

—
Σχολή Τεχνικής Εκπαίδευσης Αξιωματικών Μηχανικού
Μάθημα: Υδραυλική

Σημειώσεις υδρολογίας πλημμυρών και
σχεδιασμού έργων αποχέτευσης ομβρίων

Ανδρέας Ευστρατιάδης
Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Διάρθρωση μαθήματος

- Υδρολογικές διεργασίες – Υδρολογικός κύκλος
- Πλημμύρες: φυσικό πλαίσιο
- Πιθανοτική ανάλυση ακραίων υδρολογικών γεγονότων
- Καταιγίδες σχεδιασμού – όμβριες καμπύλες
- Ορθολογική μέθοδος
- Εκτίμηση παροχών ομβρίων σε αστικές λεκάνες
- Υδραυλική των υπονόμων – προδιαγραφές
- Διαστασιολόγηση αγωγών ομβρίων

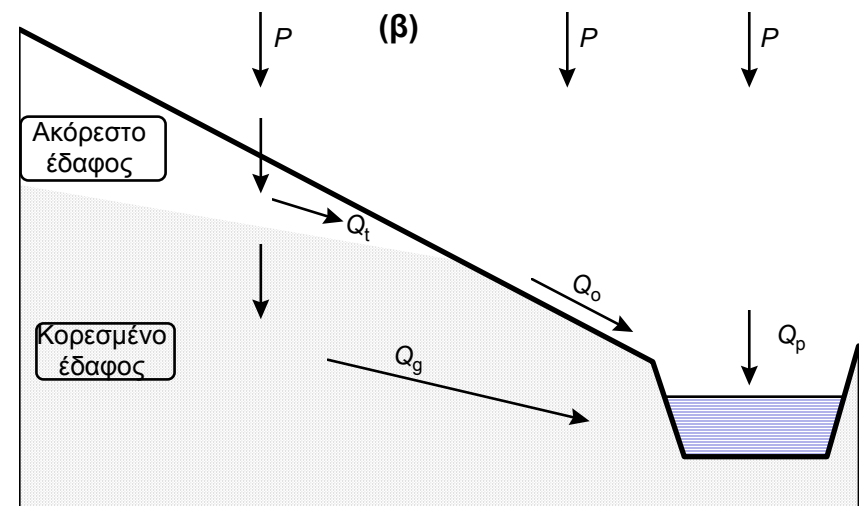
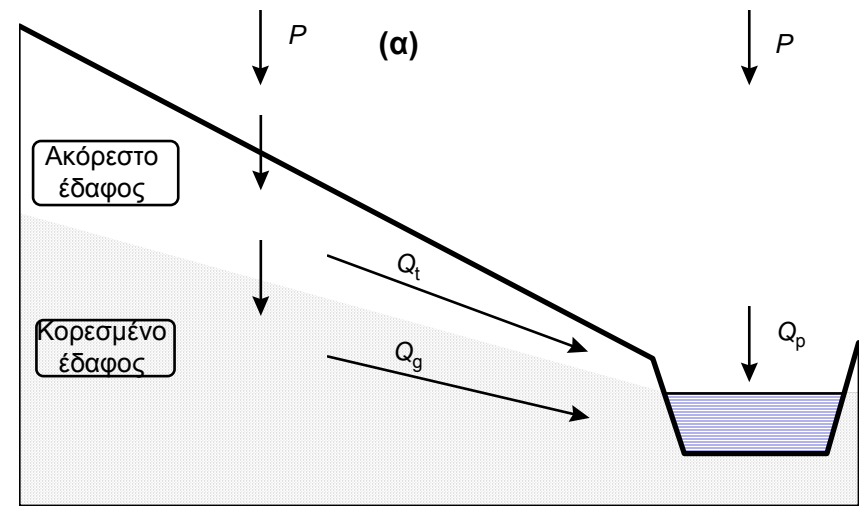
Αναγνωρίσεις: Στην κατασκευή των σημειώσεων και των ασκήσεων έχει χρησιμοποιηθεί εκπαιδευτικό υλικό από τις διαλέξεις των μαθημάτων **Τεχνική Υδρολογία** και **Αστικά Υδραυλικά Έργα**, τα οποία διδάσκονται στο 5^ο και 6^ο εξάμηνο της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ.

Υδρολογικός και υδραυλικός σχεδιασμός αντιπλημμυρικών έργων

- ❑ Σε αντίθεση με άλλα έργα Πολιτικού Μηχανικού, στα αντιπλημμυρικά υιοθετείται μια **στατιστική-πιθανοτική** προσέγγιση, καθώς οι διεργασίες που σχετίζονται με την παραγωγή της πλημμύρας αντιμετωπίζονται ως **τυχαίες μεταβλητές**.
- ❑ Ο σχεδιασμός των αντιπλημμυρικών έργων γίνεται για συγκεκριμένη **περίοδο επαναφοράς** (μέση ετήσια συχνότητα επανάληψης της πλημμύρας) η οποία εξαρτάται από την σημασία του έργου (π.χ. από 5 χρόνια για δευτερεύοντες αγωγούς ομβρίων έως 5000-10000 χρόνια για υπερχειλιστές φραγμάτων).
- ❑ Ο **υδρολογικός σχεδιασμός** περιλαμβάνει δύο συνιστώσες:
 - Εκτίμηση καταιγίδας σχεδιασμού, για τη συγκεκριμένη περίοδο επαναφοράς
 - Εκτίμηση πλημμύρας, η οποία προκαλείται από την καταιγίδα σχεδιασμού (στα απλά έργα μας ενδιαφέρει μόνο η παροχή αιχμής)
- ❑ Η συσχέτιση βροχής-απορροής γίνεται με πληθώρα μεθοδολογιών, από απλές εμπειρικές σχέσεις μέχρι εξειδικευμένα μοντέλα προσομοίωσης.
- ❑ Η απαγωγή της πλημμύρας γίνεται μέσω του υδρογραφικού δικτύου ή ενός δικτύου αγωγών, στους οποίους η ροή είναι με **ελεύθερη επιφάνεια**.
- ❑ Στην απλούστερη περίπτωση ενός κυκλικού αγωγού ομβρίων, ο **υδραυλικός σχεδιασμός** του περιλαμβάνει δύο συνιστώσες: (α) διαστασιολόγηση, ήτοι επιλογή **διαμέτρου**, και (β) τοποθέτηση σε μηκοτομή, ήτοι επιλογή **κλίσης**.

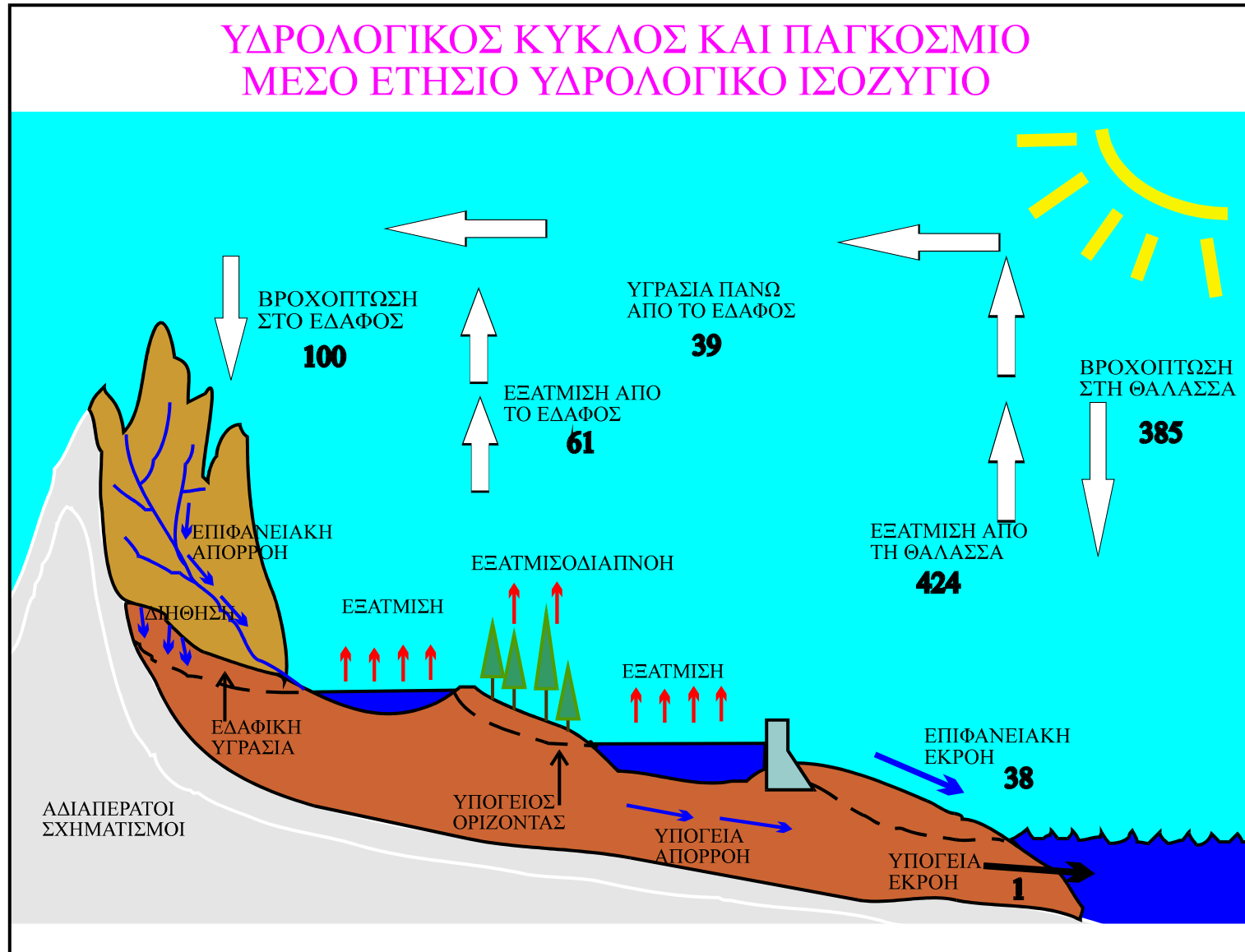
Υδρολογικές διεργασίες

- Κατακρήμνιση
 - Βροχόπτωση
 - Χιονόπτωση
 - Χαλαζόπτωση
- Εξατμοδιαπνοή
 - Εξάτμιση (υδάτινες επιφάνειες, έδαφος)
 - Διαπνοή χλωρίδας
- Κατακράτηση
 - Παρεμπόδιση από τη χλωρίδα
 - Επιφανειακή παγίδευση στο έδαφος
 - Κατακράτηση χιονιού
- Διήθηση νερού στο έδαφος (ακόρεστη ζώνη)
- Επαναφόρτιση υδροφορέων (κατείσδυση)
- Επιφανειακή απορροή
 - Επίγεια ροή
 - Υποδερμική ροή
- Υπόγεια απορροή
 - Επιφανειακή εκφόρτιση (σημειακή - πηγές, διεπιφάνεια ποταμού και υδροφορέα)
 - Εκροή στη θάλασσα



Σχηματικό διάγραμμα του τρόπου κίνησης του νερού σύμφωνα με την υπόθεση Hewlett: (α) αρχικό στάδιο, και (β) προχωρημένο στάδιο (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999, σ. 286).

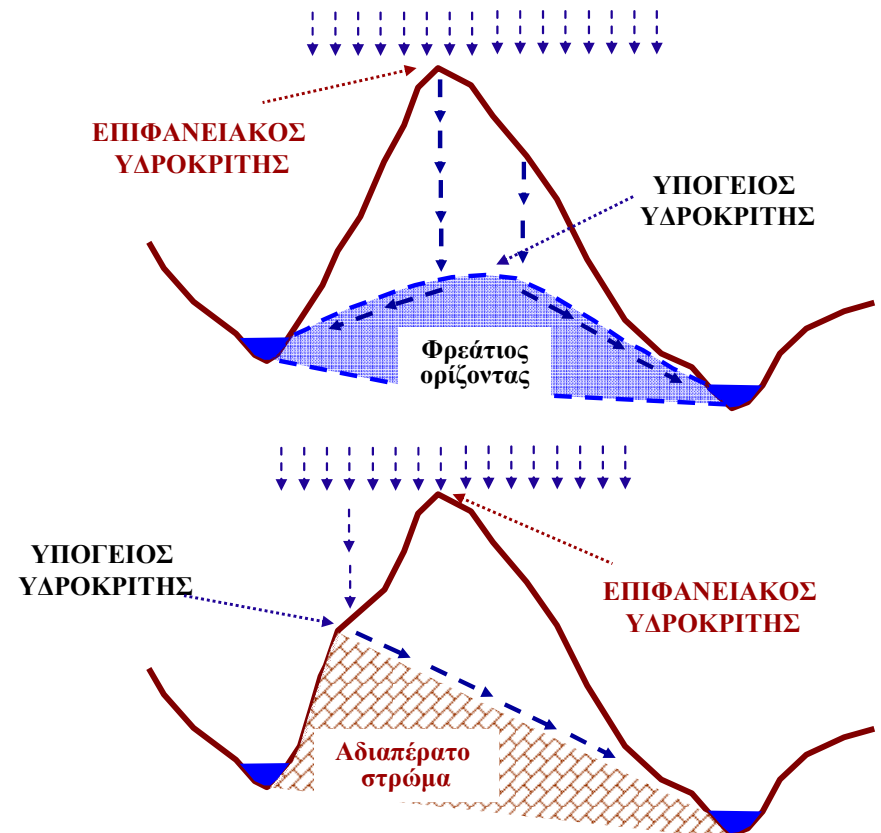
Παγκόσμιο υδατικό ισοζύγιο



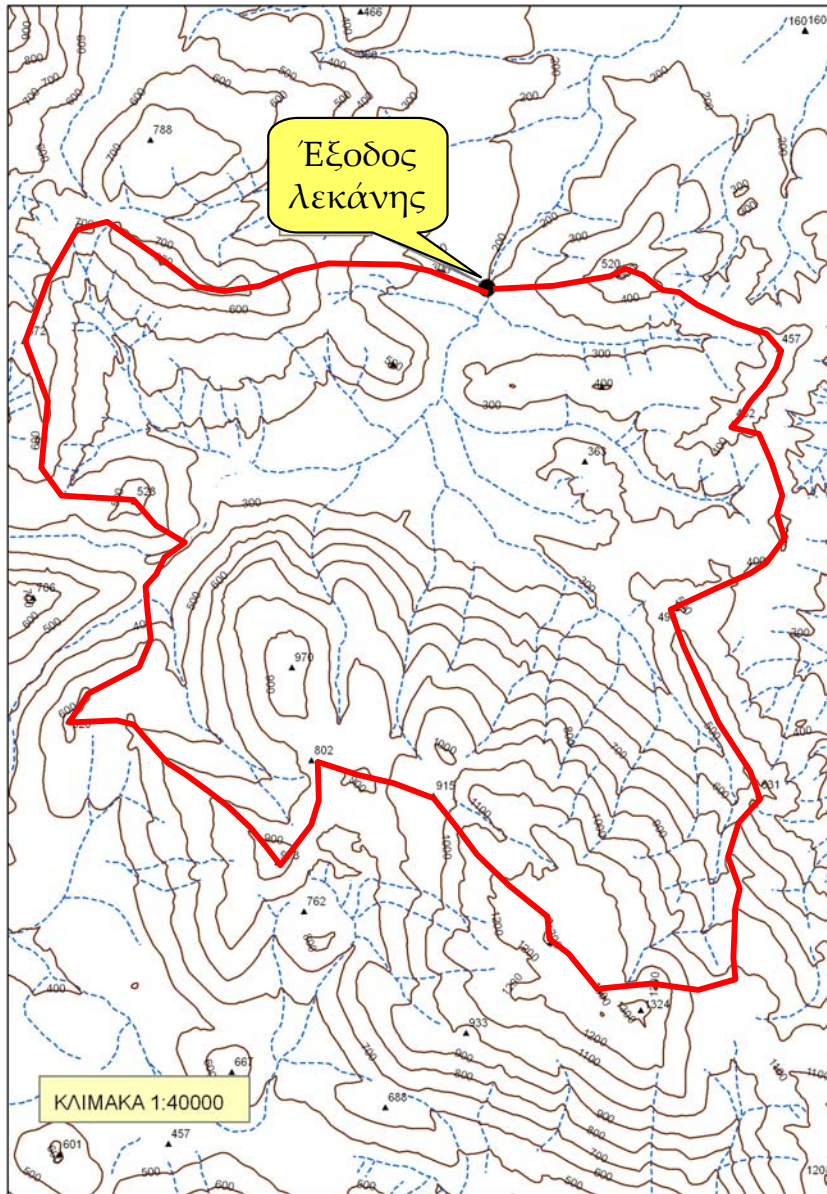
Μέσο ετήσιο παγκόσμιο υδατικό ισοζύγιο, ως ποσοστό (%) των ετήσιων κατακρημνισμάτων στο χερσαίο τμήμα της γης (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999, σ. 36).

Η έννοια της λεκάνης απορροής

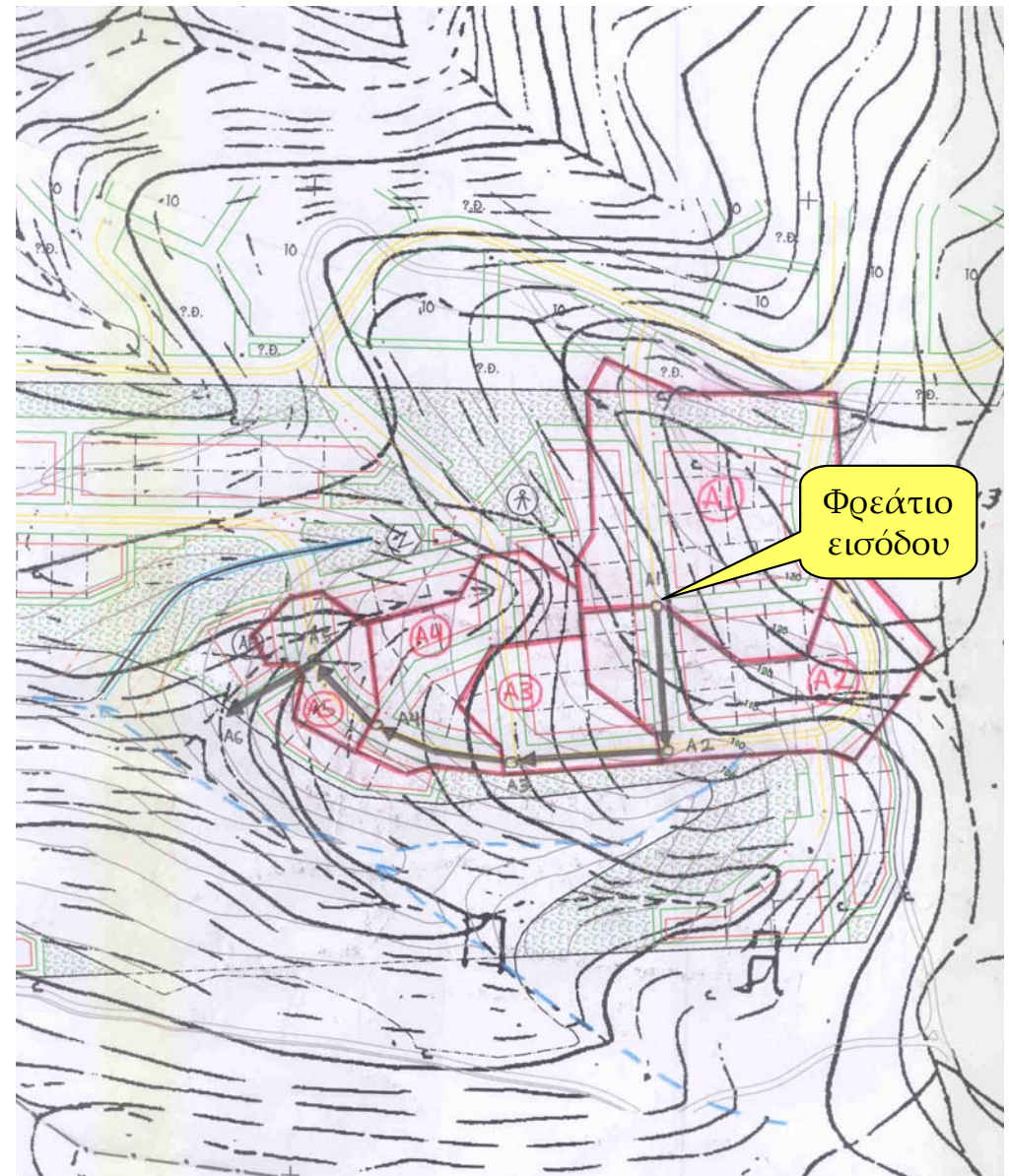
- ❑ Λεκάνη απορροής = θεμελιώδης χωρική μονάδα αναφοράς στην υδρολογία
- ❑ Η λεκάνη απορροής (ή υδρολογική λεκάνη) αναφέρεται σε συγκεκριμένη διατομή ενός υδατορεύματος (ή συλλεκτήρα ομβρίων, εφόσον αναφερόμαστε σε δίκτυο ομβρίων) και ορίζεται ως η γεωγραφική περιοχή, η βροχόπτωση της οποίας συνεισφέρει στην απορροή που διέρχεται από την εν λόγω διατομή.
- ❑ Το όριο της (επιφανειακής) λεκάνης απορροής καλείται **υδροκρίτης** και ορίζεται με βάση το υδρογραφικό δίκτυο και τις υψομετρικές καμπύλες.
- ❑ Η **υπόγεια λεκάνη** (ή υδρογεωλογική λεκάνη ή υδροφορέας) μπορεί να εκτείνεται εκτός των ορίων της επιφανειακής.



