

ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ - ΥΓΡΑΣΙΑ

1. ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ

1.1. Εισαγωγή

Με τον όρο *θερμότητα* εννοούμε μια μορφή ενέργειας που εξαρτάται από τη δομή της ύλης και που είναι δυνατό να μεταδοθεί σε διάφορα συστήματα ή σώματα με διάφορους τρόπους ή να μετατραπεί σ' άλλες μορφές ενέργειας. *Θερμοκρασία* είναι το μέτρο με το οποίο προσδιορίζεται η "θερμική κατάσταση" των διαφόρων σωμάτων, είναι δηλαδή ένα φυσικό μέγεθος που συνδέεται με τη μέση κινητική ενέργεια των σωματιδίων ενός συστατικού, το οποίο και χαρακτηρίζει πόσο θερμό ή πόσο ψυχρό είναι αυτό.

Κύρια πηγή θερμότητας για την ατμόσφαιρα και τη γη είναι ο ήλιος. Η ακτινοβολία του ρυθμίζει τη θερμοκρασία της ατμόσφαιρας κυρίως των κατώτερων στρωμάτων της, του εδάφους και των νερών. Ο ατμοσφαιρικός αέρας, από την ηλιακή ακτινοβολία που διέρχεται απ' αυτόν, απορροφά πολύ μικρά ποσά θερμότητας με αποτέλεσμα το μεγαλύτερο ποσοστό να απορροφάται από την επιφάνεια του εδάφους η οποία και θερμαίνεται πολύ περισσότερο. Οι διάφοροι μηχανισμοί μετάδοσης της θερμότητας στην ατμόσφαιρα είναι: α) μετάδοση μέσω αγωγιμότητας (γίνεται σημαντική πολύ κοντά στην επιφάνεια του εδάφους καθώς ο αέρας είναι κακός αγωγός της θερμότητας), β) μετάδοση μέσω μεταφοράς (τα επιφανειακά στρώματα του αέρα, θερμαίνονται ισχυρότερα από τα ανώτερά τους γίνονται ελαφρύτερα και ανέρχονται, μεταφέροντας θερμότητα σε ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας) και γ) μετάδοση μέσω ακτινοβολίας (η γη θερμαίνεται από την ηλιακή ακτινοβολία και ο αέρας από τη γήινη ακτινοβολία).

Οι μορφές με τις οποίες η θερμότητα γίνεται αντιληπτή στο σύστημα γη-ατμόσφαιρα είναι: α) η *αισθητή θερμότητα* της οποίας το αποτέλεσμα μπορεί να μετρηθεί απ'ευθείας με τη βοήθεια ενός οργάνου και β) η *λανθάνουσα θερμότητα* που διακινείται κατά τη διάρκεια ορισμένων φυσικών διεργασιών (εξάτμιση, συμπύκνωση).

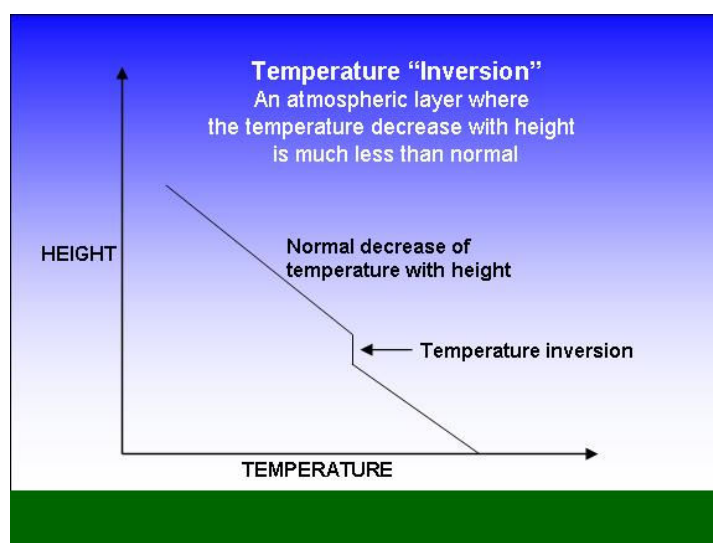
Υπό κανονικές συνθήκες, η θερμοκρασία του αέρα ελαττώνεται με το ύψος μέσα στην τροπόσφαιρα. Η μεταβολή αυτή εκφράζεται από την κατακόρυφη θερμοβαθμίδα σε $^{\circ}\text{C}/100\text{m}$. Στην τροπόσφαιρα είναι συνήθως $0.6^{\circ}\text{C}/100\text{m}$. Η μείωση της θερμοκρασίας με το ύψος στην τροπόσφαιρα, δεν ακολουθείται πάντοτε. Πολλές φορές παρατηρείται το φαινόμενο της αύξησης της θερμοκρασίας με το ύψος. Τότε μιλάμε για θερμοκρασιακή αναστροφή (Σχήμα 1.1). Οι σπουδαιότεροι παράγοντες που διαμορφώνουν τις θερμομετρικές συνθήκες σε έναν τόπο είναι:

1. Η ένταση της ακτινοβολίας
2. Το ισοζύγιο ακτινοβολιών στο σύστημα γη-ατμόσφαιρα-διάστημα στον τόπο αυτό
3. Η δυνατότητα και η συχνότητα μεταφοράς στον τόπο αυτό ποσοτήτων θερμότητας με οριζόντιες και κατακόρυφες κινήσεις (θερμές ή ψυχρές αέριες μάζες)
4. Τα ποσά θερμότητας που εκλύονται ή προσλαμβάνονται κατά τους μηχανισμούς της συμπύκνωσης των υδρατμών ή της εξάτμισης του νερού

5. Τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας του εδάφους που συνδέονται και με την ανακλαστικότητα του εδάφους και τη φυτοκάλυψή του και
6. Τα θαλάσσια ρεύματα που τυχόν περνούν κοντά από τον τόπο.

Στη μετεωρολογία είναι απαραίτητες οι μετρήσεις, συχνά μάλιστα συνεχείς:

1. της θερμοκρασίας του αέρα κοντά στην επιφάνεια του εδάφους
2. της θερμοκρασίας του αέρα σε διάφορα ύψη μέσα στην ατμόσφαιρα
3. της θερμοκρασίας του εδάφους στην επιφάνεια του και σε διάφορα βάθη
4. της θερμοκρασίας του νερού στις λίμνες, ποταμούς και θάλασσες σε διάφορα βάθη.



Σχήμα 1.1: Μεταβολή της θερμοκρασίας καθ' ύψος μέσα στην τροπόσφαιρα

1.2 Θερμοκρασία του αέρα

Η θερμοκρασία του αέρα αποτελεί το σημαντικότερο κλιματικό στοιχείο και τη βασικότερη παράμετρο σ' όλες τις κλιματικές κατατάξεις. Με τον όρο θερμοκρασία του αέρα εννοούμε τις μεταβολές θερμότητας αυτού, οι οποίες καταγράφονται από τα θερμόμετρα. Τα θερμόμετρα θα πρέπει να βρίσκονται σε σκιά, ώστε να μη προσβάλλονται από την άμεση και διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία και να προφυλάσσονται από τη βροχή, το χιόνι, την πάχνη, τη σκόνη. Γι' αυτό το λόγο τα θερμόμετρα τοποθετούνται μέσα σε ειδικό στέγαστρο (μετεωρολογικό κλωβό— Σχήμα 1.2) και σε ύψος 1.5-2 m από το έδαφος όπου σε αντίθεση με τα πρώτα εκατοστά πάνω από το έδαφος, η μεταβολή της θερμοκρασίας καθ' ύψος δεν είναι πολύ έντονη.



Σχήμα 1.2 Μετεωρολογικός κλωβός που φέρει εντός μετεωρολογικά όργανα για την παρακολούθηση των κλιματικών μεταβολών της ατμόσφαιρας.

Η θερμοκρασία του αέρα σ' ένα τόπο αποδίδεται με τις παρακάτω παραμέτρους:

Α. Απολύτως μέγιστη ($T_{\max}$) και απολύτως ελάχιστη ($T_{\min}$) τιμή της θερμοκρασίας του αέρα που σημειώνεται στον τόπο στη διάρκεια μιας χρονικής περιόδου (24ωρο, μήνας, έτος).

Β. Μέση ημερήσια τιμή της θερμοκρασίας που ορίζεται από τη σχέση:

$$\bar{T} = \frac{1}{24} \sum_{i=1}^{24} T_{hi}, \text{ όπου } T_{hi} = \text{ωριαία τιμή (i = 1, 2, \dots, 24)}. \quad (1.1)$$

Ο παραπάνω τύπος εφαρμόζεται μόνον, όταν ο μετεωρολογικός σταθμός έχει τη δυνατότητα της καταγραφής των ωριαίων τιμών της θερμοκρασίας του αέρα. Στην περίπτωση που διαθέτει μόνο τις μετρήσεις των παρατηρήσεων που πραγματοποιούνται στις 08:00, 14:00 και 20:00 ώρες της ημέρας, τότε ο υπολογισμός της μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας γίνεται με χρήση ενός από τους παρακάτω εμπειρικούς τύπους:

$$\bar{T} = \frac{1}{2} (T_{\max} + T_{\min}) \quad (1.2)$$

$$\bar{T} = \frac{1}{3} (T_8 + T_{14} + T_{20}) \quad (1.3)$$

$$\bar{T} = \frac{1}{4} (T_8 + T_{14} + 2T_{20}) \quad (1.4)$$

Ο τελευταίος τύπος εφαρμόζεται από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (Ε.Μ.Υ.) για τον υπολογισμό της μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας σ' ολόκληρο το δίκτυο των μετεωρολογικών σταθμών της.

Γ. Μέση μηνιαία θερμοκρασία ($\bar{T}_{mo}$) που υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\bar{T}_{mo} = \frac{1}{v} \sum_{i=1}^v \bar{T}_{(i)} \quad (1.5), \text{ όπου } v = \text{πλήθος ημερών του θεωρούμενου μήνα}.$$

Δ. Μέση ετήσια θερμοκρασία ($\bar{T}_E$), που υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\bar{T}_E = \frac{1}{v} \sum_{i=1}^{12} \bar{T}_{mo(i)} \quad (1.6), \text{ όπου } v = \text{πλήθος μηνών}$$

Ανάλογες στατιστικές παράμετροι της θερμοκρασίας του αέρα μ' αυτές που δίνονται από τους τύπους (1.5)-(1.6) ορίζονται και για τις άκρες τιμές ($T_{\max}$, $T_{\min}$) της θερμοκρασίας, δηλαδή έχουμε τη μέση μηνιαία μέγιστη, τη μέση μηνιαία ελάχιστη, κ.λπ.

