
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγικές έννοιες

1.1 Ορισμός, αντικείμενο και κλάδοι της υδρολογίας

Οι βιολογικές δομές της χλωρίδας και της πανίδας στον πλανήτη μας, προϋποθέτουν την αδιάλειπτη εξασφάλιση νερού σε κατάλληλη ποιότητα και ικανή ποσότητα. Με θαυμαστή πληρότητα, ο Πίνδαρος περιέγραψε με τρεις μόνο λέξεις την πρωταρχική σημασία του νερού στη βιόσφαιρα: “άριστον μεν ύδωρ”. Η κυρίαρχη φυσική λειτουργία της Γης που εξασφαλίζει το συνεχή εφοδιασμό της βιόσφαιρας με νερό είναι ο *υδρολογικός κύκλος*: η αέναη κίνηση του νερού ανάμεσα στους ωκεανούς, την ατμόσφαιρα και την ξηρά που συνοδεύεται και από αλλαγές ανάμεσα στην υγρή, την αέρια και τη στερεή φάση του (βλ. ενότητα 1.6). Η επιστήμη που ασχολείται με το όλο πλαίσιο της φυσικής κίνησης του νερού της Γης είναι η *υδρολογία**.

Κατά τη Διεθνή Υδρολογική Δεκαετία (1965-1974) που οργανώθηκε από τον Οργανισμό Ηνωμένων Εθνών, έγινε δεκτός ο ακόλουθος ορισμός της υδρολογίας: *Υδρολογία είναι η επιστήμη που ασχολείται με τα ύδατα της Γης, την παρουσία, την κυκλοφορία και κατανομή τους, τις φυσικές και χημικές ιδιότητές τους, και τις αλληλεπιδράσεις τους με το*

* Η ελληνική λέξη *υδρολογία* αποτελεί και τη διεθνή ονομασία της επιστήμης (π.χ. *hydrology* στην αγγλική, *hydrologie* στη γαλλική, *idrologia* στην ιταλική κτλ.)

περιβάλλον, στο οποίο περιλαμβάνονται και τα έμβια όντα. Το γνωστικό πεδίο της υδρολογίας καλύπτει την όλη ιστορία της παρουσίας του νερού στη Γη. Ο ορισμός αυτός προτάθηκε από μια Αμερικανική επιτροπή υπό τον W. Langbein (Ad Hoc Panel on Hydrology, 1962) και βασίζεται, με αρκετές διαφοροποιήσεις, σε παλιότερους ορισμούς των Horton (1931) και Meinzer (1942).

Ένα πρώτο συμπέρασμα από τον παραπάνω ορισμό είναι ότι η υδρολογία είναι μια γεωεπιστήμη (όπως είναι π.χ. η γεωλογία, η ωκεανογραφία, η επιστήμη της ατμόσφαιρας κτλ.) αφού ασχολείται με το νερό της Γης και όχι αφαιρετικά με το νερό ως ουσία ή ως ρευστό. Ένα δεύτερο συμπέρασμα είναι η ευρύτητα του περιεχόμενου της υδρολογίας, η οποία το επεκτείνει σε πολλές επιστημονικές περιοχές και το διασυνδέει με άλλες γεωεπιστήμες. Έτσι, η υδρολογία, παρόλο που είναι μια αυτόνομη επιστήμη, απαιτεί μια διεπιστημονική προσέγγιση του αντικειμένου της.

Αν και δεν προκύπτει σαφώς από τον παραπάνω ορισμό, παραδοσιακά η υδρολογία ασχολείται κυρίως με το φυσικό νερό στο χερσαίο τμήμα του πλανήτη, αφήνοντας στην ωκεανογραφία τη λεπτομερή μελέτη των νερών των ωκεανών και στις ατμοσφαιρικές επιστήμες την εστίαση στην κίνηση της αέριας φάσης του νερού. Πρόσφατα, η U.S. Committee on Opportunities in the Hydrological Sciences (1992) διατύπωσε την “προτίμηση” αυτή της υδρολογίας αποσαφηνίζοντας το γνωστικό πεδίο και τα όριά της ως διακριτής γεωεπιστήμης, σε σχέση με άλλες συγγενείς επιστήμες.* Αυτή την πιο πρόσφατη διατύπωση του περιεχομένου της υδρολογίας την έχουμε κωδικοποιήσει στον Πίν. 1.1, ο οποίος αποτυπώνει μια πιο σύγχρονη και σαφέστερη εκδοχή του ορισμού της.

* Η έμφαση της υδρολογίας (και ειδικότερα της τεχνικής υδρολογίας) στο χερσαίο τμήμα των υδρολογικού κύκλου είχε διατυπωθεί στην Ελλάδα και παλιότερα. Συγκεκριμένα, ο Ξανθόπουλος (1984) όρισε το αντικείμενο της τεχνικής υδρολογίας ως *τη μελέτη της κίνησης του ύδατος και των συνεπειών της από τη στιγμή που φτάνει στο έδαφος και τη χλωρίδα υπό μορφή ατμοσφαιρικού κατακρημνίσματος (βροχής, χιονιού, κτλ.) μέχρις ότου καταλήξει με επιφανειακή ή υπόγεια απορροή στους μεγάλους φυσικούς ή τεχνητούς ταμιευτήρες (θάλασσα, λίμνες, υπόγεια υδροφόρα στρώματα)*. Με τη διατύπωση της U.S. Committee on Opportunities in the Hydrological Sciences (1992) υπογραμμίζεται η μελέτη των χερσαίων υδρολογικών διεργασιών ως συστατικό στοιχείο του ορισμού της υδρολογίας ως συνόλου και όχι μόνο του κλάδου της τεχνικής υδρολογίας.

Πίν. 1.1 Διασάφηση του αντικειμένου της υδρολογίας (με βάση στοιχεία της U.S. Committee on Opportunities in the Hydrological Sciences, 1992).

Τομέας	Ανάλυση αντικειμένου	Περιλαμβάνει:	Δεν περιλαμβάνει
Υδατικό ισοζύγιο υδρογείου	Χωρική και χρονική μεταβλητότητα του υδατικού ισοζυγίου της υδρογείου (σε στερεή, υγρή και αέρια φάση, στη θάλασσα, την ξηρά και την ατμόσφαιρα)	Διαδρομές διακίνησης, διακινούμενες μάζες νερού και χρόνοι παραμονής, τόσο μεταξύ ωκεανών, ατμόσφαιρας και ηπείρων, όσο και μεταξύ των τριών φάσεων	Φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες εσωτερικές στην ατμόσφαιρα και τους ωκεανούς
Ηπειρωτικές (χερσαίες) υδρολογικές διεργασίες	Κίνηση του νερού πάνω και κάτω από την επιφάνεια της γης, σε όλες τις χωρικές και χρονικές κλίμακες, από την μικροκλίμακα μέχρι την κλίμακα ηπείρων	Φυσικές και χημικές διεργασίες που συνδέουν την κίνηση του νερού, καθώς και βιολογικές διεργασίες που αλληλεπιδρούν με αυτή την κίνηση (π.χ. διαπνοή φυτών, διάφορες ανθρώπινες δραστηριότητες)	Βιολογικές διεργασίες που απλώς εξαρτώνται από το νερό (π.χ. κύκλος ζωής υδρόβιων οργανισμών)

Η ευρύτητα του περιεχομένου της υδρολογίας έχει οδηγήσει στη διάκριση διάφορων κλάδων της με πιο περιορισμένο περιεχόμενο. Αν και η διάκριση αυτών των κλάδων δεν είναι μονοσήμαντη, ούτε ορισμένη με επάρκεια και γενική συμφωνία, θα επιχειρήσουμε να σκιαγραφήσουμε τις κύριες επιστημονικές υποπεριοχές της υδρολογίας, τα όρια και τις διασυνδέσεις τους.

Η συνηθέστερη διάκριση κλάδων της υδρολογίας βασίζεται στον τρόπο και το στόχο της προσέγγισης του αντικειμένου. Έτσι, ο κλάδος της υδρολογίας που έχει κύριο στόχο την *κατανόηση* των υδρολογικών διεργασιών, των φαινομένων που συνδέονται με αυτές, των νόμων που τις διέπουν και των μηχανισμών που τις κατευθύνουν είναι συχνά γνω-

στός με τον (όχι τόσο σαφή) όρο *υδρολογική επιστήμη* (hydrologic science). Ως συνώνυμος χρησιμοποιείται ο όρος *φυσική υδρολογία* (physical hydrology), ενώ πολύ κοντινός είναι και ο όρος *περιβαλλοντική υδρολογία* (environmental hydrology).

Σε αντιδιαστολή, ο κλάδος της υδρολογίας που έχει στόχο την *ποσοτική εκτίμηση και πρόγνωση* των υδρολογικών μεγεθών είναι γνωστός ως *τεχνική υδρολογία* (engineering hydrology), ενώ πρακτικά συνώνυμος είναι και ο όρος *εφαρμοσμένη υδρολογία* (applied hydrology). Η τεχνική υδρολογία για λόγους ιστορικούς και ουσιαστικούς, λόγω της τεχνολογικής προσέγγισης του αντικειμένου της, εντάσσεται στην *περιοχή των επιστημών του μηχανικού* και εστιάζεται στη μελέτη των χερσαίων υδρολογικών διεργασιών.* Η ανάπτυξη της τεχνικής υδρολογίας, ιστορικά υπαγορεύτηκε από τις ανάγκες σχεδιασμού των έργων ελέγχου της φυσικής υδρολογικής δίαιτας και είναι αυτή που καθιέρωσε στον αιώνα μας την υδρολογία ως σύγχρονη επιστήμη. Η φυσική υδρολογική δίαιτα ήταν πάντα ζωτικής σημασίας για τις ανθρώπινες δραστηριότητες και οι ευεργετικές ή καταστρεπτικές συνέπειές της ανάγκασαν τον άνθρωπο να της αφιερώσει, από τα βάθη της ιστορικής διαδρομής του μέχρι σήμερα το σπουδαιότερο ίσως μέρος της δημιουργικής του δουλειάς. Πράγματι, η *εξασφάλιση του πόσιμου και του αρδευτικού νερού* σε συνδυασμό με την *προστασία από τις πλημμύρες*, ήταν το κυρίαρχο μέλημα του ανθρώπου από την αυγή του πολιτισμού, ενώ και οι εξίσου σημαντικές φροντίδες της κατοχύρωσης μιας σίγουρης στέγης και της εξασφάλισης τροφής πάντα συνδυάζονται με τη διαθεσιμότητα του νερού. Απόδειξη, η εμφάνιση των πρώτων πολιτισμών στις παραποτάμιες περιοχές.

Σήμερα η τεχνική υδρολογία υποστηρίζει την ευρύτερη επιστημονική και τεχνολογική περιοχή της *τεχνολογίας και διαχείρισης υδροσυστημάτων* (hydrosystems engineering and management)†: πρόκειται για συστήματα που αποτελούνται από συνδυασμό *φυσικών υδάτινων σωμάτων* (ποταμών, λιμνών, υπόγειων υδροφορέων) και *υδραυλικών έργων*, δηλαδή τεχνικών έργων, συνήθως μεγάλης κλίμακας, που αποσκοπούν τόσο στην αξιοποίηση του νερού ως *φυσικού πόρου*, όσο και στην προ-

* Βλ. και υποσημείωση στη σ. 2.

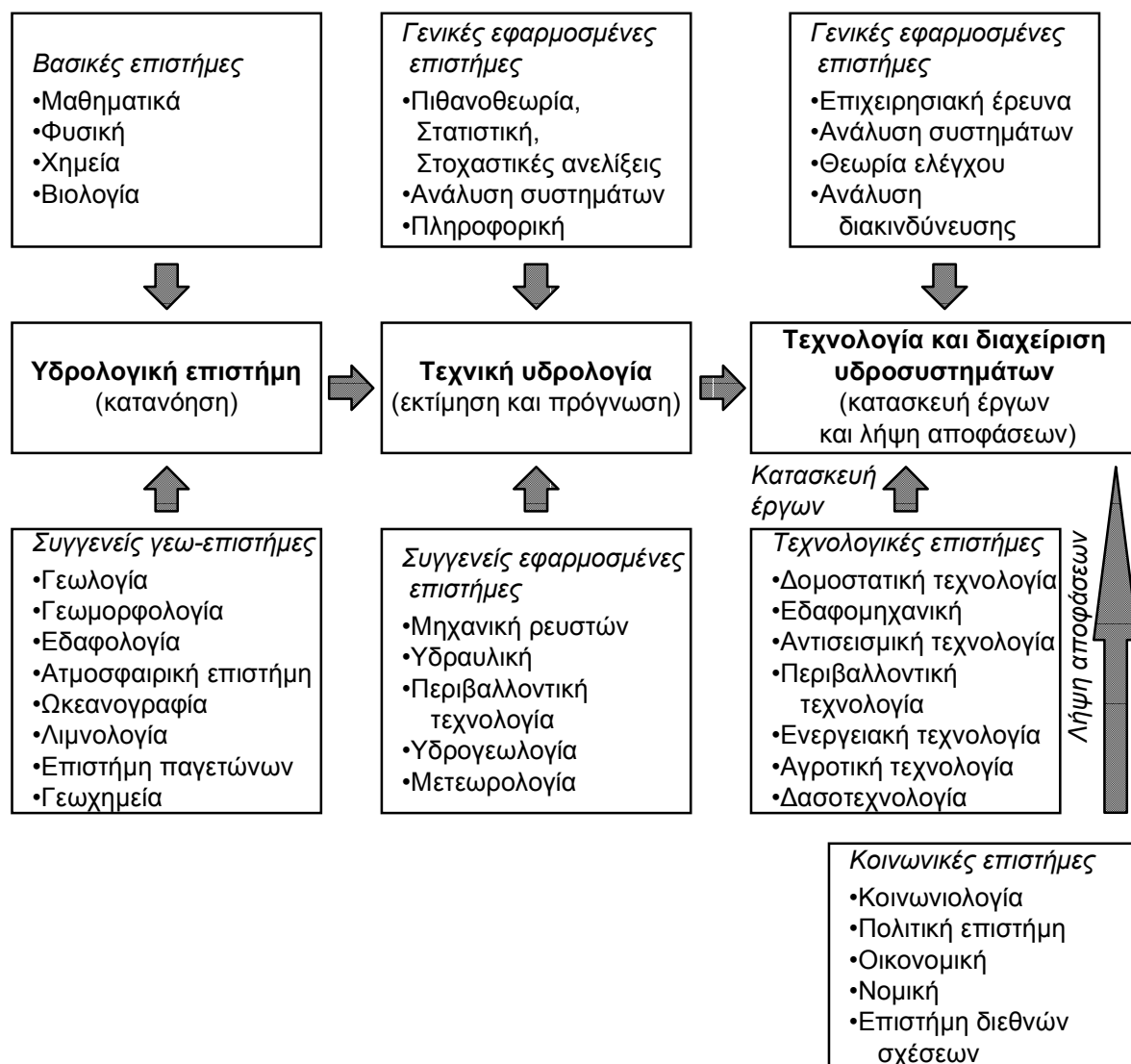
† Ο όρος *υδροσυστήματα* (hydrosystems) έχει εισαχθεί αρχικά από τον V. T. Chow γαι τη συλλογική περιγραφή τεχνικών περιοχών της υδρολογίας, της υδραυλικής και των υδατικών πόρων.

στασία από την καταστροφική δράση του νερού (πλημμύρες κτλ.) ως φυσικού κινδύνου. Στην πρώτη κατηγορία υδραυλικών έργων, δηλαδή των έργων *ανάπτυξης και αξιοποίησης των υδατικών πόρων* περιλαμβάνονται έργα για ύδρευση, άρδευση και παραγωγή ενέργειας, ενώ στη δεύτερη κατηγορία, δηλαδή των έργων *ελέγχου των υδρολογικών κινδύνων* περιλαμβάνονται έργα προστασίας από τις πλημμύρες και τη διάβρωση. Στην περιοχή της τεχνολογίας και διαχείρισης υδροσυστημάτων συμπεριλαμβάνονται τόσο ο σχεδιασμός και η κατασκευή των υδραυλικών έργων, όσο και η λειτουργία και διαχείριση των έργων αυτών (βλ. και ενότητες 1.3 και 1.4). Ειδικότερα, η *διαχείριση υδατικών πόρων*, που σήμερα έχει αποκτήσει ιδιαίτερη σπουδαιότητα διεθνώς, αποσκοπεί στο σχεδιασμό και υλοποίηση πολιτικών κατανομής των χρήσεων του νερού μέσω τεχνικών, νομικών, οικονομικών και πολιτικών μηχανισμών.

Είναι προφανές ότι η παραπάνω αντιδιαστολή υδρολογικής επιστήμης (ή φυσικής υδρολογίας) και τεχνικής υδρολογίας δεν έχει απόλυτο χαρακτήρα, αφού οι δύο αυτοί κλάδοι βρίσκονται σε στενή σχέση αλληλεπίδρασης και τα όριά τους είναι εγγενώς συγκεχυμένα. Η τεχνική υδρολογία, η οποία αποτελεί και το αντικείμενο αυτού του κειμένου, δεν μπορεί παρά να ενσωματώνει και να αξιοποιεί τις εξελίξεις στην κατανόηση των υδρολογικών φαινομένων, δίνει όμως έμφαση περισσότερο στην εφαρμογή παρά στη θεωρητική ανάλυση των υδρολογικών διεργασιών. Ωστόσο, συχνότατα η πράξη επιβάλλει την ανάγκη εξεύρεσης λύσεων, ακόμη και όταν η κατανόηση των φαινομένων είναι ελλιπής. Με αυτή την έννοια η τεχνική υδρολογία δεν προϋποθέτει, ούτε επιζητεί την πλήρη κατανόηση των φαινομένων αλλά διαθέτει ένα βαθμό αυτονομίας στην πορεία της για την ικανοποίηση των συγκεκριμένων αναγκών της πράξης.

Ένας δεύτερος τρόπος διάκρισης κλάδων ή ενοτήτων της υδρολογίας στηρίζεται στην εξειδίκευση του χώρου στον οποίο συμβαίνουν τα υδρολογικά φαινόμενα. Έτσι, διακρίνουμε δύο βασικές ενότητες της υδρολογίας, την *επιφανειακή υδρολογία* (surface hydrology) που ασχολείται με τα επιφανειακά νερά και την *υπόγεια υδρολογία* (subsurface or groundwater hydrology) που ασχολείται με τα υπόγεια νερά. Η σκοπιμότητα αυτής της διάκρισης βρίσκεται στις έντονες διαφορές της κινητικής και δυναμικής συμπεριφοράς των επιφανειακών και υπόγειων νερών. Πράγματι, η όλη κινητική συμπεριφορά του νερού, από την είσοδό του στο έδαφος (διήθηση) μέχρι τη φυσική ή τεχνητή επανεμφάνισή του σε

κάποια άλλη εδαφική επιφάνεια (πηγή, γεώτρηση), χαρακτηρίζεται από την ηπιότητα των γραμμικών ή σχεδόν γραμμικών, σχέσεων παροχής-ενεργειακών απωλειών και από τη φυσική ρύθμιση που προσφέρει η “δεξαμενή-έδαφος”, απαλύνοντας τις έντονες χρονικές διακυμάνσεις των παροχών εισόδου. Ακόμη, στην ευρύτερη περιοχή της υδρολογίας βρίσκεται η *υδρομετεωρολογία* (hydrometeorology), η οποία ασχολείται με το νερό της ατμόσφαιρας δίνοντας έμφαση στα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα (βροχή, χιόνι, χαλάζι) και την εξατμοδιαπνοή, και αποτελώντας κάποιο είδος συγκερασμού υδρολογίας και μετεωρολογίας.



Σχ. 1.1 Υδρολογική επιστήμη και τεχνική υδρολογία: σχηματική παράσταση της ένταξης τους στο ευρύτερο πλαίσιο των γεωεπιστημών και επιστημών του μηχανικού, και σχέση τους με την τεχνολογία και διαχείριση υδροσυστημάτων.

Ένας τελευταίος τρόπος διάκρισης επιστημονικών κλάδων της υδρολογίας στηρίζεται στη μεθοδολογική προτίμηση της ακολουθούμενης προσέγγισης. Έτσι έχουμε τη *στατιστική υδρολογία* (statistical hydrology) η οποία αξιοποιεί μεθόδους της θεωρίας πιθανοτήτων και στατιστικής προκειμένου να οδηγηθεί σε ποσοτική εκτίμηση και πρόγνωση μεγεθών. Διακρίνουμε ακόμη τη *στοχαστική* (ή *επιχειρησιακή*) *υδρολογία* (stochastic or operational hydrology), η οποία αξιοποιεί μεθόδους της θεωρίας στοχαστικών ανελίξεων προκειμένου να προσομοιώσει μαθηματικά χρονική την εξέλιξη των υδρολογικών μεταβλητών και τη συμπεριφορά σύνθετων υδροσυστημάτων. Και οι δύο αυτοί κλάδοι εντάσσονται στην τεχνική υδρολογία και αποσκοπούν κυρίως στην εξυπηρέτηση αναγκών της τεχνολογίας και διαχείρισης υδροσυστημάτων.

Όπως προαναφέραμε, η υδρολογία ακολουθεί εκ των πραγμάτων διεπιστημονική προσέγγιση του περιεχομένου της και γι' αυτό είναι στενά συνδεδεμένη με άλλες επιστήμες. Στο Σχ. 1.1 απεικονίζεται (με απλουστευμένο τρόπο) η διασύνδεση της ακολουθίας *υδρολογική επιστήμη - τεχνική υδρολογία - τεχνολογία και διαχείριση υδροσυστημάτων*, με τις άλλες γεωεπιστήμες, τις εφαρμοσμένες επιστήμες και τις επιστήμες του μηχανικού.

Ανάμεσα στις διάφορες διασυνδέσεις του Σχ. 1.1, τονίζουμε τις ειδικές σχέσεις της τεχνικής υδρολογίας με την πιθανοθεωρία, τη στατιστική και τη θεωρία στοχαστικών ανελίξεων (για τις οποίες η τεχνική υδρολογία αποτελεί ιδεώδες πεδίο εφαρμογών και έρευνας), και με την πληροφορική. Ο τυχαίος χαρακτήρας των υδρολογικών διεργασιών (βλ. ενότητα 1.8) και οι σημαντικές αβεβαιότητες που αυτός συνεπάγεται οδήγησε στο πάντρεμα της υδρολογίας με την πιθανοθεωρία, τη στατιστική και τη θεωρία στοχαστικών ανελίξεων, με αποτέλεσμα τη δημιουργία αυτόνομων σχετικών κλάδων της τεχνικής υδρολογίας (στατιστική υδρολογία, στοχαστική υδρολογία). Ιστορικά, η σχέση αυτή έχει εγκαθιδρυθεί από τις αρχές του αιώνα και έχει συνδεθεί με την καθιέρωση της υδρολογίας ως σύγχρονης αυτόνομης επιστήμης. Η σχέση της τεχνικής υδρολογίας με την πληροφορική, είναι πιο πρόσφατη και έχει υπαγορευτεί από δύο λόγους. Ο πρώτος λόγος αφορά στον μεγάλο όγκο υδρολογικής πληροφορίας (μετρήσεων υδρολογικών μεταβλητών· βλ. ενότητα 1.9) που χρησιμοποιεί η τεχνική υδρολογία, η διαχείριση της οποίας απαιτεί τη χρήση προηγμένων μεθόδων πληροφορικής. Ο δεύτερος λόγος αφορά

στα πολύπλοκα υπολογιστικά μοντέλα της υδρολογίας που αναπαριστούν μαθηματικά τη συμπεριφορά πολυσύνθετων υδροσυστημάτων, η ανάπτυξη των οποίων έγινε δυνατή χάρη στη χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών.

1.2 Σύντομο ιστορικό

Το ιστορικό της υδρολογίας στην περιοχή των επιστημών του μηχανικού είναι τόσο απέραντο, ώστε μόνο προσφεύγοντας σε γενικές μεθοδολογίες κατάταξης των θετικών επιστημών μπορεί να χωριστεί σε ενδεικτικές περιόδους και να σκιαγραφηθεί. Επισημαίνεται πάντως ότι ακολουθήθηκαν δύο διαφορετικοί δρόμοι κατά την μακριά πορεία της μελέτης των φαινομένων της τεχνικής υδρολογίας. Ο πρώτος μπορεί να ονομαστεί *θεωρητικός* και αναζητεί την απεικόνιση της υπάρχουσας γνώσης μέσα από ένα σύνολο γενικών αρχών, δηλαδή με τη βοήθεια μιας *θεωρίας*. Ο δεύτερος χαρακτηρίζεται ως *εμπειρικός* και προσπαθεί να αυξήσει τις πρακτικές γνώσεις για τα υδρολογικά φαινόμενα, αναπτύσσοντας τα εργαλεία που πολλαπλασιάζουν και βελτιώνουν τις σχετικές πληροφορίες και την επεξεργασία τους. Όσες φορές, στην περίοδο της ιστορίας της υδρολογίας (αλλά και των άλλων επιστημών) οι δύο αυτοί δρόμοι προσέγγισαν, τα αποτελέσματα ήταν εντυπωσιακά. Η ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστικών μέσων βοήθησε αποφασιστικά την ένωση των δύο αυτών δρόμων την τελευταία 30ετία.

Σήμερα φαίνεται σχεδόν αυτονόητο ότι η κατανόηση των φαινομένων, είτε μέσω του θεωρητικού, είτε μέσω του εμπειρικού δρόμου, είναι απαραίτητη προϋπόθεση για τις πρακτικές εφαρμογές. Ωστόσο, η ιστορία ακολούθησε την ακριβώς αντίθετη διαδρομή: πρώτα γίνεται η εμπειρική εφαρμογή, με την κατασκευή αρδευτικών έργων, υδραγωγείων κτλ., που ξεκινά ήδη από την 6η χιλιετία π.Χ. και ακολουθεί πολύ αργότερα η κατανόηση και η επιστημονική συγκρότηση των γνώσεων.

Το σύντομο ιστορικό που ακολουθεί απλώς σκιαγραφεί τους σημαντικότερους σταθμούς στην ανάπτυξη της υδρολογίας. Ο αναγνώστης που ενδιαφέρεται για περισσότερα στοιχεία παραπέμπεται μεταξύ άλλων στους Meinzer (1942), Jones et al. (1963), Biswas (1967), UNESCO (1974) και U.S. Committee on Opportunities in the Hydrological Sciences (1992). Μερικά στοιχεία για τη σύνταξη του ιστορικού έχουν

ληφθεί και από τους Ξανθόπουλο (1984), Chow et al. (1988), Ward and Robinson (1989) και Maidment (1993).

1.2.1 Προορθολογιστική Περίοδος (ως το 1400 μ.Χ.)

Η αξία μιας επιστημονικής περιοχής του μηχανικού κρίνεται από τη χρησιμότητα των πρακτικών εφαρμογών της. Η γνώση των φαινομένων της τεχνικής υδρολογίας αποτελεί την απαραίτητη προϋπόθεση για την καλή λειτουργία των υδραυλικών έργων, υδρευτικών, αρδευτικών και ενεργειακών. Τα επιτυχημένα υδραυλικά έργα είναι αρχαία όσο και οι πρώτοι οργανωμένοι ανθρώπινοι πολιτισμοί (βλ και ενότητα 1.3): πράγματι, από την προϊστορική ακόμη εποχή (ίσως από την 6η χιλιετία π.Χ.), σύστημα διωρύγων άρδευε με νερό των ποταμών Τίγρη και Ευφράτη, αλλά και με γόνιμα φερτά υλικά, τις πεδιάδες της Μεσοποταμίας, οι πόλεις της οποίας προστατεύονταν από τις πλημμύρες με χωμάτινα αναχώματα. Είναι εντυπωσιακό ότι οι Σουμέριοι, που ο πολιτισμός τους ξεκινά περί το 4000 π.Χ., κατασκεύασαν, μεταξύ άλλων αρδευτικών έργων, τη μεγάλη αρδευτική διώρυγα Ναχρουάν, μήκους 320 km και πλάτους 120 m, η οποία τροφοδοτούσε μικρότερες διώρυγες, και ανακάλυψαν επίσης τον υδροτροχό (U.S. Committee on Opportunities in the Hydrological Sciences, 1992, σ. 21). Ανάλογα συστήματα διωρύγων κατασκευάστηκαν και από τους Αιγύπτιους, οι οποίοι μάλιστα έκτισαν και ένα φράγμα στο Νείλο περί το 4000 π.Χ. (Viessman et al., 1989, σ. 4), και διαδόθηκαν στη Συρία, την Κύπρο και την Κρήτη. Στην Κίνα, τεράστια έργα διευθέτησης ποταμών ολοκληρώθηκαν και λειτούργησαν σχεδόν συνεχώς επί 1700 χρόνια. Στην Περσία και τις Ινδίες κατασκευάστηκαν μεγάλα δίκτυα από αρδευτικές διώρυγες. Κατά συνέπεια υπήρχαν δοκιμασμένες πρακτικές εμπειρίες υδρολογίας, σε όλους τους ιστορικά βεβαιωμένους αρχαίους πολιτισμούς.

Ωστόσο, η πρώτη οργανωμένη θεωρητικά προσέγγιση των φαινομένων της υδρολογίας, μετεωρολογίας και υδραυλικής, μέσα από τον αφηρημένο στοχασμό που συνδυάζεται με την παρατήρηση, παρουσιάστηκε από τους έλληνες διανοητές και διασώθηκε σε γραπτά φιλοσοφικά και επιστημονικά κείμενα. Έτσι, για τον Θαλή το Μιλήσιο* και τους κατοπι-

* Γενάρχης της σχολής των Ιώνων φιλοσόφων και της ρασιοναλιστικής κοσμοερμηνείας (640-546 π.Χ.). Κατά μία παράδοση που μεταφέρεται από τον Ηρό-

νούς Ίωνες φυσικούς φιλοσόφους, το “ύδωρ” είναι η πρωταρχική ουσία του κόσμου*. Ο Αναξιμένης† μελέτησε με εξαιρετική επινοητικότητα και αγγίχοντα 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 (Γεωργούλης, 1957β). Ο Ίππων** αποδέχεται τη θεωρία του Θαλή για το ύδωρ ως πρωταρχικό στοιχείο, ανάγει την υγρασία σε πηγή της ζωής και την ξηρασία σε εχθρό της, ενώ αναγνωρίζει ότι όλα τα νερά έχουν πηγή τη θάλασσα (Θεοδωρίδης, 1954, σσ. 36-41). Ο σύγχρονός του Αναξαγόρας ο Κλαζομένιος††, που 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’

δοτο (Ιστορία, Βιβλίο Πρώτο, Κλειώ, 75) ο Θαλής φέρεται και ως υδραυλικός μηχανικός, αφού κατάφερε να εκτρέψει τον ποταμό Άλη για να βοηθήσει την προέλαση των στρατευμάτων του Κροίσου (βασιλιά των Λυδών) κατά του Κύρου (βασιλιά των Περσών).

