

Ευάγγελος Α. Μπαϊτάς

ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑ



ISBN 960-456-038-7

© Copyright: Μπαλτάς Ευάγγελος, Εκδόσεις Ζήτη, Δεκέμβριος 2006, Θεσσαλονίκη

Το παρόν έργο πνευματικής ιδιοκτησίας προστατεύεται κατά τις διατάξεις του Ελληνικού νόμου (Ν.2121/1993 όπως έχει τροποποιηθεί και ισχύει σήμερα) και τις διεθνείς συμβάσεις περί πνευματικής ιδιοκτησίας. Απαγορεύεται απολύτως η άνευ γραπτής άδειας του εκδότη και συγγραφέα κατά οποιοδήποτε τρόπο ή μέσο αντιγραφή, φωτοανατύπωση και εν γένει αναπαραγωγή, εκμίσθωση ή δανεισμός, μετάφραση, διασκευή, αναμετάδοση στο κοινό σε οποιαδήποτε μορφή (ηλεκτρονική, μηχανική ή άλλη) και η εν γένει εκμετάλλευση του συνόλου ή μέρους του έργου.



**Φωτοστοχειοθεσία
Εκτύπωση**

Βιβλιοπωλείο

www.ziti.gr

Π. ΖΗΤΗ & Σια ΟΕ

18ο χλμ Θεσ/νίκης-Περαίας
Τ.Θ. 4171 • Περαία Θεσσαλονίκης • Τ.Κ. 570 19
Τηλ.: 23920 72.222 (10 γραμ.) - Fax: 23920 72.229
e-mail: info@ziti.gr

ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΖΗΤΗ

Αρμενοπούλου 27 • 546 35 Θεσσαλονίκη
Τηλ. 2310 203.720, Fax 2310 211.305
e-mail: sales@ziti.gr

Πρόλογος

Στόχος του παρόντος συγγράμματος είναι η παροχή στους φοιτητές Γεωτεχνικών και Πολυτεχνικών Σχολών καθώς και σε πτυχιούχους των παραπάνω Σχολών ενός πλήρους βοηθήματος σχετικά με θέματα Μετεωρολογικών εφαρμογών.

Το βιβλίο διαμορφώθηκε έτσι ώστε να παρέχει τις βασικές γνώσεις των εννοιών της επιστήμης της Μετεωρολογίας με παραδείγματα που συμβάλλουν στην καλύτερη κατανόηση αυτών. Οι έννοιες αυτές θεωρούνται απαραίτητες για τους επαγγελματίες Γεωτεχνικούς και Μηχανικούς που ασχολούνται με οποιονδήποτε τομέα των φυσικών επιστημών που συνδέεται με τη Μετεωρολογία και κυρίως την Υδρολογία και τους Υδατικούς Πόρους.

Πιστεύω ότι το βιβλίο αυτό θα συμβάλλει στην εκπαίδευση των φοιτητών που διδάσκονται Μετεωρολογία και θα βοηθήσει του μεταπτυχιακούς φοιτητές καθώς και τους τεχνικούς και άλλους επιστήμονες για ολοκληρωμένες προσεγγίσεις σε θέματα μετεωρολογικών εφαρμογών.

Οι όποιες υποδείξεις από τους αναγνώστες του βιβλίου για ενδεχόμενες ελλείψεις καθώς και τυπογραφικά ή εννοιολογικά σφάλματα θα είναι ευμενώς δεκτές.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη των εκδόσεων «ΖΗΤΗ» για την επιμελημένη έκδοση του βιβλίου.

Δεκέμβριος 2006

Ευάγγελος Α. Μπαλτάς

Περιεχόμενα

1 Εισαγωγή

1.1. Γενικά.....	13
1.1.1 Ιστορικό.....	14
1.2 Δομή και Φυσικές Ιδιότητες της Ατμόσφαιρας.....	16
1.2.1 Χημική σύνθεση της ατμόσφαιρας.....	17
1.2.2 Το όζον και η σημασία του στη ζωή.....	18
1.2.3 Το διοξείδιο του άνθρακα και το φαινόμενο θερμοκηπίου.....	19
1.2.4 Το διοξείδιο του θείου και η όξινη βροχή.....	20
1.3 Το Νερό και ο Υδρολογικός Κύκλος.....	20
1.4 Το Κλίμα και η Αένη Αλλαγή του.....	21
1.4.1 Το κλίμα στην Ελλάδα.....	22

2 Θερμοδυναμική της Ατμόσφαιρας

2.1 Ο Νόμος των αερίων.....	23
2.1.1 Εικονική θερμοκρασία (virtual temperature).....	26
2.2 Υδροστατική εξίσωση και εφαρμογές της.....	27
2.2.1 Γεωδυναμικό.....	28
2.3 Μονάδες μέτρησης στη Μετεωρολογία.....	29
2.5 1 ^{ος} Νόμος Θερμοδυναμικής.....	32
2.4.1 Ειδική θερμότητα.....	34
2.5 Αδιαβατική διαδικασία.....	35
2.5.1 Αδιαβατική θερμοβαθμίδα.....	36
2.5.2 Δυναμική θερμοκρασία.....	37
2.5.3 Τεφίγραμμα.....	38
2.5.4 Ισοδύναμη δυναμική θερμοκρασία.....	40
2.5.5 Επίπεδο συμπύκνωσης (LCL).....	40
2.6 Φαινόμενο Φεν (Föhn).....	41
2.7 Αστάθεια.....	42
2.8 Υγρομετρικές παράμετροι.....	43
2.8.1 Απόλυτη υγρασία.....	43
2.8.2 Αναλογία μίγματος.....	44
2.8.3 Αναλογία μίγματος κορεσμού.....	45
2.8.4 Ειδική υγρασία.....	45

2.8.5	Σχετική υγρασία.....	46
2.8.6	Υπολογισμός της απόλυτης υγρασίας απο τη σχετική υγρασία και τη θερμοκρασία	47
2.9	Μέθοδοι και όργανα μέτρησης της υγρασίας.....	54
2.9.1	Θερμοδυναμική μέθοδος	54
2.9.2	Μέθοδος υγροσκοπική.....	57
2.9.3	Μέθοδος συμπύκνωσης	59
2.9.4	Μέθοδος απορρόφησης και ηλεκτρική.....	59
2.9.5	Αισθητήρες μέτρησης της σχετικής υγρασίας του αέρα κατάλληλοι για αυτόματους μετεωρολογικούς σταθμούς.....	59

3 Θερμοκρασία

3.1	Θερμοκρασία Αέρα.....	71
3.1.1	Εισαγωγή	71
3.1.2	Περιοδικές μεταβολές της θερμοκρασίας αέρα.....	73
3.1.3	Γεωγραφική κατανομή της θερμοκρασίας αέρα.....	78
3.1.4	Μεταβολή της θερμοκρασίας αέρα με το ύψος.....	82
3.1.5	Αναστροφές θερμοκρασίας αέρα.....	82
3.1.6	Γεωγραφική κατανομή της θερμοκρασίας αέρα στον ελληνικό χώρο	84
3.2	Θερμοκρασία Εδάφους.....	86
3.2.1	Γενικά	86
3.2.2	Θερμοκρασία επιφανειακών εδαφικών στρωμάτων.....	88
3.2.3	Θερμοκρασία βάθους εδάφους.....	88
3.3	Θερμοκρασία Υδάτων	89
3.3.1	Θερμοκρασία γλυκού νερού	89
3.3.2	Θερμοκρασία θαλάσσιου νερού	89

