# ΠΟΜ 442 ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ

Διδάσκων Δρ. Ηλίας Γραβάνης

## Περιεχόμενα

Εισαγωγικές έννοιες (ορισμοί, ιστορικό, υδρολογικός κύκλος, υδρολογική πληροφορία λεκάνης απορροής). Περιγραφή, ανάλυση και μέτρηση υδρολογικών διεργασιών (ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα, υδρολογικά ελλείμματα, επιφανειακή απορροή, υπόγεια νερά, εκμετάλλευση υδροφορέων). Πιθανοθεωρητικές και στατιστικές μέθοδοι στην τεχνική υδρολογία (πιθανοθεωρητική περιγραφή υδρολογικών διεργασιών, διακινδύνευση, τυπική στατιστική ανάλυση και πρόγνωση υδρολογικών μεταβλητών, στατιστική διερεύνηση συσχετισμού υδρολογικών μεταβλητών, βελτίωση της υδρολογικής πληροφορίας). Υπολογιστικές μέθοδοι στην τεχνική υδρολογία (υδρογράφημα πλημμύρας, γραμμικές λεκάνες, υδρογράφημα, διόδευση πλημμύρας, εισαγωγή στα μοντέλα προσομοίωσης λεκανών απορροής).

# Βιβλιογραφία

Κουτσογιάννης Δ. & Ξανθόπουλος (1999) Τεχνική Υδρολογία, Εκδόσεις ΕΜΠ
Μιμίκου Μ.(2006) Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, Εκδόσεις Παπασωτηρίου
Μιμίκου Μ. & Μπαλτάς Ε. (2003) Τεχνική Υδρολογία, Εκδόσεις ΕΜΠ
Τσακίρης Γ., (1995) Υδατικοί πόροι: Ι. Τεχνική Υδρολογία, Εκδόσεις Συμμετρία
Κωτσόπουλος Σ. (2006) Υδρολογία Εκδόσεις ΙΩΝ
Σακκάς Ι., (2004) Τεχνική Υδρολογία, Τόμος 1, Υδρολογία Επιφανειακών Υδάτων, Εκδόσεις Αΐβαζή
Shaw Elizabeth (1994) Hydrology in Practice, Chapman & Hall, ISBN 0-203-01325-5
Maidment, D., 1993 "Handbook of Hydrology"
Οδηγία 2000/60/ΕΚ ΤΟΥ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟΥ ΚΟΙΝΟΒΟΥΛΙΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΥΜΒΟΥΛΙΟΥ της 23ης Οκτωβρίου 2000 για την θέσπιση πλαισίου κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων. (2000)
Προσχέδιο Διαχείρισης Λεκάνης Απορροής Κύπρου,
Προκαταρκτικό Σχέδιο Διαχείρισης Ξηρασίας

## Αξιολόγηση

Η παρακολούθηση του μαθήματος είναι υποχρεωτική με όριο απουσιών το 25% των διδακτικών ωρών. Θα λάβει χώρα ένα διαγώνισμα προόδου (mid-semester examination) κατά την διάρκεια του εξαμήνου και θα αποτελεί το 35% της τελικής βαθμολογίας. Το τελικό διαγώνισμα περιλαμβάνει ερωτήσεις θεωρίας και ασκήσεις και γίνεται με κλειστά βιβλία και αποτελεί το 65% της τελικής βαθμολογίας.

