

Ατμόσφαιρα και κλίμα

Δημήτρης Κουτσογιάννης

Τομέας Υδατικών Πόρων, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Εισαγωγή

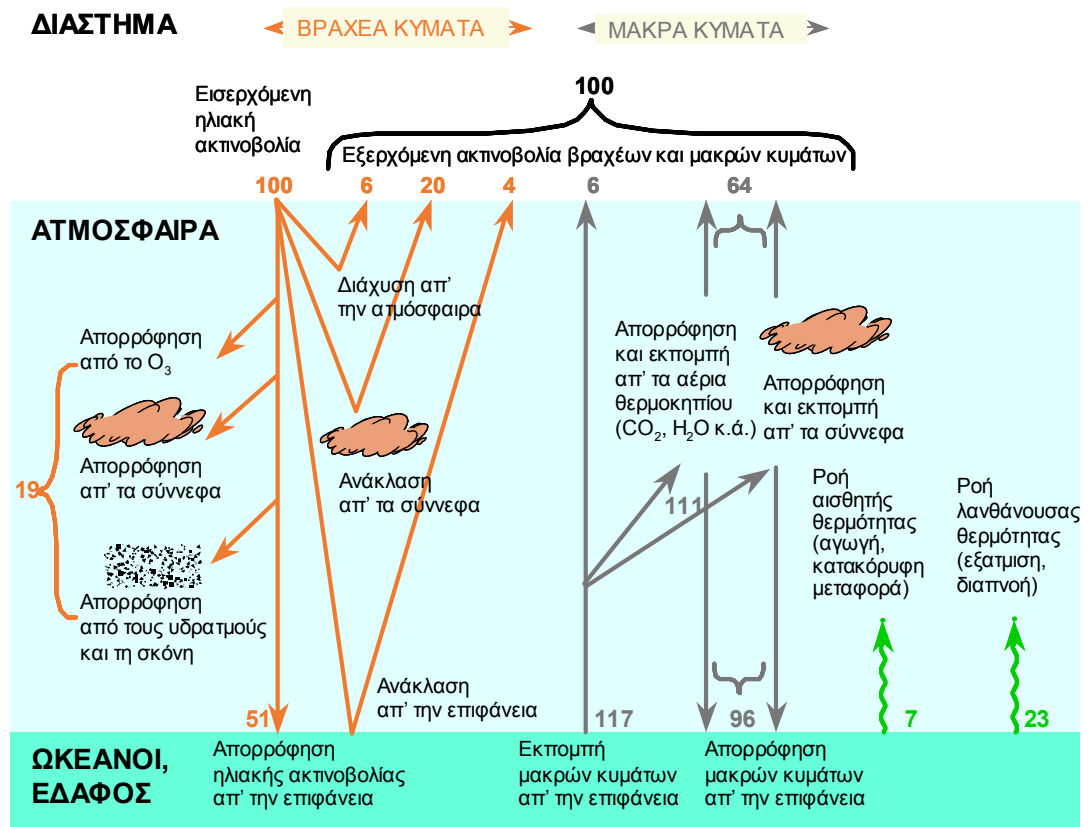
Η ατμόσφαιρα επιτελεί σημαντικές λειτουργίες, κρίσιμες για όλες τις διεργασίες του πλανήτη και ιδιαίτερα για τη ζωή πάνω στη Γη. Αποτελεί την ασπίδα της Γης, προστατεύοντας την από την εισβολή αστρικών σωμάτων, τα οποία εισερχόμενα στην ατμόσφαιρα και διανύοντάς την καίγονται σε ψηλές θερμοκρασίες, αλλά και φιλτράροντας την επιβλαβή ακτινοβολία, αστρική και ηλιακή. 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 (ένας δεύτερος είναι το νερό, κυρίως της θάλασσας), 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.