1.3 Περιοδικές μεταβολές της θερμοκρασίας του αέρα

Α. Η ημερήσια μεταβολή

Στη διάρκεια μιας κανονικής ημέρας (χωρίς σύννεφα και άνεμο), η θερμοκρασία του αέρα παρουσιάζει, κατά κανόνα, απλή κύμανση γνωστή και σαν ημερήσια πορεία της θερμοκρασίας με ελάχιστο που παρατηρείται

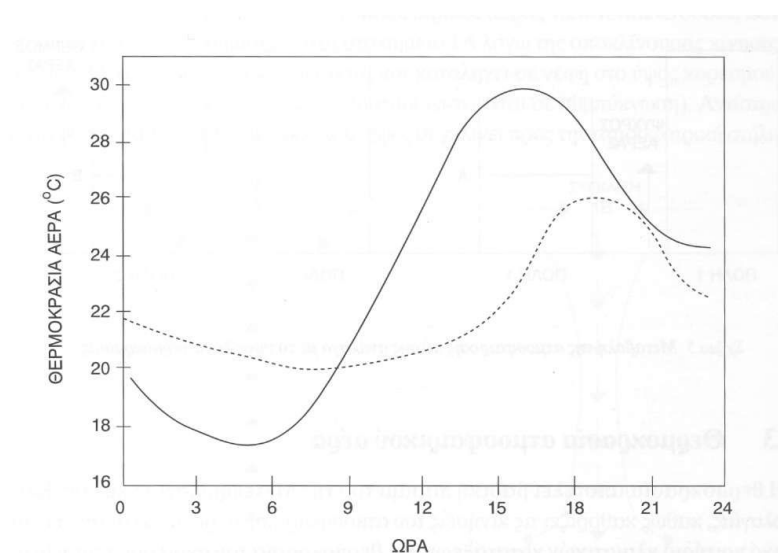
λίγα λεπτά μετά την ανατολή του ήλιου και μέγιστο που σημειώνεται 1-2 ώρες μετά τη μεσουράνηση του ήλιου (Σχήμα 1.3). Η ημερήσια πορεία της θερμοκρασίας του αέρα, σε σχέση με την ημερήσια πορεία της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας και της εξερχόμενης γήινης ακτινοβολίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.4. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, η προσλαμβανόμενη μέσω ηλιακής ακτινοβολίας θερμότητα είναι μεγαλύτερη από αυτή που αποβάλλεται (μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία) με αποτέλεσμα ο αέρας να θερμαίνεται. Τη νύχτα, σταματάει η εισροή της ηλιακής ακτινοβολίας ενώ παράλληλα υπάρχει απώλεια θερμότητας λόγω της γήινης ακτινοβολίας. Η ψύξη συνεχίζεται μέχρι την ανατολή του ήλιου όπου και παρατηρείται το ελάχιστο της θερμοκρασίας. Η χρονική καθυστέρηση εμφάνισης του μέγιστου της θερμοκρασίας σε σχέση με το μέγιστο της ηλιακής ακτινοβολίας σχετίζεται με το γεγονός ότι ο αέρας θερμαίνεται πρωτίστως από την επιφάνεια της γης, καθώς δεν έχει την ικανότητα να απορροφά μεγάλα ποσά θερμότητας από την ηλιακή ακτινοβολία. Η χρονική καθυστέρηση αποδίδεται στο ότι ο ρυθμός με τον οποίο η επιφάνεια της γης προσφέρει θερμότητα στην ατμόσφαιρα (π.χ. μέσω ακτινοβολίας) δεν είναι ίδιος με το ρυθμό που η ατμόσφαιρα χάνει θερμότητα λόγω ακτινοβολίας προς το διάστημα. Στην περίπτωση που η μέρα δεν είναι κανονική, η ώρα της μέγιστης και ελάχιστης τιμής της θερμοκρασίας σημειώνεται σε διαφορετικές από τις ώρες που αναφέρθηκαν παραπάνω, ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν (Σχήμα 1.3).

Η διαφορά ανάμεσα στη μέγιστη και ελάχιστη τιμή της θερμοκρασίας στο 24ωρο ορίζεται ως *Ημερήσιο θερμομετρικό εύρος*.

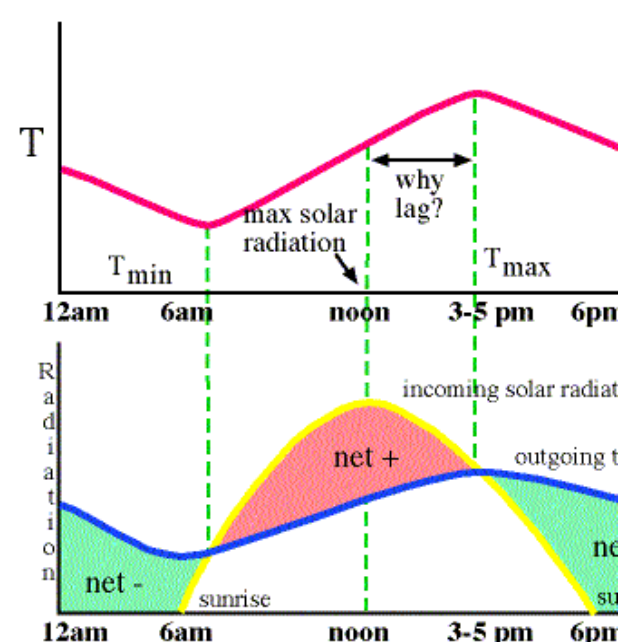
$$H.Θ.E. = T_{\max} - T_{\min}$$

Το Η.Θ.Ε. είναι μια πολύ σημαντική κλιματική παράμετρος και εξαρτάται, κυρίως, από:

1. Το γεωγραφικό πλάτος και την εποχή. Το Η.Θ.Ε. σε μια ομοιογενή και ομοιόμορφη γη ελαττώνεται, καθώς αυξάνει το γεωγραφικό πλάτος. Η μέγιστη τιμή του σημειώνεται στον Ισημερινό, όπου το ύψος του ήλιου είναι μέγιστο και το ελάχιστο πάνω από τις πολικές περιοχές, όπου το ύψος του ήλιου ελαχιστοποιείται. Στα μέσα και ανώτερα γεωγραφικά πλάτη με διακριτές εποχές, το Η.Θ.Ε. είναι μεγαλύτερο στη διάρκεια της θερινής περιόδου και μικρότερο κατά την ψυχρή περίοδο.



Σχήμα 1.3: Η ημερήσια πορεία της θερμοκρασίας του αέρα στη διάρκεια μιας κανονικής ημέρας και μιας μέρας με σύννεφα (διακεκομμένη).

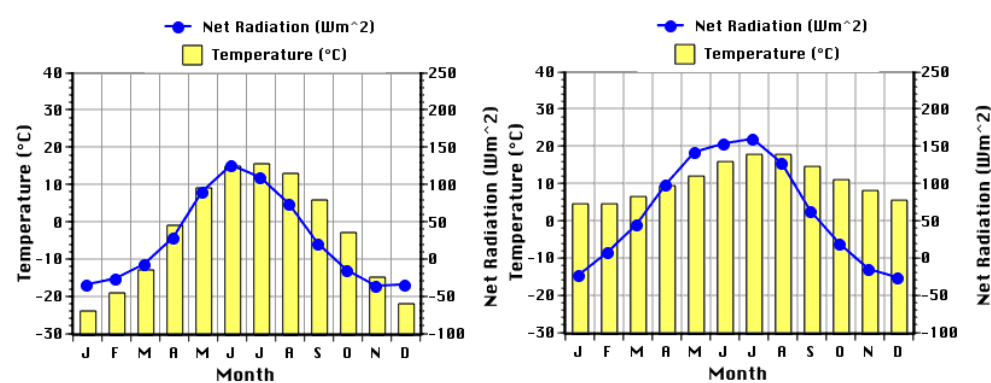


Σχήμα 1.4: Ημερήσια πορεία της θερμοκρασίας του αέρα, σε σχέση με την ημερήσια πορεία της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας και της εξερχόμενης γήινης ακτινοβολίας.

2. Το βαθμό ηπειρωτικότητας. Το Η.Θ.Ε. είναι μικρότερο πάνω από τους ωκεανούς ή θάλασσες απ' ό,τι πάνω από τις ηπειρωτικές περιοχές. Συνήθως, πάνω από τη θάλασσα η τιμή του δεν υπερβαίνει τους 2-3 °C, ενώ πάνω από τη ξηρά υπερβαίνει και τους 20 °C.
3. Τη νέφωση. Το Η.Θ.Ε. είναι μικρότερο στη διάρκεια μιας νεφосκεπούς μέρας, σε σχέση με μια μέρα με αίθριο ουρανό.
4. Τη βλάστηση και τη φύση του εδάφους. Το Η.Θ.Ε. είναι μικρότερο πάνω από περιοχές με εκτεταμένη βλάστηση, σε σχέση μ' εκείνη πάνω από ερημικές περιοχές. Επίσης, είναι μεγαλύτερο πάνω από ξηρά παρά πάνω από υγρά εδάφη.
5. Το υψόμετρο. Επειδή ο αέρας θερμαίνεται και ψύχεται, κυρίως, από την επιφάνεια του εδάφους, η τιμή του Η.Θ.Ε. ελαττώνεται με την αύξηση του υψόμετρου. Η ελάττωση αυτή οφείλεται και στην αύξηση της ταχύτητας του ανέμου.
6. Το ανάγλυφο. Στα κοίλα τμήματα ενός βουνού, το Η.Θ.Ε. είναι μεγαλύτερο απ'ότι στις πλαγιές.
7. Την ανατάραξη. Στην περίπτωση μιας νήνεμης κατάστασης, το Η.Θ.Ε. είναι μεγαλύτερο παρά σε μια περίπτωση με ισχυρή ανατάραξη.

