

ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το περιεχόμενο της Υδρογεωλογίας

Η σημασία της Υδρογεωλογίας

Η κατανάλωση του νερού

Μέθοδοι της Υδρογεωλογίας

Συνοπτική ιστορία της Υδρογεωλογίας



ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ο ΚΥΚΛΟΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ – ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ

Το νερό στη φύση

Κύκλος του νερού – Υδρολογικό Ισοζύγιο

Λεκάνη απορροής



ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΤΑ ΚΑΤΑΚΡΗΜΝΙΣΜΑΤΑ

Ορισμός - Βασικά Φαινόμενα

Μέτρηση των κατακρημνισμάτων

Κατανομή των κατακρημνισμάτων στο χώρο – Ισοϋετείς καμπύλες

Χάραξη Ισοϋετών καμπυλών

Υπολογισμός όγκου κατακρημνισμάτων

Έλεγχος ομοιογένειας και συμπλήρωση βροχομετρικών δεδομένων

Εντάσεις και συχνότητες

Περίοδοι επανάληψης βροχοπτώσεων – Ποσοτικές σχέσεις

ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Η ΚΑΤΕΙΣΔΥΣΗ

Ορισμός - Βασικά Φαινόμενα

Εμπλουτισμός υδροφόρων στρωμάτων

Ρυθμιστικοί Παράγοντες του συντελεστή κατείσδυσης

Μέτρηση της κατείσδυσης

Υπολογισμός του εμπλουτισμού μιας περιοχής ή λεκάνης

Σχέση κατείσδυσης – ύψους ετήσιων κατακρημνισμάτων

ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Η ΕΞΑΤΜΙΣΙΔΙΑΠΝΟΗ

Ορισμός - Βασικά Φαινόμενα

Ρυθμιστικοί Παράγοντες της εξατμισιδιαπνοής

Μέτρηση - Υπολογιστές της εξατμισιδιαπνοής

Υπολογισμός της εξατμισιδιαπνοής από εμπειρικούς τύπους

Σχέση ύψους ετήσιων κατακρημνισμάτων – εξατμισιδιαπνοής

ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ

Κοκκώδη (πορώδη) και ρωγμώδη πετρώματα ή σχηματισμοί

Άλλες κατατάξεις



ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΤΟ ΣΥΜΠΛΕΓΜΑ ΣΤΕΡΕΑΣ – ΥΓΡΗΣ ΦΑΣΗΣ:

ΤΟ ΕΝΕΡΓΟ ΠΟΡΩΔΕΣ

Κατηγορίες νερού στο υπέδαφος

Παρατηρήσεις: Το ενεργό πορώδες

Ρυθμιστικοί Παράγοντες του ενεργού πορώδους

Μέτρηση του ενεργού πορώδους

ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΤΟ ΣΥΜΠΛΕΓΜΑ ΣΤΕΡΕΑΣ – ΥΓΡΗΣ – ΑΕΡΙΑΣ ΦΑΣΗΣ

Γενικά, Ορισμοί

Γραφική παράσταση πετρωμάτων και σχηματισμών μη κορεσμένων σε νερό

Μετρήσεις της υγρασίας στο υπέδαφος

ΤΑ ΤΡΙΧΟΕΙΔΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΚΑΙ Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΟΥΣ ΓΙΑ ΤΟ ΥΠΟΓΕΙΟ ΝΕΡΟ

Η φύση των τριχοειδών φαινομένων

Νόμος της τριχοειδούς ανόδου

Ο ρόλος ρόλος των τριχοειδών φαινομένων στο υπόγειο νερό

Η ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ VLF ΣΤΗΝ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ

ΜΑΘΗΜΑ 1^ο



ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το περιεχόμενο της Υδρογεωλογίας

Η σημασία της Υδρογεωλογίας

Η κατανάλωση του νερού

Μέθοδοι της Υδρογεωλογίας

Συνοπτική ιστορία της Υδρογεωλογίας



ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ

ΚΥΚΛΟΣ ΝΕΡΟΥ – ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ

Αντικείμενο της Υδρογεωλογίας είναι:

Η μελέτη του νερού στο υπέδαφος, δηλαδή η μελέτη του υπόγειου νερού. Παρά ταύτα πρέπει να ληφθούν υπόψη και μερικά απαραίτητα στοιχεία της Επιφανειακής Υδρολογίας.

Έτσι η Υδρογεωλογία μελετά:

- Την Επιφανειακή Υδρολογία
- Τον τρόπο αποθήκευσης και κατανομή του υπόγειου νερού
- Τους νόμους που ρυθμίζουν τις φυσικές ροές του υπόγειου νερού
- Τους νόμους που διέπουν τις υπόγειες ροές προς τα υδρομαστευτικά έργα.
- Τα υδρομαστευτικά έργα και η τεχνική της κατασκευής τους.
- Τα αποθέματα του υπόγειου νερού.
- Τις φυσικές και χημικές ιδιότητες του υπόγειου νερού, τη σχέση τους με τη γεωλογική σύσταση, τις διαδικασίες της ρύπανσής του και τους τρόπους προστασίας του.
- Διάφορα θέματα υδρογεωλογίας, όπως καρστική υδρογεωλογία, υδρογεωλογικά μοντέλα, διασκοπήσεις, ισοτοπική υδρογεωλογία – ιχνηθετήσεις κλπ.

Μέθοδοι της Υδρογεωλογίας

- Συνοπτικά οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στην Υδρογεωλογία είναι:
- Γεωλογικές: Στηρίζονται στη μελέτη της γεωλογικής δομής του υπεδάφους.
- Υδρολογικές: Στηρίζονται στις μετρήσεις σχετικά με την ποσοτική μετακίνηση του νερού, όπως κατείσδυση, απορροή κλπ.
- Μετεωρολογικές: Στηρίζονται στα μετεωρολογικά στοιχεία.
- Χημικές: Στηρίζεται στις μεταβολές της χημικής σύστασης του υπόγειου νερού κατά υπόγεια ροή του.
- Υδραυλικές: Στηρίζονται στους νόμους της υδραυλικής.
- Πιεζομετρικές: Στηρίζονται στη μεταβολή της πιεζομετρικής επιφάνειας υδροφόρων οριζόντων.
- Υχνοθετικές: Με βάση την ιχνοθέτηση του νερού.
- Μαθηματικές: Με βάση ένα σύνολο μαθηματικών τύπων δημιουργείται μαθηματικό πρότυπο διαφόρων ροών.
- Γεωφυσικές: Βασίζονται στα αποτελέσματα γεωφυσικών βυθοσκοπίσεων με τα κατάλληλα γεωφυσικά όργανα.

ΚΥΚΛΟΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ – ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ

➤ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΗ ΓΗ ΚΑΤΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

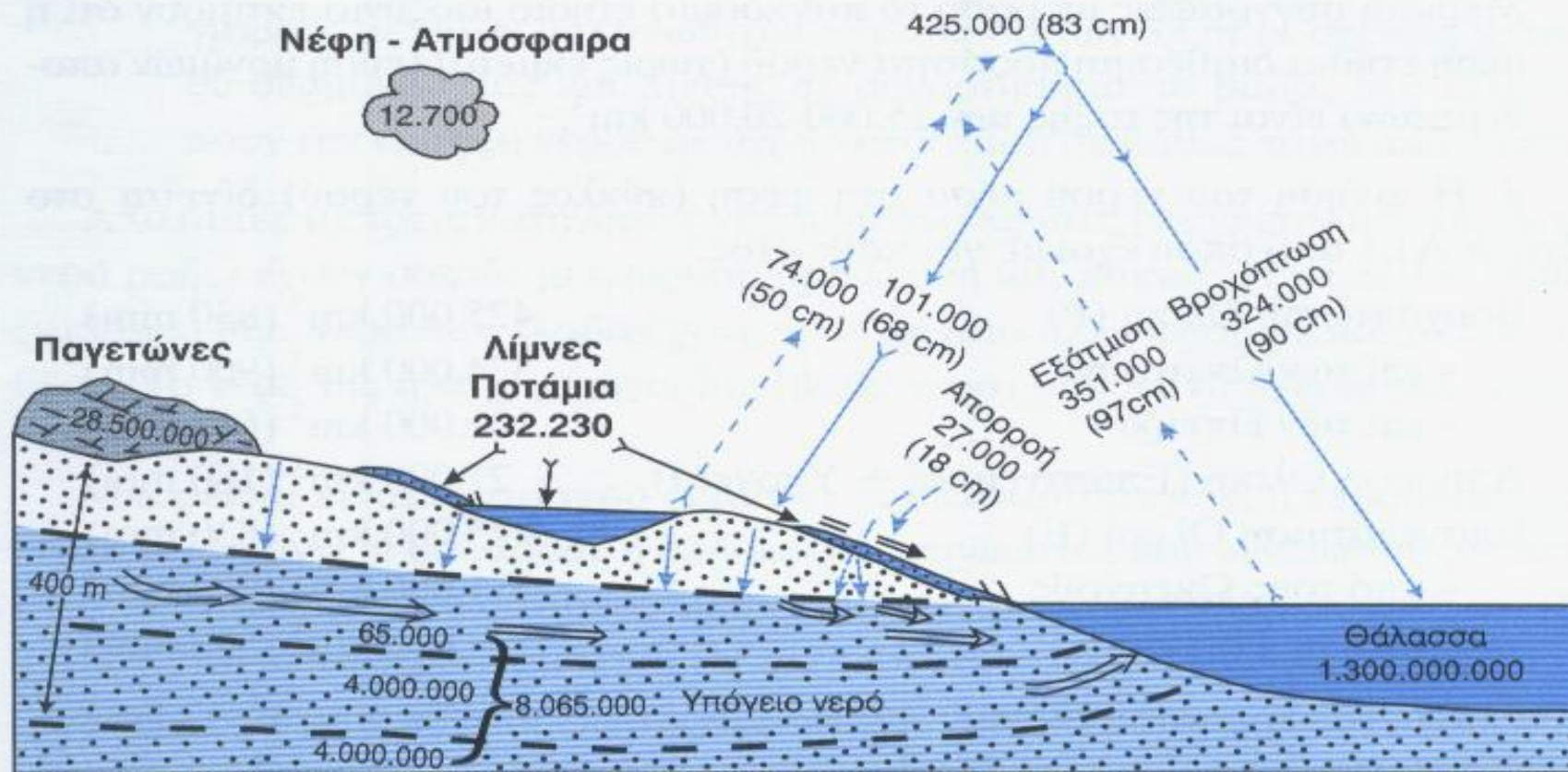
ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	ΠΟΣΟΤΗΤΑ (km ³)	ΠΟΣΟΣΤΟ (%)
ΥΓΡΗ	1.308.290.000	97.86
ΣΤΕΡΕΑ (ΠΑΓΕΤΩΝΕΣ)	28.500.000	2.13
ΑΕΡΙΑ	12.700	0.001
ΣΥΝΝΟΛΟ	1.336.800.000	100

ΚΥΚΛΟΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ – ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ

► ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΗ ΓΗ ΚΑΤΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ	ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΣΕ km ³	ΠΟΣΟΣΤΟ (%)
ΘΑΛΑΣΣΕΣ	1.300.000.000	97.25
ΠΑΓΕΤΩΝΕΣ	28.500.000	2.13
ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ	12.700	0.001
ΕΣΩΤΕΡΙΚΑ (ΓΛΥΚΑ) ΝΕΡΑ	8.290.000	0.62
ΛΙΜΝΕΣ – ΠΟΤΑΜΙΑ	224.230	
ΥΠΟΓΕΙΟ ΝΕΡΟ	8.065.000	
ΚΟΝΤΑ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ	65.000	
ΒΑΘΟΣ < 800 m	4.000.000	
ΒΑΘΟΣ > 800 m	4.000.000	

Το νερό στη φύση (οι ποσότητες αναφέρονται σε km^3 , εφόσον δεν αναφέρεται άλλη μονάδα)



Η ΚΙΝΗΣΗ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΗ ΦΥΣΗ

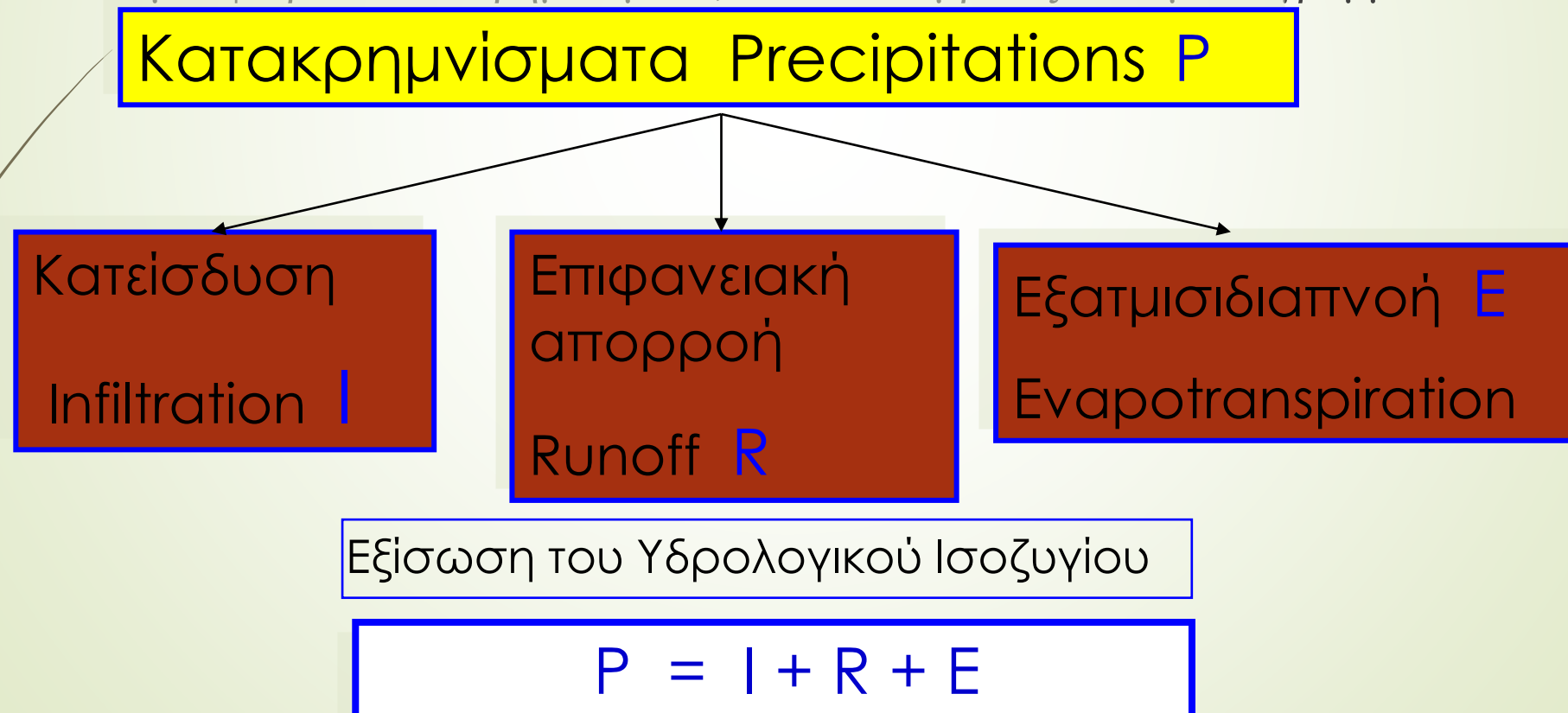
ΟΛΙΚΗ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ	Km ³ 425.000	mm 830
ΕΠΙ ΤΩΝ ΩΚΕΑΝΩΝ	324.000	900
ΕΠΙ ΤΩΝ ΗΠΕΙΡΩΝ	101.000	860
ΟΛΙΚΗ ΑΠΟΡΡΟΗ (ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ + ΥΠΟΓΕΙΑ)	27.000	180
ΟΛΙΚΗ ΕΠΑΝΕΞΑΤΜΙΣΗ	425.000	830
ΑΠΟ ΤΟΥΣ ΩΚΕΑΝΟΥΣ	351.000	970
ΑΠΟ ΤΙΣ ΗΠΕΙΡΟΥ	74.000	500

- 
- 
- Η προέλευση του υπόγειου νερού είναι κυρίως μετεωρική. Πιο συγκεκριμένα το υπόγειο νερό μπορεί να διακριθεί στις παρακάτω κατηγορίες:
 - **Νερό κατείσδυσης:** Προέρχεται από την επιφάνεια του εδάφους και έχει σχεδόν κατακόρυφη ροή, με μηδενική έως αμελητέα συνιστώσα.
 - **Νερό ροής:** Κινείται κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα. Βρίσκεται μέσα στα υδροφόρα στρώματα. Θεωρείται εξ ορισμού ρέον με σημαντική οριζόντια συνιστώσα και πολύ μικρή έως αμελητέα κατακόρυφη.
 - **Νερό βάθους ή βαθύ νερό:** Το νερό αυτό πρακτικά δε ρέει ή ρέει βραδύτατα. Ονομάζεται και απολιθωμένο νερό. Υδροστατικά απομονωμένο και δεν υπόκειται σε υδροδυναμισμό. Περιέχει μεγάλες ποσότητες αλάτων, βρίσκεται δηλαδή σε χημική ισορροπία με τα πετρώματα. Το βάθος του νερού αυτού εκτίνεται έως τα συμπαγή και αδιαπέραστα για το νερό πετρώματα και εκτιμάται ότι μπορεί να φθάσει έως τα 33 km.

- 
- 
- Από τις παραπάνω τρεις κατηγορίες νερού οι δύο πρώτες (**νερό κατείσδυσης και νερό ροής**) έχουν μετεωρική προέλευση και πάντως είναι παλαιά νερά (vadoses). Πρόκειται για νερά που γεννήθηκαν σε κάποια άλλη φάση σε κάποια άλλη θέση.
 - Το βαθύ νερό μπορεί να έχει διπλή προέλευση:
 - **Παλαιό νερό** (vadose) που καταστράγγισε, ή νερό παλαιάς λίμνης, ή θάλασσας ή υδροφόρου στρώματος που εγκλωβίσθηκε και απομονώθηκε κατά την ιζηματογένεση και/ή τον τεκτονισμό.
 - **Νέο νερό** (juvenile): γεννήθηκε για πρώτη φορά και δεν μετακινήθηκε σημαντικά από εκεί και πάντως δεν ήλθε ακόμα στο φως.

ΚΥΚΛΟΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ – ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ

- Αένας κύκλος στη φύση όπου το νερό μεταπηδά από πεδίο σε πεδίο, με κίνησή του αυτή να επαναλαμβάνεται μέσα στο χρόνο.
- **Επιφανειακή Υδρολογία:** Μελετά το νερό στην επιφάνεια της γης υπό οποιαδήποτε μορφή (βροχή, χιόνι, χαλάζι κλπ) γνωστά στο σύνολό τους ως ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα, τα ποία συμβολίζονται με το γράμμα **P**.



Παράδειγμα έκφρασης υδρολογικού ισοζυγίου σε λεκάνη 200 km²

	P	=	I	+	R	+	E
Όγκος m ³	118X10 ⁶		12,98X10 ⁶		51,92X10 ⁶		53,1X10 ⁶
Ύψος βροχής (mm)	590		64,9		259,6		265,5
Συντε- λεστής (%)	100		11		44		45

- 
- 
- Το ύψος βροχής (σε mm) προκύπτει από τον όγκο διαιρούμενος δια του εμβαδού της περιοχής στην οποία αναφέρεται, υπό την προϋπόθεση της ομοιόμορφης κατανομής σε όλη την υπό εξέταση περιοχή.
 - Ο υδρολογικός κύκλος (hydrologic cycle) είναι ένας από τους πλέον σημαντικούς κύκλους στην γη ανάμεσα στον γεωλογικό, γεωχημικό, γεωτεκτονικό, ιζηματολογικό, κλπ, διότι με αυτόν διακινούνται μεταξύ εδάφους και ατμόσφαιρας τεράστιες ποσότητες νερού και ενέργειας, αλλά και διότι διατηρεί τη ζωή επάνω στην επιφάνεια των ηπείρων.