Μια συνοπτική εικόνα των διεργασιών ανταλλαγής ενέργειας που συμβαίνουν στην ατμόσφαιρα δίνονται στο Σχ. 1. 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°C), ακτινοβολεί και η ίδια. Για τη μέση θερμοκρασία της επιφάνειας της Γης (περίπου 15°C), η εκπεμπόμενη ακτινοβολία είναι υπέρυθη (μη ορατά, μακρά κύματα) και είναι υπερδιπλάσια από την ηλιακή ενέργεια που φτάνει στην επιφάνεια της Γης (117 ενεργειακές μονάδες στο Σχ. 1). 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 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. Είναι λοιπόν φανερό ότι η Γη δεν κερδίζει ενέργεια από τον Ήλιο. Στην πραγματι-

κότητα, το κέρδος της Γης αφορά την *εντροπία*: η ηλιακή ακτινοβολία είναι χαμηλότερης εντροπίας από την υπέρυθη ακτινοβολία που εκπέμπει η Γη. Επίσης, 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 μακρό 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.



Σχ. 1 Ενεργειακό ισοζύγιο στην ατμόσφαιρα (τα μεγέθη δίνονται ως ποσοστά επί της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας· πηγή: Κουτσογιάννης, Δ., και Θ. Ξανθόπουλος, Τεχνική Υδρολογία, Έκδοση 3, 418 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1999.).

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 φιλο-

σοφικά και επιστημονικά κείμενα. Ο Ίωνας φιλόσοφος Αναξιμένης (585-525 π.Χ.) μελέτησε με εξαιρετική επινοητικότητα και αγχίνια τα μετεωρολογικά φαινόμενα και παρουσίασε ορθές εξηγήσεις 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 ίδιος μελέτησε και πολλά μετεωρολογικά φαινόμενα (άνεμοι, αστραπές, θύελλες, ανεμοστρόβιλοι, νέφη, χιόνι, ίριδα) αποδεχόμενος εν γένει τις ερμηνείες του Αναξιμένη και συμπληρώνοντάς τες. Ειδικότερα, για τη γένεση των ανέμων θεωρεί υπεύθυνες τις διαφορές πυκνότητας του αέρα που προκαλούνται από την ηλιακή θερμότητα: ο θερμαινόμενος αέρας κινείται προς το βόρειο πόλο και αφήνει κενά τα οποία προκαλούν ρεύματα αέρα. 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 επήρεια του ηλίου και η συμπύκνωσή τους προκαλεί τα νέφη· μάλιστα διατυπώνει έμμεσα την αρχή της διατήρησης της μάζας του νερού στον υδρολογικό κύκλο. Ο μαθητής του Θεόφραστος υιοθετεί και συμπληρώνει τις θεωρίες του Αναξιμένη και του Αριστοτέλη για το σχηματισμό των κατακρημνισμάτων από συμπύκνωση και πάγωμα των υδρατμών· σημαντική είναι η συμβολή του στην κατανόηση της σχέσης του ανέμου με την εξάτμιση. 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 19^ο 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 διεθνής μετεωρολογικός οργανισμός (1878).

Τέλος, τον 20^ο 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.

Δομή και φυσικές ιδιότητες της ατμόσφαιρας

Η ατμόσφαιρα θεωρείται ότι εκτείνεται σε ύψος περίπου 500 χιλιομέτρων πάνω από την επιφάνεια της Γης, αν και στην πραγματικότητα το άνω όριό της δεν είναι καθόλου σαφές, δεδομένου ότι ο αέρας αραιώνει σταδιακά, έτσι ώστε ακόμη και σε απόσταση αρκετών χιλιάδων χιλιομέτρων να υπάρχουν ατμοσφαιρικά μόρια. Ωστόσο, το 99.9% της μάζας της βρίσκεται στα πρώτα 50 χιλιόμετρα, σε δύο κύρια στρώματα. Το πρώτο είναι η *τροπόσφαιρα*, που φτάνει σε ύψος 10-12 χιλιόμετρα 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 (χιλιόγραμμα ανά κυβικό μέτρο, μόλις το 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, φυσικά και 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°C κάθε 1000 μέτρα ανάβασης. Αυτό συμβαίνει μέχρι και το υψόμετρο των 11 000 μέτρων, ενώ από εκεί μέχρι και τα 20 000 μέτρα (μέσα στη στρατόσφαιρα) παραμένει πρακτικώς σταθερή στους -56.5°C . Αν τώρα συνδυάσουμε και το νόμο των τέλειων 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 (2917 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. Αντίστοιχα, σε υψόμετρο 16 000 μέτρων η πίεση είναι μόλις το 1/10 και η πυκνότητα λιγότερο από 1/7 των αντίστοιχων μεγεθών στη στάθμη 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.

