

ΕΛΕΝΗΣ Α. ΚΑΝΕΛΛΟΠΟΥΛΟΥ

ΦΥΣΙΚΟΥ - ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΟΥ
ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΡΙΑΣ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑΣ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΑΘΗΝΩΝ

ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΑ



ΑΘΗΝΑ 2007

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	9
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	11

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

1.1	Ηλιακή Ακτινοβολία	13
1.2	Ηλιοφάνεια και Νέφωση	16
1.3	Θερμοκρασία	17
1.3.1	Ετήσια Μεταβολή της Θερμοκρασίας	17
1.3.2	Ημερήσια Μεταβολή της Θερμοκρασίας	18
1.3.3	Επίδραση του Υψομέτρου στη Θερμοκρασία	18
1.3.4	Θερμοκρασία του Εδάφους	19
1.4	Υετός	21
1.4.1	Ετήσιες Τιμές	21
1.4.2	Μηνιαίες Τιμές	22
1.4.3	Ημερήσια Μεταβολή	22
1.4.4	Μεταβολή με το Υψόμετρο	22
1.4.5	Χιόνι	23
1.5	Υγρασία	23
1.6	Άνεμος	24
1.6.1	Δευτερεύοντες Άνεμοι	24
1.6.2	Μεταβολή με το Υψόμετρο	25
1.7	Εξάτμιση και Εξατμισοδιαπνοή	26

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΚΛΙΜΑΤΙΚΕΣ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΕΙΣ - ΚΛΙΜΑΤΙΚΟΙ ΔΕΙΚΤΕΣ

2.1	Τύποι Κλιματικών Ταξινομήσεων	29
2.1.1	Ταξινόμηση κατά Griffiths	29
2.1.2	Ταξινόμηση κατά Köppen	31
2.1.3	Ταξινόμηση κατά Thornthwaite	33
2.1.4	Άλλες Ταξινομήσεις	36
2.2	Κλιματικοί Δείκτες	37
2.2.1	Δείκτες Thornthwaite	37
2.2.2	Δείκτες Ηπειρωτικότητας - Ωκεανικότητας	38
2.2.3	Δείκτες Καιρικότητας	38
2.2.4	Δείκτες Ερημικότητας - Ευφορίας	40

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3**ΚΛΙΜΑ ΚΑΙ ΑΝΘΡΩΠΟΣ - ΒΙΟΚΛΙΜΑΤΙΚΟΙ ΔΕΙΚΤΕΣ**

3.1	Επίδραση του Κλίματος στον Άνθρωπο	42
3.1.1	Ισοζύγιο Θερμότητας	42
3.1.2	Ισοζύγιο Νερού	43
3.1.3	Εγκλιματισμός	44
3.2	Βιοκλιματικοί δείκτες	45

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4**ΚΛΙΜΑ ΚΑΙ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ**

4.1	Προσφορά Νερού	51
4.2	Αποθέματα Νερού	52
4.3	Διήθηση Νερού	53
4.4	Μέθοδοι Προσδιορισμών Συλλογής Νερού	54
4.5	Επιφανειακή Απορροή και Υπόγειο Νερό	55
4.6	Υδρομηχανική	56
4.7	Υδρολογικές Αλλαγές λόγω Αστικής Επίδρασης	58

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5**ΚΛΙΜΑ ΚΑΙ ΕΔΑΦΟΣ**

5.1	Εδάφη Ζώνης	60
5.2	Ενδοζωνικά και Αζωνικά Εδάφη	61
5.3	Κλίμα, Έδαφος και Διάβρωση	61

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6**ΚΛΙΜΑ ΚΑΙ ΓΕΩΡΓΙΑ**

6.1	Θερμοκρασία	63
6.2	Υγρασία και Βροχή	64
6.3	Ηλιακή Ακτινοβολία	66
6.4	Άνεμος	66
6.5	Εξάτμιση	67
6.6	Σχέση Κλίματος και Εσοδείας	67

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7**ΚΛΙΜΑ ΚΑΙ ΔΑΣΟΠΟΝΙΑ**

7.1	Ακτινοβολία	70
7.2	Θερμοκρασία και Υγρασία	70
7.3	Άνεμος	70
7.4	Βροχόπτωση	71

7.5	Πυκνότητα του Δάσους και Κλίμα	71
7.6	Ανάπτυξη του Δάσους και Παραγωγή	72

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

ΜΕΘΟΔΟΙ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΥ ΚΛΙΜΑΤΟΣ

8.1	Ανεμοφράκτες	75
8.2	Τεχνητή Αύξηση της Βροχής	76
8.3	Ελάττωση της Εξάτμισης	77
8.4	Προφύλαξη από τον Παγετό	77

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

ΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΕΣ

9.1	Κυκλώνες	81
9.1.1	Χαρακτηριστικά των Κυκλώνων	81
9.2	Πλημμύρες	83
9.3	Καταιγίδες	86
9.3.1	Γενικά Χαρακτηριστικά	87
9.3.2	Σίφωνες	88
9.4	Χιονοπτώσεις	90
9.5	Χαλαζόπτωση	93
9.6	Ξηρασία	94
9.7	Ερημοποίηση	95
9.8	Απερήμωση	95

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10

ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΤΩΝ ΗΠΙΩΝ ΜΟΡΦΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

10.1	Γενικά για την Ενέργεια	97
10.1.1	Μορφές Ενέργειας και Μονάδες Μέτρησης	103
10.1.2	Στατιστικά Στοιχεία που αφορούν στην Αξιοποίηση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας	111
10.2	Αιολική Ενέργεια	115
10.2.1	Γενικά	115
10.2.2	Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της Αιολικής Ενέργειας	115
10.2.3	Η τεχνική μιας Αιολικής Μηχανής	117
10.2.4	Υπολογισμός της Ισχύος του Ανέμου	119
10.2.5	Διακυμάνσεις της Ταχύτητας του Ανέμου	122
10.2.6	Η Παραγόμενη Ισχύς από μια Αιολική Μηχανή	125
10.2.7	Εδαφική καταλληλότητα για την εγκατάσταση μιας Αιολικής μηχανής	128
10.2.8	Αντιπροσωπευτικότεροι Τύποι Αιολικών Μηχανών	131
10.2.9	Αξιοποίηση των Αιολικών συστημάτων ανά τον κόσμο και την Ελλάδα	135
10.3	Ηλιακή Ενέργεια	142

10.3.1	Γενικά	142
10.3.2	Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα κατά την εκμετάλλευση της Ηλιακής Ενέργειας	143
10.3.3	Συστήματα Αξιοποίησης της Ηλιακής Ακτινοβολίας	145
10.3.4	Μέθοδος Συγκρότησης Τυπικών Μετεωρολογικών Στοιχείων για Χρήση σε Ηλιακά Συστήματα	162
10.3.5	Η Εκμετάλλευση της Ηλιακής Ενέργειας στον Ευρωπαϊκό Χώρο	163
10.4	Η προοπτική Μελλοντικής Αξιοποίησης των Αιολικών και Ηλιακών Συστημάτων στην Ελλάδα	164

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11 ΠΑΛΑΙΟΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΑ

Εσαγωγή	167
Γενικά για τις Μεθόδους Παλαιοκλιματικών Προσδιορισμών	169
11.1 Παλαιοκλιματικοί Δείκτες	171
I. Βιολογικά Παλαιοκλιματικά Στοιχεία (απολιθώματα φυτών και ζώων)	171
II. Λιθογενετικά Στοιχεία	173
III. Μορφολογικά Στοιχεία	175
IV. Ενδείξεις Διαφόρων Τύπων Κλιμάτων Αναλόγως του Είδους των Αποθέσεων	176
11.1.1 Δυσκολίες κατά τον Προσδιορισμό των Παλαιοκλιματικών Στοιχείων	177
11.2 Προσεγγίσεις στα Κλιματικά Αρχεία του Παρελθόντος	178
I. Δενδροκλιματολογία	178
II. Ανάλυση Γύρης Σπόρων και Μακροαπολιθωμάτων	183
III. Ανάπτυξη Βάλτων	188
11.3 Φυσικές Μέθοδοι Προσδιορισμού των Παλαιοκλιματικών Στοιχείων .	189
I. Μέθοδοι Μέτρησης Παλαιοθερμοκρασιών με τα Ισότοπα του Οξυγόνου	189
II. Οι Μέθοδοι Χρονολόγησης με Ραδιενεργά Ισότοπα και η Συμβολή τους στην Εκτίμηση του Παλαιοκλίματος	199
III. Άλλες Μέθοδοι Χρονολόγησης	206
11.4 Οι Μεταβολές του Κλίματος της Γης στο Παρελθόν και το Παρόν και οι Τάσεις Μεταβολής του στο Μέλλον	211
A. Οι Κλιματικές Μεταβολές από το Παρελθόν μέχρι Σήμερα	211
B. Το Μελλοντικό Κλίμα της Γης	221
Γ. Προγνωστικά Μοντέλλα	238

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ

ΑΣΚΗΣΗ (1)

Κλιματικοί Χάρτες	249
-------------------------	-----

ΑΣΚΗΣΗ (2)

Κλιματικές Ταξινομήσεις – Κλιματικοί Δείκτες (Α)	255
--	-----

ΑΣΚΗΣΗ (3)	
Κλιματικές Ταξινομήσεις – Κλιματικοί Δείκτες (B)	259
ΑΣΚΗΣΗ (4)	
Βιοκλιματικοί Δείκτες	267
ΑΣΚΗΣΗ (5)	
Αξιοποίηση της Αιολικής και Ηλιακής Ενέργειας	273
ΑΣΚΗΣΗ (6)	
Παλιαιοκλιματολογία	279
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	283

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Ο άνθρωπος, μέσα στο φυσικό του περιβάλλον ζει υπό τη συνεχή επίδραση του κλίματος, το οποίο επηρεάζει τις περισσότερες από τις δραστηριότητες και τη συμπεριφορά του. Η πρόοδος που έχει σημειωθεί στη δυνατότητα εφαρμογής των κλιματολογικών πληροφοριών, έχει βοηθήσει σε μεγάλο βαθμό να κατανοήσουμε την επίδραση της ατμόσφαιρας στον άνθρωπο και τις δραστηριότητες αυτές. Η σχέση όμως αυτή του κλίματος με τον άνθρωπο έχει εξελιχθεί σήμερα σε ένα ιδιαίτερα πολύπλοκο σύστημα. Είναι φανερό ότι το περιβάλλον δεν έχει απεριόριστες δυνατότητες απορρόφησης των ανθρωπίνων επεμβάσεων.

Η επίδραση των ανθρωπίνων δραστηριοτήτων στο κλίμα δημιουργεί ήδη μια τόσο μεγάλη διακύμανση, όσο καμιά άλλη φυσική μεταβολή κατά την τελευταία χιλιετηρίδα· και η επίδραση αυτή μεγαλώνει συνεχώς, ώστε ο 200ετής κύκλος του ελαχίστου των ηλιακών κηλίδων στον οποίο εισήλθαμε, ή άλλοι αναδραστικοί παράγοντες, να είναι ανίσχυροι στο να παίξουν τόσο ισχυρό ρόλο ως προς την κατεύθυνση της μετάβασης σε ψυχρό κλίμα και στην ανάκαμψη της επαηλούμενης τάσης θέρμανσης.

Η συσσώρευση θερμοκηπικών αερίων που προβλέπεται για το έτος 2030, αφήνει να εννοηθεί ότι η παγκόσμια μέση θερμοκρασία θα αυξηθεί περίπου κατά 2°C, με πολύ μεγαλύτερη αύξηση στα υψηλά γεωγραφικά πλάτη (κοντά στους πόλους) που είναι οι πλέον ευαίσθητοι δέκτες των κλιματικών μεταβολών, παρά τον Ισημερινό. Είναι ικανοί οι άλλοι μηχανισμοί ανάδρασης να λειτουργήσουν ως προς την αντίθετη κατεύθυνση, ανακόπτοντας τη θερμοκηπική εξέλιξη;

Οι περισσότεροι επιστήμονες είναι εξαιρετικά απαισιόδοξοι ως προς αυτό, πολλοί μάλιστα πιστεύουν ότι θα ενεργοποιηθούν και άλλοι θερμοκηπικοί μηχανισμοί, όπως π.χ. αυτός των υδριδίων μεθανίου, τεράστιες ποσότητες των οποίων είναι εγκλωβισμένες κάτω από τη θάλασσα, στις ηπειρωτικές υφαλοκρηπίδες, αλλά και στο μόνιμα παγωμένο υπέδαφος της Αρκτικής και υπάρχουν στοιχεία ότι τα υδρίδια αυτά διασπώνται απελευθερώνοντας μεθάνιο στην ατμόσφαιρα. Αυτό ενισχύεται και από το γεγονός ότι οι διακυμάνσεις της παγκόσμιας μέσης θερμοκρασίας συμβαδίζουν σχεδόν απόλυτα με τις αντίστοιχες διακυμάνσεις της συγκέντρωσης του μεθανίου στην ατμόσφαιρα, σ' όλες τις σειρές ιστοπικών αναλύσεων οξυγόνου, σε αποθέσεις πάγων, που έχουν γίνει κατά καιρούς.

Θα μπορέσει άραγε ο άνθρωπος του μέλλοντος να ζήσει και να δουλέψει κάτω από ακραίες κλιματικές συνθήκες; Φαίνεται και αυτό ακόμα πιθανό με τη σημερινή τεχνολογία. Δεν είναι μακριά η εποχή όπου οι «άγονες» έρημοι θα μετατραπούν σε πολιτείες με κλιματιζόμενες συνθήκες εκμεταλευόμενες την ηλιακή ενέργεια.

Υπάρχουν όμως πολλές αβεβαιότητες σ' αυτό το δρόμο. Μια απ' αυτές π.χ. είναι ότι η τεχνολογική πρόοδος δεν είναι πάντα τόσο θετική όσο θα θέλαμε (π.χ. η κακή χρήση της πυρηνικής ενέργειας).

Η εμπιστοσύνη στις τεχνολογικές και διαχειριστικές μας ικανότητες, προκειμένου να επιλύσουμε τα μελλοντικά προβλήματα, αναστέλλεται από κάτι ακόμα. Κα-

θώς οι λύσεις απαιτούν όλο και πιο πολύπλοκα και δαπανηρότερα μέσα, γίνονται ανεφάρμοστες για το μεγαλύτερο μέρος του γήινου πληθυσμού. Οι κάτοικοι των χωρών του Τρίτου κόσμου έχουν λιγότερες επιλογές για αλλαγή και προσαρμογή από εκείνους των ανεπτυγμένων χωρών. Επηρεάζονται όμως, το ίδιο με τους κατοίκους των πιο εύφορων περιοχών της Γης από τις αλλαγές της θερμοκρασίας, τις αυξομειώσεις των βροχοπτώσεων και τις τιμές της παγκόσμιας αγοράς. Γενικά, οι χώρες του Τρίτου Κόσμου θα έχουν πολύ μεγαλύτερες δυσκολίες για να προσαρμοσθούν στις γρήγορες αλλαγές, απ' όσο ο αναπτυγμένος κόσμος –μολονότι για τη βλαβερή κλιματική αλλαγή ευθύνονται κυρίως τα αέρια που διοχετεύουν στην ατμόσφαιρα οι βιομηχανικές χώρες.

Συχνά ο άνθρωπος είναι ανυπεράσπιστος απέναντι στα κλιματικά φαινόμενα, η επίγνωση όμως του ότι η συμβολή του στην τροποποίηση της «κλιματικής συμπεριφοράς» τα τελευταία χρόνια είναι καθοριστική, δεν έχει δυστυχώς οδηγήσει στη λήψη σοβαρών μέτρων, ούτε σε ατομικό ούτε σε συλλογικό επίπεδο.