# 1. Γενικές έννοιες (ορισμοί, ιστορικό)

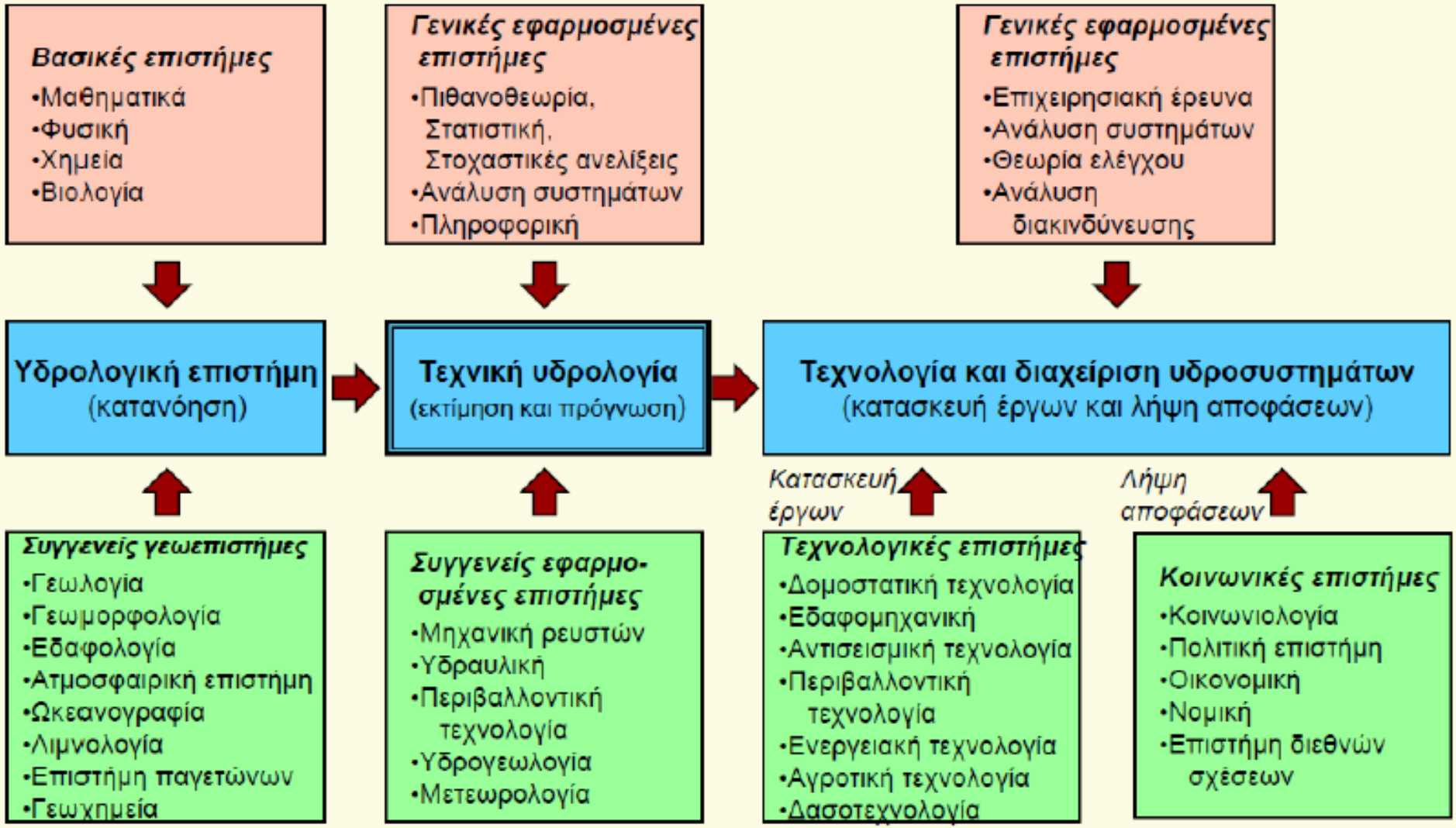
## Ορισμός της υδρολογίας

- **Υδρολογία** (hydrology) 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 περιβάλλον, στο οποίο περιλαμβάνονται και τα έμβια όντα.
- **Τεχνική υδρολογία** (engineering hydrology) είναι ο κλάδος της υδρολογίας που έχει στόχο την ποσοτική εκτίμηση και πρόγνωση των υδρολογικών μεγεθών.

# Διασαφήνιση του ορισμού της υδρολογίας

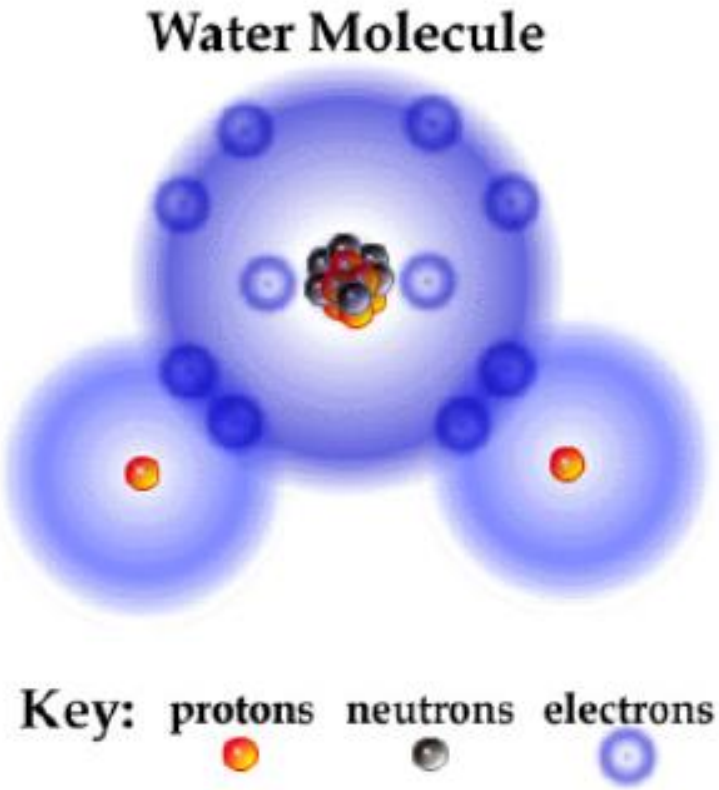
| Τομέας | Ανάλυση αντικειμένου | Περιλαμβάνει: | Δεν περιλαμβάνει |
|---|---|---|---|
| Υδατικό ισοζύγιο υδρογείου | Χωρική και χρονική μεταβλητότητα του υδατικού ισοζυγίου της υδρογείου (σε στερεή, υγρή και αέρια φάση, στη θάλασσα, την ξηρά και την ατμόσφαιρα) | Διαδρομές διακίνησης, διακινούμενες 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 συνοδεύουν 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) |