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, όπως θα δούμε αναλυτικότερα παρακάτω. Εκτός των παραπάνω δύο, 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 (παγοκρύσταλλοι). 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 τις βροχής αφού αποτελούν τους πυρήνες πάνω στους οποίους σχηματίζονται οι σταγόνες ή οι κρύσταλλοι 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.

Το οξυγόνο και η ιστορία του

Το οξυγόνο είναι το αέριο στο οποίο βασίζεται ποικιλία μορφών ζωής στη Γη, αφού είναι απαραίτητο για την αναπνοή των ζώων, αλλά παράλληλα είναι και το ίδιο προϊόν της ζωής. Θεωρείται βέβαιο ότι απουσίαζε στην αρχική ατμόσφαιρα, αφού δεν υπάρχει στα αέρια των ηφαιστειών και παράλληλα είναι πολύ ενεργό χημικά ώστε να δεσμεύεται εύκολα σε άμπολλες χημικές αντιδράσεις. Η σημερινή αφθονία του στην ατμόσφαιρα σχετίζεται με τη φωτοσύνθεση, μια διεργασία που διάφοροι οργανισμοί μεταξύ των οποίων τα φυτά, είναι ικανοί να πραγματοποιούν. Με αυτή παρασκευάζουν οι ίδιοι την «τροφή» τους με πρώτες ύλες διοξείδιο του άνθρακα, νερό και φως, εκλύοντας οξυγόνο ως παράγωγο αυτής της διεργασίας. Η εμφάνιση του οξυγόνου στην ατμόσφαιρα (περίπου 2 δισεκατομμύρια χρόνια μετά το σχηματισμό της Γης) ήταν αποτέλεσμα της φωτοσύνθεσης θαλάσσιων οργανισμών και σήμανε την αρχή μιας μεγάλης ατμοσφαιρικής, γεωλογικής και βιολογικής εξέλιξης που έχει οδηγήσει στη σημερινή ατμόσφαιρα και γεωλογική εικόνα της Γης και την ποικιλία των μορφών ζωής που εξαρτώνται από το οξυγόνο. Το ατμοσφαιρικό οξυγόνο καταναλώνεται με την αναπνοή οργανισμών, την αποσύνθεση νεκρών οργανισμών κάτω από την επίδραση βακτηριδίων, την καύση οργανικών ουσιών (π.χ. πυρκαγιές δασών, καύση πετρελαίου) και διάφορες οξειδωτικές αντιδράσεις. Κατά συνέπεια, αν δεν ανανεωνόταν με τον ίδιο ρυθμό, η συγκέντρωσή

του στην ατμόσφαιρα θα μειωνόταν. Ευτυχώς νέες ποσότητες οξυγόνου δημιουργούνται από τις φωτοσυνθετικές αντιδράσεις των φυκιών στη θάλασσα και των φυτών στη στεριά.

Το όζον και η σημασία του στη ζωή

Σε μεγάλα ύψη (στα 20-100 χιλιόμετρα), υπό την επίδραση των ισχυρών υπεριώδων 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 χιλιομέτρων.

Είναι γνωστό ότι οι υψηλής ενέργειας υπεριώδεις ακτίνες προκαλούν βλάβες στο DNA των ζώντων 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. Πριν υπάρξει οξυγόνο (και κατά συνέπεια και όζον) στην ατμόσφαιρα, η ζωή στην ξηρά ήταν αδύνατη. Για το λόγο αυτό θεωρείται ότι οι πρώτες μορφές ζωής αναπτύχθηκαν στη θάλασσα, σε βάθος πάνω από 10 μέτρα, 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 οξειδία 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.

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· 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 και με το οξυγόνο, 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 στη χρήση 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 θερμοκηπίου, η οποία σύμφωνα με την αιτιοκρατική λογική θα επισύρει αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη και αλλαγές στο κλίμα. Το ερώτημα ποιες θα είναι αυτές οι αλλαγές είναι δύσκολο να απαντηθεί· αν και 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.