Χάραξη λεκάνης απορροής



Φυσική λεκάνη



Αστική λεκάνη

Υδατικό ισοζύγιο λεκάνης απορροής

- Γενική εξίσωση υδατικού ισοζυγίου:

$$dS(t)/dt = P(t) - ET(t) - Q(t) - R(t) - L(t)$$

όπου $S(t)$ η αποθήκευση νερού στη λεκάνη (ακόρεστη ζώνη και υδροφορέας), $P(t)$ η βροχόπτωση, $ET(t)$ οι απώλειες λόγω εξατμοδιαπνοής, $Q(t)$ η απορροή που καταλήγει στην έξοδο της λεκάνης, $R(t)$ οι απολήψεις νερού για διάφορες χρήσεις, οι οποίες δεν επιστρέφουν στη λεκάνη, και $L(t)$ οι απώλειες υπόγειου νερού λόγω διαφυγών (λόγω υδραυλικής επικοινωνίας του υδροφορέα τη θάλασσα ή γειτονικής λεκάνες).

- Από τα παραπάνω μεγέθη:

- Η βροχόπτωση στην επιφάνεια της λεκάνης εκτιμάται με βάση σημειακές μετρήσεις ύψους βροχής σε βροχομετρικούς σταθμούς (όσο πυκνότερη χωρικά η πληροφορία, τόσο καλύτερη η εκτίμηση).
- Η απορροή στην έξοδο της λεκάνης εκτιμάται μέσω μετρήσεων στάθμης και παροχής στη συγκεκριμένη διατομή (όσο πυκνότερη χρονικά η πληροφορία, τόσο καλύτερη η εκτίμηση).
- Η αποθήκευση υγρασίας, η εξατμοδιαπνοή και οι υπόγειες διαφυγές είναι αδύνατο να μετρηθούν.

- Σε λεκάνες με αδιαπέρατο υπόβαθρο ($L = 0$), χωρίς απολήψεις ($R = 0$), και για μεγάλη χρονική κλίμακα (πλέον της ετήσιας), στην οποία η μεταβολή της αποθήκευσης είναι αμελητέα ($dS/dt = 0$), η εξίσωση ισοζυγίου απλοποιείται και γράφεται ως εξής:

$$P(t) = ET(t) + Q(t)$$

Υδρολογικά μεγέθη και μονάδες μέτρησης

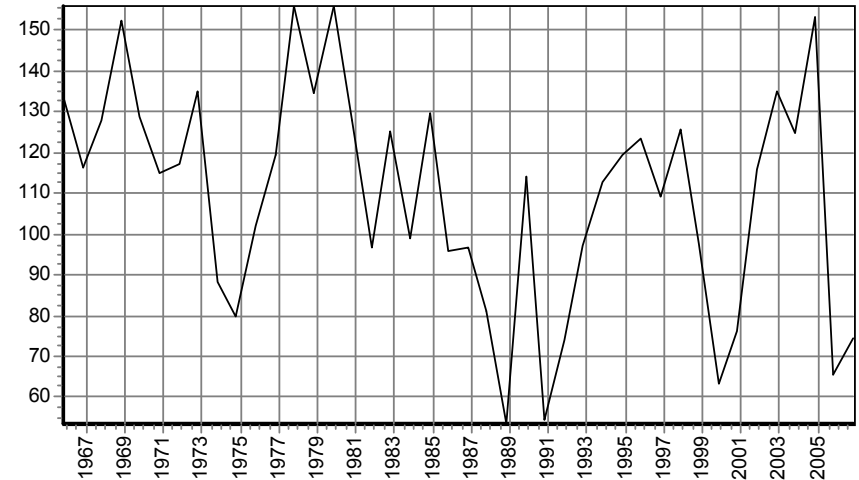
- Στην υδρολογία, διακρίνονται δύο είδη υδρολογικών μεγεθών:
 - **Αποθέματα** νερού (ή υγρασίας) σε κάποια αποθηκευτική «διάταξη» (ατμόσφαιρα, υδάτινα σώματα, υπέδαφος, θάλασσα).
 - **Μετακινήσεις** νερού από το ένα σώμα στο άλλο.
- Οι υδρολογικές μεταβλητές εκφράζονται ποσοτικά ως εξής:
 - **Όγκος** νερού V που διακινήθηκε σε ορισμένο χρονικό διάστημα Δt , με τυπικές μονάδες μέτρησης m^3 ή hm^3 (εκατομμύρια κυβικά μέτρα)
 - **Μέση παροχή**, δηλαδή ρυθμός διακίνησης στη μονάδα του χρόνου, με τυπικές μονάδες μέτρησης L/s , m^3/s , m^3/h , $hm^3/\acute{\epsilon}τος$, κτλ.
- Προσοχή στη διάκριση μεταξύ στιγμιαίας παροχής, $q(t) = dV/dt$, και μέσης παροχής q_m (κατά κανόνα, και για τις δύο μεταβλητές χρησιμοποιείται ο όρος «παροχή»):
$$q_m = \int q(t) dt / \Delta t$$
- Συχνά, για όλες τις μεταβλητές αλλά κυρίως για τη βροχόπτωση και την εξάτμιση, αντί του όγκου νερού χρησιμοποιείται το **ισοδύναμο ύψος νερού** (όγκος ανά μονάδα επιφάνειας), που εκφράζεται σε mm ($1 mm = 1 L/m^2$).
- Στη βροχόπτωση, αντί της «παροχής», χρησιμοποιείται η **ένταση**, δηλαδή ο ρυθμός μεταβολής του ύψους νερού στη μονάδα του χρόνου, που εκφράζεται σε mm/h .

Παράδειγμα: Για τη μετατροπή του ύψους βροχής p (σε mm), που δέχεται μια υδρολογική λεκάνη έκτασης A (σε km^2), σε όγκο νερού V_p (σε hm^3), εφαρμόζεται η σχέση αναγωγής: $V_p = p A / 1000$.

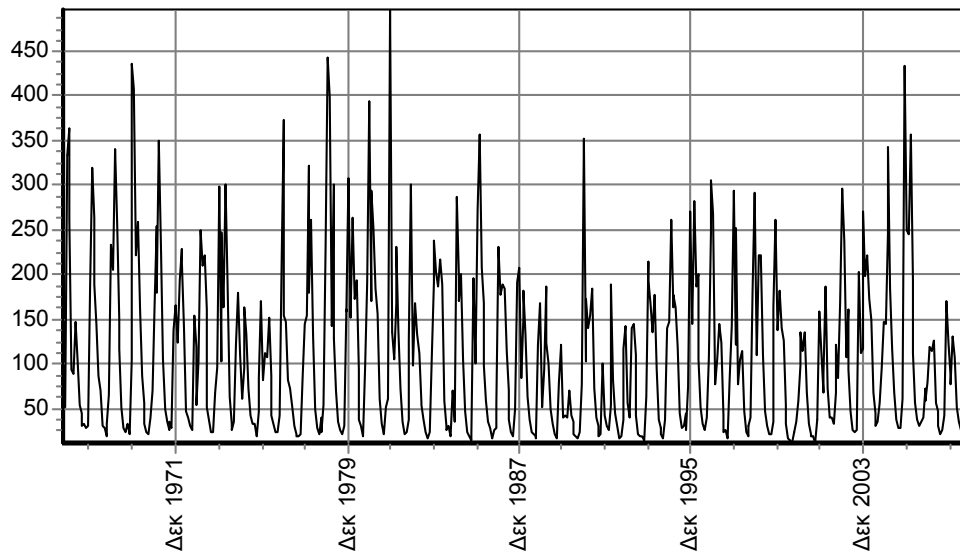
Χρονικές κλίμακες υδρολογικών μεγεθών



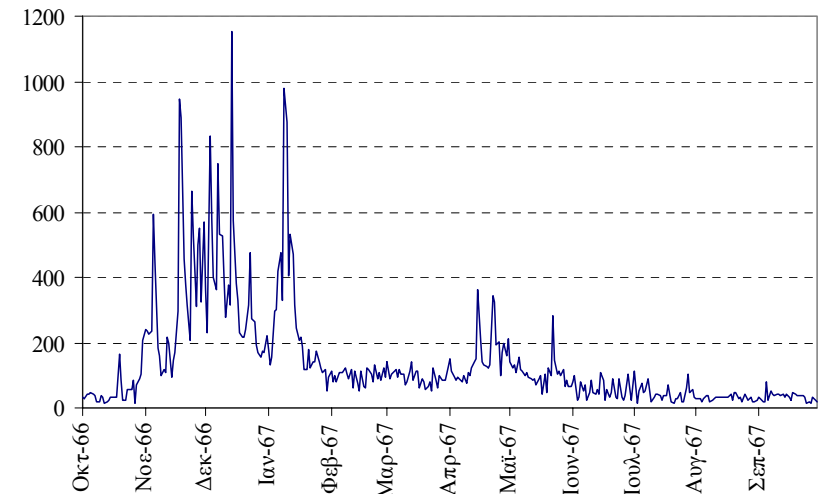
Μέση ημερήσια παροχή 1966-2008 (m³/s)



Μέση ετήσια παροχή 1966-2008(m³/s)

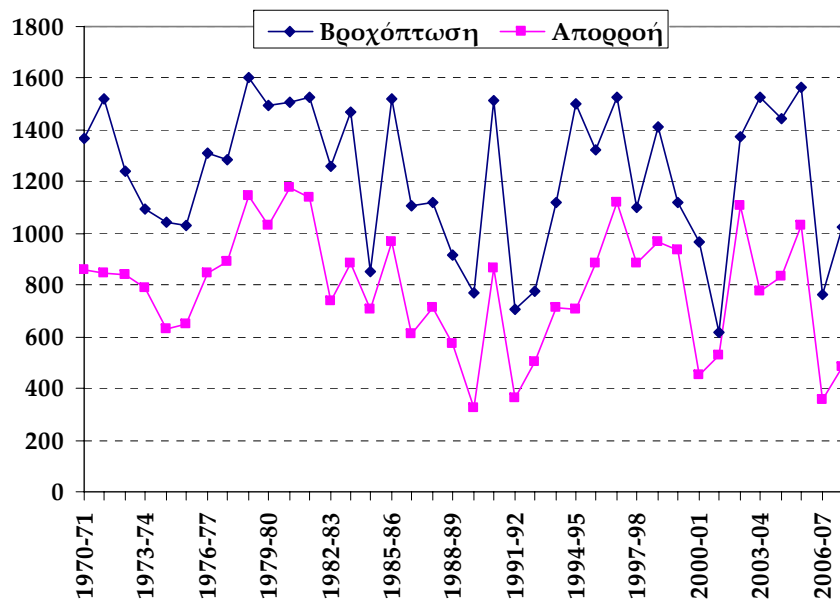


Μέση μηνιαία παροχή 1966-2008 (m³/s)



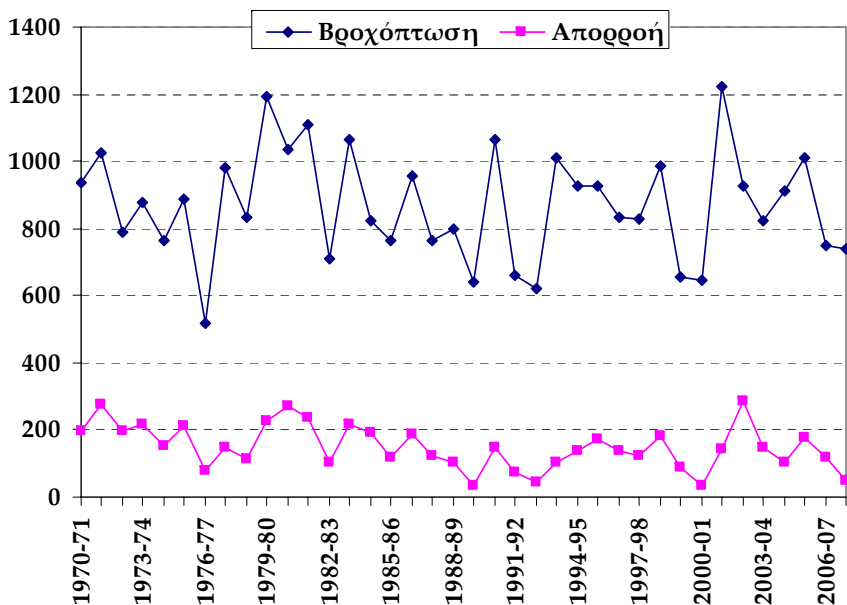
Μέση ημερήσια παροχή υδρ. έτους 1966-67 (m³/s)

Σχέση βροχής-απορροής: ετήσια κλίμακα



Εύηνος (ανάντη φράγματος): Δυτική Ελλάδα, εξαιρετικά πλούσια σε βροχοπτώσεις, φυσική λεκάνη, σε σημαντικά τμήματα της οποίας κυριαρχούν σχηματισμοί μέτριας και χαμηλής περατότητας

Λόγος μέσης ετήσιας βροχόπτωσης / μέση ετήσια απορροή = 0.64

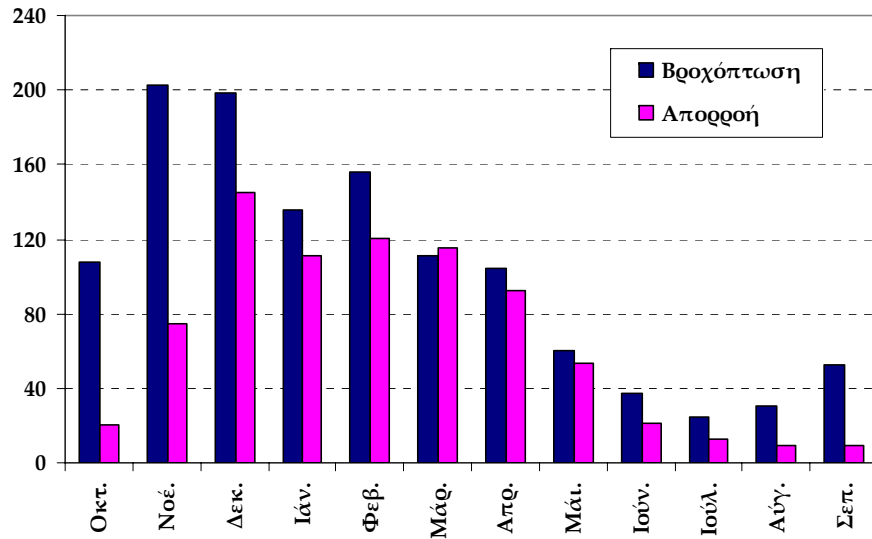


Βοιωτικός Κηφισός (ανάντη Υλίκης):

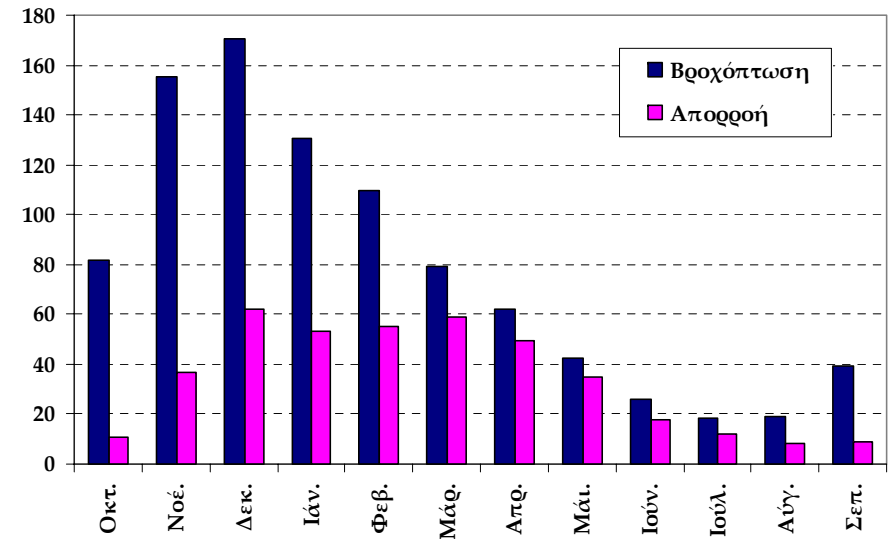
Ανατολική Ελλάδα, ξηρό έως ημιάνυδρο κλίμα, σε σημαντικά τμήματα της λεκάνης αναπτύσσονται σχηματισμοί πολύ υψηλής περατότητας (ασβεστόλιθοι, καρστ), σημαντικές ποσότητες εκτρέπονται για άρδευση