Ο John Gribbin έχει πει ότι ο άνθρωπος είναι ένας ιός που μολύνει τη Γη.

Εμείς θέλουμε να πιστεύουμε ότι η Γη έχει τεράστιους μηχανισμούς άμυνας και θα αντιδράσει σ' αυτή τη «μόλυνση». Θα θυμήσουμε ότι λίγο μετά την εμφάνιση της ζωής στη Γη η θερμοκρασία μειώθηκε από 25°C σε 15°C, εξαιτίας της μείωσης του CO₂, το οποίο χρησιμοποίησαν διάφοροι μικροοργανισμοί σαν πηγή άνθρακα για να δομήσουν τα σώματά τους. Η φύση όμως με σοφία λειτούργησε ώστε κατά την εκπονή τους αυτοί να απελευθερώσουν μεθάνιο, που είναι θερμοκηπικό αέριο, ώστε τελικά να αποκατασταθεί η θερμική ισορροπία και η θερμοκρασία να διατηρηθεί σταθερή (περίπου 3.500.000.000 χρόνια πριν). Αυτό όμως ήταν μια φυσική μεταβολή και οι φυσικές μεταβολές είναι βραδείες μεταβολές σε αντίθεση με τις ανθρωπογενείς.

Θα πρέπει λοιπόν τα μηνύματα των ανησυχητικών προβλέψεων που αναλύσαμε να ληφθούν και να αναγνωστούν σωστά από τους «κρατούντες» των κυβερνήσεων ιδίως των βιομηχανικά αναπτυγμένων χωρών, ώστε η πρόοδος της επιστήμης και της μηχανικής να βοηθήσει στην ειρηνική ανάπτυξη μιας ανθρώπινης κοινωνίας. Διαφορετικά μπορεί να γίνει αυτό που ο κλιματολόγος Lovelock είπε χαριτολογώντας, ότι: πράγματι η Γη έχει μηχανισμούς άμυνας, αλλά θα τους χρησιμοποιήσει για να απαλλαγεί από μας, σώζοντας τον εαυτό της.

Ας ελπίσουμε ότι ο φόβος μιας ζοφερής τροποποίησης του μελλοντικού κλίματος της Γης θα οδηγήσει τον άνθρωπο στη σωστή αξιοποίηση των τεράστιων δυνατοτήτων που του παρέχονται από την ανάπτυξη όλων των Εφαρμοσμένων Επιστημών.

Μάρτης 2007

Ε.Α. ΚΑΝΕΛΛΟΠΟΥΛΟΥ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η Κλιματολογία στις αρχές του αιώνα μας και μέχρι το 1940 ήταν κυρίως περιγραφική των σχέσεων δύο βασικών κλιματικών στοιχείων: της θερμοκρασίας και της βροχής με τη βλάστηση.

Η δυνατότητα της Κλιματολογίας να εισδύσει σε ένα ευρύ φάσμα πρακτικών εφαρμογών διεφάνη το 1926 (R. GEIGER) όπου, από τη μελέτη των κλιματικών μεταβολών σε μικρές, οριζόντιες και κάθετες αποστάσεις σε περιοχές της Γερμανίας, τέθηκαν τα πρώτα θεμέλια της Μικροκλιματολογίας. Εκτοτε πολλοί επιστήμονες (Trapp, Thornthwaite, Fritts, Landsberg) έθεσαν τις βάσεις και σε πολλούς άλλους τομείς εφαρμογών της Κλιματολογίας, όπως είναι οι επιδράσεις του κλίματος: στον άνθρωπο, στο έδαφος, τη γεωργία και τη δασοπονία, στο περιβάλλον και στη συναφή έννοια των ατμοσφαιρικών πόρων.

Η **Εφαρμοσμένη Κλιματολογία** είναι λοιπόν σήμερα η επιστήμη της οποίας το βασικό κριτήριο είναι οι πρακτικές εφαρμογές που σκοπό έχουν την εξυπηρέτηση των αναγκών του ανθρώπου στους ακόλουθους κλάδους:

Βιοκλιματολογία, που εξετάζει την επίδραση των κλιματικών συνθηκών πάνω στα έμβια όντα και στα βιολογικά φαινόμενα.

Ιατρική και Θεραπευτική Κλιματολογία, που εξετάζει το κλίμα σε σχέση με την υγεία και τους διάφορους τύπους νοσημάτων.

Γεωργική Κλιματολογία, που ερευνά το κλίμα σε σχέση με τη γεωργική παραγωγή και δραστηριότητα.

Ραδιοκλιματολογία, που εξετάζει τα κλίματα των διαφόρων ατμοσφαιρικών στρωμάτων σε σχέση με τη διάδοση των διαφόρων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

Παλαιοκλιματολογία, που εξετάζει τις κλιματικές συνθήκες των μεγάλης διάρκειας γεωλογικών περιόδων του παρελθόντος, με ειδικούς κλιματικούς δείκτες που δημιουργήθηκαν κάτω από ορισμένες κλιματικές συνθήκες.

Εδαφοκλιματολογία, που μελετά τη μακροχρόνια μηχανική, χημική και βιολογική επίδραση της ατμόσφαιρας (weathering), των υδρομετεώρων και των αιωρούμενων ρύπων στη μορφή, στο χρώμα και στη σύνθεση της εκτεθειμένης εδαφικής επιφάνειας και των υλικών. Μελετά επίσης τη μετακίνηση και διάβρωση (erosion) των υλικών (χώματος, βράχων) με τη δράση της θάλασσας, του κινούμενου νερού και πάγου, της βροχής και του ανέμου. Προσδιορίζει π.χ. τα ειδικά στοιχεία του κλίματος που ευνοούν τους μύκητες και συνεπώς τη μούχλα και το σάπισμα οργανικών υλικών ή τα μακροχρόνια αποτελέσματα της λειαντικής ή αποξεστικής επίδρασης των αερομεταφερόμενων υλικών (π.χ. κονιορτού, παγοκρυστάλλων).

Μικροκλιματολογία, που μελετά το κλίμα μικρών περιοχών, τις δυνατότητες τροποποίησής του, όπου αυτό χρειάζεται (ρύπανση, παγετός κ.λπ.), ή τις δυνατότητες αξιοποίησης των μικροκλιματικών παραμέτρων μιας περιοχής (π.χ. αιολική και ηλιακή ενέργεια).

Είναι μεγάλη και ευρεία η χρησιμότητα όλων των κλάδων της Εφαρμοσμένης Κλιματολογίας σε κρίσιμους τομείς της Εθνικής Οικονομίας μιας χώρας, προχωρεί όμως πολύ πέρα και από το καθαρά οικονομικό επίπεδο. Η έκβαση π.χ. ιστορικών γεγονότων του 18ου αιώνα θα ήταν διαφορετική αν οι στρατιωτικές επιχειρήσεις διέθεταν τη σημερινή τεχνογνωσία επί των κλιματικών εφαρμογών και θα ήταν διαφορετική επίσης η εξέλιξη της ιστορίας των λαών, ίσως δε και του ανθρώπινου πολιτισμού.

ΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Είναι γνωστό ότι οι κλιματικές παράμετροι με τη μεγαλύτερη συμβολή στη διαμόρφωση του κλίματος μιας περιοχής είναι: η ακτινοβολία, η ηλιοφάνεια, η θερμοκρασία, ο άνεμος, ο υετός, η υγρασία, η εξάτμιση, η νέφωση και η ομίχλη. Η ανάλυση των χωροχρονικών μεταβολών των παραμέτρων αυτών καθώς και των αιτίων που δημιουργούν τις μεταβολές αυτές, δίνουν πληροφορίες πολύτιμες για τις Εφαρμογές της Κλιματολογίας σε σημαντικά προβλήματα του σύγχρονου ανθρώπου, όπως π.χ. αυτό της τροποποίησης του κλίματος περιοχών που πλήττονται από ξηρασία, ή αυτό της αξιοποίησης κλιματικών στοιχείων ως πηγών ενέργειας κ.λπ.