Λεκάνη απορροής

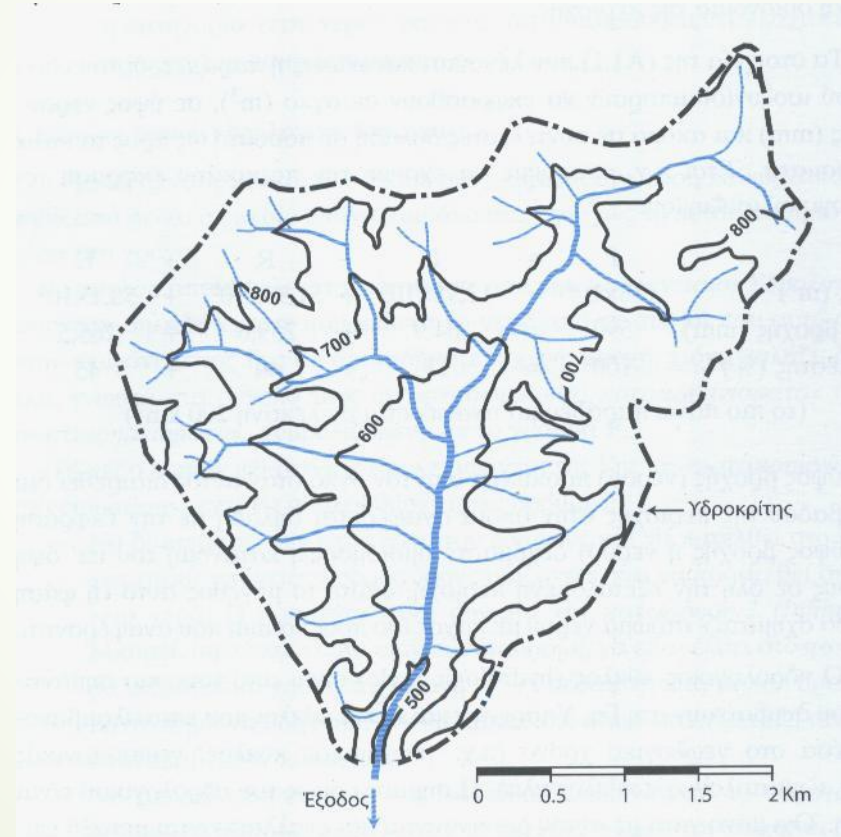
► Λεκάνη Απορροής ή Υδρολογική Λεκάνη (Hydrologic Basin) ενός ποταμού :

- Το τμήμα εκείνο της επιφάνειας του εδάφους πάνω στο οποίο τα νερά που ρέουν επιφανειακά φέρονται με το υδρογραφικό δίκτυο στην κοίτη του ποταμού ο οποίος τα οδηγεί κατευθείαν στη θάλασσα ή δια μέσου άλλου μεγαλύτερου ποταμού, του οποίου είναι παραπόταμος. Η περιοχή αυτή έχει αυτόνομη επιφανειακή υδροοικονομία με ανεξάρτητο υδρολογικό ισοζύγιο.

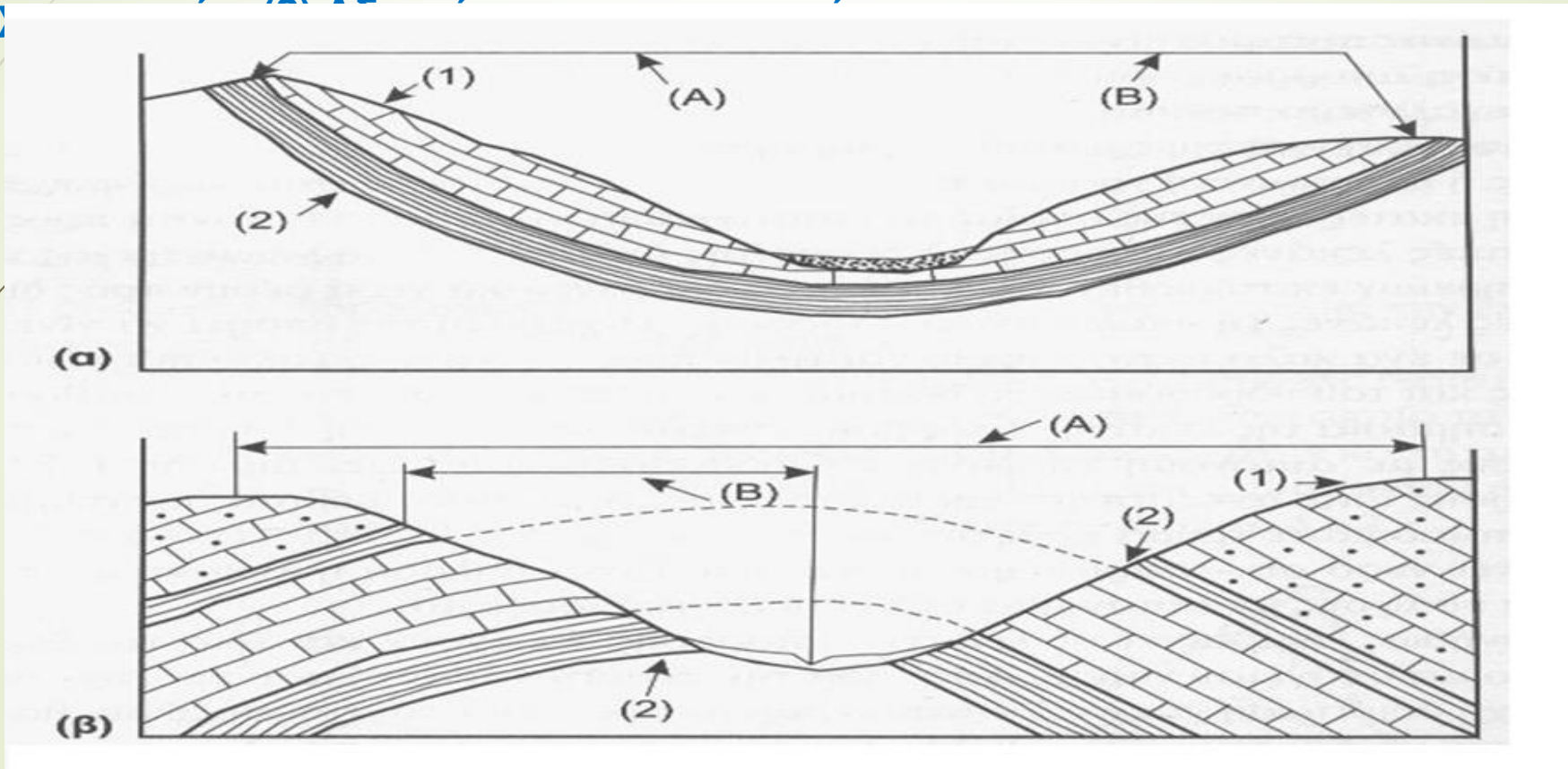
► Υδροκριτική Γραμμή ή Υδροκρίτης μιας λεκάνης απορροής:

- Η οριακή – περιφερειακή γραμμή που αντιστοιχεί στην κορυφογραμμή εκείνη εκατέρωθεν της οποίας τα επιφανειακά νερά κατευθύνονται προς διαφορετικές λεκάνες απορροής.

Λεκάνη απορροής



Υπόγειες και επιφανειακές λεκάνες. (α) Σύμπτωση υπόγειας και επιφανειακής λεκάνης, (β) Μη σύμπτωση αυτών των λεκανών. (Α) Επιφανειακή λεκάνη απορροής, (Β) Υπόγεια λεκάνη, (1) Περαιτός





Καθοριστικοί Παράγοντες του Υδρολογικού Ισοζυγίου

Κλιματολογικές Συνθήκες

Φύση των πετρωμάτων

Γεωμορφολογία της λεκάνης

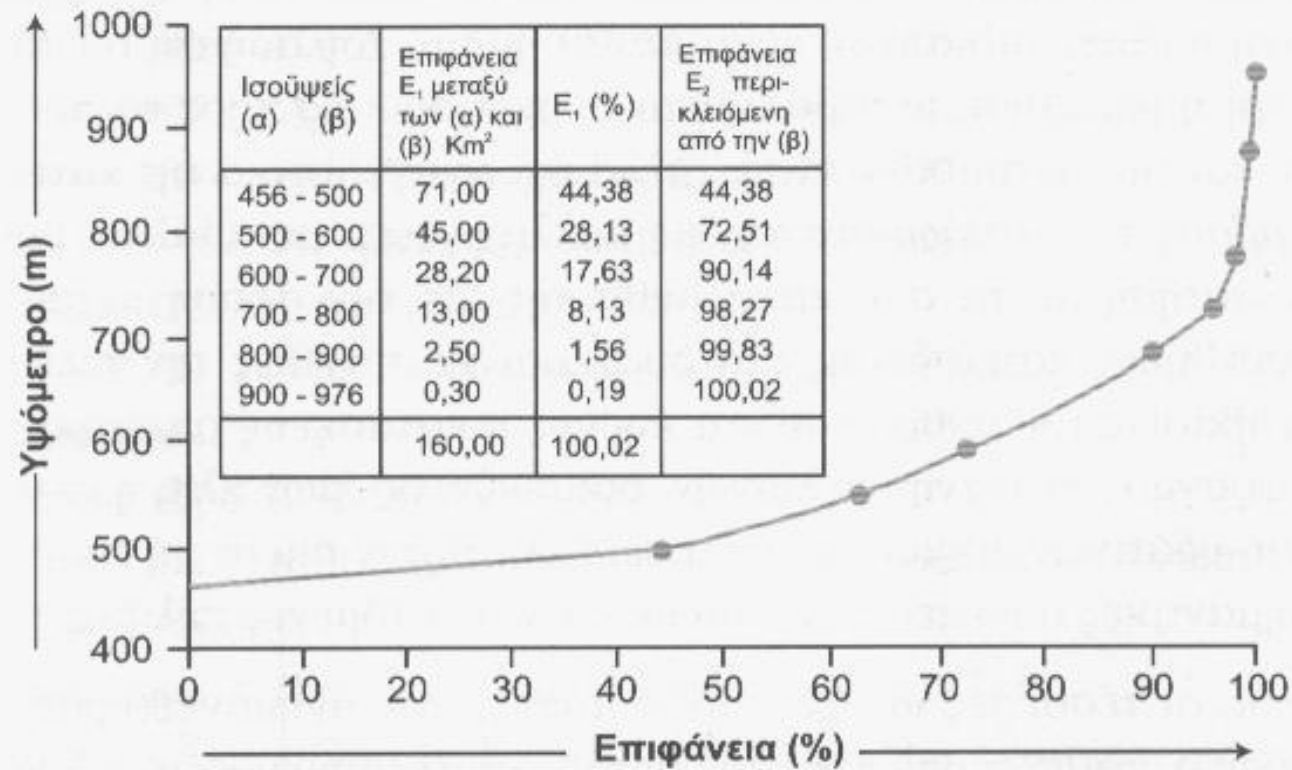
Βλάστηση και Ανθρωπογενείς
Επεμβάσεις

Γεωμορφολογία της λεκάνης

➤ Γεωμορφολογικοί παράμετροι που ενδιαφέρουν την υδρογεωλογία

- **Η μέση κλίση του εδάφους:** $P = \frac{dL}{E}$
- Όπου d=η ισοδιάσταση,
- $L = l_1 + l_2 + l_3 + \dots + l_n$ = συνολικό μήκος των ισοϋψών καμπυλών
- E= Η επιφάνεια της υπόψη περιοχής
- **Το μέγιστο ανάγλυφο** Hd = Η υψομετρική διαφορά ανάμεσα στο υψηλότερο και το χαμηλότερο σημείο.
- **Η κατανομή της επιφάνειας** στα διάφορα υψόμετρα (δίδεται από την υψογραφική καμπύλη, επόμενο Σχήμα).

Υψογραφική καμπύλη μιας λεκάνης



➤ **Το υδρογραφικό δίκτυο:** αναλύεται από τους παρακάτω παράγοντες που αφορούν την Υδρογεωλογία:

➤ ♦ **Συντελεστής αποστράγγισης**

$$d = \frac{E}{L}$$

(E= η υπό εξέταση επιφάνεια της λεκάνης, L= συνολικό μήκος των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου)

♦ **Πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου**

$$D = \frac{L}{E}$$

♦ **Συχνότητα του υδρογραφικού δικτύου**

$$F = \frac{N}{E}$$

(N= ο αριθμός όλων των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου)

Βλάστηση

- Η βλάστηση παίζει σημαντικά αρνητικό ρόλο στη επιφανειακή ροή.
- Κατά άλλους, στην ίδια και την αυτή λεκάνη, ανεξάρτητα της βλάστησης και τις μεταβολές της, η εξατμισοδιαπνοή είναι πάντοτε η ίδια και άρα δεν μεταβάλλονται ουσιαστικά τα ποσοστά της κατείδυσης.

Ανθρωπογενείς Επεμβάσεις

- Μεταβολή της φυσικής βλάστησης με τις καλλιέργειες
- Κατασκευές : Αποστραγγιστικά έργα, φράγματα-τεχνητές λίμνες, οικισμοί, δρόμοι.
- Εκτενής χρήση υδάτινων πόρων

ΜΑΘΗΜΑ 2^ο



ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΤΑ ΚΑΤΑΚΡΗΜΝΙΣΜΑΤΑ

Ορισμός - Βασικά Φαινόμενα

Μέτρηση των κατακρημνισμάτων

Κατανομή των κατακρημνισμάτων στο χώρο – Ισοϋετείς καμπύλες

Χάραξη Ισοϋετών καμπυλών

Υπολογισμός όγκου κατακρημνισμάτων

Έλεγχος ομοιογένειας και συμπλήρωση βροχομετρικών δεδομένων

Εντάσεις και συχνότητες

Περίοδοι επανάληψης βροχοπτώσεων – Ποσοτικές σχέσεις

ΚΑΤΑΚΡΗΜΝΙΣΜΑΤΑ

- *Κατακρημνίσματα – Precipitations P* : Το σύνολο του μετεωρικού νερού που φθάνει στη επιφάνεια της γης, σε οποιαδήποτε μορφή (με τη βροχή να υπερέχει συντριπτικά πάνω από 80% στο σύνολο).

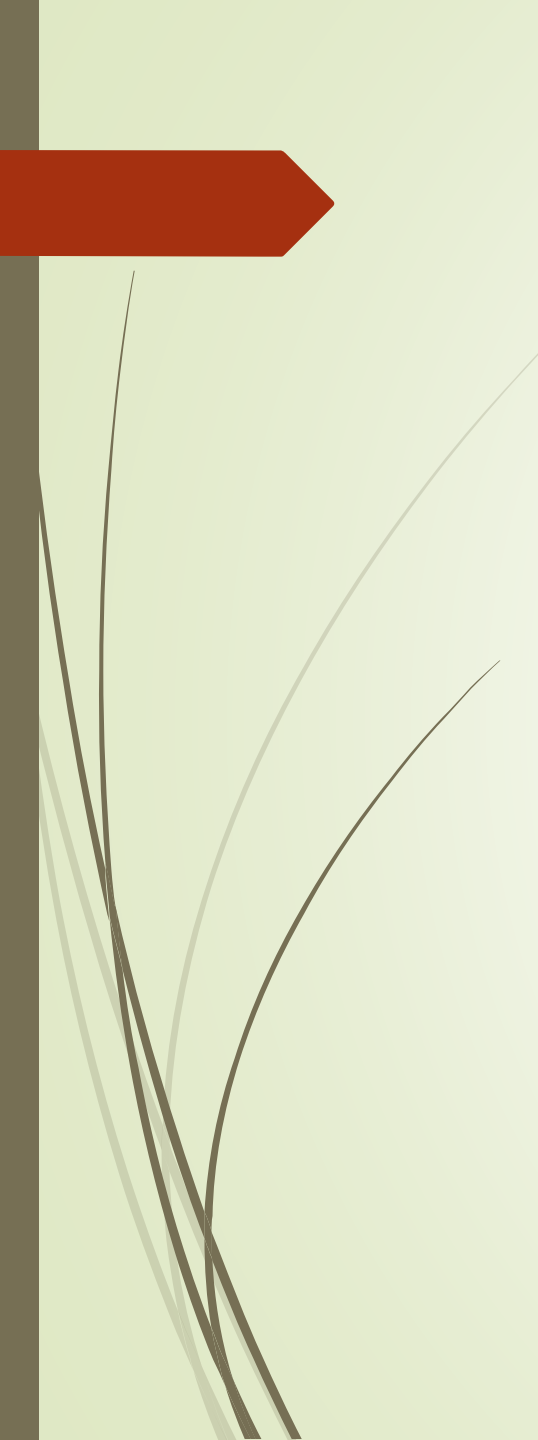
Προϋποθέσεις για την συμπύκνωση των υδρατμών στις αέριες μάζες

- Ύπαρξη άφθονων υδρατμών στην ατμόσφαιρα.
- Ψύξη του αέρα ώστε η θερμοκρασία να πλησιάσει το «σημείο δρόσου»
- Ύπαρξη στην ατμόσφαιρα «πυρήνων συμπύκνωσης». Πρόκειται συνήθως για ιονισμένα σωματίδια Na^+ , Cl^- όπως και Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} κλπ.

ΚΑΤΑΚΡΗΜΝΙΣΜΑΤΑ

- Οι μετρήσεις των κατακρημνισμάτων γίνονται με όργανα, τα λεγόμενα «*βροχόμετρα*» τα οποία μετρούν το ύψος βροχής σε mm και έτσι εντοπίζουμε:
 - ✓ Το ετήσιο ή μηνιαίο ύψος κατακρημνισμάτων για ένα συγκεκριμένο έτος ή μήνα.
 - ✓ Το μέσο ετήσιο ή μηνιαίο ύψος κατακρημνισμάτων, που επίσης ονομάζεται «*ετήσιος βροχομετρικός δείκτης*» ή «*μηνιαίος βροχομετρικός δείκτης*».
 - ✓ Τον «*δείκτη βροχερότητας*» ενός έτους ή μήνα. Το πηλίκο δηλαδή του ετήσιου (ή μηνιαίου) ύψους κατακρημνισμάτων του συγκεκριμένου έτους (ή μήνα) δια του μέσου ετήσιου (ή μηνιαίου) βροχομετρικού δείκτη.