Λόγος μέσης ετήσιας βροχόπτωσης / μέση ετήσια απορροή = 0.17

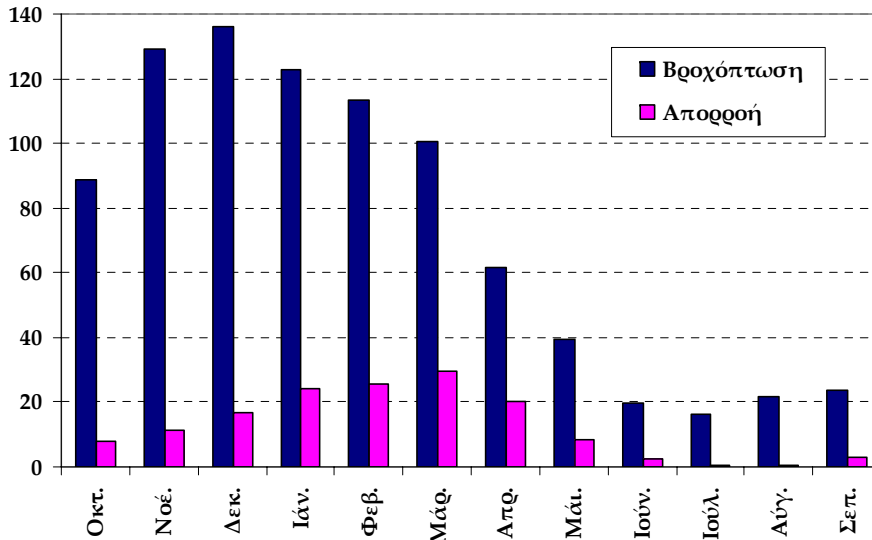
Σχέση βροχής-απορροής: μηνιαία κλίμακα



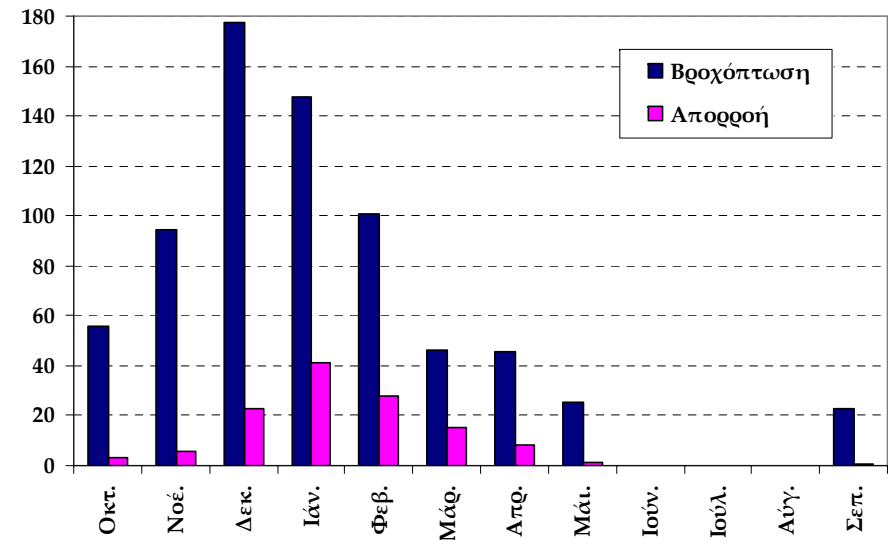
Εύηνος



Μόρνος

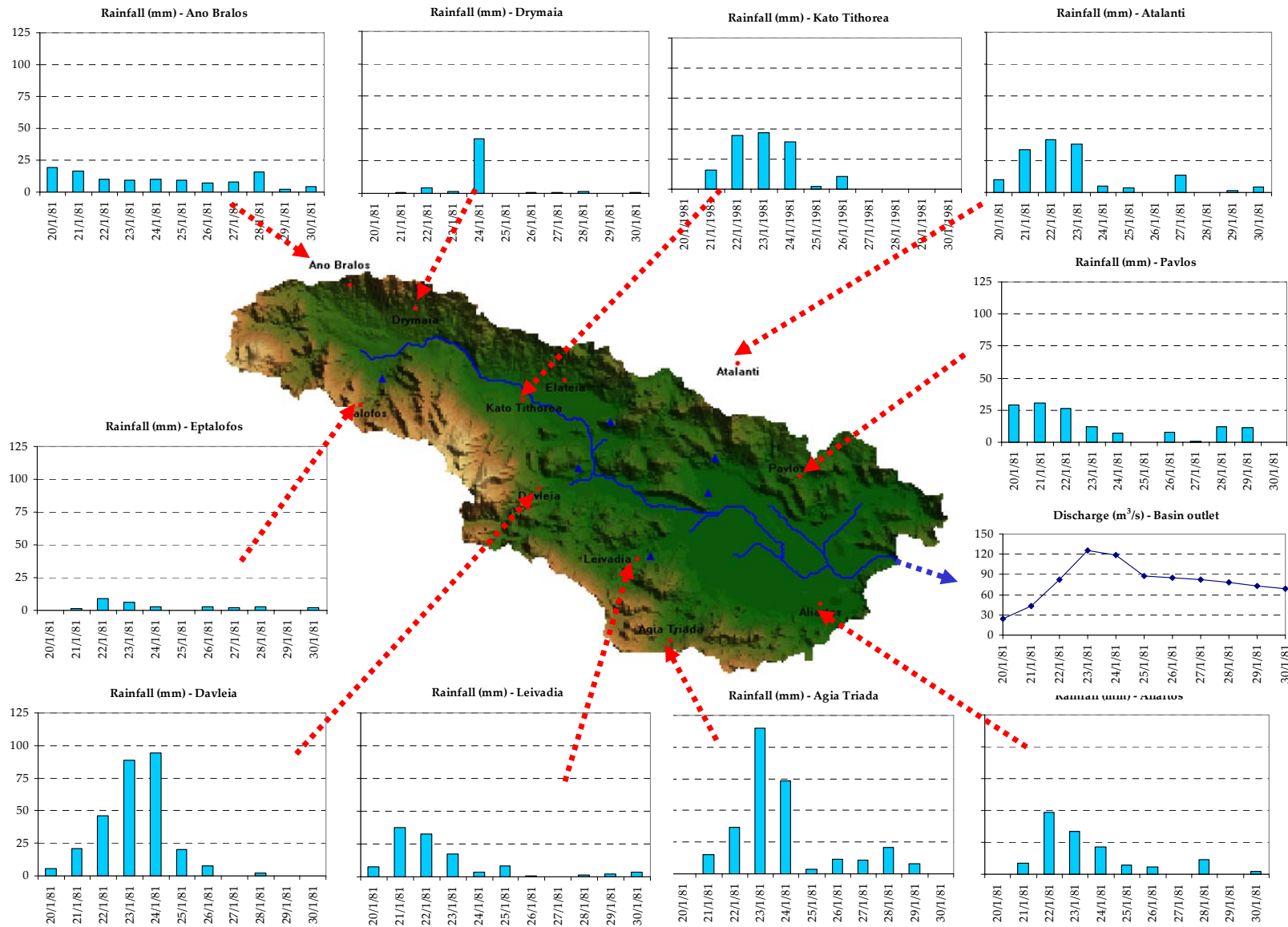


Βοιωτικός Κηφισός



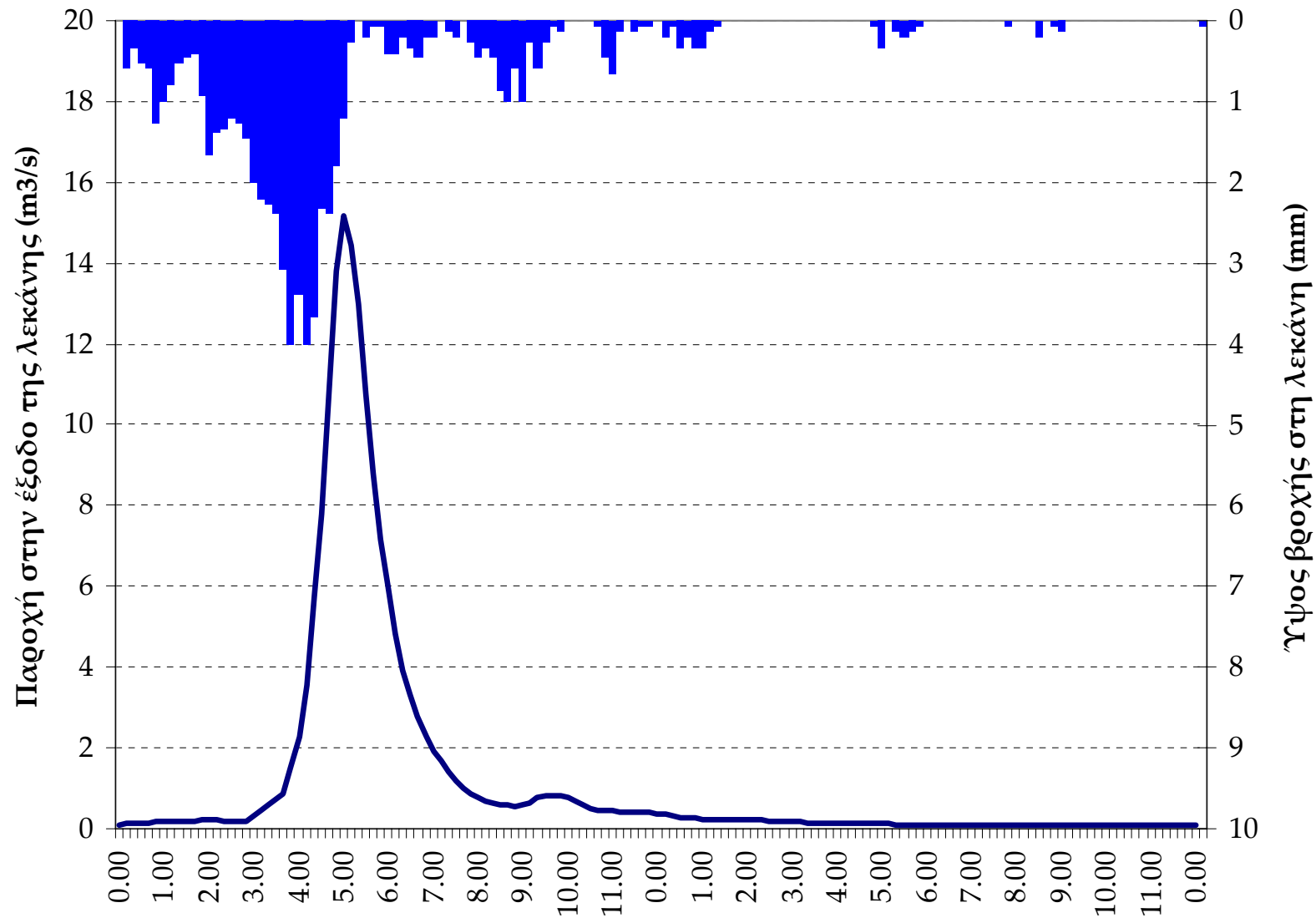
Γαδουράς (Ρόδος)

Σχέση βροχής-απορροής: ημερήσια κλίμακα



Υψη βροχής σε διάφορους βροχομετρικούς σταθμούς της λεκάνης απορροής του Βοιωτικού Κηφισού και παροχή ποταμού στην έξοδο, το δεκαήμερο 20-30/1/1981 (Efstratiadis and Papalexioiu, 2010).

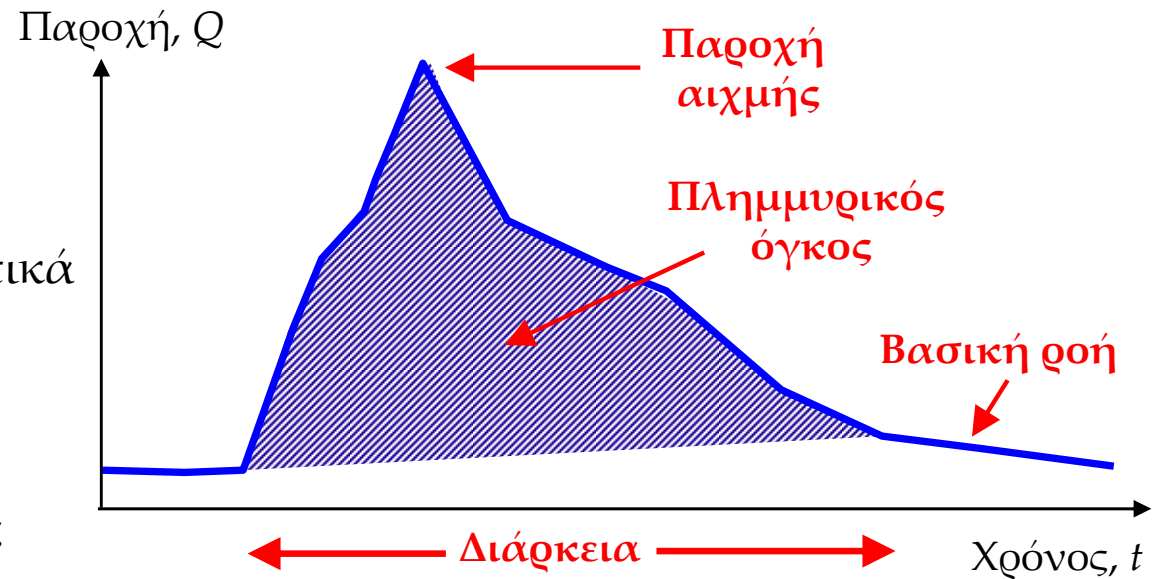
Σχέση βροχής-απορροής: δεκάλεπτη κλίμακα



Επιφανειακό ύψος βροχής (μέσος όρος τριών βροχομετρικών σταθμών) και παροχή εξόδου στην πειραματική λεκάνη Λυκορέματος Πεντέλης, στις 23/11/2005 (<http://hoa.ntua.gr/stations/d/354/>).

Εμβάθυνση στις πλημμυρικές διεργασίες

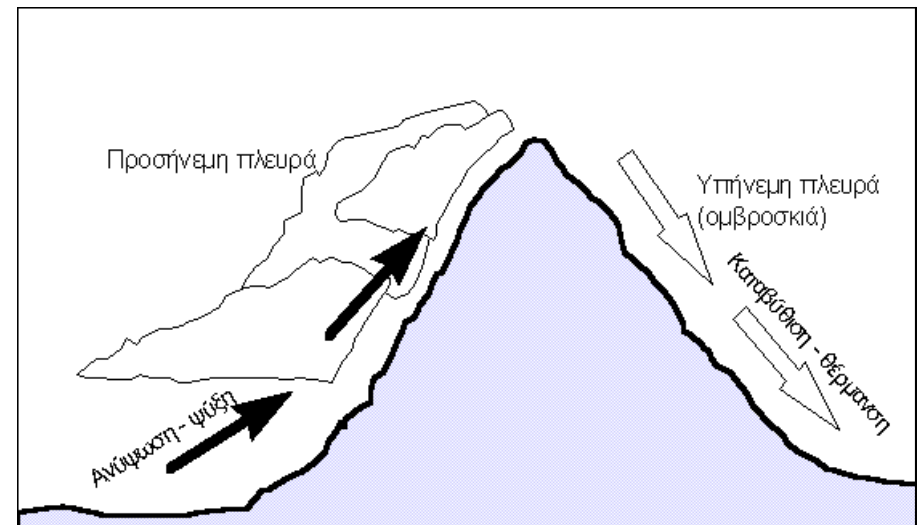
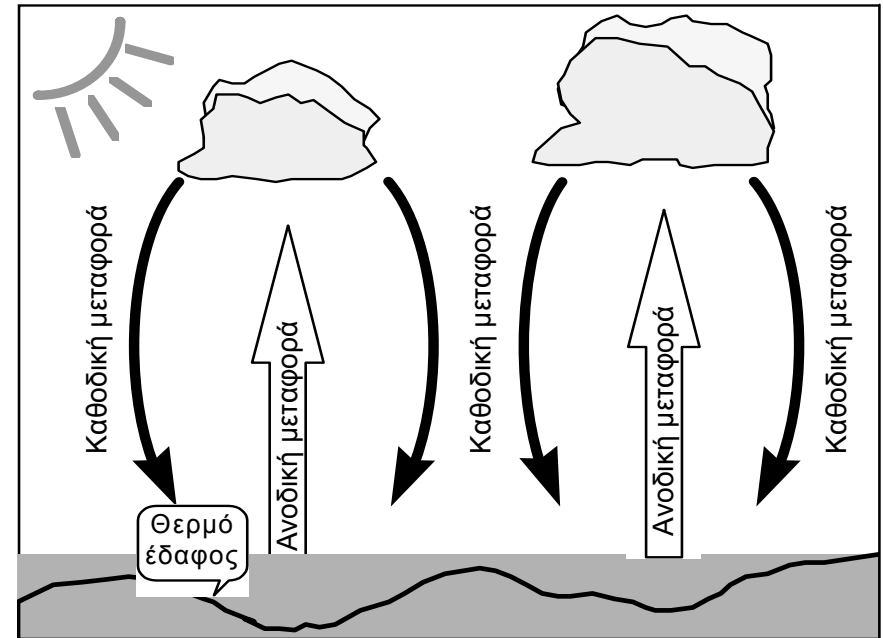
- Η χωροχρονική εξέλιξη μιας πλημμύρας εξαρτάται από:
 - τη χωροχρονική εξέλιξη του επεισοδίου βροχής (καταιγίδα)
 - τα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής
 - τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του υδρογραφικού δικτύου



- Βασικά μεγέθη στην ανάλυση μιας πλημμύρας είναι:
 - η παροχή αιχμής (και η αντίστοιχη στάθμη στο υδατόρευμα)
 - ο πλημμυρικός όγκος
 - η χρονική διάρκεια
 - η κατακλυόμενη έκταση
- Εκτός από τη βροχόπτωση, οι υδρολογικές διεργασίες που επηρεάζουν την εξέλιξη της πλημμύρας και, συνακόλουθα, το ισοζύγιο της λεκάνης, είναι η κατακράτηση και η διήθηση (αναφέρονται και ως **υδρολογικά ελλείμματα**), ενώ είναι αμελητέα η επίδραση της εξατμοδιαπνοής καθώς και των διεργασιών του υδροφορέα (επειδή οι ταχύτητες ροής του υπόγειου νερού και οι σχετικές μεταβολές όγκου είναι πολύ μικρές σε σχέση με τις επιφανειακές διεργασίες).