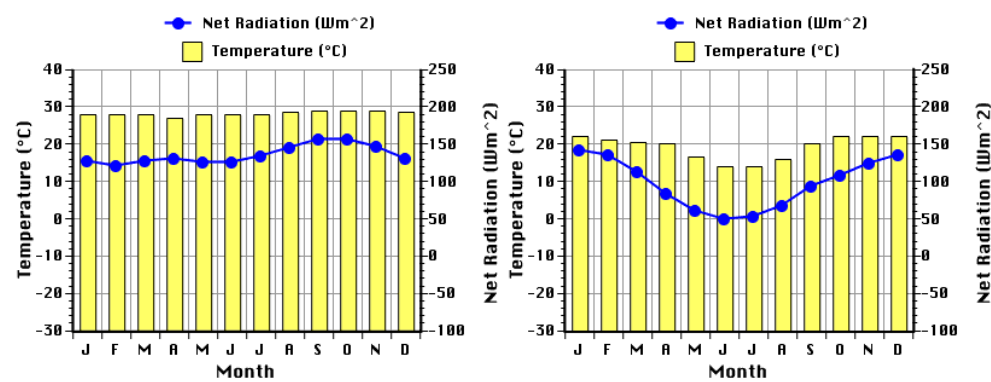
B. Η ετήσια πορεία

Η ετήσια πορεία ή ο ετήσιος κύκλος της θερμοκρασίας του αέρα (Σχήμα 1.5) παρουσιάζει, συνήθως, απλή κύμανση με μέγιστο (B ημισφαίριο) που σημειώνεται τον Ιούλιο/Αύγουστο (πάνω από τις ηπείρους/θάλασσες) και το ελάχιστο τον Ιανουάριο/Φεβρουάριο (πάνω από τις ηπείρους/θάλασσες). Οι άκρες τιμές σημειώνονται 1-2 μήνες μετά από τα αντίστοιχα ηλιοστάσια και μάλιστα όταν τα ποσά θερμότητας, τα οποία παίρνει σε μια μέρα το έδαφος και ο αέρας κοντά σε αυτόν, γίνουν ίσα με αυτά, τα οποία χάνει κατά τη διάρκεια της νύχτας. Το γεγονός ότι σε έναν τόπο οι άκρες τιμές της θερμοκρασίας και της ηλιακής ακτινοβολίας δεν εμφανίζονται συγχρόνως οφείλεται στο ότι εκτός της ηλιακής ακτινοβολίας υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που καθορίζουν τη θερμοκρασία στον τόπο αυτό.



Fairbanks, USA, 65 ° Βόρειο ημισφαίριο

Λονδίνο 52° Βόρειο ημισφαίριο



Manaus, Βραζιλία, 3° Νότιο ημισφαίριο

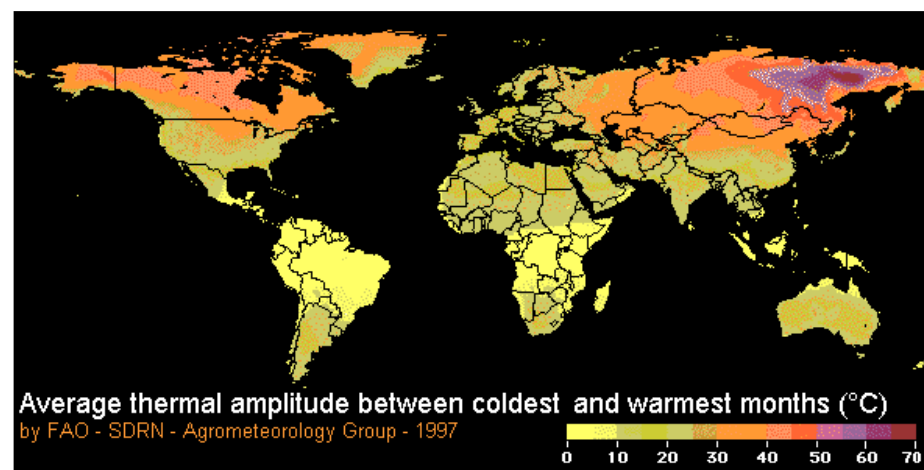
Zimbabwe, 20° Νότιο ημισφαίριο

Σχήμα 1.5: Μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες και μηνιαία μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας σε διάφορες περιοχές (πηγή Physical Geography.net)

Η διαφορά της μέσης θερμοκρασίας του αέρα του ψυχρότερου μήνα από τη μέση θερμοκρασία του θερμότερου μήνα που σημειώνονται μέσα στο έτος ορίζεται ως *Ετήσιο θερμομετρικό εύρος*:

$$Ε.Θ.Ε. = T_{mo(θερμoτ)} - T_{mo(ψυχροτ)}$$

Το Ε.Θ.Ε. είναι μια πολύ χρήσιμη κλιματική παράμετρος, γιατί η διαμόρφωση της τιμής του εξαρτάται απ' όλους εκείνους τους παράγοντες που αποτελούν τους θερμοκρασιακούς χαρακτήρες ενός τόπου. Η τιμή του αυξάνει με την αύξηση του γεωγραφικού πλάτους (Σχήμα 1.6). Οι υπόλοιποι ρυθμιστικοί παράγοντες της τιμής του Ε.Θ.Ε. παραμένουν οι ίδιοι με εκείνους που ρυθμίζουν την τιμή του Η.Θ.Ε. και λειτουργούν ανάλογα.



Σχήμα 1.6: Χωρική κατανομή της διαφοράς της μέσης θερμοκρασίας του αέρα του ψυχρότερου μήνα από τη μέση θερμοκρασία του θερμότερου μήνα

2. ΟΡΓΑΝΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ

Τα θερμόμετρα είναι συσκευές που μετρούν τη θερμοκρασία. Η αρχή λειτουργίας τους στηρίζεται στο γεγονός ότι η μεταβολή της θερμοκρασίας προκαλεί μεταβολή κάποιας ιδιότητας των υλικών, που χρησιμοποιούνται ως αισθητήρες.

Θερμόμετρα υγρών

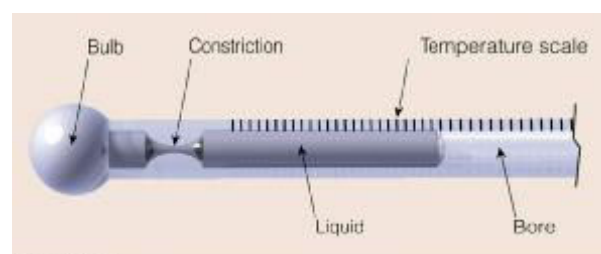
Αυτά αποτελούνται από γυάλινο κυλινδρικό σωλήνα που καταλήγει σε ένα βολβό που περιέχει υγρό. Ο όγκος του υγρού στο θερμόμετρο είναι τέτοιος ώστε ο βολβός να είναι πλήρως γεμάτος αλλά ο σωλήνας είναι

μόνο μερικώς γεμάτος σε όλες τις θερμοκρασίες οι οποίες πρόκειται να μετρηθούν. Οι μεταβολές του όγκου του υγρού σε σχέση με τον σωλήνα γίνονται ορατές από τις μεταβολές της θέσης της κορυφής της στήλης του υγρού. Το υγρό που χρησιμοποιείται εξαρτάται από την τάξη των θερμοκρασιών που θέλουμε να μετρήσουμε. Γενικά ο υδράργυρος χρησιμοποιείται για θερμοκρασίες πάνω από τους $-38.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ενώ για χαμηλότερες θερμοκρασίες χρησιμοποιείται αιθυλική αλκοόλη ή άλλα οργανικά υγρά. Τα θερμόμετρα υγρού χρησιμοποιούνται για τις μετρήσεις της άμεσης, της μέγιστης και της ελάχιστης θερμοκρασίας. Για την μέτρηση της άμεσης και της μέγιστης θερμοκρασίας χρησιμοποιούνται συνήθως υδραργυρικά θερμόμετρα. Τα θερμόμετρα αιθυλικής αλκοόλης χρησιμοποιούνται κυρίως για την μέτρηση χαμηλών θερμοκρασιών καθώς και της ελάχιστης θερμοκρασίας.

Μεγιστοβάθμια θερμόμετρα

Το πιο διαδεδομένο μεγιστοβάθμιο θερμόμετρο είναι ένα υδραργυρικό που έχει ένα πώμα ή στένωση κάτω από τα χαμηλότερα σημεία της κλίμακας βαθμολογίας (Σχήμα 2.1). Όταν η θερμοκρασία πέφτει η στήλη υδραργύρου δεν μπορεί να εισχωρήσει στο δοχείο δια μέσου της στένωσης, διότι καμία δύναμη δεν την αναγκάζει προς τούτο εκτός του βάρους το οποίο είναι ελάχιστο και μη ικανό να υπερνικήσει το στένωμα. Είναι δυνατό ο υδράργυρος να εισχωρήσει στο δοχείο όταν επαναφέρουμε το όργανο στην αρχική του θέση.

Η πιο συνηθισμένη συσκευή που δείχνει την ελάχιστη θερμοκρασία είναι ένα γυάλινο θερμόμετρο γεμάτο με άχρωμο οινόπνευμα, μέσα στο οποίο υπάρχει ένας μικρός δείκτης (Σχήμα 2.2). Μεταξύ των εσωτερικών τοιχωμάτων του σωλήνα και του δείκτη το οινόπνευμα κυκλοφορεί ελεύθερα. Αν το θερμόμετρο γέρνει έτσι ώστε ο βολβός να είναι ψηλότερα του σωλήνα, ο δείκτης θα μετακινηθεί κατά μήκος του σωλήνα μέχρι να σταματήσει εκεί που τελειώνει το οινόπνευμα. Η επιφανειακή τάση σταματάει τον δείκτη καθώς αυτός περνάει μέσα από την επιφάνεια του οινόπνευματος. Το θερμόμετρο είναι τοποθετημένο οριζόντια. Όταν η θερμοκρασία πέφτει το οινόπνευμα συστέλλεται και ο δείκτης συμπαρασύρεται απ'αυτό κατά μήκος του σωλήνα και θα σταματήσει εκεί όπου θα σημειωθεί το ελάχιστο αυτής. Αν η θερμοκρασία ανέρχεται το οινόπνευμα διαστέλλεται και ο δείκτης παραμένει σταθερός. Το άκρο του που βρίσκεται μακρύτερα από το βολβό δείχνει την χαμηλότερη θερμοκρασία που σημειώθηκε από τότε που το όργανο ήταν στην προηγούμενη θέση. Το θερμόμετρο μπορεί να επανέλθει στην αρχή της κλίμακας γέρνοντας το όργανο έτσι ώστε ο δείκτης να μετακινηθεί στο τέλος της στήλης του οινόπνευματος



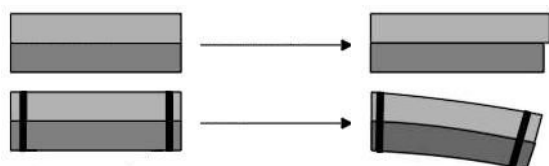
Σχήμα 2.1: Θερμόμετρο υδραργύρου



Σχήμα 2.2: Ελαχιστοβάθμιο θερμόμετρο

Διμεταλλικό θερμόμετρο

Το διμεταλλικό θερμόμετρο συνήθως αποτελείται από σπειροειδές έλασμα, το οποίο είναι κατασκευασμένο από δύο μεταλλικές ταινίες κολλημένες μεταξύ τους. Αυτές έχουν διαφορετικούς συντελεστές διαστολής. Όταν η θερμοκρασία του ελάσματος μεταβληθεί, τα δύο μέταλλα διαστέλλονται ή συστέλλονται με διαφορετικό τρόπο, με αποτέλεσμα η καμπυλότητα του ελάσματος να ποικίλει (Σχήμα 2.3). Το ένα άκρο του ελάσματος είναι σταθερά στερεωμένο ενώ το άλλο είναι ελεύθερο και με κατάλληλους πολλαπλασιαστικούς μοχλούς συνδέεται με δείκτη, ο οποίος κινείται μπροστά από κυκλικό τόξο που φέρει την θερμομετρική κλίμακα. Όταν η θερμοκρασία αυξάνει, το ελεύθερο άκρο μετακινείται και ο δείκτης ανέρχεται ανάλογα με την θερμοκρασία, ενώ όταν η θερμοκρασία ελαττώνεται ο δείκτης κινείται κατά την αντίθετη κατεύθυνση. Ο θερμογράφος είναι ένα καταγραφικό θερμόμετρο που βασίζεται στην παραπάνω αρχή (Σχήμα 2.4).