Στο κεφάλαιο αυτό λοιπόν θα εξεταστούν αναλυτικά οι προαναφερθέντες κλιματικοί παράγοντες.

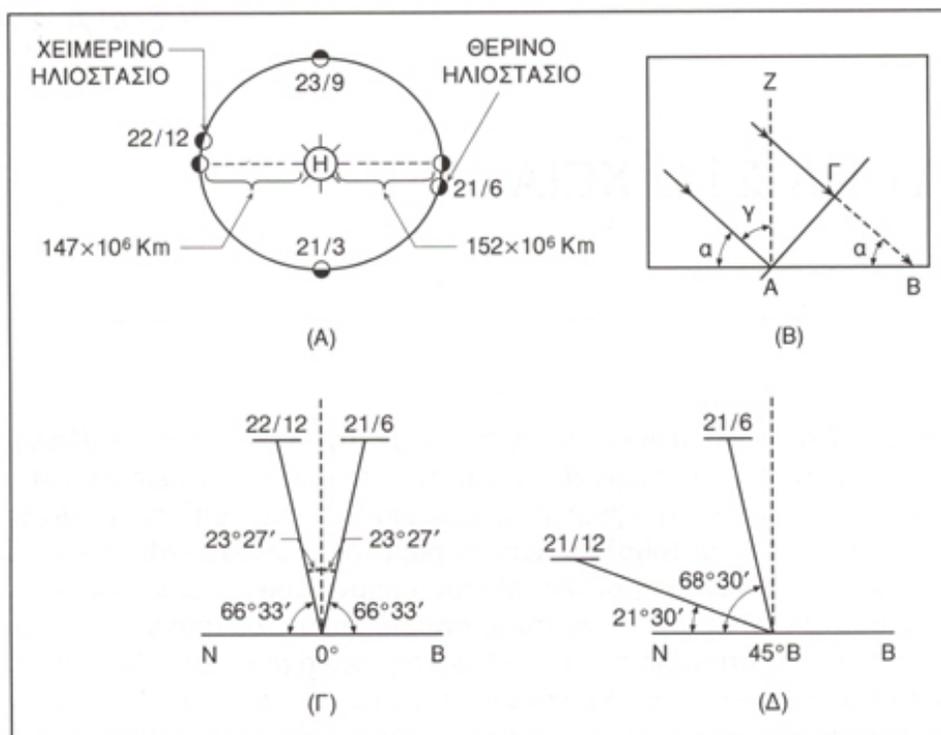
1.1 Ηλιακή ακτινοβολία

Οι κατά τόπους διαφορές στο κλίμα του πλανήτη μας είναι αποτέλεσμα του διαφορετικού τρόπου με τον οποίο η ηλιακή ενέργεια φθάνει στις διάφορες περιοχές, είτε λόγω του σχήματος της γης (διαφορά θέρμανσης μεταξύ πόλων και ισημερινού), είτε λόγω της ιδιάζουσας τροχιάς της περί τον ήλιο και περί τον άξονά της (διακύμανση θερμοκρασίας μεταξύ ημέρας-νύχτας, εποχών κ.λπ.), είτε λόγω διαφορετικού ανάγλυφου (διαφορετική θέρμανση μεταξύ ξηράς, θάλασσας ή ορέων, πεδιάδων, φυτοκαλυμμένου ή γυμνού εδάφους, κ.ά.).

Λόγω της ελλειπτικής τροχιάς της γης περί τον ήλιο, η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στη γη μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του έτους σύμφωνα με τη μεταβολή της απόστασης γης-ηλίου (Σχήμα 1.1_{1Α}).

Η ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διαδρομή της μέσα στην ατμόσφαιρα, απορροφάται ανακλάται ή σκεδάζεται από τους υδρατμούς, τις υδροσταγόνες, τη σκόνη κ.λπ., σε βαθμό που εξαρτάται από την πυκνότητα της ατμόσφαιρας και τη διαδρομή των ακτίνων μέσα σ' αυτή. Αυτή η διαδρομή εξαρτάται από το ύψος του ηλίου, δηλαδή τη γωνία (α) που σχηματίζουν οι ακτίνες του ηλίου με το οριζόντιο επίπεδο. Η κατανομή της ηλιακής ενέργειας σ' αυτή την περίπτωση δίδεται από την εξίσωση του νόμου του Lambert ($I = I_0 \cos \gamma$), όπου I είναι το ποσό της ηλιακής ενέργειας που φθάνει σε μια τυχαία επί της γης επιφάνεια AB (Σχήμα 1.1_{1Β}), I_0 το ποσό της ηλιακής ενέργειας σε επιφάνεια AG κάθετα εκτεθειμένη στις ηλιακές ακτίνες [$I_0 \approx 2 \text{ cal.cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ (ηλιακή σταθερά)] και γ η γωνία μεταξύ της ηλιακής δέσμης και του ζενίθ ενός τόπου.

Στον Ισημερινό η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας κυμαίνεται μεταξύ $23^\circ 27'$ βόρεια του ζενίθ μέχρι $23^\circ 27'$ νότια του ζενίθ ή $66^\circ 33'$ πάνω από τον αντίστοιχο ορίζοντα (Σχήματα 1.1_{1Γ} και 1.1_{1Δ} αντίστοιχα).



Σχ. 1.1. Διακύμανση εξαιτίας αστρονομικών παραγόντων της κατανομής της ηλιακής ενέργειας που φτάνει στη γη. Α) περιφορά της γης περί τον ήλιο. Β) Απεικόνιση νόμου Lambert. Γ) και Δ) Γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ενέργειας στον Ισημερινό και σε γ.π. 45° αντίστοιχα.

Η ηλιακή ακτινοβολία συντίθεται από διάφορα μήκη κύματος που εμφανίζονται στο ηλιακό φάσμα. Ο σκεδασμός τους δεν είναι ομοιόμορφος αλλά, γενικά, τα μικρότερα μήκη κύματος σκεδάζονται περισσότερο, αφού τα σωματίδια της ατμόσφαιρας είναι αντίστοιχα μικρού μεγέθους.

Σύμφωνα με το νόμο του Planck α) η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας δεν είναι η ίδια για όλα τα μήκη κύματος και εμφανίζει τη μέγιστη τιμή της στην κιτρινοπράσινη περιοχή του φάσματος, πριν την απορρόφηση και β) η ακτινοβολία του «μέλανος σώματος» είναι ανάλογη προς την τετάρτη δύναμη της θερμοκρασίας του. Ο ήλιος και η γη έχει δείχθει ότι κατά προσέγγιση συμπεριφέρονται σαν «μέλανα» σώματα. Επομένως, από τη θερμοκρασία μιας περιοχής μπορούμε να υπολογίσουμε κατά προσέγγιση το ποσό και τα μήκη κύματος της ακτινοβολίας που εκπέμπει, καθώς και το μήκος κύματος που έχει τη μέγιστη ένταση ακτινοβολίας. Η ατμόσφαιρα της γης έχει θερμοκρασία περίπου 300°K επομένως και σύμφωνα με τα παραπάνω, εκπέμπει ακτινοβολία κυρίως στην περιοχή των μεγάλων μηκών κύματος, $5\text{-}50 \mu\text{m}$, με μέγιστη ένταση στα $10 \mu\text{m}$.