* Κανένα έργο του Θαλή δεν διασώθηκε αλλά υπάρχουν μαρτυρίες γι’ αυτόν από άλλους αρχαίους συγγραφείς. Έτσι, από τον Πλούταρχο (Sol. 2) μαθαίνουμε ότι κατά τον Θαλή “ύδωρ αρχήν απάντων και γένεσιν τίθεσθαι” (το νερό είναι αρχή και καταγωγή όλων των πραγμάτων). Ένα σχετικό απόσπασμα από το έργο του Θαλή *Περί αρχών* διασώθηκε από το Γαληνό (Galen. in Hipp de hum. I 1 [XVI 37 K]): “τα μεν ουν πολυθρύλητα τέτταρα, ών το πρώτον είναι ύδωρ φαμέν και ωσανεί μόνον στοιχείον τίθεμεν” (όσο για τα περίφημα τέσσερα στοιχεία – νερό, αέρας, χώμα, φωτιά – για αυτά λέμε ότι το πρώτο είναι το νερό, το οποίο θέτουμε κατά κάποιο τρόπο ως μοναδικό στοιχείο).

† Τρίτος και τελευταίος στη σειρά των Μιλησίων φιλοσόφων, μετά το Θαλή και τον Αναξίμανδρο (585-525 π.Χ.).

‡ “Χάλαζαν δε γίγνεσθαι όταν από των νεφών το ύδωρ καταφερόμενον παγή· χιόνα δε όταν αυτά ταύτα ενυγρότερα πήξιν λάβη” (Το χαλάζι παράγεται όταν το νερό, το οποίο φέρεται προς τα κάτω από τα νέφη, παγώσει· το χιόνι όταν τα ίδια τα σύννεφα, έχοντας μεγαλύτερη υγρασία, παγώσουν).

§ Οι άνεμοι προκαλούνται “όταν εκπεπυκνωμένος ο αήρ αραιωθείς φέρεται” (όταν ο αέρας, έχοντας χάσει την πυκνότητά του, γίνεται αραιός και τίθεται σε κίνηση”.

** Σάμιος ή Μεταποντίνος φιλόσοφος, οπαδός του Πυθαγορικού συλλόγου, σύγχρονος του Περικλή (5ος αιώνας π.Χ.).

†† Φιλόσοφος που έζησε στην Αθήνα (500-428 π.Χ.).

όπου πέφτει ως βροχή, στη συνέχεια συλλέγεται σε υπόγεια κοιλάματα και τροφοδοτεί τη ροή των ποταμών (Γεωργούλης, 1957α· Chow et al., 1988). 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 υψώνεται προς το βόρειο πόλο και αφήνει κενά τα οποία προκαλούν ρεύματα αέρα. Μελέτησε επίσης τις πλημμύρες του Νείλου, αποδίδοντάς τες στην τήξη του χιονιού της Αιθιοπίας (Γεωργούλης, 1957α). Με το “αίνιγμα” των πλημμυρών του Νείλου (οι οποίες, σε αντίθεση με την τυπική δίαιτα των μεσογειακών ποταμών, παρατηρούνται το καλοκαίρι) ασχολήθηκε διεξοδικά και ο Ηρόδοτος‡, ο οποίος φαίνεται να έχει σαφή γνώση του υδρολογικού κύκλου και των μηχανισμών του.

Ο Αριστοτέλης§ 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

* Κατά μία εκδοχή για τη φυλάκισή του το 430 π.Χ. ευθύνεται η θεωρία του για τους κεραυνούς, που πολεμούσε τη δοξασία του εξακοντισμού τους από το Δία.

† “ίριν δε καλέομεν το εν τήσι νεφέλησιν αντιλάμπον τω ηλίω” (ίριδα καλούμε την αντανάκλαση της λάμψης του ηλιακού φωτός που προσπίπτει στα νέφη).

‡ Διάσημος ιστορικός από την Αλικαρνασσό, 480-430 π.Χ. Το θέμα των πλημμυρών του Νείλου το θίγει στο δεύτερο βιβλίο της *Ιστορίας* του (Ευτέρπη, 19-30).

§ Διάσημος φιλόσοφος από τα Στάγειρα, μαθητής του Πλάτωνα, παιδαγωγός του Μεγάλου Αλεξάνδρου και συγγραφέας πολλών έργων (384-323 π.Χ.).

** “η γαρ ατμής ύδατος διάκρισις εστιν” (Μετεωρολογικά, 340b 3).

†† “έτι δ’ η υπό του ηλίου αναγωγή του υγρού ομοία τοις θερμαινομένης εστίν ύδασιν υπό πυρός” (Εξ άλλου, η αναρρόφηση της υγρασίας από τον ήλιο είναι παρόμοια με αυτό που συμβαίνει όταν το νερό θερμανθεί από τη φωτιά) (ό.π. 355a 15).

‡‡ “... συνίσταται πάλιν η ατμής ψυχομένη διά τε την απόλειπιν του θερμού και τον τόπον, και γίγνεται ύδωρ εξ αέρος· γενόμενον δε πάλιν φέρεται προς την γην. έστι δ’ η μεν ύδατος αναθυμίασις ατμής, η δ’ εξ αέρος εις ύδωρ νέφος”. (Ο υδρατμός που ψύχεται από την έλλειψη θερμότητας στην περιοχή που βρίσκεται, συμπυκνώνεται πάλι και από αέρας γίνεται νερό· και αφού σχηματιστεί κατ’

αρχή της διατήρησης της μάζας του νερού στον υδρολογικό κύκλο*. Ο 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[§] έδωσε φυσικές εξηγήσεις των μετεωρολογικών φαινομένων, στα πρότυπα των Ιώνων φιλοσόφων**, αντικρούοντας τις δεισιδαιμονίες της εποχής. Ο Αρχιμήδης^{††} έθεσε τις βάσεις της υδροστατικής με τη φερώνυμη αρχή. Σημαντική συμβολή στην υδροστατική αλλά και στην υδροδυναμική έκανε ο Ήρων ο Αλεξανδρεύς^{‡‡} που θεωρείται ως ο πρώτος που διατύπωσε την έννοια της παροχής και έκανε υδρομετρήσεις (U.S. Committee on Opportunities in the Hydrological Sciences, 1992, σ. 37).

αυτόν τον τρόπο αυτό φέρεται πάλι προς τη γη. Η αναθυμίαση από το νερό είναι ο υδρατμός και η συμπύκνωσή του σε νερό το νέφος.) (ό.π. 346b 30).

* “ώστε [την θάλατταν] ουδέποτε ξηραίνεται· πάλιν γαρ εκείνο φθήσεται καταβάν το προανελθόν.” (Επομένως η θάλασσα δεν θα ξεραθεί ποτέ, επειδή το νερό που ανέρχεται θα επιστρέφει πάλι σ’ αυτή) (ό.π. 356b 26). Επίσης: “καν μη κατ’ ενιαυτόν αποδιδώ και καθ’ εκάστην ομοίως χώραν, αλλ’ εν γε τισιν τεταγμένοις χρονις αποδίδωσι παν το ληφθέν” (έστω και αν δεν αναπληρώνεται η ίδια ποσότητα νερού κάθε χρόνο και σε κάθε περιοχή, ωστόσο η ποσότητα που αφαιρέθηκε αποδίδεται ολόκληρη μέσα σε μια ορισμένη χρονική περίοδο) (ό.π. 355a 26).

[†] Μαθητής και διάδοχος του Αριστοτέλη (372-287 π.Χ.).

[‡] Βλ. και την ανάλυση του Brutsaert (1982, σ. 16).

[§] Αθηναίος φιλόσοφος, ιδρυτής της φερώνυμης σχολής (341-270 π.Χ.).

** Στη Β’ επιστολή του προς Πυθοκλέα εξηγεί τη δημιουργία των νεφών και της βροχής: “Τα σύννεφα μπορούν να σχηματίζονται και να μαζεύονται είτε από τη συμπύκνωση του αέρα με την πίεση των ανέμων, είτε από τις περιπλοκές ατόμων, που είναι κατάλληλα γι’ αυτό, είτε από τη συγκέντρωση των ατμών που ανεβαίνουν από τη στεριά και τα νερά. Επίσης είναι δυνατό να σχηματίζονται με πολλούς άλλους τρόπους. Με την πίεση ανάμεσά τους ή κάτι παρόμοιο εξηγείται η βροχή, που σε ορισμένες περιπτώσεις είναι δυνατή.” Στο ίδιο κείμενο δίνει εξηγήσεις για τις αστραπές και βροντές, καθώς και την καθυστέρηση του ηχητικού αισθήματος της αστραπής σε σχέση με το οπτικό (Θεοδωρίδης, 1954, σσ. 320-321).

^{††} Ο μεγαλύτερος μαθηματικός της αρχαιότητας, Συρρακούσιος (287-212 π.Χ.).

^{‡‡} Φυσικός, μαθηματικός και μηχανικός (1ος αιώνας π.Χ. και κατ’ άλλους 1ος αιώνας μ.Χ.).

Οι ιδέες των ελλήνων φιλοσόφων μεταλαμπαδεύτηκαν στη συνέχεια στη Ρώμη. Έτσι, στο ίδιο πνεύμα με τον Επίκουρο κινήθηκε και ο επικούρειος Λουκρήτιος*, ενώ αναφορές στον υδρολογικό κύκλο κάνουν οι Βιτρούβιος†, Σενέκας‡ και Πλίνιος§. Αν και στο θεωρητικό επίπεδο οι ρωμαίοι δεν έχουν να επιδείξουν σημαντική πρόοδο, είναι γνωστή η μεγάλη συμβολή τους στο τεχνολογικό επίπεδο με την κατασκευή των περίφημων ρωμαϊκών υδραγωγείων.

Αλλά και για τους άλλους αρχαίους πολιτισμούς υπάρχουν μαρτυρίες ενασχόλησης με υδρολογικά θέματα, χωρίς όμως τη θεωρητική εμβάθυνση των ελλήνων. Έτσι, οι πρώτες μετρήσεις κατακρημνισμάτων θεωρείται ότι έγιναν στην Ινδία τον 4ο αιώνα π.Χ. από τον Kautilia (U.S. Committee on Opportunities in the Hydrological Sciences, 1992, σ. 37), ενώ κατ' άλλους έγιναν πολύ νωρίτερα (το 10ο αιώνα π.Χ.) στην Κίνα (Chow et al., 1988, σ. 14). Ακόμη νωρίτερα, περί το 1800 π.Χ. έγιναν μετρήσεις της στάθμης του Νείλου στο δεύτερο καταρράκτη, η σκοπιμότητά τους όμως συνδέεται με θρησκευτικούς λόγους παρά με τεχνικούς ή επιστημονικούς. Συστηματικές μετρήσεις της στάθμης του Νείλου ξεκίνησαν τον πρώτο αιώνα μ.Χ. από τους Ρωμαίους**. Σε ότι αφορά στην προσέγγιση της έννοιας του υδρολογικού κύκλου από τους ασιατικούς πολιτισμούς, σπέρματά της φαίνεται να υπήρχαν, περί τα μέσα της πρώτης χιλιετίας π.Χ. ή και νωρίτερα, στους πολιτισμούς της Κίνας, Ινδίας,

* Ρωμαίος ποιητής και φιλοσοφος (96-55 π.Χ.).

† Ρωμαίος αρχιτέκονας και μηχανικός (88-26 π.Χ.). Επηρεασμένος από το Θεόφραστο, τον οποίο μελέτησε, γράφει στον 8ο τόμο της πραγματείας του *De Architectura Libri Decem* (που αποτέλεσε εγχειρίδιο των μηχανικών του Μεσαίωνα) ότι η βροχή και το χιόνι που πέφτουν στις ορεινές περιοχές διηθούνται μέσω της επιφάνειας της γης και αργότερα εμφανίζονται στις πιο κατάντη περιοχές ως πηγές και υδατορεύματα (Chow et al., 1988, σ. 14· Viessman et al., 1989, σ. 4).

‡ Ρωμαίος πολιτικός και στωικός φιλόσοφος (2-66 μ.Χ.).

§ Ρωμαίος φυσιοδίφης, συγγραφέας της *Historia Naturalis*, μιας συλλογής γνώσεων της εποχής (23-79 μ.Χ.).

** Τις μετρήσεις αυτές επεξεργάστηκε ο Πλίνιος, συνδέοντάς τες με την γεωργική ευφορία, τους λιμούς (από λειψυδρία) και τις καταστροφές (από πλημμύρες) στην πεδιάδα του Νείλου (Dooge, 1988).

Περσίας (UNESCO, 1974· Chow et al., 1988) και τον Εβραϊκό*. Τα σπέρματα αυτά βρίσκονται σε γραπτά κείμενα αλλά πάντως υπό μορφή ποιητικού λόγου και όχι συγκροτημένου θεωρητικού και επιστημονικού λόγου†.

1.2.2 Περίοδος μετρήσεων και πειραματισμών (1400-1850)

Μετά την περίοδο του Μεσαίωνα, η Αναγέννηση οδήγησε πάλι τις επιστήμες στον ορθολογικό δρόμο της παρατήρησης. Τα ερευνητικά πνεύματα της εποχής άρχισαν να αναλύουν και να κατανοούν ορισμένες φάσεις του υδρολογικού κύκλου. Ο διάσημος Leonardo da Vinci‡ έκανε συστηματικές μελέτες της κατανομής της ταχύτητας σε διατομές υδατορευμάτων, χρησιμοποιώντας μια ράβδο που επέπλεε με τη βοήθεια ενός πλωτήρα, ενώ διατηρούνταν σε κατακόρυφη θέση με τη βοήθεια ενός αντιβάρου.§ Ο Bernard Palissy** έδειξε ότι οι ποταμοί και οι πηγές έχουν την αφετηρία τους στη βροχή.

Αλλά η ορθολογική αντίληψη για τον υδρολογικό κύκλο δεν καθιερώθηκε στους νεότερους χρόνους παρά στο τέλος του 17ου με τις μελέτες των Pierre Perrault††, Edmé Mariotte‡‡ και Edmund Halley§§, παρόλο που, όπως είδαμε, την αντίληψη αυτή είχαν εισαγάγει και ενστερνιστεί

* Αυτό προκύπτει από μια, μάλλον ποιητική, αναφορά στον Εκκλησιαστή 1:7, ότι τα ποτάμια καταλήγουν στη θάλασσα, απ' όπου και προέρχονται (βλ. και UNESCO, 1974· Digman, 1994, σ. 4).

† Παρόμοια σπέρματα εμφανίζονται άλλωστε και στον Όμηρο.

‡ Ιταλός ζωγράφος, χαράκτης, γλύπτης, ποιητής, μουσικός, αρχιτέκτονας, μηχανικός, ανατόμος, γεωλόγος, χημικός και μαθηματικός (1452-1519).

§ Σύμφωνα με τον Frazier (1974· βλ. και Chow et al., 1988, σ. 15) οι 8000 σελίδες των σημειώσεων του Leonardo που έχουν διασωθεί περιέχουν περισσότερες καταχωρήσεις σχετικά με την υδραυλική παρά με οποιοδήποτε άλλο αντικείμενο.

** Γάλλος Ουγενότος επιστήμονας (1510-1589).

†† Γάλλος δικηγόρος και φυσιοδίφης (1608-1680).

‡‡ Γάλλος φυσικός, γνωστός και για το φερόνυμο νόμο (Boyle-Mariotte· 1620-1684).

§§ Άγγλος αστρονόμος (1656-1742).

πολλοί φιλόσοφοι του αρχαίου ελληνικού και ρωμαϊκού κόσμου*. Η σημαντική συμβολή των επιστημόνων αυτών ήταν ότι ποσοτικοποίησαν τα μεγέθη των διακινήσεων νερού που συνδέονται με τον υδρολογικό κύκλο. Οι Perrault και Mariotte μελέτησαν (περί το 1760-1780, ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλο) την απορροή του Σηκουάνα κάνοντας συστηματικές μετρήσεις τόσο της βροχής στη λεκάνη, όσο και της παροχής του ποταμού, από τις οποίες προέκυψε το συμπέρασμα ότι η βροχόπτωση στη λεκάνη του Σηκουάνα ήταν αρκετή για να τροφοδοτήσει την απορροή του ποταμού. Λίγα χρόνια μετά, περί το 1700, ο Halley εκτίμησε, μετά από μετρήσεις, την εξάτμιση της Μεσογείου και συμπέρανε ότι η ποσότητα της εξάτμισης υπερκαλύπτει σε ποσότητα την απορροή των ποταμών που εκβάλλουν στη θάλασσα.

Μετά τη μέτρηση ήρθε το συστηματικό πείραμα και θεμελιώθηκε έτσι η γενική υδραυλική και η μεθοδολογία για ποσοτικές εκτιμήσεις των υδρολογικών μεγεθών. Ο 18ος αιώνας είναι ο κατ' εξοχήν αιώνας της κλασικής υδραυλικής με σημαντικές συμβολές από τους Bernoulli†,

* Η ανώνυμη δημοσίευση της εργασίας του Perrault, καθώς και η δημοσίευση των αποτελεσμάτων του Mariotte μετά το θάνατό του, αποτελούν ένδειξη ότι η έννοια του υδρολογικού κύκλου ήταν αντίθετη στις δεισιδαιμονίες της εποχής. Δεν είναι η μόνη περίπτωση που “ξανασφευρέθηκαν” στους νεότερους χρόνους, μετά από 2000 χρόνια, οι ανακαλύψεις των αρχαίων ελλήνων, οι οποίες ήταν αντίθετες στις δεισιδαιμονίες των ευρωπαίων. Υπάρχουν μάλιστα πιο χαρακτηριστικά παραδείγματα, όπως το σφαιρικό σχήμα της Γης. Οι αρχαίοι έλληνες, όχι μόνο γνώριζαν ότι η Γη είναι σφαιρική (“ότι σφαιρική μεν εστίν η κατ' αλήθειαν της γης επιφάνεια” — Στράβωνος Γεωγραφικά 2, C109) αλλά ο Ερατοσθένης ο Κυρηναίος (276-194 π.Χ) μέτρησε, με αξιοθαύμαστη για την εποχή αξρίβεια την περίμετρό της (252 000 στάδια ή 41 328 km· σφάλμα ≈3%) ο δε Στράβων ο Γεωγράφος (63 π.Χ. - 44 μ.Χ.) είχε καθορίσει τις πέντε ζώνες που χρησιμοποιούνται και σήμερα: διακεκαυμένη, δύο εύκρατες και δύο πολικές. Χρειάστηκε όμως να γίνουν τα ταξίδια του Κολόμβου και των άλλων εξερευνητών περί το 1500 μ.Χ. για να γίνουν αποδεκτές από την τότε ευρωπαϊκή διάνοηση οι ιδέες αυτές.

† Daniele Bernoulli, φλαμανδικής καταγωγής φυσικομαθηματικός, γιος του μαθηματικού Giovanni Bernoulli· έζησε κυρίως στη Ρωσία και την Ελβετία (1700-1782). Ασχολήθηκε με την κίνηση των υγρών, επινόησε τον όρο *υδροδυναμική* και διατύπωσε σε μια αρχική μορφή την έννοια του ύψους κινητικής ενέργειας.

Euler*, d'Alembert†, Pitot‡, Chézy§, κ.ά., ενώ στις αρχές του 19ου αιώνα σημειώνεται πρόοδος στην υδρολογία με τις εργασίες των de la Méthérie** για τη μετατροπή της βροχής σε επιφανειακή και υπόγεια απορροή, και εξατμοδιαπνοή, του John Dalton†† για το μηχανισμό της εξάτμισης (1802) και των Hagen‡‡-Poiseuille§§ για τη ροή σε τριχοειδή (1839).

Η χρήση του όρου “υδρολογία” ξεκινά γύρω στο 1750. Συστηματικά δίκτυα μέτρησης της βροχής εγκαθιδρύονται στην Ευρώπη και τις ΗΠΑ πριν το 1800, και στις Ινδίες περί το 1820 (Dingman, 1994, σ. 5). Στην Ελλάδα, η εγκατάσταση ανάλογων δικτύων θα ξεκινήσει λίγο αργότερα, στο τέλος της δεκαετίας του 1850 (με πρώτο το σταθμό του Αστεροσκοπείου Αθηνών το 1858).

1.2.3 Περίοδος επιστημονικής θεμελίωσης της υδρολογίας (1850-1960)

Τα μέσα του 19ου αιώνα αποτελούν ορόσημο για την υδρολογία, αφού αυτή την εποχή ξεκινά η διατύπωση θεωριών και μεθοδολογιών που χρησιμοποιούνται ακόμη και σήμερα. Παράλληλα πραγματοποιείται σημαντική πρόοδος στην υδραυλική με την κατάστρωση των γενικών

* Leonhard Euler, ελβετός μαθηματικός· έζησε και στη Ρωσία και Γερμανία (1707-1783). Εξήγησε το ρόλο της πίεσης στη ροή υγρών και διατύπωσε τις βασικές εξισώσεις ροής και το αποκαλούμενο *θεώρημα Bernoulli* (Rouse and Ince, 1963, σ. 105).

† Jean le Rond d'Alembert, γάλλος φυσικός, θεμελιωτής των αρχών διατήρησης της ορμής και ενέργειας και της εφαρμογής τους στην κίνηση των ρευστών.

‡ Henry de Pitot, γάλλος επιστήμονας, πρωτίστως υδραυλικός (1695-1771), εφευρέτης της φερόνυμης συσκευής μέτρησης ταχυτήτων (διπλού σωλήνα).

§ Antoine Chézy, γάλλος μηχανικός (1718-1798), γνωστός για το φερόνυμο τύπο της ταχύτητας ροής σε ανοιχτούς αγωγούς.

** Jean-Claude de la Méthérie (1743-1817).

†† Άγγλος χημικός και φυσιοδίφης, γνωστός για το φερόνυμο νόμο (1766-1844). Από το 1787 μέχρι το θάνατό του (57 χρόνια) διατηρούσε μετεωρολογικό ημερολόγιο, όπου ενέγραψε 900 000 παρατηρήσεις.

‡‡ Gotthilf Heinrich Ludwig Hagen, γερμανός υδραυλικός μηχανικός (1797-1884)· μελέτησε κυρίως την αντίσταση στη στρωτή και την τυρβώδη ροή.

§§ Jean Louis Poiseuille, γάλλος πειραματικός φυσικός (1799-1869)· μελέτησε κυρίως την αντίσταση της ροής μέσω τριχοειδών σωλήνων.

διαφορικών εξισώσεων των σπουδαιότερων φαινομένων της. Επίσης, από τα μέσα του 19ου αιώνα εκσυγχρονίζεται η τεχνολογία των υδραυλικών έργων και κατασκευάζονται σημαντικά έργα σύγχρονης αντίληψης (αρδευτικοί και υδρευτικοί ταμιευτήρες, δίκτυα αποχέτευσης, κ.ά.) στην Ευρώπη και τις ΗΠΑ.

Η περίοδος της επιστημονικής θεμελίωσης της υδρολογίας ξεκινά με τη διατύπωση από τον Mulvaney* το 1851, της λεγόμενης *ορθολογικής μεθόδου* για την εκτίμηση της πλημμυρικής παροχής υδατορευμάτων με βάση τη βροχόπτωση, η οποία χρησιμοποιείται ακόμη και σήμερα. Λίγο αργότερα, το 1856 διατυπώνεται από τον Darcy† ο νόμος του για τη ροή σε πορώδες μέσο. Οι εξισώσεις μη μόνιμης ροής με ελεύθερη επιφάνεια διατυπώνονται το 1871 από τον Saint-Venant‡. Η μελέτη των φαινομένων μεταφοράς ξεκινά το 1879 με την εργασία του du Boys§ για τις στερεοπαροχές. Η εφαρμογή της στατιστικής στην υδρολογία ξεκινά το 1914 με τη μελέτη του Hazen για τις πλημμυρικές αιχμές.

Ακολουθεί μια περίοδος έντονης δημιουργικότητας σε όλους τους κλάδους της υδρολογίας και των συγγενών επιστημών, οι κυριότεροι σταθμοί της οποίας φαίνονται στον Πίν. 1.2, μαζί με τα ονόματα των ερευνητών που έκαναν της αντίστοιχες συμβολές, τα οποία έχουν πια ταυτιστεί με όρους, νόμους, εξισώσεις και μεθοδολογίες της υδρολογίας, και ο αναγνώστης θα τα συναντήσει πολλές φορές σε αυτό το κείμενο.

Η περίοδος αυτή χαρακτηρίζεται και από την έκδοση σημαντικών βιβλίων υδρολογίας. Ήδη το 1851 δημοσιεύεται το “Εγχειρίδιο Υδρολογίας” (Manual of Hydrology) του Άγγλου Nathaniel Beardmore. Σημαντικά θεωρούνται τα βιβλία των Mead (το 1904), Meyer (το 1919) και Meinzer (το 1942). Η περίοδος κλείνει με τα βιβλία των Linsley, Kohler, Paulus “Υδρολογία για Μηχανικούς” (Hydrology for Engineers, 1958), του Todd “Υπόγεια υδρολογία” (Groundwater hydrology, 1959) και του Chow “Υδραυλική ανοιχτών αγωγών” (Open-channel Hydraulics, 1959).

* T. J. Mulvaney, Ιρλανδός μηχανικός (1822-1892)

† Henri Philibert Gaspard Darcy, γάλλος μηχανικός (1803-1858)· μελέτησε το σύστημα ύδρευσης του Παρισιού και εκτέλεσε σειρά πειραματικών μελετών ροής σε σωλήνες και διαπερατά εδάφη.

‡ Jean-Claude Barré de Saint-Venant, γάλλος μηχανικός (1797-1886).

§ Paul François Dominique du Boys, γάλλος υδραυλικός μηχανικός (1847-1924).

Πίν. 1.2 Σημαντικότερες συμβολές στην υδρολογία κατά την περίοδο 1850-1960.

Έτος	Ερευνητής	Συμβολή	Υπο-περιοχή*
1851	Mulvaney	Ορθολογική μέθοδος για πλημμυρική παροχή	1
1856	Darcy	Νόμος κίνησης υπόγειων νερών	2α
1863	Dupuit	Προσέγγιση κίνησης υπόγειων νερών	2α
1871	Saint-Venant	Εξισώσεις μη μόνιμης ροής με ελεύθερη επιφάνεια	1α
1879	Du Boys	Εξίσωση στερεοπαροχής με σύρση	3α
1883	Rippl	Μέθοδος διαστασιολόγησης ταμιευτήρων	1
1891	Manning	Τύπος ταχύτητας σε ροή με ελεύθερη επιφάνεια	1α
1902	Slichter	Θεωρία υπόγειας ροής	2α
1911	Thiessen	Μέθοδος εκτίμησης επιφανειακής βροχόπτωσης	1δ
1911	Green & Ampt	Φυσικά θεμελιωμένο μοντέλο διήθησης	2
1914	Hazen	Ανάλυση συχνοτήτων για πλημμυρικές αιχμές, όγκοι ταμίευσης	4
1914	Forchheimer	Θεωρία υπόγειας ροής	2α
1925	Prandtl	Θεωρία τυρβώδους μεταφοράς	1α
1925	Streeter-Phelps	Εξίσωση διαλυμένου οξυγόνου σε ποτάμια	3β
1928	Meinzer	Μηχανική περιορισμένων υδροφορέων	2α
1931	Richards	Εξίσωση ακόρεστης ροής	2α
1932	Sherman	Μοναδιαίο υδρογράφημα	1
1933	Horton	Θεωρία διήθησης	2
1935	Theis	Εξίσωση υδραυλικής φρεάτων	2α
1936	Shields	Κριτήριο ξεκινήματος στερεοπαροχής	3α
1938	Snyder	Συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα	1
1938	McCarthy	Μέθοδος διόδευσης πλημμυρών Muskingum	1α
1940	Hubbert	Θεωρία υπόγειας ροής	2α
1941	Gumbel	Πιθανοτική κατανομή ακροτάτων	4
1944	Thornthwaite	Εκτίμηση δυνητικής εξατμοδιαπνοής	1δ
1945	Clark	Συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα	1
1945	Horton	Μαθηματική περιγραφή υδρογραφικών δικτύων	1γ
1948	Penman	Εξίσωση εξάτμισης	1δ
1948	Meyer-Peter & Muller	Εξίσωση στερεοπαροχής	3α
1949	Langbein	Σειρές ετήσιων μεγίστων και μερικής διάρκειας	4

(συνεχίζεται)

Πίν. 1.2 (συνέχεια) Σημαντικότερες συμβολές στην υδρολογία κατά την περίοδο 1850-1960.

Έτος	Ερευνητής	Συμβολή	Υπο-περιοχή*
1950	Blaney & Criddle	Εξίσωση εξατμοδιαπνοής καλλιεργειών	1
1950	Jacob	Εξίσωση μη μόνιμης υπόγειας ροής	2α
1950	Einstein	Εξίσωση στερεοπαροχής	3α
1951	Hurst	Εμμογή υδρολογικών χρονοσειρών	4
1951	Chow	Τυποποίηση υπολογισμών στατιστικής υδρολογίας	4
1955	Jenkinson	Γενικευμένη κατανομή ακροτάτων	4
1957	Nash	Μοντέλο συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος	1
1957	Philip	Εξίσωση διήθησης	2
1957	Blench	Θεωρία καθεστώτος μορφής υδατορευμάτων	3γ

* 1: επιφανειακή υδρολογία, 2: υπόγεια υδρολογία, 3: φαινόμενα μεταφοράς, 4: στατιστική υδρολογία· α: σχέση με υδραυλική, β: σχέση με περιβαλλοντική τεχνολογία, γ: σχέση με γεωμορφολογία, δ: σχέση με μετεωρολογία.