Καταιγίδες: φυσικό πλαίσιο

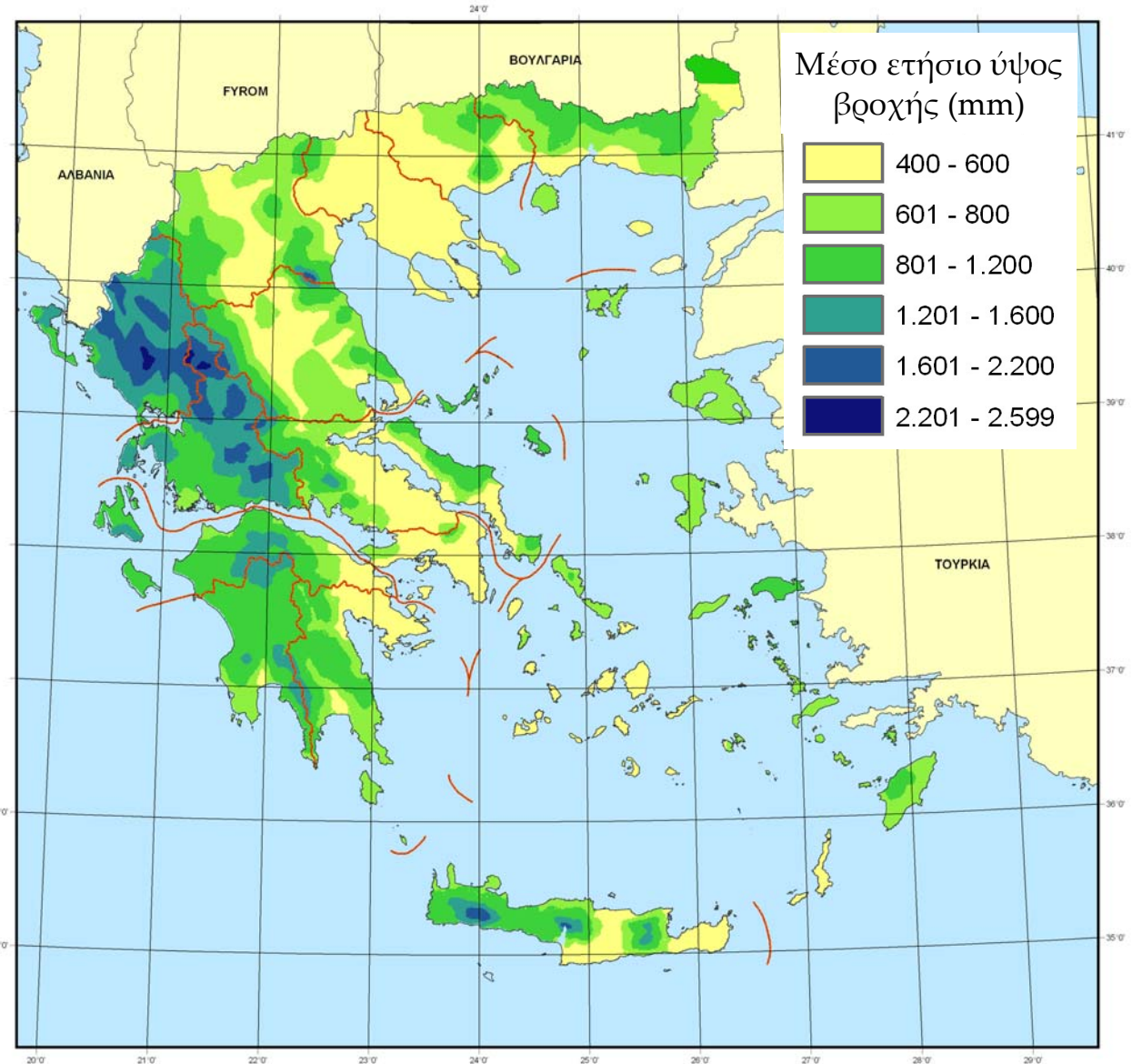
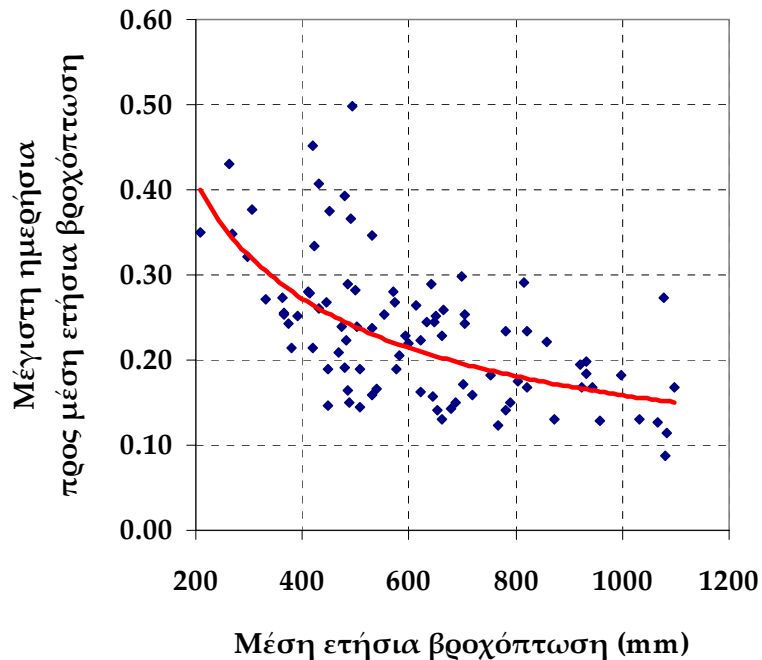
- Στάδια γέννησης κατακρημνισμάτων:
 - Δημιουργία συνθηκών υγραποίησης των υδρατμών (θερμοδυναμικός κορεσμός), ως συνέπεια της διόγκωσης και ψύξης του αέρα κατά την ανοδική πορεία του
 - Συμπύκνωση υδρατμών σε πολύ μικρά σταγονίδια (10-30 μm) ή κρυστάλλους, με συνέπεια τη δημιουργία νεφών
 - Αύξηση μάζας σταγόνων (έως και 10^6 φορές) σε κατακρημνίσμα μεγέθη
 - Συνεχής τροφοδότηση με νέους υδρατμούς
- Τυπικοί μηχανισμοί κατακρήμνισης στις μεσογειακές συνθήκες:
 - **Μεταγωγικές κατακρημνίσεις** (λόγω του θερμού εδάφους, δημιουργείται ανοδικό ρεύμα) – κυριαρχούν την άνοιξη και το φθινόπωρο, απογευματινές ώρες
 - **Ορογραφικές κατακρημνίσεις** (λόγω του αναγλύφου, ευνοείται η δημιουργία νεφών στην προσήνεμη πλευρά)



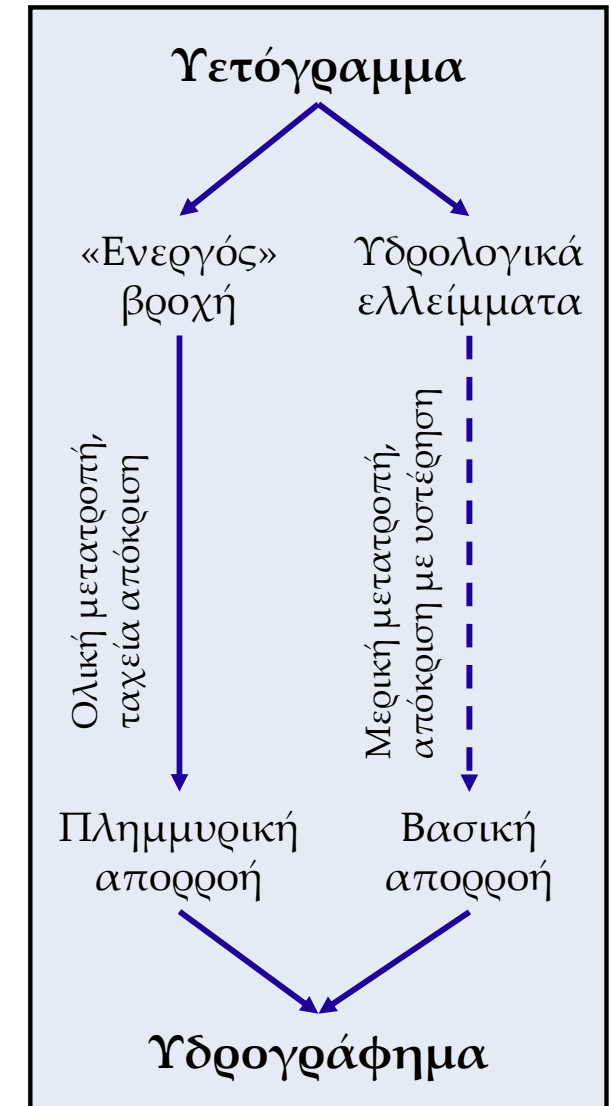
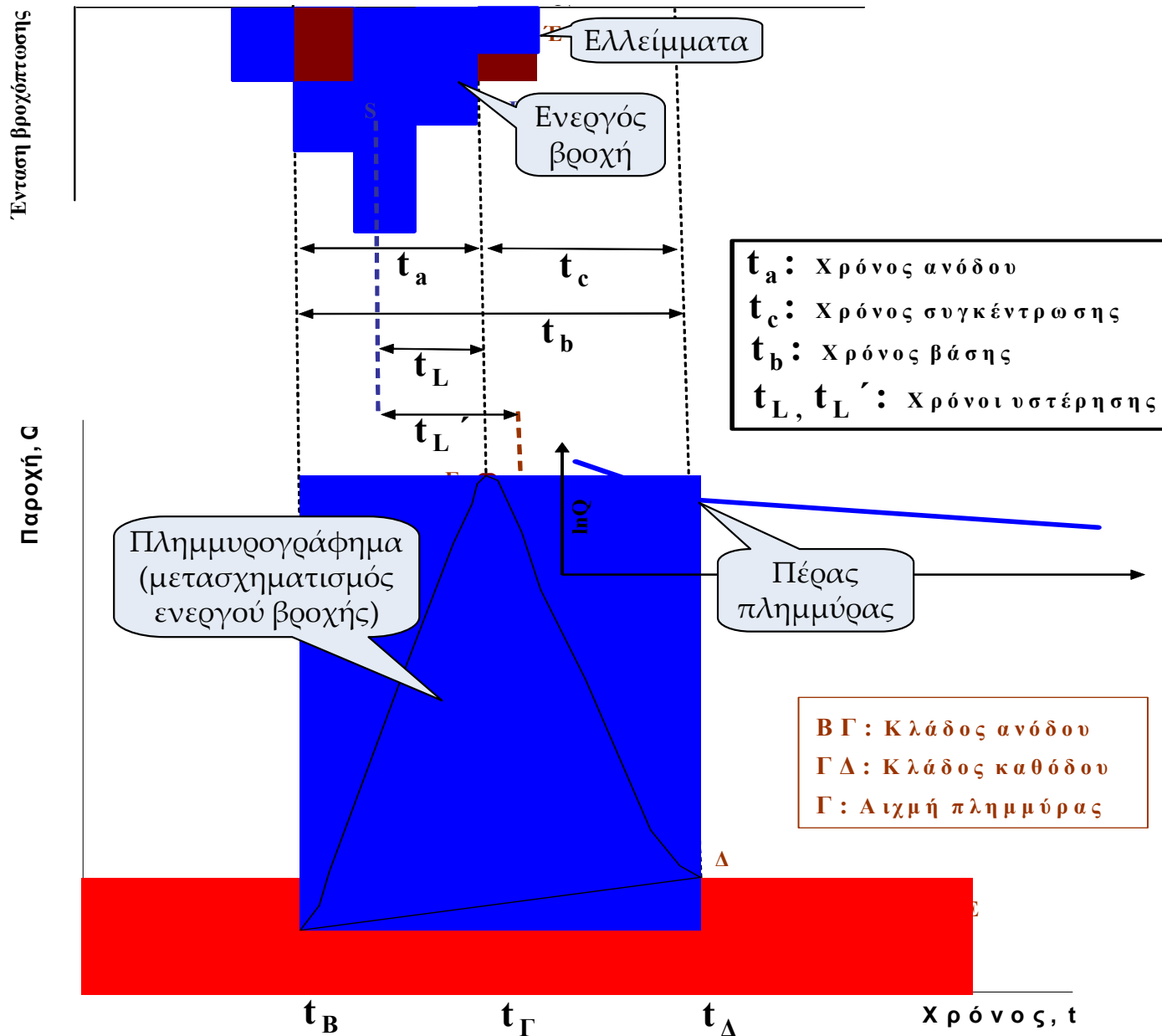
Πηγή: Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999, σ. 85, 87

Κατανομή βροχοπτώσεων στην Ελλάδα

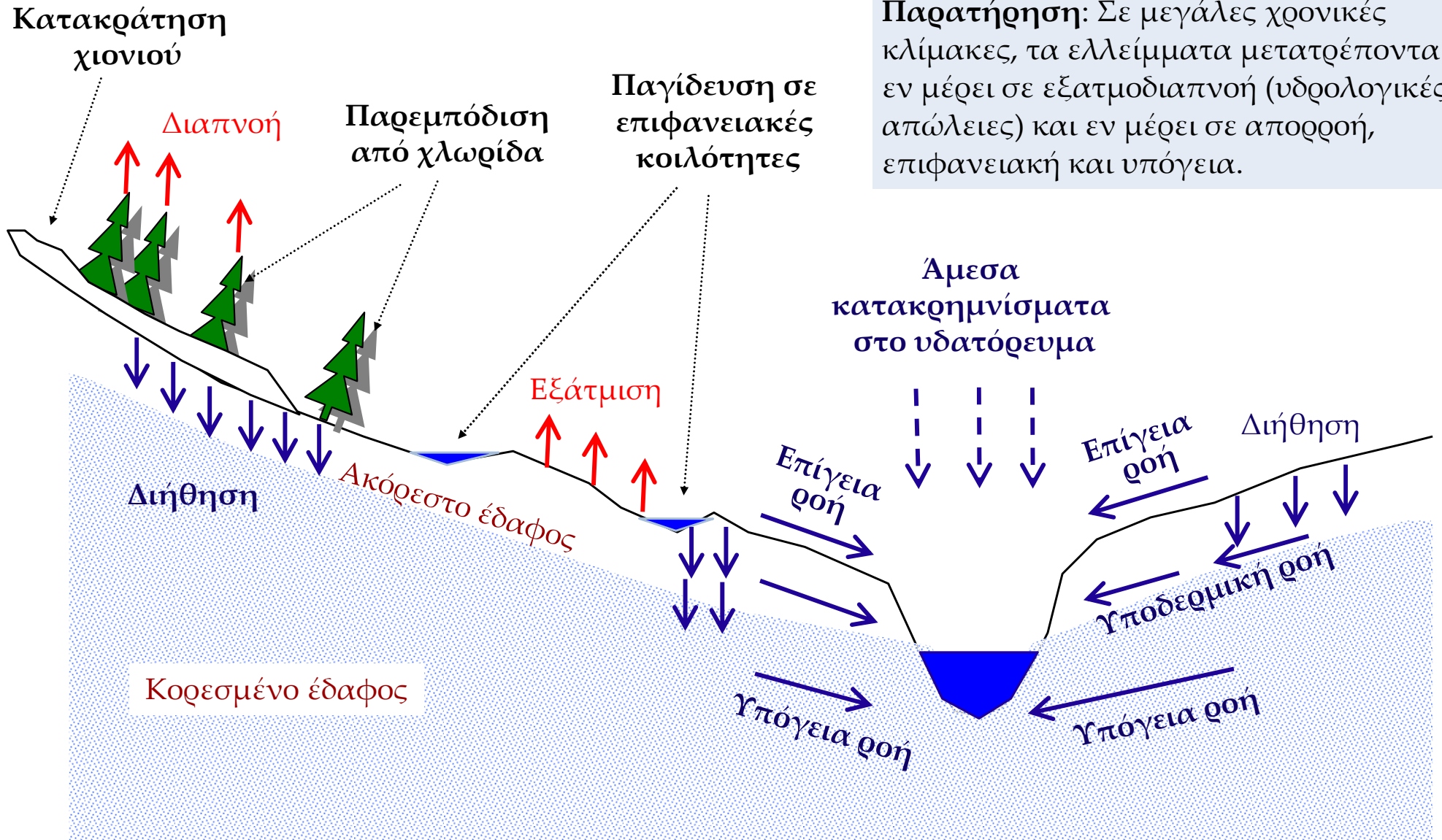
- Η ορογραφία (Πίνδος) ευνοεί την παραγωγή βροχοπτώσεων στην Δυτική Ελλάδα, όπου τα μέσα ετήσια ύψη βροχής ξεπερνούν τα 1500 mm.
- Ωστόσο, τα πλέον ισχυρά επεισόδια καταιγίδων παρατηρούνται στην Ανατολική Ελλάδα και τα νησιά του Αιγαίου.



Υετογράμματα και υδρογραφήματα



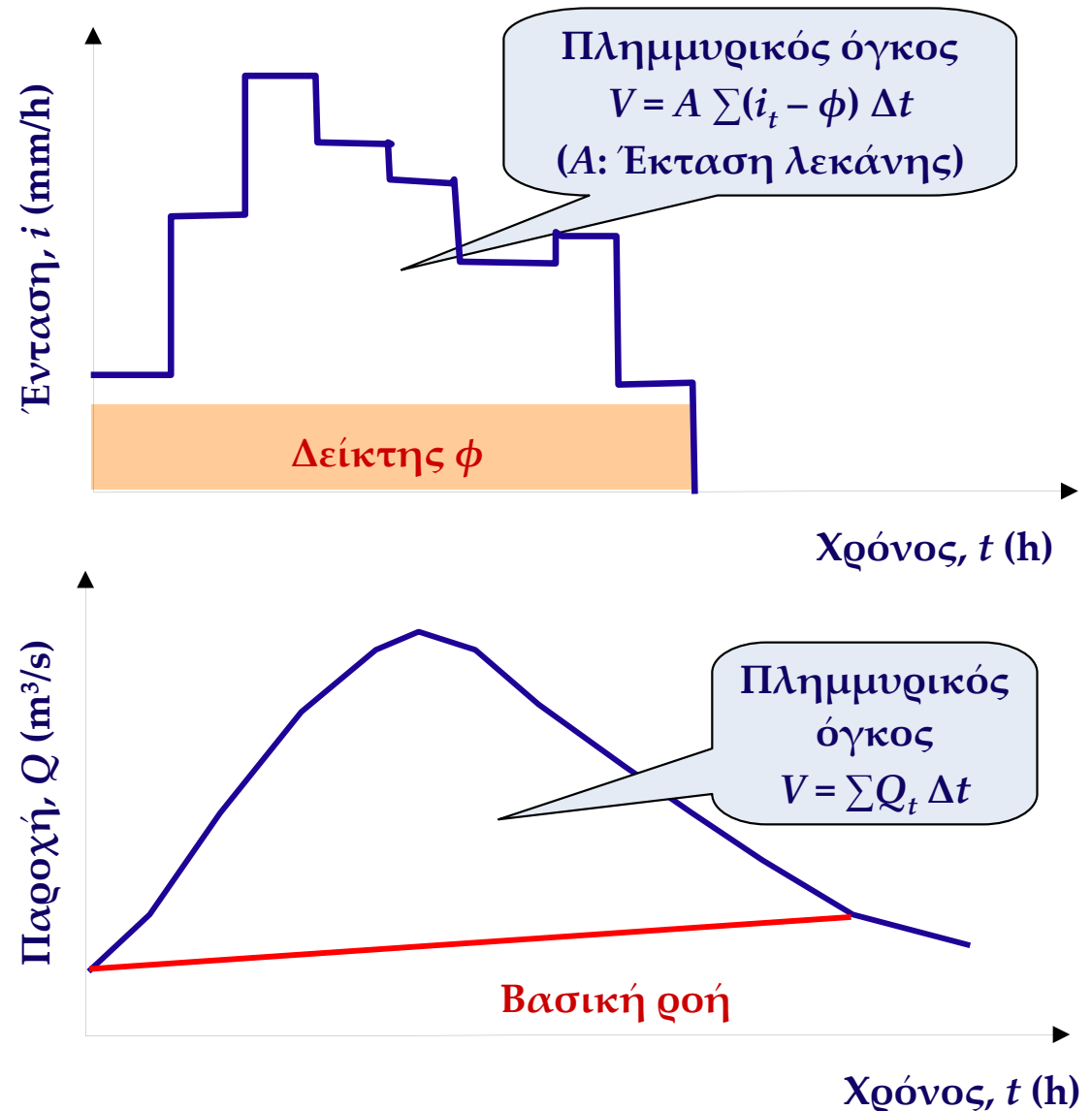
Υδρολογικά ελλείμματα (κατακράτηση και διήθηση): φυσικό πλαίσιο



Παρατήρηση: Σε μεγάλες χρονικές κλίμακες, τα ελλείμματα μετατρέπονται εν μέρει σε εξατμοδιαπνοή (υδρολογικές απώλειες) και εν μέρει σε απορροή, επιφανειακή και υπόγεια.