# Ένταξη της υδρολογίας στο ευρύτερο επιστημονικό και τεχνολογικό πλαίσιο



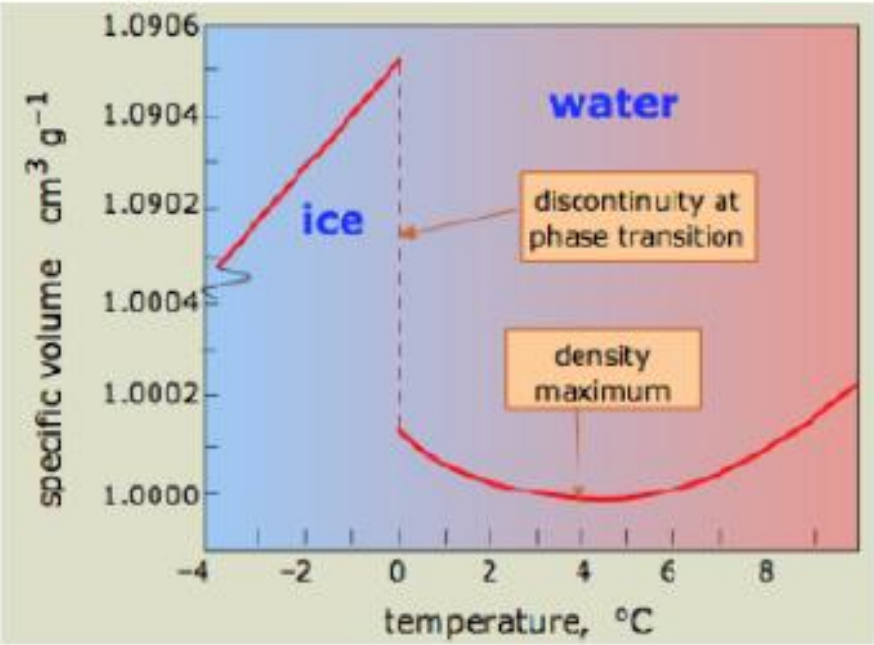
# Water Molecule

- Electrons desired
  - "s" shell – 2
  - "p" shell – 8
  - Total – 10
- Electrons available:
  - Hydrogen $H^1$ – 1
  - Oxygen $O^{16}$ – 8
  - For $H_2O$ – 10



# Water Density

- Water as a solid (ice) is less dense than it is as a liquid
- Maximum density is at 4°C



# 2. Ιστορική Εξέλιξη

Ήδη πριν από αρκετές εκατονταετίες ο άνθρωπος άλλαζε τη μορφή της φύσης για να εξυπηρετήσει τις ανάγκες του όπως μαρτυρούν τα αρδευτικά έργα της Αιγύπτου της Μεσοποταμίας και της Κίνας, τα υδραγωγεία της Ρωμαϊκής περιόδου. Ο Αριστοτέλης (428-347 π.Χ.) στα Μετεωρολογικά διατύπωσε μια θεωρία για τον υδρολογικό κύκλο που είναι πολύ κοντά σε ότι πιστεύουμε σήμερα και ο μαθητής του Θεόφραστος (372-287 π.Χ.) με τις παρατηρήσεις του έβαλε τα θεμέλια της Υδρολογίας.

Η περίοδος της σύγχρονης υδρολογίας μπορεί να θεωρηθεί ότι αρχίζει τον 17$^{o}$ αιώνα όπου πλέον η γνώση των υδρολογικών φαινομένων στηρίζεται στη μέτρηση. Ο Perault (1608-1680) μέτρησε την βροχόπτωση και την εξάτμιση της λεκάνης απορροής του ποταμού Σηκουάνα και διαπίστωσε ότι μόνο το ένα έκτο της βροχής μετατρέπεται σε απορροή. Ο αστρονόμος Halley εκτίμησε την εξάτμιση με βάση μετρήσεων εξάτμισης από ανοιχτά δοχεία της Μεσογείου θάλασσας. Τον 18$^{o}$ αιώνα αρχίζει η πειραματική έρευνα και εφευρίσκονται όργανα για παράδειγμα για τη μέτρηση της παροχής όπως ο σωλήνας Pitot, ο μυλίσκος Woltman κ.α. Στον 20$^{o}$ αιώνα εισάγεται η ορθολογική μέθοδος στη μελέτη των υδρολογικών φαινομένων. Διατυπώνεται το μοναδιαίο υδρογράφημα από τον Sherman, η διήθηση της επιφανειακής απορροής εκφράζεται μαθηματικά από τον Horton και εισάγεται η στατιστική. Από το 1950 αρχίζει η περίοδος εφαρμογής θεωρητικών μεθόδων (Σακκάς, 2004) στην υδρολογία και η χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών κάνει εφικτή την επίλυση πολύπλοκων διαφορικών εξισώσεων στα υπό μελέτη φαινόμενα που συνδυάζονται με πολύπλοκα και υψηλής ανάλυσης όργανα για τον πειραματικό έλεγχο των προτεινόμενων θεωρητικών λύσεων των υδρολογικών φαινομένων.

