πιο κρύο νερό βυθίζεται και είναι φτωχότερο σε οξυγόνο. Αυτό έχει ως συνέπεια το νερό που απελευθερώνεται στην κοίτη του ποταμού, είτε άμεσα είτε μετά το σταθμό παραγωγής, να είναι πιο κρύο και πιο ανοξικό από το φυσικό, αν προέρχεται από το κάτω στόμιο του φράγματος, και να προκαλέσει προβλήματα διαβίωσης ή ακόμα και θανάτωση της ιχθυοπανίδας, που είναι συνηθισμένη να ζει σε θερμότερο και πιο οξυγονωμένο νερό. Το πρόβλημα είναι σαφώς τοπικό και επικεντρώνεται στην περιοχή αμέσως κατάντη του φράγματος ή του σταθμού παραγωγής. Αν πάλι το νερό προέρχεται από το πάνω στόμιο του φράγματος, τότε θα είναι πιο θερμό από το κανονικό οπότε και πάλι θα δημιουργηθεί τοπικό πρόβλημα.
- Τέλος μπορεί να υπάρξει μείωση του pH από την αποσύνθεση της βιομάζας, που υπάρχει στον ταμιευτήρα, θολότητα και αιωρούμενα στερεά από τη διάβρωση του πυθμένα, καθώς και πιθανή αλάτωση του νερού.

Η πρώτη επίπτωση ισχύει και στην περίπτωση που δεν κατασκευάζεται υδροταμιευτήρας συνοδευτικά με την κατασκευή του υδροηλεκτρικού σταθμού.

Τα συνιστάμενα μέτρα για την αντιμετώπιση ή την αποφυγή των ανωτέρω επιπτώσεων των υδροηλεκτρικών σταθμών στα υδατικά αποθέματα της περιοχής εγκατάστασης είναι τα εξής:

- εξασφάλιση ελάχιστης μόνιμης ροής και στα κατάντη του φράγματος (Ν. 2773/99),
- ιεράρχηση χρήσεων νερού του ταμιευτήρα,
- μείωση του χρόνου παραμονής του νερού στον ταμιευτήρα,
- για τη βελτίωση των προβλημάτων της ποιότητας του νερού, προτείνονται λύσεις όπως εκχειλιστές σε διάφορα ύψη του φράγματος, ώστε το νερό να διατηρεί σταθερή μέση θερμοκρασία, τεχνητά συστήματα θέρμανσης και κλιματισμού, αναμεικτες και συστήματα αερισμού μέσα στο νερό της λίμνης ή στην ειδικά διαμορφωμένη τουρμπίνα, που θα βοηθούν την αύξηση του οξυγόνου που είναι διαλυμένο στο νερό της λίμνης,
- αποψίλωση της κατακλυζόμενης βλάστησης στο χώρο του ταμιευτήρα πριν την πλήρωσή του με νερό.

- Ιχθυοπανίδα

Οι επιπτώσεις στην ιχθυοπανίδα από την κατασκευή και λειτουργία ενός υδροηλεκτρικού σταθμού μπορεί να είναι οι σημαντικότερες από κάθε άλλη κατηγορία. Συγκεκριμένα:

- Ευνοούνται νέα είδη ιχθυοπανίδας κυρίως λιμναίας, ενώ ταυτόχρονα δημιουργείται αναταραχή με μείωση έως και εξαφάνιση της πρότερης ποτάμιας ιχθυοπανίδας. Οι λόγοι αφορούν στις αλλαγές της θερμοκρασίας του νερού και στη συγκέντρωση των διαλυμένων αερίων κατάντη, στη μεταβολή της ποσότητας και της ποιότητας του νερού καθώς στις έντονες διακυμάνσεις της στάθμης του νερού.
- Εξαφανίζονται ή μειώνονται αισθητά τα ψάρια κατάντη του φράγματος εξαιτίας της εκεί μικρής παροχής του νερού.
- Μεγάλο πρόβλημα δημιουργείται σε όλα τα είδη των μεταναστευτικών ψαριών, τα ανάδρομα (π.χ. σολομός), τα κατάδρομα (π.χ. χέλι), τα αμφίδρομα (π.χ. κάποια είδη κεφάλων) και τα ποταμοδρομικά. Τα μεταναστευτικά ψάρια απαιτούν διαφορετικό περιβάλλον στις βασικές φάσεις της ζωής. Ο κύκλος ζωής τους πραγματοποιείται εν μέρει στο γλυκό νερό και εν μέρει στο αλμυρό νερό της θάλασσας. Το φράγμα και η δεξαμενή αποτελούν εμπόδιο για τη μετανάστευση των ψαριών, είτε στα ανάντη, είτε στα κατάντη.