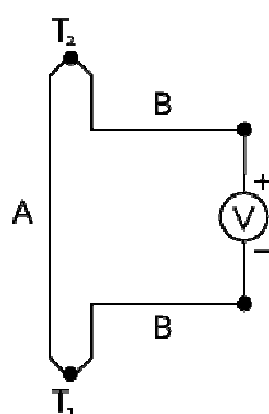
Σχήμα 2.3: Η μεταβολή της θερμοκρασίας προκαλεί διαφορετική διαστολή στα δύο μέταλλα και μεταβολή της καμπυλότητας του ελάσματος



Σχήμα 2.4: Θερμογράφος

Θερμοζεύγος

Η αρχή λειτουργίας των θερμοζευγών στηρίζεται στο φαινόμενο Seebeck. Σε ένα θερμοζεύγος δύο διαφορετικά μέταλλα (A, B, Σχήμα 2.5) συνδέονται μεταξύ τους ώστε να σχηματιστεί ένα συνεχές κύκλωμα. Αν η μία ένωση έχει διαφορετική θερμοκρασία από την άλλη, το κύκλωμα διαρρέεται από ρεύμα, αναπτύσσεται δηλαδή μία ηλεκτρεγερτική δύναμη. Το μέγεθος της δύναμης αυτής ποικίλει με την διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δύο ενώσεων. Έτσι αν μία ένωση διατηρείται σε μία καθορισμένη θερμοκρασία ή θερμοκρασία αναφοράς και η άλλη ένωση επιτρέπει τη άνοδο της θερμοκρασίας ώστε να μπορεί αυτή να μετρηθεί, η ηλεκτρεγερτική δύναμη που αναπτύσσεται στο κύκλωμα δίνει ένα μέτρο της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ της θερμής και της ψυχρής ένωσης και η ζητούμενη θερμοκρασία μπορεί να βρεθεί. Υπάρχουν διάφοροι συνδυασμοί μετάλλων οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον σχηματισμό του θερμοζεύγους. Η επιλογή του συνδυασμού εξαρτάται από την διακύμανση της θερμοκρασίας, την ευαισθησία και την ακρίβεια που απαιτείται.



Σχήμα 2.5: Θερμοζεύγος

Ηλεκτρικά θερμόμετρα αντίστασης

Τα θερμόμετρα αυτά στηρίζονται στην αρχή της μεταβολής της αντίστασης ενός μετάλλου με τη θερμοκρασία. Συνεπώς για συγκεκριμένο μήκος σύρματος ειδικά επιλεγμένου μετάλλου μπορούμε να εξασφαλίσουμε διαφορετική αντίσταση για ένα πλάτος θερμοκρασιών. Η ηλεκτρική αντίσταση R_T ενός υλικού σε κάποια θερμοκρασία T δίνεται από την σχέση:

$$R_T = R_0(1 + aT + bT^2)$$

όπου R_0 είναι η αντίσταση σε θερμοκρασία 0°C , a και b σταθερές. Για τις περιοχές θερμοκρασιών που συναντάμε στην Μετεωρολογία και μόνο ο γραμμικός όρος της παραπάνω εξίσωσης δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Συνεπώς, αν με τη βοήθεια απλών ηλεκτρονικών κυκλωμάτων μετατρέψουμε τη μεταβολή της ωμικής αντίστασης σε μεταβολή τάσης, αυτή η μεταβολή της τάσης θα συμβολίζει τη μεταβολή της θερμοκρασίας. Το μέταλλο που κυρίως χρησιμοποιείται είναι λευκόχρυσος ο οποίος είναι αναλλοίωτος στον ατμοσφαιρικό αέρα, έχει μεγάλη ειδική αντίσταση, ικανοποιητική γραμμικότητα, χαμηλό κόστος, εύκολη βαθμονόμηση, και υψηλή χρονική απόκριση. Άλλα μέταλλα που χρησιμοποιούνται είναι νικέλιο, χαλκός. Ο συντελεστής a για πλατίνα έχει συνήθως τιμές 0.00385 - $0.00392^\circ\text{C}^{-1}$.

Ένας άλλος τύπος θερμομέτρου αντίστασης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι το *θερμίστορ*. Στα θερμίστορ ο αισθητήρας δεν είναι σύρμα πλατίνας αλλά ημιαγωγοί από κεραμικά υλικά οι οποίοι είναι πολύ περισσότερο ευαίσθητοι στις μεταβολές θερμοκρασίας από τα μέταλλα. Η αντίστασης R_T του θερμίστορ σε θερμοκρασία T μπορεί να εκφραστεί με την εξίσωση:

$$R_T = ke^{-b/T}$$

όπου k, b είναι σταθερές εξαρτώμενες από τη φύση του υλικού.

Τα ηλεκτρικά θερμόμετρα είναι πολύ κατάλληλα για εξ' αποστάσεως μετρήσεις και καταγραφή της θερμοκρασίας.

2.1 Σφάλματα λόγω θερμικής αδράνειας

Κάθε όργανο μέτρησης περιέχει έναν αισθητήρα ο οποίος αντιδρά σε κάθε αλλαγή της ποσότητας που θα μετρηθεί. Η αντίδραση του αισθητηρίου δεν είναι ποτέ ακαριαία, υπάρχει πάντα κάποια αδράνεια. Αυτή η αδράνεια είναι ιδιαίτερα σημαντική στη μετεωρολογία επειδή οι μετεωρολογικές ποσότητες μεταβάλλονται συνεχώς, τόσο στο χώρο όσο και στο χρόνο. Όταν ένα θερμόμετρο με ίδια θερμοκρασία T_u τοποθετηθεί σε περιβάλλοντα αέρα θερμοκρασίας T_r , τότε δεν παίρνει τη θερμοκρασία T_r ακαριαία, αλλά την προσεγγίζει ασυμπτωτικά με μία ταχύτητα που εξαρτάται τόσο από τις ιδιότητες του θερμομέτρου (υλικό, διαστάσεις) όσο και από τις ιδιότητες του αέρα (ταχύτητα ροής, πυκνότητα κ.τ.λ.). Η θερμοκρασία του αισθητήρα μεταβάλλεται με τον χρόνο σύμφωνα με τη σχέση:

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{1}{\beta}(T - T_r)$$

όπου T είναι η θερμοκρασία του αισθητήρα σε χρόνο t και β είναι η χρονική σταθερά του. Αν η παραπάνω εξίσωση ολοκληρωθεί υπό την υπόθεση ότι τα β και T_r είναι σταθερά, λαμβάνεται η παρακάτω εξίσωση

$$T - T_r = \frac{T_u - T_r}{e^{\frac{t}{\beta}}}$$

Ο βαθμός της αδράνειας ενός αισθητηρίου εκφράζεται συνήθως από τη χρονική σταθερά του, η οποία αντιπροσωπεύει τον αριθμό δευτερολέπτων που απαιτείται ώστε η αρχική θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ του θερμομετρικού στοιχείου και του θερμομετρούμενου σώματος, $T_u - T_r$, να μειωθεί στο $1/e$, δηλ. στο 37%. Στον πίνακα 2.1 παρουσιάζεται η χρονική σταθερά για διαφορετικά αισθητήρια θερμότητας σε φυσιολογικές συνθήκες εξαερισμού. Όταν το θερμόμετρο χρησιμοποιείται για συνήθεις μετεωρολογικούς σκοπούς, αρκεί ένα αισθητήριο με χρονική σταθερά περίπου 30 δευτερολέπτων. Σε ειδικές περιπτώσεις, όταν μας ενδιαφέρουν οι γρήγορες μεταβολές της θερμοκρασίας θα πρέπει να διαλέγουμε αισθητήρες με πολύ μικρή χρονική σταθερά.

Πίνακας 2.1: Η χρονική σταθερά διαφόρων θερμομέτρων

Αισθητήριο Θερμότητας	Χρονική σταθερά (s)
Θερμόμετρο οινόπνεύματος	80-90
Θερμόμετρο υδράργυρου	50-60
Μεταλλικό θερμόμετρο	20-30
Θερμοστοιχείο	0.1-3

3. ΥΓΡΑΣΙΑ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ

3.1 Περιεκτικότητα νερού στην ατμόσφαιρα

Η ατμόσφαιρα περιέχει μια μεταβλητή ποσότητα νερού που παρουσιάζεται σε αέρια κατάσταση (υδρατμοί), σε υγρή κατάσταση (βροχή, ομίχλη, σύννεφα από υδροσταγονίδια κλπ.) αλλά και σε στερεή κατάσταση (χιόνι, χαλάζι, σύννεφα από παγοκρυστάλλους κλπ.). Το 90% και πλέον της ποσότητας του νερού βρίσκεται μέχρι ύψους 8-10 km από την επιφάνεια του εδάφους (Πίνακας 3.1) και αποτελεί το 0,3 – 0,4% της μάζας του κατώτερου στρώματος της ατμόσφαιρας. Η περιεκτικότητα της ατμόσφαιρας σε υδρατμούς μειώνεται ανάλογα με το ύψος εξαιτίας της μείωσης της θερμοκρασίας και της συνεπαγόμενης μείωσης της ικανότητας του ατμοσφαιρικού αέρα να συγκρατήσει υδρατμούς. Οι υδρατμοί, αν και αποτελούν ελάχιστο μέρος της όλης ατμόσφαιρας (0-4% κατ' όγκο), διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στα καιρικά φαινόμενα, στο ενεργειακό ισοζύγιο αλλά και στην αλληλεπίδραση Γης – ατμόσφαιρας. Από την συνολική ποσότητα νερού που υπάρχει στον πλανήτη μας, μόνο το 0.001% βρίσκεται στην ατμόσφαιρα και αντιπροσωπεύει ποσότητα ίση με $1,3 \times 10^{13}$ τόνους. Από την ποσότητα αυτή, το 95% είναι σε μορφή υδρατμών και μόνο το 5% βρίσκεται σε μορφή υδροσταγονιδίων και παγοκρυστάλλων. Έτσι, το νερό που διακινείται στην ατμόσφαιρα σε ένα έτος και φθάνει πάλι στη Γη με μορφή διαφόρων κατακρημνισμάτων ανέρχεται σε 5×10^{14} τόνους, δηλαδή είναι 40πλάσιο περίπου του ολικού ποσού του νερού που περιέχεται στην ατμόσφαιρα. Αν όλο το νερό της ατμόσφαιρας ήταν σε υγρή μορφή, τότε ο όγκος του στο σύνολο της ατμόσφαιρας, ανά πάσα στιγμή, θα ήταν περίπου 12.900 κυβικά χιλιόμετρα. Αν όλο το νερό της ατμόσφαιρας έπεφτε την ίδια στιγμή, θα κάλυπτε το έδαφος με νερό σε ύψος 2,5 εκατοστών.