# 3. Υδρολογικός κύκλος και ποσοτική έκφρασή του

## Παρουσία του νερού στη γη

| 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 | 1 385 984 610 | 100 | 35 029 210 | 100 |

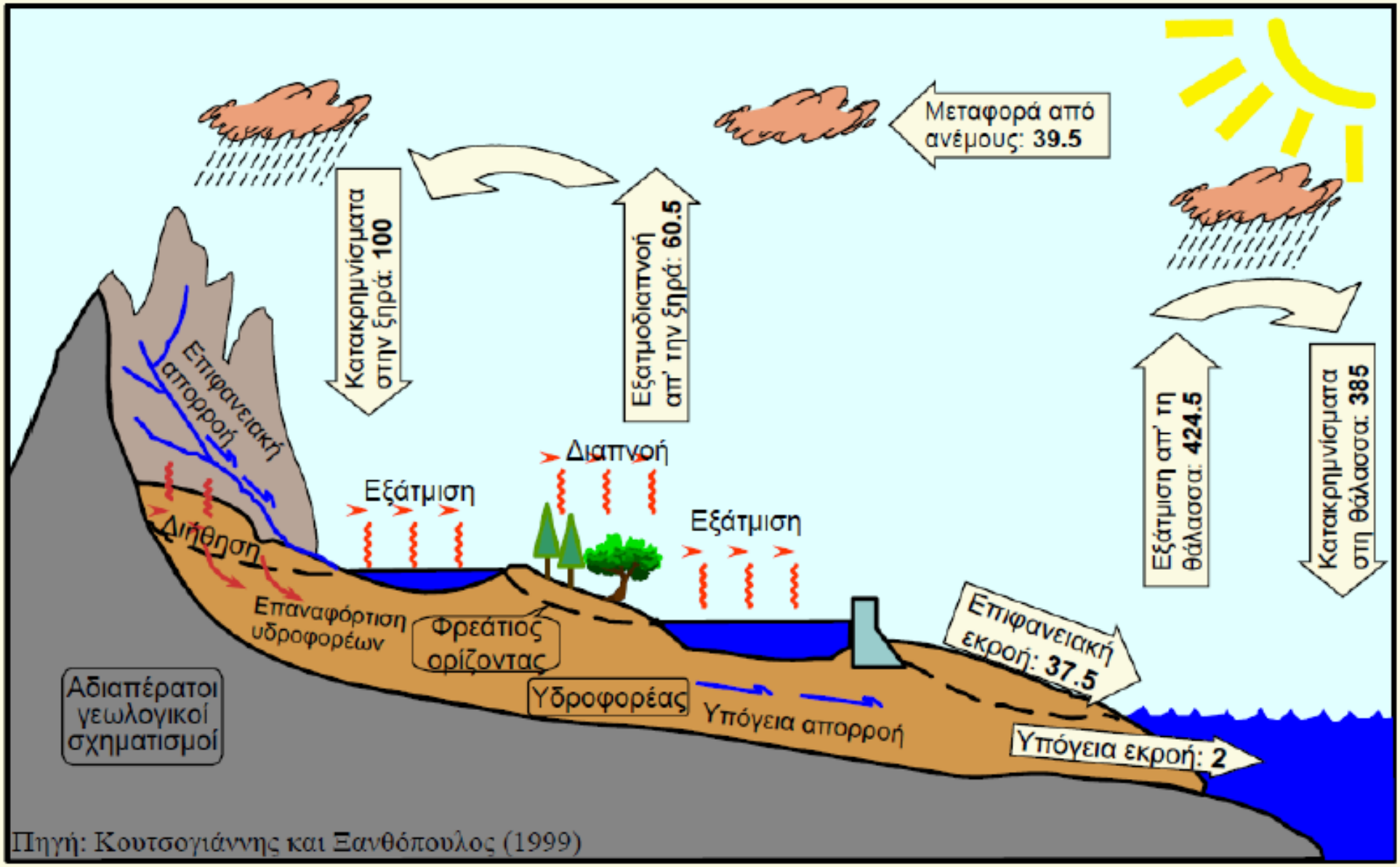
# Υδρολογικός Κύκλος

- *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.