4 Εξάτμιση και Διαπνοή

4.1	Γενικά	93
4.2	Φυσικό Υπόβαθρο Εξάτμισης	95
4.2.1	Φυσικές ιδιότητες νερού και υδρατμών.....	95
4.2.2	Ακτινοβολία.....	97
4.3	Εξάτμιση	102
4.3.1	Ημερήσια και ετήσια μεταβολή της εξάτμισης	104
4.3.2	Εξάτμιση από διάφορες εδαφικές επιφάνειες.....	105
4.3.3	Προσδιορισμός της εξάτμισης με λεκάνη εξάτμισης και ατμόμετρο.....	107
4.3.4	Μέθοδοι υδατικού ισοζυγίου.....	109
4.3.5	Μέθοδοι ισοζυγίου ενέργειας.....	109
4.3.6	Μέθοδοι μεταφοράς μάζας.....	110

4.3.7 Μέθοδοι συνδυασμού - η μέθοδος Penman	111
4.4 Διαπνοή	114
4.5 Εξατμισοδιαπνοή	115
4.5.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την εξατμισοδιαπνοή.....	116
4.5.2 Γεωγραφική κατανομή των τιμών της εξατμισοδιαπνοής.....	117
4.5.3 Άμεση εκτίμηση (μέτρηση) της εξατμισοδιαπνοής	120
4.5.4 Έμμεση εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής.....	121
4.5.5 Μέθοδοι υδατικού ισοζυγίου.....	121
4.5.6 Μέθοδοι προσδιορισμού της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής από κλιμα- τικά δεδομένα	123
4.6 Μέθοδοι Προσδιορισμού της Πραγματικής Εξατμισοδιαπνοής.....	134
4.6.1 Μέθοδος TURC	135
4.6.2 Μέθοδος Coutagne	136
4.6.3 Μέθοδος Ol' Dekor	139
4.7 Παρατηρήσεις στην Προσομοίωση της Εξατμισοδιαπνοής	139

5 Βαρομετρική Πίεση

5.1 Γενικά.....	141
5.1.1 Μονάδες ατμοσφαιρικής πίεσης.....	142
5.2 Μεταβολές της Ατμοσφαιρικής Πίεσης.....	143
5.2.1 Κατακόρυφες μεταβολές	143
5.2.2 Οριζόντιες μεταβολές	143
5.2.3 Περιοδικές μεταβολές.....	144
5.3 Βαροβαθμίδα - Ισοβαρείς Καμπύλες και Μορφές της	145
5.4 Υδραργυρικά Βαρόμετρα	147
5.4.1 Βαρόμετρο Fortin	147
5.4.2 Βαρόμετρο Repou - Kew.....	149
5.4.3 Διορθώσεις και αναγωγές των βαρομετρικών αναγνώσεων	149
5.5 Μεταλλικά ή Ανεροϊδή Βαρόμετρα - Βαρογράφοι	151

6 Ηλιακή Ακτινοβολία και Φωτισμός

6.1 Γενικά.....	163
6.1.1 Ορισμοί.....	163
6.1.2 Μορφές ακτινοβολίας.....	166
6.2 Νόμοι της Ακτινοβολίας.....	168
6.3 Ηλιακή Ακτινοβολία	171
6.3.1 Χαρακτηριστικά του ηλίου.....	175
6.3.2 Ηλιακή σταθερά.....	176

6.4	Περιγραφή Οργάνων Μέτρησης της Ηλιακής Ακτινοβολίας.....	177
6.4.1	Πυρηλιόμετρα	177
6.4.2	Ακτινόμετρα.....	182
6.4.3	Περιγραφή οργάνων μέτρησης του φωτισμού	186

7 Άνεμος

7.1	Εισαγωγή	187
7.2	Ημερήσιοι Άνεμοι.....	191
7.2.1	Θαλάσσια και απόγειος αύρα	191
7.2.2	Αύρες Ορέων και Κοιλάδων.....	193
7.3	Χαρακτηριστικοί Άνεμοι στη Μεσόγειο	194
7.3.1	Ετησίες ή μελέμια	194
7.3.2	Άνεμος Foehn ή Λίβας.....	195
7.3.3	Βαρδάρης (Vardarac).....	196
7.3.4	Άνεμος Sirocco	196

8 Κατακρημνίσματα

8.1	Γενικά	199
8.2	Σχηματισμός των Ατμοσφαιρικών Κατακρημνισμάτων	199
8.3	Μορφές Κατακρημνισμάτων	201
8.3.1	Βροχή.....	202
8.3.2	Χιόνι.....	202
8.3.3	Χαλάζι.....	204
8.4	Μηχανισμοί Ψύξης και Τύποι Κατακρημνισμάτων	205
8.5	Μέτρηση Κατακρημνισμάτων	206
8.5.1	Βροχόμετρα	206
8.5.2	Βροχογράφοι.....	207
8.5.3	Μέτρηση Χιονιού	209
8.5.4	Μετεωρολογικό Ραντάρ.....	210
8.5.5	Εγκατάσταση βροχομέτρων και βροχογράφων	210
8.6	Εγκατάσταση Δικτύων Σημειακών Μετρήσεων	211
8.7	Έλεγχος Ομοιογένειας και Ανάλυση Διπλών Αθροιστικών Καμπυλών	215
8.8	Συμπλήρωση Βροχομετρικών Παρατηρήσεων – Αναγωγή σε Διαφορετικό Ύψόμετρο	222
8.8.1	Μέθοδος Αριθμητικού Μέσου.....	223
8.8.2	Μέθοδος Κανονικών Λόγων.....	223
8.8.3	Μέθοδος Αντίστροφων Αποστάσεων.....	224

8.8.4	Συσχέτιση και παλινδρόμηση.....	224
8.8.5	Διόρθωση της βροχόπτωσης με το υψόμετρο	231
8.9	Επιφανειακή Ολοκλήρωση Σημειακών Βροχοπτώσεων	232
8.9.1	Μέθοδος μέσου όρου.....	233
8.9.2	Μέθοδος Thiessen	233
8.9.3	Μέθοδος των ισοϋτίων.....	235

9 Ξηρασία

9.1	Γενικά.....	243
9.2	Ορισμός της Ξηρασίας.....	244
9.2.1	Τύποι Ξηρασίας	244
9.3	Χαρακτηριστικά της Ξηρασίας.....	246
9.4	Αίτια της Ξηρασίας.....	248
9.4.1	Αλλαγές στην κυκλοφορία της ατμόσφαιρας.....	249
9.4.2	Φαινόμενο El Niño	249
9.4.3	Φαινόμενο La Niña.....	252
9.4.4	Αστρονομικοί Παράγοντες	255
9.5	Δείκτες Ξηρασίας.....	255
9.5.1	Δείκτης ξηρασίας SPI (Standard Precipitation Index)	256
9.5.2	Palmer Drought Severity Index (PDSI).....	258
9.5.3	Το ποσοστό της μέσης τιμής βροχόπτωσης (normal)	260
9.5.4	Surface Water Supply Index (SWPI).....	261
9.5.5	Δείκτης Υγρασίας Σοδειάς (CMI-Crop Moisture Index)	262
9.5.6	Εθνικός Δείκτης Βροχόπτωσης (RI-National Rainfall Index)	262