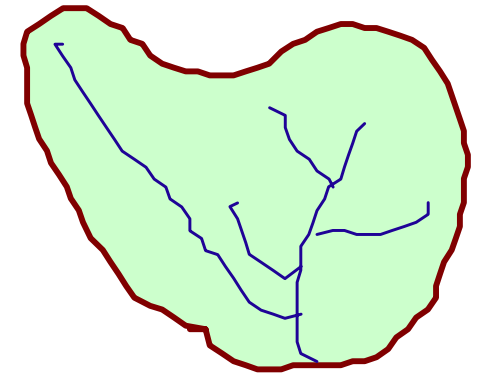
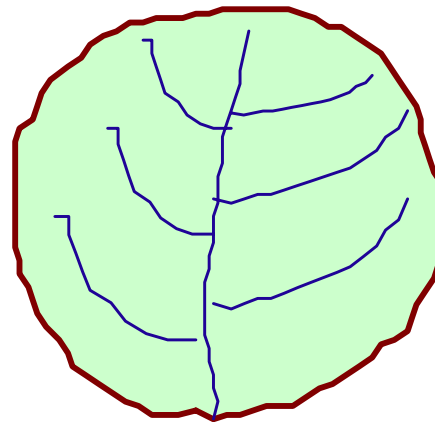
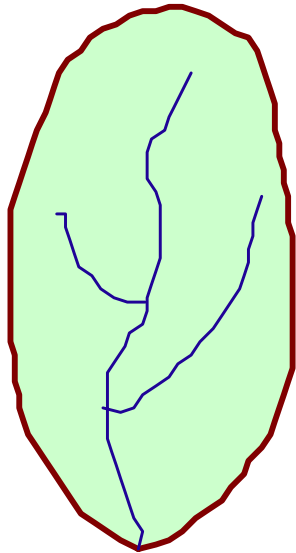
Συνολική εκτίμηση ελλειμμάτων – Η μέθοδος του δείκτη ϕ

- Η ανάλυση ενός πλημμυρικού επεισοδίου περιλαμβάνει:
 - τον διαχωρισμό της βασικής ροής από το υδρογράφημα, ώστε να εξαχθεί το καθαρό πλημυρογράφημα της λεκάνης
 - τον διαχωρισμό των υδρολογικών ελλειμμάτων από το βροχογράφημα, ώστε να εξαχθεί το ενεργό υετόγραμμα που προκάλεσε την πλημμύρα

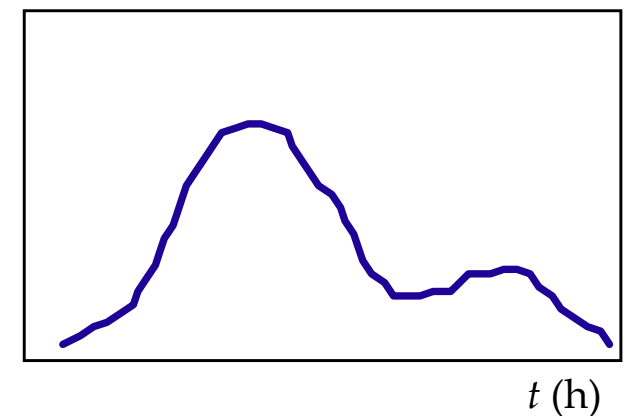
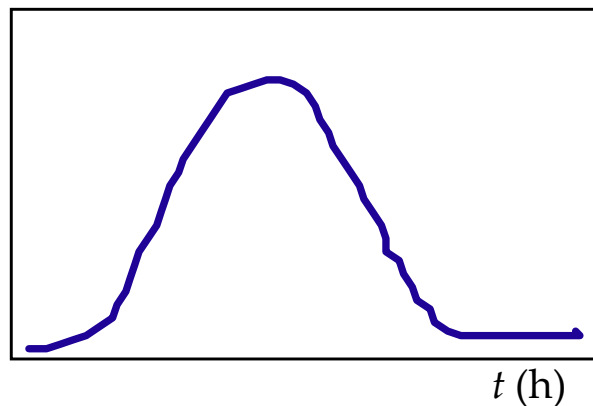
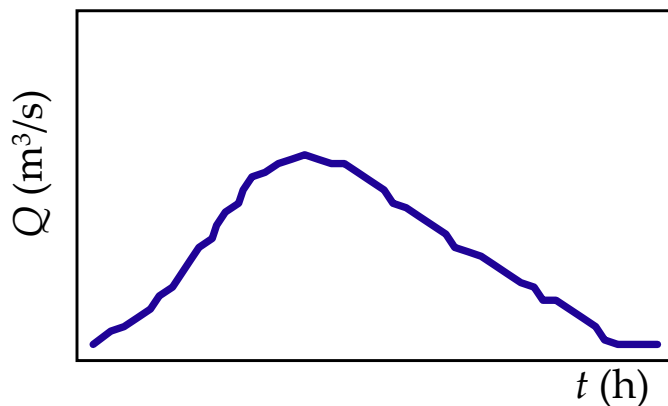


Επίδραση γεωμορφολογίας και γεωμετρίας λεκάνης στην παραγωγή απορροής

Λεκάνες απορροής, ίσου εμβαδού A



Υδρογραφήματα για ωφέλιμη (ενεργό) βροχόπτωση σταθερής έντασης i και διάρκειας d



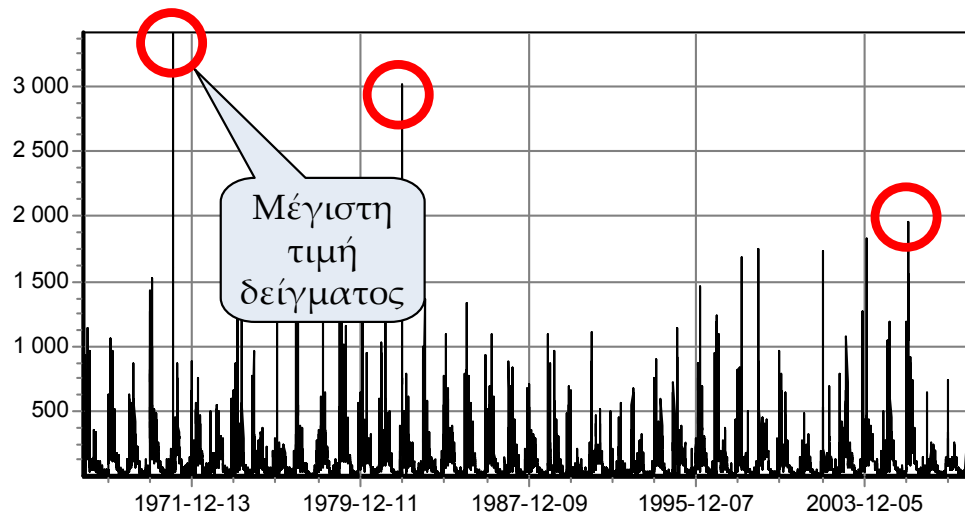
Η έννοια της περιόδου επαναφοράς

- ❑ Ο βαθμός προστασίας που παρέχει ένα αντιπλημμυρικό έργο (π.χ. δίκτυο ομβρίων) περιγράφεται από την περίοδο επαναφοράς του επεισοδίου βροχής που μπορεί να παροχετεύσει το συγκεκριμένο έργο, χωρίς προβλήματα.
- ❑ Περίοδος επαναφοράς T μιας δεδομένης τιμής x μιας τυχαίας μεταβλητής X ορίζεται ως ο μέσος αριθμός ετών που μεσολαβεί μεταξύ δύο διαδοχικών εμφανίσεων της μεταβλητής με μέγεθος μεγαλύτερο ή ίσο του x . Για συνεχείς και στατιστικά ανεξάρτητες μεταβλητές (π.χ. παροχές αιχμής), η περίοδος επαναφοράς είναι το αντίστροφο της **πιθανότητας υπέρβασης**.
- ❑ Η περίοδος επαναφοράς αποτελεί θεμελιώδες μέγεθος του **υδρολογικού σχεδιασμού**, η επιλογή του οποίου εξαρτάται από τη σημασία του έργου. Κάθε υδραυλικό έργο σχεδιάζεται με δεδομένη πιθανότητα (υδρολογικής) αστοχίας.
- ❑ **Υδρολογική αστοχία** του έργου σημαίνει ανεπαρκής παροχέτευση του συνόλου της πλημμυρικής απορροής, όχι καταστροφή του έργου.
- ❑ Αν N η διάρκεια ζωής του έργου (π.χ. 40-50 χρόνια για συνήθη έργα Πολιτικού Μηχανικού) και T η περίοδος επαναφοράς με την οποία έχει γίνει ο υδρολογικός σχεδιασμός, τότε η **διακινδύνευση** του έργου, δηλαδή η πιθανότητα αστοχίας του στη διάρκεια των N ετών, ισούται με:

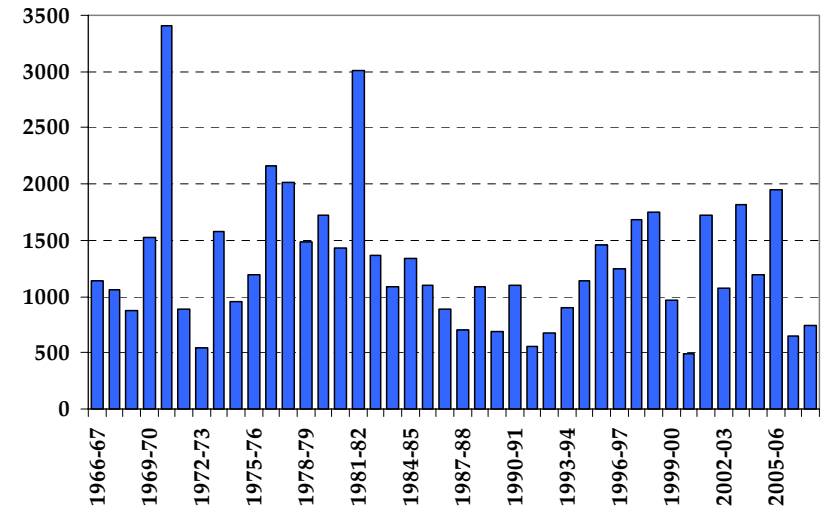
$$r = 1 - (1 - 1 / T)^N$$

Παράδειγμα: Η διακινδύνευση ενός μικρού αντιπλημμυρικού έργου (π.χ. δίκτυο ομβρίων), το οποίο σχεδιάζεται με περίοδο επαναφοράς 10 έτη και χρόνο ζωής 50 έτη, είναι 99.5%. Αν το έργο σχεδιαστεί για $T = 50$ έτη, τότε η διακινδύνευσή του είναι 63.6%, ενώ για $T = 100$ έτη, μειώνεται σε 39.5%.

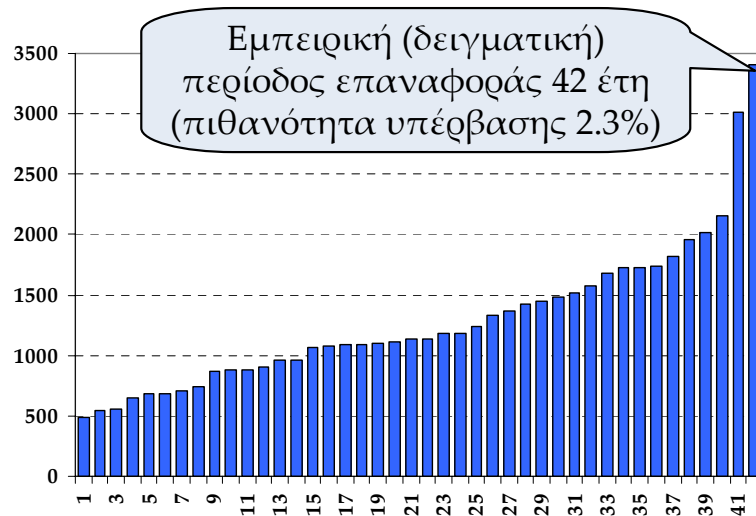
Πιθανοθεωρητική θεώρηση πλημμυρών



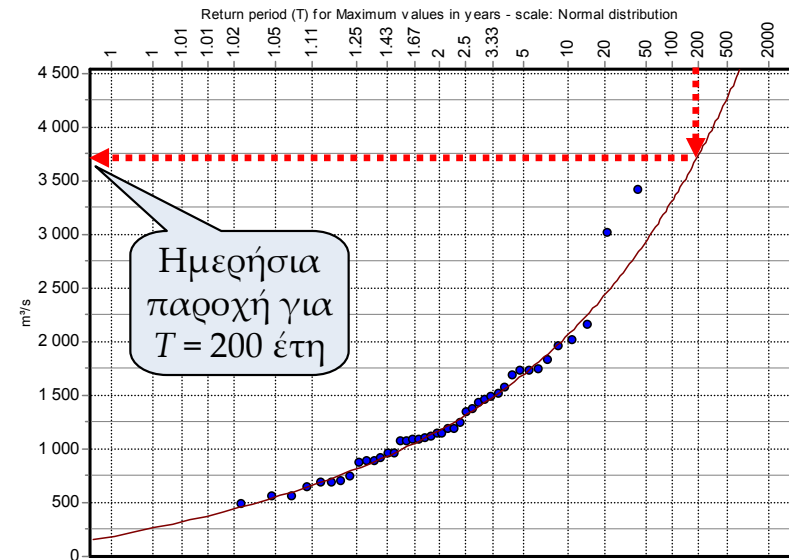
Βήμα 1: Χρονοσειρά μέσω ημερήσιων παροχών Αχελώου



Βήμα 2: Εξαγωγή μέγιστων ετήσιων τιμών



Βήμα 3: Κατάταξη δεδομένων σε φθίνουσα σειρά



Βήμα 4: Προσαρμογή στατιστικής κατανομής και επιλογή παροχής σχεδιασμού για περίοδο επαναφοράς T

Γιατί δεν εφαρμόζεται η απευθείας στατιστική ανάλυση των παροχών αιχμής στις μελέτες;

- ❑ Η υδρομετρική πληροφορία (χρονοσειρές παροχής) είναι πολύ περιορισμένη, ειδικά στην Ελλάδα, και σε κάθε περίπτωση αναφέρεται σε σχετικά μεγάλες λεκάνες, όπου υπάρχουν έργα αξιοποίησης υδατικών πόρων (π.χ. φράγματα ΔΕΗ).
- ❑ Τα συνήθη αντιπλημμυρικά έργα αφορούν σε μικρές, γενικά, λεκάνες (π.χ. αστικές), στις οποίες η εξέλιξη των πλημμυρικών φαινομένων είναι πολύ γρήγορη, με συνέπεια να απαιτείται η ύπαρξη χρονοσειρών παροχής **λεπτής χρονικής κλίμακας**, π.χ. μέσης ωριαίας ή και μικρότερης.
- ❑ Ακόμα και αν διατίθενται επαρκούς μήκους χρονοσειρές παροχής στη θέση ενδιαφέροντος, με την επιθυμητή χρονική διακριτότητα, οι τιμές των παροχών αιχμής που θα χρησιμοποιηθούν στη στατιστική ανάλυση είναι ιδιαίτερα επισφαλείς, καθώς δεν προέρχονται από μετρήσεις (είναι αδύνατη η πραγματοποίηση μετρήσεων παροχής κατά τη διάρκεια της πλημμύρας) αλλά εκτιμώνται από **εμπειρικές υδραυλικές σχέσεις μειωμένης αξιοπιστίας**, ως συνάρτηση της στάθμης.
- ❑ Η εκτίμηση της πλημμύρας σχεδιασμού (η οποία αναφέρεται σε συγκεκριμένη περίοδο επαναφοράς) γίνεται έμμεσα, με στατιστική ανάλυση των ισχυρών βροχοπτώσεων στην περιοχή μελέτης και εφαρμογή μοντέλων που αναπαριστούν το μετασχηματισμό της **βροχόπτωσης σχεδιασμού** σε πλημμύρα.
- ❑ Το απλούστερο και πλέον διαδεδομένο μοντέλο βροχής-απορροής, με ευρεία εφαρμογή στο σχεδιασμό αστρικών δικτύων ομβρίων, είναι η **ορθολογική μέθοδος**.

Η ορθολογική μέθοδος

- Η ορθολογική μέθοδος εφαρμόζεται συχνά στις υδρολογικές μελέτες για την εκτίμηση της **πλημμυρικής αιχμής**. Χρησιμοποιείται σε μικρές σχετικά υδρολογικές λεκάνες και βασίζεται στην αρχή ότι σε βροχές που παρουσιάζουν ομοιόμορφη ένταση και κατανομή στη λεκάνη, η μέγιστη απορροή εμφανίζεται όταν στην έξοδο της λεκάνης καταφθάσει το νερό από όλα τα σημεία της.
- Η ορθολογική μέθοδος εκφράζεται από την σχέση:

$$Q = 0.278 c i A$$

όπου:

Q (m³/s) : η αιχμή της απορροής

c : ο συντελεστής απορροής

i (mm/h) : η κρίσιμη ένταση της βροχόπτωσης, για συγκεκριμένη διάρκεια και περίοδο επαναφοράς

A (km²) : η επιφάνεια της λεκάνης

- Προκειμένου να εφαρμοστεί η μέθοδος για την εκτίμηση των παροχών αιχμής γίνονται οι εξής υποθέσεις:
 - Η περίοδος επαναφοράς της παροχής είναι ίση με την αυτήν της βροχής.
 - Η διάρκεια της κρίσιμης βροχής είναι ίση με το χρόνο συγκέντρωσης της λεκάνης, ώστε όλα τα σημεία της λεκάνης να συνεισφέρουν στην απορροή ταυτόχρονα.
 - Η ένταση της βροχής είναι σταθερή σε όλη τη διάρκεια του επεισοδίου.

Τυπικές τιμές περιόδου επαναφοράς για αντιπλημμυρικά έργα

ΑΓΩΓΟΙ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΩΝ

Μικρής κυκλοφορίας: 5-10 έτη

Μεσαίας κυκλοφορίας: 10-25 έτη

Μεγάλης κυκλοφορίας: 50-100 έτη

ΓΕΦΥΡΕΣ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΩΝ

Δευτερεύον: 10-50 έτη

Πρωτεύον δίκτυο: 50-100 έτη

ΑΠΟΣΤΡΑΓΓΙΣΗ ΑΓΡΟΤΙΚΩΝ

ΕΚΤΑΣΕΩΝ: 5-50 έτη

ΑΠΟΣΤΡΑΓΓΙΣΗ ΠΟΛΕΩΝ

Μικρές πόλεις: 2-25 έτη

Μεγάλες πόλεις: 25-50 έτη

ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΑ

Μικρής κυκλοφορίας: 5-10 έτη

Μεσαίας κυκλοφορίας: 10-25 έτη

Μεγάλης κυκλοφορίας: 50-100 έτη

ΑΝΑΧΩΜΑΤΑ

Σε αγροτικές εκτάσεις: 2-50 έτη

Σε πόλεις: 50-200 έτη

ΦΡΑΓΜΑΤΑ ΧΑΜΗΛΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ

Μικρά: 50-100 έτη

Μεσαία: >100 έτη

Μεγάλα: 50-100%

ΦΡΑΓΜΑΤΑ ΜΕΣΑΙΑΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ

Μικρά: >100 έτη

Μεσαία: 50-100%

Μεγάλα: 100%

ΦΡΑΓΜΑΤΑ ΥΨΗΛΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ

Μικρά: 50-100%

Μεσαία και μεγάλα: 100%

Η έννοια του συντελεστή απορροής

- Ο συντελεστής απορροής συνεκτιμά τα υδρολογικά ελλείμματα, και εξαρτάται από τα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά της λεκάνης, τις τρέχουσες συνθήκες υγρασίας, τη χωροχρονική κατανομή της βροχόπτωσης, κτλ.
- Με την αύξηση της περιόδου επαναφοράς, και συνεπώς της έντασης της βροχής, μειώνονται τα ελλείμματα και άρα αυξάνει ο συντελεστής απορροής.
- Ο εν λόγω συντελεστής εκτιμάται (σύμφωνα με την ΟΜΟΕ-ΑΣΥΕΟ, 2002) ως το άθροισμα τεσσάρων επιμέρους συντελεστών που εξαρτώνται, αντίστοιχα, από:
 - το ανάγλυφο της επιφάνειας της λεκάνης (c_1)
 - τη διηθητικότητα του εδάφους (c_2)
 - την έκταση και την πυκνότητα της φυτοκάλυψης (c_3)
 - την κλίση των πρανών και την αποθηκευτική ικανότητα σε χαμηλά σημεία της επιφάνειας της λεκάνης απορροής (c_4)
- Οι τυπικές τιμές κατά ΟΜΟΕ-ΑΣΥΕΟ (2002) ισχύουν για περιόδους επαναφοράς 5-10 έτη. Σύμφωνα με τους κανονισμούς, ο τελικός συντελεστής απορροής προσαυξάνεται κατά 10% για $T = 25$ έτη, κατά 20% για $T = 50$ έτη και κατά 25% για $T = 100$ έτη, παραμένοντας προφανώς μικρότερος της μονάδας.