Το εμπόδιο, που συναντούν τα ψάρια κατά το ταξίδι της μετανάστευσης τους, είναι πιθανό:

α. Να τα οδηγήσει στους στροβίλους του σταθμού παραγωγής με αποτέλεσμα τη διαταραχή τους, τον τραυματισμό τους ή και τη θανάτωσή τους, μιας και οι μηχανισμοί τραυματισμού των ψαριών μέσα σε μια τουρμπίνα, μπορεί να είναι οι αλλαγές πιέσεων, ο στροβιλισμός, το χτύπημά τους στα μηχανικά μέρη της τουρμπίνας και ο τεμαχισμός τους ανάμεσα στα κενά και τα κινητά μέρη της τουρμπίνας.

β. Να τα καθυστερήσει, με αποτέλεσμα να συσσωρευτούν πίσω από το φράγμα, να παραμείνουν σε ακατάλληλες θερμικές ζώνες στο βαθύτερο στρώμα του νερού και να πέσουν εύκολο θύμα παράνομης αλιείας ή θύματα άλλων ειδών ιχθυοπανίδας ή αρπακτικών ζώων.

Για την αντιμετώπιση των ανωτέρω επιπτώσεων είναι δυνατό να ληφθούν τα ακόλουθα μέτρα:

- Τοποθέτηση αποτελεσματικών και ελκυστικών ιχθυοσκαλών ή ιχθυοπερασμάτων για την ασφαλή μετάβαση των ψαριών στα κατάντη ή στα ανάντη του φράγματος. Οι δίοδοι αυτοί, για να είναι αποτελεσματικοί, πρέπει να χωροθετηθούν κατάλληλα και θα πρέπει να εξασφαλίζουν συνθήκες για τα ψάρια παρόμοιες με του ποταμού όσον αφορά ποιότητα, ποσότητα ροής νερού και πυθμένα. Οι ιχθυόσκαλες αυτές μπορεί να είναι σε αναβαθμίδες, σκαλοπάτια ή κατασκευασμένες σε κεκλιμένα επίπεδα. Επίσης, θα πρέπει να καλύπτονται με εσχάρες και κλειδαριές, για να μην πέσουν τα ψάρια θύματα παράνομης αλιείας.
- Για την ομαλή μετάβαση των ψαριών στα κατάντη μπορούν να τοποθετηθούν συστήματα αερισμού, θέρμανσης ή κλιματισμού, που θα αποτρέπουν την είσοδο των ψαριών στις επικίνδυνες για αυτά τουρμπίνες. Πολύ συχνά εφαρμοζόμενες τεχνικές είναι οι παρακαμπτήριες επιφανειακές δίοδοι ή τα κόσκινα – φίλτρα. Τα φίλτρα μπορεί να είναι διάτρητοι δίσκοι και μεταλλικές ή πλαστικές ράβδοι. Επίσης, αντί των φυσικών φραγμών των κόσκινων μπορούν να χρησιμοποιηθούν συμπεριφεριστικοί φραγμοί, όπου χρησιμοποιώντας κάποιο φως ή ήχους ή ηλεκτρικά πεδία ή φυσαλίδες να προσελκύουν τα ψάρια να περάσουν μέσα από αυτές τις δόδους αποφεύγοντας έτσι τους στροβίλους.
- Όλα τα πιο πάνω για το ασφαλές πέρασμα, είτε προς τα πάνω, είτε προς τα κάτω, πρέπει να συνδυάζονται με τους φιλικούς για τα ψάρια στροβίλους. Στην περίπτωση αυτή απαιτείται ο περιβαλλοντικός επανασχεδιασμός τους, ώστε τα ψάρια να μην πεθαίνουν είτε άμεσα είτε έμμεσα στο πέρασμά τους από αυτούς. Οι φιλικοί για τα ψάρια στροβίλοι σχεδιάζονται με ένα συνδυασμό αλλαγών στα μεγέθη των ανοιγμάτων, στις γωνίες των ραφιών – ελασμάτων, στις δόδους ανοιγμάτων και στις προεξοχές τους καθώς και στη ροή του νερού μέσα σε αυτούς, έτσι ώστε το ψάρι να βρεθεί σε μια ζώνη ασφαλείας όπου οι πιέσεις, ο στροβιλισμός και η πιθανότητα χτυπήματος του να είναι σε αποδεκτά επίπεδα.
- Συνεργασία μηχανικών και βιολόγων για την εξομοίωση της συμπεριφοράς των ψαριών, μέσω κάποιων αισθητήρων στο φράγμα και στο πέρασμά τους από τους στροβίλους.
- Δημιουργία τεχνητών καλλιεργειών και αναπαραγωγικών ειδών ιχθυοπανίδας.