Σύμφωνα με το νόμο του Kirchoff, η σχέση της ισχύος απορρόφησης προς την ισχύ εκπομπής, ενός συγκεκριμένου μήκους κύματος σε δοθείσα θερμοκρασία, είναι η ίδια για όλα τα σώματα, επομένως ένα σώμα που απορροφά καλά μια ακτινοβολία την εκπέμπει επίσης καλά και αντίθετα. Η περιοχή των μεγάλων μηκών κύματος υφίσταται μεγάλη απορρόφηση μέσα στην ατμόσφαιρα λόγω της ύπαρξης των υδρατμών και του διοξειδίου του άνθρακα, εκτός της περιοχής των $8\text{-}13 \mu\text{m}$, που ονομάζεται «παράθυρο».

Από την ακτινοβολία που φτάνει στο όριο γης-ατμόσφαιρας το 42% επιστρέφει ανακλώμενο στο διάστημα. Το 15% απορροφάται από την ατμόσφαιρα. Το 27% φθάνει απ' ευθείας στο έδαφος. Τέλος το 16% διαχέεται πολλαπλά (διάχυτη ακτινοβολία). Στο Σχήμα 1.1₂ απεικονίζεται παραστατικά το ισοζύγιο της γήινης ακτινοβολίας.



Σχ. 1.1₂. Το ισοζύγιο της γήινης ακτινοβολίας από τον ήλιο (J.F. GRIFFITHS, Applied Climatology).

Η ατμόσφαιρα απορροφά ακτινοβολίες μικρού μήκος κύματος (ηλιακή) ισοδύναμες ετησίως με 45 Kly ενώ ταυτόχρονα εκπέμπει ακτινοβολίες μεγάλου μήκους κύματος (γήινη) ισοδύναμες με 117 Kly. Επομένως η ατμόσφαιρα, κατά τη διάρκεια του έτους και κατά μέσον όρο, παρουσιάζει «καθαρή ακτινοβολία» ίση με -72 Kly.

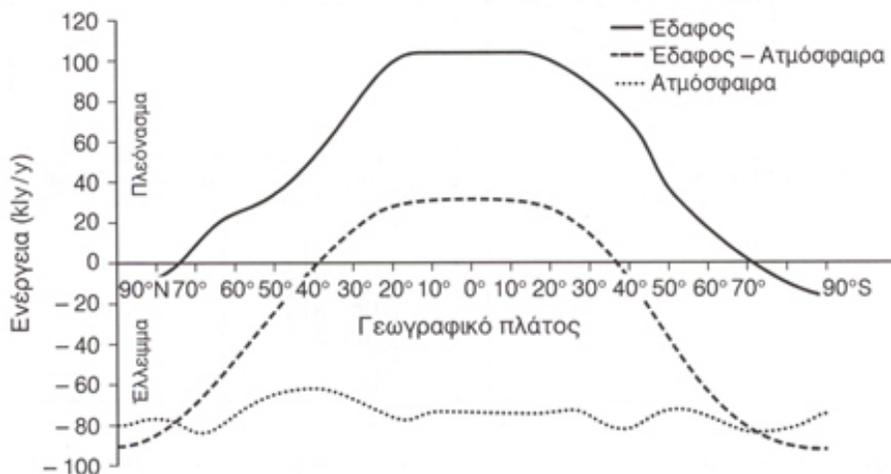
Όμως, η ατμόσφαιρα χάνει τόση ακτινοβολουμένη ενέργεια, όση κερδίζει το έδαφος. Επομένως η «καθαρή ακτινοβολία» R_g του συστήματος έδαφος-ατμόσφαιρα είναι ίση με μηδέν:

$$R_g = R + R_a = 0$$

Αν και το ισοζύγιο ακτινοβολιών για το σύστημα έδαφος-ατμόσφαιρα είναι, κατά μέσον όρο, ίσο με μηδέν κατά τη διάρκεια του έτους, δεν συμβαίνει το ίδιο, για το ισοζύγιο αυτό αν το εξετάσουμε από εποχή σε εποχή και από τόπο σε τόπο. Την ετήσια κατά πλάτος κατανομή των καθαρών ακτινοβολιών R , R_a , R_g βλέπουμε στο Σχήμα 1.1₃.

Παρατηρούμε ότι η ατμόσφαιρα παρουσιάζει μια σχεδόν ομοιόμορφη απώλεια ενέργειας σ' όλα τα γεωγραφικά πλάτη, σε αντίθεση με την επιφάνεια του εδάφους που ενεργεί, ανομοιόμορφα όμως, σαν πηγή θερμότητας, με εξαίρεση μόνο τις πολικές περιοχές. Για να μη γίνεται όμως η επιφάνεια του εδάφους θερμότερη, εξαι-

τίας του πλεονάσματος που παρουσιάζει, και η ατμόσφαιρα ψυχρότερη, εξαιτίας του ελλείμματος που παρουσιάζει, αναπτύσσεται μια κατακόρυφη μεταφορά ενέργειας από το έδαφος προς την ατμόσφαιρα. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.1₃, από το γεωγραφικό πλάτος των 40° περίπου και προς τους πόλους, η ατμόσφαιρα χάνει πολύ μεγαλύτερα ποσά από εκείνα που δέχεται από το έδαφος με αποτέλεσμα σ' αυτά τα γεωγραφικά πλάτη το σύστημα έδαφος-ατμόσφαιρα να παρουσιάζει έλλειμμα ακτινοβολίας. Αντίθετα από το γεωγραφικό πλάτος των 40° περίπου και προς τον ισημερινό το σύστημα έδαφος-ατμόσφαιρα παρουσιάζει πλεόνασμα.



Σχ. 1.1₃. Η μέση ετήσια κατά γεωγραφικό πλάτος κατανομή του ενεργειακού υπολοίπου των ακτινοβολιών της επιφάνειας της γης R , της ατμόσφαιρας R_0 και του συστήματος γη-ατμόσφαιρα R_0 («Physical Climatology» W.D. SELLERS).

1.2 Ηλιοφάνεια και νέφωση

Επειδή ακόμα και σήμερα σε λίγους τόπους του πλανήτη μετρείται η ηλιακή ακτινοβολία με τη χρήση των ειδικών οργάνων, ο προσδιορισμός μπορεί να γίνει έμμεσα από τις τιμές ηλιοφάνειας.

Έχουν προταθεί πολλές σχέσεις για την εκτίμηση της ακτινοβολίας από την ηλιοφάνεια, όπως μετράται από τα χρησιμοποιούμενα όργανα. Μια από τις περισσότερο επιτυχείς είναι η εξής:

$$Q/Q_0 = 0,29 \cos\phi + 0,52 n/H$$

όπου Q : το σύνολο της ακτινοβολίας επί οριζόντιας επιφάνειας σε γεωγραφικό πλάτος ϕ

Q_0 : το ίδιο με το Q χωρίς, όμως ατμόσφαιρα

n : η πραγματική διάρκεια της ηλιοφάνειας

H : η μέγιστη δυνατή διάρκεια ηλιοφάνειας.

Κατά τον υπολογισμό η τιμή του H λαμβάνεται μικρότερη από την πραγματική κατά ένα ποσοστό εξαρτώμενο από το γεωγραφικό πλάτος και την ηλιακή απόκλιση, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα ικανοποίησης της σχέσης $n = H$. Επίσης, ο υπολογισμός αυτός γίνεται με βάση τις μέσες τιμές μακρών περιόδων, όπως εφαρμόζεται συνήθως στις στατιστικές εκτιμήσεις.