Παρατήρηση: Για την εφαρμογή της ορθολογικής μεθόδου σε λεκάνες με διαφορετικά φυσιογραφικά χαρακτηριστικά, όπου σε κάθε επιμέρους περιοχή έκτασης A_i αντιστοιχεί διαφορετική τιμή του συντελεστή απορροής c_i , λαμβάνεται ένας σταθμισμένος συντελεστής, σύμφωνα με τη σχέση:

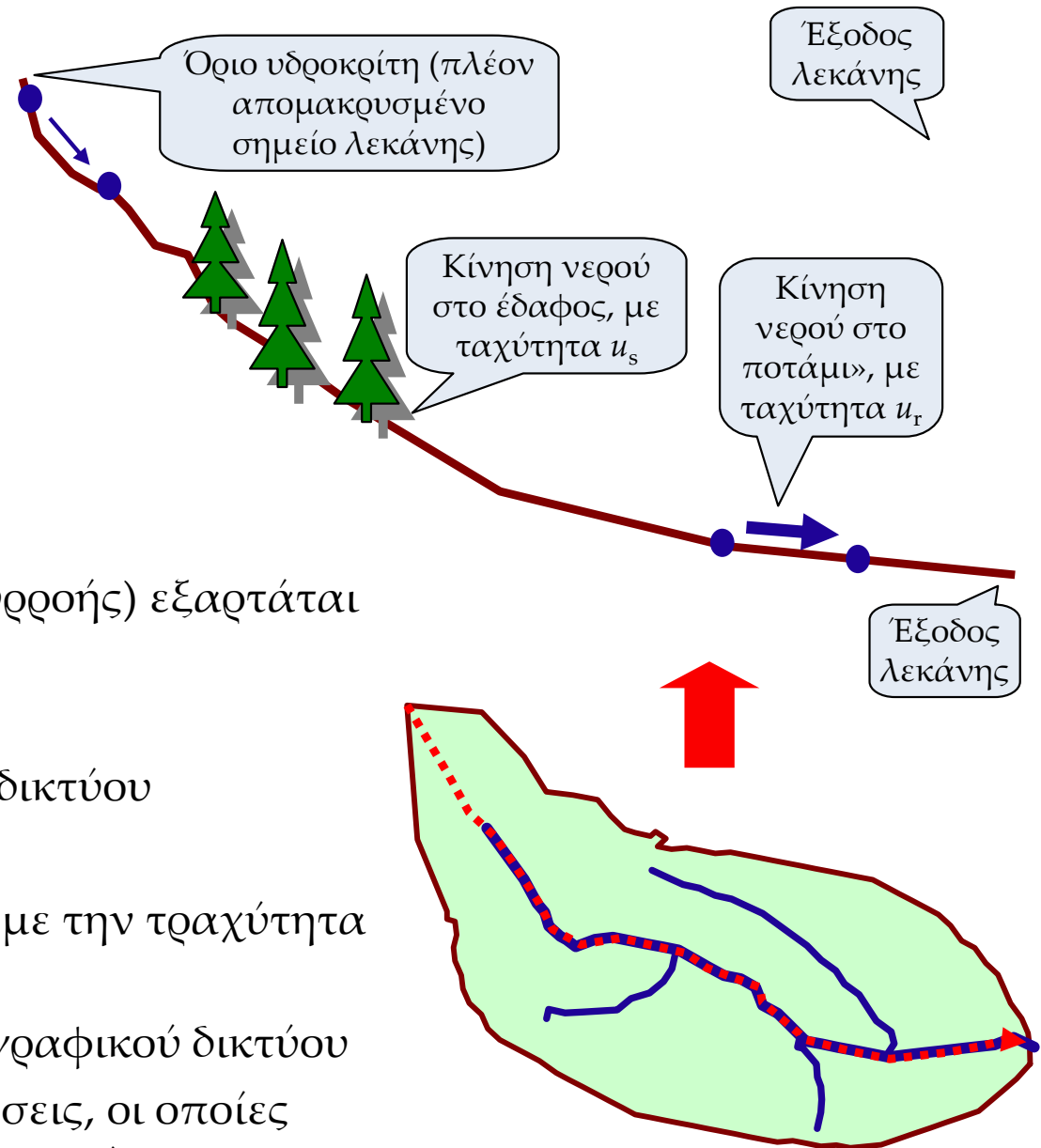
$$c = \sum c_i A_i / \sum A_i$$

Εκτίμηση επιμέρους συντελεστών απορροής κατά ΟΜΟΕ-ΑΣΥΕΟ (2002)

C ₁	0.28 – 0.35 Επικλινές ανάγλυφο, ανώμαλες επιφάνειες με μέσες κλίσεις >30%	0.20 – 0.28 Λοφώδες ανάγλυφο, με μέσες κλίσεις 10-30 %	0.14 – 0.20 Κυματώδες ανάγλυφο, με μέσες κλίσεις 5-10%	0.08 – 0.14 Σχετικά επίπεδο ανάγλυφο, με μέσες κλίσεις 0-5%
C ₂	0.12 – 0.16 Μη επηρεαζόμενο κάλυμμα εδάφους, είτε βραχώδες είτε μανδύας λεπτόκκοκου εδάφους αμελητέας διηθητικότητας	0.08 – 0.12 Βραδεία διηθητικότητα, άργιλοι ή αβαθή παχιά εδάφη χαμηλής διηθητικότητας, ατελώς ή πολύ μικρής αποστραγγιστικότητας	0.06 – 0.08 Κανονική διηθητικότητας καλά αποστραγγιζόμενο μικρής ή μεσσίας μακροϋφής εδάφη, αμμώδη παχιά εδάφη, ίλυες και ιλυώδη εδάφη	0.04 – 0.06 Υψηλή διηθητικότητα, βαθιά άμμος ή άλλο έδαφος που απορροφά το νερό, πολύ ελαφριά καλά αποστραγγιζόμενα εδάφη
C ₃	0.12 – 0.16 Βλάστηση που δεν επηρεάζει την απορροή, γυμνό έδαφος ή πολύ αραιά κάλυψη	0.08 – 0.12 Πτωχή ως μέτρια βλάστηση, καθαρές καλλιέργειες ή πτωχής φυσικής κάλυψης, <20% της αποχετευόμενης επιφάνειας με καλή κάλυψη	0.06 – 0.08 Μέτρια ως καλή βλάστηση, ~50% επιφάνειας είναι καλή φυτική γη ή δασώδες, <50% της επιφάνειας είναι καλλιέργειες	0.04 – 0.06 Καλή έως άριστη βλάστηση, ~90% της αποχετευόμενης επιφάνειας είναι καλή φυτική γη, δασώδες ή ισοδύναμης κάλυψης
C ₄	0.10 – 0.12 Αμελητέες ταπεινώσεις εδάφους και αβαθείς, μικροί διάδρομοι αποστράγγισης, καθόλου τέλματα	0.08 – 0.10 Χαμηλή αποθηκευτικότητα, καλά οριζόμενο σύστημα διαδρόμων αποστράγγισης, όχι λιμνάζοντα νερά ή τέλματα	0.06 – 0.08 Κανονική αποθηκευτικότητα, σημαντικές επιφανειακές ταπεινώσεις, λιμνάζοντα νερά και τέλματα	0.04 – 0.06 Υψηλή αποθηκευτικότητα, σύστημα αποστράγγισης όχι καλά οριζόμενο, μεγάλος αριθμός πλημμυριζόμενων επιφανειών ή τελμάτων

Η έννοια του χρόνου συγκέντρωσης

- Ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται ώστε μια σταγόνα βροχής να φτάσει από το πιο απομακρυσμένο σημείο μέχρι την έξοδο της λεκάνης.
- Η διαδρομή του νερού περιλαμβάνει:
 - Κίνηση στο έδαφος και σε μη διαμορφωμένες μισγάγγειες (πλαγιές), με ταχύτητα u_s .
 - Κίνηση στο υδρογραφικό δίκτυο (ποτάμι), με ταχύτητα $u_r \gg u_s$.
- Ο χρόνος συγκέντρωσης (ή χρόνος συρροής) εξαρτάται από παράγοντες όπως:
 - σχήμα και έκταση λεκάνης
 - μήκος πυκνότητα υδρογραφικού δικτύου
 - κλίση εδάφους
 - χαρακτηριστικά που σχετίζονται με την τραχύτητα του εδάφους (π.χ. φυτοκάλυψη)
 - υδραυλικά χαρακτηριστικά υδρογραφικού δικτύου
- Η εκτίμηση γίνεται με εμπειρικές σχέσεις, οι οποίες παρουσιάζουν μεταξύ τους έντονες αποκλίσεις.



Εκτίμηση χρόνου συγκέντρωσης

Giandotti

$$t_c = (4 A^{1/2} + 1.5 L) / (0.8 \Delta H^{0.5})$$

t_c (h) χρόνος συγκέντρωσης

A (km²) έκταση λεκάνης

L (km) μήκος κυρίου υδατορεύματος

ΔH (m) διαφορά μέσου υψόμετρου λεκάνης από το υψόμετρο στην έξοδο

Kirpich

$$t_c = 0.1947 L^{0.77} S^{-0.385}$$

t_c (min) χρόνος συγκέντρωσης

L (m) μέγιστο μήκος διαδρομής του νερού στη λεκάνη

S κλίση ανάμεσα στο υψηλότερο σημείο της λεκάνης και την έξοδο

Soil Conservation Service (SCS)

$$t_c = L^{1.15} / (7700 \Delta H^{0.38})$$

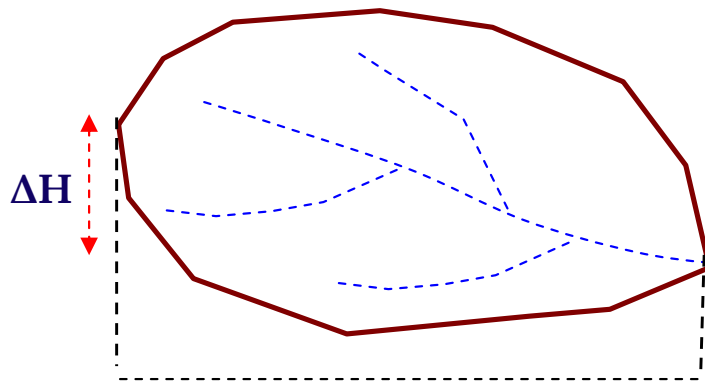
t_c (h) χρόνος συγκέντρωσης

L (ft) μήκος του κυρίου υδατορεύματος

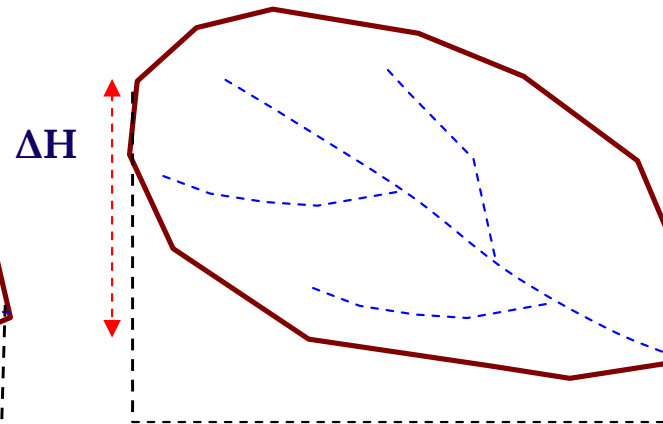
ΔH (ft) υψομετρική διαφορά μεταξύ του πλέον απομακρυσμένου σημείου και εξόδου

Επίδραση του χρόνου συγκέντρωσης στα χαρακτηριστικά της πλημμύρας

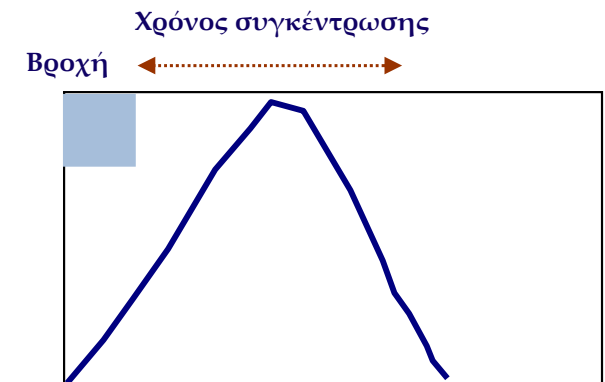
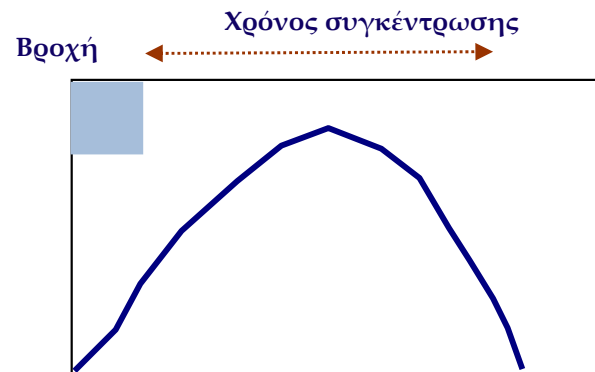
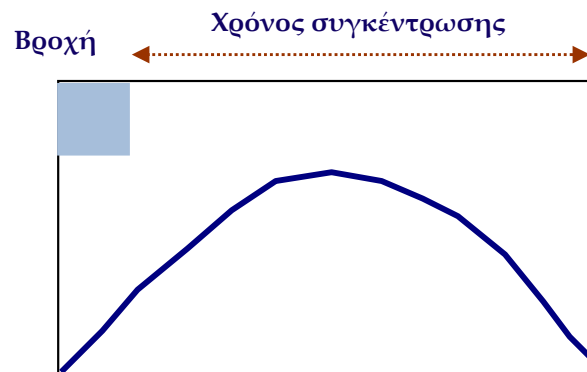
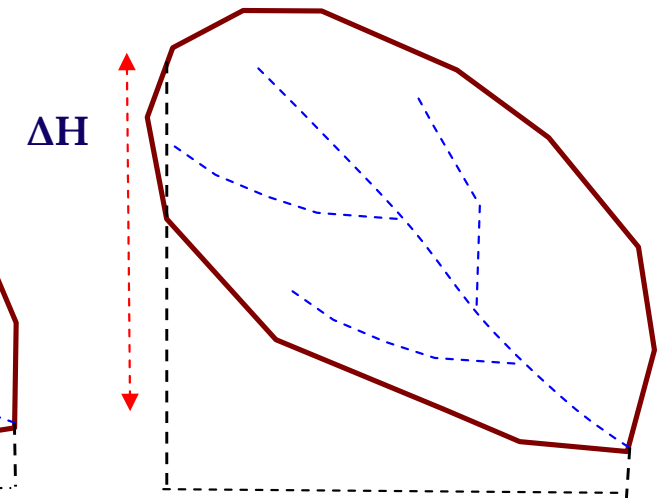
Μικρή κλίση - Μεγάλος χρόνος συγκέντρωσης



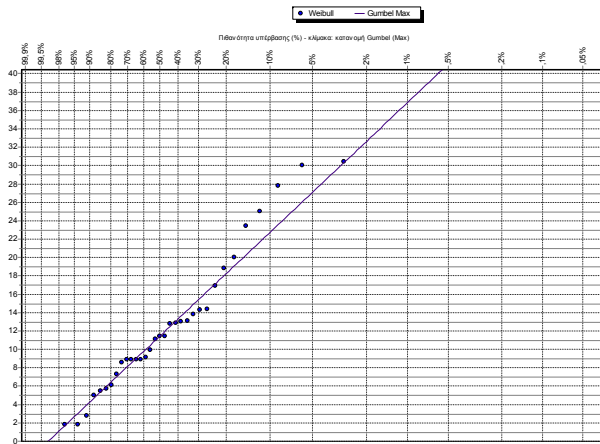
Μέτρια κλίση - Μέτριος χρόνος συγκέντρωσης



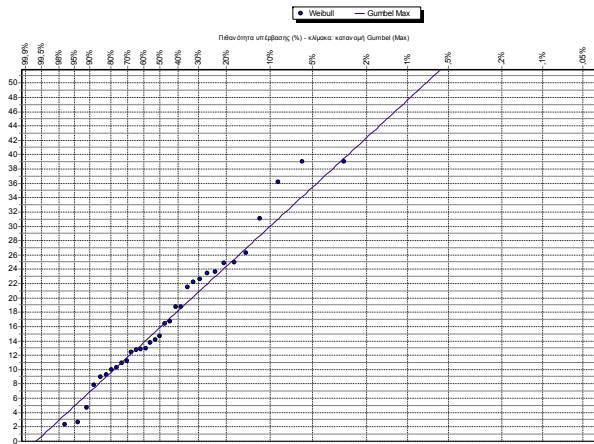
Μεγάλη κλίση - Μικρός χρόνος συγκέντρωσης



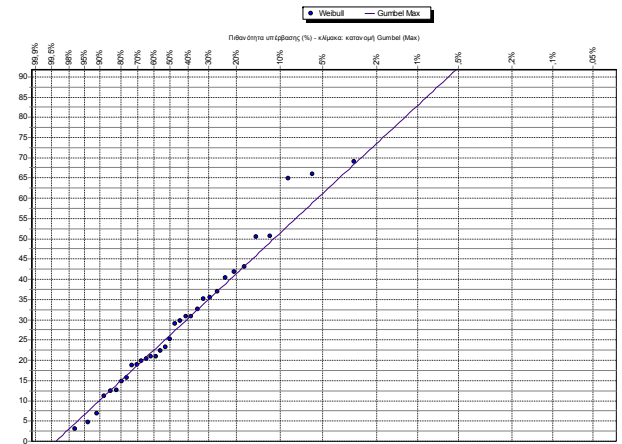
Όμβριες καμπύλες: Προσαρμογή στατιστικών κατανομών σε δείγματα ετήσιων μέγιστων υψών βροχής διαφόρων διαρκειών