10 Κλιματική Ταξινόμηση

10.1	Γενική Περιγραφή Κλίματος Ελλάδας	265
10.2	Κλιματικές Ταξινομήσεις	266
10.2.1	Κλιματική ταξινόμηση κατά Köppen.....	266
10.2.2	Κλιματική ταξινόμηση κατά Thornthwaite (Ζαμπάκας, 1992)	272
10.3	Κλιματικοί δείκτες	276
10.3.1	Δείκτες Ηπειρωτικότητας - Ωκεανικότητας.....	277
10.3.2	Δείκτες Ξηρότητας - Υγρότητας.....	280
10.3.3	Θερμοϋγρογραφήματα	287

11 Δίκτυο Αυτόματων Μετεωρολογικών Σταθμών

11.1	Εισαγωγή	289
11.2	Λειτουργικές Απαιτήσεις του Συστήματος.....	290

11.3	Ο Σταθμός Διαχείρισης Δικτύου των ΑΜΣ	291
11.4	Τεχνικές Απαιτήσεις κάθε Υποσυστήματος	291
11.5	Κεντρική Μονάδα Αυτόματων Μετεωρολογικών Σταθμών (ΚΜ - ΑΜΣ)	292
11.6	Σχεδίαση του Σταθμού Διαχείρισης Δικτύου (ΣΔΔ) του Συστήματος των ΑΜΣ	294
11.7	Αισθητήρες	295
11.7.1	Αισθητήρες μέτρησης ταχύτητας και διεύθυνσης ανέμου	296
11.7.2	Αισθητήρας μέτρησης έντασης ανέμου	297
11.7.3	Αισθητήρας μέτρησης Θερμοκρασίας και Σχετικής Υγρασίας αέρα	297
11.7.4	Αισθητήρας Βαρομετρικής πίεσης	298
11.7.5	Αισθητήρας μέτρησης βροχόπτωσης	298
11.7.6	Αισθητήρας μέτρησης ύψους βάσης νεφών	299
11.7.7	Αισθητήρας ποσού νεφών	299
11.7.8	Αισθητήρας ορατότητας (forward scatter)	299
11.7.9	Αισθητήρας παρόντος καιρού	299
11.7.10	Αισθητήρας μέτρησης θερμοκρασίας εδάφους	299
11.7.11	Αισθητήρας μέτρησης ύψους χιονιού	300
11.7.12	Αισθητήρας μέτρησης ολικής ηλιακής ακτινοβολίας	300
11.7.13	Αισθητήρας μέτρησης καθαρής ακτινοβολίας	300
11.7.14	Αισθητήρας φωτοσυνθετικά ενεργού ακτινοβολίας	300
11.7.15	Αισθητήρας μέτρησης υγρασίας εδάφους	300
11.7.16	Αισθητήρας μέτρησης ροής θερμότητας	301
11.7.17	Αισθητήρας μέτρησης της διάρκειας ηλιοφάνειας	301
11.7.18	Αισθητήρας μέτρησης εξάτμισης (εξατμισόμετρο λεκάνης)	301
11.8	Ιστός	301
11.9	Σχετική Διάταξη Τμημάτων των Αυτόματων Μετεωρολογικών Σταθμών	302
11.9.1	Απαιτήσεις σε Λογισμικό και Υλισμικό (SW / HW)	302
11.9.2	Τεχνολογικός Εξοπλισμός	303
11.9.3	Δικτυακός Εξοπλισμός	304
11.9.4	Βαθμονόμηση - Συντήρηση	305
11.10	Εργασίες Υποδομής	306
11.10.1	Περίφραξη	307

12 Μετεωρολογικό Ραντάρ και Εφαρμογές

12.1.	Γενικά περί Ραντάρ	313
12.2	Βασική Θεωρία του Μετεωρολογικού Ραντάρ	316

12.3	Περιγραφή του WSR-74 S-Band Μετεωρολογικού Ραντάρ	322
12.4	Δίκτυο Μετεωρολογικών Ραντάρ στην Ελλάδα	331
12.5	Συνοπτική Επισκόπηση Χρήσης του Μετεωρολογικού Ραντάρ στην Υδρολογία.....	334
12.5.1	Παράγοντες διαφοροποίησης της μέτρησης της βροχής μεταξύ ραντάρ και βροχογράφων.....	336
12.5.2	Πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα χρήσης μετεωρολογικού ραντάρ έναντι βροχογράφων	337
12.6	Σφάλματα στις Μετρήσεις του Μετεωρολογικού Ραντάρ.....	338
12.6.1	Γενικά περί σφαλμάτων του μετεωρολογικού ραντάρ βροχογράφων	338
12.7	Προβλήματα Προερχόμενα από τα Χαρακτηριστικά και τη Θέση του Ραντάρ	339
12.7.1	Σφάλματα οφειλόμενα στο ανάγλυφο του εδάφους.....	339
12.7.2	Σφάλματα οφειλόμενα στην εξασθένηση του σήματος.....	340
12.7.3	Επιλογή του μήκους κύματος του ραντάρ	343
12.7.4	Επιλογή θέσης ραντάρ για υδρολογικές εφαρμογές	343
12.7.5	Ρύθμιση των ηλεκτρονικών τμημάτων του συστήματος του ραντάρ	344
12.8	Προβλήματα Προερχόμενα από τα Χαρακτηριστικά των Καταιγίδων	345
12.8.1	Επίδραση της κατανομής των υδροσταγονιδίων στη Z-R εκθετική σχέση	345
12.8.2	Επίδραση του κατακόρυφου προφίλ ανακλαστικότητας στις μετρήσεις του μετεωρολογικού ραντάρ	349

Παράρτημα: Μονάδες Μέτρησης και Φυσικές Σταθερές

A-1	Μονάδες Μέτρησης	355
A-2	Φυσικές Σταθερές	357
	Βιβλιογραφικές Αναφορές.....	359
	Βιβλιογραφία από το Διαδίκτυο	363



1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Η ατμόσφαιρα επιτελεί σημαντικές λειτουργίες, κρίσιμες για όλες τις διεργασίες του πλανήτη και ιδιαίτερα για τη ζωή πάνω στη Γη. Αποτελεί την ασπίδα της Γης, προστατεύοντάς την από την εισβολή αστρικών σωμάτων, τα οποία εισερχόμενα στην ατμόσφαιρα και διανύοντάς την καίγονται σε υψηλές θερμοκρασίες, αλλά και φιλτράροντας την επιβλαβή ακτινοβολία. Δίνει τροφή στα φυτά (και έμμεσα στα ζώα), παρέχοντας το διοξείδιο του άνθρακα, το οποίο με τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης μετατρέπεται σε οργανική ύλη. Δίνει το απαραίτητο για την αναπνοή οξυγόνο στα (αερόβια) έμβια όντα. Αποτελεί τον κύριο θερμοστάτη του πλανήτη, ρυθμίζοντας τη θερμοκρασία σε επίπεδα που κάνουν τη Γη φιλόξενη στη ζωή. Είναι το μέσο στο οποίο συμβαίνουν σημαντικές διεργασίες ανταλλαγής ενέργειας και μάζας.

