

# ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ

Δρ. Γκουντούλας Χρ. Κωνσταντίνος PhD, MSc

# Οι «κυρίαρχοι»

100 χιλ.χρ. πριν - Σήμερα



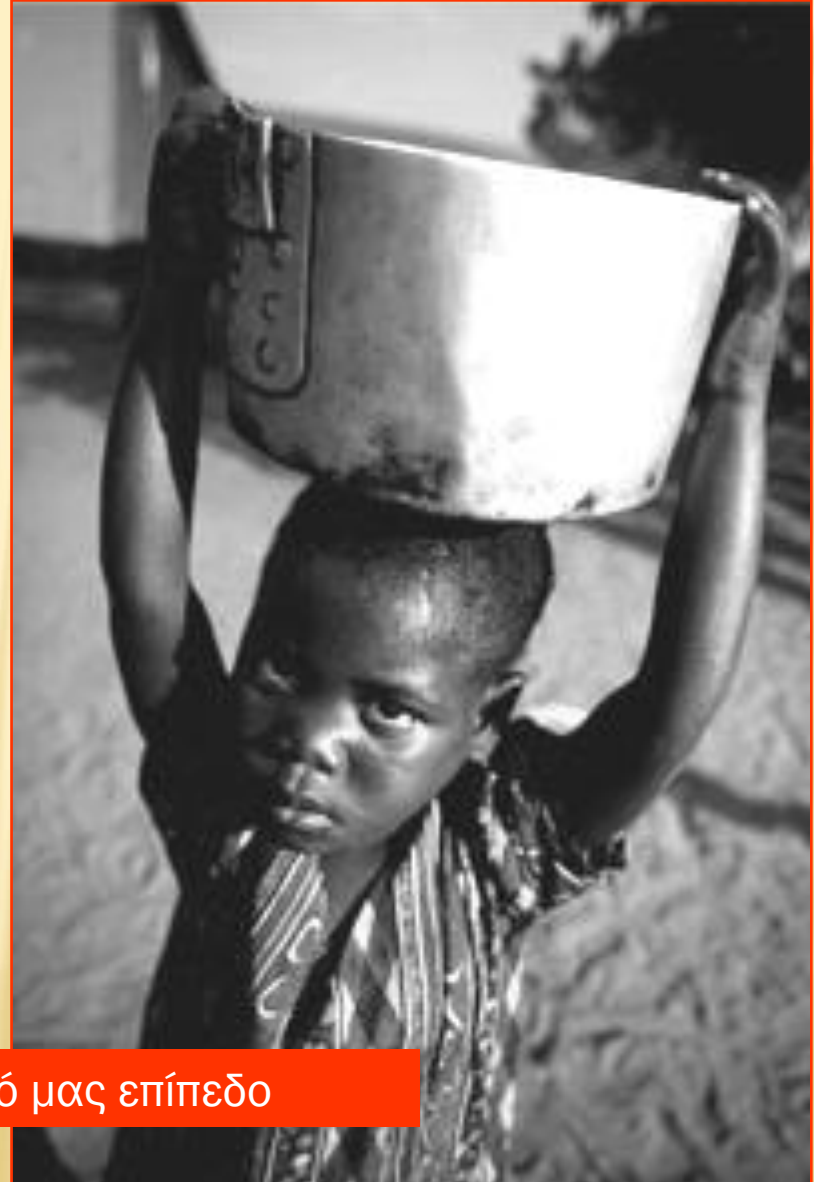
250-70 εκ. χρ. πριν



500-400 εκ. χρ. πριν



# Το νερό δεν προέρχεται από τη βρύση

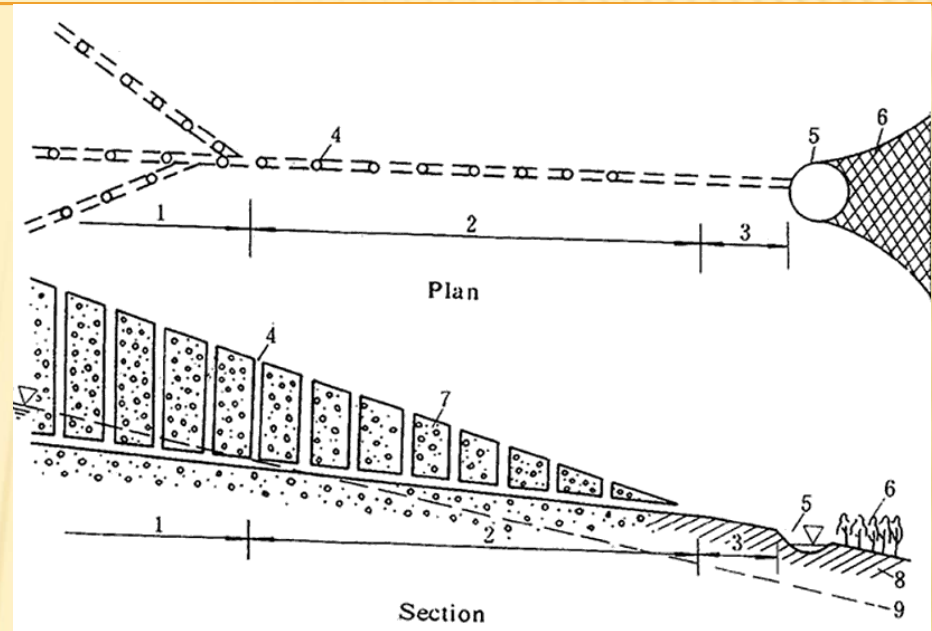


...και καθορίζει το βιοτικό μας επίπεδο

# ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΟ ΠΑΡΕΛΘΟΝ



Απομεινάρια της Περσεπόλεως, της αρχαίας πρωτεύουσα της Περσίας που χτίστηκε από τον Δαρείο Ι το 520 π.Χ., στο κέντρο της αεροφωτογραφίας. Οι σειρές των μικρών τρυπών που μοιάζουν με σημάδια αποκαλύπτουν την παρουσία διάφορων συστημάτων qanat κάτω από την επιφάνεια: κάθε τρύπα είναι η κορυφή ενός φρέατος εξαερισμού.



Γενικό σχήμα ανάπτυξης ενός συστήματος qanats. (1) Τμήμα εμπλουτισμού των στοών, (2) Μέρος μεταβίβασης ύδατος (τμήμα πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα), (3) Ανοικτό κανάλι (στοά), (4) Κάθετες στοές, (5) Μικρή λίμνη αποθήκευσης, (6) Περιοχή άρδευσης, (7) Άμμος και αμμοχάλικο, (8) Εδαφικά στρώματα, (9) Ισοδυναμική επιφάνεια υπόγειων νερών.

# ΝΟΜΟΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΣΤΟ ΠΑΡΕΛΘΟΝ

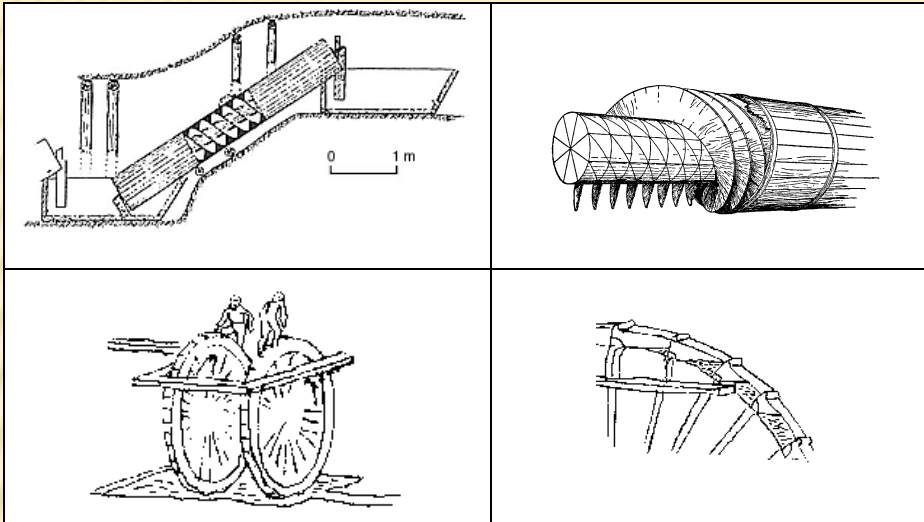
Απόσπασμα του νόμου του Σόλωνα που αναφέρεται στις επιτρεπόμενες αποσπάσεις ανόρυξης φρέατος από δημόσιο ή ιδιωτικό φρέαρ. (Πλουτάρχου, Σόλων, 23):

«Επειδή δεν υπάρχουν ούτε ποταμοί μόνιμης ροής ούτε λίμνες ούτε άφθονες πηγές στη χώρα, αλλά οι περισσότεροι χρησιμοποιούσαν κατασκευασμένα φρέατα, έγραψε νόμο, όπου υπάρχει σε ακτίνα 740 μέτρων δημόσιο φρέαρ, να χρησιμοποιούν αυτό. ... όπου δεν υπάρχει, να κατασκευάζουν μόνοι τους. Αν δεν βρουν νερό σε βάθος 18,5 μέτρων, τότε να παίρνουν από το γείτονα μια υδρία από δυο φορές την ημέρα. ... Όρισε και αποστάσεις στις καλλιέργειες ... διατάζοντας όποιοι φυτεύουν οτιδήποτε άλλο να απέχει 1,5 μέτρα από του γείτονα, και όποιοι φυτεύουν συκιά ή ελιά να απέχει 2,7 μέτρα, γιατί οι ρίζες τους φτάνουν πιο μακριά και αφαιρούν την τροφή από τα γειτονικά τους, ή τα βλάπτουν οι απορροές τους. Και όποιος θέλει να ανοίξει βόθρους και τάφρους, σε όσο βάθος φτάνουν τόσο να απέχουν και μεταξύ τους, και όποιος βάζει μελίσσια, να απέχουν από τα υφιστάμενα 90 μέτρα.».



Ο Σόλων παραδίδει τους νόμους του στους Αθηναίους. Perino del Vaga, Solon Giving Laws to the Athenians, c. 1541. Lent from the Royal Library by Her Majesty Queen Elizabeth II (National Gallery of Art, Washington D.C.).

# ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΣΤΟ ΠΑΡΕΛΘΟΝ



Στη θητεία του Αρχιμήδη στην Αίγυπτο γύρω στο 250 π.Χ., αποδίδεται ο κοχλίας άντλησης νερού (πάνω) που βρήκε ευρύτατη εφαρμογή στην αποστράγγιση των ρωμαϊκών ορυχείων (Διόδωρος Σικελιώτης, Ιστορίαι), και η άντληση με ποδήλατο τροχό (κάτω). Πηγή: <http://www.math.nyu.edu/~crorres/Archimedes/Screw/SourcesScrew.html> (New York University, Department of Mathematics).

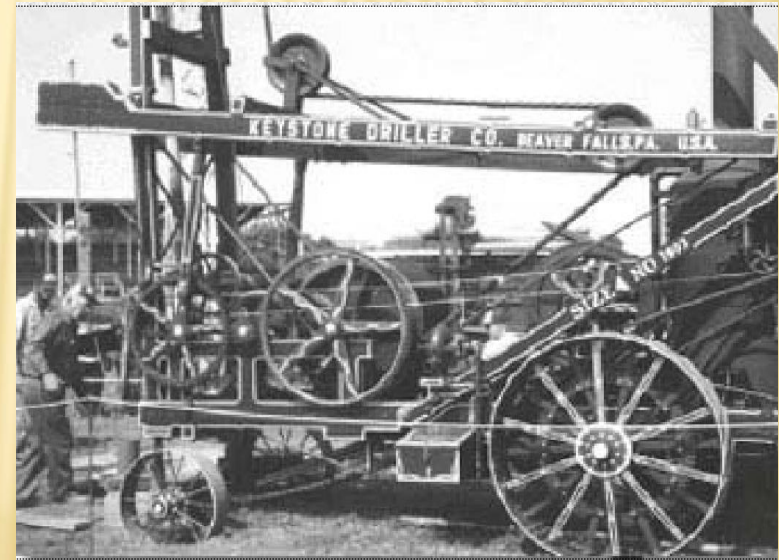
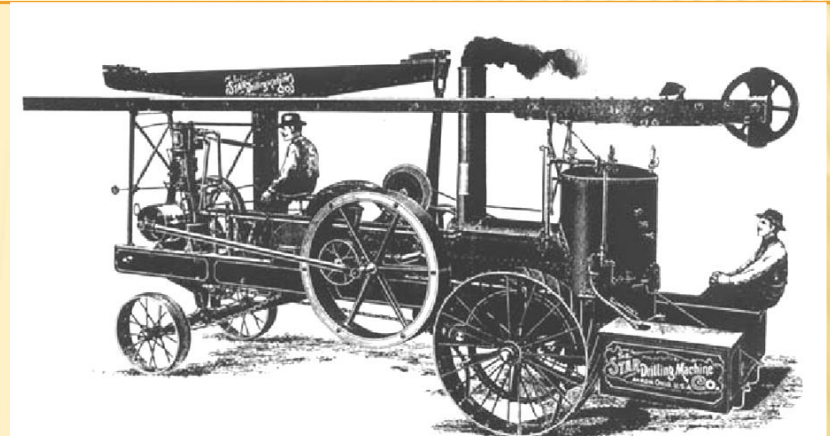


Τα υδραγωγεία της Ρώμης (αναπαράσταση). Πηγή: (Πίνακας του Zeno Diemer, Deutsches Museum, Μόναχο, από Lettenmaier, 2004).

# ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΣΤΟ ΠΑΡΕΛΘΟΝ



Ανόρυξη γεώτρησης στις ΗΠΑ τη δεκαετία του 1870 με «ιπποδύναμη».



Αυτοκινούμενα ατμοκίνητα γεωτρήματα της δεκαετίας του 1900.

# ΟΙ ΓΝΩΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟ ΝΕΡΟ ΔΕΝ ΗΤΑΝ ΠΑΝΤΑ ΙΔΙΕΣ

|                                                 |                                                                                                                                                                                                 |
|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Αρχαιότητα – 1400 μ.Χ.<br>Περίοδος της Υπόθεσης | Θαλής, Πλάτωνας, Αριστοτέλης, Σενέκας, Πλίνιος, Μάρκος Βιτρούβιος                                                                                                                               |
| 1400-1600<br>Περίοδος της Παρατήρησης           | Da Vinci, B. Palissy, κατανόηση του υδρολογικού κύκλου, αρχή της συνεχείας                                                                                                                      |
| 1600-1700<br>Περίοδος της Μέτρησης              | Επιστήμη της Υδρολογίας (Perrault, Mariotte, Halley)                                                                                                                                            |
| 1700-1800<br>Περίοδος του Πειραματισμού         | Υδραυλική (Bernoulli, Pilot, Chezy, etc)                                                                                                                                                        |
| 1800-1900<br>Περίοδος του Εκσυγχρονισμού        | Υδρολογία υπόγειων νερών, σύγχρονη υδρολογία (Darcy, Poiseulle, Dupuit, Thiem, Ghyben – Herzberg, etc)                                                                                          |
| 1900-1930<br>Περίοδος του Εμπειρισμού           | Εμπειρικοί τύποι για τα μεγέθη του υδρολογικού κύκλου                                                                                                                                           |
| 1930-1950<br>Περίοδος του Ορθολογισμού          | Μοναδιαίο υδρογράφημα (Sherman), Θεωρία κατείσδυσης (Horton), Υδραυλική των φρεάτων (Theis), Ανάλυση συχνότητας υδρολογικών δεδομένων (Gumbel), Στατιστική (Hazel), Υδρομετεωρολογία (Bernard). |
| 1950-σήμερα<br>Περίοδος της Θεωρίας             | Ανάλυση συστημάτων με χρήση Η/Υ. Σύγχρονη μηχανική ρευστών. Θεωρητική Υδρολογία.                                                                                                                |

Ιστορική εξέλιξη της Υδρολογίας (Ven Te Chow, 1964, από Καλλέργης, 1999).

# Η ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ ΜΕΛΕΤΑ:

1. Την προέλευση του υπόγειου νερού
2. Τον τρόπο διείσδυσής του στο υπέδαφος
3. Τις σχέσεις του με τα επιφανειακά νερά και την αμοιβαία ισορροπία τους
4. Τους νόμους που ρυθμίζουν τις κάθε είδους φυσικές κινήσεις του
5. Το ρόλο που παίζουν οι γεωλογικές δομές και τα διάφορα πετρώματα στην αποθήκευσή του
6. Τα αποθέματα και τις μεταβολές τους
7. Τις φυσικές και χημικές του ιδιότητες
8. Την προστασία του από τη μόλυνση

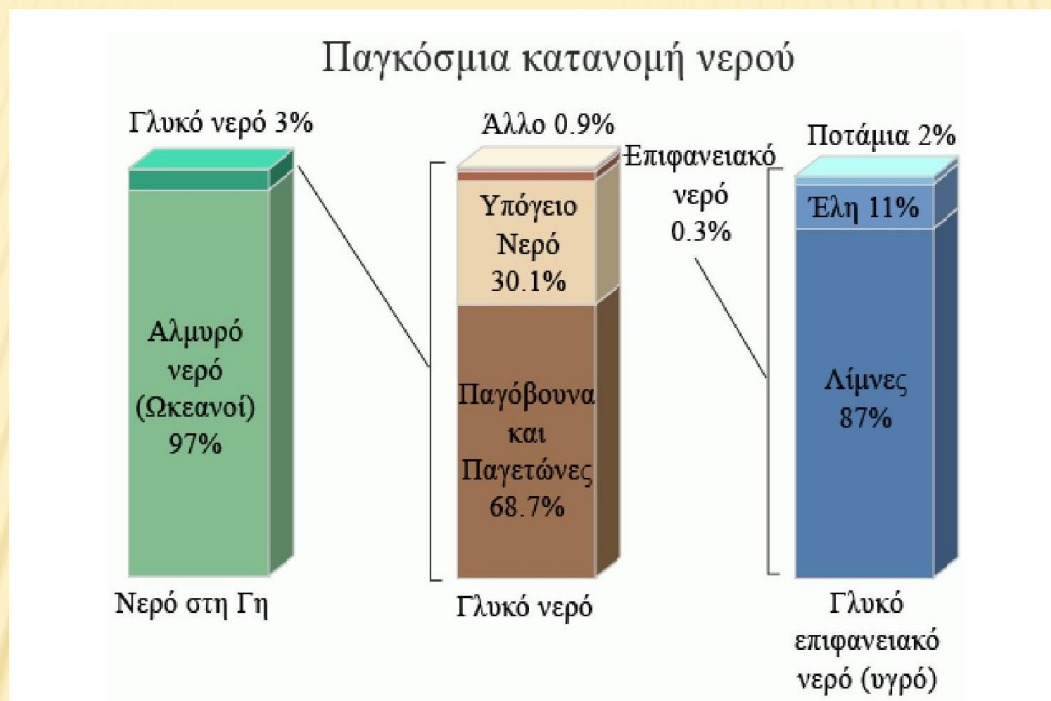
# ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΕΙ Η ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ

- 1) Γεωλογικές (γεωλογική κατασκευή υπεδάφους
- 2) Υδρολογικές (βροχόπτωση, απορροή κλπ.)
- 3) Μετεωρολογικές (υγρασία, άνεμοι κλπ.)
- 4) Χημικές (ποιότητα του νερού)
- 5) Υδραυλικές (νόμοι υπόγειας ροής)
- 6) Γεωφυσικές (ηλεκτρικές, σεισμικές κλπ.)
- 7) Μαθηματικές (μαθηματικά μοντέλα)
- 8) Μέθοδοι ομοιωμάτων (ηλεκτρικά μοντέλα)
- 9) Ιχνηθετικές (προσδιορισμός υπόγειας διαδρομής)

# ΟΙ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ

1. Ατμοσφαιρικά νερά (βροχή, χιόνι, χαλάζι κλπ.)
2. Επιφανειακά νερά (λίμνες, ποταμοί, ρυάκια κλπ.)
3. Υπόγεια νερά
  - a) Μετεωρολογικά νερά
    - i. Αβαθή νερά (vadoses)
    - ii. Βαθιά νερά
    - iii. Απολιθωμένα νερά (fossiles)
  - b) Νερά από μεταμόρφωση
  - c) Νεαρά νερά (juveniles)
4. Κοσμικά νερά

# ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΝΕΡΟΥ



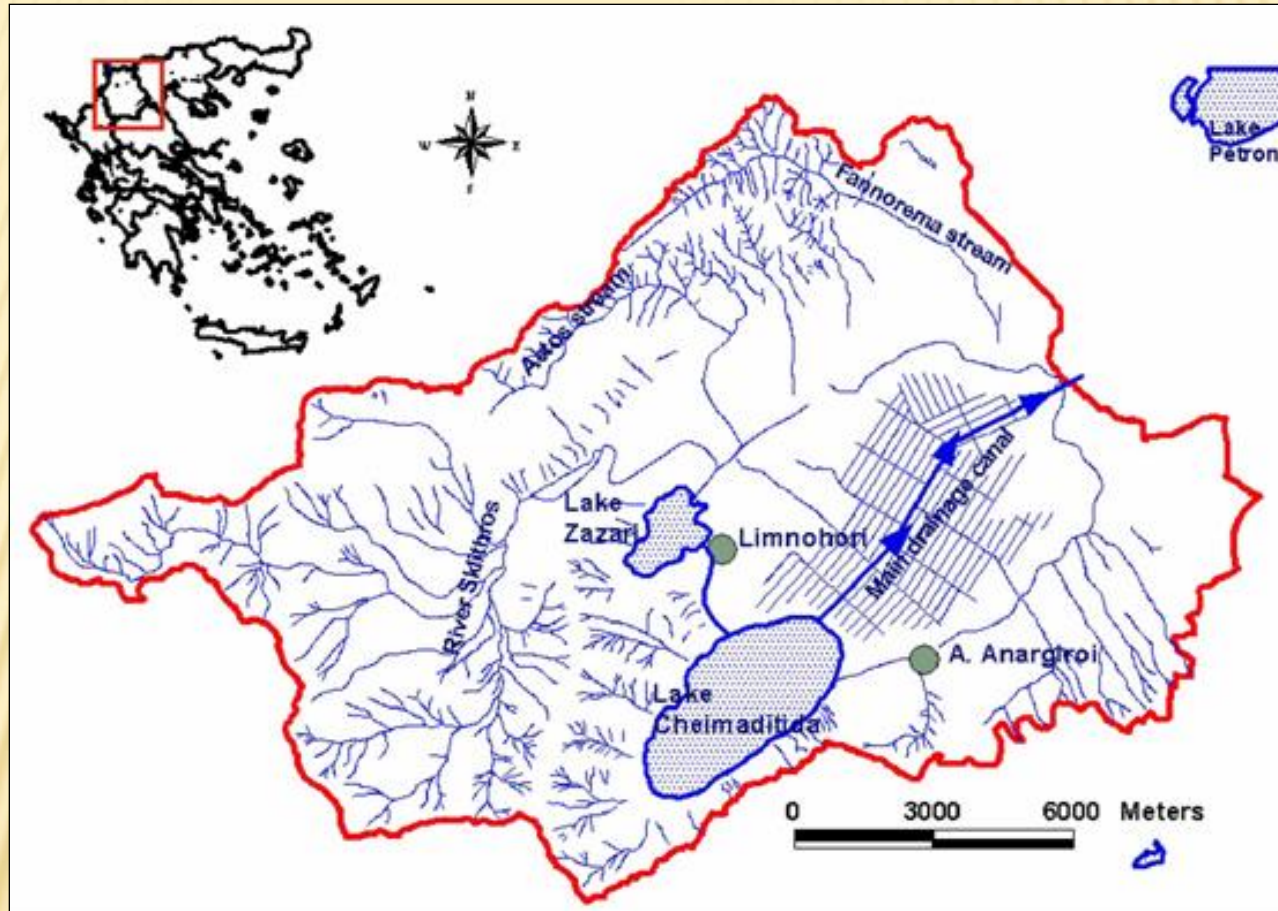
# ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΠΑΓΚΟΣΜΙΑΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΝΕΡΟΥ

| Μορφή Νερού                             | Όγκος νερού σε κυβικά χιλιόμετρα | Ποσοστό γλυκού νερού | Ποσοστό συνολικού νερού |
|-----------------------------------------|----------------------------------|----------------------|-------------------------|
| Ωκεανοί, Θάλασσες & Κόλποι              | 1.338.000.000                    | -                    | 96,5                    |
| Παγόβουνα, Παγετώνες & Μόνιμο χιόνι     | 24.064.000                       | 68,7                 | 1,74                    |
| Υπόγειο Νερό                            | 23.400.000                       | -                    | 1,7                     |
| Γλυκό                                   | 10.530.000                       | 30,1                 | 0,76                    |
| Αλμυρό                                  | 12.870.000                       | -                    | 0,94                    |
| Εδαφική Υγρασία                         | 16.500                           | 0,05                 | 0,001                   |
| Εδαφικός πάγος & Μόνιμα παγωμένο Έδαφος | 300.000                          | 0,86                 | 0,022                   |
| Λίμνες                                  | 176.400                          | -                    | 0,013                   |
| Γλυκές                                  | 91.000                           | 0,26                 | 0,007                   |
| Αλμυρές                                 | 85.400                           | -                    | 0,006                   |
| Ατμόσφαιρα                              | 12.900                           | 0,04                 | 0,001                   |
| Έλη                                     | 11.470                           | 0,03                 | 0,0008                  |
| Ποταμοί                                 | 2.120                            | 0,006                | 0,0002                  |
| Βιολογικό Νερό                          | 1.120                            | 0,003                | 0,0001                  |
| Σύνολο                                  | 1.386.000.000                    | ~                    | 100                     |

# ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Υδρολογική λεκάνη σ' ένα σημείο ή καλύτερα σε μία διατομή ενός υδρορέματος ορίζεται σαν η συνολική τοπογραφική επιφάνεια που αποστραγγίζεται από το υδατόρεμα προς τα ανάντη της εν λόγω διατομής. Έτσι, όλες οι απορροές που δημιουργούνται στο εσωτερικό της επιφάνειας αυτής ακολουθώντας την πορεία τους προς τα κατάντη οφείλουν να διέλθουν μέσω της διατομής αυτής.

# ΛΕΚΑΝΗ ΑΠΟΡΡΟΗΣ



Λεκάνη απορροής. (Γκουντούλας, 2012)

**Υδρογραφικό δίκτυο** μιας περιοχής θεωρείται το σύστημα των ρυακιών, χειμάρρων και παραποτάμων, τα οποία αποστραγγίζουν την περιοχή αυτή.

**Υδροκρίτης** μπορεί να οριστεί η νοητή γραμμή που συνδέει τα υψηλότερα σημεία της επιφάνειας και διαχωρίζει δύο υδρολογικές λεκάνες απορροής.

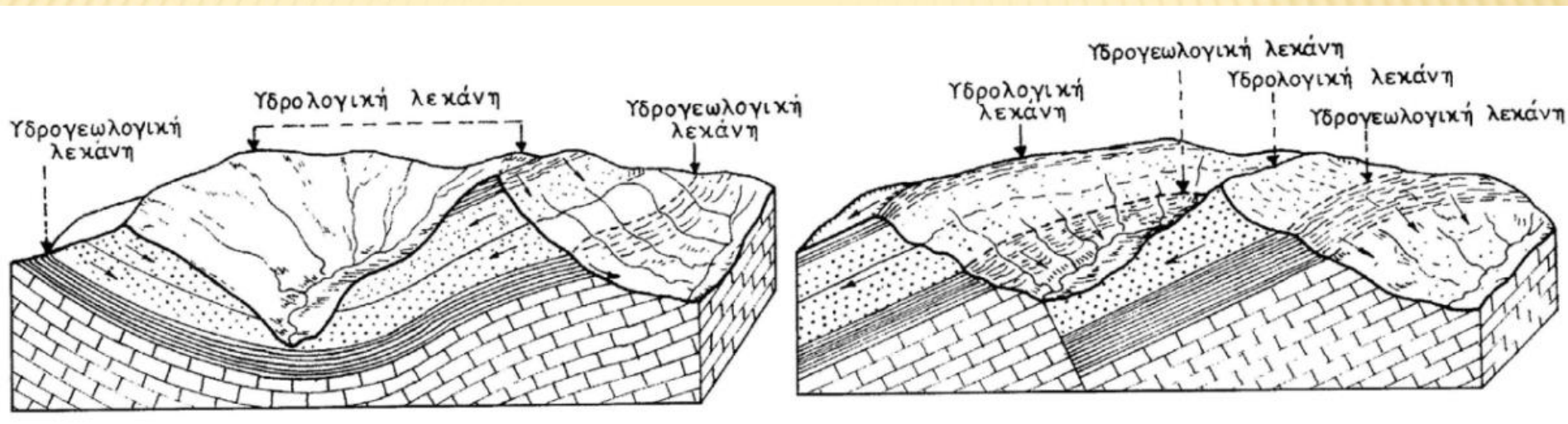
---

➤ Ο υδροκρίτης διέρχεται από τις κορυφές των τοπικών τοπογραφικών εξάρσεων που περικλείουν τον κλάδο ή τους κλάδους του υδρογραφικού δικτύου των οποίων την λεκάνη απορροής οριοθετούμε.

➤ Ο υδροκρίτης τέμνει σχεδόν κάθετα τις ισοϋψείς καμπύλες και δεν κινείται ποτέ παράλληλα προς αυτές.

➤ Ο υδροκρίτης δεν τέμνει ποτέ τους κλάδους του υδρογραφικού δικτύου.

Θα πρέπει να σημειωθεί πως ο υδροκρίτης των επιφανειακών νερών, πολλές φορές δεν συμπίπτει με τον υδροκρίτη των υπόγειων νερών, ο οποίος καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τη γεωλογική δομή μιας περιοχής και όχι αποκλειστικά από τη μορφή του τοπογραφικού αναγλύφου.