Το διοξείδιο του θείου και η όξινη βροχή

Μια άλλη ανθρωπογενής επίδραση στην ατμόσφαιρα έχει σχέση με το διοξείδιο του θείου (SO₂), το οποίο απελευθερώνεται με την καύση ορυκτών καυσίμων που περιέχουν θείο. Στη συνέχεια το SO₂ οξειδώνεται σε SO₃ το οποίο ενυδατώνεται σε θειικό οξύ (H₂SO₄) στις σταγόνες των νεφών, προκαλώντας οξύτητα μακριά από την κανονική (pH = 5.6). Ως συνέπεια, πραγματοποιείται όξινη βροχή κοντά σε βιομηχανικές περιοχές, η οποία οξειδώνει 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.

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, μια μεγάλης σημασίας λειτουργία για τα φυτά, 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 (Σχ. 2). 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 υποκειμένους 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.

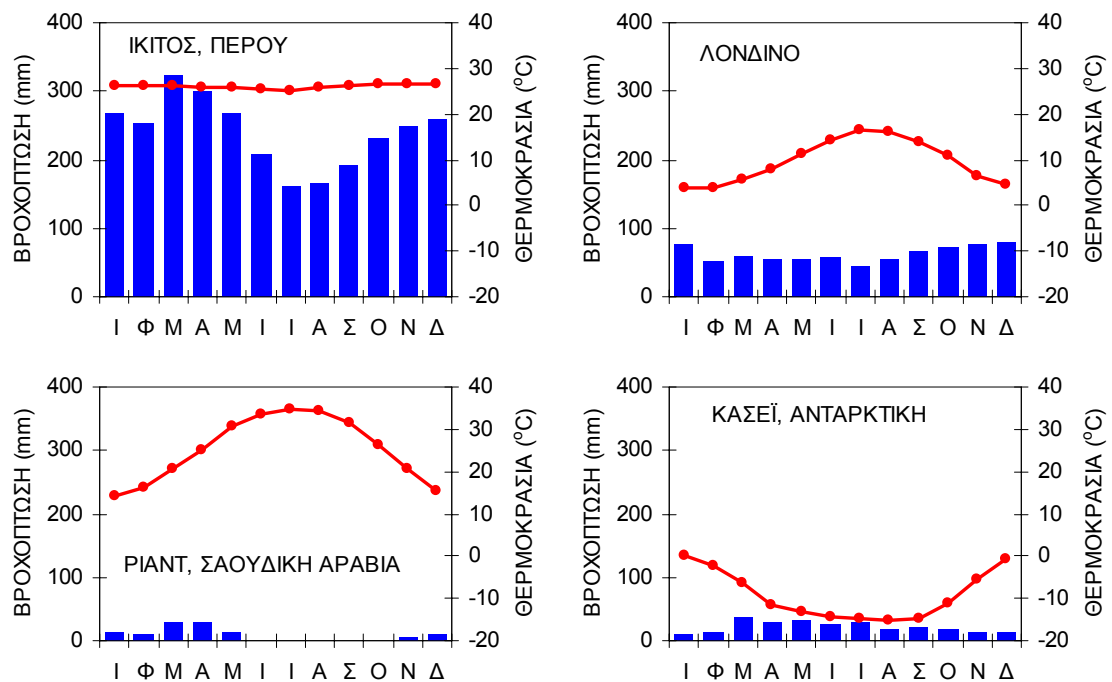


Σχ. 2 Τα σύννεφα, ανάλογα με τη μορφή και την κατακόρυφη ανάπτυξή τους κατατάσσονται σε διάφορους τύπους. Έτσι τα σύννεφα της φωτογραφίας είναι στρωματοσωρείτες (*stratocumulus*). Πηγή: Ahrens, C. D. (1993), *Essentials of Meteorology, An Invitation to the Atmosphere*, West Publishing, Minneapolis.

Το κλίμα και η αέναη 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. Ενδεικτικά διαγράμματα για χαρακτηριστικούς τύπους κλίματος δίνονται στο Σχ. 3.