Η σχέση μεταξύ νέφωσης και ηλιοφάνειας δεν είναι ακριβής και σαφής λόγω των μεταβαλλομένων ωρών ηλιοφάνειας και των νυχτερινών παρατηρήσεων νέφωσης. Μια ικανοποιητική όμως σχέση μεταξύ της θεωρητικής ηλιοφάνειας S (sunshine) και της νέφωσης N είναι η εξίσωση:

$$S + N = 100$$

1.3 Θερμοκρασία

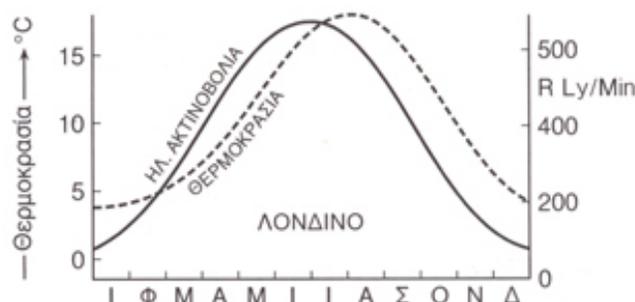
Η θερμοκρασία είναι κυρίως αποτέλεσμα του συνδυασμού της ηλιακής και της γήινης ακτινοβολίας, που επηρεάζονται και από τα φυσικά χαρακτηριστικά των επιφανειών που εκπέμπουν ή δέχονται ακτινοβολία. Επομένως, εκτός από την άμεση μέτρησή της με τα θερμόμετρα, είναι δυνατόν να εκτιμηθεί και με μαθηματικούς υπολογισμούς μετά από μετρήσεις φυσικών μεγεθών.

Υπάρχουν διάφοροι όροι που εκφράζουν τα χαρακτηριστικά και τη συμπεριφορά της θερμοκρασίας και μερικοί από τους περισσότερο χρησιμοποιούμενους είναι οι εξής:

- Μέση ημερήσια θερμοκρασία: η μέση τιμή των 24 ωριαίων τιμών. Γενικά, όμως, λαμβάνεται ως η μέση τιμή της μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας.
- Μέση μηνιαία μέγιστη: η μέση τιμή όλων των ημερήσιων μέγιστων του μήνα.
- Μέση μηνιαία ελάχιστη: η μέση τιμή όλων των ημερήσιων ελάχιστων του μήνα.
- Μέση μηνιαία θερμοκρασία: η μέση τιμή όλων των ημερήσιων μέσων τιμών του μήνα.
- Ημερήσιο εύρος: η διαφορά της ελάχιστης από τη μέγιστη θερμοκρασία της ημέρας.
- Ετήσιο εύρος: η διαφορά των μέσων μηνιαίων τιμών μεταξύ του θερμότερου και του ψυχρότερου μήνα του έτους.
- Διημερήσια μεταβολή: η διαφορά των μέσων ημερήσιων θερμοκρασιών δύο συνεχών ημερών.

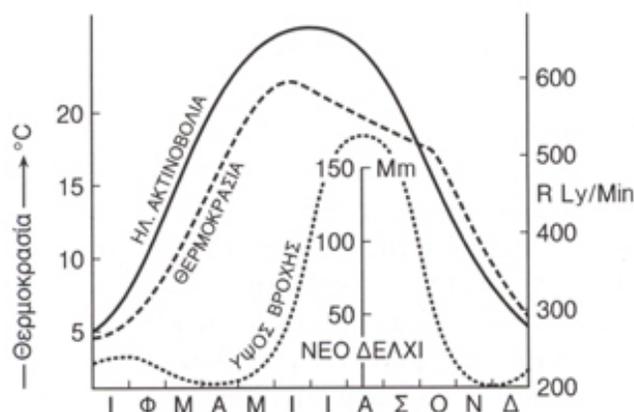
1.3.1 Ετήσια μεταβολή της θερμοκρασίας

Η ετήσια μεταβολή της θερμοκρασίας εμφανίζει απλή κύμανση με ένα μέγιστο κατά το θερμότερο μήνα του αντίστοιχου ημισφαιρίου της γης. Αυτό, βέβαια, ισχύει σε περιοχές που επηρεάζονται ομοιόμορφα, ή και καθόλου, από τη νέφωση και τον υετό, έτσι ώστε η μεταβολή της θερμοκρασίας ακολουθεί τη μεταβολή της ακτινοβολίας, με κάποια καθυστέρηση της τάξης των 2 έως 8 εβδομάδων ανάλογα με την ηπειρωτικότητα ή μη της περιοχής (Σχήμα 1.3.1.).



Σχ. 1.3.1. Σχέση μεταξύ θερμοκρασίας και άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας (R) σε οριζόντιο επίπεδο, στο Λονδίνο [$1 \text{ Ly} = 1 \text{ cal/cm}^2$].

Όπου εμφανίζεται εποχιακά βροχόπτωση, η παραπάνω απλή σχέση καλύπτεται από την επίδραση της αυξημένης νέφωσης και του ψυκτικού αποτελέσματος της βροχής (Σχήμα 1.3.1₂).

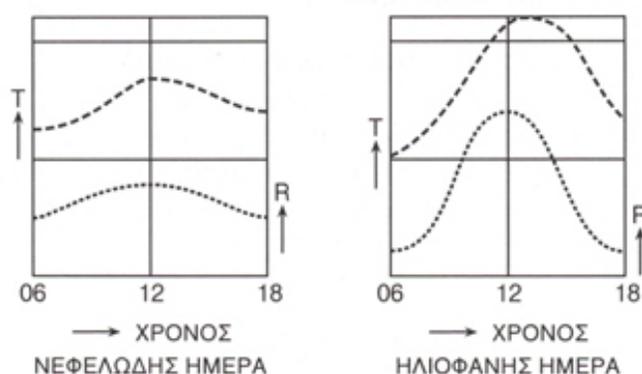


Σχ. 1.3.1₂. Μοντέλο κατανομής της θερμοκρασίας, της ηλιακής ακτινοβολίας και της βροχής στο Ν. Δελχί [$1 \text{ Ly} = 1 \text{ cal/cm}^2$].

Στα θαλάσσια κλίματα το ετήσιο εύρος είναι πολύ μικρότερο από τα ηπειρωτικά, λόγω της ρυθμιστικής επίδρασης των θαλασσών.

1.3.2 Ημερήσια μεταβολή της θερμοκρασίας

Η ημερήσια μεταβολή της θερμοκρασίας είναι και αυτή απλή και ακολουθεί τη μεταβολή της ακτινοβολίας, εάν δεν παρεμβαίνουν άλλοι παράγοντες. Τα θαλάσσια κλίματα εμφανίζουν μικρότερη ημερήσια διακύμανση από τα ηπειρωτικά (Σχήμα 1.3.2).



Σχ. 1.3.2. Αναπαράσταση της συσχέτισης μεταξύ ημερήσιας διακύμανσης της θερμοκρασίας (T) και της ηλιακής ακτινοβολίας (R).

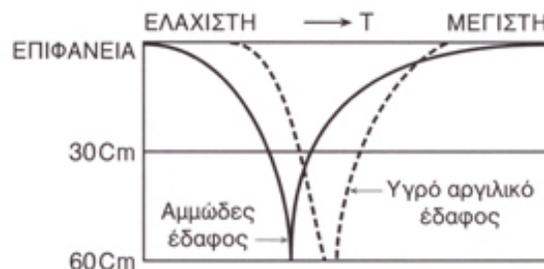
1.3.3 Επίδραση του υψόμετρου στη θερμοκρασία

Όσο αυξάνει το υψόμετρο ελαττώνεται το ημερήσιο εύρος. Εμφανίζεται ακόμη και μία καθυστέρηση στο χρόνο εμφάνισης του μέγιστου και του ελάχιστου, εξαιτίας

της επίδρασης των ατμοσφαιρικών διαταράξεων, καθώς και των φαινομένων της μεταφοράς και αγωγής θερμότητας. Για σταθμούς που βρίσκονται πάνω από το επίπεδο της θάλασσας και μετρούν τη θερμοκρασία στον μετεωρολογικό κλωβό, υπάρχει μία μέση βαθμίδα μεταβολής $0,55^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$, όπως έχει βρεθεί με βάση τις παρατηρήσεις σταθμών σ' όλο τον κόσμο. Η τιμή αυτή είναι συγκρίσιμη με εκείνη της ιδανικής ξηρής αδιαβατικής βαθμίδας για τέλεια ξηρό αέρα, που είναι περίπου $1^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$. (Αδιαβατική θεωρείται η αλλαγή της κατάστασης ενός συστήματος όταν γίνεται χωρίς την ανταλλαγή θερμότητας ή μάζας με το περιβάλλον του).