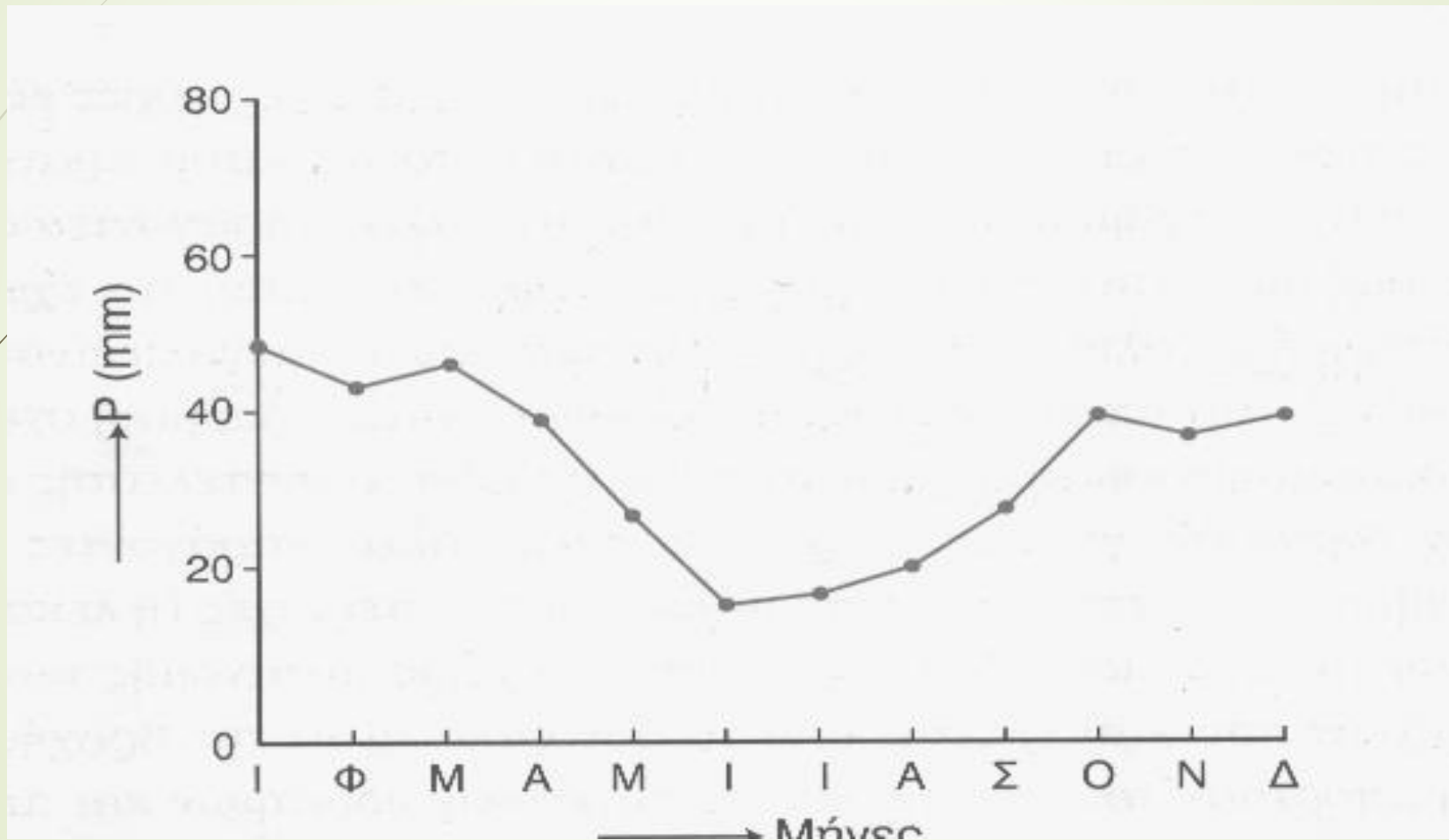
Εύρος δείκτη βροχερότητας: 2,2 - 0,4



ΚΑΤΑΚΡΗΜΝΙΣΜΑΤΑ

- ✓ Το «*διάγραμμα κατανομής ή υετόγραμμα*».
- ✓ Η «*ένταση των κατακρημνισμάτων*» (το ανά μονάδα χρόνου ύψος των κατακρημνισμάτων που επηρεάζει την κατανομή των φάσεων του υδρολογικού ισοζυγίου).

Υετόγραμμα: Ετήσια κατανομή των κατακρημνισμάτων ανά μήνα



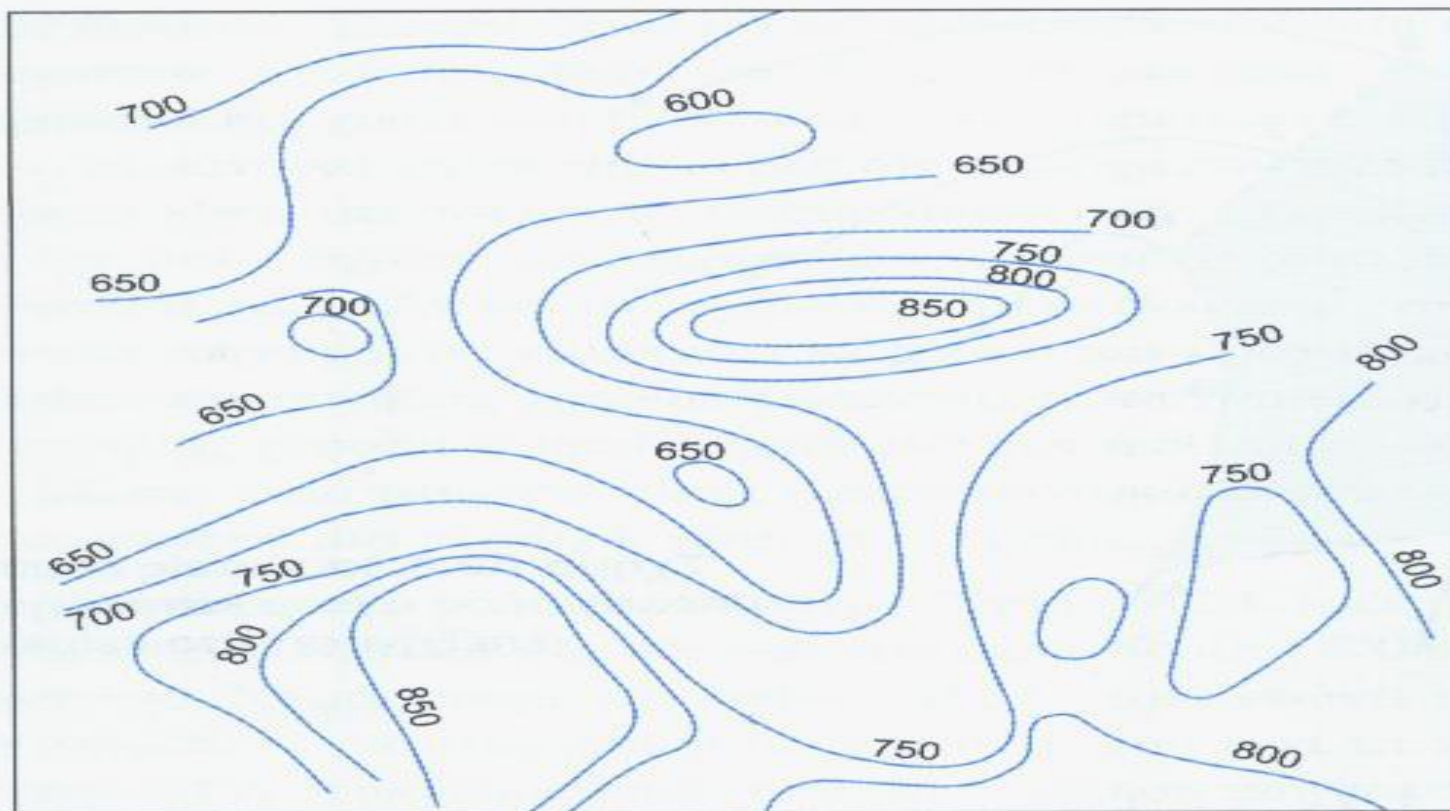
ΚΑΤΑΚΡΗΜΝΙΣΜΑΤΑ

Κατανομή των Κατακρημνισμάτων στο χώρο: Ισοϋετείς καμπύλες

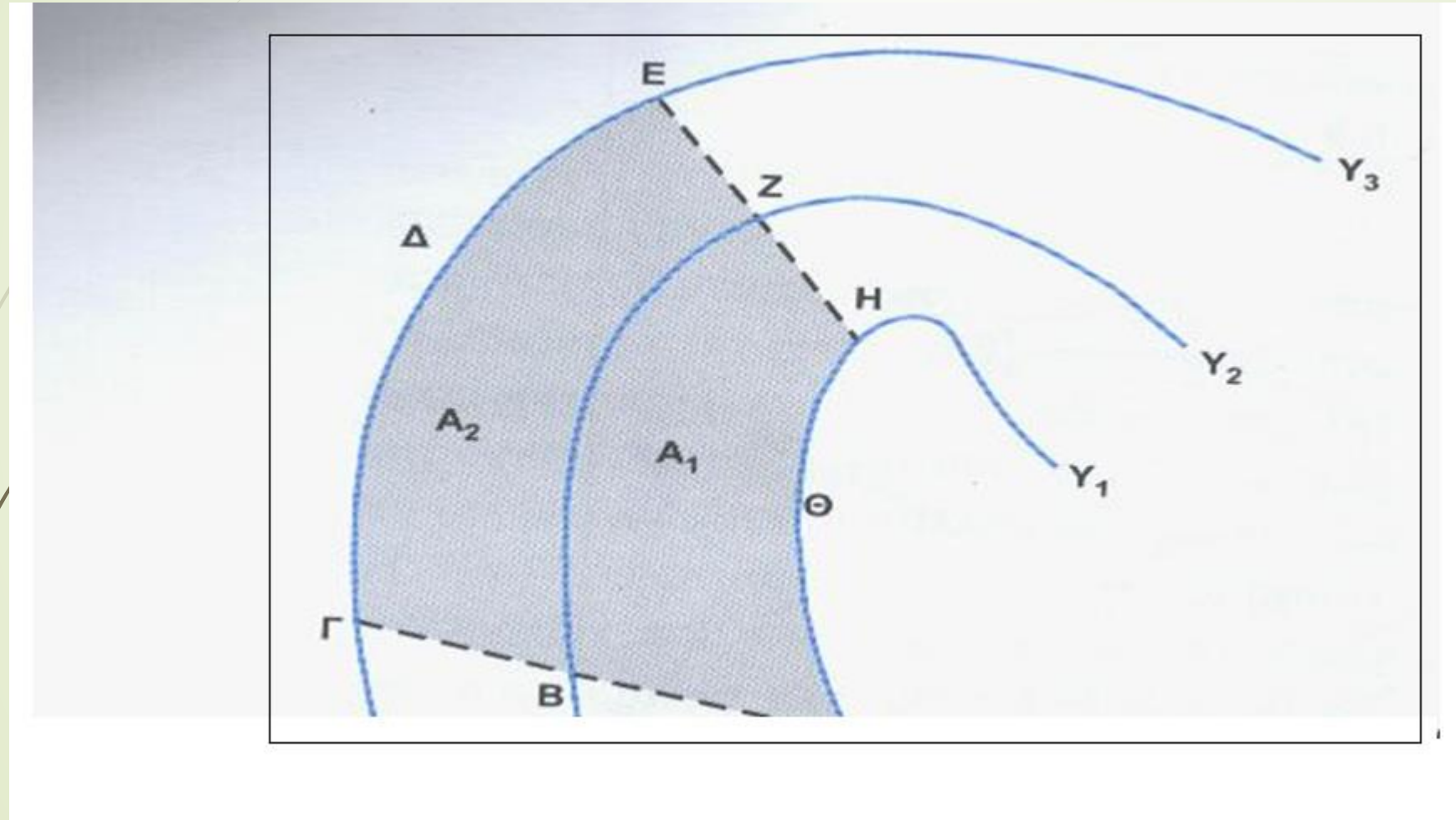
Παράγοντες που επιδρούν στην κατανομή των κατακρημνισμάτων μέσα σε μια υδρογεωλογική λεκάνη

- ⊙ Το υψόμετρο του βροχομετρικού σταθμού.
- ⊙ Η θέση του σταθμού μέσα στον ευρύτερο χώρο κατανομής των κατακρημνισμάτων.
- ⊙ Το ανάγλυφο (γεωμορφολογία) της περιοχής που εκφράζεται με:
 - * Την ανύψωση: υψομετρική διαφορά μεταξύ του θεωρούμενου σημείου και του υψηλότερου σημείου (ακτίνας έως 10 km).
 - * Την έκθεση: το άθροισμα σε μοίρες των τομέων του κύκλου με κέντρο τον σταθμό και ακτίνα ~10 km σε σημαντικό υψόμετρο (>400 m) σε σχέση με τον σταθμό.
 - * Τον προσανατολισμό, η θέση των τομέων ως προς τον ορίζοντα και ως προς τις πηγές παραγωγής των υδρατμών (θάλασσες).
 - * Την διεύθυνση κλίσης των κλιτύων ως προς τις πηγές υδρατμών.

Βροχομετρικός χάρτης – χάρτης ισόετών καμπυλών.
Οι αριθμοί δηλώνουν το ύψος των ετήσιων κατακρημνισμάτων σε mm.



Χάραξη ισοϋετών καμπυλών – υπολογισμός όγκου κατακρημνισμάτων



Χάραξη ισοϋετών καμπυλών – υπολογισμός όγκου κατακρημνισμάτων

V = Όγκος κατακρημνισμάτων σε μία συγκεκριμένη περιοχή.

Y_1, Y_2, Y_3 = Ισοϋετείς καμπύλες γνωστού ύψους κατακρημνισμάτων .

A_1, A_2 = Επιφάνεια μεταξύ δύο διαδοχικών ισοϋετων.

$$V = \frac{Y_1 + Y_2}{2} A_1 + \frac{Y_2 + Y_3}{2} A_2$$

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

: Μέσο ύψος κατακρημνισμάτων
 $\bar{Y}$

Χάραξη ισοϋτών καμπυλών – υπολογισμός όγκου κατακρημνισμάτων

➤ Ο υπολογισμός του όγκου των κατακρημνισμάτων βασίζεται:

- Στη μέτρηση του εμβαδού της εξεταζόμενης επιφάνειας.
- Στη χάραξη των ισοεϋτών καμπυλών ή στη γνώση των μέσου ύψους των κατακρημνισμάτων στην ολική επιφάνεια.

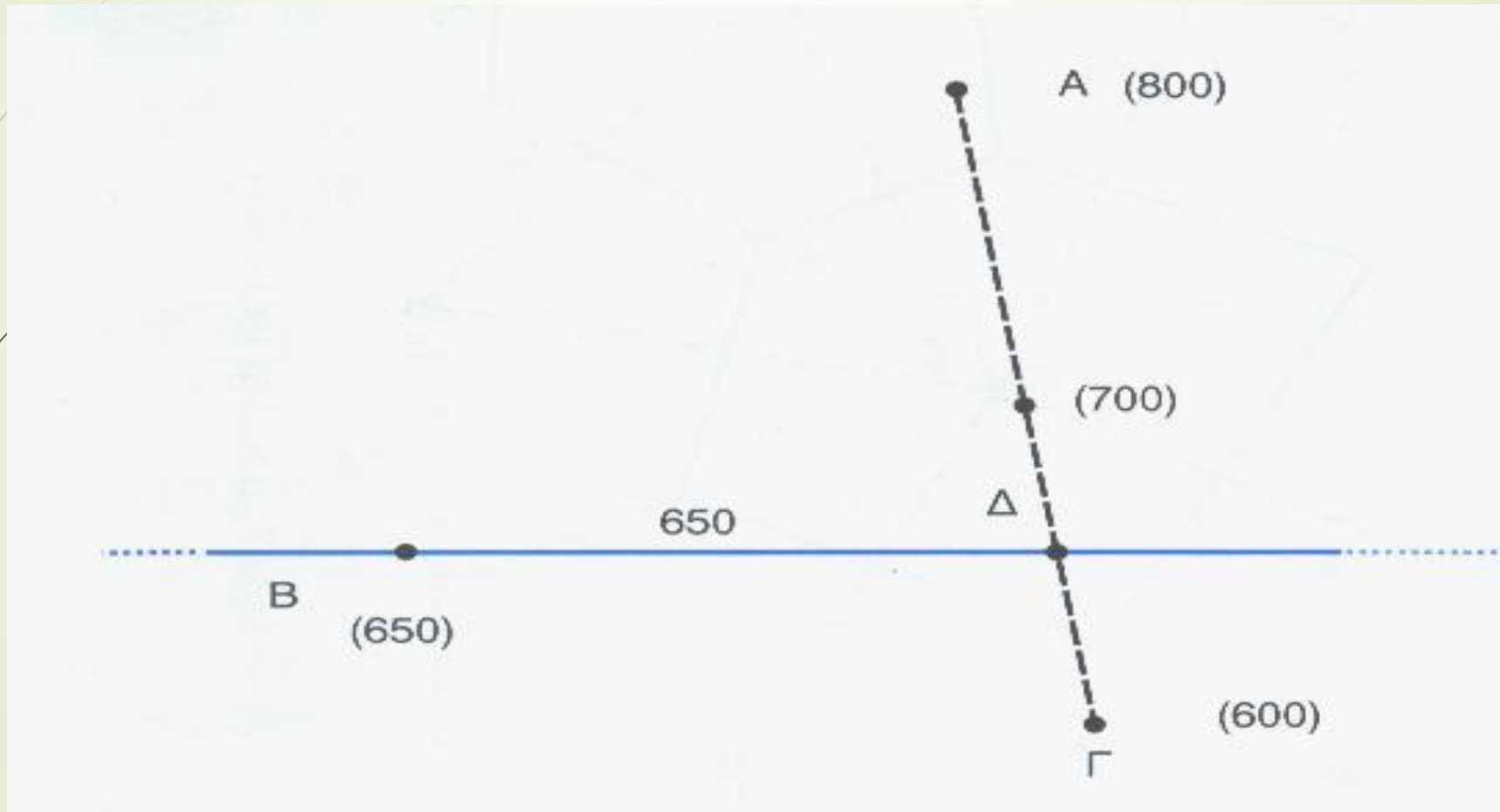
Η μέτρηση του εμβαδού μιας επιφάνειας από χάρτη μπορεί να γίνει εναλλακτικά:

- Με τη χρήση ειδικών οργάνων, των εμβαδομέτρων, έχοντας υπόψη την κλίμακα του χάρτη.
- Με την μέθοδο των τετραγωνιδίων, λαμβάνοντας υπόψη την κλίμακα του χάρτη.
- Με τη μέθοδο της ζύγισης σε ευαίσθητο ηλεκτρονικό ζυγό.
- Ηλεκτρονικά, σε μία περιοχή ψηφιοποιημένη.