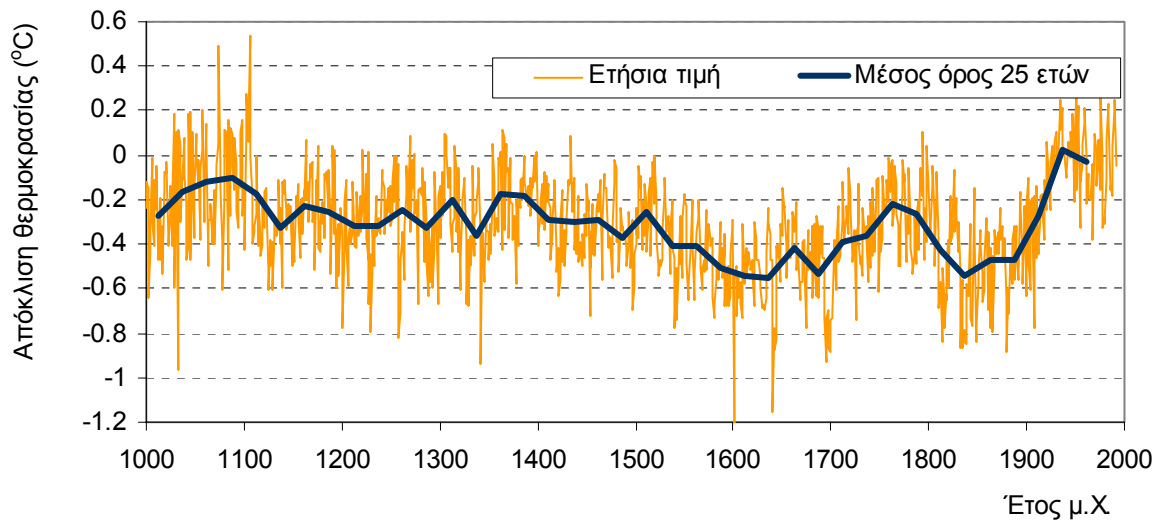
Η σημασία του κλίματος στη χλωρίδα και την πανίδα αλλά και τον άνθρωπο και τον πολιτισμό είναι σχεδόν προφανής. Οι αρχαιολόγοι, ανθρωπολόγοι και ιστορικοί έχουν διαπιστώσει τη σχέση του κλίματος με τη διανοητική και πνευματική ανάπτυξη του ανθρώπου και την ακμή και παρακμή των πολιτισμών.



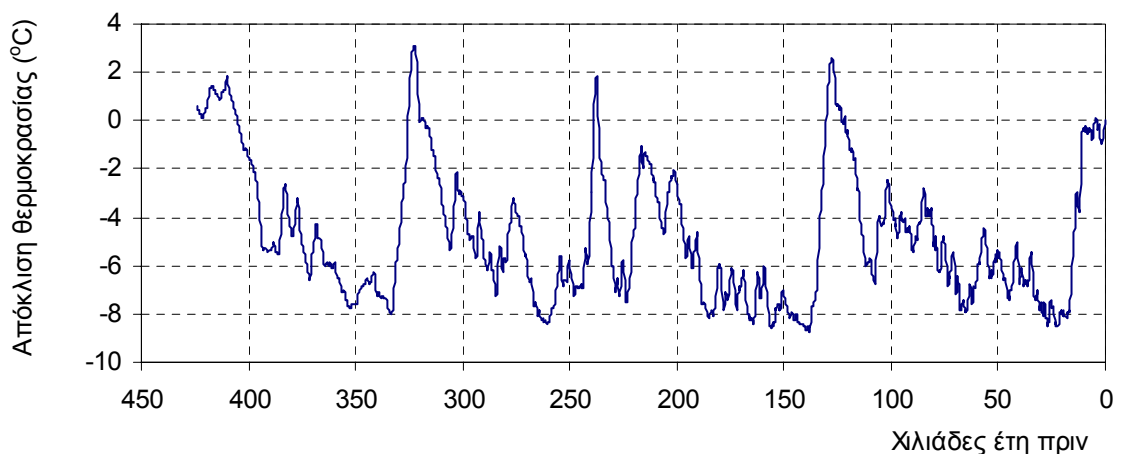
Σχ. 3 Τυπικά κλιματικά διαγράμματα που απεικονίζουν τα μέσα μεγέθη της θερμοκρασίας κάθε μήνα (κόκκινη γραμμή) και των κατακρημνισμάτων (μπλε ράβδοι) για χαρακτηριστικές κλιματικές περιοχές. Το Ικίτος που βρίσκεται κοντά στον ισημερινό και παρουσιάζει σταθερά υψηλές μηνιαίες θερμοκρασίες και βροχοπτώσεις είναι αντιπροσωπευτικό του τροπικού κλίματος. Το Λονδίνο με σταθερή βροχόπτωση σε όλους τους μήνες και μικρό θερμοκρασιακό εύρος (διαφορά θερινής και χειμερινής θερμοκρασίας) είναι χαρακτηριστικό ενός σχετικά ήπιου και υγρού κλίματος. Το Ριάντ με την ελάχιστη βροχόπτωση και τις πολύ υψηλές θερινές θερμοκρασίες είναι χαρακτηριστικό παράδειγμα ξηρού ερημικού κλίματος. Το Κάσεϊ της Ανταρκτικής με τα πολύ μικρά κατακρημνίσματα και τις εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες είναι αντιπροσωπευτικό του πολικού κλίματος.