Όλη η ποσότητα του διακινούμενου νερού εισέρχεται στην ατμόσφαιρα μέσω της εξάτμισης και της εξατμισοδιαπνοής. Γίνεται λοιπόν αντιληπτό, ότι οι τεράστιες ποσότητες ενέργειας μεταφέρονται και απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα μέσα σε αυτόν τον κύκλο του νερού.

Πίνακας 3.1

Κατανομή υδρατμών καθ' ύψος

Υψόμετρο (km)	Περιεκτικότητα σε υδρατμούς (%)
0	1,3
1	1,0
2	0,69
3	0,49
4	0,37
5	0,27
6	0,15
7	0,09
8	0,05

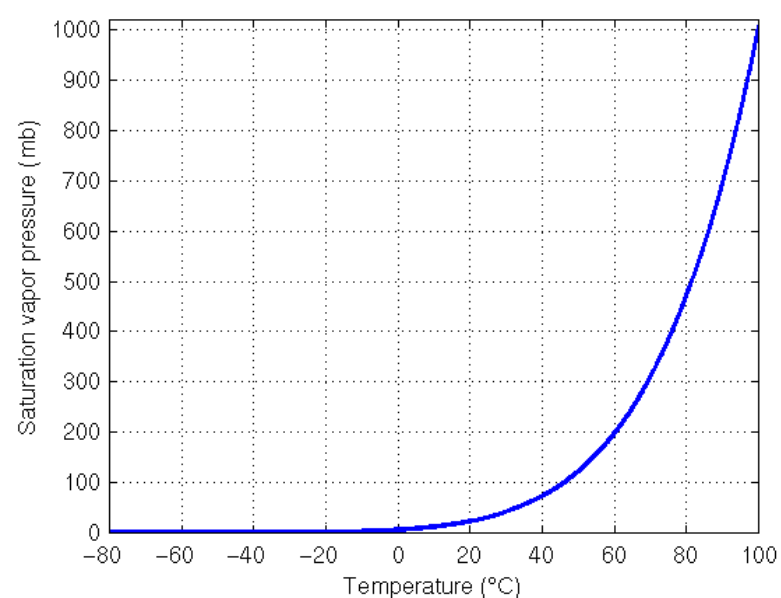
Ο ατμοσφαιρικός αέρας μπορεί να συγκρατήσει ορισμένη ποσότητα υδρατμών σε δοσμένη θερμοκρασία; αν την ξεπεράσει, συμπυκνώνει τους επιπλέον υδρατμούς. Στην περίπτωση που ο αέρας περιέχει μια τέτοια οριακή ποσότητα υδρατμών, χαρακτηρίζεται ως κορεσμένος. Σε αντίθετη περίπτωση, χαρακτηρίζεται ως ακόρεστος.

3.2 Εκφράσεις υγρασίας

Η ποσότητα των υδρατμών που περιέχει ο ατμοσφαιρικός αέρας ονομάζεται υγρασία. Η υγρομετρική κατάσταση του αέρα, εκφράζεται με μια από τις παρακάτω υγρομετρικές παραμέτρους:

A. Τάση των υδρατμών (vapor pressure - e)

Οι υδρατμοί που δημιουργούνται κατά την εξάτμιση του νερού, διαχέονται στον περιβάλλοντα ατμοσφαιρικό αέρα και, αναμιγνυόμενοι μ' αυτόν, ασκούν τη δική τους μερική πίεση, που αποτελεί μέρος της ολικής ατμοσφαιρικής πίεσης. Η μερική αυτή πίεση των υδρατμών λέγεται τάση υδρατμών (e). Στην περίπτωση, που ο αέρας είναι κορεσμένος με υδρατμούς, η τάση των υδρατμών λέγεται **μέγιστη τάση** (saturation vapor pressure) και συμβολίζεται με e_s . Αυτή αυξάνεται εκθετικά, όταν αυξάνεται η θερμοκρασία του ατμοσφαιρικού αέρα (Σχήμα 3.1). Στην βιβλιογραφία, υπάρχουν πίνακες που δίνουν, για κάθε τιμή της θερμοκρασίας του αέρα, την αντίστοιχη μέγιστη τάση των υδρατμών.



Σχήμα 3.1. Μέγιστη τάση των υδρατμών συναρτήσει της θερμοκρασίας του ατμοσφαιρικού αέρα.

Η μέγιστη τάση των υδρατμών e_s , εκφρασμένη σε mb, δίνεται από:

α. τον εμπειρικό τύπο των Magnus-Tetens:

$$e_s = e_{so} \times 10^{\frac{\alpha T}{\beta + T}} \quad (3.1)$$

όπου: $e_{so} = 6,11$ mb

$\alpha = 7,5$ και $\beta = 237,3$ °C (πάνω από το νερό)

$\alpha = 9,7$ και $\beta = 265,5$ °C (πάνω από τον πάγο)

T = θερμοκρασία του αέρα σε °C.

β. τη σχέση:

$$\log e_s = 9.4041 - \frac{2354}{T} \quad (3.2)$$

όπου: T = θερμοκρασία του αέρα σε °K.

Εκτός από τις σχέσεις (3.1) και (3.2), η e_s μπορεί να υπολογιστεί και από την εξίσωση των Clausius-Clapeyron:

$$\frac{de_s}{dT} = \frac{e_s L_u}{R_u T^2} \quad (3.3)$$

όπου: L_u = λανθάνουσα θερμότητα εξαέρωσης του νερού,

R_u = ειδική σταθερά των υδρατμών, και

T = θερμοκρασία του αέρα σε °K.

Η τάση των υδρατμών (e) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$e = e_s(T_w) - \frac{C_{pa}}{0.622 L_u} (T - T_w) P \quad (3.4)$$

όπου: T = θερμοκρασία αέρα (θερμοκρασία του ξηρού θερμομέτρου) σε °C,

P = ατμοσφαιρική πίεση

T_w = θερμοκρασία του υγρού θερμομέτρου σε °C,

$e_s(T_w)$ = μέγιστη τάση των υδρατμών στην θερμοκρασία του υγρού θερμομέτρου,

C_{pa} = ειδική θερμότητα του ξηρού αέρα σε σταθερή πίεση.

B. Απόλυτη υγρασία (absolute humidity - β)

Η απόλυτη υγρασία ορίζεται ως ο λόγος της μάζας των υδρατμών m_v προς τον όγκο V του αέρα στον οποίο περιέχονται. Η μαθηματική έκφραση της απόλυτης υγρασίας είναι:

$$\beta = \frac{m_v}{V} (gr / m^3) \quad (3.5)$$

Η σχέση που συνδέει την απόλυτη υγρασία με την αντίστοιχη τάση των υδρατμών (e), 1 m³ δείγματος υγρού αέρα, θερμοκρασίας T και πίεσης P , είναι:

$$\beta = \frac{804.2}{1 + 0.00367T} \frac{e}{P} \quad (3.6)$$

όπου T = θερμοκρασία αέρα σε °C, P και e εκφράζονται με τις ίδιες μονάδες σε mb ή mmHg. Αν $P = 760$ mmHg, τότε η σχέση (6) γίνεται:

$$\beta = \frac{1.0599}{1 + 0.00367T} e \approx \frac{1.1}{1 + 0.004T} e \quad (3.7)$$

Στις συνηθισμένες μετεωρολογικές συνθήκες, ο λόγος της σχέσης (7) ελάχιστα διαφέρει από τη μονάδα, οπότε η σχέση (3.7) γίνεται:

$$\beta \approx e \quad (3.8)$$

δηλαδή, για πρακτικές εφαρμογές, η απόλυτη υγρασία και η τάση των υδρατμών εκφράζονται με τον ίδιο αριθμό, όταν η τάση e έχει υπολογιστεί σε mmHg και η υγρασία β σε gr/m³. Το ίδιο ισχύει και όταν η ατμόσφαιρα είναι κορεσμένη με υδρατμούς ($e \equiv e_s$).

Γ. Έλλειμμα κόρου ή κοροπλήρωμα (saturation deficit - SD)

Έλλειμμα κόρου ή κοροπλήρωμα ονομάζεται η διαφορά ανάμεσα στην τάση των υδρατμών (e) του ατμοσφαιρικού αέρα σε δοσμένη θερμοκρασία και στη μέγιστη τάση των υδρατμών (e_s) στην ίδια θερμοκρασία, δηλαδή είναι:

$$SD = e_s - e \quad (3.9)$$

Δ. Αναλογία μίγματος (mixing ratio - r)

Έστω όγκος V ατμοσφαιρικού αέρα. Ως αναλογία μίγματος r ορίζεται ο λόγος της μάζας m_v των υδρατμών προς τη μάζα m_d του ξηρού αέρα που περιέχονται σε έναν όγκο V υγρού αέρα ($m_a = m_v + m_d$). Με βάση τον παραπάνω ορισμό, έχουμε:

$$r = \frac{m_v}{m_d} \quad (3.10)$$

Η r εκφράζεται, συνήθως, σε γραμμάρια υδρατμών ανά χιλιόγραμμο ξηρού αέρα (gr/kg). Αποδεικνύεται, εύκολα, ότι ανάμεσα στα μεγέθη r , e και P ισχύει η σχέση:

$$r = 0.622 \frac{e}{P - e} \quad (3.11)$$

ενώ για την κατάσταση κόρου ισχύει ανάλογα:

$$r_s = 0.622 \frac{e_s}{P - e_s} \quad (3.12)$$

Επειδή η τάση των υδρατμών e ή e_s είναι πολύ μικρότερη της ολικής πίεσης P ($P \gg e$, $P \gg e_s$), οι σχέσεις (3.11) και (3.12) γράφονται κατά προσέγγιση:

$$\begin{aligned} r &\approx 0.622 \frac{e}{P}, \\ r_s &\approx 0.622 \frac{e_s}{P} \end{aligned} \quad (3.13 \alpha - \beta)$$

Ε. Ειδική υγρασία (specific humidity - q)

Ειδική υγρασία q ενός δείγματος υγρού αέρα, ορίζεται ο λόγος της μάζας m_v των υδρατμών του προς τη μάζα του δείγματος m_a ($m_a = m_v + m_d$) και εκφράζεται σε γραμμάρια υδρατμών ανά χιλιόγραμμο υγρού αέρα.

$$q = \frac{m_v}{m_d + m_v} \quad (3.14)$$

Εύκολα αποδεικνύεται ότι η ειδική υγρασία συνδέεται με την αναλογία μίγματος μέσω των σχέσεων:

$$\begin{aligned} q &= \frac{r}{1 + r} \\ q_s &= \frac{r_s}{1 + r_s} \end{aligned} \quad (3.15 \alpha - \beta)$$

Έτσι, καθώς η ειδική υγρασία ελάχιστα διαφέρει από την αναλογία μίγματος, τις θεωρούμε ίσες σε πολλές πρακτικές εφαρμογές. Μία τυπική τιμή για την κατώτερη ατμόσφαιρα είναι τα 0,01 gr/kg.

