

# Υδραυλικές Κατασκευές – Φράγματα

## 9ο εξάμηνο Σχολής Πολιτικών Μηχανικών



# Διάλεξη 8<sup>η</sup>: Υδρολογία φραγμάτων

---

**Ανδρέας Ευστρατιάδης, Σπύρος Μίχας & Δημήτρης Δερματάς,**  
Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Ακαδημαϊκό έτος 2015-16

# Υδρολογικές μελέτες φραγμάτων

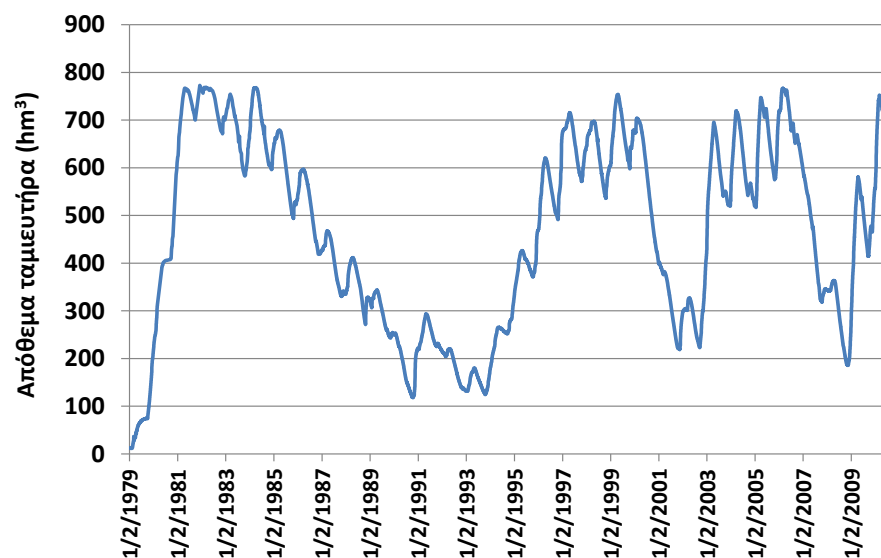
- Εκτίμηση **εισροών** στη θέση του φράγματος (απορροή ανάντη λεκάνης):
  - Εκτίμηση ωφέλιμης χωρητικότητας ταμιευτήρα (διαστασιολόγηση)
  - Μελέτη λειτουργίας ταμιευτήρα
  - Κατάρτιση σχεδίου διαχείρισης των υδατικών πόρων σε κλίμακα λεκάνης απορροής ή υδροσυστήματος
- Εκτίμηση λοιπών υδρολογικών μεγεθών **υδατικού ισοζυγίου** ταμιευτήρα (βροχόπτωση στην επιφάνεια του ταμιευτήρα, απώλειες λόγω εξάτμισης, υπόγειες διαφυγές).
- Εκτίμηση **πλημμυρών σχεδιασμού** σήραγγας εκτροπής και υπερχειλιστή (περιλαμβάνει και στατιστική ανάλυση των ισχυρών βροχοπτώσεων της ευρύτερης λεκάνης).
- Εκτίμηση **περιβαλλοντικής παροχής** (ροή που πρέπει να διοχετεύεται κατάντη του φράγματος, για προστασία του ποτάμιου συστήματος και των οικοσυστημάτων).
- Εκτίμηση **στερεοαπορροής** (φερτά)
  - Διαστασιολόγηση νεκρού όγκου ταμιευτήρα
  - Εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων λόγω διακοπής της στερεοαπορροής
- Τυπικές **χρονικές κλίμακες** υδρολογικών αναλύσεων:
  - μηνιαία (υδρολογικός σχεδιασμός, λειτουργία και διαχείριση ταμιευτήρα, φερτά)
  - ημερήσια (οικολογική παροχή)
  - ωριαία (πλημμύρες)