Παρά όσα νομίζαμε παλιότερα, 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 το 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. Στο Σχ. 4 βλέπουμε ένα ανακατασκευασμένο δείγμα θερμοκρασίας της τελευταίας χιλιετίας. Είναι εμφανές ότι σήμερα οι θερμοκρασίες είναι υψηλές, αλλά ήταν επίσης υψηλές και τον 11^ο αιώνα, ενώ τον 16^ο-17^ο καθώς και τον 19^ο ήταν χαμηλές. Εξ άλλου, στο Σχ. 5 βλέπουμε ένα ανακατασκευασμένο δείγμα θερμοκρασίας των τελευταίων 420 000 ετών, όπως προέκυψε από τη μελέτη δειγμάτων πάγου στην Ανταρκτική. Και εδώ παρατηρούμε τις υψηλές τωρινές σημερινές θερμοκρασίες που διατηρούνται σε παρόμοια επίπεδα τα τελευταία 10 000 χρόνια. Σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας, περίπου 8°C, ξεκινά εδώ και 20 000 χρόνια και λήγει στα 10 000 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 ηφαιστείων, 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.



Σχ. 4 Ανακατασκευασμένο δείγμα θερμοκρασίας του Βόρειου Ημισφαιρίου (απόκλιση της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας από τη μέση τιμή των ετών 1960-90) για την τελευταία χιλιετία με βάση συνδυασμό διάφορων υποκατάστατων δεδομένων. Πηγή δεδομένων: Jones, P. D., et al. (1998), *High-resolution paleoclimatic records for the last millennium: interpretation, integration and comparison with General Circulation Model control-run temperatures*. *Holocene* 8(4), 455–471.