ΣΤ. Σχετική υγρασία (relative humidity - RH)

Σχετική υγρασία του ατμοσφαιρικού αέρα ονομάζεται ο λόγος της μάζας m_v των υδρατμών που περιέχονται σε έναν όγκο υγρού αέρα, προς την μάζα των υδρατμών m_{vs} που θα περιείχε ο όγκος αυτός, αν ήταν κορεσμένος με υδρατμούς, υπό τις ίδιες συνθήκες πίεσης P και θερμοκρασίας T , δηλαδή:

$$RH = \frac{m_v}{m_{vs}} \quad (3.16)$$

Η σχετική υγρασία δίνει το μέτρο του κατά πόσο η ατμόσφαιρα απέχει από την κατάσταση κόρου. Αυτό έχει μεγάλη σημασία από κλιματολογική και βιολογική πλευρά, καθώς οι διάφοροι οργανισμοί επηρεάζονται από τη σχετική υγρασία και όχι από την απόλυτη υγρασία. Η RH μπορεί να οριστεί και ως ο λόγος της τάσης των υδρατμών e προς τη μέγιστη τάση αυτών e_s (στην ίδια τιμή θερμοκρασίας του δείγματος), αλλά και ως ο λόγος της αναλογίας μίγματος προς την αναλογία μίγματος κορεσμένου ατμοσφαιρικού αέρα που βρίσκεται στις ίδιες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης, δηλαδή ισχύει:

$$RH = \frac{e}{e_s} 100 = \frac{r}{r_s} 100 \quad (3.17)$$

Όπως φαίνεται από την σχέση (3.17), η τιμή της RH είναι μικρότερη της μονάδας και γι' αυτό συνήθως εκφράζεται σε εκατοστιαία (%) τιμή. Στην κατάσταση κόρου, η σχετική υγρασία είναι ίση με 100%. Πολλές φορές η ατμόσφαιρα γίνεται υπέρκορη με υδρατμούς και τότε ισχύει $RH > 100\%$. Το φαινόμενο αυτό προκαλείται με την αδιαβατική εκτόνωση, με την ψύξη μέσω ακτινοβολίας και με την ανάμειξη κορεσμένων αερίων μαζών διαφορετικών θερμοκρασιών. Η σχετική υγρασία είναι μία εξαιρετικά μεταβλητή παράμετρος, καθώς επηρεάζεται από τις μεταβολές τόσο της θερμοκρασίας όσο και της ατμοσφαιρικής πίεσης.

Z. Θερμοκρασία του σημείου δρόσου (dew-point temperature - T_d)

Θερμοκρασία του σημείου δρόσου ή απλά θερμοκρασία δρόσου ονομάζεται η θερμοκρασία στην οποία πρέπει να ψυχθεί μία αέρια μάζα, υπό σταθερή πίεση και χωρίς προσθήκη ή αφαίρεση υδρατμών, ώστε να κορεστεί ($RH = 100\%$). Στην περίπτωση αυτή, η τάση e των υδρατμών που υπάρχουν, γίνεται ίση με τη μέγιστη τάση e_s των ιδίων υδρατμών στην θερμοκρασία του σημείου δρόσου (T_d). Με την εφαρμογή της σχέσης των Magnus-Tetens έχουμε:

$$e = e_s(T_d) = e_s \quad (3.18)$$

Είναι φανερό ότι όταν η θερμοκρασία του αέρα και το θερμοκρασία δρόσου συμπίπτουν, τότε η σχετική υγρασία είναι 100%. Καθώς ο θερμός αέρας συγκρατεί περισσότερους υδρατμούς από τον ψυχρό αέρα, η θερμοκρασία (ή σημείο) δρόσου, κατά μέσο όρο, είναι μεγαλύτερη το καλοκαίρι παρά τον χειμώνα, και γενικότερα αυξάνει με την αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα.

H. Θερμοκρασία του υγρού θερμομέτρου (Wet-bulb temperature - T_w)

Θερμοκρασία υγρού θερμομέτρου (T_w) ονομάζουμε την θερμοκρασία που αποκτά ο ατμοσφαιρικός αέρας υπό σταθερή πίεση, όταν μέσα σ' αυτόν γίνεται συνεχής εξάτμιση νερού μέχρι να γίνει κορεσμένος, χωρίς ανταλλαγή θερμότητας με το περιβάλλον. Από τον ορισμό αυτό προκύπτει ότι:

α. για τον ακόρεστο ατμοσφαιρικό αέρα ισχύει: $T > T_w > T_d$

β. για τον κορεσμένο ατμοσφαιρικό αέρα ισχύει: $T = T_w = T_d$

Η θερμοκρασία υγρού θερμομέτρου χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της υγρασίας με την βοήθεια των ψυχομέτρων (βλέπε παρακάτω).

ΕΦΑΡΜΟΓΗ: Υπολογισμός της θερμοκρασίας δρόσου από την σχετική υγρασία και την θερμοκρασία του αέρα.

Εάν γνωρίζουμε την σχετική υγρασία και την θερμοκρασία του αέρα, τότε μπορούμε να υπολογίσουμε την θερμοκρασία δρόσου, χρησιμοποιώντας τις ακόλουθες εξισώσεις:

Αρχικά, υπολογίζουμε την τάση κορεσμένων υδρατμών (e_s) σε mb από την μαθηματική εξίσωση:

$$e_s = 6.11 \times 10^{\left(\frac{7.5 \times T}{237.7 + T}\right)} \quad (1)$$

όπου T είναι η θερμοκρασία του αέρα σε $^{\circ}\text{C}$.

Έπειτα, χρησιμοποιούμε την τάση κορεσμένων υδρατμών (e_s) και την σχετική υγρασία για να υπολογίσουμε την τάση των υδρατμών (e) του αέρα. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της εξίσωσης:

$$e = (RH \cdot e_s) / 100 \quad (2)$$

όπου RH είναι η σχετική υγρασία σε % (π.χ. 80%).

Τέλος, η θερμοκρασία δρόσου υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$e = 6.11 \times 10^{\left(\frac{7.5 \times T_d}{237.7 + T_d}\right)} \Rightarrow \frac{e}{6.11} = 10^{\left(\frac{7.5 \times T_d}{237.7 + T_d}\right)} \Rightarrow \log\left(\frac{e}{6.11}\right) = \frac{7.5 \times T_d}{237.7 + T_d} \Rightarrow T_d = \dots \quad (3)$$

Για παράδειγμα, εάν ένας σταθμός μετράει θερμοκρασία αέρα ίση με 15.6°C και σχετική υγρασία ίση με 47%, τότε από την εφαρμογή της εξίσωσης (1) θα πρέπει να βρούμε $e_s = 17.7$ mb και από την εφαρμογή της εξίσωσης (2) να έχουμε $e = 8.3$ mb. Έτσι, η θερμοκρασία δρόσου που θα υπολογίσουμε τελικά από την εξίσωση (3) θα είναι ίση με 4.3°C .

3.2 Ημερήσια και ετήσια πορεία της υγρασίας

Η υγρασία του αέρα παρουσιάζει μεταβολές στη διάρκεια του 24ώρου όσο και του έτους. Στην συνέχεια, θα γίνει περιγραφή της ημερήσιας και ετήσιας πορείας της απόλυτης, της σχετικής και της ειδικής υγρασίας του αέρα.

Α. Απόλυτη υγρασία (β)

Παρατηρούνται δύο τύποι ημερήσιας πορείας της απόλυτης υγρασίας:

Ο πρώτος τύπος παρουσιάζει απλή κύμανση, με μέγιστο και ελάχιστο που σημειώνεται αντίστοιχα κοντά στο μέγιστο και ελάχιστο της θερμοκρασίας του αέρα. Συμβαίνει με έλλειψη αναταρακτικών κινήσεων και έντονη εξάτμιση. Παρατηρείται πάνω από ωκεανούς όλες τις εποχές και πάνω από ηπείρους κατά την ψυχρή περίοδο του έτους. Ο δεύτερος τύπος παρουσιάζει διπλή κύμανση, με μέγιστα που σημειώνονται κατά τις ώρες 09.00-10.00 (δευτερεύον μέγιστο) και 20.00-21.00 (πρωτεύον μέγιστο) τοπικού χρόνου. Το κύριο ελάχιστο (πρωτεύον) σημειώνεται, συγχρόνως με το ελάχιστο της θερμοκρασίας του αέρα, δηλαδή λίγο πριν ή λίγο μετά την ανατολή του ήλιου, το δε δευτερεύον ελάχιστο σημειώνεται ανάμεσα στο διάστημα της 16ης και 17ης ώρας. Ο τύπος αυτός παρατηρείται με μεγάλη τιμή του ημερήσιου θερμομετρικού εύρους και με ισχυρές αναταρακτικές κινήσεις. Σημειώνεται στις τροπικές περιοχές στη διάρκεια ολόκληρου του έτους και στις ηπείρους κατά τη διάρκεια του θέρους. Το μεταμεσημβρινό ελάχιστο είναι αποτέλεσμα των μεσημβρινών ανοδικών κινήσεων του αέρα και της μεταφοράς των υδρατμών προς τα πάνω. Η διπλή κύμανση εξομαλύνεται,

καθώς το ύψος αυξάνεται, και πάνω από κάποιο επίπεδο (συνήθως στα 500 μέτρα) αυτή γίνεται απλή, μέχρι που η ημερήσια κύμανση εξαλείφεται εντελώς σε μεγαλύτερα ύψη.

Η ετήσια πορεία της β είναι απλή, με μέγιστο και ελάχιστο που σημειώνονται αντίστοιχα στη διάρκεια του καλοκαιριού και του χειμώνα. Το ετήσιο εύρος της εξαρτάται από την τιμή του αντίστοιχου Ε.Θ.Ε.