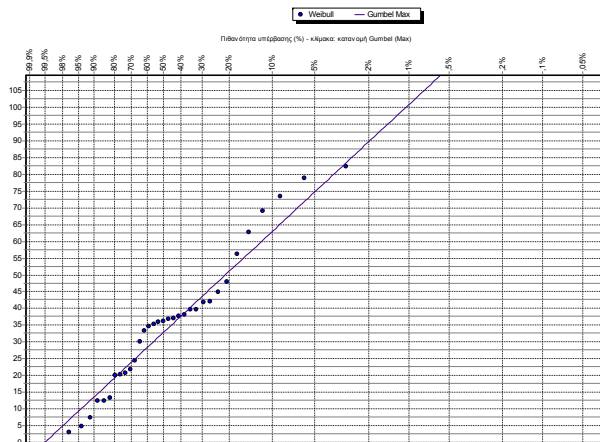
Μέγιστα ύψη βροχής 1 h



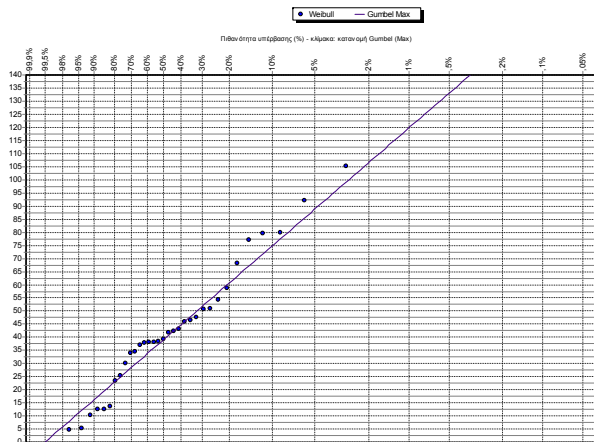
Μέγιστα ύψη βροχής 2 h



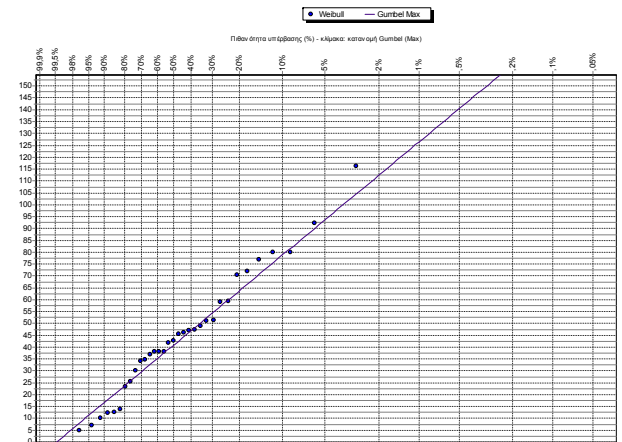
Μέγιστα ύψη βροχής 6 h



Μέγιστα ύψη βροχής 12 h



Μέγιστα ύψη βροχής 24 h



Μέγιστα ύψη βροχής 48 h

Όμβριες καμπύλες: Εξαγωγή σχέσεων ύψους (ή έντασης) βροχής – διάρκειας – περιόδου επαναφοράς

- Διατυπώνονται με δύο τρόπους:

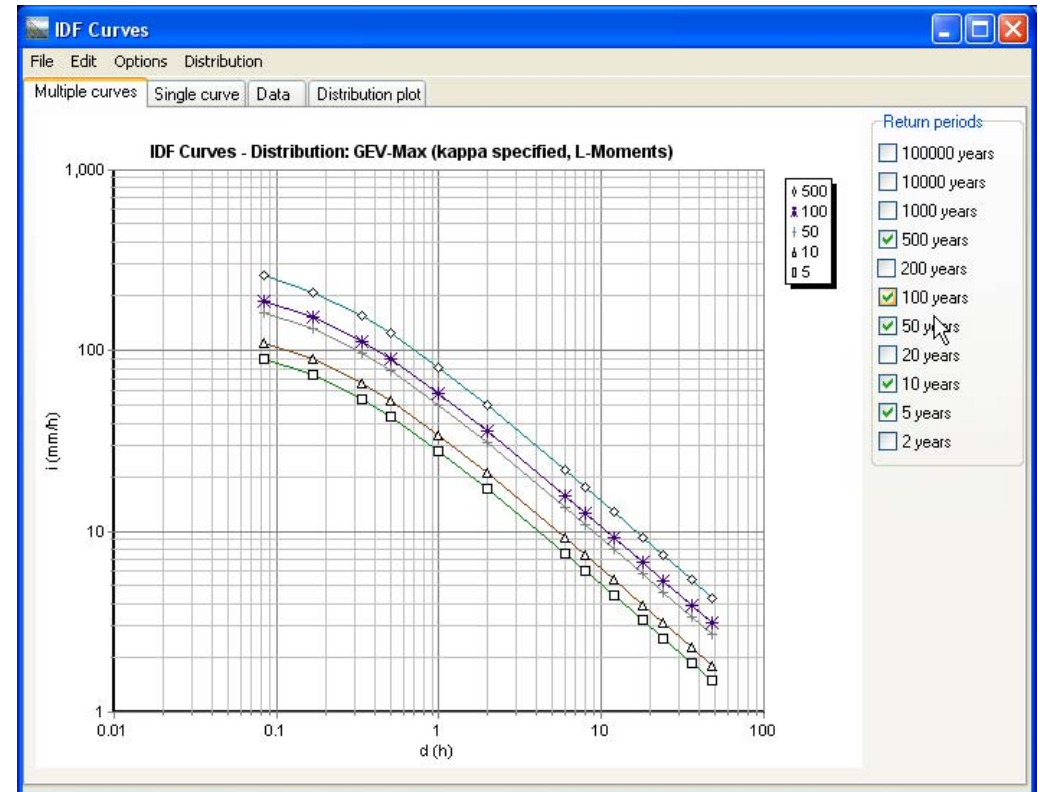
- Ως σύνολο εξισώσεων, κάθε μία από τις οποίες αντιστοιχεί σε δεδομένη περίοδο επαναφοράς
- Ως ενιαία έκφραση, που περιέχει την περίοδο επαναφοράς ως μεταβλητή

- Η γενική έκφραση είναι της μορφής:

$$i = \lambda (T - \beta)^{\kappa} / (d + \theta)^n$$

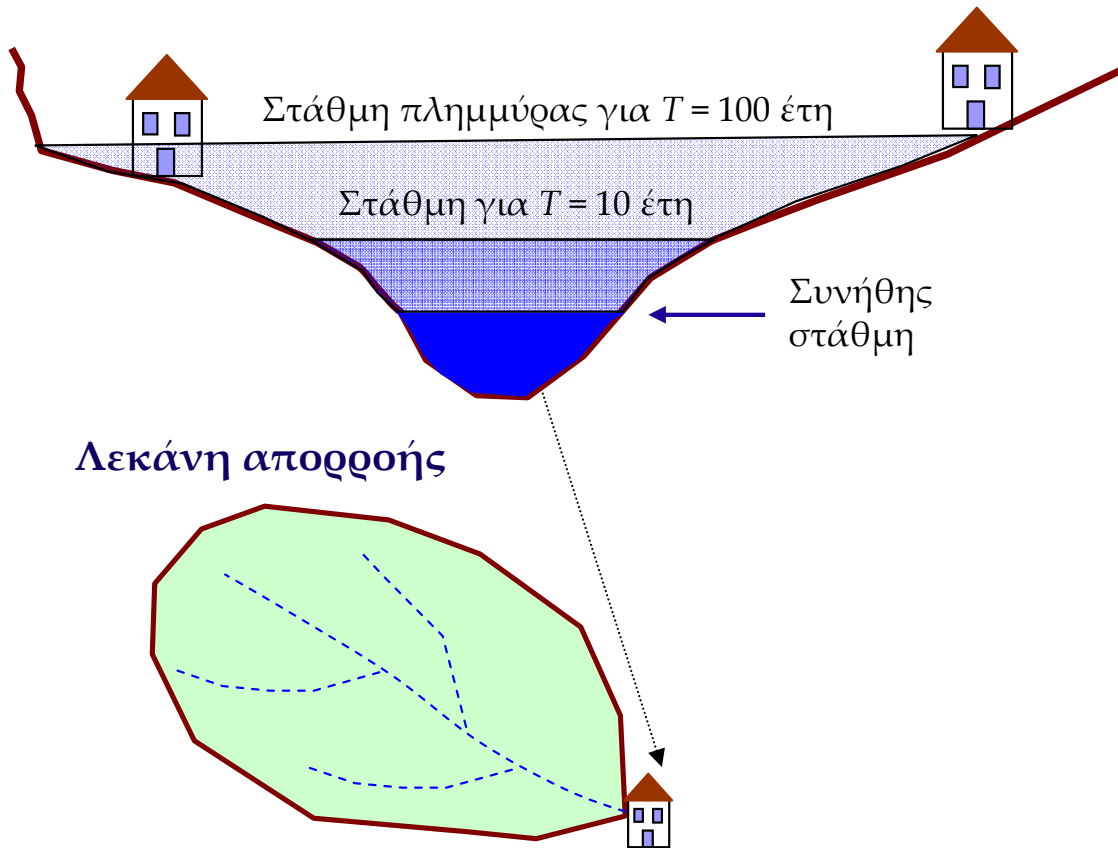
- Κατά κανόνα, οι όμβριες καμπύλες αναφέρονται σε σημείο (π.χ. στη θέση του βροχομετρικού σταθμού, απ' όπου έχει ληφθεί το δείγμα).

- Προκειμένου να γίνει αναγωγή της σημειακής εκτίμησης της έντασης (ή ύψους) βροχής στην επιφάνεια της λεκάνης, εφαρμόζονται μειωτικοί συντελεστές (τόσο μεγαλύτερη η απομείωση όσο μεγαλύτερη η έκταση της λεκάνης και όσο μικρότερη η διάρκεια της βροχής), ώστε να ληφθεί υπόψη η χωρική ετερογένεια του φαινομένου.

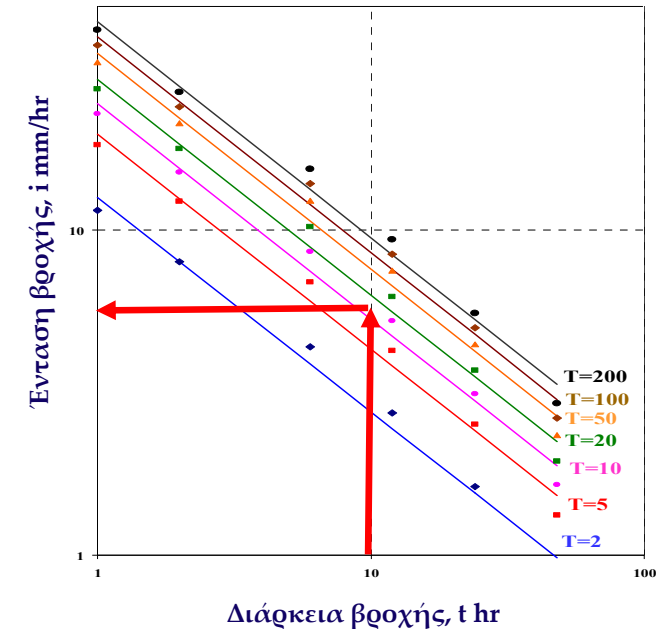


Σύνοψη: Βήματα εφαρμογής της μεθόδου

1. Επιλογή περιόδου επαναφοράς



2. Κατασκευή ομβρίων καμπυλών



3. Εκτίμηση χαρακτηριστικών λεκάνης

Έκταση: A (km^2)

Συντελεστής απορροής: c

Χρόνος συγκέντρωσης: t_c (h)

4. Εκτίμηση κρίσιμης έντασης βροχής για διάρκεια $d = t_c$

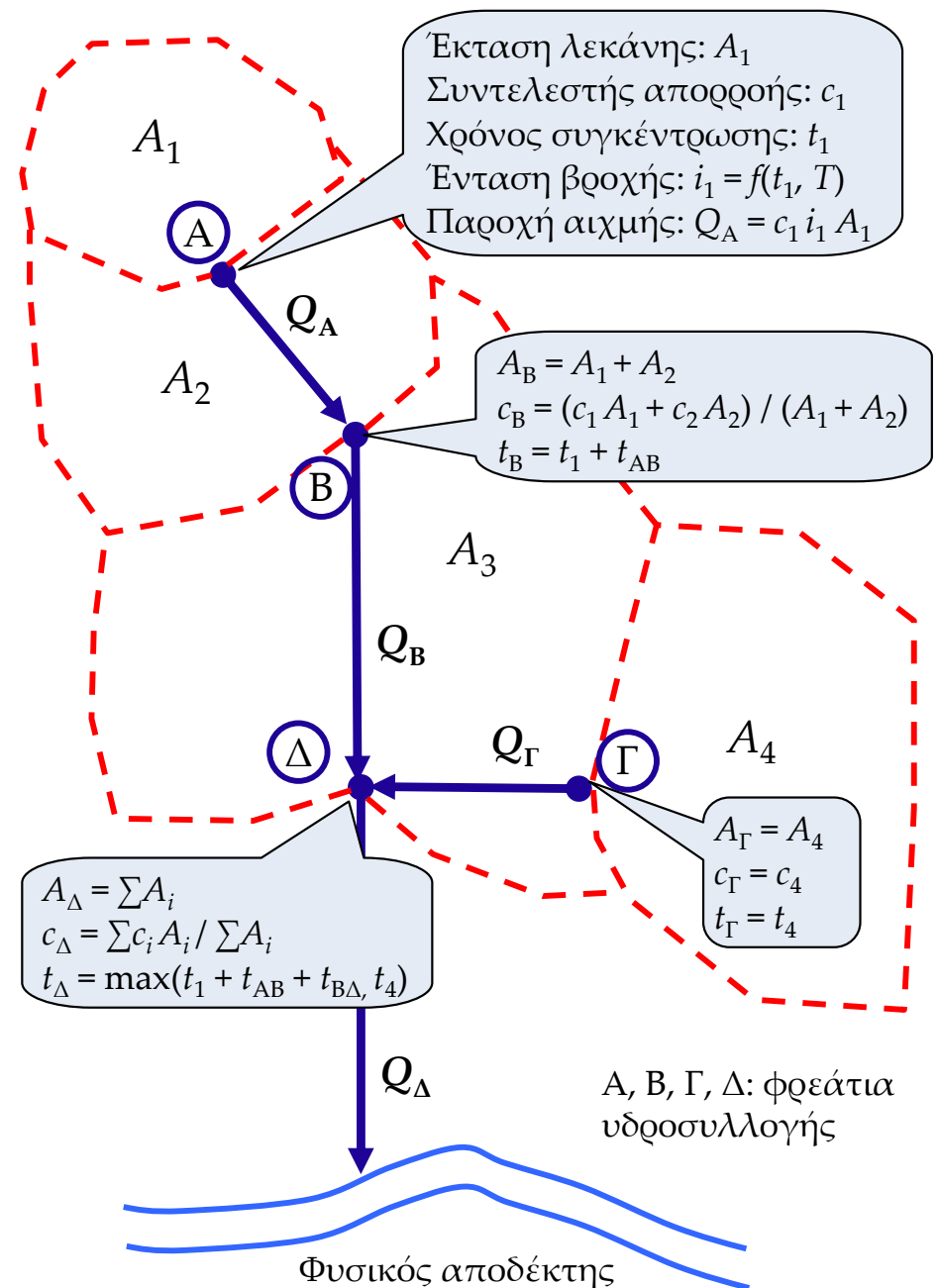
$$i_c \text{ (mm/h)} = i(d, T)$$

5. Εκτίμηση παροχής αιχμής

$$Q \text{ (m}^3\text{/s)} = 0.278 c i A$$

Υδρολογικός σχεδιασμός αγωγών ομβρίων

- Σε αστικές λεκάνες, η παροχή αιχμής των αγωγών αποχέτευσης ομβρίων εκτιμάται με την **ορθολογική μέθοδο**.
- Για τη χάραξη του **υδροκρίτη** ανάντη κάθε φρεατίου υδροσυλλογής λαμβάνονται υπόψη το ρυμοτομικό σχέδιο και οι κλίσεις των δρόμων.
- Σε κάθε σημείο ελέγχου, εκτιμάται η **συνολική παροχή αιχμής** της ανάντης λεκάνης, η οποία προκαλείται από βροχόπτωση διάρκειας ίσης με το χρόνο συγκέντρωσης της λεκάνης t_c , και έντασης που αντιστοιχεί σε διάρκεια $d = t_c$ και σε κατάλληλη περίοδο επαναφοράς T .
- Η εκτίμηση της κρίσιμης έντασης γίνεται μέσω της **όμβριας καμπύλης**, ήτοι μιας στατιστικής σχέσης της μορφής $i = f(d, T)$.
- Ο υδραυλικός έλεγχος γίνεται πάντοτε **από ανάντη προς κατάντη**, ενώ **δεν ισχύει η εξίσωση συνέχειας** κατά μήκος του δικτύου ομβρίων.



Εκτίμηση δεδομένων εισόδου ορθολογικής μεθόδου σε μελέτες αστικών αποχετεύσεων (1)

- Σύμφωνα με τις ελληνικές προδιαγραφές (ΠΔ 696/74), για τον συντελεστή απορροής σε **μη αστικές περιοχές** λαμβάνονται τυποποιημένες τιμές, οι οποίες αντιστοιχούν σε μικρές περιόδους επαναφοράς, της τάξης των 5-10 ετών:
 - Για ορεινές περιοχές: 0.60
 - Για λοφώδεις περιοχές: 0.50
 - Για πεδινές περιοχές: 0.30
- Σε αστικές περιοχές, πρέπει να εφαρμόζονται συντελεστές απορροής κατ' ελάχιστο ίσοι με τις αντίστοιχες αστικές. Γενικά, προτείνεται ο διαχωρισμός της περιοχής σε ζώνες, και η εκτίμηση ενός καθολικού (σταθμισμένου) συντελεστή απορροής.
- Χαρακτηριστικές τιμές κατά WPCF&ASCE (1976, 1990):
 - Κεντρικές εμπορικές περιοχές, πεζοδρόμια, δρόμοι, στέγες: 0.70-0.95
 - Πολυκατοικίες σε συνεχές σύστημα: 0.60-0.75
 - Πολυκατοικίες σε πανταχόθεν ελεύθερο σύστημα: 0.40-0.60
 - Μονοκατοικίες: 0.30-0.50
 - Υποαστικές περιοχές: 0.25-0.40
 - Βιομηχανικές ζώνες: 0.50 (ελαφρές βιομηχανίες) ως 0.90 (βαριές βιομηχανίες)
 - Ελεύθεροι χώροι (πάρκα, γήπεδα): 0.10-0.35

Εκτίμηση δεδομένων εισόδου ορθολογικής μεθόδου σε μελέτες αστικών αποχετεύσεων (2)

- Ο **χρόνος συγκέντρωσης** περιλαμβάνει δύο συνιστώσες:
 - τον χρόνο εισόδου t_e , δηλαδή το χρόνο που απαιτείται μέχρι η απορροή να οδηγηθεί στο δίκτυο (π.χ. μέσω φρεατίων υδροσυλλογής ή άμεσων συνδέσεων)
 - τον χρόνο ροής t_p κατά μήκος του αγωγού ομβρίων μέχρι τη θέση ελέγχου.
- Σύμφωνα με το ΠΔ 696/74, ο **χρόνος εισόδου** σε αστικές περιοχές λαμβάνεται 10 min. Γενικά, κυμαίνεται από 5 min (σε πυκνοδομημένες περιοχές, με άμεση σύνδεση με το δίκτυο ομβρίων) ως 30 min (για ήπιες κλίσεις και διεσπαρμένα φρεάτια υδροσυλλογής).
- Στα **μη αστικοποιημένα** τμήματα της λεκάνης, ο χρόνος εισόδου εκτιμάται με βάση κάποια από τις εμπειρικές βιβλιογραφικές μεθόδους (π.χ. Giandotti).
- Ο **χρόνος ροής** εκτιμάται κατά τον υδραυλικό υπολογισμό των αγωγών:

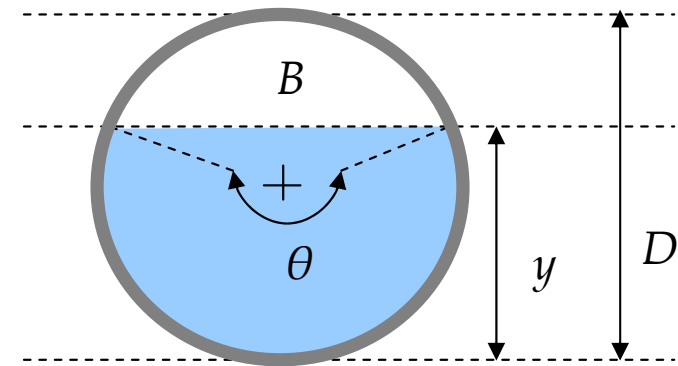
$$t_p = \sum L_i / u_i$$

όπου L_i είναι τα μήκη των διαδοχικών τμημάτων κατά μήκος μιας διαδρομής του δικτύου ομβρίων, μέχρι τη θέση ελέγχου, και u_i οι αντίστοιχες ταχύτητες ροής.