1.2.4 Περίοδος ηλεκτρονικών υπολογιστών και διεπιστημονικής υδρολογίας (1960-σήμερα)

Η εμφάνιση του πρώτου ψηφιακού ηλεκτρονικού υπολογιστή (ENIAC, των Eckert και Mauchley) χρονολογείται το 1943, αλλά η διάδοση και χρήση των υπολογιστών στην υδρολογία ξεκινά από το 1960, έτος που το θεωρούμε ως ορόσημο της πιο σύγχρονης περιόδου της ιστορίας της υδρολογίας. Το πρώτο διαδεδομένο πακέτο υδρολογικών εφαρμογών, το HEC-1, αναπτύχθηκε το 1965 από το Σώμα Μηχανικών του στρατού των ΗΠΑ. Η χρήση των υπολογιστών επέτρεψε την αριθμητική επίλυση πολλών καταστρωμένων από παλιά, αλλά δισεπίλυτων μαθηματικών μοντέλων, αλλά και την κατάστρωση και επίλυση νέων θεωρητικών προσεγγίσεων με προσδιοριστική και στοχαστική δομή, για την περιγραφή των υδρολογικών διεργασιών. Προς το τέλος της δεκαετίας του 1960 ενσωματώνεται η περιγραφή των υδρολογικών διεργασιών στα πολύπλοκα μοντέλα γενικής ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας (atmospheric general circulation models - GCM), τα οποία προσομοιώνουν την υδροδυναμική και θερμοδυναμική της ατμόσφαιρας της γης, επιλύοντας τις αντίστοιχες εξισώσεις. Επίσης, η χρήση των υπολογιστών υπήρξε αποφασιστικής σημασίας και για την περιοχή της τεχνολογίας και διαχείρισης υδροσυστημά-

των, αφού επέτρεψε την τεχνικοοικονομική βελτιστοποίηση του σχεδιασμού και της λειτουργίας τους με μεθοδολογίες επιχειρησιακής έρευνας.

Εξ άλλου η σύγχρονη εποχή χαρακτηρίζεται από την επινόηση και εφαρμογή νέων μεθόδων μέτρησης και συλλογής υδρολογικών δεδομένων, που στηρίζονται στις νέες τεχνολογίες (συστήματα επίγειας τηλεμετρίας, ραντάρ, μετεωρολογικοί δορυφόροι*, κτλ.) αλλά και νέων μεθόδων επεξεργασίας και διαχείρισης των δεδομένων που στηρίζονται στην πληροφορική.

Ακόμη, οι εκπληκτικές πρόοδοι στη διάδοση της πληροφορίας βοήθησαν να πραγματοποιηθεί ουσιαστική διεπιστημονική συνεργασία (που άλλωστε γίνεται πιο απαραίτητη λόγω της εξειδίκευσης των επιστημόνων) στα σύνθετα προβλήματα τόσο της υδρολογικής επιστήμης, όσο και της διαχείρισης των υδατικών πόρων: Πολιτικοί μηχανικοί και υδρολόγοι συνεργάζονται στενά με μετεωρολόγους, γεωπόνους, οικονομολόγους, κοινωνιολόγους, χημικούς, βιολόγους, γεωλόγους.

Τέλος, η σύγχρονη εποχή χαρακτηρίζεται από εκπληκτική αύξηση του αριθμού των υδρολόγων ερευνητών και έκρηξη του ρυθμού επιστημονικών δημοσιεύσεων στην υδρολογία και τις άλλες επιστήμες. Θα πρέπει, ωστόσο, να παρατηρήσουμε ότι η ποσοτική αυτή έκρηξη δεν συνοδεύεται από ανάλογη ποιοτική άνοδο των επιστημονικών εργασιών. Αντίθετα, πολλές από τις εργασίες που δημοσιεύονται αποτελούν πολλαπλές επαναλήψεις άλλων εργασιών, πράγμα που επιτείνει τις ήδη σημαντικές δυσκολίες παρακολούθησης της επιστημονικής προόδου από τον υδρολόγο επαγγελματία.

Το γενικότερο τεχνικό, κοινωνικό, οικονομικό, και πολιτικό πλαίσιο, στο οποίο κινείται σήμερα η υδρολογία, και καθόρισε, σε συνδυασμό και με τις επιστημονικοτεχνικές προόδους που αναφέρθηκαν, την πρόοδο και την αναβάθμιση του ρόλου της υδρολογίας στη σύγχρονη εποχή, προσδιορίζεται από την αυξημένη σημασία των υδατικών πόρων και τις επιτακτικότερες ανάγκες προστασίας του περιβάλλοντος. Είναι χαρακτηριστική της αναβάθμισης της υδρολογίας η αναγνώριση του επαγγέλματος του υδρολόγου στις ΗΠΑ το 1965 (Chow et al., 1988, σ. 16) και η προκήρυξη της Διεθνούς Υδρολογικής Δεκαετίας 1965-1974 από τον ΟΗΕ.

* Ο πρώτος αμερικανικός μετεωρολογικός δορυφόρος (TIROS I) εκτοξεύτηκε το 1960.

Είναι μάλλον βέβαιο ότι η σημασία της υδρολογίας θα αυξηθεί περαιτέρω στο μέλλον, λόγω των αδιεξόδων που σχετίζονται τόσο με τη διαθεσιμότητα υδατικών πόρων, όσο και με την περιβαλλοντική υποβάθμιση στην υδρόγειο.

Δεν θα είχε νόημα να αναφερθούμε, στα πλαίσια αυτού του σύντομου ιστορικού, στις πάμπολλες επιμέρους συμβολές των ερευνητών αυτής της τελευταίας περιόδου, γιατί αυτό θα απαιτούσε τεράστια έκταση, αλλά και θα ήταν δύσκολο να αποδοθεί η ορθή ιστορική σημασία των πρόσφατων ανακαλύψεων. Άλλωστε, αναφορές σε σημαντικές εργασίες γίνονται στα πλαίσια των επιμέρους κεφαλαίων αυτού του κειμένου. Περιοριζόμαστε, λοιπόν στην αναφορά τριών χαρακτηριστικών βιβλίων αυτής της περιόδου: Το πρώτο, το “Εγχειρίδιο Εφαρμοσμένης Υδρολογίας” (Handbook of Applied Hydrology), που εκδόθηκε με επιμέλεια του Ven Te Chow το 1964, σημάδεψε την αρχή της πιο σύγχρονης περιόδου της ιστορίας της υδρολογίας. Το δεύτερο, το “Εγχειρίδιο Υδρολογίας” (Handbook of Hydrology), που εκδόθηκε με επιμέλεια του David R. Maidment το 1993, έχει κατορθώσει να συμπυκνώσει όλη την σύγχρονη υδρολογική γνώση σε ένα τόμο με τέσσερα μέρη: υδρολογικός κύκλος, υδρολογική μεταφορά, υδρολογική στατιστική και υδρολογική τεχνολογία. Τέλος, το τρίτο, το “Προοπτικές στις Υδρολογικές Επιστήμες” (Opportunities in Hydrological Sciences), που εκδόθηκε από επιτροπή υδρολόγων των ΗΠΑ με πρόεδρο τον Peter S. Eagleson το 1991, περιγράφει αναλυτικά το ιστορικό και τη σημερινή κατάσταση γνώσης της υδρολογίας και διαγράφει τις γοητευτικές προοπτικές εξέλιξής της.

1.3 Υδρολογικές μελέτες και υδραυλικά έργα

1.3.1 Σκιαγραφία και ιστορικό των υδραυλικών έργων

Η κατανόηση της επιστημονικής περιοχής της τεχνικής υδρολογίας διευκολύνεται από μια πρώτη σύντομη ξενάγηση στις παραδοσιακές χρήσεις του γλυκού νερού από τον άνθρωπο και στα αντίστοιχα συνήθη έργα. Συστηματικότερη ταξινόμηση των υδραυλικών έργων ακολουθεί στα επόμενα εδάφια αυτής της ενότητας.

Αστικά υδραυλικά έργα. Διακρίνονται σε υδρευτικά και αποχετευτικά έργα. Τα πρώτα εξασφαλίζουν τη σύλληψη και την ασφαλή μεταφορά

του κατάλληλου νερού στα σημεία κατανάλωσής του για έξι παραδοσιακές χρήσεις: Οι δύο πρώτες (πόσιμο νερό και μαγείρεμα) είναι και ζωτικές για την επιβίωση του ανθρώπου, οι άλλες τρεις (καθαριότητα, παραγωγικές δραστηριότητες, δημοτικές χρήσεις) καλύπτουν πολιτιστικές και αναπτυξιακές ανάγκες, και η τελευταία χρήση την πυροπροστασία.

Οι υδρεύσεις γνώρισαν τις πρώτες περιόδους ακμής τη δεύτερη π.Χ. χιλιετία, στην Αίγυπτο, την Κίνα, την Περσία, την Κρήτη, κ.α. Ακολούθησε μια πρώτη μακρά σκοτεινή περίοδος (1250 έως 800 π.Χ.), μέχρι την εμφάνιση των πρώτων συστηματικών έργων μικρής κλίμακας στην Αθήνα (Πεισίστρατος) και νόμων (Σόλωνας) κατά την άνθηση της κλασικής αρχαιοελληνικής περιόδου. Οι Ρωμαίοι, άριστοι μηχανικοί, κατασκεύασαν σε όλη την αυτοκρατορία τους μεγάλης κλίμακας υδρευτικά έργα, εξασφαλίζοντας υποδειγματικές για την εποχή τους συνθήκες υγιεινής και καθαριότητας. Η δεύτερη σκοτεινή περίοδος, ο Μεσαίωνας, χαρακτηρίζεται από μεγάλη οπισθοδρόμηση και στις υδρεύσεις, με συνέπεια τις μεγάλες επιδημίες και την αναπτυξιακή και πολιτιστική κατάρρευση. Η Αναγέννηση στη Δύση έθεσε τις βάσεις για την τεχνολογική έκρηξη και στις υδρεύσεις: Τα νέα υλικά κατασκευής δικτύων ύδρευσης υπό πίεση επέτρεψαν, από τις αρχές του 19ου αιώνα τη διανομή ασφαλούς πόσιμου νερού στις οικιακές βρύσες των πολυάριθμων αστικών πληθυσμών.

Στη μεταπολεμική Ελλάδα, από το 30% των νοικοκυριών που είχαν δίκτυο ύδρευσης στο σπίτι τους το 1950, ξεπεράσαμε το 90% στις αρχές της δεκαετίας του 1990. Παράλληλα, η Ευρωπαϊκή Ένωση θεσμοθέτησε (Κοινοτική Οδηγία 80/778) και η ελληνική Κυβέρνηση νομοθέτησε πλήρεις και αυστηρές προδιαγραφές ποιότητας για το υδρευτικό νερό, με συστηματικούς ελέγχους για την τήρησή τους από τις διάφορες δημοτικές αρχές.

Οι καταναλώσεις νερού ύδρευσης πολλαπλασιάστηκαν από τις αρχές του αιώνα μέχρι σήμερα και σε μέσο Ευρωπαϊκό επίπεδο ανέρχονται σε 100 έως 300 λίτρα ανά κάτοικο και ημέρα. Το μεγαλύτερο μέρος των αναγκών σε υδρευτικό νερό καλύπτεται σήμερα από ταμιευτήρες που συλλέγουν τα επιφανειακά νερά, δεδομένου ότι τα ασφαλέστερα υπόγεια αποθέματα δεν επαρκούν για τις υδρευτικές ανάγκες των μεγάλων αστικών κέντρων.

Εξ άλλου, τα αστικά αποχετευτικά έργα έχουν στόχο τη συλλογή και μεταφορά των λυμάτων και των όμβριων νερών των αστικών περιοχών μέχρι το σημείο διάθεσής τους. Συνήθως περιλαμβάνουν δύο κατηγορίες έργων, τα έργα αποχέτευσης λυμάτων (δίκτυο συλλογής, αγωγοί μεταφοράς) και τα έργα αποχέτευσης ομβρίων (δίκτυο συλλογής, αποχετευτικές τάφροι, διευθετήσεις υδατορευμάτων αστικών περιοχών). Σε πολλές πόλεις η αποχέτευση των ακαθάρτων και ομβρίων έχει αντιμετωπιστεί με ενιαίο δίκτυο συλλογής, γνωστό ως παντοροϊκό δίκτυο. Σήμερα, τα έργα αποχέτευσης ακαθάρτων συνοδεύονται πάντα από έργα επεξεργασίας και διάθεσης των λυμάτων στους αποδέκτες, τα οποία έχουν στόχο την απομάκρυνση επικίνδυνων για το περιβάλλον ρύπων από τα λύματα και τον περιορισμό της ρύπανσης των αποδεκτών.

Η ιστορία των αποχετευτικών έργων συμβαδίζει σε κάποιο βαθμό με αυτή των υδρευτικών. Έχει βεβαιωθεί η ύπαρξη αποχετευτικών έργων σε πολλούς αρχαίους πολιτισμούς (Ινδία, Σουμερία, Βαβυλώνα, Κνωσός). Στον ελληνικό και ρωμαϊκό πολιτισμό υπήρξε διάδοση των αποχετευτικών έργων, η οποία ακολουθείται από μακρά εγκατάλειψή τους το μεσαίωνα. Ουσιαστικά η σύγχρονη τεχνολογία των αποχετεύσεων εγκαθιδρύθηκε στα μέσα του 19ου αιώνα, και υπαγορεύτηκε από τις ανάγκες της εξάλειψης των επιδημιών και της καλύτερης ποιότητας ζωής (Κουτσογιάννης, 1993).

Στην Ελλάδα υπήρχε μέχρι πρόσφατα σημαντική καθυστέρηση στα αστικά αποχετευτικά έργα. Τη δεκαετία του 1980 ξεκινά η εντατικοποίηση της κατασκευής αποχετευτικών δικτύων και εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων στα αστικά κέντρα της χώρας, μετά από την κοινωνική απαίτηση για καλύτερη ποιότητα ζωής και αναστροφή της πορείας υποβάθμισης του περιβάλλοντος. Η απαίτηση αυτή θεσμοθετείται με κανονιστικές ρυθμίσεις (εθνικές και ευρωπαϊκές) οι οποίες οδηγούν στην ανάγκη γενίκευσης αυτών των σημαντικών έργων υποδομής σε όλα τα αστικά κέντρα της χώρας αλλά και στις μικρότερες κοινότητες. Εκτιμάται ότι αυτή η ανάγκη θα καλυφθεί μέχρι το 2005.

Εγγειοβελτιωτικά έργα. Ο όρος αναφέρεται σε όλα τα τεχνικά έργα που έχουν ως τελικό σκοπό τη βελτίωση της “έγγειας προσόδου”, δηλαδή της παραγωγικότητας της γης σε φυτικές καλλιέργειες. Τα έργα αυτά αφενός περιορίζουν την αβεβαιότητα σε σχέση με την επίτευξη συγκομιδής, σε ότι αφορά το κρίσιμο θέμα των αναγκών σε νερό, και αφετέ-

ρου, σε οικονομικούς όρους, σταθεροποιούν θεαματικά τις συνθήκες παραγωγής στον πρωτογενή τομέα.

Οι *αρδεύσεις* των εδαφών, δηλαδή η μεταφορά και διανομή του απαραίτητου νερού για την προγραμματισμένη από τον άνθρωπο ανάπτυξη και καλλιέργεια των φυτών, συνδυάζονται με τις *αποξηράνσεις*, τις *στραγγίσεις* και τις *ειδικές βελτιώσεις* του εδάφους, δηλαδή φυσικά ή τεχνητά δίκτυα για την απομάκρυνση της περίσσειας διαλυτών αλάτων και κατιόντων αλκαλιμετάλλων στο έδαφος (δεδομένου ότι τα αλατούχα και αλκαλιωμένα εδάφη αποτελούν κύριο χαρακτηριστικό των άγονων περιοχών). Εξ άλλου, οι καταστροφικές συνέπειες των πλημμυρών και στις γεωργικές εκτάσεις, επέβαλαν την αποτελεσματική προστασία τους με τα *αντιπλημμυρικά έργα*. Τα τελευταία περιλαμβάνουν προστατευτικά αναχώματα, αντιπλημμυρικές τάφρους και μεγάλους ταμιευτήρες, οι οποίοι συγκρατούν και αποθηκεύουν τα πλημμυρικά νερά για να τα αξιοποιήσουν πολλαπλά και προγραμματισμένα στις αρδεύσεις, τις υδρεύσεις και την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας την κατάλληλη εποχή.

Τα εγχειοβελτιωτικά έργα είναι τα σημαντικότερα τεχνικά έργα μεγάλης κλίμακας που ανέπτυξαν ιστορικά οι ανθρώπινες κοινωνίες, προϋπόθεση και αποτέλεσμα της εμφάνισης μεγάλων πολιτισμών (βλ. ενότητα 1.2). Τα αρδευτικά έργα στην Αρχαία Ελλάδα ήταν σχετικά περιορισμένης έκτασης και συνδυάστηκαν με αποξηραντικά και αντιπλημμυρικά έργα. Στη νεότερη Ελλάδα τα πρώτα εγχειοβελτιωτικά έργα άρχισαν το δεύτερο ήμισυ του 19ου αιώνα, με τα αντιπλημμυρικά του Αχελώου και τα αποξηραντικά έργα της λίμνης Κωπαΐδας. Μεγάλη ανάπτυξη των έργων αυτών άρχισε μετά τη Μικρασιατική Καταστροφή και συνεχίστηκε μέχρι το 1940 με τα μεγάλα αντιπλημμυρικά έργα στις πεδιάδες Θεσσαλίας, Ηπείρου, Θεσσαλονίκης και Σερρών. Μετά τον πόλεμο και μέχρι σήμερα συνεχίστηκε η κατασκευή σημαντικών φραγμάτων υδροληψίας αλλά και αποθήκευσης στους ποταμούς Αλιάκμονα, Αλφειό, Αχελώο, Πηνειό Ηλείας, Νέστο, κ.ά., για την κάλυψη των αναγκών της ξηρής θερινής περιόδου (βλ. και Κωνσταντινίδη, 1993). Οι αρδευόμενες σήμερα εκτάσεις στην Ελλάδα ξεπερνούν τα 12 000 km² με πρόβλεψη τα 18 000 km² για το έτος 2010 επί συνολικής έκτασης καλλιεργήσιμης γης περί τα 36 000 km².

Υδροενεργειακά έργα. Η συνεχής κυκλική, όχι μόνο υλική αλλά και ενεργειακή, ανανέωση των υδατικών αποθεμάτων χρησιμοποιήθηκε από

τα βάθη της ιστορίας και για την παραγωγή πολύτιμου έργου, τόσο μεταφορικού όσο και καθαρά υδραυλικού, μέσω της δυναμικής ενέργειας των υδατορευμάτων. Οι υδάτινες μεταφορές και οι πρώτες υδραυλικές μηχανές λειτούργησαν στην εγγύς Ανατολή για τις μετακινήσεις και τη μεταφορά μεγάλων φορτίων, την άντληση νερού και την άλεση (με υδρόμυλους) εδώ και 4000 χρόνια, και η χρήση τους ήταν γενικευμένη μέχρι τις αρχές του 20ου αιώνα. Η βιομηχανική παραγωγή, μεταφορά και διανομή της ευγενούς ηλεκτρικής ενέργειας κατέκτησε μέσα στον 20ο αιώνα σχεδόν όλες τις ανθρώπινες ανάγκες και δραστηριότητες. Αποτέλεσμα αυτής της κατάκτησης είναι και η κατασκευή μεγάλης κλίμακας υδροηλεκτρικών έργων.

Οι περισσότερες ευρωπαϊκές χώρες εξάντλησαν σε μεγάλο ποσοστό το υδροδυναμικό τους και κατά συνέπεια η ηλεκτροπαραγωγή από μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα δεν αναμένεται να συμβάλει ουσιαστικά στην υποκατάσταση των συμβατικών καυσίμων. Στην Ελλάδα, όμως, μόνο το ένα τέταρτο του οικονομικά εκμεταλλεύσιμου υδροδυναμικού της χώρας χρησιμοποιείται σήμερα ή βρίσκεται υπό αξιοποίηση. Διαθέτουμε επομένως τεράστια ανεκμετάλλευτα αποθέματα εγχώριων, καθαρών και ανανεώσιμων υδατικών ενεργειακών πηγών.

Τα μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα είναι πολλαπλής χρήσης αλλά και πολλαπλής οικονομικής ωφέλειας: Οι ταμιευτήρες τους διαφυλάσσουν τους πολύτιμους υδατικούς πόρους των αυξημένων χειμερινών απορροών για να τους διαθέσουν σε αρδεύσεις κατά την κρίσιμη θερινή περίοδο και σε υδρεύσεις, αποσοβώντας ταυτόχρονα τις φυσικές καταστροφές από τις πλημμύρες.

1.3.2 Κατάταξη των υδρολογικών μελετών

Υδρολογική μελέτη είναι η εφαρμογή της επιστήμης της τεχνικής υδρολογίας σε συγκεκριμένα έργα. Αξιοποιώντας τα διαθέσιμα δεδομένα, ο μελετητής καθορίζει πρώτα τις βασικές υδρολογικές παραμέτρους σχεδιασμού των έργων και στη συνέχεια συντάσσει ένα πρόγραμμα λειτουργίας και διαχείρισής τους. Επισημαίνεται βέβαια ότι, τόσο ο σχεδιασμός των έργων, όσο και η διαχείρισή τους, εξαρτάται και από πλήθος άλλων μη υδρολογικών παραμέτρων, όπως τοπογραφικών, εδαφοτεχνικών, κτλ.

Η κατάταξη των υδρολογικών μελετών ακολουθεί την αντίστοιχη των υδραυλικών έργων και στηρίζεται στην εφαρμοσμένη από όλες τις οργα-

νωμένες ανθρώπινες κοινωνίες κοινή πρακτική. Έτσι διακρίνουμε δύο κύριες κατηγορίες έργων:

1. *Έργα ανάπτυξης και αξιοποίησης υδατικών πόρων*: Αφορούν στην αναζήτηση των υδατικών αποθεμάτων και τη βέλτιστη χωροχρονική διανομή τους στις διάφορες χρήσεις και στους καταναλωτές.
2. *Έργα προστασίας από υδρολογικούς κινδύνους*: Αφορούν στην αντιμετώπιση των συνηθισμένων επιπτώσεων από την επιφανειακή απορροή αλλά και των έκτακτων υδρολογικών περιστατικών, δηλαδή των πλημμυρών και ξηρασιών.

Τα απαραίτητα για τη σύνταξη των υδρολογικών μελετών δεδομένα είναι οι διάφορες μετρήσεις ή εκτιμήσεις των *υδρολογικών μεταβλητών*, που με το γενικό τίτλο *υδρολογική πληροφορία*, ορίζονται συνοπτικά στην ενότητα 1.9*.

Στη συνέχεια (εδάφια 1.3.3 και 1.3.4) συνοψίζονται οι συνηθέστερες κατηγορίες υδρολογικών μελετών τόσο για έργα ανάπτυξης και αξιοποίησης των υδατικών πόρων, όσο και για έργα προστασίας από τους υδρολογικούς κινδύνους, ώστε να δειχτεί η ευρύτητα των εφαρμογών τους και η σπουδαιότητά τους στη γενικότερη ανάπτυξη μιας περιοχής. Πιο επιγραμματικά, οι κατηγορίες των υδραυλικών έργων και των αντίστοιχων υδρολογικών μελετών κωδικοποιούνται στον Πίν. 1.3. Διευκρινίζεται πάντως ότι η κωδικοποίηση των έργων και των μελετών είναι σχηματική και πολλές φορές ένα υδραυλικό έργο έχει πολλαπλή σκοπιμότητα (π.χ. φράγμα για παραγωγή ενέργειας, ταμίευση αρδευτικού και υδρευτικού νερού, περιβαλλοντική διατήρηση και αντιπλημμυρική προ-

* Η έλλειψη διαδεδομένων βασικών γνώσεων στην επεξεργασία της υδρολογικής πληροφορίας σε συνδυασμό με τη μέτρια ποιότητα και ανεπαρκή ποσοτήτά της, οδηγεί συχνά στη διατήρηση της παλιάς κακής συνήθειας της παράκαμψής της ακόμα και εκεί όπου υπάρχει και είναι επαρκής: ο μελετητής αποφεύγει συχνά την επίπονη επεξεργασία των δεδομένων, διαλέγοντας μια εμπειρική σχέση της βιβλιογραφίας και οι υπηρεσίες που τον ελέγχουν δέχονται πολλές φορές την απαράδεκτη αυτή άγνοια της αλήθειας. Γιατί η αλήθεια βρίσκεται μόνο στα καταγεγραμμένα υδρολογικά δεδομένα. Κάθε εμπειρική σχέση (η επί το επισημότερο υδρολογικός νόμος) έχει νόημα εφαρμογής όταν και μόνον όταν έχει προκύψει από τον πληθυσμό που καλείται να απεικονίσει. Διαφορετικά δρα σαν παραμορφωτικός καθρέφτης μιας τελείως διάφορης υδρολογικής πραγματικότητας.

στασία· βλ. και εδάφιο 1.3.1), οπότε το ίδιο αυτό έργο ανήκει σε περισσότερες από μία κατηγορίες της παρακάτω κατάταξης.

1.3.3 Έργα ανάπτυξης και αξιοποίησης υδατικών πόρων

Το τυπικό υδρολογικό μέρος της όλης μελέτης των αναπτυξιακών υδραυλικών έργων εξαρτάται άμεσα από το συγκεκριμένο τύπο των έργων που πρόκειται να κατασκευαστούν. Για μεθοδολογικούς λόγους μπορούμε να διακρίνουμε τους τύπους των έργων στις ακόλουθες κατηγορίες:

1. Έργα αξιοποίησης των άμεσα διαθέσιμων υδατικών πόρων (δηλαδή του υδατικού δυναμικού που μπορεί να αξιοποιηθεί χωρίς σημαντικές επεμβάσεις στη φυσική του δίαιτα). Στα έργα αυτά υπάγονται, μεταξύ άλλων,

- η καλλιέργεια και σύλληψη νερού από πηγές·
- η υδροληψία από φυσικά υδατορεύματα·
- η υδροληψία από φυσικές λίμνες·
- οι υδροληψίες υπόγειων υδάτων (πηγάδια και γεωτρήσεις), κτλ.

Στην κοινή πρακτική, ο υδρολόγος μηχανικός καλείται να υπολογίσει με αντικειμενική αξιοπιστία τις μέσες ή ελάχιστες τιμές των διερχόμενων παροχών σε ορισμένες θέσεις και στις κατάλληλες χρονικές κλίμακες (π.χ. μηνιαία, εβδομαδιαία, ημερήσια). Καθορίζεται έτσι η απολήψιμη παροχή, που αποτελεί και τη βασική υδρολογική παράμετρο σχεδιασμού των αντιστοίχων αναπτυξιακών έργων.

2. Έργα ανάπτυξης των ολικών διαθέσιμων υδατικών πόρων (δηλαδή του συνολικά εκμεταλλεύσιμου υδατικού δυναμικού, μετά από σημαντικές επεμβάσεις στη φυσική δίαιτα με την κατασκευή μεγάλων υδραυλικών έργων), και συγκεκριμένα:

- ταμιευτήρες, για τη συγκέντρωση των επιφανειακών νερών και ρύθμιση της δίαιτάς τους σε υπερετήσια, ετήσια ή εποχιακή κλίμακα·
- έργα εκτροπής υδατικού δυναμικού από μια περιοχή σε άλλη·
- έργα εμπλουτισμού υπόγειων υδροφορέων με χειμερινά επιφανειακά νερά, κτλ.

Αξιοποιώντας το σύνολο της διαθέσιμης υδρολογικής πληροφορίας σε κατάλληλες χρονικές κλίμακες (π.χ. μηνιαία), ο υδρολόγος μηχανικός καθορίζει μια σειρά παραμέτρων σχεδιασμού των αντιστοιχών δυνατών αναπτυξιακών έργων, όπως είναι οι όγκοι εισροών, απωλειών (εξατμοδιαπνοής, διαφυγών, κτλ.) και απολήψεων, παροχές σχεδιασμού, χωρητικότητες ταμιευτήρων. Κατά κανόνα η υδρολογική μελέτη καθορίζει ένα σύνολο εναλλακτικών παραμέτρων σχεδιασμού και η τελική λύση επιλέγεται στη συνέχεια με τεχνικοοικονομικά κριτήρια.

3. Έργα μεταφοράς και διανομής του νερού (δηλαδή υδραγωγεία και δίκτυα διανομής του υδρευτικού ή αρδευτικού νερού στους καταναλωτές). Εδώ το βασικό αντικείμενο της τεχνικής υδρολογίας είναι η εκτίμηση των υδατικών αναγκών για τις διάφορες χρήσεις νερού και της κατανομής τους στο χρόνο, μέσω των οποίων καθορίζονται οι παροχές σχεδιασμού.

1.3.4 Έργα προστασίας από υδρολογικούς κινδύνους

Το φυσικό αλλά και το ανθρωπογενές περιβάλλον μιας περιοχής ζεί προσαρμοσμένο στις συνηθισμένες υδρολογικές συνθήκες της. Όταν συμβούν έκτακτα, δηλαδή ασυνήθιστα, υδρολογικά περιστατικά στην περιοχή, όπως είναι οι πλημμύρες ή οι ξηρασίες, το περιβάλλον της δοκιμάζεται και διατρέχει κινδύνους μικρής ή και μεγάλης καταστροφής, επανορθώσιμης ή και μη επανορθώσιμης. Αλλά, εκτός από τα εξαιρετικά υδρολογικά περιστατικά, κινδύνους προκαλεί συχνά και η συνήθης υδρολογική δίαιτα. Οι κίνδυνοι αυτοί συνδέονται με τις φυσικές διεργασίες διάβρωσης, πρόσχωσης και μεταφοράς φερτών υλικών.

Τα συνηθέστερα έργα προστασίας κατατάσσονται στις ακόλουθες ειδικές κατηγορίες:

1. Έργα αντιπλημμυρικής προστασίας αστικών και αγροτικών περιοχών και ειδικότερα:
 - αστικά δίκτυα αποχέτευσης ομβρίων και αντιπλημμυρικές τάφροι·
 - έργα αποχέτευσης και αποστράγγισης αγροτικών περιοχών·
 - έργα διευθέτησης υδατορευμάτων για την ακίνδυνη διέλευση ή εκτροπή της πλημμυρικής παροχής·

- αντιπλημμυρικά φράγματα για την ανάσχεση των πλημμυρών (δηλαδή, τη μείωση της παροχής αιχμής μέσω προσωρινής αποθήκευσης) .