Μια από τις σημαντικότερες συνέπειες αυτών των ανταλλαγών είναι ο κύκλος του νερού (ή υδρολογικός κύκλος) που παρέχει το καθαρό νερό που χρειάζονται τα έμβια όντα που ζουν στη στεριά. Από τις 100 μονάδες ηλιακής ακτινοβολίας (ορατών - βραχέων κυμάτων) που φτάνουν στο εξωτερικό όριο της ατμόσφαιρας, μόνο οι 55 φτάνουν στην επιφάνεια της στεριάς ή της θάλασσας και μόνο οι 51 απορροφώνται εκεί. Οι υπόλοιπες έχουν απορροφηθεί ή ανακλαστεί από την ατμόσφαιρα. Παράλληλα, η Γη, όπως κάθε σώμα που έχει θερμοκρασία πάνω απ' το απόλυτο μηδέν ($-273\text{ }^{\circ}\text{C}$), εκπέμπει και η ίδια ακτινοβολία. Για τη μέση θερμοκρασία της επιφάνειας της Γης (περίπου $15\text{ }^{\circ}\text{C}$), η εκπεμπόμενη ακτινοβολία είναι υπέρυθη (μη ορατά - μακρά κύματα) και είναι υπερδιπλάσια από την ηλιακή ενέργεια που φτάνει στην επιφάνεια της Γης. Όμως, το μεγαλύτερο μέρος αυτής της ακτινοβολίας (111 μονάδες) απορροφάται από την ατμόσφαιρα και εν μέρει επανεκπέμπεται προς την επιφάνεια της Γης, προκαλώντας έτσι το γνωστό φαινόμενο θερμοκηπίου (όπως θα δούμε αναλυτικότερα πιο κάτω). Μικρότερες ποσότητες ακτινοβολίας διαφεύγουν προς το διάστημα.

Από το αλγεβρικό άθροισμα των παραπάνω μεγεθών προκύπτει ότι υπάρχει καθαρή απορρόφηση ή “κέρδος” 30 ενεργειακών μονάδων από την επιφάνεια της Γης. Αυτές οι 30 μονάδες μεταφέρονται στην ατμόσφαιρα με άλλους μηχανισμούς, εκτός της ακτινοβολίας. Πρόκειται, συγκεκριμένα, για τους μηχανισμούς της αγωγής θερμότητας (λόγω επαφής με την επιφάνεια της Γης), κατακόρυφης μεταφοράς (λόγω ανοδικών ρευμάτων αέρα) και εξάτμισης του νερού. Ειδικότερα, η ενέργεια που διατίθεται για την εξάτμιση, γνωστή ως λανθάνουσα θερμότητα, ανακτάται στην ατμόσφαιρα με τη συμπύκνωση των υδρατμών και αποτελεί την κινητήρια δύναμη του υδρολογικού κύκλου. Από τα παραπάνω δεδομένα προκύπτει ότι υπάρχει ισοζύγιο στις διακινήσεις ενέργειας σε όλα τα επίπεδα, τόσο στο εξωτερικό όριο της ατμόσφαιρας, όσο και στην επιφάνεια της Γης. Η ηλιακή ακτινοβολία συντηρεί τη σχετικά μεγάλη (15 °C) μέση θερμοκρασία της επιφάνειας της Γης: αν δεν υπήρχε, τότε η θερμοκρασία της Γης θα έτεινε προς το απόλυτο μηδέν (ώστε να υπάρχει και πάλι ισοζύγιο ενέργειας εκπομπής και πρόσληψης).

Τέλος, η δράση της ηλιακής ακτινοβολίας προκαλεί θερμοκρασιακή ανισοκατανομή που τροφοδοτεί ενεργειακά την κίνηση στην ατμόσφαιρα. Τα ατμοσφαιρικά φαινόμενα, άνεμοι, σύννεφα, βροχές και χιόνια, αναλύονται από τη *μετεωρολογία* (*μετέωρα* είναι οι σταγόνες του νερού που αιωρούνται στην ατμόσφαιρα, σχηματίζοντας τα σύννεφα). Μετεωρολογία είναι η επιστήμη του καιρού, ενώ ο *καιρός* ορίζεται ως η κατάσταση της ατμόσφαιρας πάνω από μια δεδομένη περιοχή για ένα δεδομένο χρόνο. Η σύνθεση των στοιχείων του καιρού για ένα μακρύ χρονικό διάστημα είναι το *κλίμα*. Έτσι, η έννοια του κλίματος συνυφαίνεται με τη στατιστική εικόνα του μεταβλητού καιρού. Το κλίμα εξετάζεται από την *κλιματολογία*, τη δεύτερη κύρια ατμοσφαιρική επιστήμη.

1.1.1 Ιστορικό

Οι απαρχές των γνώσεων για την ατμόσφαιρα και το κλίμα χάνονται στα βάθη της προϊστορίας. Πρακτικές παρατηρήσεις μετεωρολογίας, συγκεχυμένες σε ένα κράμα προκαταλήψεων και μαγείας, υπάρχουν σε όλους τους ιστορικά βεβαιωμένους αρχαίους πολιτισμούς. Η πρώτη οργανωμένη θεωρητικά προσέγγιση των φαινομένων της ατμόσφαιρας, μέσα από τον αφηρημένο στοχασμό που συνδυάζεται με την παρατήρηση, παρουσιάστηκε από τους αρχαίους Έλληνες διανοητές και διασώθηκε σε γραπτά φιλοσοφικά και επιστημονικά κείμενα. Ο Ίωνας φιλόσοφος Αναξιμένης (585-525 π.Χ.) μελέτησε με εξαιρετική επινοητικότητα και αγχίνοια τα μετεωρολογικά φαινόμενα και παρουσίασε ορθές εξη-