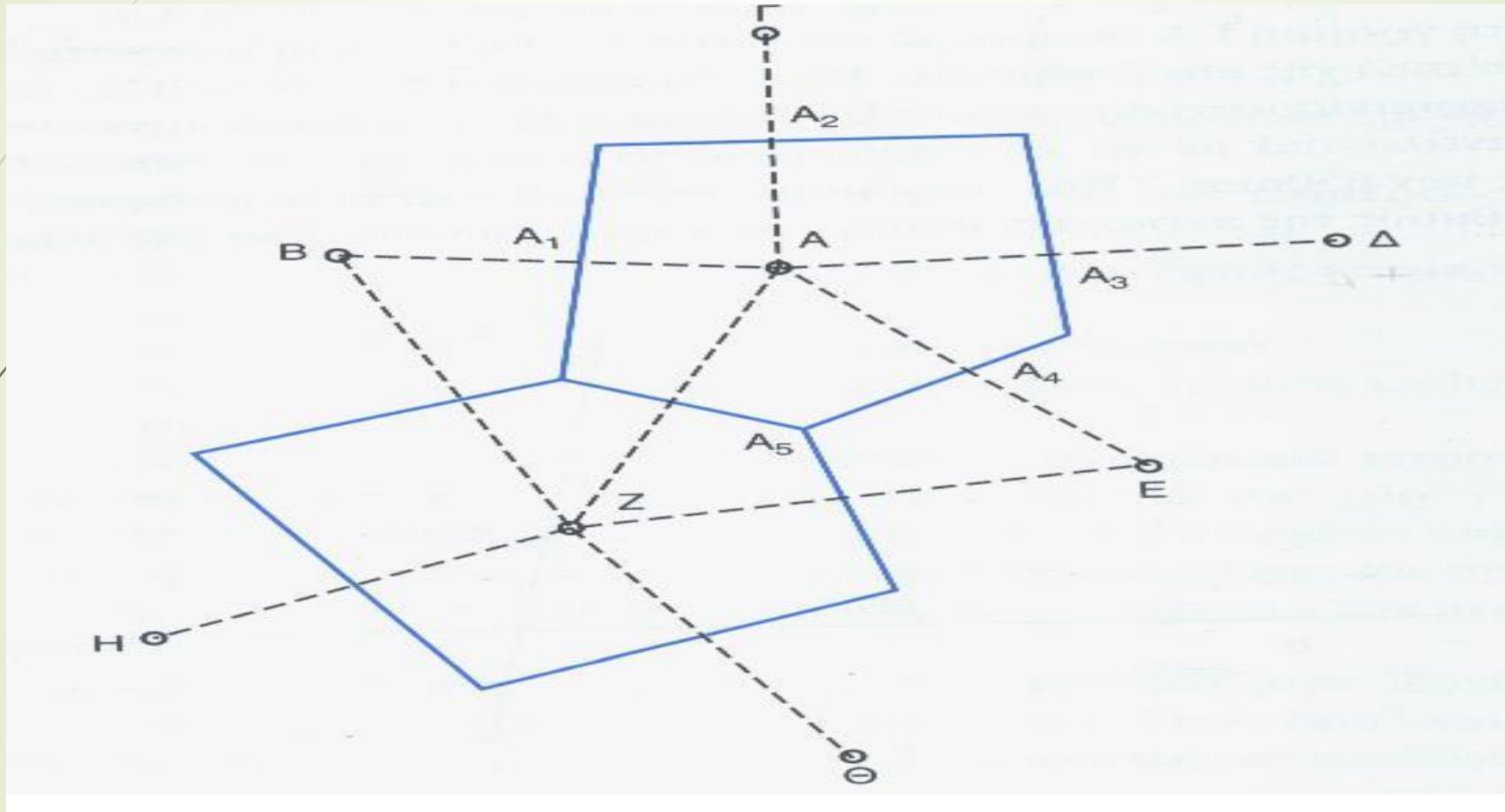
Χάραξη ισοϋετών καμπυλών – υπολογισμός όγκου κατακρημνισμάτων

- Μέθοδοι χάραξης ισοεϋτών καμπυλών και υπολογισμός της μέσης τιμής του όγκου των κατακρημνισμάτων:
 - Μέθοδος των τριγώνων
 - Μέθοδος των πολυγώνων ή του *Thiessen*
 - Μέθοδος αριθμητικής (γραμμική) ή μέθοδος απλής γραμμικής παλινδρόμησης. $y = \alpha x + \beta$, όπου y : κατακρημνίσματα σε mm, x : υψόμετρο σε m, α : συντελεστής κατεύθυνσης (αύξηση των κατακρημνισμάτων y ανά μονάδα αύξησης του υψομέτρου x , δηλ. η βροχαμετρική βαθμίδα), β : σταθερά, η τιμή του y για $x = 0$, η τιμή δηλ. των κατακρημνισμάτων για υψόμετρο $x=0$, υπό τις συνθήκες πάντα της λεκάνης.
 - Μέθοδος πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης: $P = \alpha x + \beta y + \gamma z + \delta$, όπου α, β, γ : αριθμητικοί συντελεστές, δ : η βροχύπτωση για $x=0, y=0, z=0$
 - Μέθοδος του μέσου όρου
 - Χάραξη κατ' εκτίμηση των ισοϋετών καμπυλών

Εφαρμογή της μεθόδου των τριγώνων για τη χάραξη των ισοϋετών καμπυλών



Εφαρμογή της μεθόδου των πολυγώνων (μέθοδος Thiessen) για τον υπολογισμό του όγκου των κατακρημνισμάτων





➤ Όγκος των κατακρημνισμάτων

➤ $V_{ολ} = V_1 + V_2 + V_3 + \dots V_n$

➤ $V_1 = P_1 E_1$

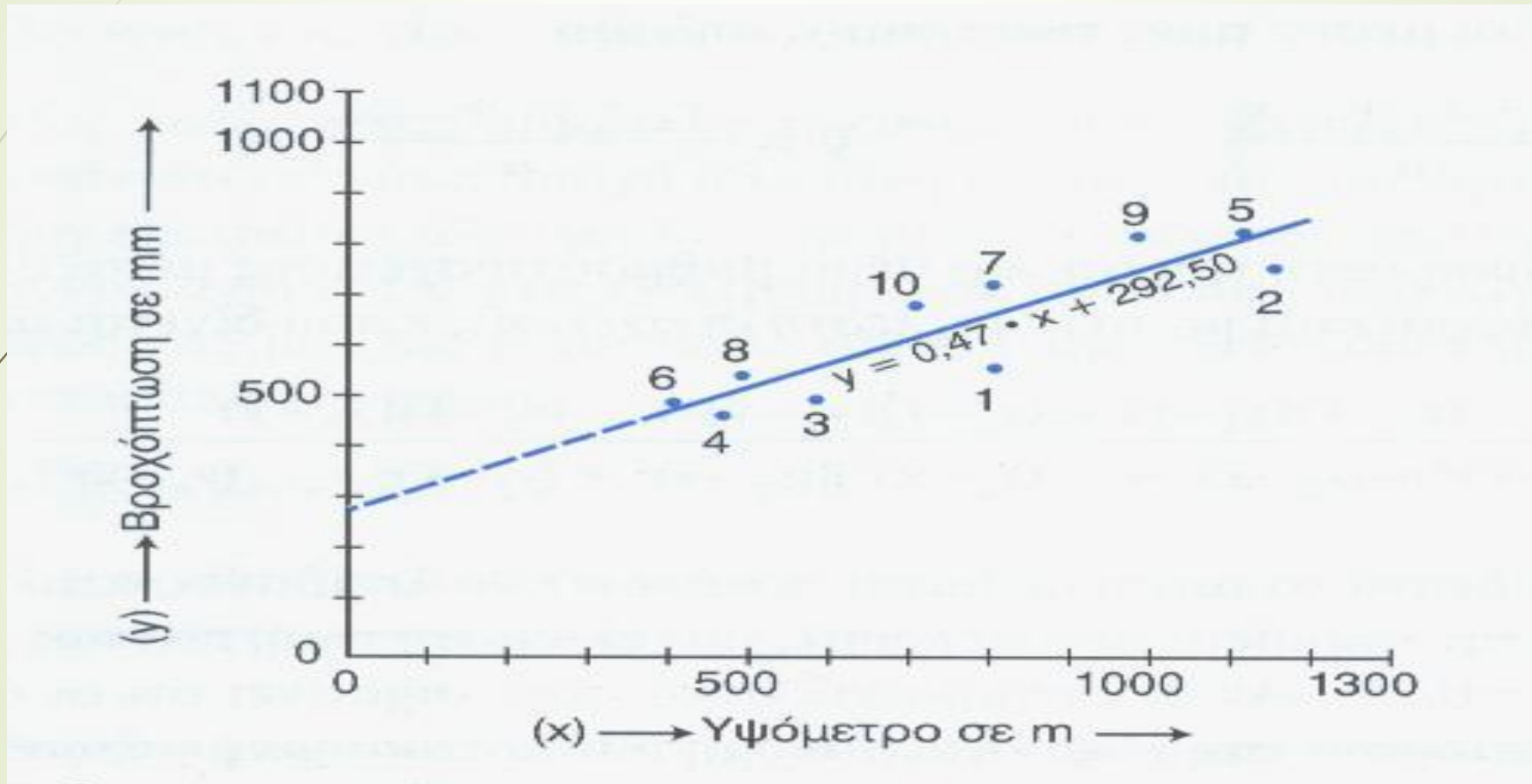
➤ $V_2 = P_2 E_2$

Μέθοδος αριθμητική (γραμμική) ή μέθοδος απλής γραμμικής παλινδρόμησης

- Στηρίζεται στην παραδοχή ότι στην κατανομή των κατακρημνισμάτων μέσα στον χώρο επιδρά ουσιαστικά μόνο το υψόμετρο, παραβλέποντας τους άλλους παράγοντες.
- Δεχόμαστε μία γραμμική σχέση μεταξύ κατακρημνισμάτων y (σε mm) και υψομέτρου x (σε m):
- $y = ax + \beta$
- Όπου a είναι ο συντελεστής κατεύθυνσης (αύξηση των κατακρημνισμάτων ανά μονάδα αύξησης του υψομέτρου)
- β : σταθερά, τιμή του y για $x=0$, ήτοι η τιμή των κατακρημνισμάτων για υψόμετρο $x=0$.



Διάγραμμα κατακρημνισμάτων – υψομέτρου



Εντάσεις – Συχνότητες – Περίοδοι Επανάληψης Βροχοπτώσεων – Ποσοτικές Σχέσεις

- P_i : Ένταση βροχής ή κατακρημνισμάτων γενικά: Το ύψος της βροχής Ph σε mm που πέφτει σε χρονική διάρκεια Δt δια Δt :

$$P_i = \frac{Ph}{\Delta t}$$

Όσο μεγαλύτερη είναι μία ένταση τόσο σπανιότερα παρατηρείται.

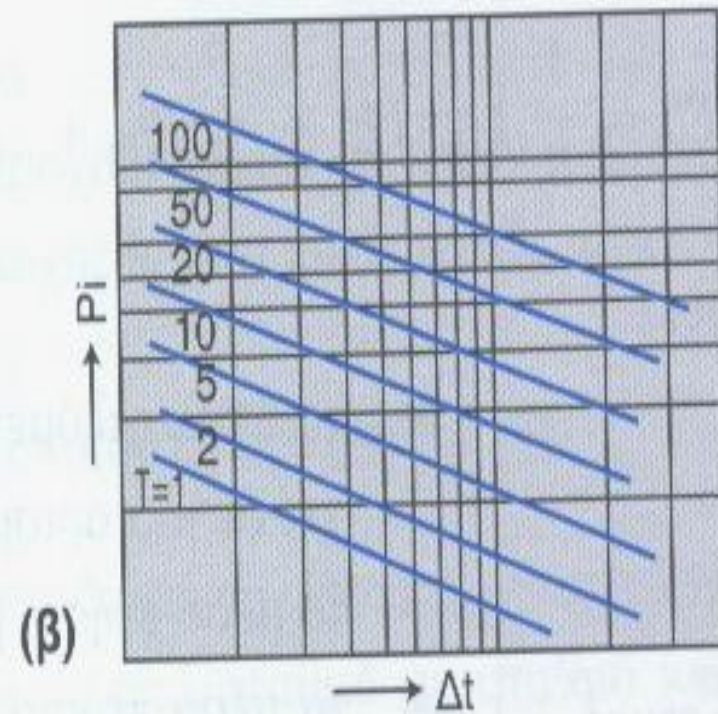
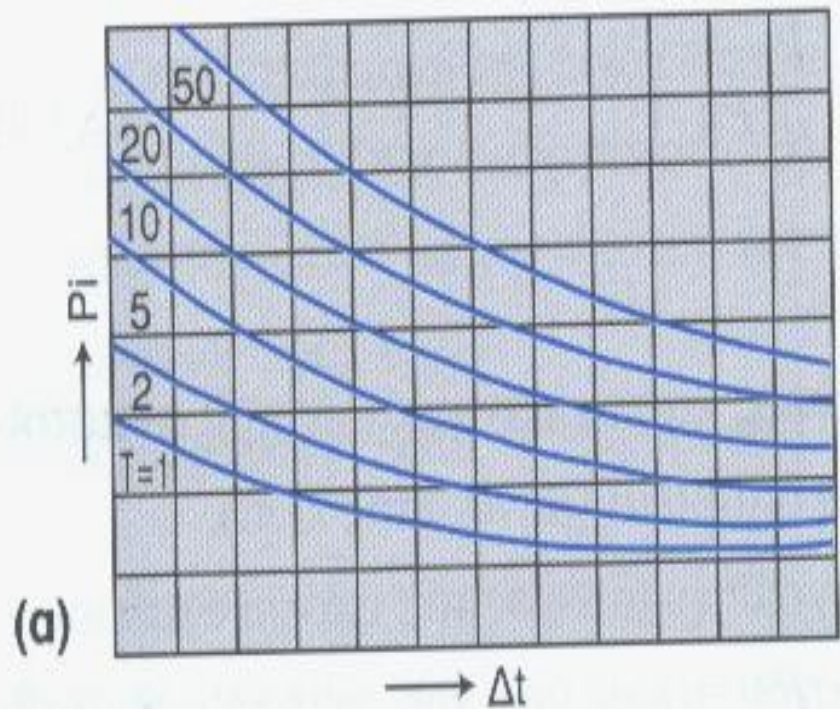
Συχνότητα έντασης, όπου m ο αριθμός εμφάνισης σε n χρόνια.

$$F = \frac{m}{n}$$

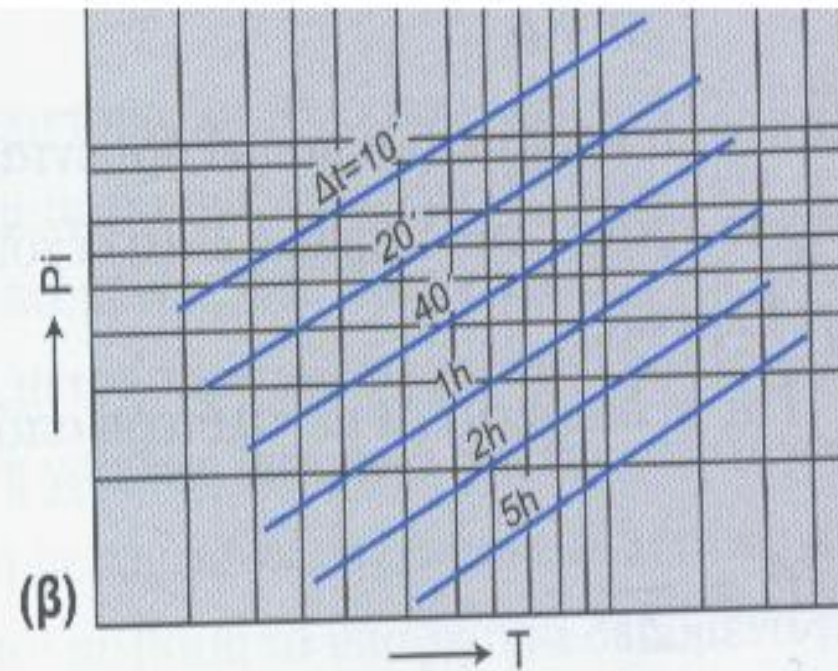
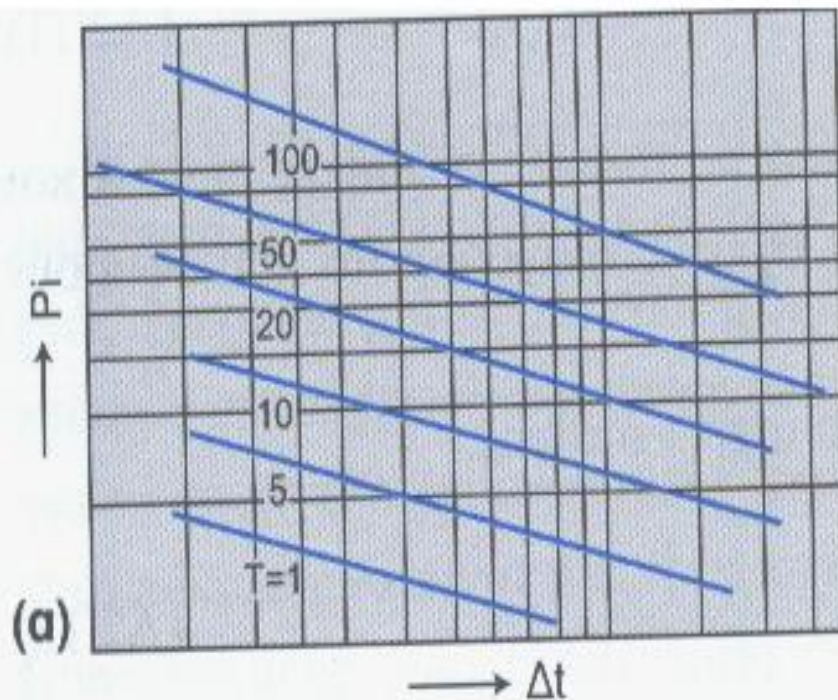
- Περίοδος επανάληψης : $T = \frac{n}{m}$, $P_i = aT^b \cdot \Delta t^{-n}$, όπου a, b, n :

παράμετροι που προσδιορίζονται από τα δεδομένα.

Διαγράμματα $P_i - \Delta t$: α) για μικρή διάρκεια Δt (παραβολική μορφή) και β) για μεγάλη διάρκεια Δt (εκθετική μορφή). T = περίοδος επανάληψης σε έτη



α) Διαγράμματα $P_i - \Delta t$ για διάφορους χρόνους επανάληψης T . β)
Διαγράμματα $P_i - \Delta t$ για διάφορες τιμές του χρόνου αναφοράς Δt (το P_i σε
λογαριθμική κλίμακα)



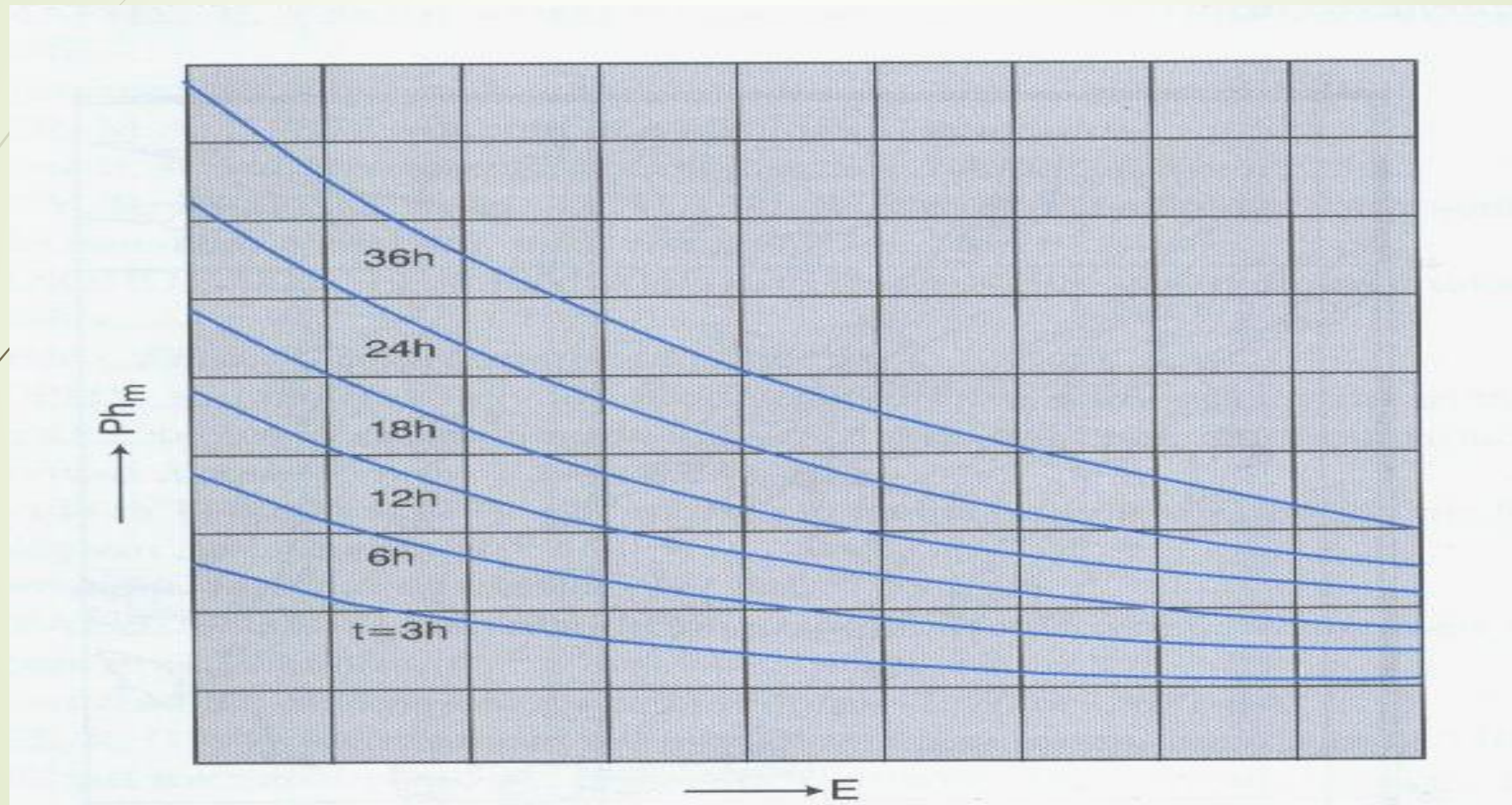
Εντάσεις – Συχνότητες – Περίοδοι Επανάληψης Βροχοπτώσεων – Ποσοτικές Σχέσεις