Πίν. 1.3 Κατηγορίες υδραυλικών έργων και συμβολή της υδρολογίας στη μελέτη των έργων κάθε κατηγορίας.

Γενική κατηγορία έργων	Ειδική κατηγορία έργων ή δράσεων	Τυπικά υδραυλικά έργα	Στόχος υδρολογικής μελέτης
Α. Έργα ανάπτυξης και αξιοποίησης υδατικών πόρων	A1. Αξιοποίηση των άμεσα διαθέσιμων υδατικών πόρων	Υδροληψία από <input type="checkbox"/> πηγές <input type="checkbox"/> υδατορεύματα <input type="checkbox"/> λίμνες <input type="checkbox"/> υδροφορείς	Εκτίμηση απολήψιμης παροχής
	A2. Ανάπτυξη των ολικών διαθέσιμων υδατικών πόρων	<input type="checkbox"/> Ταμιευτήρες <input type="checkbox"/> Έργα εκτροπής <input type="checkbox"/> Έργα εμπλουτισμού υδροφορέων	Εκτίμηση όγκων εισροών, απωλειών και απολήψεων, παροχών σχεδιασμού, χωρητικότητων ταμιευτήρων
	A3. Μεταφορά και διανομή των υδατικών πόρων	<input type="checkbox"/> Υδραγωγεία <input type="checkbox"/> Δίκτυα διανομής	Εκτίμηση των υδατικών αναγκών, εξαγωγή των παροχών σχεδιασμού
Β. Έργα προστασίας από υδρολογικούς κινδύνους	B1. Αντιπλημμυρική προστασία αστικών και αγροτικών περιοχών	<input type="checkbox"/> Αστικά δίκτυα αποχέτευσης ομβρίων <input type="checkbox"/> Έργα αποχέτευσης και αποστράγγισης αγροτικών περιοχών <input type="checkbox"/> Έργα διευθέτησης υδατορευμάτων	Εκτίμηση πλημμυρικών παροχών σχεδιασμού, χωροχρονικής εξέλιξης πλημμύρας, χρόνων κατάκλυσης
	B2. Αντιπλημμυρική προστασία συστημάτων τεχνικών έργων	Έργα προστασίας <input type="checkbox"/> φραγμάτων <input type="checkbox"/> συγκοινωνιακών έργων <input type="checkbox"/> ειδικών έργων	Όπως στην κατηγορία B1
	B3. Προστασία από ξηρασίες	Έργα κατηγορίας A2 σε συνδυασμό με τήρηση εφεδρικών αποθεμάτων και εφεδρικά έργα.	Όπως στα έργα κατηγορίας A2, και επιπλέον: εκτίμηση ελάχιστων φυσικών παροχών, παροχών περιβαλλοντικής διατήρησης
	B4. Προστασία από τη συνήθη υδρολογική δίαιτα	<input type="checkbox"/> Φράγματα συγκράτησης φερτών υλικών <input type="checkbox"/> Έργα διευθέτησης υδατορευμάτων <input type="checkbox"/> Έργα ορεινής υδρονομίας	Εκτίμηση ρυθμών διάβρωσης εδαφών και υδατορευμάτων, στερεομεταφοράς και πρόσχωσης εδαφών, υδατορευμάτων και τεχνικών έργων

Ο υδρολόγος μηχανικός καλείται εδώ να προσδιορίσει με αντικειμενική αξιοπιστία τη σχέση μεταξύ της πλημμυρικής παροχής των έκτακτων περιστατικών και της *πιθανότητας* να συμβούν. Ο τελικός σχεδιασμός των αντίστοιχων έργων προστασίας στηρίζεται στην τεχνικοοικονομική επιλογή μιας *αποδεκτής πιθανότητας* ασφάλειας. Για την πιθανότητα αυτή υπολογίζεται η παροχή του πλημμυρικού φαινομένου, που αποτελεί και τη βασική υδρολογική παράμετρο σχεδιασμού του έργου προστασίας. Πολύ συχνά (π.χ. σε περιπτώσεις ανάσχεσης των πλημμυρών) ενδιαφέρει όχι μόνο η μέγιστη τιμή της πλημμυρικής παροχής, αλλά η όλη χωροχρονική εξέλιξη του πλημμυρικού φαινομένου, πράγμα που αποτελεί επίσης αντικείμενο της υδρολογικής μελέτης. Σε μερικές περιπτώσεις έργων είναι επιτρεπτή η κατάκλυση ορισμένων περιοχών (λεκάνες κατάκλυσης), οπότε και η υδρολογική μελέτη καλείται να εκτιμήσει τους αντίστοιχους χρόνους κατάκλυσης.

2. Έργα αντιπλημμυρικής προστασίας συστημάτων τεχνικών έργων και ειδικότερα:

- φραγμάτων (και συγκεκριμένα υπερχειλιστές δηλαδή μόνιμα έργα για την περίοδο λειτουργίας, αλλά και σήραγγες εκτροπής και προφράγματα, δηλαδή προσωρινά έργα για την περίοδο κατασκευής)·
- συγκοινωνιακών έργων, όπως οδικών αξόνων, γεφυρών, αεροδρομίων, κτλ.
- ειδικών έργων, όπως μεμονωμένων κτιρίων με βαθιά θεμελίωση, στραγγιστικών αντλιοστασίων, κτλ.

Η υδρολογική μελέτη σε αυτή την κατηγορία έργων έχει στόχο παρόμοιο με αυτόν των έργων της προηγούμενης κατηγορίας,

3. Έργα προστασίας από ξηρασίες. Συνήθως τα έργα αυτής της κατηγορίας εντάσσονται στο γενικό σχεδιασμό των έργων συγκέντρωσης και χρονικής αναδιανομής του υδατικού δυναμικού. Η προστασία της πανίδας και χλωρίδας κατά τις έκτακτες περιόδους μεγάλης ξηρασίας γίνεται με διοχέτευση τμήματος των υδατικών εφεδρικών αποθεμάτων ασφαλείας στην κατανάλωση. Για το σκοπό αυτό είναι συχνά απαραίτητη η κατασκευή και χρήση εφεδρικών συγκροτημάτων έργων (γεωτρήσεων, αντλιοστασίων, αγωγών, κτλ.). Στους στόχους αυτών των έργων προστίθεται και η προστασία της ποιότητας των υδάτων και

του υδάτινου οικοσυστήματος κατά την περίοδο ξηρασίας. Πράγματι, η αστική, βιομηχανική ή αγροτική ρύπανση που διοχετεύεται στα υδατορεύματα, μπορεί να αποβεί μοιραία σε περιόδους μεγάλης ξηρασίας, ενώ κάτω από κανονικές συνθήκες είναι ανεκτή. Υπάρχει συνεπώς μια κατώτερη παροχή ασφαλείας για κάθε ρυπαινόμενο υδατόρευμα που πρέπει να διατηρείται με τα κατάλληλα έργα εμπλουτισμού. Ανάλογες μελέτες υδρολογικής δίαιτας γίνονται για τις λίμνες (προστασία από ρύπανση και ευτροφισμό) και τις παράκτιες ζώνες εκβολής υδατορευμάτων.

Η συμβολή της υδρολογικής μελέτης στην προστασία από τις ξηρασίες εντοπίζεται τόσο στην εκτίμηση των ελάχιστων φυσικών παροχών, η οποία γίνεται με μεθοδολογίες παρόμοιες με αυτές των δύο προηγούμενων κατηγοριών έργων (με τη διαφορά ότι αντί των μέγιστων παροχών εξετάζονται οι ελάχιστες), όσο και των αναγκαίων παροχών περιβαλλοντικής διατήρησης. Επιπλέον η υδρολογική μελέτη συμβάλλει στην κατάρτιση του προγράμματος εφεδρικών αποθεμάτων και έργων.

4. *Έργα προστασίας από τη συνήθη υδρολογική δίαιτα*: Πρόκειται κυρίως για την προστασία ορισμένων συστημάτων υδραυλικών έργων από προσχώσεις και την προστασία από διαβρώσεις ή προσχώσεις των φυσικών ή καλλιεργημένων εδαφών. Στα έργα αυτής της κατηγορίας συγκαταλέγονται:

- φράγματα συγκράτησης φερτών υλικών·
- έργα διευθέτησης της κοίτης των υδατορευμάτων, για την αποφυγή διάβρωσης ή πρόσχωσής της·
- έργα ορεινής υδρονομίας, δηλαδή προστασίας των εδαφών ορεινών και ημιορεινών λεκανών από πλημμυρικές διαβρώσεις.

Ειδικότερα ο υδρολόγος μηχανικός πρέπει να εκτιμήσει, την εποχιακή και ετήσια εισροή φερτών εδαφικών υλικών στα φράγματα συγκράτησης φερτών υλικών αλλά και τους ταμειυτήρες των φραγμάτων ταμίευσης νερού. Στην τελευταία περίπτωση, από την εκτίμηση της εισροής φερτών προκύπτει ο λεγόμενος νεκρός όγκος του ταμειυτήρα, δηλαδή ο όγκος που θα καταληφθεί κατά τη διάρκεια ζωής του έργου από φερτά υλικά και δεν μπορεί να διατεθεί για άλλη χρήση. Επίσης, θα πρέπει να εκτιμήσει τις αποθέσεις φερτών στα αρδευτικά, αποχε-

τευτικά και αποστραγγιστικά δίκτυα, τις εδαφικές διαβρώσεις από συνήθη απορροή στις ορεινές και ημιορεινές λεκάνες απορροής, τις προσχώσεις των γόνιμων πεδινών εκτάσεων με φερτά υλικά, καθώς και τις οριζοντιογραφικές και υψομετρικές εξελίξεις της κοίτης και των εκβολών στα φυσικά υδατορεύματα, κτλ.

1.4 Τεχνική υδρολογία και διαχείριση υδροσυστημάτων

Όπως προαναφέρθηκε, η ανάπτυξη της τεχνικής υδρολογίας υπαγορεύτηκε ιστορικά από τις ανάγκες του σχεδιασμού των υδραυλικών έργων. Στη σημερινή εποχή, οι ανεπτυγμένες χώρες έχουν ήδη αξιοποιήσει, μέσω κατάλληλων αναπτυξιακών έργων, το μεγαλύτερο ποσοστό του υδατικού δυναμικού τους. Τα υδραυλικά έργα που χρειάζονται για το υπόλοιπο ανεκμετάλλευτο ποσοστό είναι υψηλού, δύσκολα αποσβέσιμου, κόστους, στο οποίο σήμερα πρέπει να προστεθεί και μια σημαντική νέα συνιστώσα, το *περιβαλλοντικό κόστος*. Κατά συνέπεια, η ορθολογικότερη χρήση του νερού και η βελτίωση της διαχείρισης των υπαρκτών υδροσυστημάτων, χωρίς την προσθήκη νέων έργων, αποτελούν προφανείς εναλλακτικές λύσεις. Έτσι, η προσοχή των επιστημόνων και τεχνικών, αλλά και των πολιτικοοικονομικών φορέων, έχει στραφεί προς μη κατασκευαστικές κατευθύνσεις.

Στις λιγότερο ανεπτυγμένες και αναπτυσσόμενες χώρες, στις οποίες συγκαταλέγεται και η Ελλάδα, η κατασκευή υδραυλικών έργων δεν έχει ακόμη ολοκληρωθεί. Ωστόσο, και εδώ η καλύτερη διαχείριση των υδροσυστημάτων αποκτά όλο και μεγαλύτερη σημασία, δεδομένου ότι οι ωφέλειες που προκύπτουν είναι μεγάλες χωρίς να απαιτούνται πολύ σημαντικοί οικονομικοί πόροι, η έλλειψη των οποίων καθιστά δύσκολο το εγχείρημα της κατασκευής πολυδάπανων νέων υδραυλικών έργων.

Η επιστημονική περιοχή της *διαχείρισης υδροσυστημάτων* περιλαμβάνει δύο κλάδους: τη *διαχείριση υδατικών πόρων* και τη *διαχείριση συστημάτων ελέγχου πλημμυρών*.

Η διαχείριση των υδατικών πόρων αποσκοπεί στην καλύτερη κατανόηση του νερού στις διάφορες χρήσεις, λαμβάνοντας υπόψη τεχνικές, οικονομικές, περιβαλλοντικές και κοινωνικές παραμέτρους. Οι χρήσεις νερού γενικά διακρίνονται σε

- καταναλωτικές, που απαιτούν την απομάκρυνση του νερού από το φυσικό υδατικό σύστημα, (ύδρευση, άρδευση, καταναλωτική βιομηχανική χρήση, κτηνοτροφική χρήση) και ρυπαίνουν το νερό κατά τη χρήση του, και
- μη καταναλωτικές (παραγωγή ενέργειας, διατήρηση οικοσυστημάτων, διατήρηση ποιότητας, ιχθυοτροφεία, αναψυχή, ναυσιπλοΐα), στις οποίες το νερό χρησιμοποιείται επί τόπου.

Πρώτο βήμα για την ορθολογική διαχείριση είναι η καλύτερη δυνατή περιγραφή του ανταγωνισμού ανάμεσα στις επιμέρους χρήσεις νερού. Το βήμα αυτό περιλαμβάνει τόσο την οικονομική αποτίμηση καθεμιάς από τις χρήσεις, όσο και τον καθορισμό ελάχιστων ανεκτών ποσοτήτων για κάθε χρήση. Το δεύτερο βήμα είναι η μελέτη των εισόδων του συστήματος, δηλαδή των φυσικών εισροών και απωλειών νερού, και της χωροχρονικής μεταβλητότητάς τους. Το τρίτο βήμα είναι η πληρέστερη δυνατή μαθηματική αναπαράσταση του υδροσυστήματος, των φυσικών περιορισμών του και της λειτουργίας του. Το τέταρτο και τελικό βήμα είναι η βελτιστοποίηση της χωροχρονικής διανομής των υδατικών πόρων στις διάφορες χρήσεις. Η βελτιστοποίηση αυτή αφορά στην αναζήτηση των οικονομικά βέλτιστων λύσεων διανομής των διαθέσιμων ποσοτήτων νερού για την κάλυψη των αναγκών της κατανάλωσης, μεταξύ όλων των τεχνικά δυνατών λύσεων. Στη βελτιστοποίηση λαμβάνεται υπόψη και η ελαχιστοποίηση των δαπανών λειτουργίας και συντήρησης, καθώς και η ικανοποίηση φυσικών, τεχνικών, περιβαλλοντικών και άλλων περιορισμών.

Η διαχείριση των συστημάτων ελέγχου πλημμυρών αποσκοπεί στην απομείωση των καταστροφών που προκαλούν οι πλημμύρες. Σε αυτό τον κλάδο περιλαμβάνονται:

- η ανάπτυξη συστημάτων πρόγνωσης πλημμυρών, με αξιοποίηση μετεωρολογικών προγνώσεων, μετρήσεων υδρομετεωρολογικών μεταβλητών σε πραγματικό χρόνο με χρήση τόσο επίγειων δικτύων μέτρησης, όσο και μετεωρολογικών ραντάρ, κτλ.
- η εκπόνηση σχεδίων έκτακτων αναγκών και η εφαρμογή συστημάτων ενημέρωσης (προειδοποίησης, συναγερμού) του πληθυσμού·
- η εφαρμογή πρακτικών λειτουργίας των αντιπλημμυρικών έργων έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται οι ζημιές από τις πλημμύρες.

Εν όψει αυτών των νέων απαιτήσεων της διαχείρισης υδροσυστημάτων, ο προσανατολισμός της τεχνικής υδρολογίας αλλάζει για να καλύψει τις νέες ανάγκες. Για παράδειγμα, σε ένα υπαρκτό ταμιευτήρα ο υδρολόγος μηχανικός δεν θα επιδιώξει να καθορίσει τη χωρητικότητα του ταμιευτήρα ή την παροχή σχεδιασμού του υπερχειλιστή του, αφού αυτές οι παράμετροι σχεδιασμού είναι δεδομένες. Αντίθετα, θα επιχειρήσει να προσδιορίσει τη μέγιστη δυνατή απόληψη από τον ταμιευτήρα για ένα δεδομένο επίπεδο αξιοπιστίας, ή το ποσοστό ανοίγματος των θυροφραγμάτων του υπερχειλιστή για την ασφαλή παροχέτευση μιας πλημμύρας σε πραγματικό χρόνο. Επιπλέον, οι απαιτήσεις των υδρολογικών μελετών υποστήριξης της διαχείρισης υδροσυστημάτων είναι αυξημένες. Αντί του καθορισμού των παραμέτρων υδρολογικού σχεδιασμού, σήμερα είναι απαραίτητη η ανάπτυξη λεπτομερών υδρολογικών μοντέλων προσομοίωσης και πρόγνωσης της εξέλιξης των υδροσυστημάτων.

Είναι ευνόητο ότι οι αυξημένες απαιτήσεις της διαχείρισης υδροσυστημάτων οδηγούν αναγκαστικά στην αναβάθμιση όλων των δραστηριοτήτων που σχετίζονται με την υδρολογική πληροφορία. Απαιτούνται πυκνότερες (γεωγραφικά και χρονικά) και πιο αξιόπιστες μετρήσεις, χρήση νέων τεχνολογιών τηλεμετρίας, άμεση διαθεσιμότητα δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, βελτιωμένη διαχείριση και επεξεργασία των δεδομένων. Η ανάγκη αναβάθμισης των συστημάτων μετρήσεων γίνεται πιο προφανής στην περίπτωση των συστημάτων πρόγνωσης πλημμυρών.

Μια σημαντική δραστηριότητα που συνδέεται άμεσα με τη διαχείριση των υδροσυστημάτων είναι η *εκτίμηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής* σε αυτά. Είναι γνωστό ότι το κλίμα στον πλανήτη δεν είναι σταθερό χρονικά, αλλά μεταβάλλεται σε όλες τις χρονικές κλίμακες. Τα αίτια των περισσότερων μεταβολών δεν έχουν κατανοηθεί μέχρι σήμερα. Ωστόσο, στα φυσικά αίτια προστίθενται, σήμερα ή στο άμεσο μέλλον, η ανθρωπογενής κλιματική αλλαγή. Ένα από τα βασικότερα αίτια της είναι η αύξηση της συγκέντρωσης του διοξειδίου του άνθρακα (από τις καύσεις άνθρακα, υδρογονανθράκων, κτλ.) καθώς και των άλλων αερίων θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα. Η υδρολογία, σε συνεργασία με άλλες επιστήμες προσπαθεί να εκτιμήσει τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, τόσο στη φυσική προσφορά των υδατικών πόρων, όσο και στην πλημμυρογένεση, και να διερευνήσει στη συνέχεια τη λειτουργία και

διαχείριση των υδροσυστημάτων κάτω από συνθήκες κλιματικής αλλαγής.

1.5 Χαρακτηριστικές ιδιότητες του νερού

Αφού είδαμε στις προηγούμενες ενότητες το αντικείμενο, το ιστορικό και τη σημασία της υδρολογίας, και ειδικότερα της τεχνικής υδρολογίας, θα ασχοληθούμε σε αυτή την ενότητα με την “πρώτη ύλη” της, το φυσικό νερό δίνοντας τις πιο χαρακτηριστικές φυσικοχημικές ιδιότητές του. Αν και μας είναι πολύ οικείο, το νερό είναι μια “παράξενη” ουσία με μοναδικές ιδιότητες, όπως φαίνεται παρακάτω:

1. Αφθονία του νερού στη Γη

Το νερό παρουσιάζει ασυνήθιστα μεγάλη αφθονία στη Γη, καθοριστική της εικόνας της επιφάνειας της γης (καλύπτει το 70%) . Όπως φαίνεται στον Πίν. 1.4, πάνω από 1.4×10^9 km³ νερού συναντώνται στον πλανήτη, από τα οποία το 96.5% βρίσκεται στους ωκεανούς, ενώ μόνο το 2.5% είναι γλυκό νερό.

2. Ταυτόχρονη παρουσία του στις τρεις φάσεις (στερεή, υγρή, αέρια)

Ανάλογα με τις συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης, η φυσική εμφάνιση του νερού στη Γη απαντά και στις τρεις φάσεις: στερεή, υγρή και αέρια. Ασφαλώς, η υγρή φάση κυριαρχεί (ποσοστό 98.2%), αλλά ωστόσο είναι καθοριστική για τα μετεωρολογικά και υδρολογικά φαινόμενα η παρουσία του σε στερεή φάση (1.76%) και αέρια φάση (0.0009%). Από τους πλανήτες του Ηλιακού Συστήματος, μόνο η Γη έχει το προνόμιο να διαθέτει την πλειονότητα του νερού σε υγρή μορφή. Στους εσωτερικούς πλανήτες (Ερμής, Αφροδίτη) το νερό απαντά σε αέρια μορφή, εξ αιτίας των μεγάλων θερμοκρασιών. Αντίστροφα, στους εξωτερικούς πλανήτες (Άρης, Δίας, Ουρανός, Ποσειδών, Πλούτων) το νερό απαντά σε στερεή μορφή, εξ αιτίας των μικρών θερμοκρασιών.*

* Έχει αποδειχτεί ότι στο μακρινό παρελθόν στον Άρη υπήρχε κυκλοφορία νερού σε υγρή μορφή, αποτέλεσμα της οποίας ήταν ο σχηματισμός μεγάλων ποταμών με μήκη της τάξης των 2000 km και πλάτη της τάξης των 100 km. Οι κοίτες των ποταμών αυτών έχουν αποκαλυφθεί στις φωτογραφίες που τραβήχτηκαν από τα διαστημόπλοια Mariner και Viking. Το γεγονός αυτό έδωσε

Πίν. 1.4 Παρουσία του νερού στη Γη (πηγή: Shiklomanov and Sokolov, 1983)

Μορφή νερού	Συνολική ποσότητα		Ποσότητα γλυκού νερού	
	km ³ ή 10 ¹² kg	%	km ³ ή 10 ¹² kg	%
Ωκεανοί	1 338 000 000	96.54	—	—
Παγετώνες, μόνιμα χιόνια, υπόγειοι πάγοι	24 364 100	1.758	24 364 100	69.55
Υπόγεια νερά και εδαφική υγρασία	23 416 500	1.690	10 546 500	30.11
Λίμνες και έλη	187 870	0.014	102 470	0.293
Ατμοσφαιρικό νερό	12 900	0.0009	12 900	0.037
Ποταμοί	2 120	0.0002	2 120	0.006
Βιολογικό νερό	1 120	0.0001	1 120	0.003
Σύνολο	1 385 985 622	100	35 029 210	100

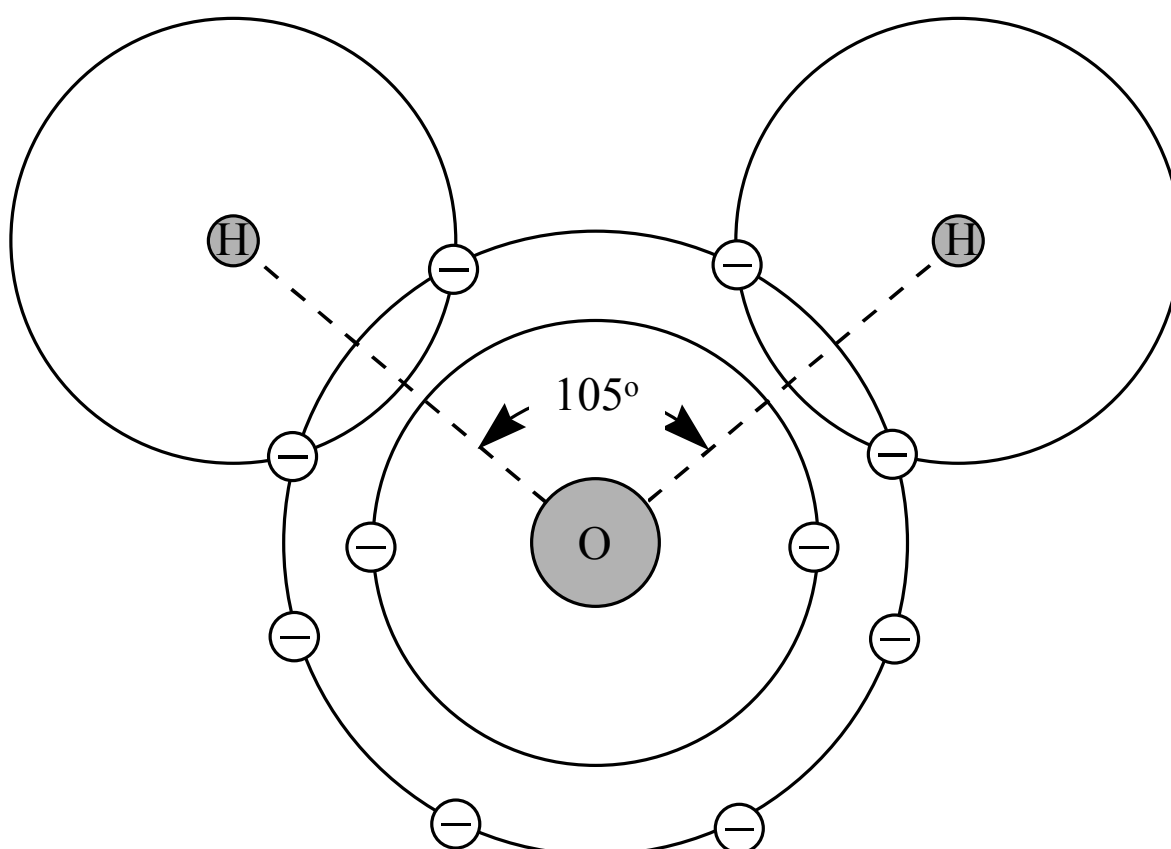
3. Συμπεριφορά του νερού στις αλλαγές φάσης

Η γενική συμπεριφορά του νερού καθορίζεται από την δομή του μορίου του H₂O. Τα άτομα του υδρογόνου ενώνονται με το άτομο του οξυγόνου με ισχυρούς ομοιοπολικούς δεσμούς, σχηματίζοντας ένα ασύμμετρο μόριο, όπου η γωνία ανάμεσα στα άτομα του υδρογόνου είναι 105° (Σχ. 1.2). Αυτή η ασυμμετρία έχει αποτέλεσμα το μόριο του νερού να είναι πολικό και η πολικότητα δημιουργεί δυνάμεις ανάμεσα στα μόρια, οι οποίες είναι γνωστές ως *δεσμοί υδρογόνου*. Οι δεσμοί αυτοί είναι 10-50 φορές ασθενέστεροι από τους ομοιοπολικούς δεσμούς ανάμεσα στα άτομα υδρογόνου και οξυγόνου μέσα στο μόριο. Σε θερμοκρασία 0°C (σε συνθήκες κανονικής ατμοσφαιρικής πίεσης και στη συνήθη, όχι τελείως καθαρή μορφή του νερού*) η κινητική ενέργεια των μορίων είναι αρκετά χαμηλή και έτσι οι δεσμοί υδρογόνου μπορούν να διατάξουν τα μόρια του νερού σε ένα κανονικό τριδιάστατο κρυσταλλικό πλέγμα. Το νερό τότε παγώνει, δηλαδή

έναυσμα για ενδιαφέρουσες έρευνες σχετικά με τη γεωμορφολογία, την παλαιο-υδρολογία και την κλιματολογία του Αρη (U.S. Committee on Opportunities in the Hydrological Sciences, 1992, σ. 34).

* Μια αξιοσημείωτη ιδιότητα του νερού είναι ότι σε καθαρή μορφή μπορεί να φτάσει σε θερμοκρασίες μέχρι -31°C χωρίς να παγώσει.

μετατρέπεται από την υγρή στη στερεή φάση. Τα μόρια του νερού σε αυτή την κρυσταλλική διάταξη καταλαμβάνουν περισσότερο χώρο απ' όσο καταλαμβάνουν στην υγρή φάση. Αυτό έχει αποτέλεσμα η πυκνότητα του πάγου να είναι μικρότερη από την πυκνότητα του νερού σε υγρή φάση (91.7% σε θερμοκρασία 0°C). Ελάχιστες άλλες ουσίες έχουν παρόμοια συμπεριφορά κατά την πήξη τους. Αυτή η ιδιότητα του νερού έχει ιδιαίτερα σημαντικές συνέπειες:



Σχ. 1.2 Σχηματική παράσταση του ασύμμετρου μορίου του νερού. Η πάνω πλευρά εμφανίζεται με συγκέντρωση θετικού φορτίου, λόγω των δύο πυρήνων υδρογόνου, ενώ η κάτω πλευρά έχει αρνητικό φορτίο, λόγω των δύο ελεύθερων ζευγών ηλεκτρονίων.

- Επιτρέπει στους πάγους των ποταμών, των λιμνών και των θαλασσών να επιπλέουν. Αν η πυκνότητα του πάγου ήταν μεγαλύτερη, τότε οι πάγοι θα βυθίζονταν, με καταστροφικά αποτελέσματα για τις βιολογικές συνθήκες.
- Καθιστά το νερό σημαντικό παράγοντα γεωλογικών διεργασιών. Το πάγωμα του νερού σε κοιλότητες ή ρωγμές πετρωμάτων αναπτύσσει τεράστιες πιέσεις (ακόμη και πάνω από 200 000 kPa) και

μπορεί έτσι να σπάσει σε κομμάτια ακόμη και τον πιο ανθεκτικό βράχο.

- Δημιουργεί κινδύνους για τα υδραυλικά έργα. Αν το νερό παγώσει μέσα σε σωλήνες όπου κυκλοφορεί υπό πίεση, μπορεί να τους σπάσει.

Όταν η θερμοκρασία αυξάνεται στους 100°C (σε συνθήκες κανονικής ατμοσφαιρικής πίεσης) η κινητική ενέργεια των μορίων μπορεί να σπάσει τους δεσμούς υδρογόνου, και έτσι το νερό μεταπίπτει μαζικά στην αέρια φάση. Αλλά και σε μικρότερες θερμοκρασίες, ορισμένα μόρια νερού στην επιφάνεια αποκτούν στιγμιαία μεγάλη κινητική ενέργεια και μπορούν να διαφεύγουν προς τον αέρα, μετατρέπόμενα σε υδρατμούς. Έτσι εξηγείται η παρουσία υδρατμών σε τυπικές συνθήκες ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας. Ασφαλώς αυτή η ιδιότητα δεν χαρακτηρίζει μόνο το νερό, αλλά και πολλά άλλα υγρά.