γήσεις για το σχηματισμό των νεφών, της βροχής, του χαλαζιού και του χιονιού, τα αίτια των ανέμων και της ίριδας (ουράνιου τόξου), ενώ προσπάθησε να δώσει φυσική ερμηνεία και για τη δημιουργία της αστραπής. Ο Αναξαγόρας ο Κλαζομένιος, φιλόσοφος που έζησε στην Αθήνα (500-428 π.Χ.) και θεωρείται (μαζί με τον Εμπεδοκλή) πατέρα της πειραματικής έρευνας, αποσαφήνισε την έννοια του υδρολογικού κύκλου: ο ήλιος σηκώνει το νερό από τη θάλασσα στην ατμόσφαιρα, απ' όπου πέφτει ως βροχή, στη συνέχεια συλλέγεται σε υπόγεια κοιλάματα και τροφοδοτεί τη ροή των ποταμών. Ο Αριστοτέλης (384-323 π.Χ.) στο έργο του *Μετεωρολογικά* διατυπώνει με σαφήνεια τις αρχές του υδρολογικού κύκλου, διευκρινίζοντας ότι οι υδρατμοί αποτελούν εξαέρωση του νερού υπό την επίρεια του ηλίου και η συμπύκνωσή τους προκαλεί τα νέφη· μάλιστα διατυπώνει έμμεσα την αρχή της διατήρησης της μάζας του νερού στον υδρολογικό κύκλο. Ο Επίκουρος (341-270 π.Χ.) έδωσε φυσικές εξηγήσεις των μετεωρολογικών φαινομένων, στα πρότυπα των Ιώνων φιλοσόφων, αντικρούοντας τις δεισιδαιμονίες της εποχής. Ο Ήρων ο Αλεξανδρεύς (1ος αιώνας π.Χ.) στο έργο του *Πνευματικά* μελέτησε την πίεση του αέρα, αναγνωρίζοντας ότι ο αέρας δεν είναι κενός χώρος αλλά ύλη με μάζα. Θα περάσουν αιώνες μέχρι να υπάρξουν νέες ουσιαστικές συμβολές στην κατανόηση των φαινομένων της ατμόσφαιρας και τη μέτρησή τους. Έτσι, μόλις στα τέλη του 16^{ου} αιώνα μ.Χ. έχουμε τη γέννηση της ενόργανης μετεωρολογίας με την εφεύρεση αρχικώς του θερμομέτρου από τον Γαλιλαίο (1592) και στη συνέχεια του βαρομέτρου από τον Τορρικέλλι (1643). Ο τελευταίος θα επιβεβαιώσει πειραματικά το γεγονός ότι ο αέρας έχει βάρος. Τον 19ο αιώνα δημιουργούνται δίκτυα μετεωρολογικών σταθμών (Lamarck, La Place, Lavoisier), καθιερώνεται η τηλεγραφική μεταβίβαση μετεωρολογικών παρατηρήσεων (Henry, 1849) για λόγους πρόβλεψης (Le Verrier, 1854) και προειδοποίησης (Ballot, 1860) και ιδρύονται μετεωρολογικές υπηρεσίες (Le Verrier, Γαλλία, 1855) και ο Διεθνής Μετεωρολογικός Οργανισμός (1878).

Τέλος, τον 20ο αιώνα έχουμε τις παρατηρήσεις της ανώτερης ατμόσφαιρας (αερόστατα, ραδιοβολίσεις), τους αυτόματους τηλεμετρικούς μετεωρολογικούς σταθμούς, τα ραντάρ καιρού και τους μετεωρολογικούς δορυφόρους. Παράλληλα, το δεύτερο μισό του 20^{ου} αιώνα σημαδεύεται από την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών, γεγονός που έδωσε τεράστια ώθηση στη μετεωρολογία και την κλιματολογία, καθιστώντας εφικτή τη μαθηματική προσομοίωση και πρόγνωση των ατμοσφαιρικών φαινομένων με τη χρήση μοντέλων καιρού και κλιματικών μοντέλων. Επίσης, σημαντική πρόοδος έγινε στην κατανόηση των ατμοσφαιρικών φαινομένων. Ένα σημαντικό στοιχείο που κατανοήθηκε είναι η πολυπλοκότητα των καιρικών φαινομένων και η εξάρτησή τους από πληθώρα

παραμέτρων και μηχανισμών, πολλοί από τους οποίους δεν έχουν ακόμη κατανοηθεί. Η πολυπλοκότητα και η ευαισθησία των φαινομένων θέτουν αξεπέραστα όρια στην προγνωστική ικανότητα των μοντέλων καιρού για μεγάλους χρονικούς ορίζοντες.

1.2 Δομή και Φυσικές Ιδιότητες της Ατμόσφαιρας

Η ατμόσφαιρα θεωρείται ότι εκτείνεται σε ύψος περίπου 500 km πάνω από την επιφάνεια της Γης, αν και στην πραγματικότητα το άνω όριο της δεν είναι καθόλου σαφές, δεδομένου ότι ο αέρας αραιώνει σταδιακά, έτσι ώστε ακόμη και σε απόσταση αρκετών χιλιάδων km να υπάρχουν ατμοσφαιρικά μόρια. Ωστόσο, το 99.9% της μάζας της βρίσκεται στα πρώτα 50 km, σε δύο κύρια στρώματα. Το πρώτο είναι η *τροπόσφαιρα*, που φτάνει σε ύψος 10-12 km και μέσα σε αυτήν συμβαίνουν όλα τα καιρικά φαινόμενα, πράγμα στο οποίο οφείλει και το όνομά της: *τροπή* σημαίνει αλλαγή και πράγματι στο στρώμα αυτό γίνονται καθημερινά οι καιρικές αλλαγές. Το δεύτερο είναι η *στρατόσφαιρα* και μέσα σε αυτό δεν συμβαίνουν αλλαγές, π.χ. δεν σχηματίζονται σύννεφα. Αυτός είναι ένας από τους λόγους που τα αεροπλάνα είναι προτιμότερο να πετούν στη στρατόσφαιρα (πάνω από τα σύννεφα και τις καταιγίδες).

Ένας άλλος λόγος είναι ότι εκεί η ατμόσφαιρα είναι αραιότερη και η αντίσταση του αέρα μικρότερη. Στη στάθμη της θάλασσας, η πυκνότητα του αέρα είναι 1.2 kg/m^3 (1/800 της πυκνότητας του νερού) και μειώνεται με το ύψος. Η μάζα μιας κατακόρυφης στήλης αέρα επιφάνειας 1 m^2 , από την επιφάνεια της θάλασσας μέχρι το εξωτερικό όριο της ατμόσφαιρας, είναι περίπου 10 τόνοι (όσο θα ήταν η μάζα στήλης νερού ύψους 10 μέτρων). Η μάζα αυτή ασκεί μέση πίεση 1013 hPa (εκτοπασκάλ ή μιλλιμπάρ) ή δύναμη 10.13 N (νιούτον) σε κάθε τετραγωνικό εκατοστό οποιουδήποτε σώματος και φυσικά οποιουδήποτε οργανισμού, χωρίς αυτό να προκαλεί δυσφορία αφού αντισταθμίζεται από εσωτερικές πιέσεις των κυττάρων.

Ο θεμελιώδης νόμος της υδροστατικής μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η ατμοσφαιρική πίεση μειώνεται όσο αυξάνεται το υψόμετρο, αφού η μάζα του υπερκείμενου αέρα είναι όλο και μικρότερη. Παράλληλα, η θερμοδυναμική μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η θερμοκρασία μειώνεται με το υψόμετρο. Πράγματι, οι μετρήσεις δείχνουν ότι στην τροπόσφαιρα η θερμοκρασία μειώνεται κατά μέσο όρο κατά $6.5 \text{ }^\circ\text{C}$ κάθε 1000 m ανάβασης. Αυτό συμβαίνει μέχρι και το υψόμετρο των 11000 m, ενώ από εκεί μέχρι και τα 20000 m (μέσα στη στρα-

τόσφαιρα) παραμένει πρακτικώς σταθερή στους -56.5°C . Αν τώρα συνδυάσουμε και το νόμο των ιδανικών αερίων, ο οποίος λέει ότι η πυκνότητα του αέρα είναι ανάλογη της πίεσης και αντιστρόφως ανάλογη της θερμοκρασίας, μπορούμε να βρούμε τη θερμοκρασία, την πίεση και την πυκνότητα του αέρα (ή αλλιώς τις θερμοδυναμικές μεταβλητές κατάστασης) σε οποιοδήποτε υψόμετρο. Έτσι, προκύπτει ότι στην κορυφή του Ολύμπου (2918 m) η θερμοκρασία είναι κατά 19°C χαμηλότερη απ' ό,τι στην επιφάνεια της θάλασσας και η πίεση και πυκνότητα κατά 30% και 25%, αντίστοιχα, χαμηλότερες απ' ό,τι στην επιφάνεια της θάλασσας. Με την αντίστροφη λογική, το βαρόμετρο, το όργανο που μετρά την ατμοσφαιρική πίεση, μπορεί εύκολα να χρησιμοποιηθεί για τον προσεγγιστικό υπολογισμό του υψομέτρου ενός τόπου ή του ύψους στο οποίο πετά ένα αεροπλάνο.