Δύο παραδείγματα διαφοροποίησης της υδρολογικής και της υδρογεωλογικής λεκάνης. Τα στικτά στρώματα είναι διαπερατά ενώ αυτά με τις συνεχείς γραμμές τα αδιαπέρατα. (Desio,1959)

# ΜΟΡΦΕΣ ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ :

Η μορφή που θα πάρει ένα υδρογραφικό δίκτυο εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την γεωλογική δομή και τις κλιματολογικές συνθήκες της περιοχής, ενώ μικρότερο ρόλο παίζει η επίδραση των ειδικών τοπικών συνθηκών της. Οι κυριότερες μορφές των υδρογραφικών δικτύων είναι οι εξής :

**Παράλληλη μορφή :** αποτελείται από παράλληλους μεταξύ τους κύριους κλάδους και μικρότερους συνδεόμενους υπό οξεία γωνία μικρότερη των  $40^\circ$  με τους κύριους κλάδους. Η δημιουργία παράλληλων μορφών δικτύου συνδέεται με την ύπαρξη πετρωμάτων με απότομη κλίση

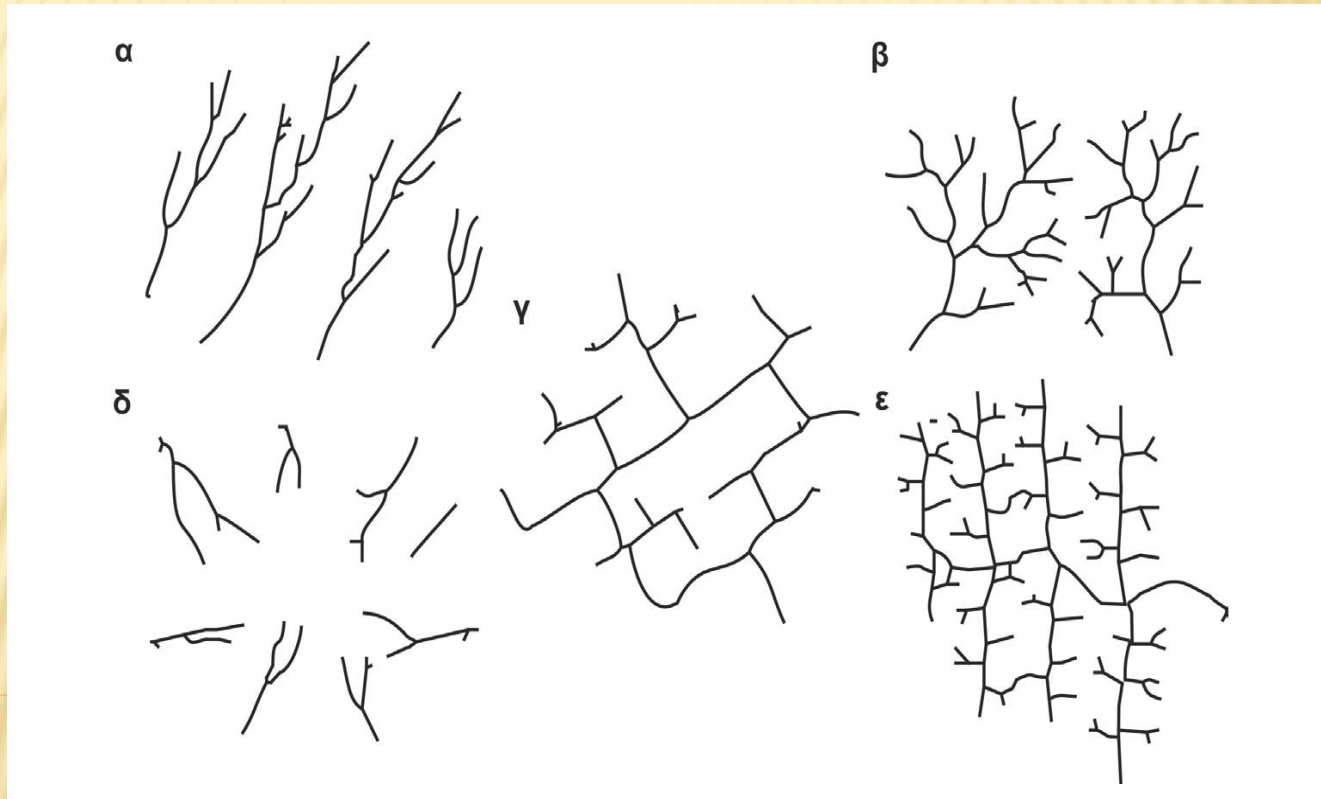
**Δενδριτική μορφή :** έχει την μορφή δένδρου του οποίου οι κλάδοι ενώνονται μεταξύ τους και με τον κύριο κορμό υπό οξεία γωνία μεγαλύτερη των  $30^\circ$  και αναπτύσσεται σε σχετικώς ομαλές ή νέες περιοχές με ομογενή πετρολογική κατασκευή.

**Ορθογώνια μορφή :** ο κύριος κλάδος κάμπτεται σε ορθές γωνίες κατά την πορεία του, ενώ οι μικρότεροι κλάδοι ενώνονται με τους μεγαλύτερους επίσης με ορθές γωνίες. Η μορφή αυτή σχετίζεται με την ύπαρξη ομάδων παράλληλων ρηγματίων που τέμνονται κάθετα.

**Ακτινωτή μορφή :** αποτελείται από κλάδους που ξεκινούν από μία κεντρική υπερυψωμένη περιοχή κωνικής μορφής και αναπτύσσεται υπό μορφή ακτινών πάνω στις πλευρές της. Η μορφή αυτή απαντάται σε ηφαίστεια, δόμους ή μεμονωμένους λόφους με απότομες πλευρές.

**Κλιμακωτή μορφή :** αποτελείται από έναν κύριο κλάδο, εκατέρωθεν του οποίου διατάσσονται κατά ζεύγη οι δευτερεύοντες κλάδοι, ενωμένοι με ορθές γωνίες με τον κύριο κλάδο. Εκατέρωθεν των δευτερευόντων κλάδων διατάσσονται οι μικρότεροι κλάδοι, ενωμένοι με ορθές γωνίες με τους δευτερεύοντες κλάδους. Η μορφή αυτή σχετίζεται με περιπτώσεις ύπαρξης ρηγματώσεων, πτυχώσεων, ρωγμών κ.α.

Σε πολλές περιπτώσεις οι παραπάνω μορφές των υδρογραφικών δικτύων απαντώνται στη φύση παράλληλα δημιουργώντας σύνθετες μορφές



α. Παράλληλη μορφή, β. Δενδριτική μορφή, γ. Ορθογώνια μορφή, δ. Ακτινωτή μορφή, ε. Κλιμακωτή μορφή

# ΑΡΙΘΜΗΣΗ ΤΩΝ ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

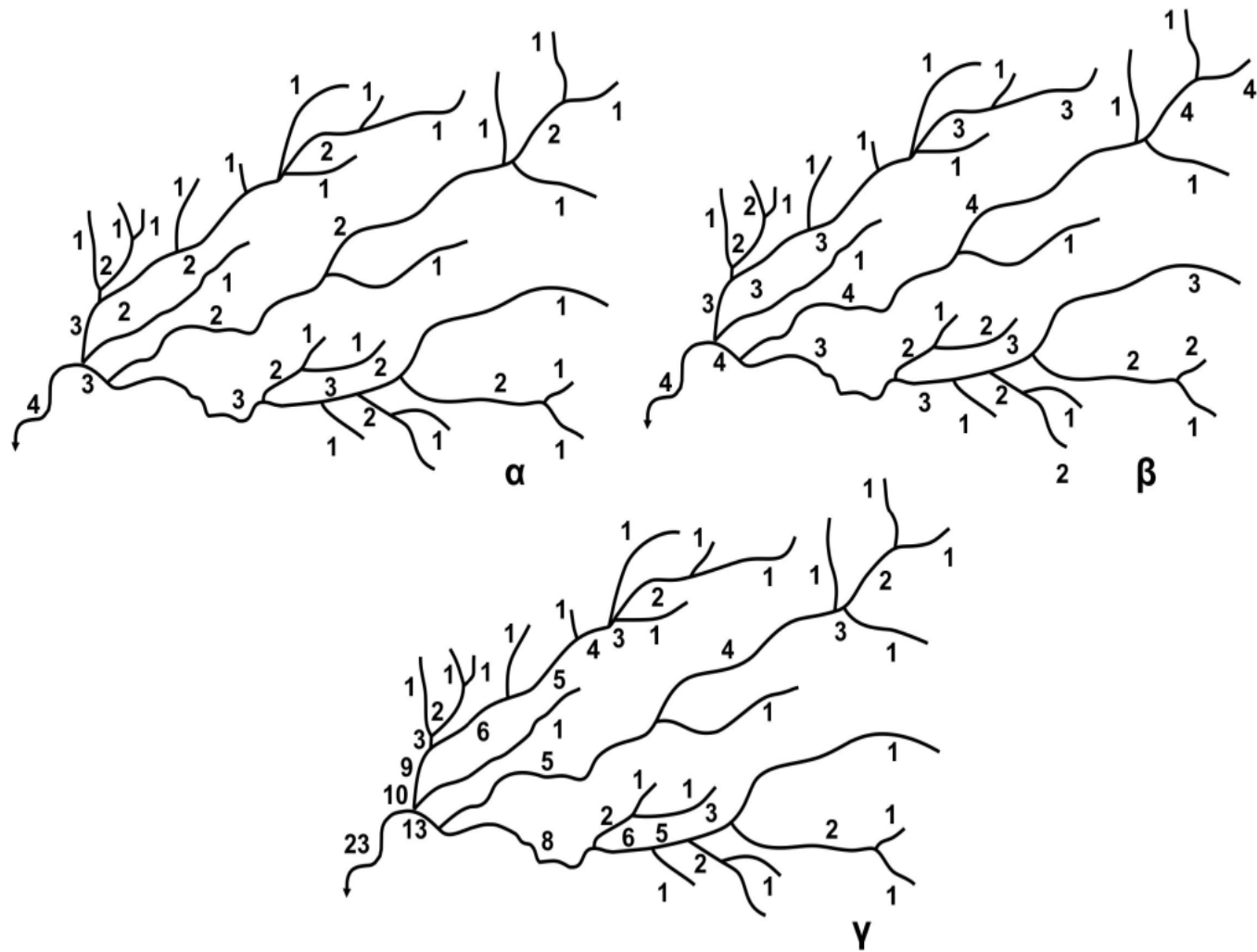
Για τη διεξαγωγή ποσοτικής ανάλυσης σε ένα υδρογραφικό δίκτυο, πρέπει πρώτα να καθορίσουμε μία σχέση μεταξύ των κλάδων του, που να βασίζεται τόσο στη διαφορά μεγέθους μεταξύ των κλάδων, όσο και στη θέση κάθε κλάδου ως προς τους υπόλοιπους.