4. Μεγάλη θερμοχωρητικότητα: κλιματικός θερμοστάτης

Μια δεδομένη μάζα νερού, απορροφά (αντίστροφα, αποδίδει) πολύ περισσότερη θερμότητα, για να αυξήσει (αντίστροφα, να μειώσει) τη θερμοκρασία της κατά 1°C, από σχεδόν κάθε άλλη κοινή ουσία ίσης μάζας. Η ποσότητα αυτής της θερμότητας ονομάζεται *ειδική θερμότητα* ή *θερμοχωρητικότητα* και είναι περίπου 1 cal / (g °C) (= 4187 J / (kg K)). Η μεγάλη θερμοχωρητικότητα του νερού σημαίνει μεγάλη θερμική αδράνεια και έχει αξιοσημείωτες συνέπειες:

- Οι ωκεανοί, αποτελώντας τον κλιματικό θερμοστάτη της Γης, ρυθμίζουν καθοριστικά το κλίμα της. Η θερμοκρασία τους διακυμαίνεται σε πολύ μικρότερο εύρος σε σχέση με τη θερμοκρασία της ξηράς. Οι θερμικές διαφορές ξηράς - θάλασσας επάγουν ατμοσφαιρικά φαινόμενα, τα οποία, μεταφέροντας θερμότητα από και προς τη θάλασσα, σταθεροποιούν και το κλίμα της ξηράς.
- Οι βιολογικοί (ζωικοί και φυτικοί) οργανισμοί χρησιμοποιούν το νερό για να σταθεροποιήσουν τη θερμοκρασία τους, κάτι που είναι απαραίτητο για τη λειτουργία της ζωής, δεδομένου ότι οι πρωτεΐνες είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες στις θερμοκρασιακές διαφορές.
- Το νερό χρησιμοποιείται ως αποτελεσματικό μέσο κατάσβεσης των πυρκαγιών.

5. *Μεγάλη ειδική λανθάνουσα θερμότητα: αποτελεσματικός εναλλάκτης θερμότητας*

Μια δεδομένη μάζα νερού, όταν αλλάζει από την υγρή στην αέρια φάση (ή αντίστροφα) απορροφά (αντίστροφα, αποδίδει) περισσότερη θερμότητα από σχεδόν κάθε άλλη κοινή ουσία ίσης μάζας. Η ποσότητα της θερμότητας που συνδέεται με αυτή την αλλαγή φάσης ονομάζεται *λανθάνουσα θερμότητα της εξάτμισης* και είναι ίση με 595.9 cal / g ($= 2.5 \times 10^6 \text{ J / kg}$). Αυτή η ασυνήθιστα μεγάλη τιμή είναι 7.5 φορές μεγαλύτερη από τη λανθάνουσα θερμότητα της τήξης των πάγων και άλλες τόσες φορές μεγαλύτερη από αυτή που απαιτείται για να θερμανθεί το νερό από τους 20°C στους 100°C . Αυτή η ιδιότητα του νερού το κάνει καθοριστικό παράγοντα στις διεργασίες ενεργειακών ανταλλαγών της υδρογείου. Έτσι περίπου το 23% της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην ατμόσφαιρα της Γης (ή το 45% της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια) απορροφάται από τη διεργασία της εξάτμισης. Η ίδια ποσότητα ενέργειας αποδίδεται κατά τη διαδικασία της συμπύκνωσης των υδρατμών στην ατμόσφαιρα, η οποία δημιουργεί τα σύννεφα. Με τον τρόπο αυτό τροφοδοτείται ενεργειακά ο υδρολογικός κύκλος και ανακατανέμεται αέναα το νερό και η ενέργεια στον πλανήτη.

6. *Αποτελεσματικός διαλύτης: γεωμορφολογικός ρυθμιστής και ελιξίριο ζωής*

Η ασυνήθιστη μοριακή δομή του νερού το καθιστά ένα εξαιρετικά αποτελεσματικό διαλύτη: ελάχιστα είναι τα υλικά που δεν διαλύονται από το νερό σε κάποιο βαθμό*, ενώ κανένα άλλο υγρό δεν μπορεί να διαλύσει τόση μεγάλη ποικιλία ουσιών. Αυτή η ιδιότητα έχει σημαντικές συνέπειες:

- Το νερό συμμετέχει καθοριστικά στην κυκλοφορία διάφορων χημικών ουσιών στην υδρόγειο (κύκλος του διοξειδίου του άνθρακα, κύκλος του αζώτου κτλ.)
- Η διαβρωτική και μεταφορική δύναμη του νερού είναι εξαιρετικά μεγάλη, πράγμα που το καθιστά σημαντικό παράγοντα της αέναης διαμόρφωσης της γεωλογίας και της μορφής της Γης. Χαρακτηρι-

* Για παράδειγμα, κάθε φορά που πίνουμε ένα ποτήρι νερό, το νερό περιέχει μια μικρή ποσότητα γαλιού σε διάλυση.

στική είναι η διαβρωτική ικανότητά του ως προς τους ασβεστολίθους (με παρουσία διοξειδίου του άνθρακα, το οποίο προέρχεται από την ατμόσφαιρα και διαλύεται από το νερό κατά τη διάρκεια της βροχής). Τα αποτελέσματα της διάβρωσης των ασβεστολίθων είναι εντυπωσιακά: υπόγειοι αγωγοί, σπήλαια, σταλακτίτες, σταλαγμίτες κτλ.

- Εξαιτίας της εκλεκτικής διαπερατότητας των κυτταρικών μεμβρανών σε διάφορες ουσίες διαλυμένες στο νερό, το τελευταίο αποτελεί ελιξίριο της ζωής, με την έννοια ότι μεταφέρει τα θρεπτικά συστατικά στα μεμονωμένα κύτταρα, στους ζωικούς οργανισμούς (ως αίμα ή λέμφος) και στους φυτικούς οργανισμούς.
- Το νερό είναι το πιο κοινό και αποτελεσματικό υγρό πλύσης.

7. Συνεκτικότητα

Η σχετικά μικρή συνεκτικότητα του νερού σε σχέση με άλλα κοινά υγρά (περίπου $1 \times 10^{-3} \text{ kg / (m s)}$, ή κινηματική συνεκτικότητα περίπου $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$), το καθιστά λεπτόρευστο και ευνοεί τη γρήγορη κίνησή του στην επιφάνεια της γης, στους ποταμούς και τα μικρότερα υδατορεύματα (όπως και στους τεχνητούς αγωγούς). Η μικρή συνεκτικότητα ευνοεί την πλημμυρογένεση, μια διαδικασία που, αν και είναι κατ' αρχήν επικίνδυνη για τον πολιτισμό μας, είναι απαραίτητη για τη λειτουργία του πλανήτη ως συνόλου.

8. Επιφανειακή τάση

Στην υπόγεια κίνηση του νερού μέσα σε πορώδη μέσα, αλλά και στην κίνησή του στην ατμόσφαιρα, στη μορφή των νεφών και των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων, μια άλλη ιδιότητα του νερού, η επιφανειακή τάση, αποκτά σημασία. Αυτή βέβαια είναι μια κοινή ιδιότητα όλων των υγρών. Πρόκειται για την έλξη των μορίων του υγρού μεταξύ τους, η οποία κάνει την εξωτερική επιφάνεια του υγρού να συμπεριφέρεται σαν ελαστική μεμβράνη. Αυτή η συμπεριφορά είναι πιο έκδηλη σε σταγόνες ενός υγρού. Οι σταγόνες τείνουν να έχουν σφαιρικό σχήμα, που είναι το σχήμα με την μικρότερη επιφάνεια για δεδομένο όγκο υγρού. Στην πραγματικότητα βέβαια δεν υπάρχει καμιά μεμβράνη, αλλά η συνισταμένη των δυνάμεων έλξης ανάμεσα στα μόρια του υγρού μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι μια δύναμη παράλληλη με την επιφάνειά του που δρα προς κάθε κατεύθυνση. Η επιφα-

νειακή τάση του νερού σε θερμοκρασία 20°C είναι 7.4×10^{-2} N/m και βέβαια μικραίνει σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες. Στο νερό της ατμόσφαιρας η επιφανειακή τάση έχει αποτέλεσμα το σχηματισμό σταγόνων. Στο υπόγειο νερό των πορωδών μέσων η επιφανειακή τάση έχει αποτέλεσμα τη δημιουργία ανυψωτικών δυνάμεων, δηλαδή δυνάμεων που αντίκεινται στη βαρύτητα, γνωστών ως *δυνάμεων τριχοειδούς*. Οι δυνάμεις αυτές έχουν αποτέλεσμα την *τριχοειδή ανύψωση* του νερού πάνω από την ελεύθερη στάθμη του, σε ύψη που είναι αντιστρόφως ανάλογα των διαστάσεων των εδαφικών πόρων. Το φαινόμενο αυτό, όπως θα δούμε πιο κάτω παίζει σημαντικό ρόλο στον υδρολογικό κύκλο και ιδιαίτερα στη διεργασία της εξάτμισης. Εξ άλλου, είναι ζωτικής σημασίας για τα φυτά, τα οποία αξιοποιούν την τριχοειδή ανύψωση για την προς τα πάνω κυκλοφορία των διαλυμένων στο νερό θρεπτικών συστατικών τους.

1.6 Η έννοια του υδρολογικού κύκλου και του υδατικού ισοζυγίου

1.6.1 Οι φυσικές διεργασίες του υδρολογικού κύκλου

Όπως προαναφέρθηκε στην ενότητα 1.1, ο υδρολογικός κύκλος περιγράφει την αέναη κίνηση του νερού ανάμεσα στους ωκεανούς, την ατμόσφαιρα και την ξηρά, που συνοδεύεται και από αλλαγές ανάμεσα στην υγρή, την αέρια και τη στερεή φάση του νερού (Σχ. 1.3). Έτσι το νερό:

- εξατμίζεται* από την θάλασσα και την ξηρά, ανεβαίνοντας κατακόρυφα, υπό μορφή υδρατμών, στην ατμόσφαιρα, αλλά και κινούμενο οριζόντια υπό την επίδραση των ανέμων·
- διαπνέεται* από τα δέντρα και τη βλάστηση, οδηγούμενο και πάλι στην ατμόσφαιρα υπό μορφή υδρατμών·
- συμπυκνώνεται* στην ατμόσφαιρα, σχηματίζοντας σύννεφα·
- κατακρημνίζεται* από την ατμόσφαιρα στη θάλασσα και την ξηρά, σε διάφορες μορφές (βροχή, χιόνι, χαλάζι)·
- κατακρατείται* από τα δέντρα, τη βλάστηση και το έδαφος·
- διηθείται* στο έδαφος εμπλουτίζοντάς το με εδαφική υγρασία·
- επαναφορτίζει* τους ταμιευτήρες υπόγειου νερού·

- απορρέει επιφανειακά, σχηματίζοντας ρέματα και ποτάμια και καταλήγοντας τελικά στη θάλασσα·
- απορρέει υπόγεια, μέσω των πόρων και ρωγμών των γεωλογικών σχηματισμών, και είτε εκφορτίζεται επιφανειακά μέσω των πηγών, είτε εκρέει προς τη θάλασσα.

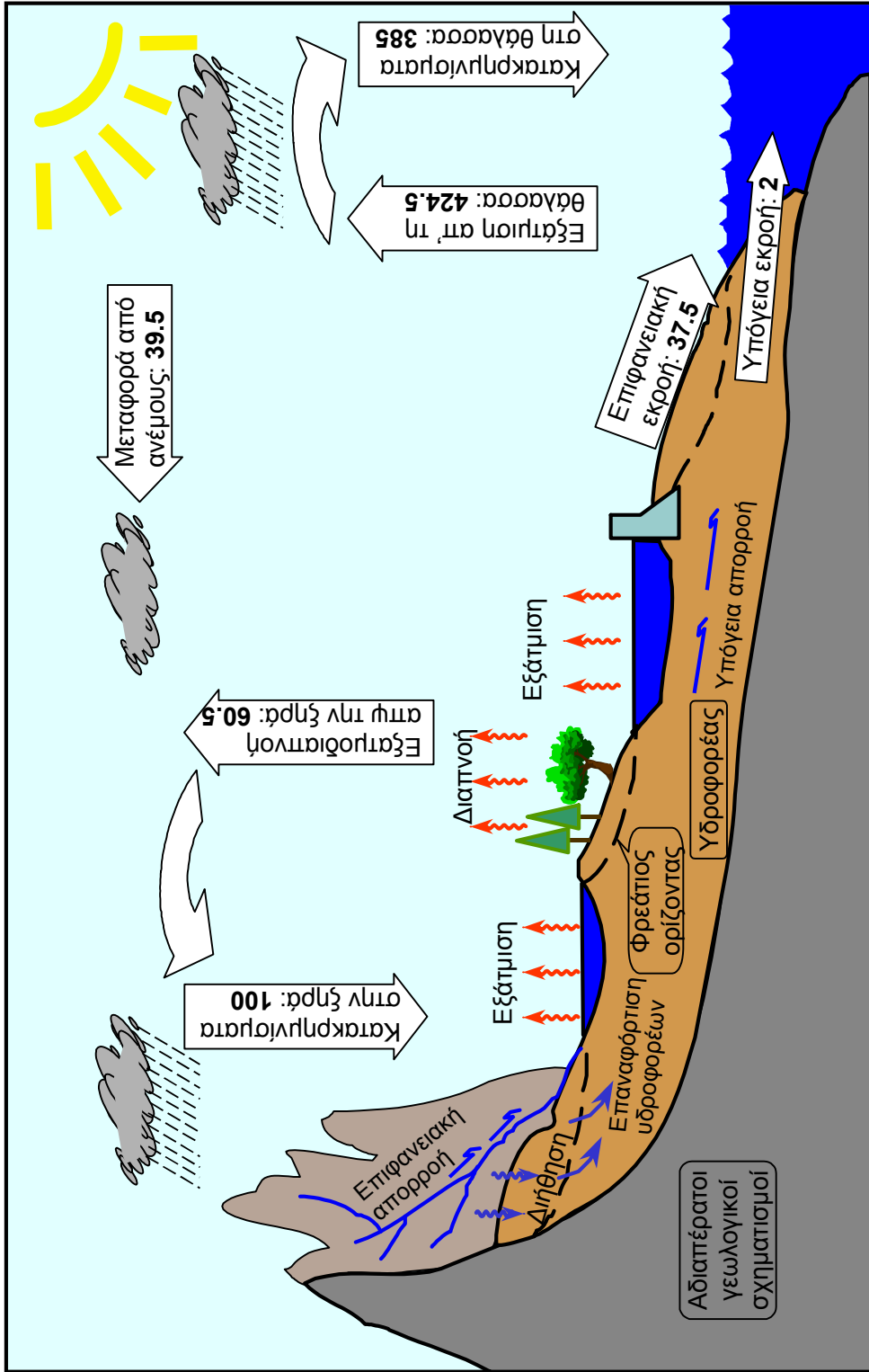
Αυτή η αχανής και αέναη “ατμομηχανή” του νερού τροφοδοτείται ενεργειακά από την ηλιακή ενέργεια (βλ. εδάφιο 1.6.4) και οδηγείται από τη βαρύτητα.

Στα επόμενα κεφάλαια θα δούμε αναλυτικά όλες τις επί μέρους φυσικές διεργασίες που σχηματίζουν τον υδρολογικό κύκλο. Όπως είδαμε προηγουμένως, η τεχνική υδρολογία ενδιαφέρεται πρωτίστως για την επιφανειακή απορροή, αφού αυτή δίνει τους σημαντικότερους υδατικούς πόρους, αλλά και δημιουργεί τους υδρολογικούς κινδύνους. Αλλά και η υπόγεια απορροή συνδέεται με την αξιοποίηση των υδατικών πόρων και αποτελεί σημαντικό αντικείμενο της τεχνικής υδρολογίας. Εξ άλλου, τα χερσαία ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα συνδέονται με την επιφανειακή και υπόγεια απορροή με τη μορφή του αιτίου - αποτελέσματος. Τέλος η χερσαία εξάτμιση και η διαπνοή, οι οποίες αποδίδονται με το συγχωνευτικό όρο εξατμοδιαπνοή, αποτελούν τις αναγκαστικές υδρολογικές απώλειες, δηλαδή το τμήμα εκείνο των κατακρημνισμάτων που δεν απορρέει και επομένως δεν είναι διαθέσιμο για εκμετάλλευση. Έτσι, η απορροή (επιφανειακή και υπόγεια), οι κατακρημνίσεις και η εξατμοδιαπνοή αποτελούν τις πιο χαρακτηριστικές διεργασίες του υδρολογικού κύκλου και τα μεγέθη τους ποσοτικοποιούν την εικόνα των υδατικών πόρων μιας περιοχής σε μια πρώτη μακροσκοπική προσέγγιση και σε αδρή χρονική κλίμακα. Σε λεπτομερέστερη προσέγγιση ή χρονική κλίμακα, υπεισέρχονται και οι υπόλοιπες διεργασίες του υδρολογικού κύκλου που αναφέρθηκαν πιο πάνω.

1.6.2 Ποσοτική έκφραση των συνιστωσών του υδρολογικού κύκλου

Οι κύριες μεταβλητές της υδρολογίας διακρίνονται σε:

- αποθηκεύσεις ή αποθέματα νερού στα υδάτινα σώματα, δηλαδή τις χερσαίες επιφανειακές εμφανίσεις νερού (π.χ. ποτάμια, φυσικές λίμνες, τεχνητοί ταμιευτήρες), τους υπεδάφιους ταμιευτήρες νερού και τις θάλασσες, και



Σχ. 1.3 Σχηματική παράσταση του υδρολογικού κύκλου και του μέσου ετήσιου υδατικού ισοζυγίου της Γης. Οι μέσες ετήσιες διακινήσεις νερού έχουν εκφραστεί ως ποσοστό (%) επί της ετήσιας ποσότητας των ατμοσφαιρικών κατακρηνισμάτων στο χερσαίο τμήμα της Γης. Μία ποσοστιαία μονάδα αντιστοιχεί σε 1190 km³/έτος. Τα δεδομένα προέρχονται από τους Shiklomanov and Sokolov (1983) και Dingman (1994).

- *διακινήσεις* νερού από ένα υδάτινο σώμα (ή και την ατμόσφαιρα) σε ένα άλλο.

Κατά τη μελέτη των συνιστωσών του υδρολογικού κύκλου ενδιαφέρουν κατ' αρχήν οι μάζες των αποθηκεύσεων ή διακινήσεων, ενώ στην ποσοτική περιγραφή υπεισέρχεται πάντα και ο χρόνος, λόγω της χρονικής μεταβλητότητας των φαινομένων. Ωστόσο, αντί της μάζας χρησιμοποιείται κατά κανόνα ως βασική μεταβλητή ο όγκος νερού, αφού γίνει πάντα αναγωγή σε υγρή φάση. Για τη μετατροπή της μάζας σε όγκο, το νερό θεωρείται ασυμπίεστο* με πυκνότητα 1000 kg/m^3 .

Στις μεταβλητές που εκφράζουν αποθήκευση νερού, η ποσοτική έκφραση γίνεται με βάση τον αποθηκευμένο όγκο. Ένδειξη του μεγέθους της αποθήκευσης δίνει συχνά και κάποια χαρακτηριστική στάθμη (π.χ. στάθμη λίμνης). Οι μεταβολές αποθήκευσης εκφράζονται είτε ως διαφορές όγκων σε ένα δεδομένο χρονικό διάστημα, είτε ως ρυθμοί μεταβολής όγκου στη μονάδα του χρόνου, οπότε και έχουν διαστάσεις παροχής.

Στις μεταβλητές που εκφράζουν διακινήσεις, η ποσοτική έκφραση γίνεται με βάση τα ακόλουθα τέσσερα μεγέθη:

- τον *όγκο* που διακινήθηκε σε ένα δεδομένο χρονικό διάστημα (π.χ. όγκος κατακρημνισμάτων 100 hm^3 † σε μια περιοχή για ένα έτος).
- την *παροχή*, δηλαδή το ρυθμό διακίνησης στη μονάδα του χρόνου (π.χ. παροχή ποταμού $5 \text{ m}^3/\text{s}$ σε μια διατομή για μια δεδομένη στιγμή).
- το *ισοδύναμο* (ή *ανηγμένο*) *ύψος*, το οποίο προκύπτει αν διαιρεθεί ο όγκος που διακινήθηκε σε ένα δεδομένο χρόνο με την οριζόντια επιφάνεια της έκτασης, στην οποία αναφέρεται η διακίνηση (π.χ. ύψος κατακρημνισμάτων — ή και ύψος βροχής, όπως λέγεται συχνότερα — 800 mm σε μια περιοχή για ένα έτος).
- την *ένταση*, δηλαδή το ρυθμό μεταβολής του ύψους στη μονάδα του χρόνου (π.χ. ένταση βροχής 10 mm/h).

* Σε μερικά προβλήματα υπόγειων ροών είναι απαραίτητο να θεωρείται το νερό ως συμπίεστο (βλ. κεφάλαιο 6). Ωστόσο, αυτό δεν επηρεάζει στην πράξη την ποσοτική έκφραση του νερού σε μονάδες όγκου.

† Υπενθυμίζεται ότι το κυβικό εκατόμετρο (hm^3), το οποίο αποτελεί τη συχνότερα χρησιμοποιούμενη μονάδα όγκου στην τεχνική υδρολογία, είναι ίσο με 10^6 m^3 .

Η μετατροπή από ένα τύπο έκφρασης σε ένα άλλο είναι πολύ απλή, όπως φαίνεται στην Εφαρμογή που ακολουθεί. Επισημαίνεται ότι το ύψος και η ένταση μπορεί να αναφέρονται είτε σε μια δεδομένη επιφάνεια, είτε σε ένα σημείο (όταν η επιφάνεια τείνει στο μηδέν). Αντίστοιχα, η παροχή και η ένταση, μπορεί να είναι είτε χρονικά μέσες τιμές για μια δεδομένη διάρκεια, είτε στιγμιαίες τιμές (όταν η διάρκεια τείνει στο μηδέν).

Η εφαρμογή της εξίσωσης διατήρησης της μάζας σε ένα δεδομένο (με καθορισμένα γεωμετρικά όρια) όγκο αναφοράς οδηγεί στη λεγόμενη *εξίσωση υδατικού ισοζυγίου*, σύμφωνα με την οποία, σε οποιοδήποτε χρονικό διάστημα, το αλγεβρικό άθροισμα των διακινήσεων και των διαφορών αποθήκευσης στον όγκο αναφοράς είναι ίσο με μηδέν. Σε επόμενα κεφάλαια θα δούμε ειδικότερες εκφράσεις της εξίσωσης ισοζυγίου, ενώ μια πρώτη επαφή με αυτή δίνεται στην Εφαρμογή 1.6.2.

Εφαρμογή 1.6.2

Λίμνη έκτασης 5 km² τροφοδοτείται από τα επιφανειακά νερά συνολικής εδαφικής έκτασης 42 km². Η υπόγεια τροφοδοσία της λίμνης είναι αμελητέα, αλλά υπάρχουν σημαντικές υπόγειες διαφυγές μέσω καταβόθρων στις όχθες της λίμνης. Αν η μέση ετήσια βροχόπτωση στη λίμνη είναι 640 mm, η μέση ετήσια εξάτμιση είναι 1310 mm και η μέση υπερετήσια παροχή τροφοδοσίας της λίμνης από επιφανειακά νερά είναι 0.25 m³/s να εκτιμηθούν (α) οι μέσοι ετήσιοι όγκοι εισροών και εκροών από τη λίμνη (β) οι μέσοι ετήσιοι όγκοι εισροών και εκροών από την εδαφική έκταση που τροφοδοτεί τη λίμνη και τα αντίστοιχα ανηγμένα ύψη, αν θεωρηθεί ότι το μέσο ετήσιο ύψος βροχής είναι ίδιο με αυτό της λίμνης, και (γ) ο μέσος ετήσιος συντελεστής απορροής της εδαφικής έκτασης που τροφοδοτεί τη λίμνη. Να υποτεθεί ότι δεν υπάρχουν ανθρωπογενείς παρεμβάσεις για την αξιοποίηση του νερού της λίμνης.

(α) Το μέσο ετήσιο ύψος βροχόπτωσης είναι $h_p = 640 \text{ mm}$. Ο μέσος ετήσιος όγκος νερού V_p που εισρέει στη λίμνη λόγω της βροχόπτωσης στην επιφάνειά της ($F_\lambda = 5 \times 10^6 \text{ m}^2$) είναι

$$V_p = 0.640 \text{ m} \times 5 \times 10^6 \text{ m}^2 = 3.20 \times 10^6 \text{ m}^3 = 3.20 \text{ hm}^3.$$

Αντίστοιχα, ο μέσος ετήσιος όγκος νερού που εξατμίζεται (V_E) από την επιφάνεια της λίμνης είναι

$$V_E = 1.31 \text{ m} \times 5 \times 10^6 \text{ m}^2 = 6.55 \times 10^6 \text{ m}^3 = 6.55 \text{ hm}^3.$$

Ο μέσος ετήσιος όγκος απορροής (V_Q) που εισρέει στη λίμνη είναι

$$V_Q = 0.25 \times 24 \times 60 \times 60 \times 365.25 = 7.89 \times 10^6 \text{ m}^3 = 7.89 \text{ hm}^3.$$

Απομένει ο υπολογισμός του όγκου V_G που διαφεύγει υπόγεια από τη λίμνη. Στην υπερετήσια χρονική κλίμακα που εξετάζεται μπορεί να θεωρηθεί ότι (κατά μέσο όρο) δεν υπάρχει διαφορά στην αποθήκευση νερού στη λίμνη. Εξ άλλου, αφού δεν υπάρχει ανθρωπογενής αξιοποίηση (απόληψη) του νερού από τη λίμνη, η εξίσωση ισοζυγίου για τη λίμνη μπορεί να γραφεί:

$$V_P + V_Q - V_E - V_G = 0,$$

απ' όπου βρίσκουμε

$$V_G = V_P + V_Q - V_E = 3.20 + 7.89 - 6.55 = 4.54 \text{ hm}^3.$$

(β) Όπως και στη λίμνη, το μέσο ετήσιο ύψος βροχόπτωσης είναι $h_P = 640 \text{ mm}$. Έτσι, ο μέσος ετήσιος όγκος νερού που εισρέει στην εδαφική έκταση ($F_e = 42 \times 10^6 \text{ m}^2$) λόγω της βροχόπτωσης (V_P) είναι

$$V_P = 0.640 \text{ m} \times 42 \times 10^6 \text{ m}^2 = 26.88 \times 10^6 \text{ m}^3 = 26.88 \text{ hm}^3.$$

Ο μέσος ετήσιος όγκος επιφανειακής απορροής (V_Q) ταυτίζεται με τον αντίστοιχο όγκο που εισρέει στη λίμνη, δηλαδή είναι $V_Q = 7.89 \text{ hm}^3$. Αφού η υπόγεια τροφοδοσία της λίμνης είναι ασήμαντη, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι εξίσου ασήμαντη είναι και η υπόγεια διαφυγή από την εδαφική έκταση. Κατά συνέπεια η εξίσωση ισοζυγίου για την εδαφική έκταση γράφεται

$$V_P - V_Q - V_{ET} = 0,$$

όπου V_{ET} ο μέσος ετήσιος όγκος της πραγματικής εξατμοδιαπνοής από την έκταση. Η εξίσωση αυτή μας επιτρέπει να υπολογίσουμε τον τελευταίο αυτό όγκο:

$$V_{ET} = V_P - V_Q = 26.88 - 7.89 = 18.99 \text{ hm}^3.$$

Το ανηγμένο ισοδύναμο ύψος απορροής είναι

$$h_Q = 7.89 \times 10^6 \text{ m}^3 / 42 \times 10^6 \text{ m}^2 = 0.188 \text{ m} = 188 \text{ mm},$$

ενώ το ανηγμένο ύψος εξατμοδιαπνοής είναι

$$h_{ET} = 18.99 \times 10^6 \text{ m}^3 / 42 \times 10^6 \text{ m}^2 = 0.452 \text{ m} = 452 \text{ mm}.$$

Προφανώς ισχύει $h_P - h_R - h_{ET} = 0$.

(γ) Γενικά ο συντελεστής απορροής είναι ένα αδιάστατο μέγεθος που εκφράζει το λόγο του όγκου (ή του ύψους) απορροής προς τον όγκο (ή το ύψος) των κατακρημνισμάτων. Έτσι ο μέσος ετήσιος συντελεστής απορροής της εδαφικής έκτασης του παραδείγματός μας είναι

$$\psi = 188 / 640 = 0.294 = 29.4\%.$$

1.6.3 Το ετήσιο υδατικό ισοζύγιο της Γης

Προηγουμένως (εδάφιο 1.5 και Πίν. 1.4) είδαμε τα συνολικά μεγέθη των αποθεμάτων του νερού της Γης στις διάφορες μορφές τους. Τα μεγέθη αυτά θεωρούνται πρακτικώς στατικά, αφού στην συνήθη υδρολογική χρονική κλίμακα ελάχιστα μεταβάλλονται*. Η δυναμική εικόνα της κυκλοφορίας του νερού στην υδρόγειο αναδύεται από τις ποσότητες των διακινήσεων του νερού ανάμεσα στις διάφορες μορφές (σε μέση ετήσια βάση), οι οποίες δίνονται σε απόλυτα μεγέθη στον Πίν. 1.5 και πιο παραστατικά, σε σχετικά μεγέθη, στο Σχ. 1.3. Άλλωστε, οι διακινήσεις (και όχι τα αποθέματα) δίνουν και την εικόνα των υδατικών πόρων της Γης (ή και μιας συγκεκριμένης περιοχής), αφού οι υδατικοί πόροι είναι από τη φύση τους *ανανεώσιμοι* και *όχι αποθεματικοί* (σε αντίθεση π.χ. με τους ορυκτούς πόρους)†.

Τα πιο χαρακτηριστικά στοιχεία που παρατηρούμε μελετώντας τον Πίν. 1.5 και το Σχ. 1.3 είναι ότι (α) το χερσαίο τμήμα της Γης τροφοδοτείται από το θαλάσσιο, μέσω των μηχανισμών της εξάτμισης και της μεταφοράς από τους ανέμους, με υδρατμούς (δηλαδή νερό σε καθαρή μορφή) που φτάνουν στο 39.5% των χερσαίων κατακρημνισμάτων (το υπόλοιπο 60.5% των χερσαίων κατακρημνισμάτων προέρχεται από τη χερσαία εξατμοδιαπνοή)· (β) η ίδια ποσότητα (39.5%) οδηγείται μέσω της επιφανειακής και υπόγειας απορροής από την ξηρά στη θάλασσα, για να κλείσει έτσι ο υδρολογικός κύκλος και το υδατικό ισοζύγιο της υδρόγειου· (γ) από τη συνολική απορροή, η οποία αποτελεί και την οροφή του εκμεταλλεύσιμου υδατικού δυναμικού, τη μερίδα του λέοντος παίρνει η επιφανειακή απορροή (η επιφανειακή εκροή στη θάλασσα είναι περίπου 20 φορές μεγαλύτερη από την υπόγεια εκροή).