- • Μία καταιγίδα και γενικά μία βροχόπτωση, πέφτει σε ορισμένη επιφάνεια εδάφους και στο κέντρο της έχει την μέγιστη ένταση σε σχέση με την περιφέρεια και εκεί θα μετρηθεί το μέγιστο ύψος βροχής Ph_m , το οποίο θα μειώνεται όσο απομακρυνόμαστε από το κέντρο προς την περιφέρεια. Ισχύει η σχέση:

$$\frac{\overline{Ph}}{Ph_m} = e^{-kE^n}$$

, όπου $\overline{Ph}$ = το μέσο ύψος νερού στην καταιγίδα
 Ph_m = Το μέγιστο ύψος της καταιγίδας
 E = Η επιφάνεια πάνω στην οποία γίνεται η καταιγίδα
 k, n = σταθερές για μια συγκεκριμένη καταιγίδα

Διαγράμματα $Ph_m - E$ για διάφορες τιμές της διάρκειας βροχόπτωσης t



■ Χάρτης ισοϋετών καμπυλών του ελλαδικού χώρου

ΥΧγ



ΚΑΤΕΙΣΔΥΣΗ

► Ορισμός - Βασικά φαινόμενα

- **Κατείσδυση (Infiltration):** Το μέρος εκείνο των κατακρημνισμάτων που διαπερνά την επιφάνεια του εδάφους, φθάνει στους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες και προστίθεται στο υπόγειο νερό μετέχονατος στους κινήσεις αυτού.
- **Βασικά φαινόμενα κατά την κατείσδυση:**
 - Ένα τμήμα του νερού που διαπερνά την επιφάνεια του εδάφους, θα συμπληρώσει κατ'αρχή το έλλειμμα υγρασίας των στρωμάτων από τα οποία θα περάσει και είναι αυτό που ονομάζουμε «**νερό κατακράτησης**».
 - Ένα άλλο τμήμα του νερού θα περάσει την επιφάνεια του εδάφους και χωρίς να κατακρατηθεί στα στρώματα που έχουν προηγουμένως κορεσθεί από το «**νερό κατακράτησης**» ούτε να φθάσει στη στάθμη των υπόγειων υδροφόρων στρωμάτων, θα κινηθεί σε μία σχετικά μικρή υπόγεια διαδρομή και θα επανεφανισθεί στην επιφάνεια του εδάφους με διάχυτες αναβλήσεις. Έτσι δημιουργείται η λεγόμενη «**υποδερμική ή ενδιάμεση απορροή (intermediate flow)**».
 - Το υπόλοιπο νερό θα κινηθεί προς τα κάτω με τη βοήθεια της βαρύτητας και θα προστεθεί στο νερό των υπόγειων στρωμάτων.

ΚΑΤΕΙΣΔΥΣΗ

- Ολική κατείσδυση (total infiltration) : $I_{ολ}$
- Ενεργή κατείσδυση (effective infiltration) : I
- Έκφραση της κατείσδυσης
 - Όγκος κατείσδυσης I_v (σε m^3)
 - Συντελεστής κατείσδυσης I_σ ως ποσοστό του μετεωρικού νερού των κατακρησμισμάτων P που κατεισδύει.
$$I\sigma = \frac{I}{P} 100$$
 - Ύψος νερού κατείσδυσης (σε mm) που αντιστοιχεί στο πάχος του νερού που κατεισδύει.

ΜΑΘΗΜΑ 3^ο



ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Η ΚΑΤΕΙΣΔΥΣΗ

Ορισμός - Βασικά Φαινόμενα

Εμπλουτισμός υδροφόρων στρωμάτων

Ρυθμιστικοί Παράγοντες του συντελεστή κατείσδυσης

Μέτρηση της κατείσδυσης

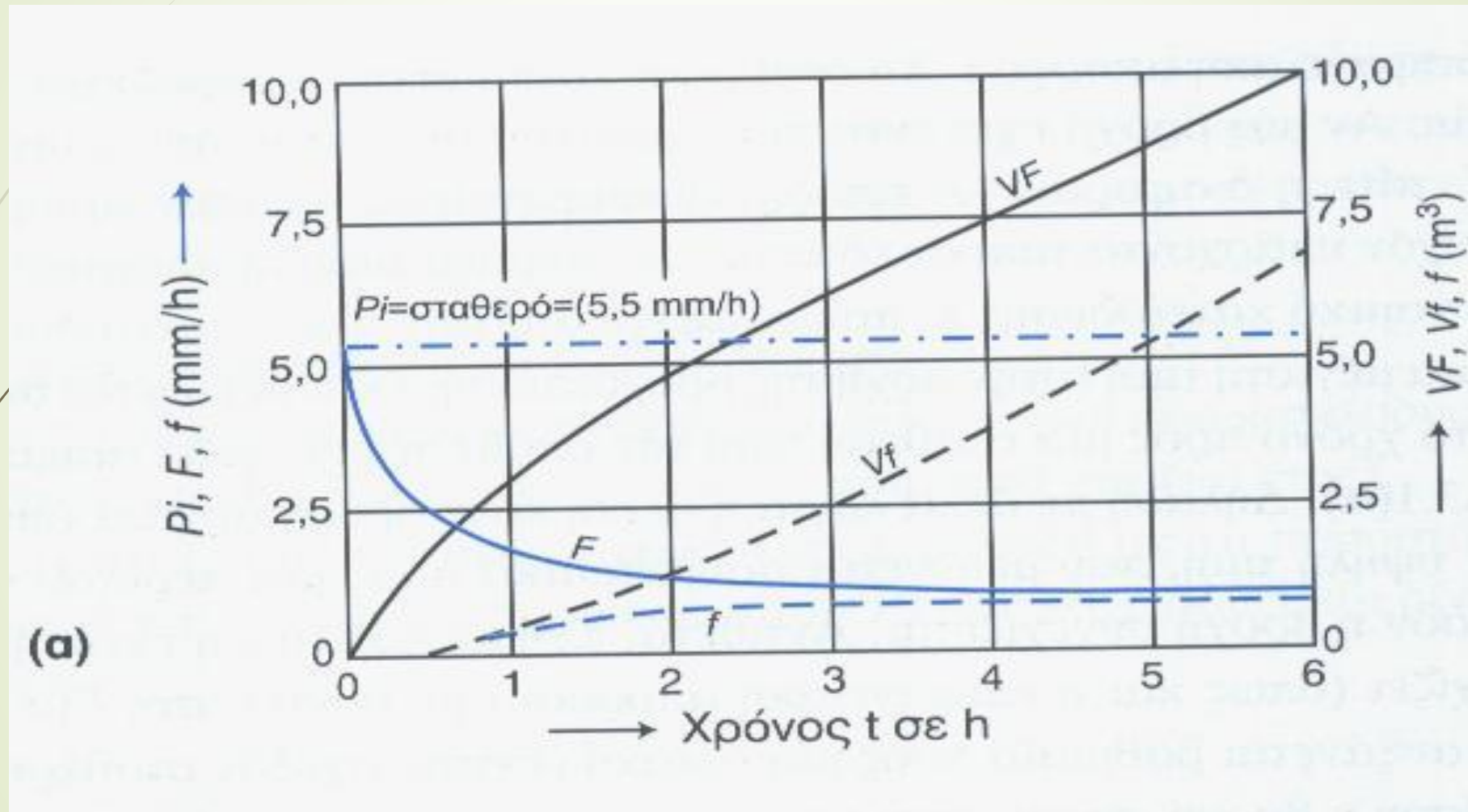
Υπολογισμός του εμπλουτισμού μιας περιοχής ή λεκάνης

Σχέση κατείσδυσης – ύψους ετήσιων κατακρημνισμάτων

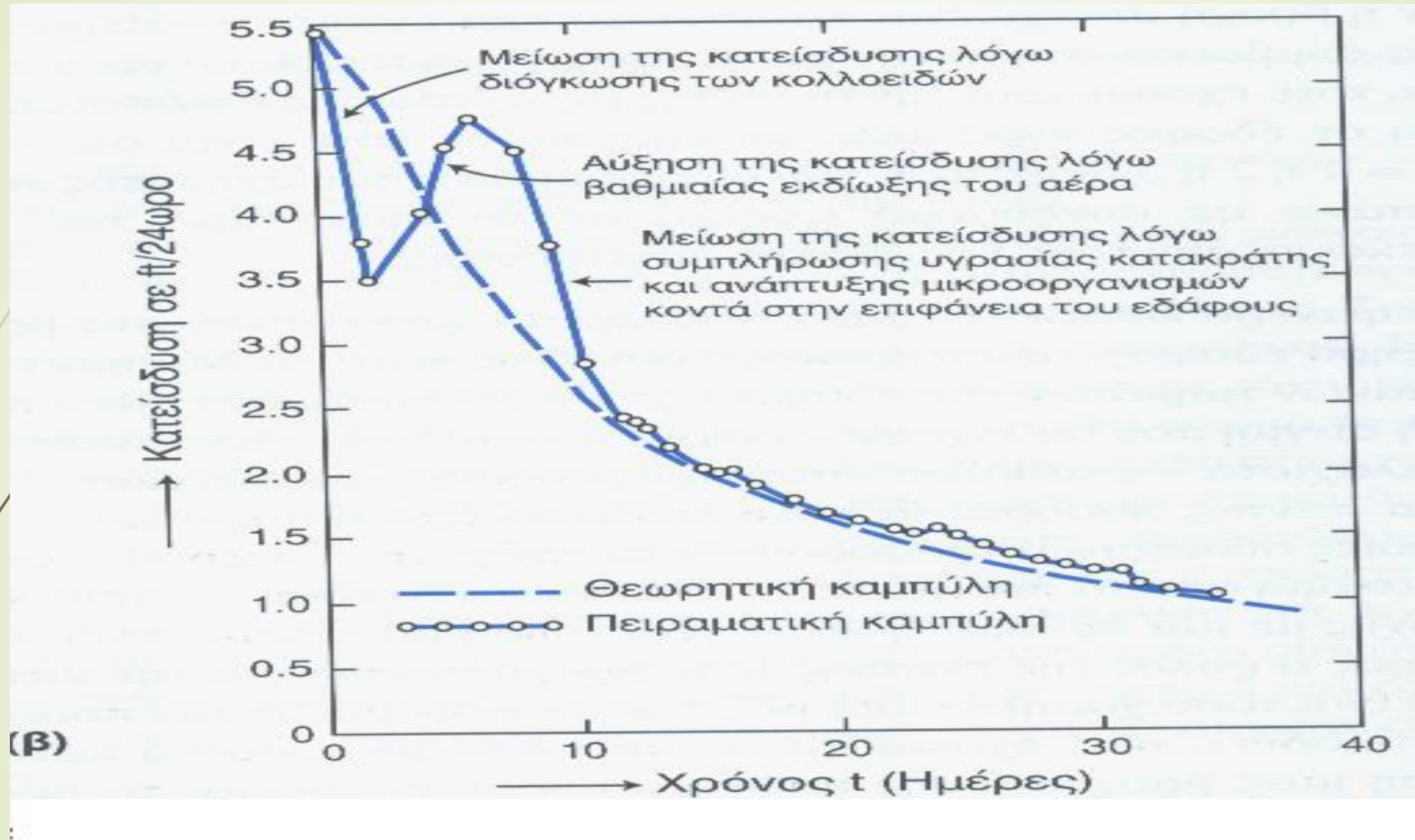
ΚΑΤΕΙΣΔΥΣΗ

- **Κατείσδυση (infiltration):** Διείσδυση του μετεωρικού (ατμοσφαιρικού) νερού των κατακρημνισμάτων επί του εδάφους και στο υπέδαφος, με κύρια συνιστώσα κίνησης (αν όχι αποκλειστική) την *κατακόρυφη*.
- **Διήθηση (percolation ή filtration):** Ροή του υπόγειου νερού, που δεν έχει άμεση μετεωρική προέλευση (δεν προέρχεται κατευθεία από τα κατακρημνίσματα P) και γίνεται μέσα σε κορεσμένο, κατά κανόνα μέσο και η κύρια συνιστώσα της είναι η *οριζόντια*.
- **Δυναμικό (ολικής) κατείσδυσης (capacity of infiltration) F:** Η ικανότητα του εδάφους να «απορροφά» το νερό της βροχής (μετεωρικό νερό). Με άλλα λόγια ο βαθμός με τον οποίο επιδέχεται το έδαφος την κατείσδυση. Αριθμητικά αντιστοιχεί προς τη μέγιστη ένταση της βροχής που μπορεί να απορροφήσει το δεθέν έδαφος χωρίς να επιτρέπει επιφανειακή απορροή.
- Εκφράζεται σε *mm/h ή mm/min*.

Οι Νόμοι της κατείδυσης: Κατείδυση P_i - Δυναμικό Ολικής Κατείδυσης
 F - Δυναμικό ενεργής κατείδυσης f σε mm/h. V_F : Συνολικός όγκος ολικής
κατείδυσης, V_f : Συνολικός όγκος ενεργής κατείδυσης



Οι Νόμοι της κατείδυσης: Θεωρητική και Πειραματική κατείδυση με τον χρόνο



Εμπλουτισμός Υδροφόρων Στρωμάτων

► Τρόποι εμπλουτισμού ή τροφοδοσίας (recharge)

- Ενεργή κατείσδυση από το νερό των κατακρημνισμάτων
- Διήθηση από τις κοίτες των ποταμών και ρεμάτων ή από τον πυθμέν λιμνών ή άλλων επιφανειακών συγκεντρώσεων νερού.
- Πλευρική τροφοδοσία = Μετάγγιση υπόγειου νερού από γειτονικά υδροφόρα στρώματα.
- Τεχνητός εμπλουτισμός: Ανθρωπογενείς τεχνικές διαδικασίες και διευθετήσεις για την αύξηση του υπόγειου νερού.

Ρυθμιστικοί Παράγοντες του Συντελεστή κατείδυσης

Κύριοι Παράγοντες

- Τα ίδια τα κατακρημνίσματα με το συνολικό ετήσιο ύψος τους, την κατανομή τους μέσα στο υδρολογικό έτος και την ένταση των βροχοπτώσεων.
- Η φύση του εδάφους και υπεδάφους που υπεισέρχεται με το «δυναμικό κατείδυσης» το οποίο ρυθμίζεται από την περατότητα τους, το πορώδες τους, την λιθολογική τους σύσταση και γεωλογική δομή.

Δευτερεύοντες Παράγοντες

- Κλίση του εδάφους
- Βλάστηση
- Θερμοκρασία, άνεμος και άλλοι κλιματικοί παράγοντες που ρυθμίζουν την εξατμισιδιαπνοή.
- Επεμβάσεις του ανθρώπου: άροση-καλλιέργεια εδαφών, πάκτωση εδαφών από διέλευση μηχανημάτων, δημιουργία μεγαλουπόλεων, οδικού δικτύου, τεχνιτών τάφρων, φραγμάτων, λιμνών, πρόκληση πυρκαγιών κλπ.

Ο Συντελεστής ενεργής κατείδυσης για συνήθεις γεωλογικούς σχηματισμούς

Περιοχές	Συντελεστής ενεργής κατείδυσης (%)
Ασβεστολιθικές - καρστικές	25-60
Προσχωσιγενείς	10-20
Οφιολιθικές	4-8
Φλύσχης – μάργες – σχιστόλιθοι – φυλλίτες - παρόμοια	3-7
Γρανίτες	5-12
Μολάσσεις – ψαμμίτες – παρόμοιοι σχηματισμοί	15-25
Ηφαιστειακά πετρώματα	3-8
Πρασινόλιθοι – γνεύσιοι – μαρμαρυγιακοί σχιστόλιθοι – παρεμφεροί μεταμορφωμένοι σχηματισμοί	3-7

Μέτρηση Κατείδυσης

Τρόποι μέτρησης της ενεργής κατείδυσης

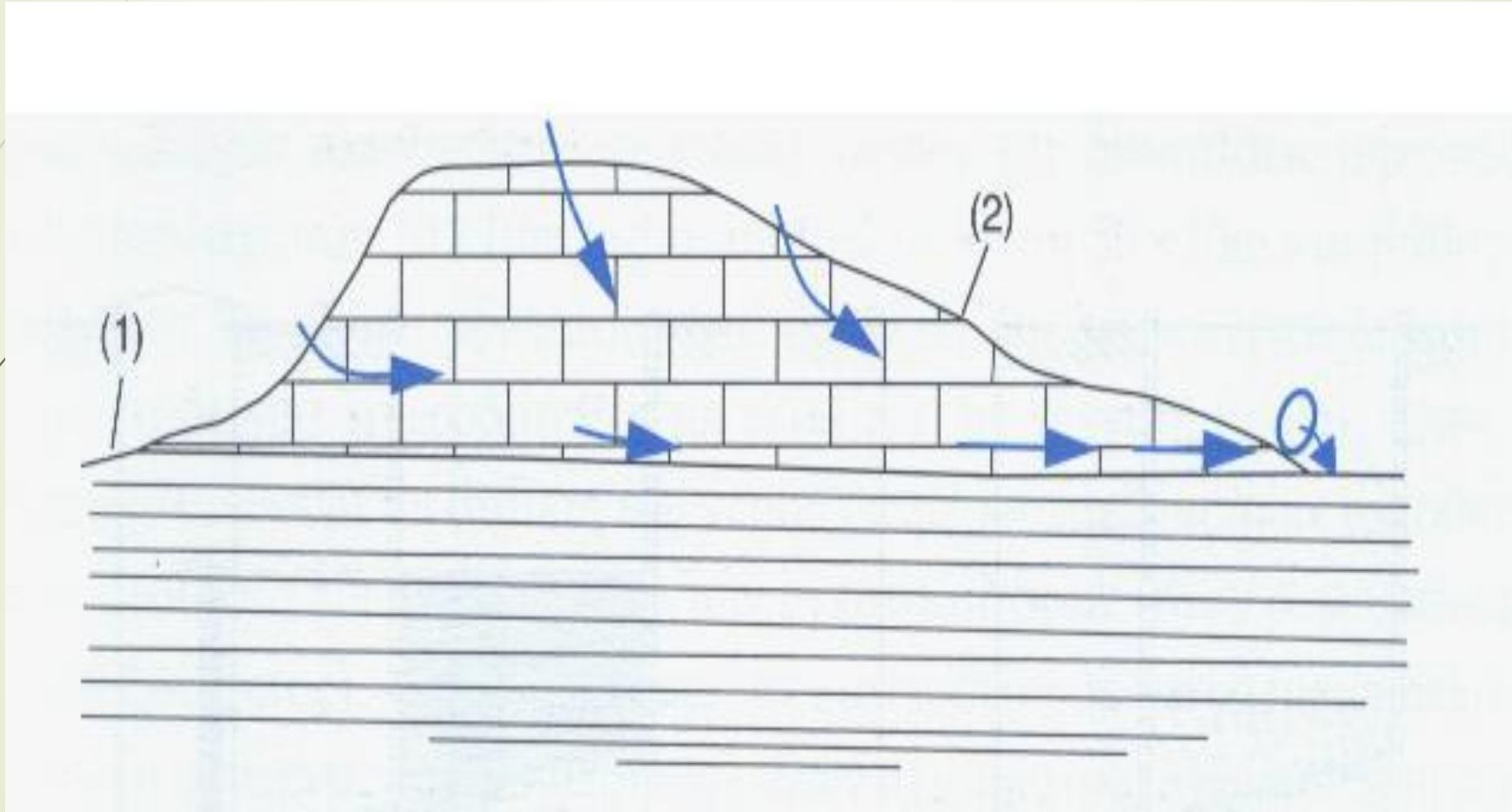
- Παρακολούθηση της παροχής των πηγών καθ' όλη τη διάρκεια του υδρολογικού έτους. Ο ολικός όγκος της ετήσιας παροχής αντιστοιχείται προς την ολική ποσότητα νερού των κατακρημνισμάτων που κατείδυσε στη ζώνη τροφοδοσίας της πηγής.