Διάφοροι ερευνητές όπως ο Horton, ο Schreidigger, ο Strahler και ο Shreve πρότειναν τις παρακάτω μεθόδους αρίθμησης των κλάδων ενός υδρογραφικού

**Αρίθμηση κατά Strahler:** κάθε κλάδος που δεν δέχεται νερά άλλων μικρότερων ρευμάτων ονομάζεται κλάδος 1ης τάξης. Ο κλάδος που προκύπτει από τη σύνδεση δύο κλάδων 1ης τάξης ονομάζεται κλάδος 2ης τάξης. Ο κλάδος που προκύπτει από τη σύνδεση δύο κλάδων 2ης τάξης ονομάζεται 3ης τάξης κ.ο.κ. Στην περίπτωση που συνδέονται δύο κλάδοι διαφορετικής τάξης, ο νέος κλάδος που προκύπτει εξακολουθεί να έχει την αρίθμηση της μεγαλύτερης τάξης του ενός από τους δύο συνδεόμενους κλάδους (Εικ 3Α).

**Αρίθμηση κατά Horton:** οι κλάδοι ενός υδρογραφικού δικτύου, οι οποίοι δεν δέχονται τα νερά κανενός μικρότερου κλάδου, αλλά τα επιφανειακά νερά μιας μικρής λεκάνης, ονομάζονται κλάδοι 1ης τάξης. Κλάδοι που δέχονται τα νερά κλάδων 1ης τάξης ονομάζονται κλάδοι 2ης τάξης, κ.ο.κ. Η αρίθμηση ενός κλάδου ισχύει από την αρχή του μέχρι το τέλος του, έτσι οι μεγαλύτεροι σε μήκος κλάδοι είναι και μεγαλύτερης τάξης (Εικ 3B).

**Αρίθμηση κατά Shreve:** δεν γίνεται αναφορά στην τάξη των κλάδων, αλλά στο μέγεθος σύνδεσής τους. Συγκεκριμένα, κάθε εξωτερικός κλάδος έχει μέγεθος 1, ενώ αν συνδέονται κλάδοι μεγεθών  $\mu_1$  και  $\mu_2$ , τότε ο κλάδος που προκύπτει έχει μέγεθος  $\mu_1 + \mu_2$  (Εικ 3γ).



Από τις τρεις παραπάνω μεθόδους αριθμήσεως των υδρογραφικών δικτύων, η μέθοδος του Strahler θεωρείται η πλέον ορθόδοξη, ικανή να ερμηνεύσει τους νόμους της υδρογραφικής σύνθεσης, όπως αυτοί διατυπώθηκαν πρώτα από τον Horton.

# ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΚΗ ΣΥΝΘΕΣΗ

*Πρώτος νόμος του Horton -Νόμος του αριθμού των κλάδων*

Ο αριθμός των διαδοχικών μικρότερης τάξεως κλάδων ενός υδρογραφικού δικτύου τείνει να σχηματίσει μία αύξουσα γεωμετρική ακολουθία, της οποίας ο πρώτος όρος είναι η μονάδα και έχει για λόγο τον συντελεστή διακλάδωσης ( $Rb$ )

$$N_u = Rb^{(k-u)}$$

Όπου:

$k$  είναι η μέγιστη τάξη και

$u$  είναι ζητούμενη τάξη

Για να ισχύει ο πρώτος νόμος του Horton θα πρέπει η προβολή των σημείων σε διάγραμμα  $u = f(\log N_u)$  να είναι συνευθειακή.

|                                    |           |
|------------------------------------|-----------|
| <b>Κλάδοι 1<sup>ης</sup> τάξης</b> | <b>64</b> |
| <b>Κλάδοι 2<sup>ης</sup> τάξης</b> | <b>19</b> |
| <b>Κλάδοι 3<sup>ης</sup> τάξης</b> | <b>5</b>  |
| <b>Κλάδοι 4<sup>ης</sup> τάξης</b> | <b>1</b>  |

## ΔΕΥΤΕΡΟΣ ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ HORTON -ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΤΩΝ ΚΛΑΔΩΝ

Τα αθροιστικά μέσα μήκη των διαδοχικά μεγαλύτερης τάξης κλάδων ενός υδρογραφικού δικτύου τείνουν να σχηματίσουν μία αύξουσα γεωμετρική ακολουθία με πρώτο όρο το μέσο μήκος των κλάδων πρώτης τάξης και λόγο, το λόγο του μήκους των κλάδων ( $R_L$ ).

Ο δεύτερος νόμος εκφράζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\bar{L}_u = \bar{L}_1 * R_L^{(u-1)}$$

$L_u$  το μέσο μήκος των κλάδων τάξης  $u$

$\bar{L}_1$  το μέσο μήκος του κλάδου 1ης τάξης

$R_L$  ο λόγος του μέσου μήκους των κλάδων μιας τάξης προς το μέσο μήκος των κλάδων της προηγούμενης τάξης

### ΤΡΙΤΟΣ ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ HORTON -ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ ΕΜΒΑΔΟΥ ΤΩΝ ΛΕΚΑΝΩΝ ΑΠΟΡΡΟΗΣ

Το μέσο εμβαδόν των διαδοχικά αυξανόμενης τάξης λεκανών απορροής ενός υδρογραφικού δικτύου τείνει να σχηματίσει μία αύξουσα γεωμετρική ακολουθία, η οποία έχει πρώτο όρο το μέσο εμβαδόν των λεκανών πρώτης τάξης  $A$ , και λόγο, τον λόγο του εμβαδού  $R_A$ .

Ο τρίτος νόμος εκφράζεται από την παρακάτω σχέση

$$\overline{A}_u = \overline{A}_1 * R_A^{(u-1)}$$

$\overline{A}_u$  : το μέσο εμβαδόν των λεκανών τάξης  $u$

$\overline{A}_1$  : το μέσο εμβαδόν των λεκανών 1ης τάξης

$R_A$  : ο λόγος του εμβαδού

# Γεωμετρικά χαρακτηριστικά μιας υδρολογικής λεκάνης

## Υδρογραφική πυκνότητα $D$

Ως υδρογραφική πυκνότητα ορίζεται ο λόγος του συνολικού μήκους όλων των κλάδων του δικτύου μιας αυτοτελούς λεκάνης απορροής προς το εμβαδόν της λεκάνης αυτής και δίνεται από τη σχέση

$$D = (\Sigma L) \frac{(\Sigma L)u}{A_u} \text{ σε km}^{-1}$$

Όπου:

$\Sigma L_u$  το συνολικό μήκος των κλάδων του δικτύου σε km και

$A_u$  το εμβαδόν της λεκάνης αυτής σε km<sup>2</sup>

Οι τιμές που μπορεί να λάβει η υδρογραφική πυκνότητα ποικίλλουν. Ανάλογα με τις τιμές αυτές η υδρογραφική πυκνότητα διακρίνεται σε:

- ❖ χαμηλή υδρογραφική πυκνότητα, με τιμές από 3 έως 4 (π.χ. σε περιοχές με σκληρά πετρώματα και πυκνή βλάστηση).
- ❖ μέση υδρογραφική πυκνότητα, με τιμές από 8 έως 16 (π.χ. σε περιοχές με μαλακά πετρώματα και πυκνή βλάστηση).
- ❖ υψηλή υδρογραφική πυκνότητα, με τιμές από 30 έως 50 (π.χ. σε περιοχές με μαλακά πετρώματα και υψηλό ανάγλυφο, χωρίς βλάστηση).

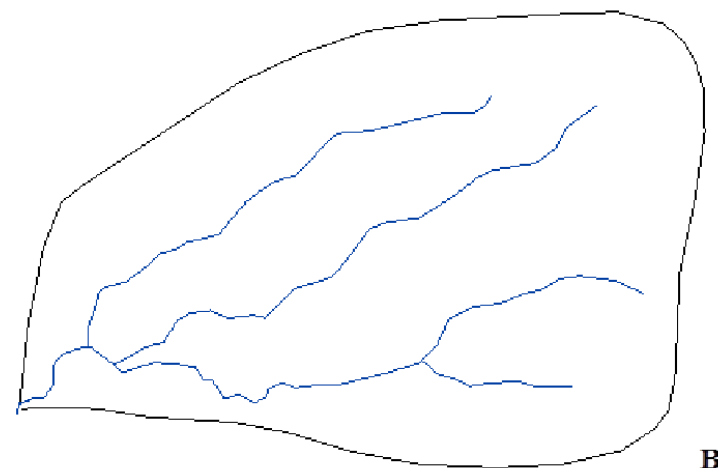
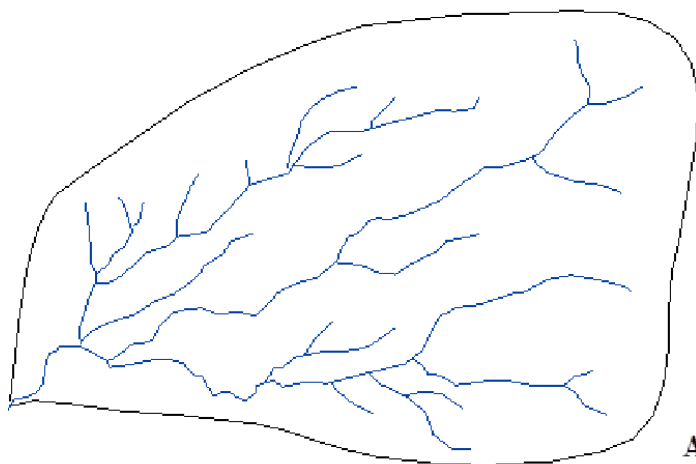
# ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΚΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ (F)

Ως υδρογραφική συχνότητα ορίζεται ο λόγος του συνολικού αριθμού των κλάδων μιας λεκάνης απορροής προς το εμβαδόν της λεκάνης αυτής και δίνεται από τη σχέση:

$$F = \frac{(\Sigma N)u}{Au} \text{ σε km}^{-2}$$

Το πλήθος των κλάδων, το οποίο αποτελεί τον καθοριστικό παράγοντα της συχνότητας, εξαρτάται από τους ίδιους παράγοντες από τους οποίους εξαρτώνται οι τιμές της υδρογραφικής πυκνότητας, δηλαδή το ανάγλυφο, τη γεωλογική δομή και τη βλάστηση της λεκάνης απορροής.