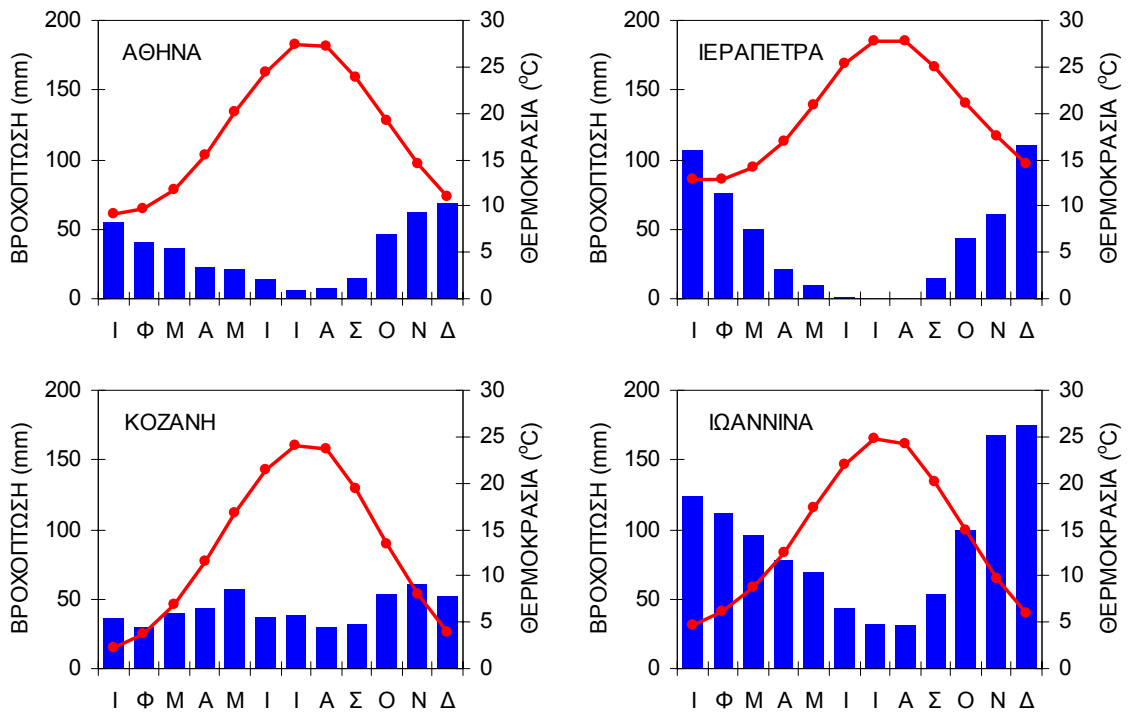


Σχ. 5 Ανακατασκευασμένο δείγμα θερμοκρασίας (απόκλιση της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας από τη σημερινή τιμή) για τα τελευταία 420 000 χρόνια με βάση αναλύσεις πυρήνα πάγου από το Βοστόκ στην Ανταρκτική. Πηγή δεδομένων: Petit, J.R., et al. (2001), *Vostok Ice Core Data for 420,000 Years*, IGBP PAGES/World Data Center for Paleoclimatology, NOAA/NGDC Paleoclimatology Program, Boulder CO, USA.