- Εγκατάσταση μονάδων αερισμού, θέρμανσης για τη διατήρηση της θερμοκρασίας και του οξυγόνου του νερού στα πρότερα επίπεδα, ώστε να μπορεί να επιβιώσει η ιχθυοπανίδα, που είναι συνηθισμένη σε αυτές τις συνθήκες.
- Προσεκτικός καθαρισμός της παρόχθιας ζώνης.
- Εξασφάλιση ελάχιστης μόνιμης ροής του ποταμού στην παλιά κοίτη του.

- Λοιπή πανίδα

Αναφορικά με τη λοιπή πανίδα, πλην της ιχθυοπανίδας, οι εν δυνάμει επιπτώσεις από την κατασκευή και λειτουργία ενός υδροηλεκτρικού σταθμού συνοψίζονται στις εξής:

- ευνοούνται από την ύπαρξη του ταμιευτήρα κάποια είδη ορνιθοπανίδας, ερπετών και θηλαστικών κυρίως αρπακτικών
- από το ίδιο το φράγμα ή και τον ταμιευτήρα αποκόπτονται κάποια είδη ζώων κυρίως θηλαστικών και δυσκολεύουν οι μετακινήσεις και οι μεταναστεύσεις τους
- λόγω της αύξησης της υγρασίας και του ηπιότερου περιβάλλοντος στην περιοχή του ταμιευτήρα ευνοούνται κάποια είδη εντόμων.

Οι επιπτώσεις από την κατασκευή και λειτουργία ενός υδροηλεκτρικού σταθμού στη λοιπή πανίδα δύνανται να αντιμετωπιστούν με τα εξής μέτρα:

- προσεκτικός καθαρισμός της παρόχθιας ζώνης
- δενδροφυτεύσεις
- δημιουργία ζωνών προστασίας και τεχνητή μεταφορά ευαίσθητων ειδών πανίδας.

- Οικοσυστήματα – Χλωρίδα – Βλάστηση

Στο τοπικό οικοσύστημα της περιοχής εγκατάστασης μπορεί να προκληθούν οι ακόλουθες επιπτώσεις:

- Με την κατασκευή του φράγματος και την κατάκλυση του ταμιευτήρα χάνεται όλο το χειρσαίο οικοσύστημα. Αλλοιώνεται έτσι το ποτάμιο και παραποτάμιο οικοσύστημα, ανάντη και κατάντη του φράγματος, ενώ ταυτόχρονα αντικαθίσταται με μια ομοιόμορφη δεξαμενή, με έντονες και αφύσικες διακυμάνσεις της στάθμης με πιθανό αποτέλεσμα την απώλεια ενός μέρους της φυσικής παρόχθιας βλάστησης και πανίδας. Είναι δυνατόν, επίσης, να επέλθουν ολέθριες υποβιβάσεις ακτών, με προβλήματα τόσο στην αλιεία, όσο και στα υδρόβια πουλιά.
- Με την κατασκευή του φράγματος συγκρατείται πίσω του όλο το φορτίο των φερτών ιζημάτων που μετέφερε το νερό του ποταμού με αποτέλεσμα να μην μεταφέρεται το φορτίο αυτό στα κατάντη και να αλλοιώνεται έτσι το εκεί περιβάλλον, κυρίως στο στόμιο της εκβολής (δέλτα) του ποταμού ή ακόμα και αρκετά μέτρα πιο μακριά στις γειτονικές ακτές. Επιβεβαιώνεται έτσι αυτό που υποστηρίζουν πολλοί ότι τα «φράγματα δεν παγιδεύουν μόνο το νερό των ποταμών αλλά και το περιεχόμενό τους».
- Η εναλλαγή περιόδων ξηρασίας ή πλημμυρών μπορεί να επιφέρει τη διάβρωση του εδάφους και την εξαφάνιση της βλάστησης, παρόχθιας ή μη.

Η τελευταία επίπτωση ισχύει και στην περίπτωση που δεν κατασκευάζεται υδροταμιευτήρας συνοδευτικά με την κατασκευή του υδροηλεκτρικού σταθμού.

Οι ανωτέρω επιπτώσεις δύνανται να αντιμετωπιστούν με τα ακόλουθα μέτρα:

- εξασφάλιση ελάχιστης μόνιμης ροής του ποταμού στην παλιά κοίτη του
- δενδροφυτεύσεις, επαναφυτεύσεις
- δημιουργία ζωνών προστασίας στη γειτονική παρόχθια περιοχή

- διατήρηση σταθερής στάθμης του νερού του ταμιευτήρα με την κατασκευή πολλαπλών ταμιευτήρων (π.χ. ημερήσιων ή μηνιαίων), ώστε να προσομοιάζεται ο ταμιευτήρας με μια φυσική λίμνη
- για την αντιμετώπιση της ιζηματοαπόθεσης στον ταμιευτήρα και των συνεπαγόμενων επιπτώσεων του (π.χ. διάβρωση), προτείνονται:
 - α. οι κατασκευές εξόδων των φερτών υλών πριν τη δεξαμενή, καθώς και η δημιουργία μικρών ταμιευτήρων πριν από τον κεντρικό για την εναπόθεση των φερτών σε αυτόν και την ομαλή απομάκρυνσή τους μέσω ειδικών διόδων
 - β. συχνός καθαρισμός των ιζημάτων και μεταφορά τους στο κατάντη νερό.

- Τοπίο

Η κατασκευή ενός υδροηλεκτρικού σταθμού σαφώς προκαλεί αλλοιώσεις στο φυσικό τοπίο. Συγκεκριμένα:

- Παρατηρείται σημαντική σημειακή αλλαγή και τομή του τοπίου, όπου από φυσικό τοπίο μετατρέπεται σε κάποια σημεία του σε ανθρωπογενές. Το διαμήκες, δαιδαλώδες και άγριο ποτάμιο τοπίο, μετατρέπεται σε λιμναίο, συνήθως ήπιο και ομαλό. Τα δάση και η όποια βλάστηση προϋπάρχει, δίνουν τη θέση τους στη λίμνη, σε διώρυγες, κανάλια και στο σταθμό παραγωγής, σε νέους δρόμους πρόσβασης καθώς και σε νέα δίκτυα κοινής ωφέλειας.
- Με τη μειωμένη ροή του νερού στα κατάντη του φράγματος και με την πολλές φορές διαβρωμένη κοίτη του ποταμού αλλοιώνεται σημαντικά το τοπίο μέχρι και το σημείο της εκβολής του.