Η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης απορροής αναγνωρίσθηκε ως χαρακτηριστικό μεγάλης σπουδαιότητας πολύ σύντομα, αφού συνδέεται άμεσα με τις διεργασίες που παρατηρούνται σ' αυτήν. Πιο συγκεκριμένα, λεκάνες με πυκνό υδρογραφικό δίκτυο δημιουργούν υψηλές πλημμυρικές αιχμές στο σημείο εξόδου και επίσης μεταφέρουν σημαντικές ποσότητες φερτών υλών [Gregory και Walling (1983), Dunne και Leopold (1978)]. Επιπλέον, η μεγάλη πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου συνδέεται με επιφάνειες της λεκάνης μεγάλων κλίσεων.



**A Υψηλή υδρογραφική πυκνότητα και συχνότητα, B. χαμηλή υδρογραφική πυκνότητα και συχνότητα.**

Ο δείκτης αυτός εξαρτάται από την τάξη των ρευμάτων, ενώ η πυκνότητα ρευμάτων είναι ανεξάρτητη της τάξης. Επίσης αναφέρεται πως για την έκφραση της ίδιας παραμέτρου ο Penck χρησιμοποίησε τη μέση απόσταση των τμημάτων των ρευμάτων του δικτύου, μεταξύ δύο συμβολών (Gregory και Walling, 1983).

Για την εκτίμηση της πυκνότητας του δικτύου απαιτείται προφανώς η μέτρηση του μήκους των ρευμάτων. Για το σκοπό αυτό μπορούν να χρησιμοποιηθούν κοινοί τοπογραφικοί ή ψηφιακοί χάρτες, μέθοδοι τηλεπισκόπησης κλπ.

Είναι ενδεχόμενο όμως ο εντοπισμός των ρευμάτων να είναι δύσκολος όταν χρησιμοποιούνται μέθοδοι όπως αυτή της τηλεπισκόπησης, με πιθανότητα να υπάρξει υποεκτίμηση του συνολικού μήκους. Από την άλλη όμως πλευρά η βλάστηση μπορεί να διευκολύνει τον εντοπισμό των ρευμάτων, αν αυτή επεκτείνεται μόνο κατά μήκος των μισγαγγειών των ρευμάτων.

# ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΌ ΙΣΟΖΥΓΙΟ

---

# ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΑΚΡΗΜΝΙΣΜΆΤΩΝ

---

Η μέτρηση των κατακρημνισμάτων γίνεται με ειδικά όργανα και αφορά

α) Βροχομετρία και

β) τη χιονομετρία

# A) ΒΡΟΧΟΜΕΤΡΙΑ

*Βροχόμετρα*, που δίνουν την ολική σημειακή βροχόπτωση και το ισοδύναμο νερού μιας χιονόπτωσης ανά ορισμένα χρονικά διαστήματα (συνήθως 12ωρο ή 24ωρο), με την ανάγνωση της ένδειξης από έναν παρατηρητή



*Βροχογράφους*, που καταγράφουν με απλό ωρολογιακό μηχανισμό την μεταβολή του ύψους βροχής στο χρόνο, περιγράφοντας έτσι τη χρονική κατανομή της σημειακής βροχόπτωσης.

# B) ΧΙΟΝΟΜΕΤΡΙΑ

Οι τυπικές υδρολογικές μετρήσεις του χιονιού αναφέρονται στο ύψος κατακρημνισμάτων, το ύψος χιονόπτωσης και το ύψος χιονοκάλυψης, καθώς και στα αντίστοιχα ισοδύναμα ύψη νερού.

Όταν η υγροποίηση του χιονιού είναι άμεση (δεν στρώνεται το χιόνι). Το ύψος κατακρημνισμάτων προκύπτει κατ' αρχήν απ' τα βροχόμετρα, τα οποία συλλέγουν όλες τις μορφές κατακρημνισμάτων.

Όταν η υγροποίηση δεν είναι άμεση (στρώνεται το χιόνι), τότε τα τυπικά βροχόμετρα δεν αποδίδουν πιστά το ύψος κατακρημνίσματος, σε αυτή την περίπτωση, το ύψος κατακρημνισμάτων είναι προτιμότερο να προκύπτει ως άθροισμα της τυχόν υγρής μορφής κατακρημνίσματος και του ισοδύναμου ύψους νερού της χιονόπτωσης.

Το ύψος χιονόπτωσης μετριέται συνήθως με χιονοτράπεζες αυτές είναι απλές οριζόντιες επιφάνειες, όπου, αφού συσσωρευτεί το χιόνι, μετριέται το ύψος του με ένα κοινό πήχη. Μετά τη μέτρηση η τράπεζα καθαρίζεται από το χιόνι, ώστε να είναι έτοιμη για την επόμενη μέτρηση του ύψους χιονόπτωσης. με την υπόθεση ότι η πυκνότητα της χιονόπτωσης είναι  $\rho_s = 0.1 \rho_w$ , το ισοδύναμο ύψος νερού της χιονόπτωσης είναι το 1/10 του ύψους χιονόπτωσης

Οι μετρήσεις που παίρνονται από τα διάφορα αυτά όργανα είναι mm ύψους βροχής και από αυτές τις μετρήσεις βρίσκουμε:

**Το ετήσιο - ή μηνιαίο - ύψος κατακρημνισμάτων:** το ύψος κατακρημνισμάτων που έπεσαν κατά τη διάρκεια αυτού του συγκεκριμένου έτους ή μήνα.

**Το μέσο ετήσιο ύψος κατακρημνισμάτων,** που το λέμε και **ετήσιο βροχομετρικό δείκτη**, είναι ο μέσος όρος των ετησίων υψών κατακρημνισμάτων μιας όσο το δυνατό μακράς σειράς ετών.

**Το μέσο μηνιαίο, το μηνιαίο βροχομετρικό δείκτη,** είναι ο μέσος όρος για ένα συγκεκριμένο μήνα μηνιαίων υψών κατακρημνισμάτων μιας όσο το δυνατό μακράς σειράς ετών

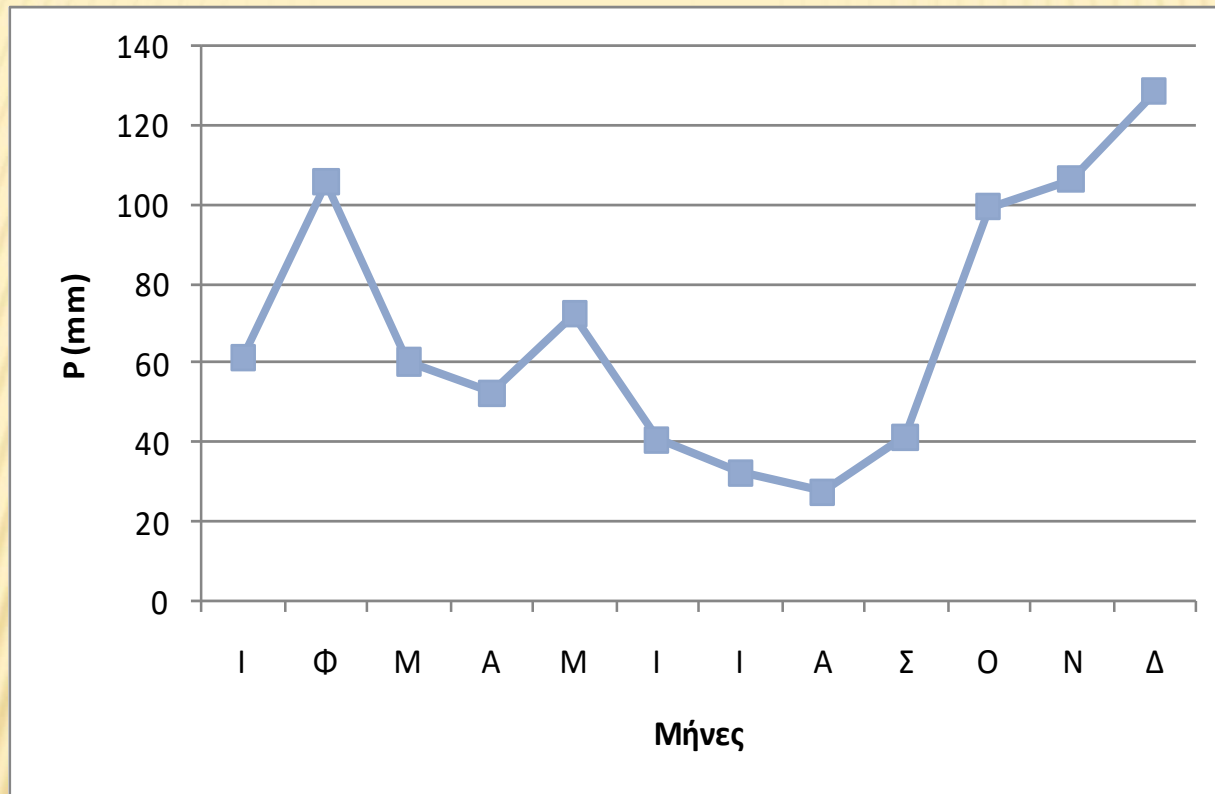
**Τον δείκτη βροχερότητας ενός έτους (ή μήνα)** δηλαδή το πηλίκο του ετήσιου (ή μηνιαίου) ύψους κατακρημνισμάτων του συγκεκριμένου έτους (ή μήνα) δια του μέσου ετήσιου (ή μέσου μηνιαίου) βροχομετρικού δείκτη. Όσο η τιμή αυτή είναι πάνω από τη μονάδα τόσο βροχερότερο είναι το έτος αυτό (ή ο μήνας αυτός) και αντίθετα, όσο οι τιμές είναι κάτω από τη μονάδα, τόσο ξηρότερο.