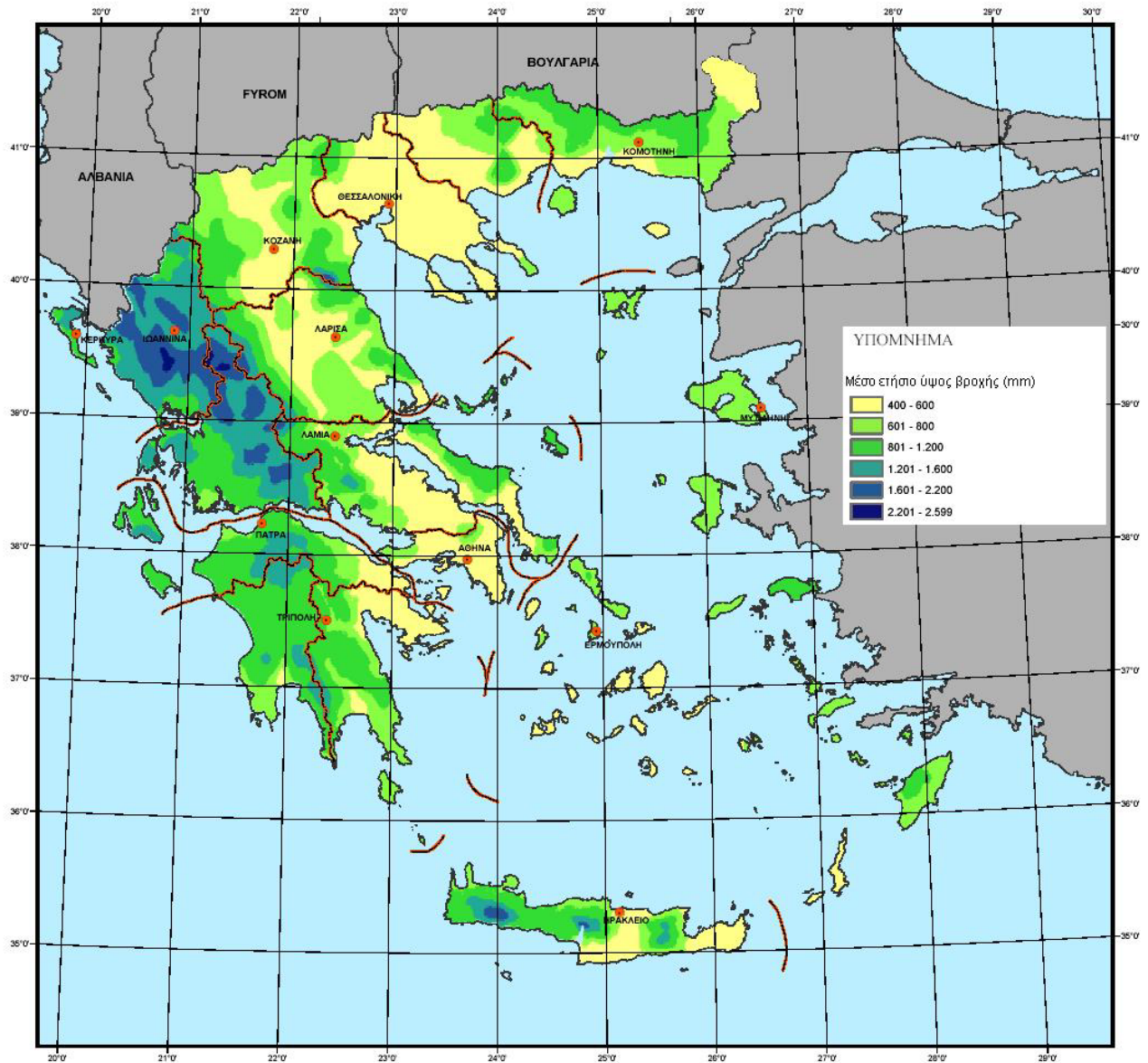
Το κλίμα στην Ελλάδα

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.

Μερικά χαρακτηριστικά κλιματικά διαγράμματα που δείχνουν την ποικιλία του κλίματος απεικονίζονται στο Σχ. 6. Η γεωγραφική κατανομή της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης φαίνεται στο Σχ. 7, όπου παρατηρούμε ότι η Δυτική Ελλάδα είναι πολύ πλουσιότερη σε βροχοπτώσεις από την Ανατολική. Έτσι, ενώ στην Ήπειρο η μέση ετήσια βροχόπτωση ξεπερνά τα 1200 χιλιοστά (τοπικά φτάνει ακόμη και τα 2000 χιλιοστά), στην Αττική και τις Κυκλάδες είναι κάτω από 400 χιλιοστά. 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 «ομβροσκιά» στην Ανατολική.



Σχ. 6 Κλιματικά διαγράμματα για πόλεις της Ελλάδας που παρουσιάζουν διαφορετικά κλιματικά χαρακτηριστικά, παρότι κατατάσσονται όλες στο ήπιο μεσογειακό κλίμα. Σε γενικές γραμμές οι θερμοκρασίες αυξάνονται προς στα νότια (Αθήνα, Ιεράπετρα) ενώ το θερμοκρασιακό εύρος (διαφορά θερινής και χειμερινής θερμοκρασίας) μεγαλώνει όσο απομακρυνόμαστε απ' τη θάλασσα (Κοζάνη, Ιωάννινα). Οι βροχοπτώσεις είναι υψηλές στη Δυτική Ελλάδα (Ιωάννινα) και πάντως μειώνονται πολύ το καλοκαίρι, με εξαίρεση όμως τους βόρειους και απομακρυσμένους απ' τη θάλασσα σταθμούς που μπορεί να εμφανίζουν σταθερή βροχόπτωση σε όλους τους μήνες (Κοζάνη).



Σχ. 7 Γεωγραφική κατανομή της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης στην Ελλάδα (σε χιλιοστά). Πηγή: ΥΠΑΝ, ΕΜΠ, ΙΓΜΕ, και ΚΕΠΕ, Σχέδιο προγράμματος διαχείρισης των υδατικών πόρων της χώρας, Συμπλήρωση της ταξινόμησης ποσοτικών και ποιοτικών παραμέτρων των υδατικών πόρων στα υδατικά διαμερίσματα της χώρας, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 549 σελίδες, Υπουργείο Ανάπτυξης, Αθήνα, 2003.