Εάν V_p είναι ο όγκος των κατακρημνισμάτων και V_1 η ολική ετήσια παροχή της πηγής τότε ο **συντελεστής ενεργής κατείδυσης I_σ** είναι:

$$I_\sigma = \frac{V_1}{V_p}$$

Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται κυρίως σε καρστικές περιοχές

Παράδειγμα μιας πηγής που τροφοδοτείται από ορισμένη περιοχή.
(1) Αδιαπέρατος σχηματισμός (2) Περαιτός σχηματισμός



Μέτρηση Κατείδυσης

- Χρήση ειδικών συσκευών ή εγκαταστάσεων – λυσιμέτρων

Λυσίμετρα : Χρησιμοποιούνται κυρίως σε προσχωσιγενείς λεκάνες. Μετρούν άμεσα την κατείδυση και έμμεσα την εξατμισιδιαπνοή. Συνοδεύονται από βροχόμετρα ή βροχογράφους. Η εγκατάσταση ενός λυσιμέτρου πρέπει να γίνεται με πολύ προσοχή ώστε να απομονώνει ένα τμήμα του εδάφους χωρίς αξιοσημείωτη διατάραξή του, σε βάθος 1-3 m.

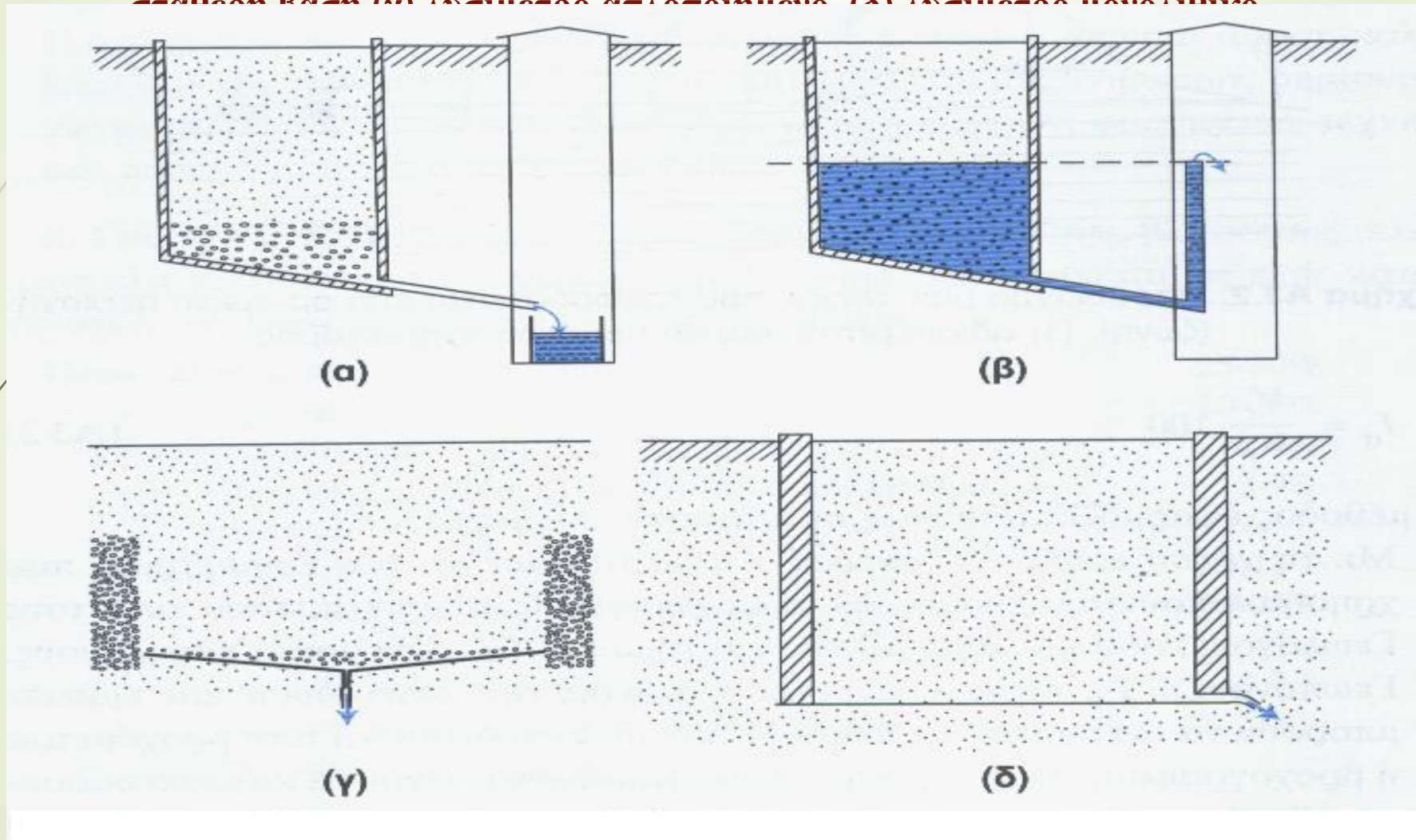
Μειονεκτήματα των λυσιμέτρων:

- Το «δείγμα» του εδάφους που χρησιμοποιείται είναι κατ' ανάγκη μικρό και ίσως όχι αντιπροσωπευτικό για το σύνολο του εξεταζόμενου εδάφους.
- Διατάραξη της φυσικής κατάστασης του εδάφους, παρά την όποια προσεκτική τοποθέτηση ενός λυσιμέτρου, με τα ανάλογα δυσμενή αποτελέσματα στις μετρήσεις τα οποία πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη.

Τύποι λυσιμέτρων

(α) Λυσίμετρο ολικής αποστράγγισης (με στρώμα χαλικιών στην βάση) , (β) λυσίμετρο με

επαρκή βάση (γ) λυσίμετρο από σπειρώμενο (δ) λυσίμετρο με κλιθόνες



Μέτρηση Κατείσδυσης

- **Πειραματική μέθοδος**

Δημιουργούνται ειδικές εγκαταστάσεις στο εργαστήριο υπό συνθήκες παρόμοιες των φυσικών ή άλλων που ο ερευνητής θέλει να αναπαράγει. Το δείγμα (συνήθως τοποθετείται σε ειδικό κάδο διαστάσεων 20X20 m ή 30X30m) τροφοδοτείται νερό π.χ. με τεχνητή βροχή και παρακολουθείται η στάθμη του νερού διαμέσου πιεζομέτρων που τοποθετούνται στο έδαφος-δείγμα, είτε συλλέγουμε το κατεισδύον σε υποκείμενο δείγμα. Διαδικασία δαπανηρή.

- **Κατ' εκτίμηση**

Χρησιμοποιείται για εύρεση μόνο της τάξης μεγέθους, λαμβάνοντας υπόψη ιδιαίτερα τη λιθολογική σύσταση της λεκάνης και το ύψος των κατακρημνισμάτων.

- **Έμμεσα από την εξίσωση : $P = I + R + E$**

Μέτρηση Κατείσδυσης

- Η λιθολογική σύσταση μιας υδρολογικής λεκάνης είναι κατά το πλείστον ανομοιογενής και κάθε πετρολογικός σχηματισμός έχει διαφορετικό και ιδιαίτερο συντελεστή κατείσδυσης. Η έκφραση ενός *ενιαίου υδρολογικού ισοζυγίου* μιας λεκάνης επιβάλλει ένα **ενιαίο συντελεστή κατείσδυσης**, ο οποίος αντανακλά κατά τον ένα ή άλλο τρόπο τον ίδιο όγκο κατείσδυσης για όλη την υπό εξέταση λεκάνη:

$$I = \frac{I_1E_1 + I_2E_2 + \dots + I_nE_n}{E_{ολ}}$$

I = Ενιαίος Συντελεστής κατείσδυσης

I₁...I_n = Μερικοί Συντελεστές κατείσδυσης

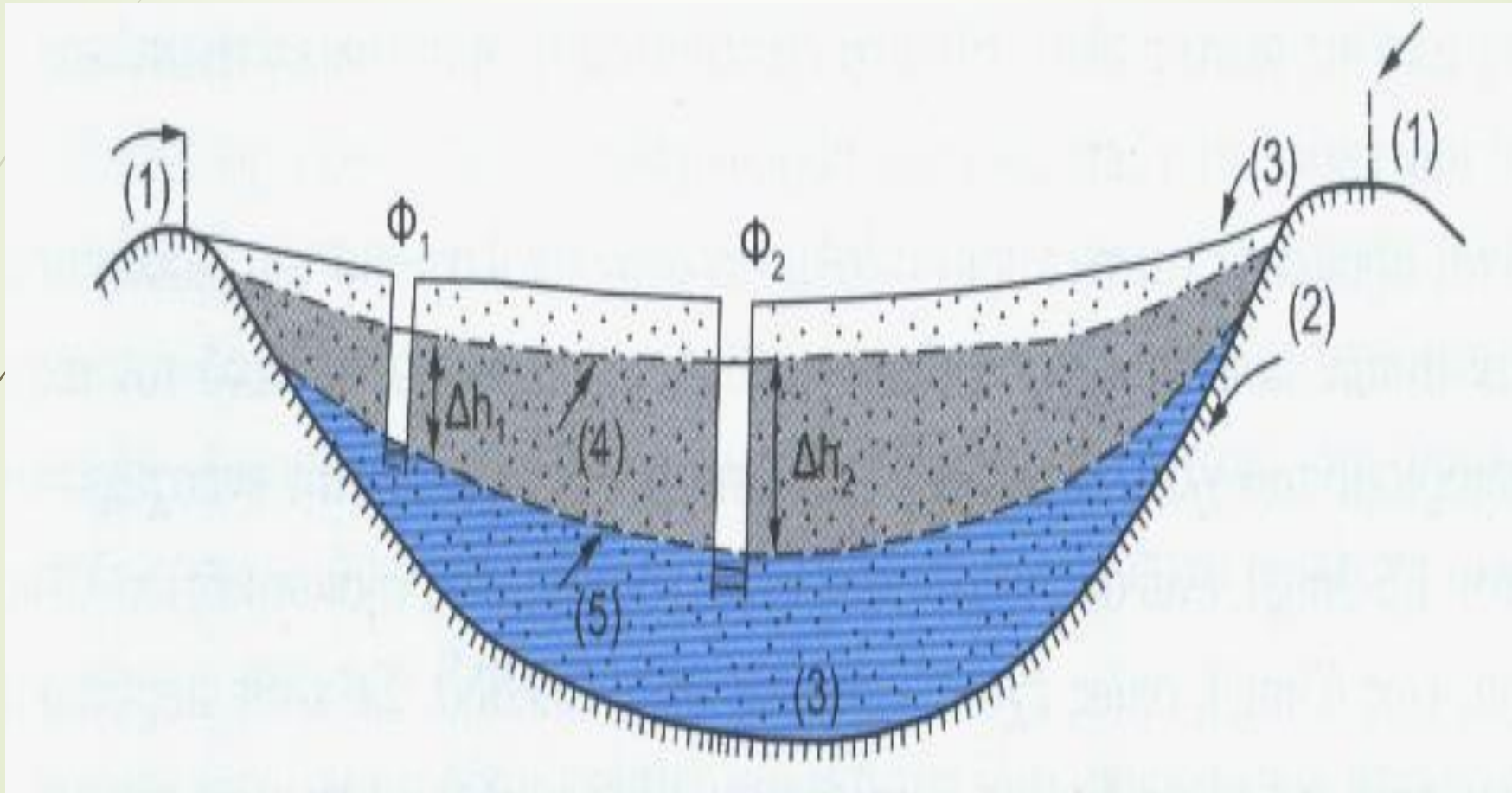
E₁...E_n = Επιφάνειες εμφάνισης των
πετρολογικών σχηματισμών

E_{ολ} = Ολική επιφάνεια της υπό
εξέτασης περιοχής

Υπολογισμός του εμπλουτισμού μιας περιοχής ή λεκάνης

- Ο εμπλουτισμός των υπόγειων υδροφόρων στρωμάτων γίνεται κατά το κύριο μέρος του από την κατείδυση. Σε άλλες, μεγαλύτερες συνήθως λεκάνες, γίνεται με άλλους τρόπους, όπως από τα επιφανειακά νερά.
- Δεν υπάρχει τρόπος άμεσης μέτρησης του εμπλουτισμού, αλλά αυτός γίνεται προσεγγιστικά.
- Μέθοδος παρακολούθησης της διακύμανσης της πιεζομετρικής στάθμης σε μία ομοιογενή κυρίως υδρογεωλογική λεκάνη. Η παρακολούθηση γίνεται σε συνάρτηση με τη γνώση του πορώδους σχηματισμού.

Διακύμανση στάθμης με την αποθήκευση νερού κατείσδυσης. (1) Όριο λεκάνης, (2) Αδιαπέρατο υπόβαρο, (3) Υδροφορέας, (4) Ανώτερη, (5) κατώτερη στάθμη που παρατηρούνται μέσα σε ένα υδρολογικό έτος, (Δh_1), (Δh_2) μέγιστη διακύμανση της στάθμης που παρατηρείται στα φρέατα Φ_1 και Φ_2 .



Υπολογισμός του εμπλουτισμού μιας περιοχής ή λεκάνης

■ Μέθοδος ισοζυγίου μάζας χλωριόντων

Με βάση την παραδοχή ότι το χλώριο του υπόγειου νερού προέρχεται από το χλώριο του νερού της βροχής (το οποίο με τη σειρά του προέρχεται κατά βάση από το θαλασσινό νερό) έχει αναπτυχθεί η μεθοδολογία υπολογισμού της τροφοδοσίας του νερού των υδροφορέων στηριζόμενη στο ισοζύγιο της μάζας των χλωριόντων.

Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή το ισοζύγιο των χλωριόντων εκφράζεται από την εξίσωση:

$$P(\text{Cl})_p = E(\text{Cl})_e + I(\text{Cl})_i + R(\text{Cl})_r$$

Όπου $(\text{Cl})_p$, $(\text{Cl})_e$, $(\text{Cl})_i$, $(\text{Cl})_r$, η περιεκτικότητα σε χλώριο του νερού της βροχής, του νερού της εξατμισιδιαπνοής, του νερού της κατείσδυσης (του υπόγειου βασικά) και του νερού της απορροής αντίστοιχα.

Υπολογισμός του εμπλουτισμού μιας περιοχής ή λεκάνης

- Η ποσότητα του χλωρίου στο νερό της εξατμισιδιαπνοής θεωρείται αμελητέα και επομένως η προηγούμενη εξίσωση γίνεται:
- $P(Cl)_p = I(Cl)_i + R(Cl)_r$ Λύνουμε στη συνέχεια ως προς τον εμπλουτισμό I :

$$I = \frac{P(Cl)p + R(Cl)r}{(Cl)i}$$

- Επισημαίνεται ότι το I δεν αντιστοιχεί μόνο στην άμεση κατείδυση, αλλά και σε κάθε τροφοδοσία του υπόγειου νερού, όπως πλευρική τροφοδοσία κλπ.
- *Ως εμπλουτισμό εννοούμε την συνολική ανανέωση του νερού των εκάστοτε εξεταζόμενων υδροφορέων.*
- Τα χλωριόντα του νερού της βροχής στην ενδοχώρα έχουν μετρηθεί ότι κυμαίνονται μεταξύ 1,5-3 mg/l ενώ στις παράκτιες και νησιωτικές περιοχές οι τιμές είναι πολύ υψηλότερες, έως 63 mg/l.

Υπολογισμός του εμπλουτισμού μιας περιοχής ή λεκάνης

■ Μέθοδος ισοτόπων

Η μέθοδος αυτή είναι ανάλογη με τη μέθοδο της μάζας των χλωριόντων, διότι μετρούνται εργαστηριακά τα ισότοπα O^{18} ή H^3 του νερού της βροχής και του υπόγειου νερού.

■ Μέθοδος υδρογεωλογικών μοντέλων

Υπάρχουν πολλά ανάλογα μοντέλα να επιλέξουμε όπως το Modbil, MERO, SIMERO, BEMER κ.α.

Για την εφαρμογή αυτών των μοντέλων απαιτείται εκτός των κατακρημνισμάτων και της θερμοκρασίας σε ημερήσια ή σε μηνιαία βάση:

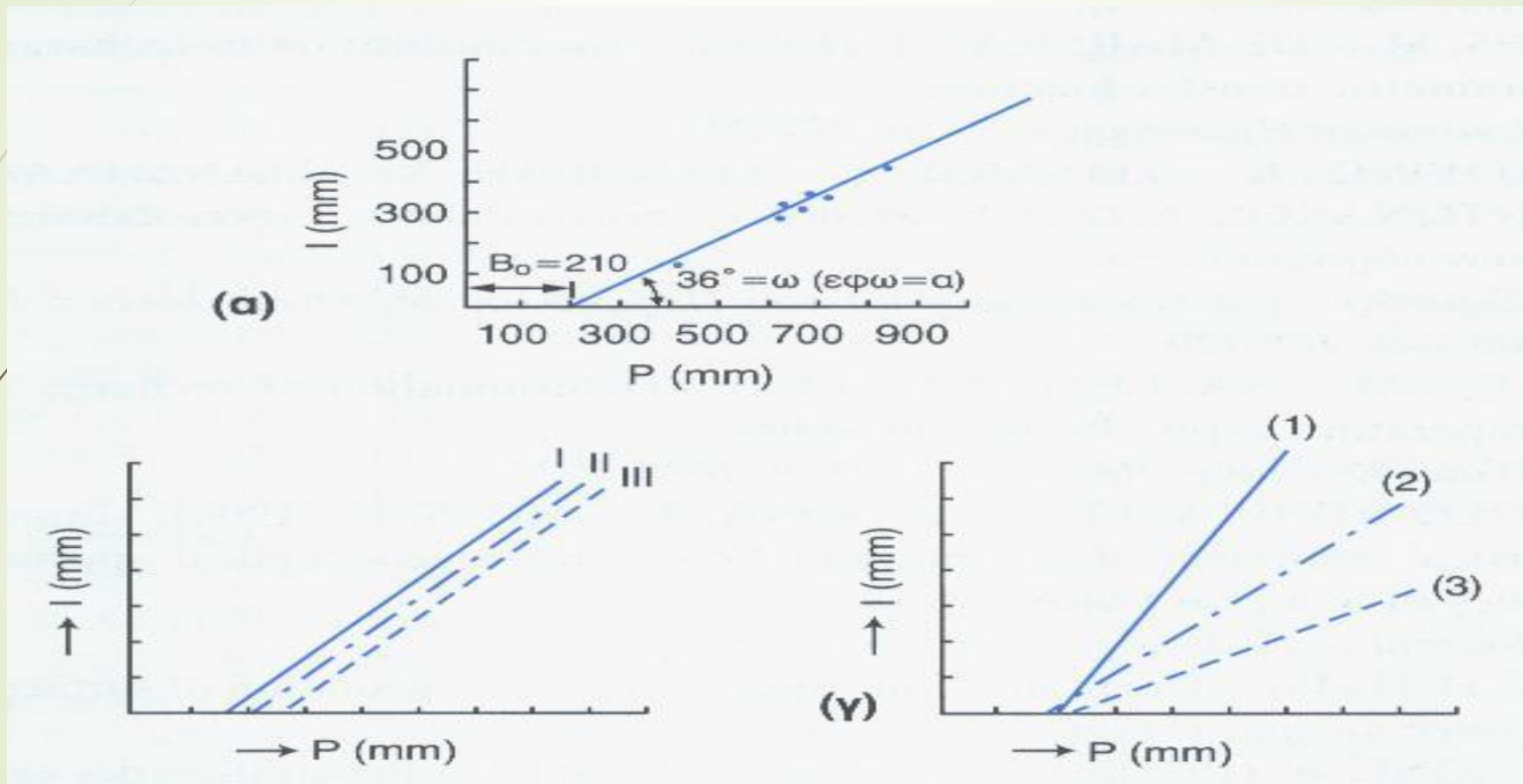
- ✓ Το πάχος, η λιθολογική σύσταση, η περατότητα της μη κορεσμένης ζώνης.
- ✓ Το πάχος και το είδος του εδάφους.
- ✓ Η βλάστηση.