Σημειώνουμε ότι ο δείκτης βροχερότητας μπορεί να πάρει ανώτερες τιμές, συνήθως μέχρι 2,2 για ιδιαίτερα βροχερό έτος και κατώτερες μέχρι 0,4 για ιδιαίτερα ξηρό έτος.

**Τα υετογράμματα**, δηλ. τα διαγράμματα κατανομής των κατακρημνισμάτων μέσα στο χρόνο που το λέμε και το βροχομετρικό σύστημα, Σχήμα 2-1 που δίνει την ενδοετήσια κατανομή των κατακρημνισμάτων μέσα στους 12 μήνες.

**Η ένταση των κατακρημνισμάτων**, δηλ. το ανά μονάδα χρόνου ύψος των κατακρημνισμάτων που επηρεάζει την κατανομή των φάσεων του υδρολογικού ισοζυγίου.

# ΥΕΤΟΓΡΑΜΜΑ).



*Κατανομή των κατακρημνισμάτων μέσα στους δώδεκα μήνες του έτους (υετόγραμμα).*

# ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΚΑΤΑΚΡΗΜΝΙΣΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΧΩΡΟ

Όλα τα σημεία μιας λεκάνης δεν δέχονται το ίδιο ύψος κατακρημνισμάτων. Πολύ δε περισσότερο δεν δέχονται το ίδιο ύψος κατακρημνισμάτων διαφορετικές λεκάνες. Οι παράγοντες που επιδρούν στην κατανομή των κατακρημνισμάτων μέσα στο χώρο μπορούν να είναι:

**Το υψόμετρο** του βροχομετρικού σταθμού (ή του βροχόμετρου)- Συγκεκριμένα αποδείχνεται ότι αρκετές φορές υπάρχει μια γραμμική σχέση μεταξύ υψόμετρου και ύψους κατακρημνισμάτων μιας ορισμένης περιοχής. Ο συντελεστής συσχέτισης αυτής της γραμμικής σχέσης λίγες φορές είναι υψηλός και τις περισσότερες μέσος ή χαμηλός. Και αυτό γιατί στην πραγματικότητα εκτός από το υψόμετρο, υπεισέρχονται και άλλοι παράγοντες στη χωρική κατανομή των κατακρημνισμάτων που έχουν σχετικά μικρότερη ή μεγαλύτερη επίδραση. Πάντως όσο πιο μεγάλη είναι η περιοχή (ή λεκάνη) στην οποία θέλουμε να δώσουμε ενιαία γραμμική σχέση υψόμετρου-κατακρημνισμάτων τόσο χαμηλός θα είναι ο συντελεστής συσχέτισης της σχέσης αυτής, γιατί υπεισέρχονται πολλοί άλλοι παράγοντες. Το αντίθετο συμβαίνει για επί μάλλον και μάλλον μικρές περιοχές (ή λεκάνες).

**Η θέση** του σταθμού μέσα στον ευρύτερο χώρο κατανομής των κατακρημνισμάτων που καθορίζεται από τα δυναμικά αίτια της βροχής (μέτωπα) και η απόσταση του από τις κύριες πηγές των υδρατμών και από καθοριστικές για τη βροχόπτωση γραμμές, όπως π.χ. για την Ελλάδα η απόσταση από τις δυτικές ακτές ή από την κορυφογραμμή της Πίνδου κλπ.

**Το ανάγλυφο** (γεωμορφολογία) της περιοχής και του γύρω χώρου που εκφράζεται με:

**Την ανύψωση**, δηλ. την υψομετρική διαφορά μεταξύ του θεωρούμενου σημείου και του υψηλότερου σημείου μέχρι μια ορισμένη ακτίνα (=10km).

**Την έκθεση**, που είναι το άθροισμα σε μοίρες των τομέων εκείνων του κύκλου με κέντρο το θεωρούμενο σημείο (το σταθμό) και μια ακτίνα « 20km, οι οποίοι δεν έχουν κανένα φυσικό εμπόδιο με σημαντικό υψόμετρο π.χ. πάνω από 400 m σε σχέση με το σημείο του σταθμού

**Τον προσανατολισμό**, που είναι η θέση των πιο πάνω τομέων ως προς τον ορίζοντα και ως προς τις διευθύνσεις των πηγών παραγωγής υδρατμών (θαλασσών).

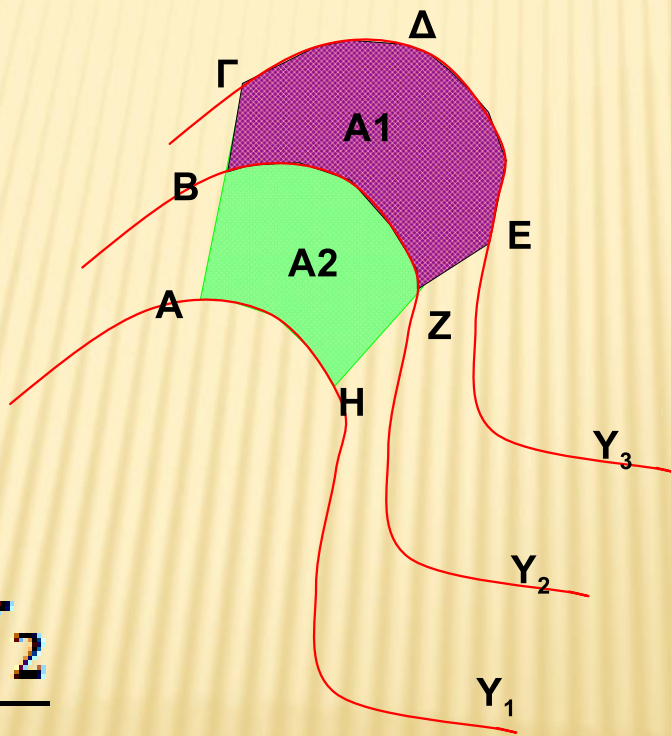
**Τη διεύθυνση κλίσης των κλιτύων ως προς τις πηγές υδρατμών.** Στην Ελλάδα π.χ. στην Δ. Στερεά, Δ. Πελοπόννησο και Ήπειρο οι δυτικές κλιτύες δέχονται μεγαλύτερη βροχόπτωση από ότι οι ανατολικές

Από τους πιο πάνω παράγοντες θα σημειώσουμε την ιδιαίτερη σημασία που έχει το υψόμετρο, που μερικές φορές αυτό και μόνο παίρνουμε υπόψη μας όταν μελετάμε μικρές λεκάνες, όπως επίσης και τη θέση του σταθμού στον ευρύτερο χώρο.

Η κατανομή των κατακρημνισμάτων στο χώρο αποτυπώνεται στο *βροχομετρικό χάρτη* με τις *ισοϋετείς καμπύλες*. **Ισοϋετής καμπύλη** είναι η νοητή εκείνη γραμμή της επιφάνειας του εδάφους πάνω στην οποία το έδαφος δέχεται το ίδιο ύψος κατακρημνισμάτων.

# ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΌΣ ΤΟΥ ΌΓΚΟΥ ΤΩΝ ΚΑΤΑΚΡΗΜΝΙΣΜΆΤΩΝ

Ας θεωρήσουμε μια περιοχή, Σχήμα, στην οποία η κατανομή της βροχόπτωσης εκφράζεται από τις ισοϋετείς καμπύλες  $Y_1$ ,  $Y_2$ ,  $Y_3$  γνωστού ύψους κατακρημνισμάτων η κάθε μία, ο όγκος των κατακρημνισμάτων που θα δεχθεί το επιλεγμένο τμήμα της περιοχής (ΑΒΓΔΕΖΗ) θα είναι:



$$\bar{Y} = \frac{Y_1 + Y_2}{2}$$

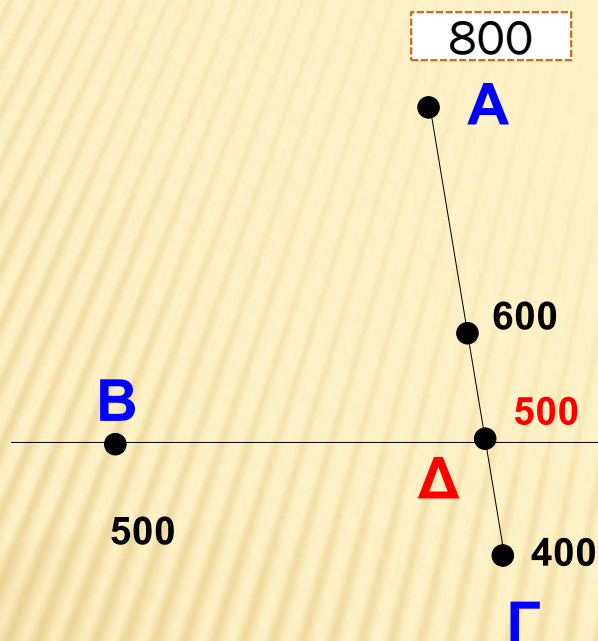
Άρα λοιπόν για τον υπολογισμό του όγκου των κατακρημνισμάτων μιας περιοχής απαραίτητα είναι τα εξής:

- η μέτρηση του εμβαδού της εξεταζόμενης επιφάνειας και των επιμέρους τμημάτων της από χάρτη, και,
- η χάραξη του ισοϋετών καμπυλών ή η γνώση του μέσου ύψους κατακρημνισμάτων στην ολική επιφάνεια.

### Η μέτρηση του εμβαδού μιας επιφάνειας από χάρτη μπορεί να γίνει:

- Είτε με τη χρήση ειδικών οργάνων των εμβαδόμετρων, έχοντας υπόψη την κλίμακα του χάρτη.
- Είτε με τη μέθοδο των τετραγωνιδίων
- Είτε με τη μέθοδο της ζύγισης σε ευαίσθητο ηλεκτρονικό ζυγό
- Είτε, τέλος, ηλεκτρονικά όταν η περιοχή είναι ψηφιοποιημένη

# ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΤΡΙΓΩΝΩΝ.



Ας θεωρήσουμε, Σχήμα, τρεις βροχομετρικούς σταθμούς Α, Β και Γ που μας έδωσαν κατακρημνίσματα 700 mm, 500 mm, και 400 mm αντίστοιχα.