1.3.4 Θερμοκρασία του εδάφους

Η θερμοκρασία του εδάφους επηρεάζεται κυρίως από δύο φυσικές παραμέτρους του, τη θερμική αγωγιμότητα (λ) και τη θερμοχωρητικότητά του (c). Οι τιμές τους δεν είναι σταθερές αλλά μεταβάλλονται ανάλογα με την υγρασία του εδάφους και, φυσικά, τη σύστασή του. Επειδή το έδαφος είναι καλύτερος αγωγός της θερμότητας από τον αέρα και ακόμη, αντίθετα απ' αυτόν, είναι αδιαπέραστο από την ακτινοβολία, αναμένεται ότι η θερμοκρασία ακολουθεί διαφορετική συμπεριφορά μέσα στο έδαφος απ' ότι μέσα στην ατμόσφαιρα. Έτσι, τα ξηρά αμμώδη εδάφη θερμαίνονται πολύ γρήγορα στην επιφάνεια κατά την ημέρα, λόγω της μικρής θερμοχωρητικότητας και αγωγιμότητάς τους, αλλά σε μερικά εκατοστά βάθους η θέρμανση ελαττώνεται κατά πολύ (Σχήμα 1.3.4₁). Στα υγρά, εύφορα εδάφη η επιφάνεια δεν θερμαίνεται τόσο πολύ γιατί υπάρχει αυξημένη αγωγή της θερμότητας προς τα βαθύτερα στρώματα. Κατά τη νύκτα συμβαίνουν τα αντίθετα.

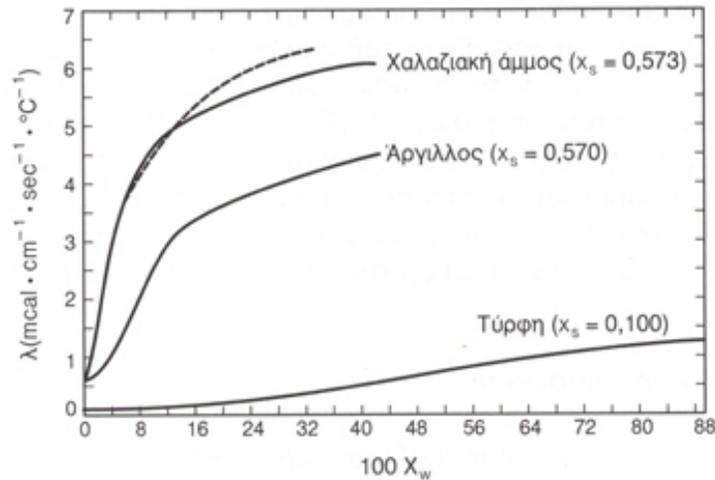


Σχ. 1.3.4₁. Σχηματικό μοντέλλο κατανομής της ημερήσιας διακύμανσης της κατά βάθος θερμοκρασίας σε αμμώδες και υγρό αργιλικό έδαφος (J.F. GRIFFITHS, Applied Climatology).

Γενικά ο συντελεστής λ αυξάνει με την αύξηση της υγρασίας του εδάφους και αποκτά μεγάλες τιμές όταν το νερό που βρίσκεται στο έδαφος είναι παγωμένο. Αντίθετα, έδαφος πλούσιο σε αέρα παρουσιάζει πολύ μικρό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας.

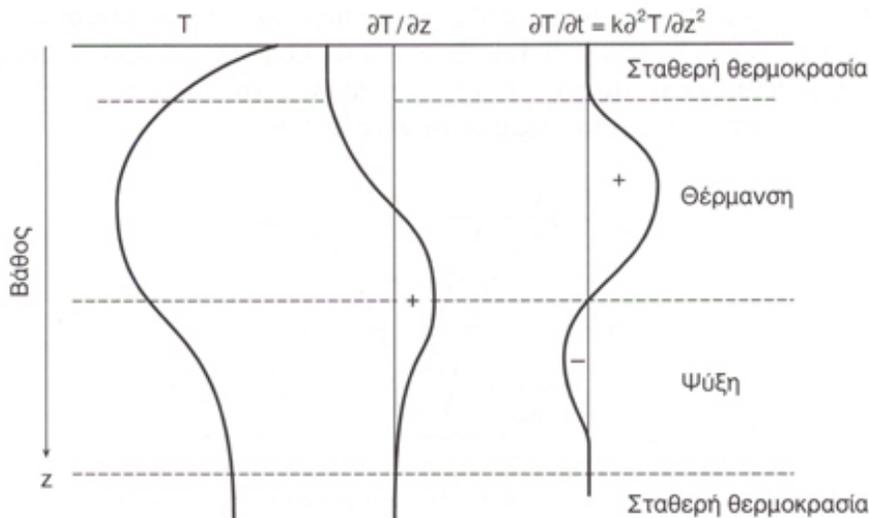
Στο Σχήμα 1.3.4₂ φαίνεται η εξάρτηση του συντελεστή αγωγιμότητας από την περιεκτικότητα X_w του εδάφους σε νερό και από την περιεκτικότητα X_s του εδάφους σε άλλα υλικά.

Όπως προκύπτει από το σχήμα, η θερμική αγωγιμότητα του αμμώδους και αργιλλώδους εδάφους, αυξάνει πολύ με την αύξηση της περιεκτικότητάς του X_w σε νερό. Τα εδάφη αυτά, χάνουν τη μονωτική τους ιδιότητα με την προσθήκη έστω και μικρής ποσότητας νερού.



Σχ. 1.3.4₂. Εξάρτηση του συντελεστή λ από την περιεκτικότητα σε νερό, διαφόρων τύπων εδάφους. (Physical Climatology, W.D. SELLERS).

Σε μια στήλη εδάφους, ομογενή, από άποψη αγωγιμότητας, είναι δυνατόν να υπολογιστεί, με δεδομένη την κατανομή της θερμοκρασίας μέσα σ' αυτό, σε ποιες περιοχές του έχουμε ψύξη και σε ποιες περιοχές του έχουμε θέρμανση (Σχήμα 1.3.4₃).



Σχ. 1.3.4₃. Μεταβολή της θερμοκρασίας του εδάφους κατά βάθος. (Principles of Environmental Physics. J.L. MONTEITH).

Το ετήσιο εύρος της θερμοκρασίας του εδάφους είναι μικρό. Σε βάθος 3 m κατά μέσον όρο είναι 3°C περίπου, στα 6 m είναι περίπου 2°C και στα 10 m είναι μόνο 1°C. Στο νερό, που είναι διαφανές στην ακτινοβολία, το ετήσιο εύρος σε βάθος 20 m είναι περί τους 5°C ενώ στα 50 m είναι 1°C.

Όπως στον αέρα έτσι και στο έδαφος εμφανίζεται μια χρονική υστέρηση οφειλόμενη στη ροή της θερμότητας μέσα σ' αυτό. Τυπικά είναι της τάξης των 12 ωρών για βάθος 30 cm και των 6 μηνών για βάθος 10 m. Αυτό σημαίνει ότι σε βάθος 10 m η θερμότερη εποχή είναι ο χειμώνας. Πάντως σε κάποιο βάθος, που εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του εδάφους και τις τοπικές συνθήκες, υπάρχει μία μέση ετήσια θερμοκρασία ίση με αυτή του αέρα.