* Βέβαια σε γεωλογική χρονική κλίμακα υπάρχουν αξιόλογες μεταβολές· έτσι, στις εποχές των παγετώνων αυξάνεται η ποσότητα του νερού στους παγετώνες και μειώνεται η ποσότητα στους ωκεανούς.

† Τα μεγάλα υπόγεια υδατικά αποθέματα στη συνήθη υδρολογική κλίμακα μπορούν να θεωρηθούν σε ένα βαθμό ως αποθεματικοί πόροι, αφού ο μέσος χρόνος παραμονής τους μπορεί να είναι της τάξης των χιλιετιών (βλ κεφάλαιο 6). Και πάλι όμως, η ορθολογική διαχείριση των υπόγειων υδατικών πόρων επιβάλλει την εκμετάλλευση μόνο ενός μικρού μέρους τους, το οποίο μπορεί να ανανεώνεται σε χρονική κλίμακα π.χ. ετήσια ή λίγων ετών.

Πίν. 1.5 Οι μέσες ετήσιες φυσικές διακινήσεις του νερού της Γης.^α

Επιφάνεια αναφοράς	Έκταση, 10 ⁹ km ²	Διακίνηση	Μέσος ετήσιος όγκος, 10 ³ km ³	Μέσο ετήσιο ύψος, mm	Μέση παροχή, km ³ /s	Ποσοστό επί των κατακρημνισμάτων, %
Σύνολο επιφανείας Γης	510.0	Κατακρημνίσματα = Εξατμοδιαπνοή	577	1131	18.28	100.0
Ωκεανοί	361.1	Κατακρημνίσματα	458	1268	14.51	100.0
		Εξάτμιση	505	1399	16.00	110.3
Ξηρά	148.9	Κατακρημνίσματα	119	799	3.77	100.0
		Εξατμοδιαπνοή	72	484	2.28	60.5
		Συνολική απορροή	47	316	1.49	39.5
		Επιφανειακή συνιστώσα απορροής ^β	44.7	300	1.42	37.6
		Υπόγεια συνιστώσα απορροής ^β	2.3	16	0.07	1.9

^α Τα δεδομένα προέρχονται από τους Shiklomanov and Sokolov (1983) και Dingman (1994).

^β Η επιφανειακή και η υπόγεια συνιστώσα απορροής αναφέρονται στην έξοδο προς τη θάλασσα.

Το μεγαλύτερο μέρος της επιφανειακής απορροής εκρέει στη θάλασσα από τους μεγάλους ποταμούς της Γης. Παρατηρούμε στον Πίν. 1.6, όπου είναι καταχωρημένα τα χαρακτηριστικά των 16 μεγαλύτερων ως προς την παροχή ποταμών της Γης, ότι αυτοί οι 16 ποταμοί είναι φορείς του 33.8% της συνολικής μέσης ετήσιας επιφανειακής απορροής της υδρογείου (εκροή 15 100 km³ από τα συνολικά 44 700 km³. μόνο ο Αμαζόνιος μεταφέρει το 13.4%).

Πίν. 1.6 Οι 16 μεγαλύτεροι ως προς την παροχή ποταμοί της Γης.^α

Ποταμός	Ήπειρος	Έκταση ^β , 10 ³ km ²	Μήκος, km	Μέση παροχή, m ³ /s	Μέσος ετήσιος όγκος απορροής, km ³	Μέσο ετήσιο ύψος απορροής, mm	Συντε- λεστής απορ- ροής
1. Amazon	N. Αμ.	7180	6275 ^γ	190 000	6000	835	0.47
2. Congo	Αφρική	3822	4666	42 000	1330	340	0.25
3. Yangtzekiang	Ασία	1970	4987	35 000	1100	560	0.50
4. Orinoco	N. Αμ.	1086	2574	29 000	915	845	0.46
5. Brahmaputra	Ασία	589		20 000	630	1070	0.65
6. La Plata	N. Αμ.	2650	3942	19 500	615	235	0.20
7. Yenesei	Ασία	2599	5712	17 800	565	215	0.42
8. Mississippi	B. Αμ.	3224	6262	17 700	560	175	0.21
9. Lena	Ασία	2430	4602	16 300	515	210	0.46
10. Mekong	Ασία	795	4183	15 900	500	630	0.43
11. Ganges	Ασία	1073		15 500	490	455	0.42
12. Irrawaddy	Ασία	431		14 000	440	1020	0.60
13. Ob	Ασία	2950	4505	12 500	395	135	0.24
14. Siking	Ασία	435		11 500	365	840	
15. Amur	Ασία	1843	4666	11 000	350	190	0.32
16. St. Lawrence	B. Αμ.	1030	3459	10 400	330	310	0.33
Σύνολο ή μέση τιμή		34 107		478 100	15 100	504	0.40
Αχελώος ^δ		4.9	220	147	4.3	951	0.60

^α Τα δεδομένα προέρχονται κυρίως από τον Dingman (1994, σ. 56) και συμπληρωματικά από τον Νικολάου (1975, σ. 2-16).

^β Έκταση της λεκάνης απορροής, βλ. εδάφιο 1.7.1.

^γ Με έντονα στοιχεία σημειώνονται τα απολύτως μεγαλύτερα μεγέθη. Ο μεγαλύτερος σε μήκος ποταμός είναι ο Νείλος (που δεν περιλαμβάνεται στον πίνακα), με μήκος 6521 km.

^δ Ο Αχελώος έχει συμπεριληφθεί στον πίνακα για λόγους σύγκρισης. Τα δεδομένα προέρχονται από τη μελέτη των ΕΥΔΕ Αχελώου και Υδροεξυγιαντικής (1995).

Εξ αιτίας της ιδιαίτερης σημασίας των μεγάλων ποταμών της Γης (και όχι μόνο των καταχωρημένων στον Πίν. 1.6) ως υδατικών πόρων, και του γεγονότος ότι πολλοί απ' αυτούς διασχίζουν περισσότερες από μία χώρες (διακρατικοί ποταμοί), η εκμετάλλευση και διαχείριση των υδάτων τους έχει γίνει αντικείμενο διακρατικών διενέξεων. Προβλέπεται ότι η εντεινόμενη εκμετάλλευση των υδατικών πόρων για την κάλυψη των διαρκώς αυξανόμενων υδατικών αναγκών θα οξύνει στο μέλλον τα προβλήματα αυτού του είδους.*

Για λόγους σύγκρισης έχει καταχωρηθεί στον Πίν. 1.6 και ο Αχελώος, ο μεγαλύτερος σε παροχή από τους μη διακρατικούς ποταμούς της Ελλάδας. Παρατηρούμε ότι η παροχή του δεν φτάνει ούτε στο 0.5% της μέσης τιμής των παροχών των 16 μεγαλύτερων ποταμών της Γης (αυτό είναι αποτέλεσμα της μικρής, σχετικά με τους μεγάλους ποταμούς, έκτασής του). Ωστόσο, τηρουμένων των αναλογιών, ο Αχελώος δεν παύει να αποτελεί ένα ιδιαίτερα σημαντικό υδατικό πόρο για την Ελλάδα. Είναι μάλιστα αξιοσημείωτο το μεγάλο ύψος απορροής και ο μεγάλος συντελεστής απορροής του που συγκρίνονται με αυτά των μεγαλύτερων ποταμών της Γης.

1.6.4 Το ενεργειακό ισοζύγιο της Γης

Όπως προαναφέραμε, ο υδρολογικός κύκλος τροφοδοτείται ενεργειακά από την ηλιακή ενέργεια. Στο Σχ. 1.4 δίνονται παραστατικά οι διακινήσεις ενέργειας στη Γη. Από τις 100 ενεργειακές μονάδες ηλιακής ακτινοβολίας που εισρέουν στο ανώτερο όριο της ατμόσφαιρας της Γης, οι 30 ανακλώνται από την ατμόσφαιρα, τα σύννεφα και την επιφάνεια, οι 19 απορροφώνται από την ατμόσφαιρα και κυρίως από το όζον (O_3)[†] της

* Είναι χαρακτηριστικός ο ακραίος ίσως, αλλά ενδεικτικός του προβλήματος, ισχυρισμός οικονομολόγων, ότι ο επόμενος παγκόσμιος πόλεμος θα γίνει για τον έλεγχο των υδατικών πόρων.

† Η απορρόφηση του όζοντος αφορά επιλεκτικά στην υπεριώδη ακτινοβολία, η οποία είναι καταστροφική για τη ζωή. Έτσι το όζον είναι η απαραίτητη ασπίδα για τη διατήρηση της ζωής στο χερσαίο τμήμα της Γης. Είναι γνωστό ότι οι εκπομπές χλωροφθορανθράκων (CFC), αποτέλεσμα διάφορων τεχνολογικών δραστηριοτήτων, έχουν συνέπεια τη μείωση της συγκέντρωσης του στρατοσφαιρικού όζοντος (*τρύπα του όζοντος*, κυρίως πάνω απ' την Ανταρκτική) που αποτελεί μείζονα κίνδυνο για τα οικοσυστήματα του πλανήτη και τον άνθρωπο.

στρατόσφαιρας*, και τους υδρατμούς, τα σύννεφα και τη σκόνη της τροπόσφαιρας. Οι υπόλοιπες 51 μονάδες απορροφώνται από την ξηρά και τη θάλασσα.

Εξ άλλου, η Γη (όπως και οποιοδήποτε σώμα με θερμοκρασία μεγαλύτερη από το απόλυτο μηδέν) εκπέμπει θερμική ακτινοβολία κατά τη διάρκεια και της ημέρας και της νύχτας. Για τη μέση θερμοκρασία της επιφάνειας της Γης (περίπου 15°C), η εκπεμπόμενη ακτινοβολία είναι υπέρυθη και φτάνει τις 117 ενεργειακές μονάδες, δηλαδή είναι μεγαλύτερη κατά 17% από την ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην ατμόσφαιρα και υπερδιπλάσια από την ηλιακή ενέργεια που φτάνει στην επιφάνεια της Γης. Όμως, η ατμόσφαιρα αφήνει να περάσουν μέσω αυτής μόνο οι 6 μονάδες. Οι υπόλοιπες 111 μονάδες απορροφώνται από τα λεγόμενα *αέρια θερμοκηπίου*, δηλαδή τους υδρατμούς και το διοξείδιο του άνθρακα, και τα σύννεφα. Μεγάλο μέρος αυτής της ενέργειας (96 μονάδες) επανεκπέμπεται προς την επιφάνεια της Γης, προκαλώντας έτσι το γνωστό φαινόμενο θερμοκηπίου.† Άλλες 64 μονάδες εκπέμπονται προς το διάστημα.

Από το 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. Συγκεκριμένα, 7 μονάδες μεταφέρονται στον αέρα με τους μηχανισμούς της αγωγής θερμότητας (λόγω επαφής με την επιφάνεια της Γης) και κατακόρυφης μεταφοράς (λόγω ανοδικών ρευμάτων αέρα). Οι υπόλοιπες 23 μονάδες δαπανώνται για την εξάτμιση του νερού και ανακτώνται στην ατμόσφαιρα με τη συμπύκνωση των υδρατμών. Αυτές οι τελευταίες ενεργειακές μονάδες είναι η κινητήρια δύναμη του υδρολογικού κύκλου.

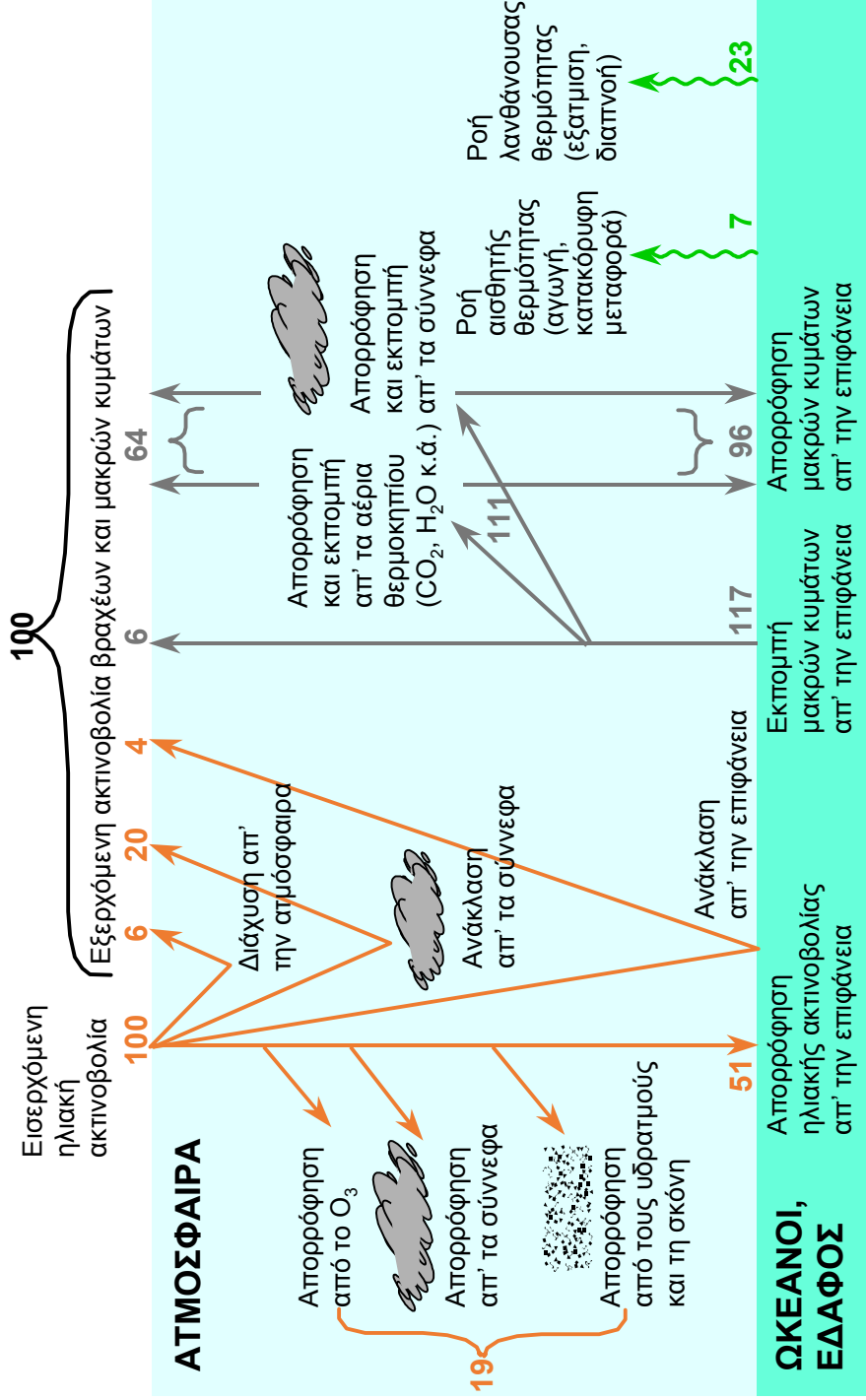
* Είναι γνωστό ότι το κατώτερο στρώμα της ατμόσφαιρας (μέχρι τα 11 km περίπου), μέσα στο οποίο πραγματοποιούνται όλα τα καιρικά φαινόμενα, ονομάζεται *τροπόσφαιρα*, ενώ τα ανώτερα στρώματα είναι κατά σειρά η *στρατόσφαιρα* (μέχρι περίπου 49 km), η *μεσόσφαιρα* (μέχρι περίπου 86 km) και η *θερμόσφαιρα* (μέχρι περίπου 500 km από την επιφάνεια της Γης).

† Χωρίς το φαινόμενο θερμοκηπίου, δηλαδή χωρίς την παρουσία H₂O και CO₂ στην ατμόσφαιρα, η μέση θερμοκρασία της Γης υπολογίζεται ότι θα ήταν -18°C (Ahrens, 1993, σ. 36). Στην εποχή μας, η αύξηση της συγκέντρωσης CO₂ στην ατμόσφαιρα επιτείνει το φυσικό φαινόμενο θερμοκηπίου και αναμένεται να επηρεάσει το κλίμα του πλανήτη (βλ. και ενότητα 1.4).

ΔΙΑΣΤΗΜΑ

← ΒΡΑΧΕΑ ΚΥΜΑΤΑ →

← ΜΑΚΡΑ ΚΥΜΑΤΑ →



Σχ. 1.4 Σχηματική παράσταση του μέσου ετήσιου ενεργειακού ισοζυγίου της Γης. Οι ετήσιες διακινήσεις ενέργειας έχουν εκφραστεί ως ποσοστό (%) επί της ηλιακής ακτινοβολίας που εισέρχεται στην ατμόσφαιρα της Γης. Μία ποσοστιαία μονάδα αντιστοιχεί σε $55 \text{ ZJ}/\text{έτος}$ ($= 55 \times 10^{21} \text{ J}/\text{έτος}$) $W = 1.53 \times 10^{15} \text{ W} = 1.53 \times 10^{10} \text{ GWh}/\text{έτος}$). Τα ενεργειακά μεγέθη έχουν ληφθεί από τον Ahrens (1993, σσ. 38-41).

Από τα παραπάνω δεδομένα προκύπτει ότι υπάρχει ισοζύγιο στις διακινήσεις ενέργειας σε όλα τα επίπεδα. Έτσι στην επιφάνεια της Γης εισέρχεται ενέργεια 147 μονάδων και εξέρχεται η ίδια ακριβώς ποσότητα ενέργειας. Στην ατμόσφαιρα προσλαμβάνεται ενέργεια 160 μονάδων και χάνεται ενέργεια 160, επίσης, μονάδων. Τέλος, στο εξωτερικό όριο της ατμόσφαιρας εισέρχεται ηλιακή ακτινοβολία 100 μονάδων και εξέρχεται ηλιακή και υπέρυθρη ακτινοβολία 100 μονάδων.

Είναι λοιπόν φανερό από τα παραπάνω ότι η Γη δεν κερδίζει ενέργεια από τον Ήλιο (αντίθετα με την καθιερωμένη αντίληψη). Στην πραγματικότητα, το κέρδος της Γης αφορά στην *εντροπία*: η ηλιακή ακτινοβολία είναι χαμηλότερης εντροπίας από την υπέρυθρη ακτινοβολία που εκπέμπει η Γη.* Η δράση της ηλιακής ακτινοβολίας προκαλεί θερμοκρασιακή ανισοκατανομή που ευθύνεται για όλα τα φαινόμενα της ατμόσφαιρας. Τέλος, η ηλιακή ακτινοβολία συντηρεί τη σχετικά μεγάλη (288 K) 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).

1.7 Οι χωρικές και χρονικές κλίμακες της υδρολογίας

Στη μελέτη των υδρολογικών φαινομένων θα ήταν κατ' αρχήν επιθυμητή η γνώση των κάθε τύπου υδρολογικών μεταβλητών σε *συνεχή χώρο και χρόνο*, δηλαδή σε κάθε σημείο της επιφάνειας της Γης και σε κάθε χρονική στιγμή. Είναι ασφαλώς ευνόητο ότι η εξαιρετική πολυπλοκότητα των υδρολογικών φαινομένων, και η αχανής έκταση και το βάθος χρόνου που αυτά εξελίσσονται καθιστά αδύνατη αυτού του είδους την προσέγγιση. Έτσι κάθε φαινόμενο μελετάται σε μια (επιλεγμένη κατά περί-

* Επειδή τα φωτόνια του ηλιακού φωτός έχουν μεγαλύτερη συχνότητα από αυτά της υπέρυθρης γήινης ακτινοβολίας, έχουν και μεγαλύτερη ενέργεια. Για ίση ποσότητα ηλιακής και γήινης ακτινοβολίας, τα φωτόνια της δεύτερης θα είναι πολύ περισσότερα. Έτσι, η ενέργεια που εκπέμπεται από τη Γη κατανέμεται σε πολύ περισσότερους βαθμούς ελευθερίας από εκείνους που έχει η ενέργεια που προσλαμβάνεται από τον ήλιο. Αυτό δείχνει ότι η εντροπία του συνόλου των γήινων φωτονίων είναι κατά πολύ αυξημένη σε σχέση με αυτή των ηλιακών που εισέρχονται στη Γη. Μια αναλυτική και ενδιαφέρουσα ανάλυση του θέματος αυτού κάνει ο Penrose (1991).

πτωση από τις ανάγκες) χαρακτηριστική χωρική και χρονική κλίμακα, στην οποία εξελίσσεται. Η εισαγωγή της κλίμακας υπονοεί (α) την απομόνωση μιας ορισμένης γεωγραφικής περιοχής και μιας ορισμένης χρονικής περιόδου, όπου μελετάται το κάθε φαινόμενο, και (β) την κατάλληλη διακριτοποίηση του (συνεχούς) χώρου και του χρόνου.

1.7.1 Χωρική κλίμακα

Η πιο χαρακτηριστική χωρική κλίμακα της υδρολογίας (και κυρίως της τεχνικής υδρολογίας) είναι η κλίμακα της *λεκάνης απορροής* (ή *υδρολογικής λεκάνης*). Η λεκάνη απορροής στη συγκεκριμένη διατομή A ενός υδατορεύματος (συνήθως φυσικού, όπως ποταμού ή χειμάρρου, αλλά και τεχνητού, όπως συλλεκτήρα ομβρίων ή αντιπλημμυρικής τάφρου) εκείνη και μόνο η γεωγραφική περιοχή S_A που τα νερά της συνεισφέρουν στην απορροή που περνά από τη δεδομένη διατομή A του υδατορεύματος (βλ. και Dingman, 1994, σ. 14).^{*} Το όριο της λεκάνης απορροής ορίζεται από την γεωμορφολογία της περιοχής (υψομετρικές καμπύλες, ποτάμιο ή, όπως αλλιώς λέγεται, *υδρογραφικό δίκτυο*)[†] και ονομάζεται *υδροκρίτη*.[‡] Είναι προφανές ότι δεν υπάρχει μια μοναδική λεκάνη απορροής για ένα υδατόρευμα, αλλά για κάθε σημείο του ορίζεται και η αντίστοιχη λεκάνη απορροής.

Από τον παραπάνω ορισμό προκύπτει σαφώς ότι η έκταση της λεκάνης απορροής δεν ορίζει μια σταθερή, ούτε ως τάξη μεγέθους, χωρική κλίμακα, αφού κυμαίνεται από π.χ. 1 km^2 ή και λιγότερο (για ένα μικρό υδατόρευμα, ή ακόμη και για μεγάλο υδατόρευμα αλλά σε μια διατομή αναφοράς κοντά στο ανάντη όριο του) μέχρι $7.16 \times 10^6 \text{ km}^2$ (για τον Αμαζόνιο στην εκβολή του). Ωστόσο, η απομόνωση μιας λεκάνης απορροής ως περιοχής μελέτης των υδρολογικών διεργασιών έχει προφανή πλεονεκτήματα, δεδομένου ότι η βασική υδρολογική διεργασία της απορροής είναι σε μεγάλο βαθμό ανεξάρτητη από τις υδρολογικές διεργασίες σε άλλες γειτονικές λεκάνες, ενώ συχνά (για όχι εξαιρετικά

^{*} Αν δεν μνημονεύεται η διατομή A, τότε συνήθως υπονοείται η διατομή όπου το υδατόρευμα εκβάλλει στον αποδέκτη του.

[†] Σε μερικές περιπτώσεις το όριο της λεκάνης εξαρτάται και από τη γεωλογία της περιοχής (βλ. Wilson, 1990, σ. 112).

[‡] Για τον τρόπο χάραξης του υδροκρίτη βλ. κεφάλαιο 5.

μεγάλα μεγέθη λεκανών) υπάρχει και σχετική κλιματική ομογένεια στο εσωτερικό της λεκάνης απορροής.

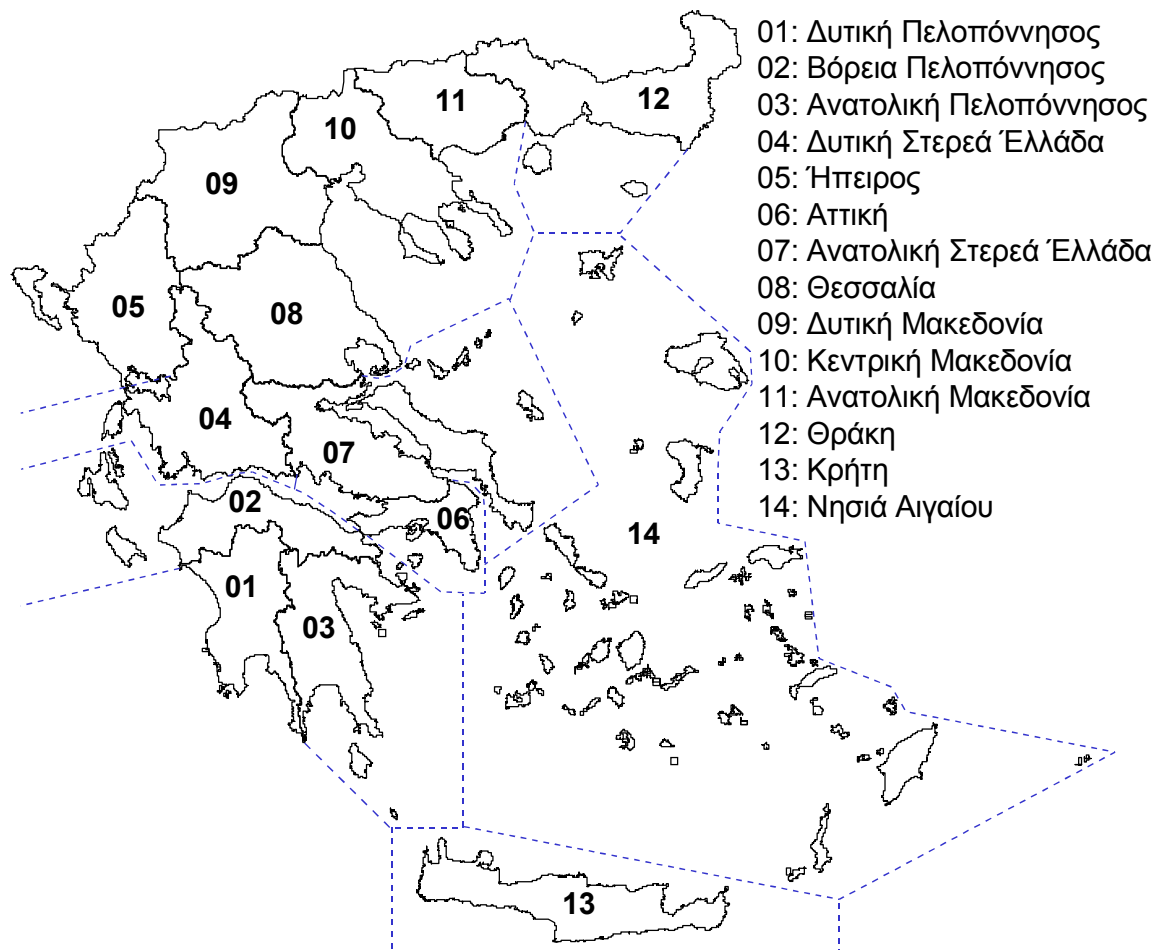
Για μεγάλα μεγέθη λεκανών, ή για προβλήματα στα οποία ενδιαφέρει η λεπτομέρεια στη γεωγραφική μεταβλητότητα των υδρολογικών διεργασιών, η λεκάνη απορροής χωρίζεται σε επί μέρους τμήματα. Αυτό γίνεται κατά κανόνα με τη χάραξη *υπολεκανών*, δηλαδή λεκανών απορροής σε χαρακτηριστικές διατομές του υδατορεύματος ανάντη της διατομής αναφοράς. Μπορεί ακόμη να γίνεται διαμερισμός της λεκάνης σε *κύτταρα* (cells) κανονικού γεωμετρικού σχήματος, συνήθως τετραγωνικού, τα οποία προκύπτουν από την εφαρμογή ενός *καννάβου* (grid) ή *πλέγματος* (lattice) δεδομένης ισοδιάστασης. Οι τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις μιας λεκάνης, είτε ως μιας αδιαμέριστης ολότητας, είτε ως ενός αθροίσματος υπολεκανών, είτε ως μιας διαμερισμένης σε πολλά μικρά κύτταρα, είναι γνωστές στην υδρολογική βιβλιογραφία ως *αδιαμέριστη* (lumped), *ημικατανεμημένη* (semidistributed) και *κατανεμημένη* (distributed) προσέγγιση, αντίστοιχα.

Στις συνήθεις περιπτώσεις της πράξης που παρουσιάζουν επιχειρησιακό ενδιαφέρον, οι λεκάνες απορροής έχουν μεγέθη της τάξης των δεκάδων έως χιλιάδων km^2 . Ωστόσο, σε ερευνητικές μελέτες, οι οποίες αποσκοπούν κυρίως στην κατανόηση των φυσικών μηχανισμών που συνδέονται με τις υδρολογικές διεργασίες, η λεπτομερής παρατήρηση και μέτρηση γίνεται σε μικρά μεγέθη λεκανών (ενδεχομένως και κάτω από 1 km^2), τις λεγόμενες *πειραματικές λεκάνες*. Τέλος, αρκετές φορές η παρατήρηση ενός φαινομένου ή η μέτρησή του γίνεται σε μια πολύ μικρή επιφάνεια που πρακτικώς αντιπροσωπεύεται από ένα σημείο, οπότε μιλάμε για *σημειακή* παρατήρηση ή μέτρηση.

Απ' την άλλη μεριά, σε αρκετές περιπτώσεις είναι απαραίτητη η μελέτη υδρολογικών ποσοτήτων (π.χ. υδατικό δυναμικό) σε σύνολα γειτονικών υδρολογικών λεκανών με σχετική κλιματική ομογένεια. Στην περίπτωση αυτή μιλούμε για κλίμακα *περιοχής* (region) ή *περιοχική* (regional). Είναι σαφές ότι και η κλίμακα περιοχής είναι κατά κανόνα ευρύτερη από την κλίμακα λεκάνης απορροής και, όπως και η τελευταία δεν έχει καθορισμένες διαστάσεις.