1.2.1 Χημική σύνθεση της ατμόσφαιρας

Ο ατμοσφαιρικός αέρας είναι ένα μείγμα αέριων χημικών στοιχείων. Το αέριο με τη μεγαλύτερη αφθονία είναι το άζωτο (N_2) που αποτελεί το 78% της ατμόσφαιρας. Το άζωτο είναι σχετικά αδρανές χημικά και δρα ως το μέσο ανάμειξης για όλα τα υπόλοιπα αέρια. Το οξυγόνο είναι το δεύτερο κύριο συστατικό και αποτελεί το 21% της ατμόσφαιρας. Βρίσκεται στη συνήθη μοριακή μορφή του (O_2) αλλά μια απειροελάχιστη ποσότητά του βρίσκεται υπό μορφή όζοντος (O_3). Και οι δύο μορφές ύπαρξης του οξυγόνου έχουν τεράστια σημασία για τη ζωή στη Γη. Εκτός των παραπάνω, σε μικρές ποσότητες συμμετέχουν στη σύνθεση της ατμόσφαιρας τα ευγενή αέρια (αργό, νέο, ήλιο, ξένο, κρυπτό) και το υδρογόνο. Πέρα από τα παραπάνω χημικά στοιχεία, υπάρχουν και ορισμένες αέριες χημικές ενώσεις, σε πολύ μικρές ποσότητες ή ίχνη, όπως το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) το μεθάνιο (CH_4), οξείδια του αζώτου (N_2O) και του θείου (SO_2) και χλωροφθοράνθρακες (CFC). Ιδιαίτερη σημασία μεταξύ των χημικών ενώσεων έχει βέβαια το νερό (H_2O) το οποίο απαντά στην ατμόσφαιρα σε αέρια (υδρατμοί), υγρή (σταγόνες) και στερεή μορφή (παγοκρυσταλλοί). Σε στερεή μορφή απαντούν ακόμη στην ατμόσφαιρα σε μικρές ποσότητες διάφορες ουσίες, όπως καπνός, σκόνη και ηφαιστειακή τέφρα, οι οποίες παίζουν σημαντικό ρόλο στη δημιουργία της βροχής αφού αποτελούν τους πυρήνες πάνω στους οποίους σχηματίζονται οι σταγόνες ή οι κρυσταλλοί νερού με την υγροποίηση των υδρατμών. Η χημική σύσταση της ατμόσφαιρας είναι πρακτικώς σταθερή στο χρόνο και στο χώρο, με μερικές όμως εξαιρέσεις, η σημαντικότερη από τις οποίες αφορά το νερό, που η συγκέντρωσή του κυμαίνεται

από 0% μέχρι 4%. Βεβαίως, αν δούμε τη σύνθεση της ατμόσφαιρας σε όλη τη διάρκεια της ιστορίας της Γης, η σταθερότητα της σύνθεσης παύει να ισχύει. Έτσι, με την υπόθεση ότι η ατμόσφαιρα προήλθε από τις αέριες εκπομπές των εκρήξεων των ηφαιστειών, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι αρχικά ήταν πλούσια σε νερό, διοξείδιο του άνθρακα, άζωτο και οξείδια του θείου, ενώ δεν περιείχε καθόλου οξυγόνο.

1.2.2 Το όζον και η σημασία του στη ζωή

Σε μεγάλα ύψη (στα 20-100 km), υπό την επίδραση των ισχυρών υπεριωδών ακτίνων που υπάρχουν στο ηλιακό φως, τα μόρια του οξυγόνου (O_2) διασπώνται απελευθερώνοντας έτσι ατομικό οξυγόνο, το οποίο στη συνέχεια μπορεί να ενώνεται με άλλα μόρια οξυγόνου σχηματίζοντας το όζον (O_3). Με τη σειρά του, το όζον μπορεί να υποστεί φωτοδιάσπαση υπό την επίδραση της υπεριώδους ακτινοβολίας, μετατρέπόμενο σε μοριακό και ατομικό οξυγόνο. Οι αντιδράσεις φωτοδιάσπασης απορροφούν ένα σημαντικό μέρος της υπεριώδους ακτινοβολίας (μήκη κύματος 0.1-0.2 μm), το οποίο διαφορετικά θα έφτανε στην επιφάνεια της Γης. Παράλληλα επιδρούν στη θέρμανση της στρατόσφαιρας, σε ύψη άνω των 20 km.

Είναι γνωστό ότι οι υψηλής ενέργειας υπεριώδεις ακτίνες προκαλούν βλάβες στο DNA των ζωντανών οργανισμών (γι' αυτό και χρησιμοποιούνται για απολύμανση σε νοσοκομεία αλλά και εγκαταστάσεις επεξεργασίας νερού). Καταλαβαίνει λοιπόν κανείς ότι το όζον της ατμόσφαιρας αποτελεί την απαραίτητη ασπίδα για την ανάπτυξη και διατήρηση της ζωής στην επιφάνεια της Γης. Χωρίς την ύπαρξη οξυγόνου (και κατά συνέπεια και όζοντος) στην ατμόσφαιρα, η ζωή στην ξηρά είναι αδύνατη. Για το λόγο αυτό θεωρείται ότι οι πρώτες μορφές ζωής αναπτύχθηκαν στη θάλασσα, σε βάθος πάνω από 10 m, για να έχουν την απαραίτητη προστασία από την υπεριώδη ακτινοβολία, που απορροφάται επίσης από το νερό.