Χαράσσουμε την ευθεία ΑΓ, η οποία ενώνει το σταθμό Α η τα υψηλότερα κατακρημνίσματα με τον Γ που έχει τα χαμηλότερα.

Πάνω στη γραμμή ΓΑ θεωρούμε ότι η αύξηση των κατακρημνισμάτων είναι συνεχής και βαθμιαία.

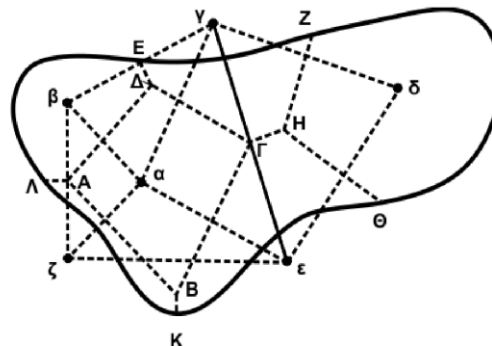
Έτσι, θα υπάρχει ένα σημείο Δ, που θα δέχεται κρημνίσματα όσα και το Β (500 mm). Η θέση του Δ πάνω στη ΓΑ ευρίσκεται αναλογικά με τα κατακρημνίσματα.

Επομένως, η ευθεία ΒΔ είναι η ισοϋετής των 500mm.

Όταν παρόμοια συνεχισθεί αυτή η διαδικασία με όλους τους σταθμούς της περιοχής, μπορεί να χαραχθούν οι ισοϋετείς καμπύλες.

# ΜΕΘΟΔΟΣ THIESSEN Ή ΤΩΝ ΠΟΛΥΓΩΝΩΝ.

Εάν υπάρχουν αρκετοί διαθέσιμοι σταθμοί σε μια περιοχή, τότε η χωρική κατανομή των βροχοπτώσεων της μπορεί να μελετηθεί με τη χρήση των βροχομετρικών δεδομένων. Στην περίπτωση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος Thiessen και να κατασκευαστούν τα ομώνυμα πολύγωνα, τα οποία οριοθετούν για κάθε ένα σταθμό την περιοχή για την οποία οι βροχοπτώσεις του σταθμού είναι αντιπροσωπευτικές (Σχ. 2-5).



| Σταθμοί | Πολύγωνο | Έκταση | Στάθμιση |
|---------|----------|--------|----------|
| α       | ΑΒΓΔ     | α1     | α1/Α     |
| β       | ΚΑΔΕ     | α2     | α2/Α     |
| γ       | ΓΔΓΕΗΖ   | α3     | α3/Α     |
| δ       | ΖΗΘ      | α4     | α4/Α     |
| ε       | ΘΗΓΒΚ    | α5     | α5/Α     |
| ζ       | ΚΒΑΛ     | α6     | α6/Α     |

Η μέση βροχόπτωση που δέχεται η λεκάνη απορροής στην περίπτωση αυτή προκύπτει από τη σχέση:

$P$  το ύψος βροχής σε χιλιοστά που αντιστοιχεί σε κάθε πολύγωνο

$\alpha$ . η επιφάνεια των πολυγώνων σε  $\text{km}^2$

$A$  η συνολική επιφάνεια της λεκάνης σε  $\text{km}^2$

Για την εφαρμογή της μεθόδου οι βροχομετρικοί σταθμοί τοποθετούνται σε τοπογραφικό χάρτη και ενώνονται με ευθείες γραμμές, ώστε όλη η περιοχή να καλυφθεί κατά το δυνατόν, με οξυγώνια τρίγωνα. Στη συνέχεια χαράζονται οι μεσοκάθετες όλων των πλευρών των τριγώνων.

Οι μεσοκάθετες τεμνόμενες ορίζουν πολύγωνα που περιβάλλουν κάθε σταθμό.

Η επιφάνεια κάθε πολυγώνου βρίσκεται με εμβαδομέτρηση, ο λόγος δε αυτής (της επιφάνειας) προς τη συνολική επιφάνεια της λεκάνης, αντιπροσωπεύει το βάρος του ύψους της βροχής του (στάθμιση) στο κέντρο του πολυγώνου του βροχομετρικού σταθμού. Υποτίθεται ότι η έκταση που καλύπτει κάθε πολύγωνο δέχεται σε κάθε σημείο της τόση βροχή, όση και ο βροχομετρικός σταθμός που βρίσκεται μέσα στο πολύγωνο. Με αυτόν τον τρόπο υπολογίζεται το ύψος βροχής για κάθε πολύγωνο, ενώ το άθροισμα των υψών βροχής των πολυγώνων της λεκάνης δίνει το συνολικό ύψος βροχής που δέχεται η λεκάνη απορροής.

Τα βασικά μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι η ανάγκη αλλαγής του συστήματος των πολυγώνων όταν προστίθεται ή αφαιρείται ένας σταθμός και στο γεγονός ότι δεν λαμβάνονται υπόψη οι τοπογραφικές ανωμαλίες του ανάγλυφου (ορεογραφικές επιδράσεις).

# ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ (ΓΡΑΜΜΙΚΗ)

Μέθοδος αριθμητική (γραμμική) ή μέθοδος απλής γραμμικής παλινδρόμησης στηρίζεται στην παραδοχή ότι στην κατανομή των κατακρημνισμάτων μέσα στο χώρο ουσιαστικά επιδρά μόνο το υψόμετρο και παραβλέπει τους άλλους παράγοντες.

Αυτή η απλοποιητική παραδοχή στην πραγματικότητα ανταποκρίνεται ικανοποιητικά (αν και ποτέ απόλυτα) σε λίγες ή ίσως σε αρκετές περιπτώσεις, ιδίως όταν πρόκειται για μικρές λεκάνες, γιατί φαίνεται ότι η επίδραση των άλλων παραγόντων δεν είναι σημαντική.

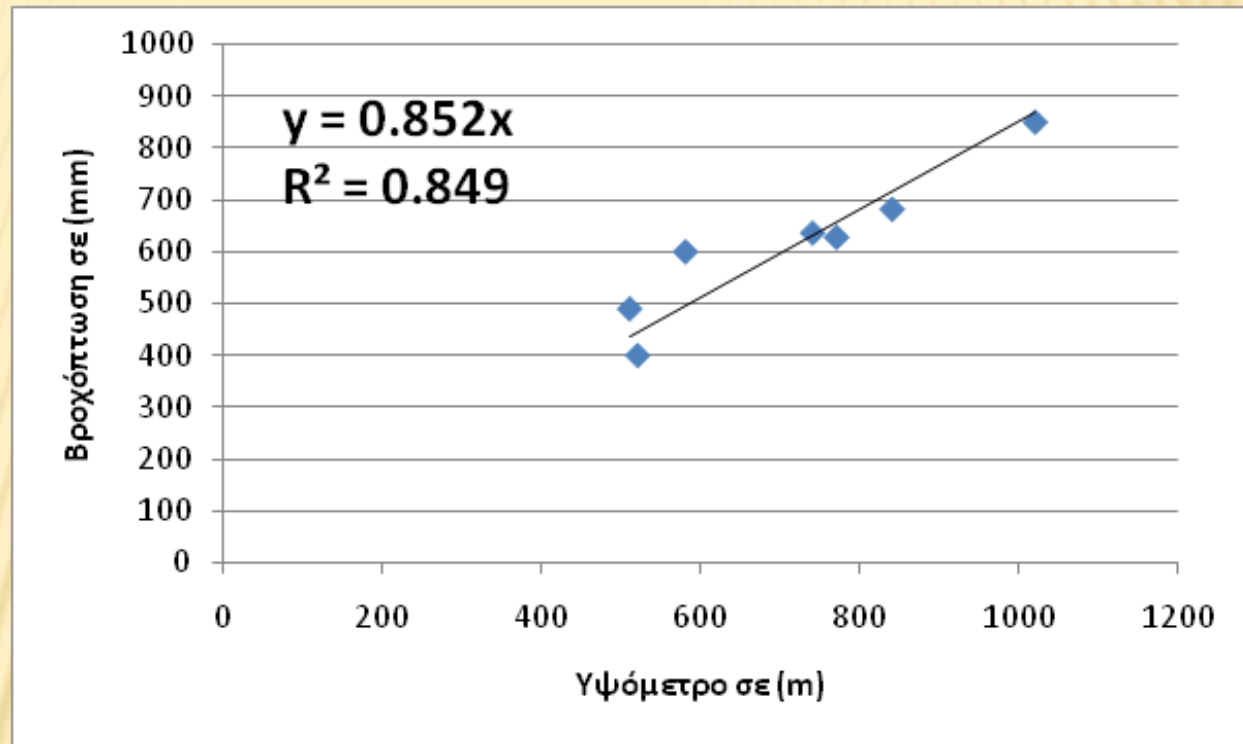
Δεχόμαστε δηλαδή ότι μεταξύ των κατακρημνισμάτων  $y$  (σε mm) και του υψόμετρου  $x$  (σε m) υπάρχει η γραμμική σχέση:

$$\psi = \alpha x + \beta$$

όπου οι παράμετροι σημαίνουν:

**$\alpha$ :** συντελεστής κατεύθυνσης, την αύξηση των κατακρημνισμάτων  $y$  ανά μονάδα αύξησης τού υψόμετρου  $x$ , δηλ. τη **βροχοβαθμίδα**, και

**$\beta$ :** σταθερή την τιμή του  $y$  για  $x=0$ , δηλαδή την τιμή των κατακρημνισμάτων για υψόμετρο  $x=0$ , υπό τις συνθήκες πάντοτε της λεκάνης.



Η εύρεση λοιπόν των τιμών εκείνων των  $\alpha$  και  $\beta$  που δίνουν την καλύτερα αντιπροσωπευτική ευθεία είναι στατιστικό πρόβλημα και μπορεί να λυθεί με την μέθοδο των *ελαχίστων τετραγώνων*. Με βάση αυτή τη μέθοδο μπορούμε να έχουμε τις τιμές των  $\alpha$  και  $\beta$ :