# Κυκλοφορία του νερού στη γη

| 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 επιφάνειας Γης | 510.0 | Κατακρημνίσματα | 577 | 1131 | 18.28 | 100.0 |
| | | Εξατμοδιαπνοή | | | | |
| 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 | 44.7 | 300 | 1.42 | 37.6 |
| | | Υπόγεια συνιστώσα απορροής | 2.3 | 16 | 0.07 | 1.9 |

# Υδρολογικός κύκλος – Υδατικό ισοζύγιο της γης




Πηγή: Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος (1999)

# Ποσοτική έκφραση συνιστωσών του Υδρολογικού Κύκλου

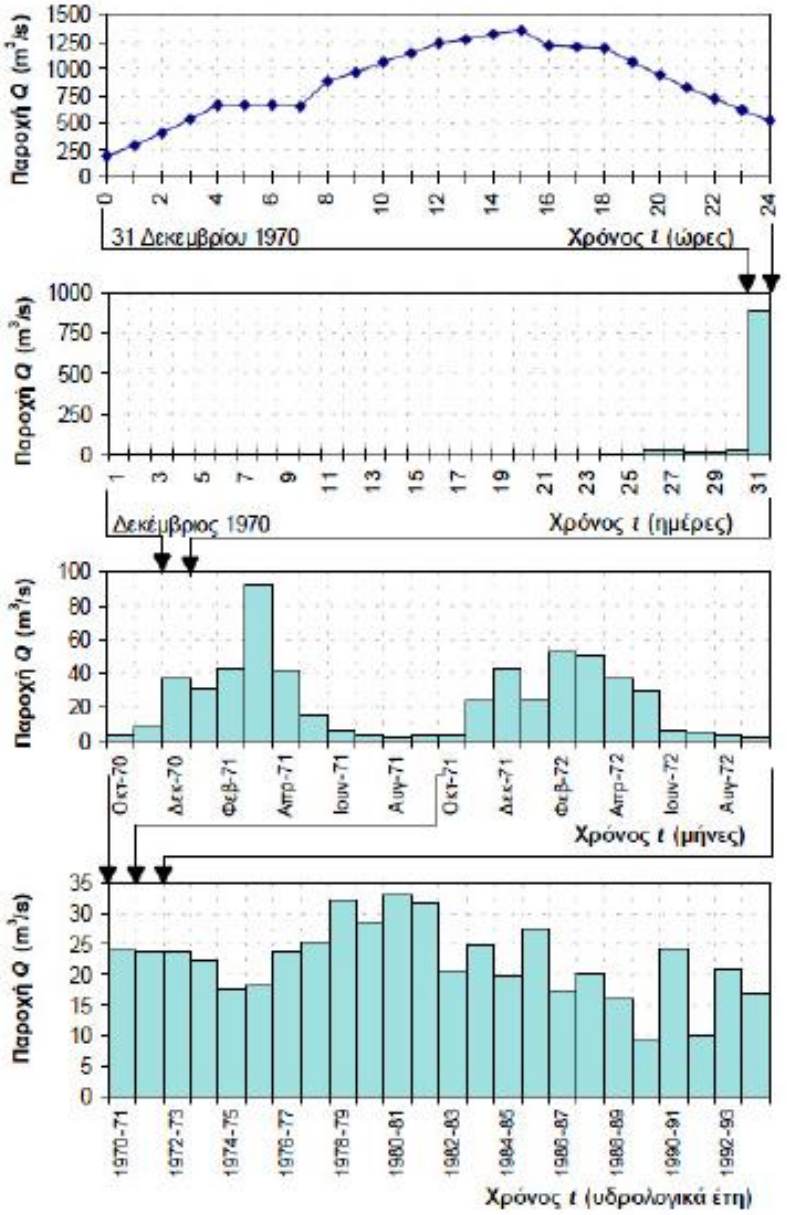
Οι κύριες μεταβλητές της υδρολογίας διακρίνονται σε:

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

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

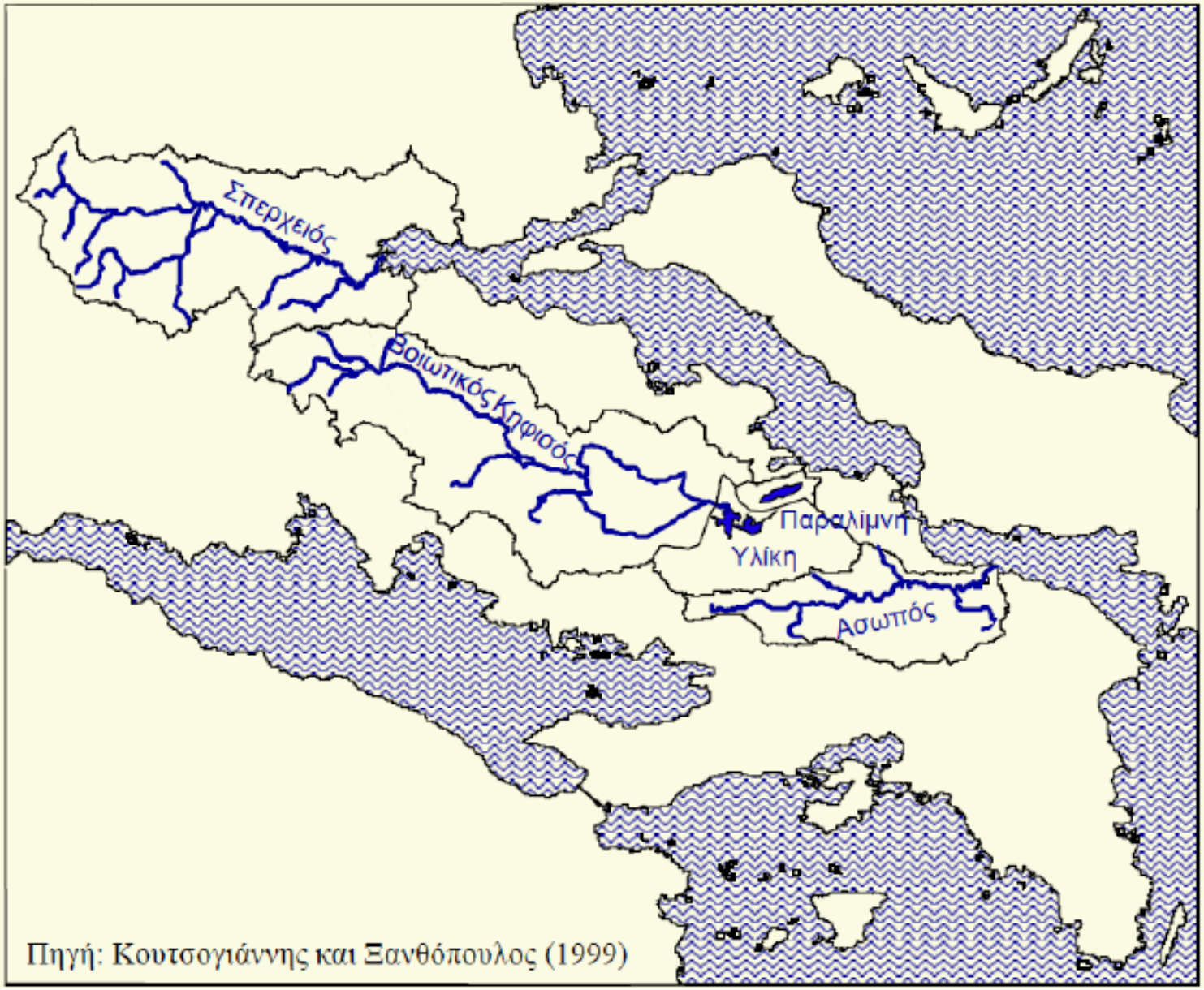
- τον *όγκο* που διακινήθηκε σε ένα δεδομένο χρονικό διάστημα (π.χ. όγκος κατακρημνισμάτων 100 $hm^3$ † σε μια περιοχή για ένα έτος)·
- την *παροχή*, δηλαδή το ρυθμό διακίνησης στη μονάδα του χρόνου (π.χ. παροχή ποταμού 5 $m^3/s$ σε μια διατομή για μια δεδομένη στιγμή)·
- το *ισοδύναμο* (ή *ανηγμένο*) *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).