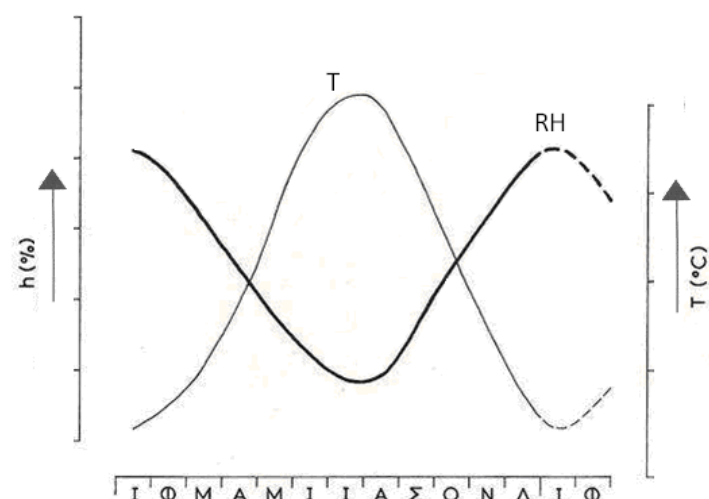
Β. Σχετική υγρασία (RH)

Η σχετική υγρασία παρουσιάζει κανονική ημερήσια πορεία, η οποία ανταποκρίνεται πρωταρχικά στην ημερήσια πορεία της θερμοκρασίας, με μέγιστο περί την ώρα του ελαχίστου της θερμοκρασίας και ελάχιστο περί την ώρα του μεγίστου της θερμοκρασίας (Σχήμα 3.2). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι αυξανόμενης της θερμοκρασίας του αέρα αυξάνεται περισσότερο η μέγιστη τάση των υδρατμών απ' όση η τάση των υδρατμών, και κατά συνέπεια μικραίνει η τιμή της σχετικής υγρασίας. Το ημερήσιο εύρος της σχετικής υγρασίας εξαρτάται επίσης από το ημερήσιο εύρος της θερμοκρασίας του αέρα, με μεγαλύτερες τιμές πάνω από τις ηπείρους από όση πάνω από τους ωκεανούς. Με επικράτηση της θαλάσσιας αύρας, η ημερήσια πορεία της RH γίνεται διπλή.

Η ετήσια πορεία της σχετικής υγρασίας του αέρα παρουσιάζει απλή κύμανση (Σχήμα 3.3), αντίθετη της ετήσιας πορείας της θερμοκρασίας του αέρα, με μέγιστο κατά το χειμώνα (Ιανουάριος) και ελάχιστο κατά το καλοκαίρι (Ιούλιος, Αύγουστος).



Σχήμα 3.2. Ημερήσια πορεία της RH και T.



Σχήμα 3.3. Ετήσια πορεία της RH και T.

Γ. Ειδική υγρασία (q)

Η ημερήσια πορεία της ειδικής υγρασίας παρουσιάζει ένα ελάχιστο (πρωτεύον) γύρω στην ανατολή του ήλιου. Αυτό, γιατί, κατά τη διάρκεια της νύχτας, έχουμε συμπύκνωση των υδρατμών και σχηματισμό δρόσου ή πάχνης, πράγμα που σημαίνει αφαίρεση υδρατμών από την ατμόσφαιρα. Μετά την ανατολή του ήλιου, στις πρώτες πρωινές ώρες, η δρόσος εξατμίζεται και οι υδρατμοί επιστρέφουν και πάλι στην ατμόσφαιρα, οπότε δημιουργείται, κατά τον τρόπο αυτό, ένα μέγιστο (δευτερεύον) γύρω στο μεσημέρι. Ταυτόχρονα, όμως, οι ανοδικές κινήσεις ενισχύονται και μεταφέρουν τους υπάρχοντες υδρατμούς μακριά από την επιφάνεια του εδάφους, με αποτέλεσμα να σημειώνεται ελάχιστο (δευτερεύον) κατά τις απογευματινές ώρες (κατά την 16η ή

17η ώρα), στη διάρκεια των οποίων οι ανοδικές κινήσεις ελαττώνονται σε μεγάλο βαθμό. Όμως, ακόμη η τιμή της θερμοκρασίας του αέρα είναι υψηλή (με αποτέλεσμα, η διαδικασία της εξάτμισης να συνεχίζεται), οπότε παρατηρείται ένας νέος εμπλουτισμός του κατώτερου στρώματος της ατμόσφαιρας με υδρατμούς. Η αύξηση αυτή σε υδρατμούς έχει ως συνέπεια να σημειώνεται, γύρω στην 20η ώρα, το πρωτεύον μέγιστο της ειδικής υγρασίας.

4. Μέτρηση της υγρασίας του αέρα

Η υγρασία της ατμόσφαιρας μετριέται με ειδικά όργανα της Μετεωρολογίας που ονομάζονται υγρόμετρα. Υπάρχουν διάφοροι τύποι υγρομέτρων, όπως το ψυχρόμετρο, το υγρόμετρο τρίχας, το συμπυκνωτικό υγρόμετρο, το χημικό ή ηλεκτρικό υγρόμετρο. Η λειτουργία αυτών των οργάνων στηρίζεται:

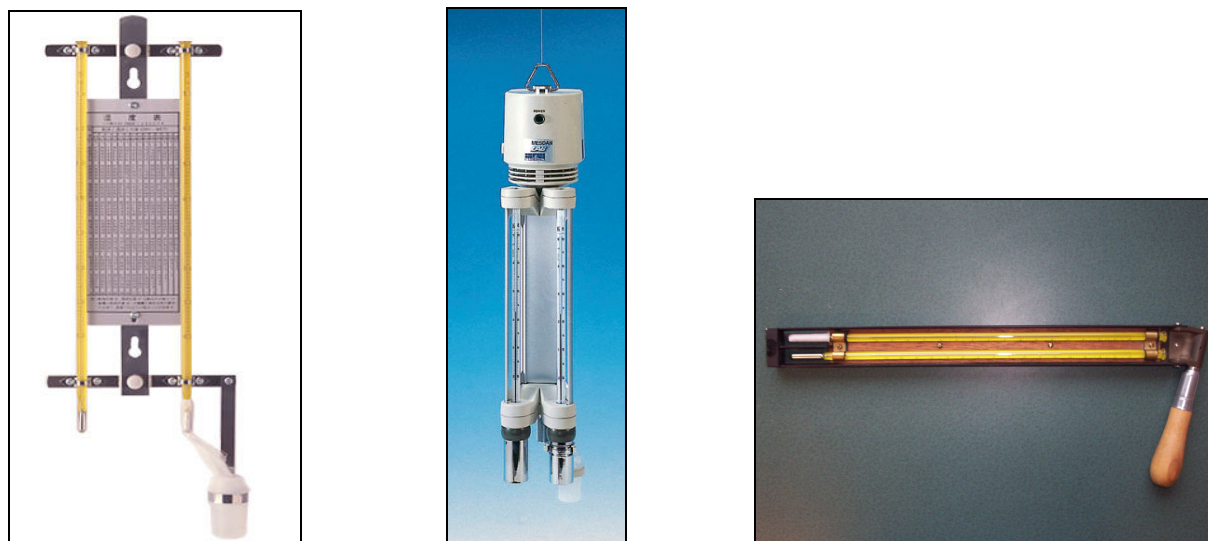
1. σε μετρήσεις θερμοκρασιών (ψυχρόμετρο)
2. σε αλλαγή των φυσικών διαστάσεων υλικών λόγω απορρόφησης της υγρασίας (υγρόμετρο τρίχας).
3. σε συμπύκνωση ενός πολύ λεπτού στρώματος νερού (συμπυκνωτικό υγρόμετρο).
4. σε αλλαγές των χημικών ή ηλεκτρικών ιδιοτήτων λόγω απορρόφησης ή προσρόφησης υδρατμών (χημικό ή ηλεκτρικό υγρόμετρο)
5. σε φάσματα απορρόφησης υδρατμών

1. **Ψυχρόμετρο.** Τόσο η απόλυτη υγρασία όσο και η σχετική υγρασία μετρούνται με το ψυχρόμετρο. Το ψυχρόμετρο αποτελείται από δύο όμοια θερμόμετρα (συνήθως δύο κοινά υδραργυρικά θερμόμετρα), τοποθετημένα παράλληλα σε κατακόρυφη θέση το ένα δίπλα στο άλλο. Το ένα μετρά την θερμοκρασία του αέρα και δείχνει την καλούμενη θερμοκρασία ξηρού θερμομέτρου (T). Το δοχείο του άλλου θερμομέτρου καλύπτεται με ύφασμα που διατηρείται υγρό με αποσταγμένο νερό και έτσι, το θερμόμετρο αυτό δείχνει την καλούμενη θερμοκρασία υγρού θερμομέτρου (T_w). Όταν το ψυχρόμετρο αερίζεται καλά, λαμβάνει χώρα εξάτμιση από την επιφάνεια του υγρού θερμομέτρου και η θερμοκρασία του πέφτει. Όταν επιτευχθεί ισορροπία, η T_w σταθεροποιείται. Η απόλυτη υγρασία, που εκφράζεται και με την μερική πίεση των υδρατμών e , υπολογίζεται από την ψυχομετρική εξίσωση:

$$e = e_s - \alpha P(T - T_w)$$

όπου e_s = μέγιστη τάση υδρατμών στην θερμοκρασία T_w , α = ψυχομετρική σταθερά (που εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου), P = ατμοσφαιρική πίεση, T = θερμοκρασία ξηρού θερμομέτρου και T_w = θερμοκρασία υγρού θερμομέτρου. Στην πράξη, για ευκολία, χρησιμοποιούνται ειδικοί πίνακες και από τις τιμές των P , T και T_w υπολογίζονται η απόλυτη και σχετική υγρασία του αέρα (Πίνακας 4.1).

Το πιο γνωστό ψυχρόμετρο είναι το Assmann (Σχήμα 4.2) που χρησιμοποιεί μηχανικό ανεμιστήρα για αερισμό. Η ανάγνωση του ψυχρόμετρου Assmann πρέπει να γίνεται 3-5 λεπτά μετά την ύγρανση του θερμομέτρου. Στο περιστρεπτό ψυχρόμετρο, περιστρέφεται το ψυχρόμετρο από την λαβή έτσι ώστε να επιτυγχάνεται ο αερισμός του ψυχομέτρου. Το ψυχρόμετρο Assman πλεονεκτεί έναντι του ψυχομέτρου August και του περιστρεπτού διότι:



Σχήμα 4.2 α) ψυχρόμετρο August β) ψυχρόμετρο Assman γ) περιστρεπτό ψυχρόμετρο Assman.