Για το χαρακτηρισμό της χωρικής κλίμακας μελέτης χρησιμοποιούνται συχνά και οι δανεισμένοι από τη μετεωρολογία όροι *μικροκλίμακα* (microscale), *μεσοκλίμακα* (mesoscale· από λίγα χιλιόμετρα μέχρι περί-

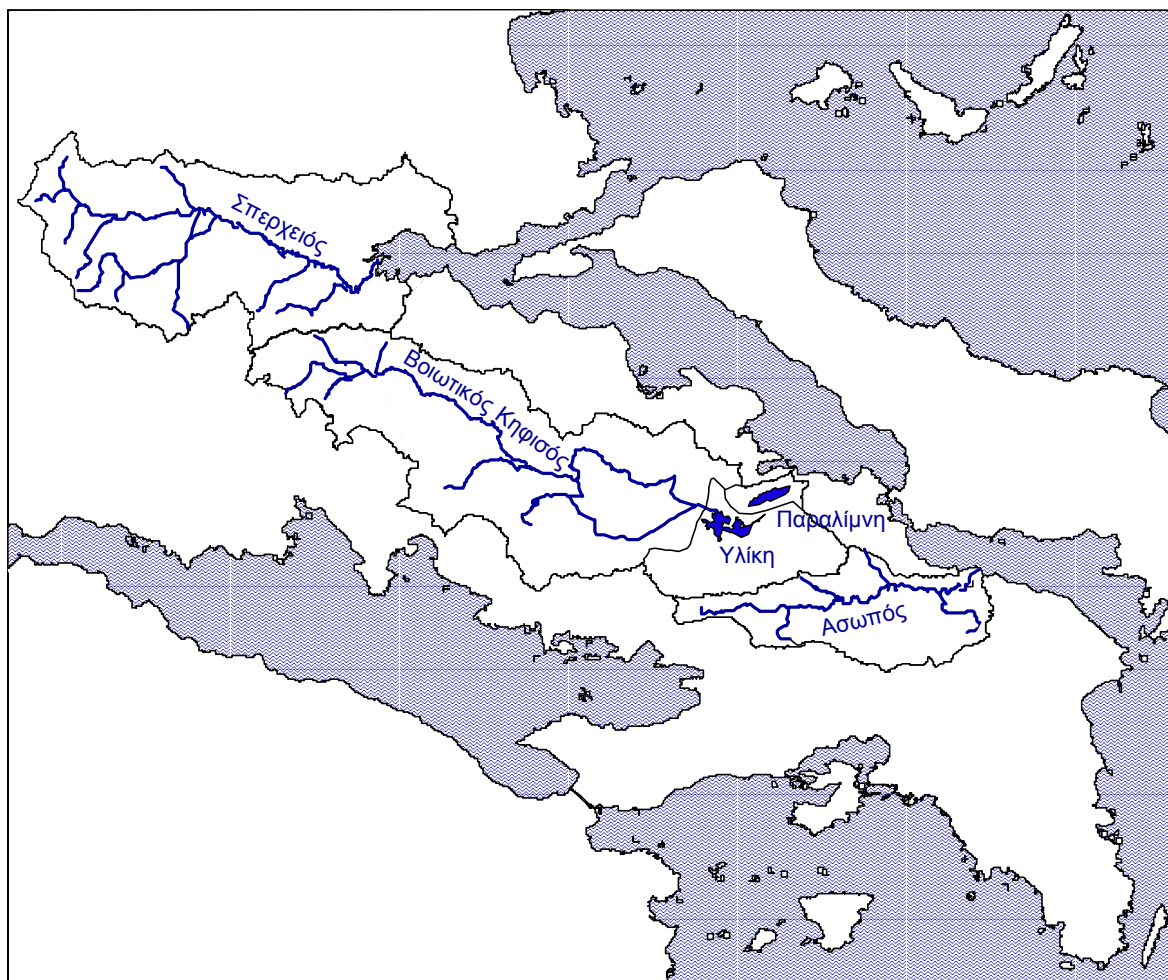
που 100 km) και *μακροκλίμακα* (macroscale· η συνήθης μετεωρολογική συνοπτική κλίμακα, που καλύπτει επιφάνειες από το μέγεθος μιας ηπείρου μέχρι τη συνολική υδρόγειο).



Σχ. 1.5 Διαμερισμός της Ελλάδας σε 14 υδατικά διαμερίσματα.

Η Ελλάδα, λόγω του πολυσχιδούς αναγλύφου της χαρακτηρίζεται από το σχηματισμό πληθώρας υδρολογικών λεκανών μικρού ή μεσαίου μεγέθους. Για το λόγο αυτό συχνά οι λεκάνες ομαδοποιούνται σε περιοχές. Με κριτήρια κλιματικής, υδρολογικής και φυσικής ομογένειας έχει θεσμοθετηθεί η υποδιαίρεση της χώρας σε 14 *υδατικά διαμερίσματα*, τα οποία απεικονίζονται στο Σχ. 1.5. Στο Σχ. 1.6 απεικονίζονται οι υδρολογικές λεκάνες των κύριων ποταμών και λιμνών ενός από τα υδατικά διαμερίσματα, του 07 (Ανατολική Στερεά Ελλάδα). Η υποδιαίρεση σε υδατικά διαμερίσματα είναι χρήσιμη ιδιαίτερα για τις μελέτες διαχείρισης υδατικών πόρων. Το κλίμα και η υδρολογική δίαιτα στο εσωτερικό κάθε υδατικού διαμερίσματος παρουσιάζει σχετική ομογένεια, ενώ σε διαφορετικά διαμερίσματα μπορεί να υπάρχουν σημαντικές διαφορές. Αξιοση-

μειώτες είναι οι διαφορές μεταξύ διαμερισμάτων της δυτικής και της ανατολικής Ελλάδας (π.χ. το μέσο ετήσιο ύψος βροχής στο διαμέρισμα της Ηπείρου είναι 1529 mm ενώ στο διαμέρισμα της Αττικής είναι 509 mm).



Σχ. 1.6 Οι υδρολογικές λεκάνες των τριών κυριότερων ποταμών (Σπερχειός, Βοιωτικός Κηφισός και Ασωπός) και των δύο λιμνών (Υλίκη, Παραλίμνη) του υδατικού διαμερίσματος Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας (07). Είναι αξιοσημείωτο ότι η λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού είναι κλειστή (δεν εκβάλλει στη θάλασσα) και γι' αυτό μέχρι το τέλος του 19ου αιώνα σχηματίζονταν στην πεδινή κατάντη περιοχή της λεκάνης η αβαθής λίμνη Κωπαΐδα. Με την κατασκευή μιας σήραγγας (Σήραγγα Καρδίτσας) τα νερά του Βοιωτικού Κηφισού οδηγούνται πλέον στην Υλίκη, και όταν αυτή υπερχειλίζει, στην Παραλίμνη και από κεί στον Ευβοϊκό κόλπο. Εξ άλλου, υπάρχει και υπόγεια επικοινωνία των λεκανών Βοιωτικού Κηφισού, Υλίκης και Παραλίμνης. Έτσι, οι τρεις λεκάνες αποτελούν ένα ενιαίο σύστημα.

1.7.2 Χρονική κλίμακα

Όλες οι υδρολογικές μεταβλητές παρουσιάζουν χρονική μεταβλητότητα. Η πλήρης γνώση της χρονικής εξέλιξης μιας υδρολογικής μεταβλητής απαιτεί την παρακολούθησή της σε συνεχή χρόνο. Ωστόσο, αυτό είναι κατά κανόνα ανέφικτο, είτε λόγω των δυσχερειών υπολογιστικού χειρισμού, είτε εξαιτίας των μετρήσεων που γίνονται ασυνεχώς, δηλαδή ανά τακτά χρονικά διαστήματα (βλ. εδάφιο 1.9.1). Έτσι, οι μεταβλητές παρακολουθούνται σε διάφορες (διακριτές) χρονικές κλίμακες, ανάλογα με τη φύση του προβλήματος που αντιμετωπίζεται.

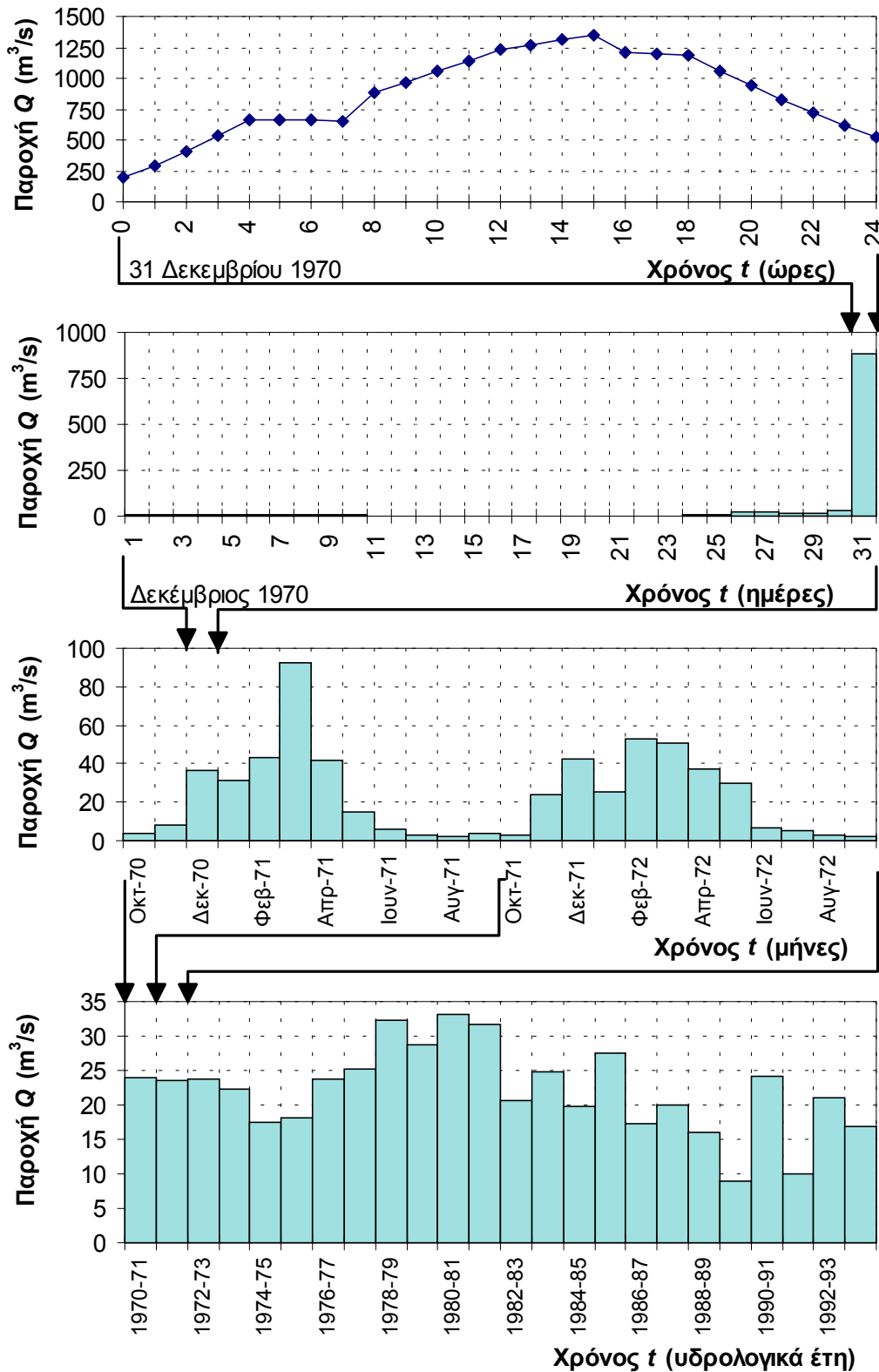
Στο Σχ. 1.7 φαίνεται η εξέλιξη της παροχής του ποταμού Ευήνου στη θέση του υδρομετρικού σταθμού Πόρος Ρηγανίου, σε ωριαία, ημερήσια, μηνιαία και ετήσια κλίμακα. Η μετάβαση από μια λεπτότερη σε μια αδρότερη κλίμακα γίνεται μέσω της εξαγωγής χρονικά μέσων τιμών.

Είναι φανερό ότι, για το συγκεκριμένο ποταμό, η ωριαία κλίμακα είναι κατάλληλη για την παρακολούθηση της εξέλιξης ενός πλημμυρικού φαινομένου (π.χ. 31 Δεκεμβρίου 1970). Στην ημερήσια κλίμακα διακρίνονται οι περίοδοι ξηρασίας και πλημμυρών, χωρίς όμως να αποτυπώνεται πλήρως η εξέλιξη των πλημμυρών. Στη μηνιαία κλίμακα χάνεται η πληροφορία σχετικά με τις πλημμύρες, αλλά γίνεται εμφανέστερη η διακύμανση των διερχόμενων ποσοτήτων νερού, και ιδίως η ετήσια περιοδικότητα της απορροής. Τέλος, στην ετήσια κλίμακα δεν διακρίνονται ούτε οι πλημμύρες, ούτε η ετήσια περιοδικότητα, αλλά εδώ είναι εμφανής η υπερετήσια διακύμανση της απορροής.

Σε μικρότερα υδατορεύματα, η ωριαία κλίμακα δεν είναι πάντα κατάλληλη για την παρακολούθηση της εξέλιξης των πλημμυρικών φαινομένων, αλλά απαιτείται λεπτότερη κλίμακα (π.χ. δεκαλέπτου). Γενικά, η χρονική κλίμακα παρακολούθησης των πλημμυρών πρέπει να είναι υποπολλαπλάσιο του χρόνου συγκέντρωσης (ή χρόνου συρροής) της λεκάνης. Ο χρόνος συγκέντρωσης είναι μια διάρκεια χαρακτηριστική της δεδομένης λεκάνης απορροής και ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται για να φθάσει το πλημμυρικό νερό από το υδραυλικά πιο απομακρυσμένο σημείο της λεκάνης στη διατομή εξόδου (βλ. και ενότητα 5.2).

Συμπερασματικά, οι κλίμακες λεπτών, ώρας έως και ημέρας είναι κατάλληλες για μελέτες καταιγίδων και πλημμυρών, ή και για λεπτομερείς μελέτες όλων των υδρολογικών διεργασιών σε μια περιοχή. Στα

προβλήματα αξιοποίησης υδατικών πόρων είναι κατά κανόνα επαρκής η μηνιαία ή η ετήσια κλίμακα.



Σχ. 1.7 Εξέλιξη της παροχής του ποταμού Ευήνου στη θέση Πόρος Ρηγανίου για διάφορες χρονικές κλίμακες (Δεδομένα: Μαμάσης και Ναλμπάντης, 1995).

1.8 Η φύση των υδρολογικών μεταβλητών και οι μέθοδοι της υδρολογίας

Στην ενότητα 1.7 είδαμε ότι υπάρχει έντονη χρονική μεταβλητότητα των υδρολογικών μεταβλητών. Ένα ερώτημα που συχνά τίθεται, είναι αν η εξέλιξη των υδρολογικών μεταβλητών υπακούει σε κάποιους αιτιοκρατικούς νόμους (νόμους αιτίου-αποτελέσματος), οπότε η χρονική μεταβλητότητα είναι προβλέψιμη, ή όχι, οπότε η εξέλιξη των φαινομένων είναι απρόβλεπτη. Σε μια παραλλαγή του, το ίδιο ερώτημα καταλήγει στο αν η φύση των υδρολογικών μεταβλητών είναι *προσδιοριστική* (ντετερμινιστική) ή *τυχαία*. Στην πραγματικότητα, τα ερωτήματα αυτά δεν είναι και σωστά διατυπωμένα και γι' αυτό δεν μπορούν να απαντηθούν. Η ύπαρξη *αιτιότητας* δεν εγγυάται την προσδιοριστική προβλεψιμότητα των φαινομένων. Αλλά και η τυχαία συμπεριφορά των μεταβλητών δεν σημαίνει και πλήρη αδυναμία πρόβλεψής τους.*

Στο βάθος των πραγμάτων, όλα σχεδόν τα υδρολογικά φαινόμενα διέπονται από τους νόμους της κλασικής φυσικής και εξηγούνται από αυτούς.† Αυτό όμως δεν αρκεί για να κάνει τα φαινόμενα προσδιοριστικώς προβλέψιμα.‡ Η “αντίσταση” των υδρολογικών φαινομένων στην πρόβλεψη οφείλεται σε τέσσερις λόγους: (α) στην αχανή πολυπλοκότητα των συστημάτων όπου τα φαινόμενα εξελίσσονται, (β) στην ατέλεια της γνώσης και μαθηματικής περιγραφής των συστημάτων και των νόμων

* Εξ άλλου δεν είναι καθόλου σαφή τα όρια μεταξύ προσδιοριστικού και τυχαίου. Είναι χαρακτηριστικό ότι οι τυχαίοι αριθμοί, που χρησιμοποιούνται στη μαθηματική προσομοίωση τυχαίων φαινομένων, εξάγονται με αυστηρά προσδιοριστική υπολογιστική διαδικασία.

† Οι θεμελιώδεις νόμοι της κλασικής φυσικής που κυρίως χρησιμοποιούνται στην υδρολογία είναι: (α) ο νόμος διατήρησης της μάζας, (β) οι τρεις νόμοι κίνησης του Νεύτωνα (διατήρηση της ορμής, αναλογία δύναμης και επιτάχυνσης, ισότητα δράσης και αντίδρασης), (γ) ο νόμος της βαρύτητας του Νεύτωνα, (δ) οι δύο νόμοι της θερμοδυναμικής (διατήρηση της ενέργειας, αύξηση της εντροπίας), και (ε) ο νόμος διάχυσης του Fick (κίνηση διαχεόμενων ουσιών από περιοχές υψηλότερων συγκεντρώσεων προς περιοχές χαμηλότερων συγκεντρώσεων με ρυθμό ανάλογο της χωρικής κλίσης της συγκέντρωσης).

‡ Και η κίνηση ενός νομίσματος που ρίχνεται στον αέρα εξηγείται πλήρως από τους νόμους της κλασικής φυσικής, αλλά παρόλα αυτά αποτελεί το πιο τυπικό παράδειγμα φαινομένου με τυχαία έκβαση (“κορώνα-γράμματα”).

που τα διέπουν, (γ) στην ατελή ή και μερικές φορές εσφαλμένη μέτρηση των υδρολογικών μεταβλητών, και (δ) στην αποκαλούμενη *ευαίσθητη εξάρτηση* από τις αρχικές συνθήκες, δηλαδή στην μεγέθυνση, με την πάροδο του χρόνου, έστω και απειροελάχιστων αβεβαιοτήτων (ή διαταραχών) γύρω από τις αρχικές συνθήκες, η οποία χαρακτηρίζει τα μη γραμμικά συστήματα. Είναι εντυπωσιακό ότι ακόμη και ο τέταρτος από τους λόγους φτάνει για να κάνει την εξέλιξη ενός συστήματος πρακτικώς απρόβλεπτη. Τα τελευταία χρόνια έχει γίνει εντατική έρευνα γύρω από τη συμπεριφορά φυσικών (ή και καθαρώς μαθηματικών) συστημάτων με ευαίσθητη εξάρτηση. Τα συστήματα αυτά έχουν αποκληθεί *χαοτικά* και ο επιστημονικός κλάδος που ασχολείται με τη μελέτη τους είναι γνωστός ως επιστήμη του *χάους*.^{*} Αναμφίβολα, τα υδρομετεωρολογικά συστήματα είναι χαοτικά.

Πολύ πριν θεμελιωθεί η επιστήμη του χάους, η αδυναμία της πλήρους περιγραφής των υδρολογικών φαινομένων με προσδιοριστικές μεθόδους οδήγησε στην εναλλακτική θεώρηση των υδρολογικών μεταβλητών ως τυχαίων μεταβλητών και την αντιμετώπισή τους με τη μαθηματική θεωρία πιθανοτήτων. Αυτή η αντιμετώπιση δεν αποτελεί “ομολογία” της αδυναμίας πρόγνωσης. Αντίθετα, η πιθανοτική θεώρηση αποσκοπεί,

* Η επιστήμη του χάους, μαζί με την κβαντομηχανική και τη σχετικότητα, είναι οι σημαντικότερες συμβολές του 20ου αιώνα στην επιστημονική σκέψη. Σε αντίθεση τόσο με τις αιτιοκρατικές θεωρίες της Νευτώνιας Μηχανικής και της σχετικότητας, όσο και με τη μη αιτιοκρατική (λόγω της θεμελιώδους αρχής της απροσδιοριστίας) κβαντομηχανική, οι οποίες θεωρούν τα φυσικά φαινόμενα ως αντιστρεπτά στο χρόνο, η επιστήμη του χάους ενσωματώνει και εμπλουτίζει τη θεώρηση της κλασικής θερμοδυναμικής (που προκύπτει από τη δεύτερο νόμο της για την αύξηση της εντροπίας) για τη μη αντιστρεπτότητα των φαινομένων στο χρόνο (εξ ου και ο όρος *βέλος του χρόνου*). Στο πλαίσιο αυτό, σημαντική είναι η πρόσφατη συμβολή του Prigogine (βραβείο Νόμπελ Χημείας 1977), που μελέτησε συστήματα που βρίσκονται μακριά από την κατάσταση θερμικής ισορροπίας (“θερμικός θάνατος”) και εξήγησε πώς είναι δυνατό σε αυτά, να μειώνεται τοπικά η εντροπία (παρόλο που η συνολική εντροπία ή αταξία του συστήματος αυξάνεται, γιατί αλλιώς θα καταλύονταν ο δεύτερος θερμοδυναμικός νόμος), και να δημιουργούνται οργανωμένες δομές (τάξη, π.χ. έμβια όντα), οι οποίες μάλιστα είναι συνεχώς εξελισσόμενες προς την κατεύθυνση της μεγαλύτερης οργάνωσης (βλ. Prigogine and Stengers, 1984). Με απλά λόγια, η παραδοσιακή ντετερμινιστική και χρονικά απροσανατόλιστη λογική αντικαθίσταται μια νέα πληρέστερη, πιθανοτική και χρονικά προσανατολισμένη λογική.

όπως και η προσδιοριστική, στην πρόγνωση. Μόνο που εδώ η πρόγνωση δεν δίνει μονοσήμαντες απαντήσεις, αλλά διαστήματα μέσα στα οποία αναμένεται να διακυμανθεί η τιμή μιας μεταβλητής με *δεδομένη πιθανότητα*. Έτσι η πιθανοτική προσέγγιση ποσοτικοποιεί, μέσω της πιθανότητας, την αβεβαιότητα γύρω από την εξέλιξη των φαινομένων.

Στην πιθανοτική προσέγγιση των φαινομένων υπάρχουν δύο διαφορετικές γενικές μεθοδολογίες. Η πρώτη από αυτές χρησιμοποιεί μεθόδους της επαγωγικής στατιστικής* (γι' αυτό και ο αντίστοιχος επιστημονικός κλάδος είναι γνωστός ως *στατιστική υδρολογία*) και είναι κατάλληλη για τις περιπτώσεις όπου κάθε πραγματοποίηση ενός φαινομένου (π.χ. μιας καταιγίδας) είναι ή μπορεί να θεωρηθεί ανεξάρτητη από κάθε άλλη πραγματοποίηση του ίδιου φαινομένου. Η δεύτερη και πληρέστερη μεθοδολογία βασίζεται σε ένα συνθετότερο κλάδο της θεωρίας πιθανοτήτων, τη *θεωρία στοχαστικών ανελίξεων* (γι' αυτό και ο αντίστοιχος επιστημονικός κλάδος είναι γνωστός ως *στοχαστική υδρολογία*) και έχει γενικότερη εφαρμογή, αφού μπορεί να πάρει υπόψη τη χρονική αλληλεξάρτηση των φαινομένων, ή, όπως αλλιώς ονομάζεται, τη *στοχαστική δομή των φαινομένων*.

Συμπερασματικά, η προσδιοριστική και η πιθανοτική προσέγγιση “νομιμοποιούνται” αλλά και είναι απαραίτητο να συνυπάρχουν, ως ένα διαλεκτικό δίπτυχο, στη μελέτη των υδρολογικών φαινομένων. Και οι δύο προσεγγίσεις έχουν στόχο την πρόγνωση, παρόλο που η μεθοδολογία αλλά και η φύση της πρόγνωσης είναι δομικά διαφορετική για καθεμιά από τις προσεγγίσεις. Σε κάθε πρόβλημα που εξετάζεται, συνήθως κυριαρχεί η μία από τις δύο προσεγγίσεις. Πολύ συχνά όμως η κυρίαρχη προσέγγιση συμπληρώνεται από την “αντίπαλή” της. Έτσι, τα προσδιοριστικά μοντέλα συχνά συμπληρώνονται με την προσθήκη τυχαίων συνιστωσών (π.χ. όρων τυχαίου σφάλματος), ενώ τα στοχαστικά μοντέλα

* Γνωστή από το 19^ο αιώνα ως η επιστήμη της συστηματικής καταγραφής μιας *κατάστασης* (status) πραγμάτων η στατιστική άλλαξε τελείως στόχους και ορισμό από την αρχή του 20^{ου} αιώνα: η σύγχρονη στατιστική είναι επαγωγική και ορίζεται ως το σύνολο των μεθόδων που επιτρέπουν τη λήψη λογικών αποφάσεων μπροστά σε διάφορες αβεβαιότητες. Ο νέος αυτός προσανατολισμός οφείλεται κυρίως στην αγγλοσαξωνική θεωρητική σχολή που, με επικεφαλής τους Pearson και Fisher, ανέδειξε τη σημασία της επαγωγής, δηλαδή της εξαγωγής συμπερασμάτων με χωροχρονικές προεκτάσεις και υπολογισμένα όρια αξιοπιστίας, από τα πειραματικά δεδομένα ενός δείγματος.

ενσωματώνουν τις τυχόν προσδιοριστικές συνιστώσες του φαινομένου που μελετάται.

Σε κάθε πρόβλημα που αντιμετωπίζουμε, για να κάνουμε την επιλογή ανάμεσα στην προσδιοριστική και την πιθανοτική προσέγγιση θα πρέπει να δούμε προσεκτικά τη φύση, τα δεδομένα και τα ζητούμενα του προβλήματος. Κυρίαρχης σημασίας ανάμεσα σε αυτά είναι ο ζητούμενος *χρονικός ορίζοντας* της πρόγνωσης. Για να διαφωτίσουμε τις πτυχές της επιλογής μεθόδου, θα εστιάσουμε την προσοχή μας στο πρόβλημα της πρόγνωσης της πλημμύρας κατά μήκος ενός ποταμού.

Αν ο χρονικός ορίζοντας πρόγνωσης είναι μικρός, π.χ. μερικών ωρών έως μερικών ημερών, είναι σαφές ότι η κυρίαρχη προσέγγιση είναι η προσδιοριστική και ότι κατ' αρχήν μπορούμε να αποφύγουμε την πιθανοτική προσέγγιση. Θα χρειαστούμε προγνωστικά δεδομένα βροχοπτώσεων, τα οποία μπορούν να εξαχθούν από ένα μετεωρολογικό μοντέλο, η φύση του οποίου είναι κατά βάση προσδιοριστική. Θα χρειαστούμε επίσης ένα προσδιοριστικό μοντέλο βροχής-απορροής, δηλαδή ένα μοντέλο που μετασχηματίζει τη βροχόπτωση στη λεκάνη, σε παροχή σε διάφορες διατομές του ποταμού, θεωρώντας τη βροχόπτωση ως αιτία και την παροχή ως αποτέλεσμα. Το τελικό αποτέλεσμα του συνδυασμού αυτών των προσδιοριστικών μοντέλων θα είναι μια μονοσήμαντη πρόγνωση της εξέλιξης της πλημμύρας. Στην πραγματικότητα βέβαια, η πραγματική πλημμύρα ποτέ δεν θα ακολουθήσει ακριβώς την πρόγνωσή μας λόγω ατελειών των μοντέλων αλλά και αστάθμητων παραγόντων. Η απόκλιση πρόγνωσης-πραγματικότητας μπορεί να ποσοτικοποιηθεί με την εισαγωγή τυχαίων συνιστωσών είτε στο προγνωστικό μοντέλο της βροχόπτωσης, είτε στο προσδιοριστικό μοντέλο βροχής-απορροής, είτε και στα δύο. Κατά συνέπεια σε ένα πρόβλημα βραχυπρόθεσμης πρόγνωσης κυριαρχεί η προσδιοριστική προσέγγιση, χωρίς όμως να αποκλείεται η συνδυασμένη χρήση πιθανοτικών μοντέλων.

Αν τώρα ο χρονικός ορίζοντας της πρόγνωσης γίνει πολύ μεγαλύτερος, π.χ. 50 χρόνια (πράγμα απολύτως συνηθισμένο στα προβλήματα σχεδιασμού αντιπλημμυρικών έργων) γίνεται φανερό ότι η προσδιοριστική αντιμετώπιση είναι ανέφικτη και αποκτά το προβάδισμα η πιθανοτική προσέγγιση. Αν διαθέτουμε ένα επαρκές ιστορικό δείγμα πλημμυρών στις διατομές του ποταμού που μας ενδιαφέρουν, τότε μπορούμε να στηριχτούμε αποκλειστικά στην πιθανοτική προσέγγιση, αποκλείοντας

τη χρήση προσδιοριστικών μοντέλων. Όμως αυτό δεν είναι πάντα εφικτό, αφού πολλές φορές η διαθέσιμη ιστορική πληροφορία για την παροχή του ποταμού είναι ανεπαρκής ή ανύπαρκτη. Σε αυτή την περίπτωση θα επιστρατεύσουμε, όπως και προηγουμένως, ένα προσδιοριστικό μοντέλο βροχής-απορροής. Η διαφορά, όμως, εδώ είναι ότι τα δεδομένα βροχής που θα χρησιμοποιήσουμε δεν μπορεί να είναι αποτέλεσμα προσδιοριστικού προγνωστικού μοντέλου, αφού δεν είναι δυνατή η προσδιοριστική πρόγνωση της βροχής σε τόσο μεγάλο ορίζοντα, λόγω ακριβώς της χαοτικής εξέλιξης των μηχανισμών που την προκαλούν. Επιπλέον, ακόμη και αν υπάρχει ιστορική πληροφορία της παροχής του ποταμού, είναι πιθανό να μη συμπίπτει η θέση μέτρησης με τη θέση των έργων, οπότε θα χρειαστεί να καταστρώσουμε ένα προσδιοριστικό μοντέλο που να συνδέει την παροχή του ποταμού σε διάφορες διατομές του. Κατά συνέπεια σε ένα πρόβλημα μακροπρόθεσμης πρόγνωσης κυριαρχεί η πιθανοτική προσέγγιση, χωρίς όμως να αποκλείεται η συνδυασμένη χρήση προσδιοριστικών μοντέλων.