# Χρονικές Κλίμακες



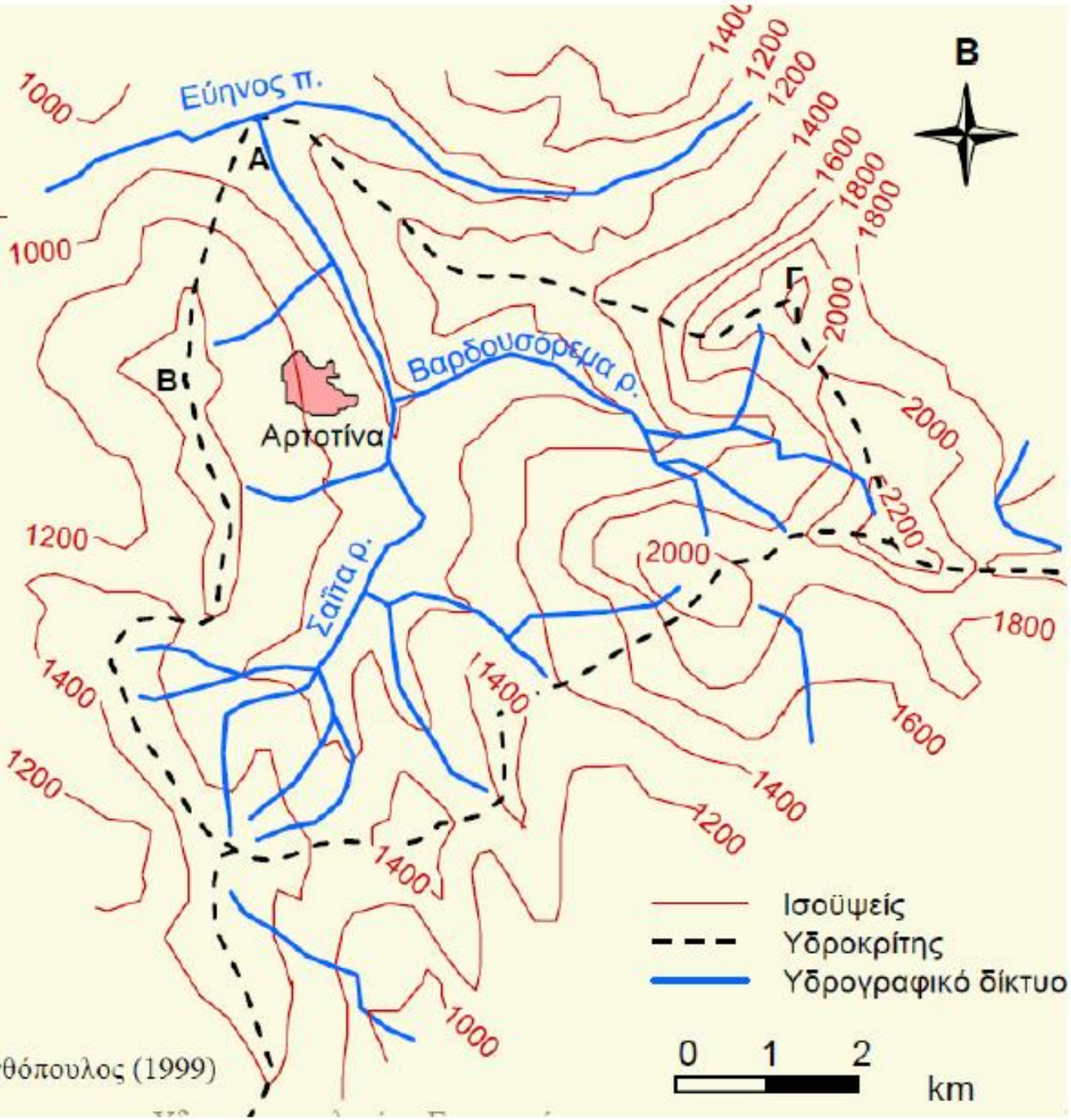

Σχ. 1.7 Εξέλιξη της παροχής του ποταμού Ευήνου στη θέση Πόρος Ρηγανίου για διάφορες χρονικές κλίμακες (Δεδομένα: Μαμάσης και Ναλμπάντης, 1995).

# Χωρικές κλίμακες της υδρολογίας: Η λεκάνη απορροής




Πηγή: Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος (1999)

# Λεκάνη απορροής: Λεπτομέρεια




Πηγή: Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος (1999)

# 4. Το Υδρολογικό Ισοζύγιο

Το υδρολογικό ισοζύγιο αποτελεί την μαθηματική έκφραση του υδρολογικού κύκλου. Εκφράζεται με το ρυθμό αλλαγής της αποθήκευσης του νερού στη λεκάνη DS, σε καθορισμένο χρόνο Δt και ισούται με τη διαφορά μεταξύ εισροής και εκροής. Αν η λεκάνη απορροής θεωρηθεί ως ένα σύστημα στο οποίο είναι γνωστές μόνο η εισροή και η εκροή και άγνωστες οι εσωτερικές διεργασίες (black box) το υδρολογικό ισοζύγιο του συστήματος μπορεί να εκφραστεί ως εξής (Μιμίκου και Μπαλτάς, 2003):

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = \bar{I} - \bar{O} \tag{1.1}$$

$$\frac{S_2 - S_1}{\Delta t} = \frac{I_1 + I_2}{2} - \frac{O_1 + O_2}{2} \tag{1.2}$$

Όπου $\bar{I}$ και $\bar{O}$ είναι αντίστοιχα η μέση εισροή και εκροή για το χρονικό διάστημα Δt, το οποίο γίνεται υπόθεση ότι είναι πολύ μικρό, ώστε να έχει νόημα ο υπολογισμός μέσης τιμής. Οι δείκτες 1 και 2 αντιστοιχούν στις τιμές στη αρχή και στο τέλος του χρονικού διαστήματος $\Delta t = t_2 - t_1$. Αν τα I και O μεταβάλλονται συνεχώς με το χρόνο t, τότε η παραπάνω εξίσωση μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\frac{dS(t)}{dt} = I(t) - O(t) \tag{1.3}$$