# Τυπικά προβλήματα υδρολογίας φραγμάτων: Εκτίμηση φυσικοποιημένων παροχών λεκάνης φράγματος

- ❑ Σε υφιστάμενα έργα, απαιτείται η εκτίμηση των φυσικοποιημένων απορροών στη θέση του φράγματος, για το διάστημα λειτουργίας του ταμιευτήρα.
- ❑ Η χρονοσειρά των φυσικοποιημένων απορροών χρησιμοποιείται σε διαχειριστικές και περιβαλλοντικές μελέτες (π.χ. για τον προσδιορισμό των περιβαλλοντικών παροχών).
- ❑ Η φυσικοποιημένη απορροή εκτιμάται από την εξίσωση **υδατικού ισοζυγίου** του ταμιευτήρα, εφόσον οι υπόλοιπες μεταβλητές είναι γνωστές, από μετρήσεις (π.χ., μεταβολή αποθέματος, εκροές, βροχόπτωση, εξάτμιση) ή εκτιμήσεις (π.χ., υπόγειες διαφυγές).
- ❑ Οι εκτιμήσεις βάσει του υδατικού ισοζυγίου είναι λιγότερο ακριβείς όσο μικρότερο είναι το **μέγεθος του ταμιευτήρα** και όσο μικρότερη η **χρονική κλίμακα** των υπολογισμών.

## Απορροή Μόρνου – μεταβλητές ισοζυγίου:

- ❑ Μεταβολή αποθέματος (+ ή -)
- ❑ Εισροές από τη σήραγγα Ευήνου-Μόρνου (+)
- ❑ Βροχόπτωση στην επιφάνεια του ταμιευτήρα (+)
- ❑ Εκροές μέσω της σήραγγας Γκιώνας (-)
- ❑ Εξάτμιση από την επιφάνεια του ταμιευτήρα (-)
- ❑ Υπόγειες διαφυγές από τον Πύρνο (στοές αποστράγγισης) και μέσω του φράγματος (-)
- ❑ Υπερχειλίσσεις (-)

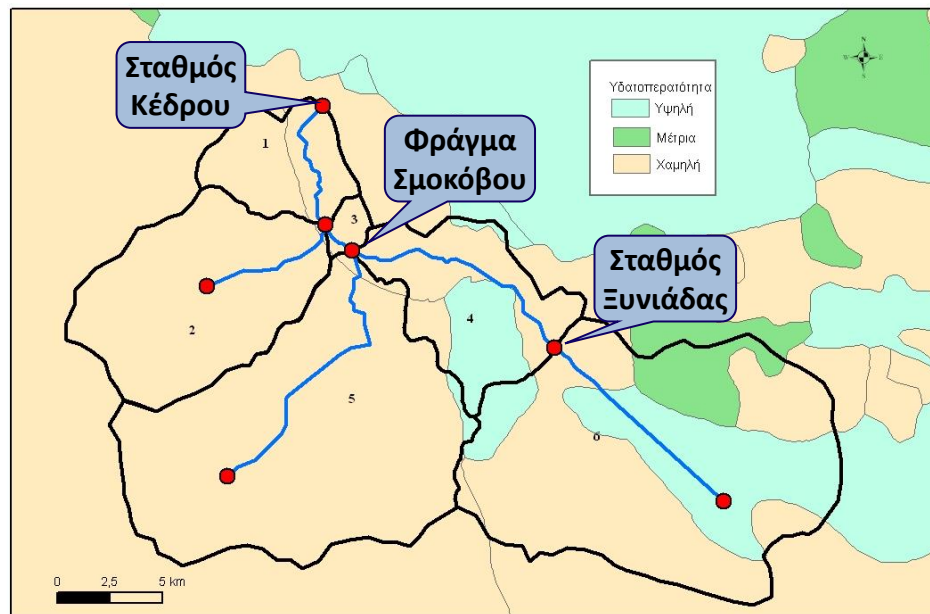


# Τυπικά προβλήματα υδρολογίας φραγμάτων: Εκτίμηση εισροών από μετρήσεις σε άλλες θέσεις της λεκάνης

- ❑ Σε αρκετές περιπτώσεις διατίθενται μετρήσεις παροχής σε διαφορετικές θέσεις της λεκάνης σε σχέση με τη θέση κατασκευής του έργου.
- ❑ Η συνήθης «μεταφορά» της απορροής με απλές εμπειρικές σχέσεις (π.χ. λόγος εμβαδών υπολεκανών) έχει αποδειχθεί εξαιρετικά επισφαλής, λόγω της έντονης ετερογένειας των φυσιογραφικών χαρακτηριστικών της λεκάνης και, συνεπώς, των υδρολογικών διεργασιών.
- ❑ Η εκτίμηση της απορροής στη θέση ενδιαφέροντος γίνεται μέσω **υδρολογικού μοντέλου**, λαμβάνοντας υπόψη τις μετρημένες απορροές στην εκτίμηση των παραμέτρων του μοντέλου.