Τα τελευταία χρόνια, οι ανθρώπινες δραστηριότητες έχουν επιδράσει αρνητικά στην ύπαρξη του στρατοσφαιρικού όζοντος. Το όζον μπορεί να καταστραφεί από οξείδια του αζώτου και ρίζες χλωρίου. Τα πρώτα προέρχονται από τις καύσεις των μηχανών υπερηχητικών αεροσκαφών και τα δεύτερα από τους χλωροφθοράνθρακες. Οι τελευταίοι είναι χημικές ενώσεις που δεν υπήρχαν στην ατμόσφαιρα πριν το 1930. Έχουν χρησιμοποιηθεί ως ψυκτικές ουσίες στα ψυγεία και τα κλιματιστικά και ως προωθητικά στα σπρέι. Όταν διαφύγουν στην ατμόσφαιρα και ανεβούν ψηλά στη στρατόσφαιρα φωτοδιασπώνται δίνοντας

χλώριο, το οποίο στη συνέχεια αντιδρά με το όζον, αλλά και με το ατομικό οξυγόνο, μειώνοντας τη συγκέντρωσή τους. Έτσι, η χρήση των χλωροφθορανθράκων θεωρείται κυρίως υπεύθυνη για τη δραστική μείωση της συγκέντρωσης όζοντος την άνοιξη πάνω από την Ανταρκτική (και δευτερευόντως πάνω από τον Αρκτικό Ωκεανό), φαινόμενο που έχει ονομαστεί *τρύπα του όζοντος*. Οι κίνδυνοι που προκαλούνται από τους χλωροφθοράνθρακες έγιναν γνωστοί τη δεκαετία του 1980 και έτσι το 1989 υπογράφηκε μια διεθνής συμφωνία, γνωστή ως «πρωτόκολλο του Μόντρεαλ», για τη μείωση της χρήσης και των εκπομπών χλωροφθορανθράκων. Φαίνεται ότι ήδη η συμφωνία έχει αποδώσει καρπούς, αφού παρατηρήθηκαν σημεία ανάκαμψης στη συγκέντρωση του όζοντος πάνω από την Ανταρκτική.

1.2.3 Το διοξείδιο του άνθρακα και το φαινόμενο θερμοκηπίου

Όπως το όζον φιλτράρει την υπεριώδη ακτινοβολία, το διοξείδιο του άνθρακα παρεμποδίζει τη διέλευση της ακτινοβολίας μακρών κυμάτων, ενώ παρόμοια δράση έχουν το οξείδιο του αζώτου, το μεθάνιο και οι υδρατμοί. Ας θυμηθούμε ότι η ακτινοβολία μακρών κυμάτων δεν είναι ηλιακή, αλλά εκπέμπεται από τη Γη. Έτσι, το διοξείδιο του άνθρακα και οι άλλες ουσίες, παρεμποδίζοντας τη γήινη θερμική ακτινοβολία να φύγει προς το διάστημα, αυξάνουν τη θερμοκρασία της Γης, δημιουργώντας έτσι το γνωστό *φαινόμενο θερμοκηπίου*. Πρόκειται για ένα ευεργετικό φαινόμενο, αφού χωρίς αυτό η μέση θερμοκρασία στην επιφάνεια της Γης, που σήμερα είναι 15 °C εκτιμάται ότι θα ήταν -18 °C, αφιλόξενη για τα περισσότερα είδη της χλωρίδας και της πανίδας.

Όπως συμβαίνει με το οξυγόνο έτσι και το διοξείδιο του άνθρακα βρίσκεται σε δυναμική (και όχι στατική) ισορροπία στην ατμόσφαιρα ακολουθώντας ένα σύνθετο παγκόσμιο κύκλο, τον κύκλο του άνθρακα. Εισέρχεται στην ατμόσφαιρα από την αναπνοή, την καύση οργανικών ουσιών, την αποσύνθεση οργανισμών, διάφορες εδαφικές διεργασίες, αλλά εκλύεται και από τα ηφαίστεια και τη θάλασσα. Εξέρχεται με τη διάλυσή του στη θάλασσα, η οποία είναι μια αχανής δεξαμενή διοξειδίου του άνθρακα, και με τη φωτοσύνθεση.

Όπως συμβαίνει και με το όζον, και στην περίπτωση του διοξειδίου του άνθρακα υπάρχει μια σχετικά πρόσφατη ανθρωπογενής διαταραχή του φυσικού κύκλου. Οι καύσεις ορυκτών καυσίμων (άνθρακα, πετρελαίου) και οι αλλαγές στις χρήσεις γης και τη φυτοκάλυψη, οδηγούν σε αυξημένες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και αύξηση της συγκέντρωσής του κυρίως στην ατμόσφαιρα και δευτερευόντως στη θάλασσα. Έτσι, υπάρχει ενίσχυση του φαινομένου του

θερμοκηπίου, η οποία σύμφωνα με την αιτιοκρατική λογική συνοδεύεται από αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη και γενικότερες αλλαγές στο κλίμα. Το ερώτημα ποιες θα είναι αυτές οι αλλαγές είναι δύσκολο να απαντηθεί. Μολονότι το θέμα ερευνάται εντατικά τις τελευταίες δεκαετίες, οι πολύπλοκοι μηχανισμοί του κλίματος δεν επιτρέπουν ασφαλείς προβλέψεις. Το βέβαιο είναι ότι η εγγενής φυσική αβεβαιότητα για την εξέλιξη του κλίματος μεγαλώνει κάτω από τις σημαντικές ανθρωπογενείς επιδράσεις.

1.2.4 Το διοξείδιο του θείου και η όξινη βροχή

Μια άλλη ανθρωπογενής επίδραση στην ατμόσφαιρα έχει σχέση με το διοξείδιο του θείου (SO_2), το οποίο απελευθερώνεται με την καύση ορυκτών καυσίμων που περιέχουν θείο. Στη συνέχεια το SO_2 οξειδώνεται σε SO_3 το οποίο ενυδατώνεται σε θειικό οξύ (H_2SO_4) στις σταγόνες των νεφών, προκαλώντας οξύτητα πέραν από το κανονικό ($\text{PH} = 5.6$). Ως συνέπεια, δημιουργείται όξινη βροχή κοντά σε βιομηχανικές περιοχές, η οποία οξειδώνει τα μέταλλα, προκαλεί ζημιές στα εδάφη, στη βλάστηση (ειδικά στα δέντρα), στα ποτάμια και τις λίμνες. Το φαινόμενο της όξινης βροχής διερευνάται και πιστεύεται πως εμπλέκονται και άλλα οξείδια, όπως αυτά του αζώτου.

1.3 Το Νερό και ο Υδρολογικός Κύκλος

Σε αντίθεση με τους αργούς κύκλους του οξυγόνου και του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, ο κύκλος του νερού εξελίσσεται με έντονους ρυθμούς με αποτέλεσμα τη μεγάλη μεταβολή, ακόμη και από ώρα σε ώρα, της περιεκτικότητας της ατμόσφαιρας σε νερό, αλλά και τις θεαματικές αλλαγές του καιρού. Αν και αρχικά το νερό στην ατμόσφαιρα προήλθε από τα ηφαίστεια, η συμμετοχή αυτού του μηχανισμού στο σημερινό υδρολογικό κύκλο είναι ελάχιστη. Το νερό εισέρχεται στην ατμόσφαιρα σε αέρια μορφή από την εξάτμιση από τις επιφάνειες της θάλασσας, των λιμνών, των ποταμών και των εδαφών, και τη διαπνοή των φυτών, μια μεγάλης σημασίας λειτουργία, τόσο για το βασικό ρόλο της στην κυκλοφορία του αγγειακού συστήματος και τη μεταφορά θρεπτικών συστατικών, όσο και για το ρόλο της στη φωτοσύνθεση: το νερό που διαπνέεται αποτελεί αναπόφευκτο υποπροϊόν της φωτοσύνθεσης.