- Αν στη θέση ελέγχου καταλήγουν πολλές διαδρομές, τότε ως χρόνος συγκέντρωσης λαμβάνεται αυτός που αντιστοιχεί στη χρονικά μεγαλύτερη διαδρομή.
- Για την εκτίμηση της **κρίσιμης έντασης βροχής**, λαμβάνεται διάρκεια βροχής ίση με το χρόνο συγκέντρωσης και **περίοδος επαναφοράς** 2-10 έτη για αγωγούς σε οικιστικές περιοχές, 10-50 έτη για αγωγούς σε εμπορικές περιοχές και κεντρικούς συλλεκτήρες, και τουλάχιστον 50 έτη για διευθετήσεις αστικών υδατορευμάτων.

Υδραυλική των υπονόμων (1)

- Στις μελέτες αστικών αποχετεύσεων (όμβρια, ακάθαρτα) θεωρείται γενικά ροή με ελεύθερη επιφάνεια, μόνιμη, ομοιόμορφη.
- Στους υδραυλικούς υπολογισμούς εφαρμόζεται η σχέση του Manning, η οποία διατυπώνεται για κυκλικούς αγωγούς μερικής πλήρωσης.



Γεωμετρικά χαρακτηριστικά	Μερική πλήρωση ($y < D$)	Ολική πλήρωση ($y = y_0 = D$)
Λόγος πλήρωσης, y/D	$\frac{y}{D} = \frac{1 - \cos(\theta/2)}{2}$	$\frac{y}{D} = 1$
Γωνία, θ	$\theta = 2 \arccos(1 - 2y/D)$	$\theta_0 = 2\pi$
Εμβαδό υγρής διατομής, A	$A = (\theta - \sin\theta) D^2/8$	$A_0 = \pi D^2/4$
Βρεχόμενη περίμετρος, P	$P = \theta D/2$	$P_0 = \pi D$
Υδραυλική ακτίνα, R	$R = (1 - \sin\theta/\theta) D/4$	$R_0 = D/4$
Πλάτος στην ελεύθερη επιφάνεια, B	$B = D \sin(\theta/2) = 2\sqrt{y(D-y)}$	0
Λόγος A/A_0	$A/A_0 = (\theta - \sin\theta) / 2\pi$	1
Λόγος R/R_0	$R/R_0 = 1 - \sin\theta/\theta$	1

Πηγή: Κουτσογιάννης, 1999, σ. 70

$$V = \frac{1}{n} \left(1 - \frac{\sin\theta}{\theta}\right)^{2/3} \left(\frac{D}{4}\right)^{2/3} J^{1/2}$$

$$V_0 = \frac{1}{n_0} \left(\frac{D}{4}\right)^{2/3} J^{1/2}$$

$$\frac{V}{V_0} = \frac{n_0}{n} \left(1 - \frac{\sin\theta}{\theta}\right)^{2/3}$$

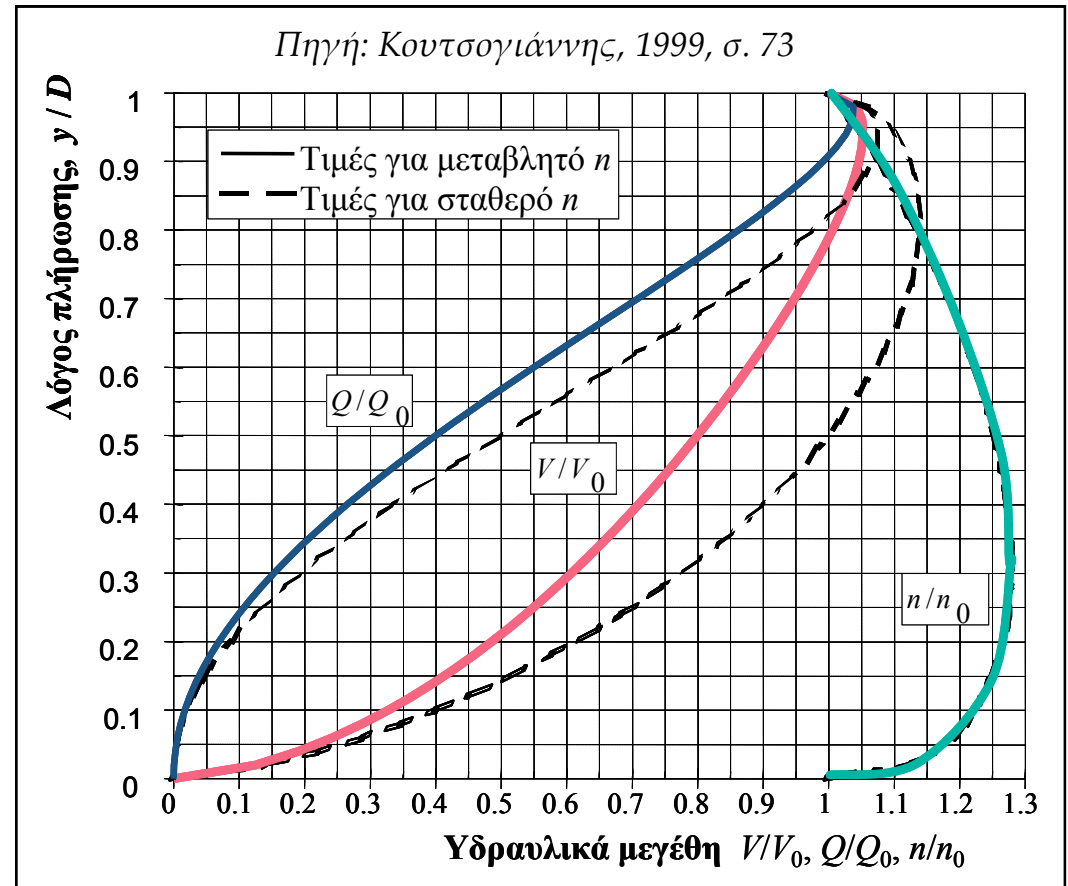
$$Q = \frac{1}{2 \cdot 4^{5/3}} \frac{1}{n} \theta \left(1 - \frac{\sin\theta}{\theta}\right)^{5/3} D^{8/3} J^{1/2}$$

$$Q_0 = \frac{\pi}{4^{5/3}} \frac{1}{n_0} D^{8/3} J^{1/2}$$

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{n_0}{n} \frac{\theta}{2\pi} \left(1 - \frac{\sin\theta}{\theta}\right)^{5/3}$$

Υδραυλική των υπονόμων (2)

- Ο συντελεστής τραχύτητας n εξαρτάται όχι μόνο από το υλικό αλλά κυρίως από κατασκευαστικούς παράγοντες (αρμοί, πλευρικές συνδέσεις, κακές ευθυγραμμίσεις), τις μεταφερόμενες στερεές ουσίες και τις τυχόν ρίζες.
- Τυπικές τιμές συντελεστή τραχύτητας:
 - Πειραματικά αποτελέσματα στις ΗΠΑ: $n_0 = 0.011-0.016$ για αγωγούς σε καλή κατάσταση, μέχρι 0.020 για αγωγούς σε κακή κατάσταση.
 - Σύσταση WPCF-ASCE: $n_0 = 0.011$ ως 0.015 , για συνήθη υλικά.
 - Συστήνεται $n_0 = 0.015$, εφόσον δεν γίνεται διάκριση μεταξύ γραμμικών και τοπικών ενεργειακών απωλειών.
- Λόγω της μεταβολής της γεωμετρίας της διατομής, ο συντελεστής τραχύτητας μεταβάλλεται με το βάθος ροής, οπότε τροποποιούνται οι εξισώσεις της υδραυλικής.
- Το μέγιστο της παροχής και της ταχύτητας δεν εμφανίζονται σε συνθήκες ολικής πλήρωσης.



Προδιαγραφές σχεδιασμού κυκλικών αγωγών αποχέτευσης

- **Εναλλαγές διαμέτρων**
 - Δεν επιτρέπεται η κατάντη διάμετρος να είναι μικρότερη από την ανάντη
 - Αν η κατάντη διάμετρος είναι μεγαλύτερη, τότε το υψόμετρο της άντυγας (άνω χείλος) στο πέρας του ανάντη αγωγού ταυτίζεται με το υψόμετρο της άντυγας στην αρχή του κατάντη.
- **Ελάχιστη διάμετρος**
 - Αγωγοί ομβρίων: $D_{\min} = 40 \text{ cm}$
 - Αγωγοί ακαθάρτων: $D_{\min} = 20 \text{ cm}$
- **Μέγιστο ποσοστό πλήρωσης**
 - Αγωγοί ομβρίων : $(y/D)_{\max} = 0.70$ (νέοι) ή 0.80 (παλαιοί)
 - Αγωγοί ακαθάρτων: $(y/D)_{\max} = 0.50-0.70$ (ανάλογα με τη διάμετρο του αγωγού)
- **Μέγιστη ταχύτητα** (αναφέρεται στην παροχή σχεδιασμού):
 - Αγωγοί ομβρίων: $V_{\max} = 6.0 \text{ m/s}$
 - Αγωγοί ακαθάρτων: $V_{\max} = 3.0 \text{ m/s}$
- **Ελάχιστη ταχύτητα** (αναφέρεται στο 10% της παροχεταιυτικότητας Q_0):
 - Αγωγοί ομβρίων: $V_{\min} = 0.6 \text{ m/s}$
 - Αγωγοί ακαθάρτων: $V_{\min} = 0.3 \text{ m/s}$

Ελάχιστες κλίσεις αγωγών αποχέτευσης

- Για $Q/Q_0 = 0.10$ προκύπτει $V/V_0 = 0.54$ (μεταβλητή τραχύτητα n).
- Η ελάχιστη ταχύτητα πλήρωσης για αγωγούς ομβρίων είναι $V_{0,min} = 1.11$ m/s και για αγωγούς ακαθάρτων είναι $V_{0,min} = 0.56$ m/s.
- Η ελάχιστη κλίση προκύπτει από τη σχέση του Manning:

$$J_{min} = 4^{4/3} n_0^2 V_{0,min}^2 / D^{4/3}$$
- Η ελάχιστη κλίση που μπορεί να υλοποιηθεί κατασκευαστικά είναι 0.1% (1 m/km).
- Με $J = J_{min}$ και για τη διάμετρο D εκτιμάται η παροχή πλήρωσης Q_0 , ενώ από τις σχέσεις $y/D = 0.70 \rightarrow Q/Q_0 = 0.71$, υπολογίζεται η αντίστοιχη ελάχιστη παροχή.

Διά- μετρος (cm)	Αγωγοί ακαθάρτων ($V_0 = 0.56$ m/s- μεταβλητή τραχύτητα με $n_0 = 0.015$)			Αγωγοί ομβρίων ($V_0 = 1.11$ m/s- μεταβλητή τραχύτητα με $n_0 = 0.015$)			Ελάχιστη κλίση αγω- γών ομβρ. & ακαθ. κατά τα πρότυπα των ΗΠΑ (για $V_0=0.6$ m/s, $n_0=0.015$) (m/km)
	Ελάχι- στη κλίση (m/km)	Επιτρε- πόμενη πλήρωση (y/D)	Αντίστοι- χη παροχή (l/s)	Ελάχι- στη κλίση (m/km)	Επιτρε- πόμενη πλήρωση (y/D)	Αντίστοι- χη παροχή (l/s)	
20	3.8	0.5	7.0	-	-	-	4.4
25	2.8	0.5	10.9	-	-	-	3.3
30	2.2	0.5	15.7	-	-	-	2.6
35	1.8	0.5	21.5	-	-	-	2.0
40	1.5	0.5	28.0	6.0	0.7	99.0	1.8
50	1.1	0.6	59.8	4.4	0.7	155	1.3
60	0.89 (1.0)	0.6	87.9 (93)	3.5	0.7	225	1.0
70	0.72 (1.0)	0.7	153 (180)	2.8	0.7	303	0.83
80	0.60 (1.0)	0.7	200 (257)	2.4	0.7	396	0.69
90	0.52 (1.0)	0.7	253 (352)	2.0	0.7	501	0.59
100	0.45 (1.0)	0.7	312 (467)	1.8	0.7	619	0.51
110	0.39 (1.0)	0.7	378 (602)	1.6	0.7	749	0.45
120	0.35 (1.0)	0.7	450 (759)	1.4	0.7	891	0.40
130	0.32 (1.0)	0.7	528 (939)	1.2	0.7	1046	0.36
140	0.29 (1.0)	0.7	612 (1144)	1.1	0.7	1213	0.33
150	0.26 (1.0)	0.7	703 (1376)	1.0	0.7	1393	0.30
160	0.24 (1.0)	0.7	799 (1634)	0.94 (1.0)	0.7	1584 (1624)	0.27
180	0.20 (1.0)	0.7	1012 (2237)	0.80 (1.0)	0.7	2005 (2237)	0.23
200	0.18 (1.0)	0.7	1249 (2962)	0.70 (1.0)	0.7	2476 (2962)	0.20

Πηγή: Κουτσογιάννης, 1999, σ. 84

Ερμηνεία των προδιαγραφών

- Ποιά είναι η σκοπιμότητα καθορισμού **ελάχιστων διαμέτρων**;
 - Αποφυγή κινδύνου εμφράξεων
- Ποια είναι η σκοπιμότητα καθορισμού **μέγιστων ποσοστών πλήρωσης**;
 - Αποφυγή κινδύνου λειτουργίας των αγωγών υπό πίεση.
 - Αποφυγή ασταθειών ροής
 - Εξασφάλιση επαρκούς αερισμού των λυμάτων
- Ποια είναι η σκοπιμότητα επιβολής **μέγιστων ορίων στην ταχύτητα**;
 - Αποφυγή διάβρωσης των τοιχωμάτων των αγωγών και φρεατίων.
 - Αποφυγή μεγάλου ύψους κινητικής ενέργειας (μεγάλο ύψος κινητικής ενέργειας → πιθανότητα γραμμής ενέργειας πάνω από το οδόστρωμα → πιθανή έξοδος λυμάτων στο δρόμο ή στα υπόγεια)
 - Αποφυγή υπερκρίσιμων ροών (σε περίπτωση υπερκρίσιμης ροής → πιθανή εμφάνιση υδραυλικών αλμάτων, ασταθειών ροής, στάσιμων κυμάτων, γενικά μη προβλέψιμες συνθήκες ροής)
- Ποια είναι η σκοπιμότητα επιβολής **ελάχιστων ορίων στην ταχύτητα-κλίση**;
 - Αποφυγή αποθέσεων φερτών στους αγωγούς και τα φρεάτια.
 - Εξασφάλιση καλού αερισμού των λυμάτων (κακός αερισμός των λυμάτων → δημιουργία αναερόβιων συνθηκών → πιθανότητα παραγωγής υδροθείου → πιθανή διάβρωση των τοιχωμάτων αγωγών και φρεατίων)

Διαστασιολόγηση κυκλικού αγωγού ομβρίων

- Επιλέγεται η κλίση J του αγωγού, με βάση την τοπογραφία ή άλλες απαιτήσεις
 - Γενικά, ο αγωγός τοποθετείται παράλληλα στο έδαφος
 - Σε εδάφη με πολύ μικρή, οριζόντια ή αρνητική κλίση εφαρμόζεται απευθείας η ελάχιστη κλίση (η οποία εξαρτάται από την παροχή σχεδιασμού)
- Για δεδομένη παροχή σχεδιασμού Q , υπολογίζεται η ελάχιστη απαιτούμενη διάμετρος, με βάση το μέγιστο αποδεκτό ποσοστό πλήρωσης (γενικά θεωρείται μεταβλητή τραχύτητα, με $n_0 = 0.015$):

$$y / D = 0.70 \rightarrow Q / Q_0 = 0.71 \rightarrow D = [4^{5/3} n_0 Q_0 / \pi J^{1/2}]^{3/8}$$

- Η διάμετρος που υπολογίζεται στρογγυλεύεται στην αμέσως επόμενη διαθέσιμη διάμετρο εμπορίου (κατ' ελάχιστον 40 cm για όμβρια, με διαβάθμιση ανά 10 cm).
- Η διάμετρος που επιλέγεται τελικά πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με την ανάντη.
- Ελέγχεται ο αγωγός ως προς τους περιορισμούς ελάχιστης και μέγιστης ταχύτητας:
 - Υπολογίζονται η ταχύτητα και η παροχή πλήρωσης:
$$V_0 = (1 / n_0) (D / 4)^{2/3} J^{1/2}, Q_0 = V_0 (\pi D^2 / 4)$$
 - Υπολογίζεται η ταχύτητα ροής ως εξής:
$$Q / Q_0 \rightarrow y / D \rightarrow V / V_0 \rightarrow V$$
 - Αν $V > 6.0$ m/s απαιτείται μείωση της κλίσης, π.χ. με βαθμιδωτή χάραξη του αγωγού (φρεάτια πτώσης), και αύξηση της διαμέτρου, ώστε να τηρείται το $(y/D)_{\max}$
 - Υπολογίζεται η ταχύτητα που αντιστοιχεί στο 10% της Q_0 , ήτοι $V_{\min} = 0.54V_0$
 - Αν $V_{\min} < 0.6$ m/s εφαρμόζεται η ελάχιστη κλίση για την επιλεχθείσα διάμετρο.

Βιβλιογραφία

- Κουτσογιάννης, Δ., και Θ. Ξανθόπουλος, *Τεχνική Υδρολογία*, Έκδοση 3, 418 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1999 (<http://itia.ntua.gr/el/docinfo/115/>).
- Κουτσογιάννης, Δ., *Σχεδιασμός Αστικών Δικτύων Αποχέτευσης*, Έκδοση 3.1, 202 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1999 (<http://itia.ntua.gr/el/docinfo/123/>).
- Οδηγίες Μελετών Οδικών Έργων (ΟΜΟΕ), Τεύχος 8: Αποχέτευση-Στράγγιση-Υδραυλικά Έργα Οδών, ΥΠΕΧΩΔΕ, 2002.
- Π.Δ. 696/1974, Περί αμοιβών μηχανικών δια σύνταξιν μελετών επίβλεψιν, παραλαβή κλπ. συγκοινωνιακών, υδραυλικών και κτιριακών έργων, ως και τοπογραφικών, κτηματογραφικών και χαρτογραφικών εργασιών, και των σχετικών τεχνικών προδιαγραφών μελετών.
- Water Pollution Control Federation (WPCF) and American Society of Civil Engineers (ASCE), *Design and Construction of Sanitary and Storm Sewers*, WPCF Manual of Practice No 9, ASCE Manual of Engineering Practice No 37, 1976.