Λεκάνη φρ. Γαδουρά (Ευστρατιάδης και Ρόζος, 2010)



Λεκάνη φρ. Σμοκόβου (Ευστρατιάδης κ.ά., 2008)

# Τυπικά προβλήματα υδρολογίας φραγμάτων: Εκτίμηση εισροών σε πολύπλοκα υδρογεωλογικά συστήματα

- Η πολύπλοκη γεωλογική και τεκτονική δομή της Ελλάδας διαμορφώνει σύνθετες υδρογεωλογικές συνθήκες (π.χ. καρστικά συστήματα), δημιουργώντας σημαντικές δυσκολίες στην οριοθέτηση των υδροφορέων, που μπορεί να τροφοδοτούνται από διαφορετικές επιφανειακές λεκάνες ή να εκφορτίζονται σε διαφορετικές λεκάνες.
- Στις υδρολογικές μελέτες θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι **αλληλεπιδράσεις των επιφανειακών και υπόγειων νερών** (κατεισδύσεις, διηθήσεις, υπόγεια υδραυλική επικοινωνία γειτονικών λεκανών, διαφυγές).



**Καταβόθρες Χώνου** (φυσική αποστράγγιση οροπεδίου Λασιθίου): Εκτιμάται ότι το 30 ως 50% της απορροής εκφορτίζεται στη λεκάνη Αποσελέμη, μέσω των καρστικών πηγών Κασταμονίτσας





# Τυπικά προβλήματα υδρολογίας φραγμάτων: Εκτίμηση εισροών χωρίς μετρήσεις (ή με ανεπαρκείς μετρήσεις)

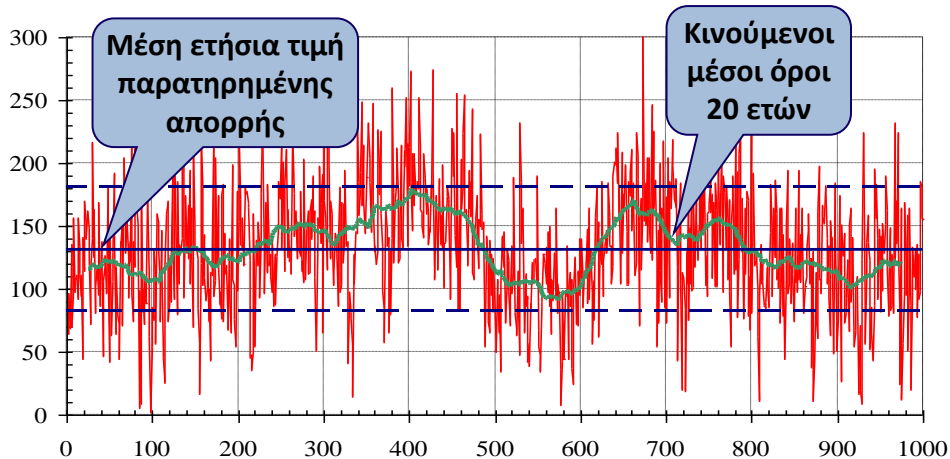
- Εφαρμόζονται μοντέλα, που εκτιμούν τις εισροές συναρτήσει των υδρομετεωρολογικών μεταβλητών που σχετίζονται με την παραγωγή της απορροής (βροχόπτωση, θερμοκρασία), λαμβάνοντας υπόψη τα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά της λεκάνης.
- Οι παράμετροι των μοντέλων εκτιμώνται είτε εμπειρικά (με βάση την υδρολογική εμπειρία) είτε με βάση ημιεμπειρικές σχέσεις της βιβλιογραφίας (**περιοχικές σχέσεις**), που βασίζονται σε επεξεργασίες υδρολογικών δεδομένων σε άλλες λεκάνες.
- Η ακρίβεια των εκτιμήσεων περιορίζεται λόγω των **αβεβαιοτήτων** που εισάγει η απουσία μετρημένων παροχών, που θα επέτρεπε την **βαθμονόμηση** και αξιολόγηση της **προγνωστικής ικανότητας** του μοντέλου.
- Ακόμα και η ύπαρξη μετρήσεων, δεν εξασφαλίζει ικανοποιητική ακρίβεια, εφόσον τα δείγματα μετρήσεων (παρατηρημένες απορροές) είναι ποσοτικά ή/και ποιοτικά ανεπαρκή.