Στα επόμενα κεφάλαια αυτού του κειμένου θα παρουσιάσουμε αναλυτικότερα βασικές μεθοδολογίες της τεχνικής υδρολογίας με έμφαση στις προσδιοριστικές, ενώ μια πρώτη συνοπτική παρουσίαση των στατιστικών μεθοδολογιών θα δώσουμε στο εδάφιο 1.9.5. Λεπτομερέστερη παρουσίαση της στατιστικής προσέγγισης αλλά και το αναγκαίο γνωσιολογικό υπόβαθρο θεωρίας πιθανοτήτων και στατιστικής, δίνεται από τον Κουτσογιάννη (1996α), ενώ για το ίδιο θέμα, ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης παραπέμπεται μεταξύ άλλων και στους Ξανθόπουλο (1972), Yevjevich (1972a), Haan (1977), Kottegoda (1980), Hirsch et al. (1993) και Stedinger et al. (1993). Για αναλυτική παρουσίαση των στοχαστικών μεθόδων ο αναγνώστης παραπέμπεται μεταξύ άλλων στους Μιμίκου (1985, 1995), Yevjevich (1972b), Kottegoda (1980), Bras and Rodriguez-Iturbe (1985), Salas et al. (1988), και Salas (1993).

1.9 Σκιαγραφή της υδρολογικής πληροφορίας

1.9.1 Σημασία και κατάταξη της υδρολογικής πληροφορίας

Μια μέτρια μέτρηση αξίζει πολύ περισσότερο από έναν καλό υπολογισμό: Πολλές εντυπωσιακές οικονομικές αποδείξεις της παραπάνω γνω-

στής σ' όλες τις θετικές επιστήμες αρχής, βρίσκονται στην τεχνική υδρολογία: για παράδειγμα οι δαπάνες εγκατάστασης και 20ετούς λειτουργίας ενός υδρομετρικού σταθμού, είναι πολύ μικρότερες από το επιπλέον κόστος κατασκευής ενός έργου αξιοποίησης υδατικού δυναμικού, το οποίο προκύπτει από τη μεγάλη αβεβαιότητα εξαιτίας της μη λειτουργίας του σταθμού (π.χ. όταν η εκτίμηση της παροχής γίνεται από τις βροχές). Εξ άλλου, η σημασία των μετρήσεων στην υδρολογία γίνεται καταφανέστερη επειδή η επιστήμη αυτή δεν μπορεί να εξαγάγει παγκόσμιους νόμους, κατά τα πρότυπα των νόμων της φυσικής, αλλά εξισώσεις και σχέσεις περιορισμένης χωροχρονικής ισχύος. Η εξαγωγή και η επαλήθευση αυτών των εξισώσεων και σχέσεων δεν είναι δυνατή παρά μόνο όταν υπάρχουν αξιόπιστες μετρήσεις των συνιστωσών του υδρολογικού κύκλου.

Το σύνολο των πρωτογενών και επεξεργασμένων μετρήσεων των συνιστωσών του υδρολογικού κύκλου σε μια περιοχή αποτελεί την *υδρολογική πληροφορία* της περιοχής. Στην ενότητα αυτή θα κάνουμε μια πρώτη επαφή με τις μορφές της υδρολογικής πληροφορίας στο σύνολό της, ενώ η αναλυτική κατά υδρολογική μεταβλητή παρουσίαση θα γίνει στα κεφάλαια που ακολουθούν.

Όπως είδαμε στην ενότητα 1.7, οι υδρολογικές μεταβλητές διακυμαίνονται στο χώρο και το χρόνο. Για την αποτύπωση της διακύμανσης στο χώρο υπάρχουν δύο ειδών τεχνικές: Η συμβατική και πιο διαδεδομένη τεχνική χρησιμοποιεί *σημειακές μετρήσεις* σε πολλά σημεία της περιοχής που ενδιαφέρει. Στην περίπτωση αυτή τα όργανα ή οι διατάξεις μετρούν την υδρολογική μεταβλητή στο συγκεκριμένο σημείο της εγκατάστασής τους (π.χ. μέτρηση του ύψους βροχής στο δοχείο του βροχομέτρου, της στάθμης του ποταμού στο στέλεχος του σταθμημέτρου, κτλ.). Η πιο σύγχρονη τεχνική *επιφανειακών μετρήσεων* δίνει το πεδίο μεταβολής μιας μεταβλητής σε μια ολόκληρη επιφάνεια, το μέγεθος της οποίας καθορίζεται από την εμβέλεια του οργάνου. Στις συσκευές αυτής της δεύτερης κατηγορίας ανήκουν τα μετεωρολογικά ραντάρ και οι δορυφόροι. Διευκρινίζεται πάντως, ότι οι συσκευές αυτής της κατηγορίας, στην πραγματικότητα δεν μετρούν την υδρολογική μεταβλητή που ενδιαφέρει, αλλά κάποιο άλλο μέγεθος, βάσει του οποίου τεκμαίρεται, μετά από πολύπλοκους υπολογισμούς, το υδρολογικό μέγεθος. Έτσι, σε αντίθεση με τα βροχόμετρα, που μετρούν πρωτογενώς το ύψος βροχής, τα ραντάρ

μετρούν την ανακλαστικότητα των νεφών, από την οποία εξάγεται η εκτίμηση του ύψους βροχής. Εξ άλλου, οι διατάξεις μέτρησης της δεύτερης κατηγορίας κατά βάση καλύπτουν μόνο τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα και όχι άλλες μεταβλητές του υδρολογικού κύκλου, όπως π.χ. την απορροή, η οποία πρωτίστως ενδιαφέρει την τεχνική υδρολογία.

Η διακύμανση των υδρολογικών μεταβλητών στο χρόνο επιβάλλει την παρακολούθησή τους στην περιοχή που ενδιαφέρει για κάποιο μικρό ή μεγάλο χρονικό διάστημα. Κατά συνέπεια, η υδρολογική πληροφορία καλύπτει μια ορισμένη χρονική περίοδο, με συνεχή ή κατά ορισμένα διαστήματα καταγραφή της υδρολογικής μεταβλητής που ενδιαφέρει. Αν X_t , παριστάνει την υδρολογική μεταβλητή σε ένα δεδομένο σημείο του χώρου και στο χρόνο t , τότε καλούμε ιστορική χρονοσειρά της μεταβλητής, τις παρατηρημένες τιμές $x_{t_0}, x_{t_1}, x_{t_2}, \dots, x_{t_n}$ της X_t στις διαδοχικές και συνήθως ισαπέχουσες χρονικές στιγμές $t_0, t_1, t_2, \dots, t_n$. Οι διαφορές $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$ χαρακτηρίζουν τη χρονική κλίμακα παρατήρησης και καθορίζονται ανάλογα με τις ανάγκες της υδρολογικής μελέτης αλλά και από τη συμπεριφορά του μετρούμενου υδρολογικού μεγέθους. Για παράδειγμα, σε περίοδο συνηθισμένης δίαιτας, η στάθμη ενός υδατορεύματος λαμβάνεται μια φορά την ημέρα ενώ σε περίοδο πλημμύρας μπορεί να λαμβάνεται συχνότερα (π.χ. κάθε 2 ώρες).

Κύρια ή πρωτεύουσα πληροφορία της τεχνικής υδρολογίας είναι οι μετρήσεις της παροχής (δηλαδή του διερχόμενου στη μονάδα του χρόνου όγκου νερού) των υδατορευμάτων. Αν υπήρχαν μεγάλα μήκη ιστορικών χρονοσειρών παροχής, σε πολλά προβλήματα της τεχνικής υδρολογίας θα ήταν πρακτικώς άχρηστες οι υπόλοιπες υδρολογικές πληροφορίες, π.χ. βροχές, θερμοκρασίες, κτλ. Θα απλουστεύονταν, εξ άλλου, πολύ και οι μαθηματικές τεχνικές επεξεργασίας της πληροφορίας αφού η απάντηση σε ορισμένα κρίσιμα ερωτήματα, π.χ. ποιά είναι η μέγιστη πλημμύρα της 100ετίας σε δεδομένη θέση υδατορεύματος, θα προέκυπτε απευθείας από την ιστορική σειρά των παροχών. Δυστυχώς για τις υδρολογικές μελέτες, η πρωτεύουσα πληροφορία είναι συνήθως ελλιπής ή ανύπαρκτη, γιατί όπως θα δούμε σε επόμενα κεφάλαια, η μέτρηση της παροχής είναι μια δύσκολη αλλά και δαπανηρή επιχείρηση.

Δευτερεύουσα (αλλά πολύτιμη) πληροφορία της τεχνικής υδρολογίας είναι οι μετρήσεις των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων. Συγκρινόμενα με τις παροχές, τα κατακρημνίσματα έχουν πολύ πυκνότερο δίκτυο

σημειακών μετρήσεων και πολύ μακρύτερες ιστορικές χρονοσειρές, για τον απλό λόγο ότι η καταγραφή τους ήταν και είναι πολύ ευκολότερη και φθηνότερη. Η λογικά προφανής σχέση αιτίου-αποτελέσματος μεταξύ κατακρημνισμάτων και απορροών οδηγεί στην κατά προτεραιότητα χρησιμοποίηση της δευτερεύουσας αυτής πληροφορίας για τη βελτίωση της εκτίμησης των παροχών.

Τριτεύουσα πληροφορία της τεχνικής υδρολογίας είναι οι μετρήσεις όλων των υπόλοιπων υδρομετεωρολογικών μεταβλητών (π.χ. θερμοκρασία και υγρασία του αέρα, ηλιοφάνεια, ταχύτητα και διεύθυνση του ανέμου, κτλ.) που κατά περίπτωση χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση ή και την απευθείας εκτίμηση της κύριας ή της δευτερεύουσας πληροφορίας. Ερευνώντας τη φυσική δομή και τις σχέσεις μεταξύ των βασικών υδρομετεωρολογικών μεταβλητών η υδρολογία μπορεί να βελτιώσει την υδρολογική πληροφορία που ήδη υπάρχει, αξιοποιώντας κάθε διαθέσιμη μέτρηση στην περιοχή που ενδιαφέρει.

1.9.2 Συμβατικά και αυτόματα όργανα σημειακών μετρήσεων

Μέχρι πρόσφατα, τα όργανα των σημειακών υδρολογικών και μετεωρολογικών μετρήσεων αποτελούνταν αποκλειστικά από μηχανικά μέρη, τα οποία λειτουργούσαν με απλό τρόπο κάτω υπό την επιτήρηση όχι ιδιαίτερα ειδικευμένων παρατηρητών. Αυτά τα *συμβατικά όργανα* μετρήσεων διακρίνονται σε δύο κύριους τύπους: τα απλά και τα καταγραφικά. Σε ένα απλό όργανο η μέτρηση γίνεται με την άμεση παρεμβολή του παρατηρητή, ο οποίος διαβάσει και καταχωρεί ανά τακτά διαστήματα (π.χ. μία έως τέσσερις φορές την ημέρα) την ένδειξη του οργάνου. Σε ένα καταγραφικό όργανο, υπάρχει μηχανισμός καταγραφής της εξέλιξης μιας μεταβλητής, ο οποίος στηρίζεται σε ένα περιστρεφόμενο τύμπανο οδηγούμενο από ωρολογιακό μηχανισμό. Αλλά και στα καταγραφικά όργανα ο ρόλος του παρατηρητή είναι βασικός (κούρδισμα ωρολογιακού μηχανισμού, αντικατάσταση ταινιών καταγραφής, κτλ.)

Την τελευταία δεκαετία έχουν αναπτυχθεί νέοι τύποι οργάνων, τα *αυτόματα όργανα*, τα οποία λειτουργούν χωρίς παρατηρητή, δεν παύουν όμως να χρειάζονται επιτήρηση και συντήρηση ανά αραιά αλλά τακτά διαστήματα. Τα όργανα αυτά μετατρέπουν τις ενδείξεις που παίρνουν οι *αισθητήρες* τους σε ψηφιακά σήματα, τα οποία καταχωρούνται αυτόματα σε *καταχωρητές δεδομένων* (data loggers). Τα αυτόματα όργανα δεν

μπορούν να κάνουν καταγραφή σε συνεχή χρόνο, αλλά στην πραγματικότητα αυτό δεν αποτελεί μειονέκτημά τους, αφού η συχνότητα λήψης μετρήσεων μπορεί να γίνει οσοδήποτε μικρή.

Η εισαγωγή των αυτόματων ψηφιακών οργάνων επέτρεψε την *τηλεμετρία*, δηλαδή την μετάδοση των μετρήσεων (την ώρα που αυτές παίρνονται ή και αργότερα) μέσω κατάλληλης ζεύξης (τηλεφωνικής, δορυφορικής, ραδιοκυμάτων) σε απομακρυσμένα σημεία (π.χ. σε κεντρικές ή περιφερειακές υδρολογικές και μετεωρολογικές υπηρεσίες). Αξιοποιώντας και τις διαθέσιμες σήμερα δυνατότητες δικτύωσης των υπολογιστών, και ειδικότερα του *διαδικτύου* (internet), μπορούν οι μετρήσεις από τους αυτόματους τηλεμετρικούς σταθμούς να είναι διαθέσιμες παγκοσμίως σε ελάχιστο χρόνο μετά τη λήψη τους. Στην Ελλάδα, αν και στην πλειονότητα τους τα μετρητικά όργανα είναι συμβατικά, έχει ήδη ξεκινήσει με εντατικό ρυθμό η εγκατάσταση αυτόματων οργάνων.*

1.9.3 Δίκτυα υδρομετεωρολογικών μετρήσεων

Όπως είδαμε παραπάνω, η παρακολούθηση και γνώση της γεωγραφικής μεταβλητότητας των υδρολογικών και μετεωρολογικών μεταβλητών προϋποθέτει την ανάπτυξη *δικτύων μετρήσεων* με πολλούς σταθμούς σημειακών μετρήσεων. Ο σχεδιασμός, η εγκατάσταση και η λειτουργία ενός δικτύου μετρήσεων είναι αρκετά πολύπλοκα ζητήματα, τα οποία καλύπτονται από τις σχετικές οδηγίες και προδιαγραφές του WMO (1981).

Η πυκνότητα, η ποιότητα και η χρονική διάρκεια λειτουργίας ενός εγκατεστημένου δικτύου μετρήσεων της υδρολογικής πληροφορίας, χαρακτηρίζουν το μέγεθος και την ποιότητα της υπάρχουσας στην περιοχή υποδομής για σύνταξη μελετών και κατασκευή έργων αξιοποίη-

* Στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου έχει εγκατασταθεί και λειτουργεί με ευθύνη του Τομέα Υδατικών Πόρων του ΕΜΠ πιλοτικός αυτόματος τηλεμετρικός μετεωρολογικός σταθμός. Περιλαμβάνει αισθητήρες βροχόπτωσης, ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας, ατμοσφαιρικής υγρασίας, ατμοσφαιρικής πίεσης, ηλιακής ακτινοβολίας, ηλιοφάνειας, ταχύτητας (και ριπής) ανέμου και διεύθυνσης ανέμου. Η λήψη μετρήσεων γίνεται ανά 10 min και μέσω διπλής ζεύξης (ενσύρματης και ασύρματης) τα δεδομένα μεταδίδονται σε υπολογιστή του Τομέα Υδατικών Πόρων και από εκεί στο διαδίκτυο, όπου είναι προσπελάσιμα μέσω του [www](http://www.hydro.ntua.gr/meteo) (<http://www.hydro.ntua.gr/meteo>).

σης των υδατικών πόρων και έργων προστασίας από τους υδρολογικούς κινδύνους. Αλλά και η λειτουργία των έργων και η διαχείριση των υδροσυστημάτων προϋποθέτει κατάλληλα μετρητικά δίκτυα. Όλες οι χώρες με τεχνολογική παράδοση έχουν καλά οργανωμένα δίκτυα υδρολογικών μετρήσεων και παρατηρήσεων. Αντίστροφα, η έλλειψη αξιόπιστης υδρολογικής πληροφορίας συμβαδίζει με γενικότερη έλλειψη τεχνολογικής υποδομής αλλά και με ανεπαρκή ως κακή οργάνωση της δημόσιας διοίκησης.

Η προμήθεια εξοπλισμού καλής ποιότητας, η εγκατάσταση και η λειτουργία ενός δικτύου υδρομετεωρολογικών σταθμών εξαρτάται πρώτα από τις πιστώσεις που θα διατεθούν, αλλά είναι προφανές ότι αυτό δεν είναι αρκετό: πράγματι, εκτός από τον απαιτούμενο ορθό σχεδιασμό για την εγκατάσταση του δικτύου, που κάθε άλλο παρά εύκολος είναι, χρειάζεται στη συνέχεια εκπαιδευμένο προσωπικό για τη λειτουργία και συντήρησή του με σαφώς προσδιορισμένες και άμεσα ελεγχόμενες ευθύνες και υποχρεώσεις. Πολυάριθμα είναι τα δείγματα εγκαταστημένων οργάνων που δεν λειτουργούν ή που λόγω κακής συντήρησης δίνουν πληροφορίες εμφανώς αναξιόπιστες, άρα πρακτικώς άχρηστες.

Τα όργανα και η μεθοδολογία μέτρησης των πληροφοριών που ενδιαφέρουν την τεχνική υδρολογία, περιγράφονται στα αντίστοιχα ειδικά κεφάλαια αυτού του κειμένου. Οι σκληρές κλιματολογικές συνθήκες, κάτω από τις οποίες πρέπει να λειτουργήσουν τα μετρητικά συστήματα και οι αυξημένες δυσκολίες για την καλή συντήρησή τους, επιβάλλουν ως γενικό κανόνα την επιλογή οργάνων δοκιμασμένης αντοχής και την τυποποίησή τους σε όλη την περιοχή ελέγχου της αρμόδιας υπηρεσίας ή ακόμα καλύτερα, της επικράτειας.

Η ύπαρξη ενός επαρκούς και αξιόπιστου δικτύου μετρήσεων της υδρολογικής πληροφορίας αποτελεί το πρώτο έργο υποδομής για την αξιοποίηση του υδατικού δυναμικού μιας χώρας. Τέτοιο δίκτυο δεν σχεδιάστηκε μέχρι σήμερα σε πανελλαδική κλίμακα.*

* Οι αξιόλογες προσπάθειες πολλών σχετικών με το αντικείμενο υπηρεσιών (π.χ. ΔΕΗ, ΕΜΥ, ΥΠΕΧΩΔΕ, ΥΠΓΕ κ.ά.) δεν είναι συντονισμένες και δεν καλύπτουν μακροπρόθεσμους στόχους πολλαπλής χρησιμότητας (ενέργεια, ύδρευση, άρδευση κτλ.). Η έλλειψη ενιαίων και αυστηρών προδιαγραφών προμήθειας και εγκατάστασης των οργάνων μέτρησης, επιβαρύνεται και με την συχνά ελλιπή εκπαίδευση του υπεύθυνου προσωπικού, την πλημμελή συντήρηση και μερικές

1.9.4 Συλλογή, πρώτη επεξεργασία και διαχείριση της πληροφορίας

Όσο καλό και αν είναι ένα δίκτυο υδρολογικών μετρήσεων, παρουσιάζει, όπως και κάθε μετρητικό σύστημα τυχαία ή συστηματικά σφάλματα. Ο ακριβής εντοπισμός και η εξάλειψή τους είναι συνάρτηση του χρονικού διαστήματος που μεσολαβεί μεταξύ της καταγραφής της πληροφορίας και της πρώτης επεξεργασίας της, δηλαδή ενός πρώτου ελέγχου και στη συνέχεια ταξινόμησής της. Πράγματι, όταν η πρώτη επεξεργασία γίνεται σχεδόν αμέσως μετά την καταγραφή, εντοπίζονται με ακρίβεια όλα τα παράδοξα της καταγραφής, αφού τα υδρολογικά γεγονότα είναι πρόσφατα, και λαμβάνονται αμέσως τα απαραίτητα μέτρα για τη βελτίωση της λειτουργίας του δικτύου, που τις περισσότερες φορές είναι ασήμαντες μεν αλλά καθοριστικές για την ποιότητα της πληροφορίας επεμβάσεις. Η σημασία αυτής της ανάγκης για άμεση (σε ελάχιστο χρόνο) πρώτη επεξεργασία της μετρημένης πληροφορίας, γίνεται τόσο μεγαλύτερη όσο χειροτερεύει η ποιότητα των εγκαταστάσεων του δικτύου και των υπηρεσιών συντήρησης και λειτουργίας του. Οι άμεσες επεμβάσεις στο δίκτυο διασώζουν τότε πολλές φορές, ολόκληρη την παρεχόμενη πληροφορία.

Μέχρι πρόσφατα, η ταξινόμηση και η διαχείριση της υδρολογικής πληροφορίας γίνονταν με αποκλειστική χρήση παραδοσιακών τρόπων αρχειοθέτησης σε φακέλους. Τα δεδομένα σπανίως δημοσιεύονταν σε ειδικές εκδόσεις και έτσι ο ενδιαφερόμενος μελετητής κατά κανόνα χρειάζονταν να ανατρέχει στους φακέλους των αρμόδιων υπηρεσιών. Σήμερα η πληροφορική επιτρέπει τη ριζική αλλαγή αυτού του μοντέλου, αυτοματοποιώντας και καθιστώντας ευχερή τη διαχείριση της υδρολογικής πληροφορίας με χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών, καθώς και την πρόσβαση σε αυτή. Διάφορες πρακτικές οργάνωσης της πληροφορίας με

φορές την εγκατάλειψη των οργάνων, και τέλος τη μεγάλη καθυστέρηση στην πρώτη επεξεργασία των μετρήσεων. Έτσι, η ποσότητα και η ποιότητα της αξιοποιήσιμης πληροφορίας είναι συχνά ανεπαρκής, ακόμα και σε περιπτώσεις που η αναγκαιότητα λήψης συγκεκριμένων υδρολογικών πληροφοριών είναι επιτακτική. Απαιτείται λήψη σοβαρών και μελετημένων μέτρων, ώστε η μετρητική υποδομή για αξιοποίηση των υδατικών πόρων μας να ανασυγκροτηθεί σύντομα. Ευτυχώς, οι απαιτούμενες δαπάνες είναι μικρές σε απόλυτους αριθμούς και μπορούν να θεωρηθούν ασήμαντες συγκρινόμενες με τα άμεσα οικονομικά οφέλη που θα προκύψουν από τη βελτίωση του σχεδιασμού και της λειτουργίας των μεγάλων υδραυλικών έργων, αλλά και τα πολλαπλά οφέλη από την απομείωση των υδρολογικών κινδύνων.

χρήση υπολογιστών έχουν ακολουθηθεί από διάφορες χώρες ή και μεμονωμένες υδρολογικές υπηρεσίες. Οι πρακτικές αυτές ξεκινούν από την αυτόνομη αρχειοθέτηση σε κεντρικούς ή προσωπικούς υπολογιστές, με χρήση κοινών αρχείων υπολογιστή ή οργανωμένων βάσεων δεδομένων, και φτάνουν μέχρι τη δημιουργία δικτυωμένων ή κατανεμημένων βάσεων δεδομένων σε συνεργαζόμενους υπολογιστές. Η πρόσβαση στα δεδομένα από τους ενδιαφερόμενους γίνεται με διάφορους τρόπους, ξεκινώντας από τη διάθεση σε δισκέτες ή CD ROM και καταλήγοντας στην πρόσβαση μέσω του διαδικτύου, η οποία προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα και φαίνεται ότι στο μέλλον θα γενικευτεί. Μερικά πρόσθετα στοιχεία γύρω από τις τεχνικές της οργάνωσης των δεδομένων δίνονται από τον Dodson (1993).*

1.9.5 Επεξεργασία και αξιοποίηση της πληροφορίας

Οι άμεσες μετρήσεις των υδρολογικών μεταβλητών, αποτελούν την *πρωτογενή* υδρολογική πληροφορία, η οποία όμως απαιτεί διάφορα στάδια επεξεργασίας προτού γίνει κατάλληλη για άμεσες εφαρμογές. Παραπάνω αναφερθήκαμε στο πρώτο στάδιο επεξεργασίας. Τα κύρια στάδια επεξεργασίας περιλαμβάνουν:

1. μετατροπές χρονικού βήματος (με συνάθροιση)·
2. έλεγχο ομογένειας, εντοπισμό και άρση των ανομογενειών (π.χ. μεμονωμένων ή συστηματικών σφαλμάτων)·
3. συμπλήρωση των ελλείψεων μετρήσεων (λόγω βλάβης οργάνων κτλ.)·
4. εξαγωγή δευτερογενών μεταβλητών (π.χ. παροχής από στάθμη, εξέλιξης από άλλες μετεωρολογικές μεταβλητές κτλ.).

* Στην Ελλάδα η συστηματική άσκηση πίεσης για ορθολογική, αξιόπιστη και συντονισμένη οργάνωση της ταξινόμησης και πρώτης επεξεργασίας της υδρολογικής πληροφορίας άρχισε τη δεκαετία του 1960, με προεξάρχουσες τις συμβολές του Αργυρόπουλου (από το 1961), με τη δημοσίευση δεδομένων, και του Ξανθόπουλου (από το 1969), με τη δημοσίευση επιστημονικών κειμένων. Οι προσπάθειες προς την κατεύθυνση της δημιουργίας σύγχρονων βάσεων δεδομένων ξεκινούν από τα τέλη της δεκαετίας του 1980 (Κουτσογιάννης, 1988· Koutsoyiannis et al., 1991· Tolikas et al., 1993· ΕΜΠ-Ερευνητική Ομάδα Υδροσκοπίου, 1994· Papakostas et al., 1994).

Για τα στάδια 2 και 3 χρησιμοποιούνται κυρίως στατιστικές μέθοδοι, (π.χ. απλή ή πολλαπλή παλινδρόμηση) χωρίς να αποκλείεται η χρήση απλούστερων μεθόδων προσδιοριστικού χαρακτήρα (π.χ., συμπλήρωση ύψους βροχής από τιμές γειτονικών σταθμών, παίρνοντας υπόψη και τις αποστάσεις ανάμεσα στους σταθμούς). Το στάδιο 4 κυριαρχείται από τη χρήση προσδιοριστικών μεθόδων (π.χ. εκτίμηση της εξάτμισης με τη μέθοδο Penman· βλ. κεφάλαιο 3), αλλά και οι στατιστικές μέθοδοι έχουν και εδώ εφαρμογή (π.χ. εξαγωγή καμπυλών στάθμης-παροχής με γραμμική παλινδρόμηση· βλ. κεφάλαιο 4). Το συνολικό λογισμικό μιας τράπεζας δεδομένων παρέχει συχνά και τις δυνατότητες εκτέλεσης των παραπάνω σταδίων επεξεργασίας. Στις περισσότερες, όμως, περιπτώσεις η επεξεργασία της πληροφορίας γίνεται με ευθύνη του μελετητή, ο οποίος έχει πρόσβαση στην πρωτογενή πληροφορία.

Η επεξεργασμένη, πλέον, πληροφορία μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια για λήψη αποφάσεων από τον υδρολόγο μηχανικό, ο οποίος καλείται να εκτιμήσει και να προβλέψει τη χωροχρονική διανομή των υδατικών πόρων (καταλήγοντας σε αποφάσεις κατασκευής πολυδάπανων έργων) στηριζόμενος συνήθως σε μικρές (και μερικές φορές ανύπαρκτες) ιστορικές χρονοσειρές της κύριας υδρολογικής πληροφορίας (παροχές). Ανεξάρτητα από την τεχνική που θα ακολουθήσει, για να βελτιώσει την αξιοπιστία της εκτίμησης των υδρολογικών μεγεθών σχεδιασμού του υδραυλικού έργου, πρέπει να επεξεργαστεί ένα δείγμα και να γνωματεύσει για τη συμπεριφορά όλου του πληθυσμού από τον οποίο το δείγμα αυτό προέκυψε. Αντιμετωπίζει μάλιστα ιδιαίτερες δυσκολίες: πρώτα γιατί το δείγμα δεν το διαλέγει ο ίδιος (όπως θα έκανε π.χ. ο κοινωνιολόγος), αλλά παίρνει ότι του δίνει το φυσικό περιβάλλον· δεύτερο γιατί τα υδρολογικά γεγονότα δεν είναι, όπως είδαμε, τελείως τυχαία γεγονότα (όπως θα ήθελε η κλασική στατιστική)· και τρίτο γιατί η επιθυμητή ομογένεια των δεδομένων ενός δείγματος είναι και δύσκολη και ευαίσθητη (εξαρτάται π.χ. από γενικές ή ειδικές αλλαγές στη διαδικασία μέτρησης αλλά και στο φυσικό περιβάλλον).

Τρεις είναι οι κύριες φάσεις αξιοποίησης της πληροφορίας ενός υδρολογικού δείγματος για τη λήψη αποφάσεων:

- η περιγραφή της πληροφορίας, που περιλαμβάνει ταξινόμηση και συμπύκνωσή της με τη βοήθεια γραφημάτων ή χαρακτηριστικών τιμών της (μέση τιμή, τυπική απόκλιση, κτλ.)·

- η επιλογή ή κατάστρωση ενός μοντέλου, δηλαδή το “ντύσιμό” της πληροφορίας με κάποιο πιθανοτικό ή στοχαστικό μοντέλο, που πρέπει να ταιριάζει κατά το δυνατό καλύτερα στο ιστορικό δείγμα·
- η πρόγνωση, δηλαδή προβολή στο μέλλον του επιλεγμένου μοντέλου για την εκτίμηση των υδρολογικών μεταβλητών σχεδιασμού, έξω από το εύρος της ιστορικής χρονοσειράς.

Στα επόμενα κεφάλαια θα αντιμετωπίσουμε, ξεχωριστά για καθεμιά από τις υδρολογικές μεταβλητές, τον τρόπο επεξεργασίας και αξιοποίησης της υδρολογικής πληροφορίας.