Οι όποιες επιπτώσεις από την κατασκευή και τη λειτουργία ενός υδροηλεκτρικού σταθμού στο τοπίο δύνανται να αντιμετωπιστούν με τα ακόλουθα μέτρα:

- Δενδροφυτεύσεις, επαναφυτεύσεις.
- Κατασκευή των οικοδομικών έργων με υλικά εναρμονισμένα με τον περιβάλλοντα χώρο (π.χ. χρήση τοπικής πέτρας κ.ά.).
- Αν το φράγμα είναι μεγάλο, προτείνεται η επένδυσή του με πέτρες ή με σιδερένιες κατασκευές, ώστε να προσφέρεται μια καλή αμφιθεατρική θέαση.
- Υπογειοποίηση του κτηρίου του σταθμού και όλων των αγωγών, ώστε να μην υπάρχει οπτική θέαση και διακοπή στην υπάρχουσα βλάστηση και πανίδα που πιθανώς υπάρχουν πάνω στο λόφο. Η υπογειοποίηση αυτή των αγωγών μπορεί να επιτευχθεί σχετικά εύκολα, με τη χρήση κατάλληλων υλικών, κυρίως πλαστικού, όπου η επιδιόρθωση και η συντήρησή τους είναι πιο σπάνιες, στη δε περίπτωση διαρροής ή βλάβης αυτή βρίσκεται εύκολα με τη χρήση θερμοκάμερας.
- Εξασφάλιση ελάχιστης μόνιμης ροής του ποταμού στην παλιά του κοίτη, έτσι ώστε να είναι ορατή η παρουσία του ποταμού και μετά την κατασκευή του φράγματος.

- 3.6. Μικροκλίμα

Επιπτώσεις μπορεί να προκύψουν επίσης στο μικροκλίμα της περιοχής, ως εξής:

- Η κατασκευή ταμιευτήρα συνεπάγεται αλλαγή του τοπικού υδρολογικού κύκλου με συνέπεια την αύξηση της υγρασίας. Είναι δε σύνηθες το φαινόμενο της πρωινής ομίχλης στη λίμνη.
- Το κλίμα γίνεται ηπιότερο καθώς παρατηρείται σχετική άνοδος της θερμοκρασίας και αλλαγή στους τοπικούς ανέμους, αφού πλέον δεν συναντούν στο πέρασμά τους έδαφος, βλάστηση, δέντρα αλλά μια επίπεδη υγρή επιφάνεια.

Οι επιπτώσεις στο μικροκλίμα αντιμετωπίζονται με την αύξηση των δενδροφυτεύσεων.

Αναφορές Κεφαλαίου

- [1] Daniel Yergin, *The Prize: The Epic Quest for Oil, Money, and Power*. New York: Simon and Schuster, 2008.
- [2] Ikenberry, G. John (1986). «The Irony of State Strength: Comparative Responses to the Oil Shocks in the 1970s». *International Organization* 40 (1): 105–137 [p. 107]. doi:10.1017/S0020818300004495
- [3] Hirsch, Robert L. (1987). «Impending United States Energy Crisis». *Science* 235 (4795): 1467–1473 [p. 1467]. doi:10.1126/science.235.4795.1467
- [4] Frum, David (2000). *How We Got Here: The 1970s*. New York: Basic Books, σελ. 313. ISBN 978-0-465-04195-4.
- [5] Slavin, Barbara; Freudenheim, Milt; Rhoden, William C. (January 24, 1982). «The World; British Miners Settle for Less». *New York Times*. April 20, 2010.
- [6] Adam Bird and Malcolm Brown (2005-06-02). "The History and Social Consequences of a Nationalized Oil Industry".
- [7] Antonia Juhasz (2007-03-13). "Whose Oil Is It, Anyway?". *The New York Times*.
- [8] Morse, Edward. *A New Political Economy of Oil?*. *Journal of International Affairs* (The Trustees of Columbia University); 1999: 53 (1).
- [9] Odell, Peter R. *The Significance of Oil*. *Journal of Contemporary History*; 1968 (Sage Publications) 3 (3, The Middle East): 93–110. JSTOR 259700.
- [10] Ikelegbe, Augustine. *The Economy of Conflict in the Oil Rich Niger Delta Region of Nigeria*. *Nordic Journal of African Studies*; 2005: 14 (2): 208–234.
- [11] Wilson III, Ernest J. *Strategies of State Control of the Economy: Nationalization and Indigenization in Africa*. *Comparative Politics*; 1990 (Ph.D. Program in Political Science of the City University of New York) 22 (4): 401–419.
- [12] Hill, Fiona; Fee, Florence. *Fueling the Future: The Prospects for Russian Oil and Gas*. *Demokratizatsiya* 2002; 10 (4): 462–487.
- [13] World Nuclear Association (2015). *The economics of nuclear power*. September 2015. <http://www.world-nuclear.org/info/Economic-Aspects/Economics-of-Nuclear-Power/>
- [14] Cooper Mark. *The economics of nuclear reactors: Renaissance or Relapse?* August 2009. No. 692-693. http://www.nirs.org/mononline/nm692_3.pdf
- [15] Energy Watch Group (2007). *Uranium costs – Electricity costs*. <http://www.energywatchgroup.org>
- [16] D.P. Lalas, H. Tselepidaki and G. Theoharatos, 1983, “An analysis of wind power potential in Greece”, *Solar Energy*, 30(6), pp. 497-505.
- [17] Dimitrios Kanellopoulos, 1992, “National wind resources validation in Greece”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 39(1–3), pp. 367-372.
- [18] Apostolos N. Fragoulis, 1994, “Wind energy in Greece development & future perspectives”, *Renewable Energy*, 5(1–4), pp. 642-649.
- [19] N. Vogiatzis, K. Kotti, S. Spanomitsios and M. Stoukides, 2004, “Analysis of wind potential and characteristics in North Aegean, Greece”, *Renewable Energy*, 29(7), pp. 1193-1208.
- [20] Ioannis Fyrippis, Petros J. Axaopoulos and Gregoris Panayiotou, 2010, “Wind energy potential assessment in Naxos Island, Greece”, *Applied Energy*, 87(2), pp. 577-586.