Η εισροή σε μια λεκάνη απορροής δύναται να είναι η βροχή, το χιόνι, το χαλάζι, ενώ η επιφανειακή απορροή, η ενδιάμεση απορροή, η υπόγεια απορροή, η εξάτμιση, η διαπνοή και η διήθηση, είναι οι συνηθέστερες συνιστώσες της εκροής. Η αποθήκευση έχει διάφορες συνιστώσες, όπως η επιφανειακή αποθήκευση (πάνω στο έδαφος, συμπεριλαμβανομένου της αποθήκευσης σε ποτάμια συστήματα και ταμιευτήρες), η υπεδάφια αποθήκευση (στο ριζικό σύστημα), η υπόγεια αποθήκευση (μέσα στους υπόγειους υδροφορείς) και η παρεμπόδιση (από βλάστηση, κτίρια κ.α.). Οι παράγοντες αυτοί συμπεριλαμβάνονται στην παρακάτω βασική εξίσωση του υδρολογικού ισοζυγίου:

$$\Delta S = P - R - G - E - T \qquad (1.4)$$

Σύμφωνα με αυτήν την εξίσωση, η μεταβολή στην αποθηκευτικότητα μιας λεκάνης απορροής είναι ίση με την ποσότητα νερού που πέφτει με τη μορφή κατακρήμνισης P, μείον την ποσότητα νερού που απορρέει επιφανειακά R, απορρέει υπόγεια G, εξατμίζεται στην ατμόσφαιρα E και διαπνέεται από τα φυλλώματα της βλάστησης T. Για μεμονωμένα επεισόδια βροχόπτωσης, οι συνιστώσες της εξάτμισης E και της διαπνοής T είναι αρκετά μικρότερες από τις υπόλοιπες και παραλείπονται.

***Παράδειγμα 1.1***

Βροχόπτωση έντασης 5 mm/h, έπεσε σε λεκάνη απορροής έκτασης 4 $km^2$ για 5 ώρες. Στην έξοδο της λεκάνης μετρήθηκε απορροή κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου ίση με 70000 $m^3$. Πόση από την ποσότητα της 5ωρης βροχόπτωσης μετατράπηκε σε υδρολογικές απώλειες;

***Παράδειγμα 1.2***

Η επιφάνεια της λίμνης Κουρνά είναι 1036000$m^2$ και το έτος 2005 η εισροή ήταν 0.1 $m^3/s$ και η αντίστοιχη εκροή 0.09 $m^3/s$ και η αύξηση του αποθέματος ήταν 198000 $m^3$. Ένας βροχογράφος που είναι δίπλα στη λίμνη μέτρησε για το έτος αυτό συνολική βροχόπτωση 752mm. Αν υποτεθεί ότι οι διαφυγές από τη λίμνη δεν είναι σημαντικές, να προσδιοριστεί η ετήσια εξάτμιση της λίμνης.

*Παράδειγμα 1.3*

Η λεκάνη απορροής του Κράθι ποταμού έχει συνολική έκταση 149 $km^2$ και καλύπτεται από τρεις βροχομετρικούς σταθμούς της Ζαρούχλας, Τσιβλού και Ακράτας. Το ποσοστό της επιφάνειας της λεκάνης που αντιπροσωπεύει ο κάθε σταθμός είναι 36%, 43% και 21% αντίστοιχα. Κατά το υδρολογικό έτος 2003-4 οι τρεις σταθμοί κατέγραψαν τα ακόλουθα μηνιαία ύψη βροχής σε mm (Πίνακας 1.1).

***Πίνακας 1.1*** Μηνιαία ύψη βροχής σε 3 βροχομετρικούς σταθμούς

| | Ακράτα | Τσιβλός | Ζαρούχλα |
|---|---|---|---|
| Οκτώβριος | 70.6 | 126.37 | 122.14 |
| Νοέμβριος | 23.1 | 41.35 | 39.96 |
| Δεκέμβριος | 105.6 | 189.02 | 182.69 |
| Ιανουάριος | 134.6 | 240.93 | 232.86 |
| Φεβρουάριος | 34.9 | 62.47 | 60.38 |
| Μάρτιος | 37.8 | 67.66 | 65.39 |
| Απρίλιο | 45.4 | 81.27 | 78.54 |
| Μάιο | 19.4 | 34.73 | 33.56 |
| Ιούνιο | 5.5 | 9.85 | 9.52 |
| Ιούλιο | 1.3 | 2.33 | 2.25 |
| Αύγουστος | 0.0 | 0.00 | 0.00 |
| Σεπτέμβριος | 1.5 | 2.69 | 2.60 |

Να υπολογιστούν:

1. Το σημειακό ετήσιο ύψος βροχής στον κάθε σταθμό.
2. Το ετήσιο ύψος βροχής και ο ετήσιος όγκος βροχής στη λεκάνη απορροής.
3. Εάν η μέση ετήσια απορροή είναι 1.5 $m^3/s$ να υπολογιστεί ο ετήσιος όγκος απορροής και το ισοδύναμο ύψος απορροής της λεκάνης σε mm.
4. Ο ετήσιος συντελεστής απορροής.
5. Ο όγκος υδρολογικών απωλειών και το ισοδύναμο ύψος υδρολογικών απωλειών στη λεκάνη.
6. Η πραγματική εξατμισοδιαπνοή εάν οι υδρολογικές απώλειες από διήθηση και υπόγειες διαφυγές είναι το 35% της συνολικής βροχής.
7. Το μέγιστο μηνιαίο ύψος βροχής στη λεκάνη απορροής.