1.4 Υετός

Για να εμφανιστεί υετός είναι απαραίτητη η ύπαρξη υγρού αέρα. Αν ο αέρας είναι πολύ ξηρός είναι δυνατόν ο υετός που πέφτει από ένα νέφος να μη φθάσει ποτέ στο έδαφος. Εφ' όσον, λοιπόν, υπάρξει υγρός αέρας τότε μπορεί να προκληθεί υετός από τρεις κυρίως αιτίες. Οι αιτίες αυτές έχουν σαν αποτέλεσμα την άνοδο ή τη μεταφορά του θερμού αέρα σε ψυχρότερες περιοχές. Κατά την άνοδο, λόγω των μικρότερων πιέσεων που υφίσταται, η μάζα του αέρα αυξάνει τον όγκο της και ψύχεται αδιαβατικά με αποτέλεσμα να έχει τη δυνατότητα να κατακρατήσει λιγότερη υγρασία και να αποδώσει την περίσσεια ως υετό.

Οι τρεις αυτές αιτίες χαρακτηρίζουν και την προέλευση του υετού και είναι οι εξής:

- (α) Ορογραφική: η μάζα του αέρα ανέρχεται λόγω της ύπαρξης υψωμάτων και ψύχεται αδιαβατικά.
- (β) Μεταφορά θερμότητας (κατακόρυφη ή οριζόντια): η διαφορετική θέρμανση μιας επιφάνειας, στην ξηρά ή τη θάλασσα, δημιουργεί θερμές περιοχές που στη συνέχεια δημιουργούν θερμές αέριες μάζες που αρχίζουν να ανέρχονται εκτονούμενες αδιαβατικά ή να μετακινούνται σε ψυχρότερες περιοχές.
- (γ) Υφέσεις ή μέτωπα: όταν δύο αέριες μάζες συναντώνται (μέτωπο) υπό γωνία, ακολουθεί άνοδος αέρα. Όταν, μάλιστα, έχουν διαφορετικά φυσικά χαρακτηριστικά, η διαφορά θερμοκρασίας επιτείνει τις κάθετες κινήσεις.

Η μεγαλύτερη μέχρι σήμερα μέση ετήσια βροχόπτωση είναι 11.7 m του όρους Waialeale της Χαβάης και ακολουθούν τα Cherrapunji (Ινδία) και Debundscha (Καμερούν). Οι ξηρότερες περιοχές της γης είναι η Arica (Χιλή) και η Wadi Halfa (Σουδάν), όπου έχουν μετρηθεί ελάχιστες βροχές κατά τη διάρκεια δεκάδων ετών. Το μεγαλύτερο ύψος βροχής κατά τη διάρκεια ενός λεπτού είναι 31 mm και παρατηρήθηκε στη Unionville του Maryland (Η.Π.Α.).

1.4.1 Ετήσιες τιμές

Οι ετήσιες τιμές του ύψους βροχής που παρατηρείται σε κάθε σταθμό εμφανίζουν μια διακύμανση. Κάθε σταθμός με μέση ετήσια τιμή άνω των 40 cm έχει περίπου 75% πιθανότητα να εμφανίζει κανονική κατανομή των ετήσιων αυτών τιμών. Η κατανομή αυτή είναι συμμετρική σχήματος κώδωνα και εκφράζεται πλήρως με τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση, S , όπου

$$S^2 = \frac{\sum (X - \bar{X})^2}{N - 1} \quad (1.4.1)$$

N = το πλήθος των παρατηρήσεων και X = οι τιμές των παρατηρήσεων. Από την κατανομή της εξίσωσης (1.4.1) μπορούν να υπολογιστούν οι πιθανότητες λήψης συγκεκριμένων υψών βροχής, όταν είναι γνωστή η τυπική απόκλιση. Η μέση τιμή \bar{X} και η τυπική απόκλιση δεν είναι δυνατό να συνδεθούν με μία ακριβή μαθηματική σχέση αλλά, όπου απαιτείται, η χρήση της εξίσωσης $S = (\bar{X}/7) + 5$, (S και \bar{X} σε cm), παρέχει εύλογα αποτελέσματα όταν το \bar{X} υπερβαίνει τα 50 cm. Η διασπορά των μέσων τιμών μπορεί να αποδοθεί δια του τυπικού σφάλματός τους που ισούται με S / \sqrt{N} .

Η πορεία της βροχής κατά τη διάρκεια του έτους ονομάζεται και βροχομετρικό σύστημα και αποτελεί θεμελιώδες κλιματικό στοιχείο κάθε περιοχής. Τα κυριώτερα από τα βροχομετρικά συστήματα μπορούν να ταξινομηθούν στις παρακάτω κατηγορίες:

- (α) Το Ισημερινό Β.Σ. εμφανίζεται στις περιοχές που περιλαμβάνονται στη ζώνη μεταξύ των παραλλήλων 10°B και N περίπου του Ισημερινού και χαρακτηρίζεται από δύο μέγιστα βροχής κατά τις ισημερίες.
- (β) Το Τροπικό Β.Σ. εμφανίζεται στις περιοχές που εκτείνονται προς B και προς N της παραπάνω ζώνης και χαρακτηρίζεται από ένα μέγιστο βροχής κατά το θέρος, όταν ο ήλιος βρίσκεται ή έχει υπερβεί το ζενίθ κάθε τόπου, και ένα ελάχιστο κατά το χειμώνα.
- (γ) Το Υποτροπικό ή Μεσογειακό Β.Σ. εμφανίζεται στις περιοχές που έχουν μεσογειακό κλίμα και επικρατεί γενικά στα όρια των ζωνών υψηλών πιέσεων και υποτροπικών περιοχών τα εγγύτερα προς τους πόλους. Χαρακτηρίζεται από ένα μέγιστο κατά το χειμώνα και ένα ελάχιστο κατά το θέρος.
- (δ) Το Μουσωνικό Β.Σ. χαρακτηρίζεται από τις άφθονες θερινές βροχές που εμφανίζονται στις περιοχές των μουσωνικών κλιμάτων, που διακρίνονται από ένα μέγιστο βροχόπτωσης κατά το θέρος και ένα ελάχιστο κατά το χειμώνα.
- (ε) Το Ηπειρωτικό Β.Σ. εμφανίζεται στο εσωτερικό των ηπείρων και χαρακτηρίζεται από ένα μέγιστο κατά το θέρος και ένα ελάχιστο κατά το χειμώνα.
- (στ) Το Θαλάσσιο Β.Σ. εμφανίζεται στις περιοχές που καταλαμβάνουν οι ωκεανοί και κυρίως στα μέσα πλάτη των δυτικών ακτών των ηπείρων και χαρακτηρίζεται από ένα μέγιστο βροχών κατά την περίοδο φθινοπώρου-χειμώνα.

1.4.2 Μηνιαίες τιμές

Οι μηνιαίες τιμές του ύψους βροχής εμφανίζουν μεγαλύτερη διακύμανση από τις ετήσιες. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται τύποι μετασχηματισμού των τιμών έτσι ώστε οι προκύπτουσες νέες τιμές να ακολουθούν την κανονική κατανομή. Σε διάφορες περιπτώσεις χρησιμοποιείται και η ατελής κατανομή γάμμα για τον υπολογισμό των πιθανοτήτων λήψης των μηνιαίων υψών βροχής.

1.4.3 Ημερήσια μεταβολή

Το φαινόμενο της βροχής παρουσιάζει ενδιαφέρον όχι μόνο από την πλευρά των παρεχόμενων ποσοτήτων νερού αλλά και από εκείνη της χρονικής κατανομής τους. Προτιμάται, συνήθως, η εμφάνιση της βροχόπτωσης κατά τη διάρκεια της νύχτας ή, ευρύτερα, κατά τη διάρκεια του σκότους, γιατί τότε προκαλεί λιγότερες δυσκολίες και ωφελεί, γενικά περισσότερο τα φυτά, εφόσον δεν έχει αρχίσει ακόμη η εξάτμιση.

1.4.4 Μεταβολή με το υψόμετρο

Η ύπαρξη υψωμάτων προκαλεί την ανύψωση των αερίων μαζών και, όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα, η επακόλουθη ψύξη τους είναι συνήθως επαρκής για τη δημιουργία βροχόπτωσης. Επομένως, γενικά, αναμένεται αύξηση της βροχής με το υψόμετρο.