Σχέση κατείσδυσης – Ύψους ετήσιων κατακρημνισμάτων

- Από τις μετρήσεις των λυσιμέτρων κυρίως προκύπτει η γραμμική σχέση: $I = aP - \beta$
- I (σε mm): Κατείσδυση, P (σε mm): Κατακρημνίσματα
- a : Συντελεστής κατεύθυνσης: Εκφράζει την αύξηση της κατείσδυσης ανά μονάδα αύξησης της βροχόπτωσης
- β : Σταθερά: Αντιστοιχεί στο I για $P=0$ (αρνητική τιμή στο I).
- β_0 : Αντιστοιχεί στην θεωρητική οριακή τιμή των P κάτω από τη οποία δεν έχουμε κατείσδυση. Επομένως:
- Το β_0 είναι η τιμή των P που αντιστοιχεί σε $P=0$.

Διαγράμματα κατείσδυσης I – κατακρημνισμάτων P

(α) Φυσικό έδαφος στη θέση του, (β) Τρία λιθολογικά όμοια δείγματα σε τρεις διαφορετικές λεκάνες, (γ) Τρία διαφορετικά λιθολογικά δείγματα στην ίδια λεκάνη.



ΜΑΘΗΜΑ 4^ο



ΕΞΑΤΜΙΣΙΔΙΑΠΝΟΗ

Ορισμός - Βασικά Φαινόμενα

Εξατμισιδιαπνοή Ε (Evaporotranspiration): Το μέρος εκείνο των κατακρημνισμάτων που επανέρχεται στην ατμόσφαιρα είτε από εξάτμιση από την επιφάνεια του εδάφους (από τα πρώτα στρώματά του, από τις ελεύθερες επιφάνειες νερού, από το νερό που υπό μορφή υμενίου περικαλύπτει τα φυτά κατά την βροχή), είτε από την διαπνοή των φυτών.

Η Εξατμισιδιαπνοή μεταφέρει ποσότητες νερού από την επιφάνεια της Γης στην ατμόσφαιρα και προκαλεί την μεταβολή της κατάστασης του νερού από υγρή σε αέρια. Αποτέλεσμα αυτής της ανακύκλωσης των φάσεων του νερού συνεπάγεται **αφαίρεση ενέργειας**, ως θερμότητα (λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης, που μεταφέρεται στην ατμόσφαιρα όπου και **αποδίδεται** με την επαναϋδροποίηση).



ΕΞΑΤΜΙΣΙΔΙΑΠΝΟΗ

Αποτελεί ένα **μηχανισμό αντίδρασης της επιφάνειας της Γης στην υπερθέρμανσή της:**

Μεταφορά θερμότητας προς την ατμόσφαιρα προς αποφυγή υπερβολικής θέρμανσης της επιφάνειας της Γης και υπερβολικής ψύξης της ατμόσφαιρας.

***ΘΕΜΕΛΙΩΔΗΣ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΓΙΑ ΤΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ
ΤΟΥ ΠΛΑΝΗΤΗ***

ΕΞΑΤΜΙΣΙΔΙΑΠΝΟΗ

ΕΞΑΜΤΙΣΙΔΙΑΠΝΟΗ - ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ

ΘΕΜΕΛΙΩΔΗΣ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΓΙΑ ΤΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ ΤΟΥ ΠΛΑΝΗΤΗ

ΕΞΑΤΜΙΣΗ (EVAPORATION)

Η εξάτμιση στη φύση γίνεται από:

- ✓ την επιφάνεια του εδάφους και των πετρωμάτων
- ✓ την ελεύθερη επιφάνεια του νερού
- ✓ τα επιπόλεια στρώματα του εδάφους και υπεδάφους



ΕΞΑΤΜΙΣΙΔΙΑΠΝΟΗ

ΔΙΑΠΝΟΗ (TRANSPIRATION)

Γίνεται από τα φυτά. Αποδίδει και επαναφέρει στην ατμόσφαιρα πολύ μεγάλες ποσότητες υδρατμών. Σημαντικός ο ρόλος της στο υδρολογικό ισοζύγιο.

Όπως για την εξάτμιση έτσι και για την διαπνοή, βαθμιαία μείωση της προσφοράς νερού προκαλεί βαθμιαία μείωση της διαπνοής μέχρι του μηδενισμού της.

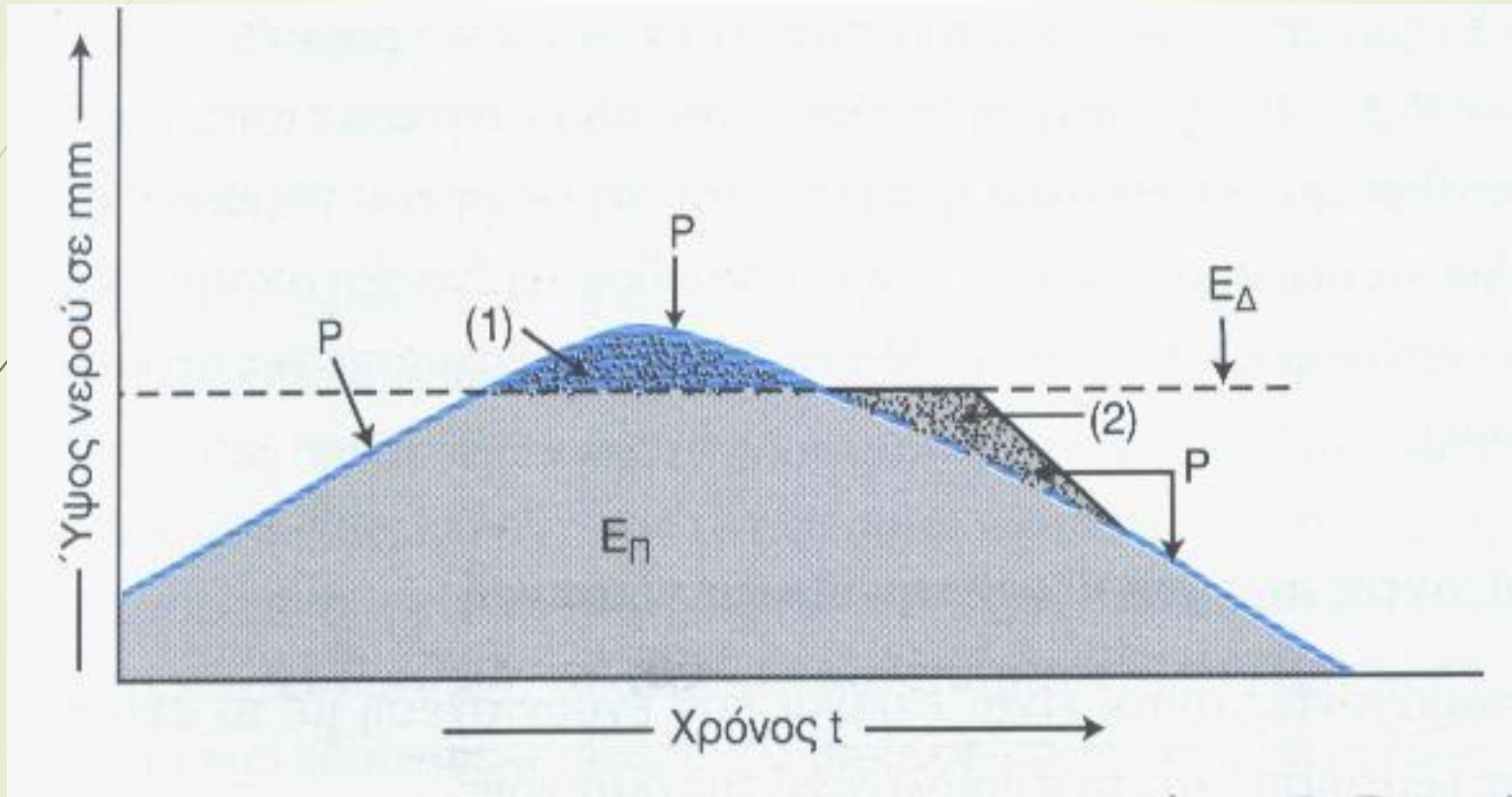
ΕΞΑΤΜΙΣΙΔΙΑΠΝΟΗ

- Στη φύση μπορούμε να διακρίνουμε δύο καταστάσεις:
 - Προσφορά νερού από την επιφάνεια του εδάφους και το υπέδαφος, τέτοια που να μπορεί τουλάχιστον να αντισταθμίζει συνεχώς την εξατμισιδιαπνοή, η οποία να λάβει την μέγιστη δυνατή τιμή της για τις επικρατούσες κλιματικές συνθήκες. Η οριακή τιμή που μπορεί να φθάσει η εξατμισιδιαπνοή είναι η **Δυνητική Εξατμισιδιοαπνοή E_A (evaporotranspiration potential)**. Η εκφράζει ουσιαστικά *θερμοκρασιακές συνθήκες και αποτελεί θερμοκρασιακό δείκτη.*

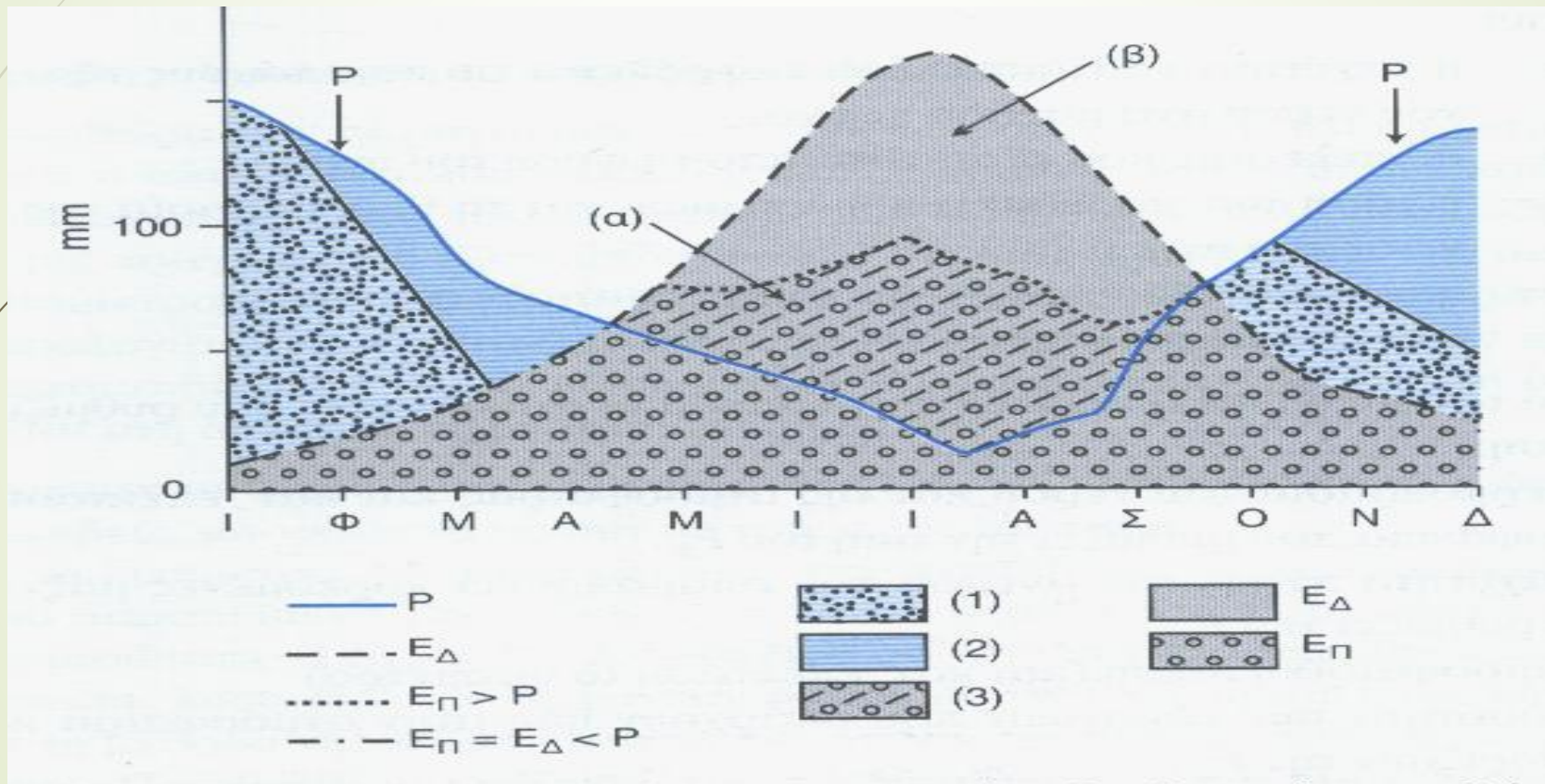
ΕΞΑΤΜΙΣΙΔΙΑΠΝΟΗ

- Η πραγματικά υπάρχουσα κατάσταση όπου έχουμε εναλλαγή μεταξύ περιόδων με προσφορά νερού σε ποσότητα που να αντισταθμίζει ή και να υπερκαλύπτει την εξατμισιδιαπνοή και περιόδων με έλλειψη πλήρους προσφοράς νερού. Στα μεσογειακά κλίματα, αλλά και στο σύνολο σχεδόν των άλλων πλην πολικών κλιμάτων, οι συνθήκες δυνητικής εξατμισιδιαπνοής παρατηρούνται μόνο για περιορισμένα χρονικά διαστήματα. Στην περίπτωση αυτή η πραγματοποιούμενη εξατμισιδιαπνοή ή **πραγματική εξατμισιδιαπνοή E_{Π} (evaporotranspiration real)**. Αποτελεί το πραγματικό μέγεθος εξατμισιδιαπνοής και είναι αυτό που ενδιαφέρει στη μελέτη του υδρολογικού ισοζυγίου.

Σχέσεις μεταξύ των P , E_{Δ} και E_{Π} για ένα διάστημα κατά το οποίο $E_{\Delta} =$ σταθερό. (1) Περίοδος με «περίσσεια νερού» που απορρέει, κατεισδύει ή αποθηκεύεται στα επιφανειακά τμήματα για να εξατμισθεί κατά την διάρκεια (2) δηλαδή σε περίοδο με «έλλειψη νερού».



Διακύμανση μερικών υδρολογικών μεγεθών κατά τη διάρκεια του υδρολογικού έτους. (1) Συμπλήρωση εδαφικής υγρασίας, (2) Περίσσεια νερού Q (=αποροή, κατείσδυση), (3) εξάτμιση εδαφικής υγρασίας (εδαφικής αποθήκευσης), (α) Εξάτμιση εδαφικής υγρασίας που αποθηκεύθηκε σε προηγούμενο χρόνο, (β) Πραγματική έλλειψη υγρασίας (Διαφορά $E_{\Delta} - E_{\Pi}$).



ΕΞΑΤΜΙΣΙΔΙΑΠΝΟΗ

ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟ ΕΤΟΣ

Για τις κλιματολογικές συνθήκες της Ελλάδας

Αρχή υδρολογικού έτους

1^η Οκτωβρίου

Έναρξη αποθήκευσης υγρασίας στο υπέδαφος

Είτε

Αρχή υδρολογικού έτους

1^η Μαΐου

Έναρξη εξάτμισης της υγρασίας του υπεδάφους

Ρυθμιστικοί Παράγοντες της Εξατμισιοδιαπνοής

➤ Έχουν σχέση με το φυσικό φαινόμενο της εξάτμισης και το φυσιολογικό της διαπνοής.

■ **ΕΞΑΤΜΙΣΗ** : Εξίσωση της Εξάτμισης : **Νόμος του Dalton**

$$V = a \frac{(F_k - F_a)}{H}$$

Όπου :

V = η ταχύτητα εξάτμισης που εκφράζεται σε mm πάχους εξατμιζόμενου νερού ανά μονάδα χρόνου

a = συντελεστής που εξαρτάται από τη φύση του υγρού

F_k = η τάση των κορεσμένων υδρατμών για τη θερμοκρασία της επιφάνειας του υγρού

F_a = η πραγματικά υπάρχουσα τάση υδρατμών στον αέρα

H = Η ατμοσφαιρική πίεση

Ρυθμιστικοί Παράγοντες της Εξατμισιδιαπνοής

- Σύμφωνα με το Νόμο του Dalton οι παράγοντες που ρυθμίζουν την εξάτμιση είναι:
 - η θερμοκρασία του νερού και της ατμόσφαιρας και κατ' επέκταση η ηλιοφάνεια που ρυθμίζει την τιμή του F_k
 - η ταχύτητα πνοής του ανέμου που απομακρύνει κορεσμένες μάζες αέρα και ρυθμίζει την F_a
 - η ατμοσφαιρική πίεση (και άρα το υψόμετρο)
 - η ποσότητα των υδρατμών που ήδη υπάρχουν στη ατμόσφαιρα και που καθορίζουν την F_a

Ρυθμιστικοί Παράγοντες της Εξατμισιοδιαπνοής

- η χημική ποιότητα του νερού (διαλυμένες ουσίες κλπ) που ρυθμίζουν το a
- η ιδιομορφία του εδάφους (βλάστηση, λιθολογία, πορώδες) που δημιουργεί τις επιφάνειες εξάτμισης

Αυτοί οι ρυθμιστικοί παράγοντες αφορούν την πραγματική εξάτμιση και πρέπει να συνδεθούν με τα κατακρημνίσματα που την επηρεάζουν άμεσα τόσο με την ποσότητά τους όσο με την κατανομή τους στο χρόνο.

Ρυθμιστικοί Παράγοντες της Εξατμισιοδιαπνοής

■ ΔΙΑΠΝΟΗ

Οι παράγοντες που ρυθμίζουν την διαπνοή είναι:

- Η εξατμιστική δυνατότητα της ατμόσφαιρας, που εκφράζεται με τους τέσσερις πρώτους παράγοντες που αναφέρονται για την διαδικασία της εξάτμισης (θερμοκρασία, ταχύτητα πνοής του ανέμου, ατμοσφαιρική πίεση, ποσότητα των υδρατμών που ήδη υπάρχουν στη ατμόσφαιρα)
- οι κλιματολογικοί εκείνοι παράγοντες που δρουν πάνω στη ζωή και τη φυσιολογία των φυτών (π.χ. άνοιγμα των στοματίων, φύλων κλπ)
- η υγρασία του εδάφους



Ρυθμιστικοί Παράγοντες της Εξατμισιοδιαπνοής

- η πυκνότητα, η ένταση, το είδος της βλάστης και η ηλικία των φυτών, παράγοντες ιδιαίτερα σημαντικοί
- η βιολογική κατάσταση της βλάστησης (ιδίως για τα φυλλοβόλα φυτά).