Η περιεκτικότητα της ατμόσφαιρας σε νερό σε αέρια μορφή έχει ένα ανώτατο όριο, το *όριο κορεσμού*, το οποίο αυξάνεται με τη θερμοκρασία. Έτσι, αν

προστεθούν υδρατμοί πάνω από το όριο κορεσμού, αλλά κυρίως αν ψυχθεί μια αέρια μάζα και μειωθεί το όριο κορεσμού (αυτό γίνεται συνήθως με την ανύψωση και εκτόνωση της μάζας σε μεγαλύτερα υψόμετρα όπου επικρατούν μικρότερες πιέσεις), οι πλεονάζοντες υδρατμοί υγροποιούνται σχηματίζοντας σε μικροσκοπικό επίπεδο σταγονίδια ή παγοκρυστάλλους και σε μακροσκοπικό επίπεδο σύννεφα. Όταν πολλά σταγονίδια ή κρύσταλλοι συνενωθούν, η δύναμη της βαρύτητας υπερνικά την αεροδυναμική άνοση και έτσι έχουμε αντίστοιχα τη βροχόπτωση ή τη χιονόπτωση, οι οποίες είναι διαφορετικές μορφές *νετού* ή *κατακρημνισμάτων*. Τα κατακρημνίσματα τροφοδοτούν με γλυκό νερό τα εδάφη και τους υποκείμενους υπόγειους υδροφορείς, που με τη σειρά τους, εκφορτίζονται μέσω των πηγών και τροφοδοτούν τη ροή των ποταμών. Όταν η ένταση της βροχής είναι μεγάλη, ξεπερνά τη δυνατότητα κατακράτησης και διήθησης των εδαφών, και τα όμβρια νερά ρέουν επιφανειακά σχηματίζοντας την πλημμυρική απορροή.

1.4 Το Κλίμα και η Αένη Αλλαγή του

Η θερμοκρασία και τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα είναι τα κύρια στοιχεία που χαρακτηρίζουν το κλίμα ενός τόπου. Άλλα σημαντικά στοιχεία είναι η υγρασία, η νέφωση και οι άνεμοι. Στον πλανήτη υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία κλιμάτων η κατάταξη των οποίων γίνεται με βάση τις μέσες τιμές της θερμοκρασίας και της βροχόπτωσης του έτους, αλλά κυρίως με βάση την κατανομή των δύο μεγεθών στους μήνες. Η σημασία του κλίματος στη χλωρίδα και την πανίδα αλλά και τον άνθρωπο και τον πολιτισμό είναι προφανής. Οι αρχαιολόγοι, ανθρωπολόγοι και ιστορικοί έχουν διαπιστώσει τη σχέση του κλίματος με τη διανοητική και πνευματική ανάπτυξη του ανθρώπου και την ακμή και παρακμή των πολιτισμών.

Σήμερα είναι διαπιστωμένο ότι το κλίμα δεν είναι σταθερό σε ένα τόπο, αλλά μεταβάλλεται συνεχώς και σε όλες τις χρονικές κλίμακες. Βεβαίως, οι μετρήσεις που έχουμε για τη θερμοκρασία, τη βροχόπτωση και άλλα στοιχεία του κλίματος δεν ξεκινούν παρά τον 17^ο αιώνα σε λίγες περιπτώσεις, και μόνο τον 20^ο αιώνα έχουν διαδοθεί. Ωστόσο, η επιστήμη της παλαιοκλιματολογίας είναι σε θέση να «ανακατασκευάσει» το κλίμα του παρελθόντος, χρησιμοποιώντας διάφορους δείκτες του κλίματος (υποκατάστατα δεδομένα), όπως ιστορικές πηγές, πάχη των δακτυλίων δέντρων, κοράλλια, κόκκους γύρης στα ιζήματα, πυρήνες πάγου και πυρήνες ιζημάτων από λίμνες ή απ' τη θάλασσα. Σημαντική

αύξηση της θερμοκρασίας, περίπου 8 °C, ξεκινά εδώ και 20000 χρόνια και λήγει στα 10000 χρόνια πριν, οπότε και τελείωσε η πιο πρόσφατη (τεταρτογενής) εποχή των παγετώνων. Προχωρώντας πιο πίσω βλέπουμε ότι οι χαμηλές θερμοκρασίες κυριαρχούν. Οι περίοδοι χαμηλών θερμοκρασιών είναι παγετωνικές και εναλλάσσονται με πιο σύντομες μεσοπαγετωνικές περιόδους, στις οποίες υποχωρούν οι πάγοι. Στις μεσοπαγετωνικές περιόδους που παρουσιάζουν θερμοκρασιακές αιχμές γύρω στα 125, 240, 325 και 410 χιλιάδες χρόνια πριν, φαίνεται ότι έχουν επικρατήσει θερμοκρασίες μεγαλύτερες από τις σημερινές. Οι σημαντικές αυτές διακυμάνσεις αποδίδονται πρωτίστως σε αστρονομικούς παράγοντες, όπως είναι οι γεωμετρικές διακυμάνσεις της τροχιάς της Γης και η αλλαγή διεύθυνσης του άξονα περιστροφής της Γης. Φυσικά, υπάρχει και μια σειρά άλλων παραγόντων που επηρεάζουν το κλιματικό σύστημα της Γης, όπως είναι οι μεταβολές στην ηλιακή δραστηριότητα, οι μετακινήσεις των ηπείρων, οι εκρήξεις ηφαιστειών, οι μεταβολές στην ανακλαστικότητα της Γης (και εδώ παίζει σημαντικό ρόλο η εξάπλωση των πάγων), οι μεταβολές στη βιόσφαιρα και την υδρόσφαιρα κ.ά., ενώ, όπως είδαμε παραπάνω, σήμερα έχουν προστεθεί και ανθρωπογενείς παράγοντες επηρεασμού του κλίματος.

1.4.1 Το κλίμα στην Ελλάδα

Η γεωγραφική θέση της Ελλάδας (γεωγραφικά πλάτη 34-42° Β), η γειτνίασή της με τη Μεσόγειο και το μεγάλο ανάπτυγμα ακτών, καθώς και το πλούσιο ανάγλυφο είναι καθοριστικοί παράγοντες για το κλίμα της χώρας. Το κλίμα έχει αξιοσημείωτη ποικιλία με τα βόρεια τμήματα της χώρας να επηρεάζονται από τους κλιματικούς παράγοντες της ΝΑ Ευρώπης, ενώ τα νότια τμήματά της να χαρακτηρίζονται από θαλάσσιο Μεσογειακό κλίμα.

Από τη γεωγραφική κατανομή της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης παρατηρείται ότι η Δυτική Ελλάδα είναι πολύ πλουσιότερη σε βροχοπτώσεις από την Ανατολική. Έτσι, ενώ στην Ήπειρο η μέση ετήσια βροχόπτωση ξεπερνά τα 1200 mm (τοπικά φτάνει ακόμη και τα 2000 mm), στην Αττική και τις Κυκλάδες είναι κάτω από 400 mm. Οι διαφοροποιήσεις αυτές οφείλονται κατά κύριο λόγο στην οροσειρά της Πίνδου, η οποία αναγκάζει τα μετεωρολογικά συστήματα που έρχονται από τα δυτικά να ανυψωθούν και να ψυχθούν, ενισχύοντας τη βροχόπτωση στη Δυτική Ελλάδα και δημιουργώντας «ομβροσκία» στην Ανατολική.