- [21] P. Palaiologou, K. Kalabokidis, D. Haralambopoulos, H. Feidas and H. Polatidis, 2011, “Wind characteristics and mapping for power production in the Island of Lesbos, Greece”, *Computers & Geosciences*, 37(7), pp. 962-972.
- [22] G. Xydis, 2012, “Wind-direction analysis in coastal mountainous sites: An experimental study within the Gulf of Corinth, Greece”, *Energy Conversion and Management*, 64, pp. 157-169.
- [23] V. Kotroni, K. Lagouvardos and S. Lykoudis, 2014, “High-resolution model-based wind atlas for Greece”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, pp. 479-489.
- [24] A.A. Flocas, 1980, “Estimation and prediction of global solar radiation over Greece”, *Solar Energy*, 24(1), pp. 63-70.
- [25] Γεωπληροφοριακός Χάρτης P.A.E.: <http://www.rae.gr/geo/>.
- [26] Dimitris Al. Katsaprakakis, 2012, “A review of the environmental and human impacts from wind parks. A case study for the Prefecture of Lasithi, Crete”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), pp. 2850-2863.
- [27] Αριθμός ΥΑΠΕ/Φ1/14810, “Κανονισμός Αδειών Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας με χρήση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και μέσω Συμπαγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας Υψηλής Απόδοσης (Σ.Η.Θ.Υ.Α.)”, Φ.Ε.Κ. 2373Β' / 25-10-2011.
- [28] <http://www.communitywindpower.co.uk/news.asp>.
- [29] http://www.westmill.coop/westmill_home.asp.
- [30] <http://hepburnwind.com.au/about/>.
- [31] <http://sustainablecities.dk/en/city-projects/cases/samsøe-a-role-model-in-self-sufficiency>.
- [32] <http://www.localenergyscotland.org/funding-resources/resources-advice/case-studies/joint-ventures-co-operatives/neilston-community-wind-farm/>.
- [33] <http://www.fremantlewindfarm.com.au/>.
- [34] International Energy Statistics.
<http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/iedindex3.cfm?tid=90&pid=44&aid=8>
- [35] Β. Λαμπροπούλου Α. Καραγεωργόπουλος, Μ. Κορνάρος. Θ. Τσούτσος. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις από μικρούς υδροηλεκτρικούς σταθμούς – Η Ελληνική εμπειρία. Τεχνικά Χρονικά. Επιστημονική Έκδοση ΤΕΕ, ΙΙΙ, τεύχος 1-2 2004. σελ. 9 – 24.