Θεμελιώδης είναι και εδώ ο ρόλος των κατακρημνισμάτων για την πραγματική διαπνοή που υπεισέρχονται επίσης με την ποσότητά τους και την κατανομή στον χρόνο.

Μέτρηση – Υπολογισμός της εξατμισιδιαπνοής

- Η πληθώρα των παραγόντων που επιδρούν στην πραγματική εξατμισιδιαπνοή και ο πολύπλοκος τρόπος με τον οποίο καθένας από αυτούς επιδρά στο τελικό αποτέλεσμα, καθιστούν πολύ δύσκολη τη μέτρηση της πραγματικής εξατμισιδιαπνοής.
- Άμεσες μετρήσεις της πραγματικής εξατμισιδιαπνοής, είναι πάντως όχι συνήθως ακριβείς.
 - Με τα λυσίμετρα. μετράμε τα κατακρημνίσματα. Επίσης όμως και την εξατμισιδιαπνοή:
 $E_{\Pi} = P - I$, δοθέντος ότι η απορροή συνήθως είναι μικρή έως αμελητέα.
 - Με τη μέθοδο της «διακύμανσης της κατακόρυφης διαβάθμισης του υδρατμού». Πρόκειται για μία μέθοδο αρκετά περίπλοκη και δαπανηρή, που απαιτεί ευαίσθητες και μακροχρόνιες μετρήσεις. Η εξατμισιδιαπνοή δεν μετριέται άμεσα αλλά υπολογίζεται έμμεσα.

Μέτρηση – Υπολογισμός της εξατμισιδιαπνοής

- Με μεγάλες και δαπανηρές πειραματικές εγκαταστάσεις, για καθαρά πειράματα και ερευνητικά προγράμματα.
- Έμμεσες μετρήσεις: Υπολογισμός της εξατμισιδιαπνοής βάσει της σχέσης: $P = I + R + E$,
όταν είναι γνωστοί όλοι οι άλλοι παράγοντες.

Υπολογισμός της εξατμισιδιαπνοής από εμπειρικούς τύπους

- Η εξατμισιδιαπνοή είναι ο πλέον δύσκολα μετρήσιμος παράγοντας του υδρολογικού ισοζυγίου, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για την E_{Π} .

- **Δυνητική Εξατμισιδιαπνοή, E_{Δ}**

Τύπος του C. Thornthwaite (1948)

$$E_{\Delta} = 16 \left(10 \frac{T}{I} \right)^a$$

όπου:

- E_{Δ} = η μηνιαία δυνητική εξατμισιδιαπνοή σε mm
- T = η μέση μηνιαία τιμή θερμοκρασίας αέρος για τον υπόψη μήνα σε °C
- $a = 0,49239 + 1792 \cdot 10^{-5} \cdot I - 771 \cdot I^2 + 675 \cdot 10^{-9} \cdot I^3$

I = ο ετήσιο θερμικός δείκτης που δίδεται από τον τύπο:

$$I = \sum_{i=1}^{12} i$$

Όπου i ο μηνιαίος θερμικός δείκτης

$$i = \left(\frac{T}{5} \right)^{1,514}$$

Υπολογισμός της εξατμισιδιαπνοής από εμπειρικούς τύπους

- Ο τύπος του **Thornthwaite** εισάγει πολλούς αριθμητικούς δείκτες με αποτέλεσμα την πολυπλοκότητα και επομένως δύσχρηστος. Παρά την πολυπλοκότητά του πρόκειται επί της ουσίας για την εκθετική εξίσωση της ευθείας:

$$y = ax^n$$

Αποδείχθηκε ότι αυτές οι ευθείες για οποιαδήποτε τιμή της T συγκλίνουν στο ίδιο σημείο. Το σημείο $T=26,50^{\circ}\text{C}$, $E_{\Delta}=135 \text{ mm}$ (Σχήμα).

□ Πραγματική Εξατμισιδιαπνοή E_{Π}

Ο τύπος που προτείνεται για την E_{Π} εμπεριέχει εκτός από την θερμοκρασία, το ύψος των κατακρημνισμάτων . **Τύπος του Turc** (1951):

$$E = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

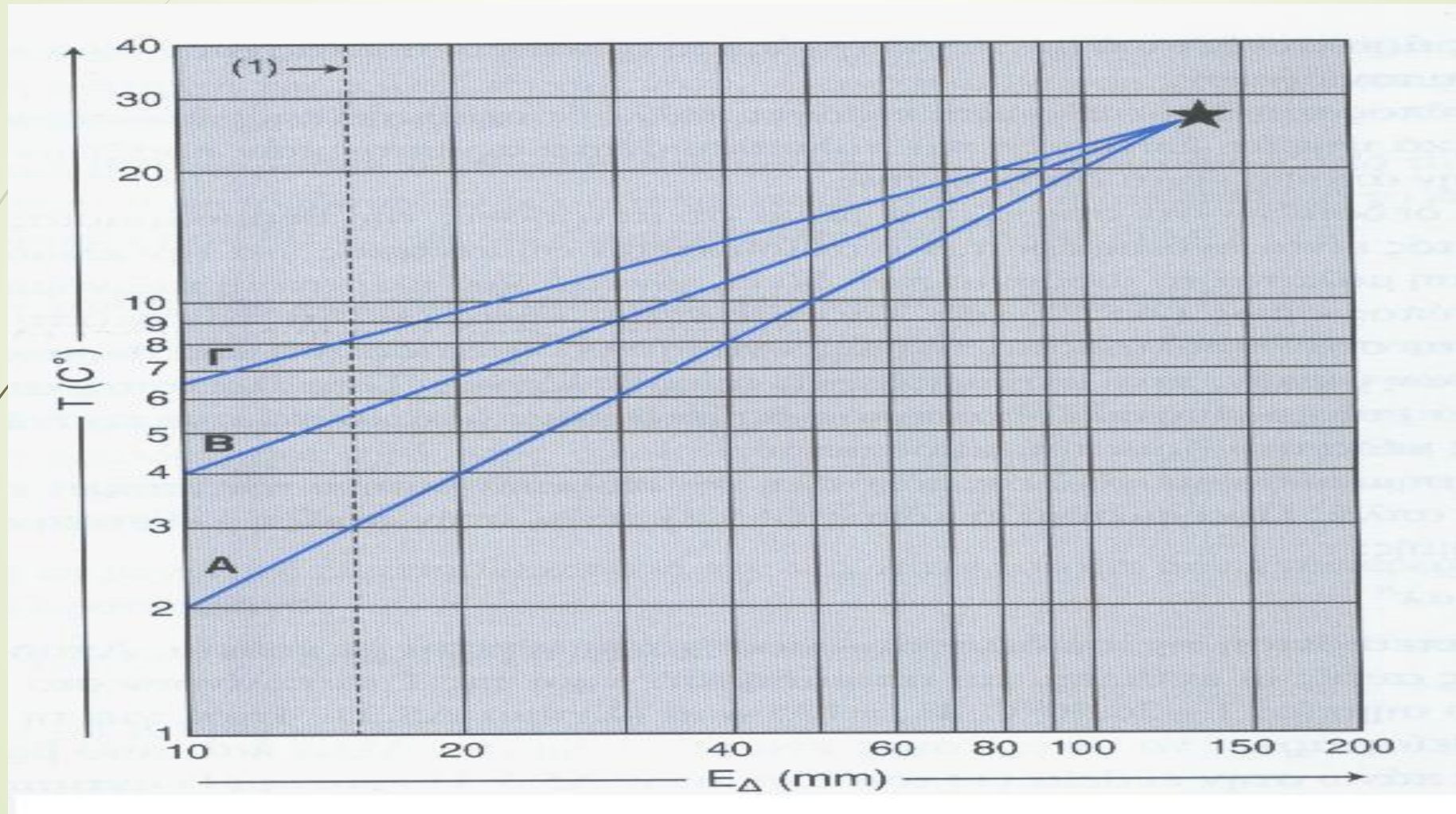
όπου E = η πραγματική ετήσια εξατμισιδιαπνοή σε mm

P = το ύψος των ετήσιων κατακρημνισμάτων σε mm

$$L = 300 + 25T + 0,05T^3$$

T = η μέση ετήσια θερμοκρασία του αέρα σε βαθμούς Κελσίου,
που εκφράζει την εξατμιστική δυνατότητα της ατμόσφαιρας

Εφαρμογή της μεθόδου του Thornthwaite. Στη γραμμή που δείχνει το βέλος (1) και που αντιστοιχεί σε E_{Δ} 16 mm τοποθετούνται οι τιμές του I (αριθμητικά $I=10T$ ($^{\circ}\text{C}$)).



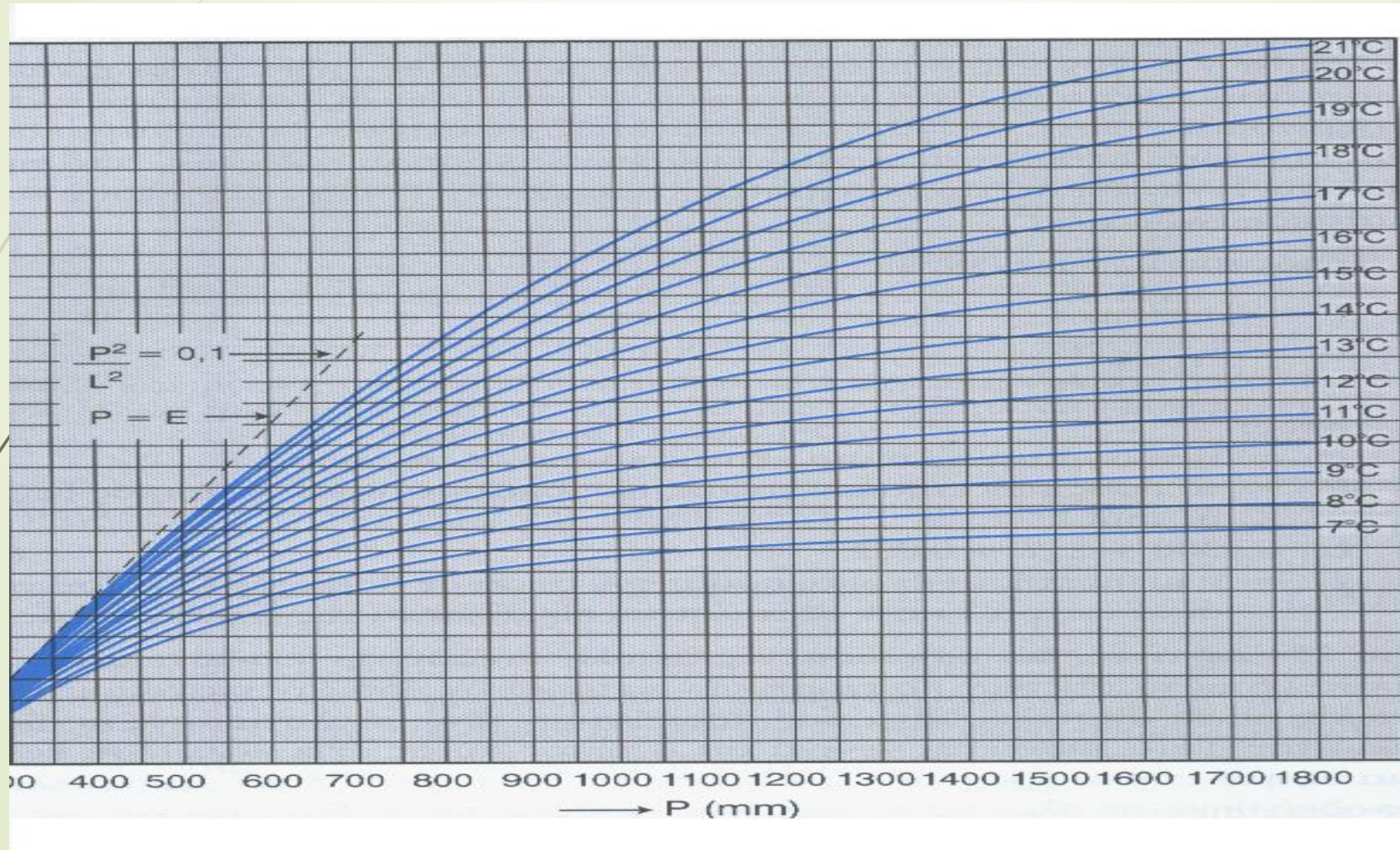
Υπολογισμός της εξατμισδιαπνοής από εμπειρικούς τύπους

Εάν το επιτρέπουν τα δεδομένα είναι προτιμότερο να χρησιμοποιείται όχι η μέση ετήσια θερμοκρασία T , αλλά η «διεθρομένη» T_{Δ} η οποία δίδεται από τον τύπο:

$$T_{\Delta} = \frac{P_1 T_1 + P_2 T_2 + \dots + P_{12} T_{12}}{P_1 + P_2 + \dots + P_{12}}$$

όπου $P_1, P_2 \dots P_{12}$ = τα ύψη των κατακρημνισμάτων για καθένα από τους 12 μήνες
 $T_1, T_2 \dots T_{12}$ = η αντίστοιχη μέση μηνιαία θερμοκρασία του αέρα

Νομόγραμμα για την εφαρμογή του τύπου του Turc



Υπολογισμός της εξατμισιδιαπνοής από εμπειρικούς τύπους

► Τύπος του Coutagne (1954)

$$E=P-\lambda P^3, \text{ όπου } \lambda = \frac{1}{0,8 + 0,14T}$$

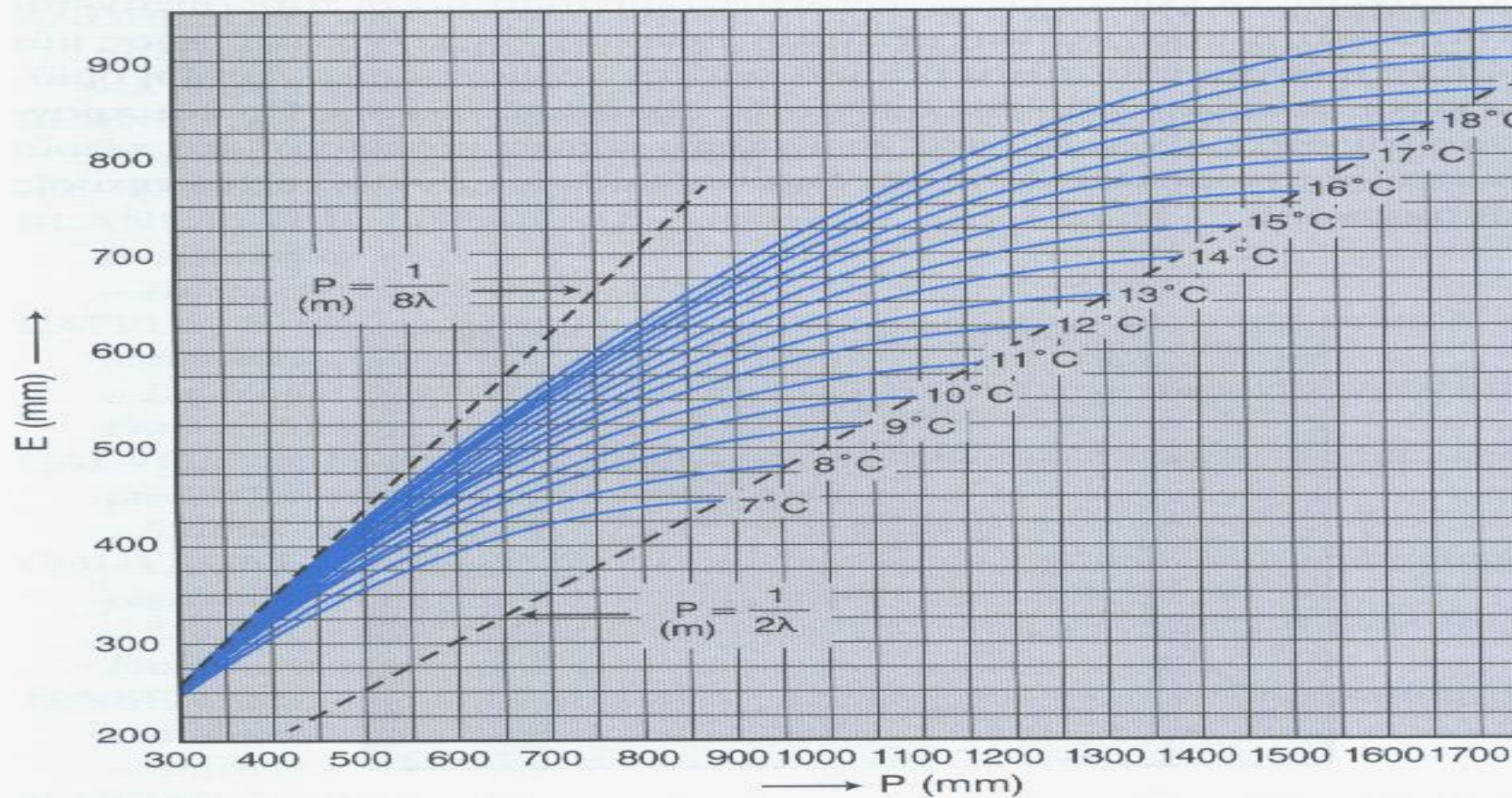
Αυτός ο τύπος είναι εφαρμόσιμος για $\frac{1}{8\lambda} < P < \frac{1}{\lambda}$ Το P εκφράζεται σε m.

Στο παρακάτω Σχήμα δίνεται το νομόγραμμα για την εφαρμογή του τύπου Coutagne.

Μέθοδος Thronthwaite-Mather

Βασικά στηρίζεται στον τύπο του Thronthwaite. Δεχόμαστε μία αποθηκευτική ικανότητα του εδάφους που η μέση τιμή της είναι περίπου 100-120 mm αλλά με ευρεία διακύμανση από 30 έως 250-300 mm, ανάλογα με τη γεωλογική σύσταση, τη μορφολογία της επιφάνειας και τη θέση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα και την κοκκομετρία της ακόρεστης ζώνης, τη βλάστηση κλπ. Αυτή η μέθοδος δίνει γενικά πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα, κοντά στις πραγματικές τιμές.

Νομόγραμμα για την εφαρμογή του τύπου του Coutagne



Σχέση ύψους ετήσιων κατακρημνισμάτων - εξατμισοδιαπνοής

Μετρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί σε πολλά σημεία της Γης έδειξαν ότι:

- Αυξανόμενου του ύψους των κατακρημνισμάτων P αυξάνεται αντίστοιχα και η **πραγματική εξατμισοδιαπνοή E_{Π}** , τείνοντας προς μία οριακή τιμή η οποία βασικά εξαρτάται από τη θερμοκρασία (πρόκειται κατά βάση για την **δυνητική εξατμισοδιαπνοή E_{Δ}**).
 - Με την αύξηση των κατακρημνισμάτων δεν αυξάνεται ο συντελεστής πραγματικής εξατμισοδιαπνοής, όπως συμβαίνει με τον συντελεστή της κατεΐσδυσης, αλλά συνήθως μειώνεται. Όμως το ύψος της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής σε απόλυτους αριθμούς αυξάνεται, ώστε στην οριακή της τιμή να φθάνει τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή.
- Φαίνεται ότι δεν υπάρχει γραμμικότητα στη σχέση μεγεθών P - E σε αντίθεση με ό,τι συμβαίνει με τη σχέση P - I και ίσως με τη σχέση P - R .

Επόμενο Σχήμα: Παραστατική απεικόνιση της σχέσης $P - E$.

Σχέσεις μεταξύ P , E_{Π} και E_{Δ}