Α. Τα δύο θερμόμετρά του βρίσκονται συνεχώς σε ρεύμα σταθερής ταχύτητας.

Β. Οι στιλπνοί μεταλλικοί σωλήνες προφυλάσσουν τα θερμόμετρα από την ακτινοβολία και τα ατμοσφαιρικά απόβλητα.

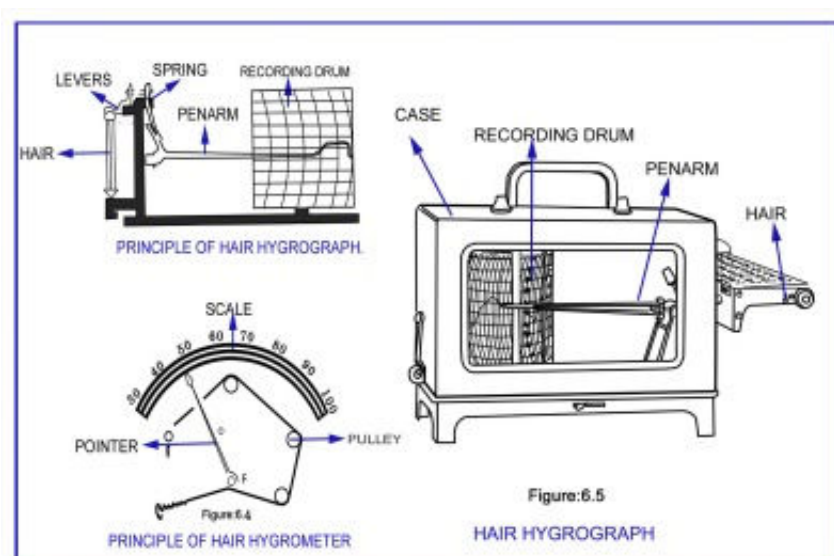
Γ. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οποιοδήποτε υψόμετρο.

Πίνακας 4.1 : Σχετική υγρασία (%) σαν συνάρτηση της διαφοράς της θερμοκρασίας του ξηρού από το υγρό θερμόμετρο (ΔT) και της θερμοκρασίας του υγρού θερμομέτρου (T_w).

T _w	ΔT								
	0	1	2	3	4	5	6	8	10
0	100	83	67	54	42	31	22	7	0
2	100	84	70	58	47	37	28	14	2
4	100	86	73	61	51	42	33	20	9
6	100	87	75	64	54	46	38	25	15
8	100	88	76	66	57	49	42	29	19
10	100	88	78	69	60	52	45	33	24
12	100	89	79	70	62	55	48	37	28
14	100	90	81	72	64	57	51	40	31
16	100	90	82	74	66	60	54	43	34
18	100	91	83	75	68	62	56	45	37
20	100	91	83	76	69	63	58	48	39
22	100	92	84	77	71	65	59	50	41
24	100	92	85	78	72	66	61	51	43
26	100	92	85	79	73	67	62	53	45
28	100	93	86	80	74	68	63	53	47
30	100	93	86	80	75	69	65	56	48
32	100	93	87	81	76	70	66	57	50
34	100	93	87	82	76	71	67	58	51
36	100	94	88	82	77	72	68	59	52
38	100	94	88	83	78	73	68	60	53

2. **Υγρόμετρο τριχός.** Το υγρόμετρο τριχός στηρίζεται στο φαινόμενο της μεταβολής του μήκους ανθρωπίνων ή ζωικών τριχών ανάλογα με την ποσότητα υδρατμών στην ατμόσφαιρα. Όταν η σχετική υγρασία αλλάζει από 0%

σε 100%, η ανθρώπινη τρίχα υπόκειται σε αύξηση του μήκους της κατά 2.0-2.5%. Λόγω αυτής της ιδιότητας, η τρίχα χρησιμοποιείται σαν αισθητήριο στις περιπτώσεις που χρειαζόμαστε συνεχή καταγραφή της υγρασίας. Οι υγρογράφοι έχουν συνήθως δέσμη ανθρώπινων τριχών, η έκταση ή η συρρίκνωση των οποίων μεταφέρεται μέσω συστήματος μοχλών σε γραφίδα προσαρμοσμένη σε περιστρεφόμενη με ωρολογιακό μηχανισμό χάρτινη ταινία βαθμονομημένη με κλίμακα από 0 έως 100 (Σχήμα 4.3). Η χρονική σταθερά του υγρόμετρου τριχός μεταβάλλεται τόσο με την θερμοκρασία όσο και με την υγρασία. Σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες ο χρόνος ισορροπίας του υγρόμετρου τριχός στις αλλαγές της υγρασίας είναι πολύ μεγάλος. Για αυτές τις περιπτώσεις, και προκειμένου να μειωθεί η χρονική σταθερά τους, οι τρίχες υποβάλλονται σε ειδική επεξεργασία. Από την άλλη μεριά η επεξεργασία κάνει τις τρίχες πιο εύθραυστες. Εκτός από τρίχες, άλλα υλικά που έχουν χρησιμοποιηθεί είναι βαμβάκι, μετάξι, νάιλον, χαρτί και ξύλο. Βασικά μειονεκτήματα αυτών των αισθητήρων είναι η σημαντική αλλαγή των φυσικών χαρακτηριστικών τους με τον χρόνο, η μεγάλη υστέρηση και η μεγάλη χρονική καθυστέρηση στην απόκριση στις αλλαγές της υγρασίας.



Σχήμα 4.3. Αρχή λειτουργίας υγρογράφου.

Σε περιπτώσεις μετρήσεων ανώτερης ατμόσφαιρας χρησιμοποιούνται τα συμπυκνωτικά υγρόμετρα και τα χημικά ή ηλεκτρικά υγρόμετρα.

3. Συμπυκνωτικά υγρόμετρα. Τα υγρόμετρα αυτής της κατηγορίας μετρούν την θερμοκρασία στην οποία συμβαίνει συμπύκνωση των υδρατμών. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν τα υγρόμετρα σημείου δρόσου, που μετρούν απ'ευθείας την θερμοκρασία στην οποία γίνεται συμπύκνωση υδρατμών πάνω σε στιλπνή επιφάνεια. Είναι όργανα ακριβείας και χρησιμοποιούνται για την βαθμονόμηση άλλων οργάνων.

4. Ηλεκτρικά υγρόμετρα. Τα όργανα αυτά μετρούν ηλεκτρονικά, την μεταβολή μίας ηλεκτρικής παραμέτρου (συνήθως αντίστασης ή χωρητικότητας) που οφείλεται σε μεταβολή της σχετικής υγρασίας. Το ευαίσθητο στοιχείο τους μπορεί να είναι μία αντίσταση από ηλεκτρολυτικό ή υγροσκοπικό υλικό είτε ένας πυκνωτής με υγροσκοπικό διηλεκτρικό. Τα στοιχεία αυτά είναι ευαίσθητα σε υψηλές υγρασίες και καταστρέφονται ή μεταβάλλονται ανεπανόρθωτα αν εκτεθούν σε υψηλά ποσοστά υγρασίας για αρκετά χρονικό διάστημα (ώρες). Είναι όργανα κατάλληλα για μετρήσεις από απόσταση, π.χ. ραδιοβολίσεις.

5. Εφαρμογές καταγραφών θερμοκρασίας και υγρασίας

Ορισμένα κλιματικά στοιχεία ή οι συνδυασμοί τους καθορίζουν τους βιοκλιματικούς δείκτες του άμεσου περιβάλλοντος του ανθρώπου και επηρεάζουν το βαθμό της βιολογικής του ευεξίας και ευδαιμονίας. Τα σημαντικότερα κλιματικά στοιχεία από πλευράς επίδρασης στον άνθρωπο είναι η θερμοκρασία, η υγρασία, η ηλιοφάνεια και ο άνεμος. Στην συνέχεια, αναφέρονται οι κυριότεροι βιοκλιματικοί δείκτες και οι τρόποι επίδρασής τους.

5.1 Αισθητή θερμοκρασία

Ο συνδυασμός της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας σε μια εμπειρική μαθηματική σχέση δίνει μια παράμετρο, η οποία ονομάζεται αισθητή θερμοκρασία και εκφράζεται σε βαθμούς Κελσίου. Η μαθηματική σχέση για την αισθητή θερμοκρασία T_e είναι:

$$T_e = T - 0.4 \cdot (T - 10) \cdot (1 - 0.01 \cdot RH)$$

όπου T είναι η θερμοκρασία του ξηρού θερμομέτρου σε βαθμούς Κελσίου και RH είναι η σχετική υγρασία σε εκατοστιαίες μονάδες (%). Για παράδειγμα, θερμοκρασία 30°C και σχετική υγρασία 50 % θα δώσει αισθητή θερμοκρασία 26°C. Οι τιμές αισθητής θερμοκρασίας μεταξύ 18 και 22°C καθορίζουν τα όρια της ζώνης φυσιολογικής άνεσης και ευεξίας της πλειονότητας των υγιών και κανονικά ντυμένων ανθρώπων. Όταν η αισθητή θερμοκρασία ξεπερνά τους 22°C, ο ανθρώπινος οργανισμός αισθάνεται δυσφορία λόγω ζέστης, ενώ όταν αυτή είναι κάτω από τους 18°C ο οργανισμός αισθάνεται δυσφορία λόγω ψύχους. Όταν η αισθητή θερμοκρασία είναι πάνω από 22°C και ο ανθρώπινος οργανισμός εκτίθεται στην ηλιακή ακτινοβολία, το αίσθημα της δυσφορίας λόγω ζέστης γίνεται ακόμα πιο έντονο, ενώ ο άνεμος το μετριάζει. Αντίθετα, όταν η αισθητή θερμοκρασία είναι κάτω από 18°C, η έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία μετριάζει το αίσθημα της δυσφορίας λόγω ψύχους, ενώ ο άνεμος το καθιστά πιο έντονο. Έχει βρεθεί πειραματικά, ότι όταν η $T_e \in (25^\circ\text{C}, 40^\circ\text{C})$ περίπου, η θερμοκρασία του δέρματος αυξάνει σχεδόν ανάλογα με την T_e . Ο οργανισμός αισθάνεται άνεση, όταν η θερμοκρασία του σώματος διατηρείται στους 37°C και του δέρματος στους 33°C περίπου. Έτσι, η εσωτερική θερμοκρασία του σώματος αρχίζει να ανεβαίνει όταν η αισθητή φτάσει την τιμή $T_e = 30$ ή 31°C. Η τιμή $T_e = 24^\circ\text{C}$ θεωρείται ως κατώτερο όριο της αίσθησης του καύσωνα, ενώ η $T_e = 35^\circ\text{C}$ ως ανώτερο όριο ανοχής του.