## Το παράδειγμα του ταμιευτήρα Μόρνου:

- Εκτίμηση μέσης ετήσιας απορροής  $375 \text{ hm}^3$ , με βάση περιορισμένο δείγμα μετρήσεων παροχών σε δύο ανάντη υδρομετρικούς σταθμούς (Στενό και Περιβόλι).
- Σχεδιασμός ταμιευτήρα ωφέλιμης χωρητικότητας  $630 \text{ hm}^3$ .
- Επανεκτίμηση μέσης ετήσιας απορροής  $235 \text{ hm}^3$ , με βάση το υδατικό ισοζύγιο του ταμιευτήρα για το διάστημα 1980-2010.
- Η πλεονάζουσα χωρητικότητα του Μόρνου επέτρεψε την κατασκευή πολύ μικρότερου έργου στον Εύηνο (μέση απορροή  $275 \text{ hm}^3$ , χωρητικότητα  $112 \text{ hm}^3$ ), που λειτουργεί ως έργο εκτροπής.

# Τυπικά προβλήματα υδρολογίας φραγμάτων: Επέκταση χρονοσειράς εισροών – συνθετικές χρονοσειρές

- Ενώ για τον ασφαλή σχεδιασμό ή διαχείριση των ταμιευτήρων θα ήταν επιθυμητή η γνώση της μακροχρόνιας χρονικής εξέλιξης των εισροών, εξαιτίας της έντονα μη γραμμικής (χαοτικής) φύσης των υδροκλιματικών διεργασιών, είναι ανέφικτη η πραγματοποίηση προσδιοριστικών προγνώσεων για χρονικό ορίζοντα πέραν των λίγων ημερών.
- Οι υδρολογικές αναλύσεις με χρήση ιστορικών δειγμάτων εισροών αντενδείκνυται γιατί:
  - το μήκος τους είναι υπερβολικά μικρό για την εμπειρική εκτίμηση των ζητούμενων πιθανοτήτων αστοχίας (π.χ. για  $\alpha = 1\%$  απαιτείται δείγμα 1 000 ως 10 000 ετών)
  - η πιθανότητα επανάληψης των ίδιων χρονοσειρών στο μέλλον είναι μηδενική.
- Η ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας γίνεται με τη χρήση συνθετικών εισροών μεγάλου μήκους, που είναι στατιστικά συνεπείς με τις παρατηρημένες χρονοσειρές του παρελθόντος.
- Η παραγωγή των συνθετικών χρονοσειρών απορροής γίνεται μέσω εξειδικευμένων **στοχαστικών μοντέλων**, που οφείλουν να αναπαράγουν, εκτός από τα στατιστικά χαρακτηριστικά των ιστορικών δειγμάτων, καθώς και τις μακροχρόνιες υδροκλιματικές μεταβολές (υδρολογική εμμονή ή δυναμική Hurst-Kolmogorov).



Συνθετική χρονοσειρά ετήσιου ύψους απορροής Μόρνου (1000 έτη)

# Τυπικά προβλήματα υδρολογίας φραγμάτων: Εκτίμηση πλημμυρών σχεδιασμού έργων ασφαλείας

- ❑ Τα έργα ασφαλείας (σήραγγα εκτροπής και υπερχειλιστής) σχεδιάζονται για πλημμύρες μεγάλης και πολύ μεγάλης περιόδου επαναφοράς.
- ❑ Σε αντίθεση με τα κοινά αντιπλημμυρικά έργα (π.χ. δίκτυα ομβρίων), απαιτείται η πλήρης χρονική εξέλιξη της πλημμύρας (**πλημμυρογράφημα**) και όχι μόνο η εκτίμηση της παροχής αιχμής.
- ❑ Τα βασικά μεγέθη σχεδιασμού είναι ο **όγκος ανάσχεσης** και η **παροχή αιχμής κατάντη**.



**Φράγμα Μαραθώνα:** Υπερπήδηση προφράγματος και κατάκλυση περιοχής θεμελίωσης φράγματος (αρχείο ΕΥΔΑΠ)

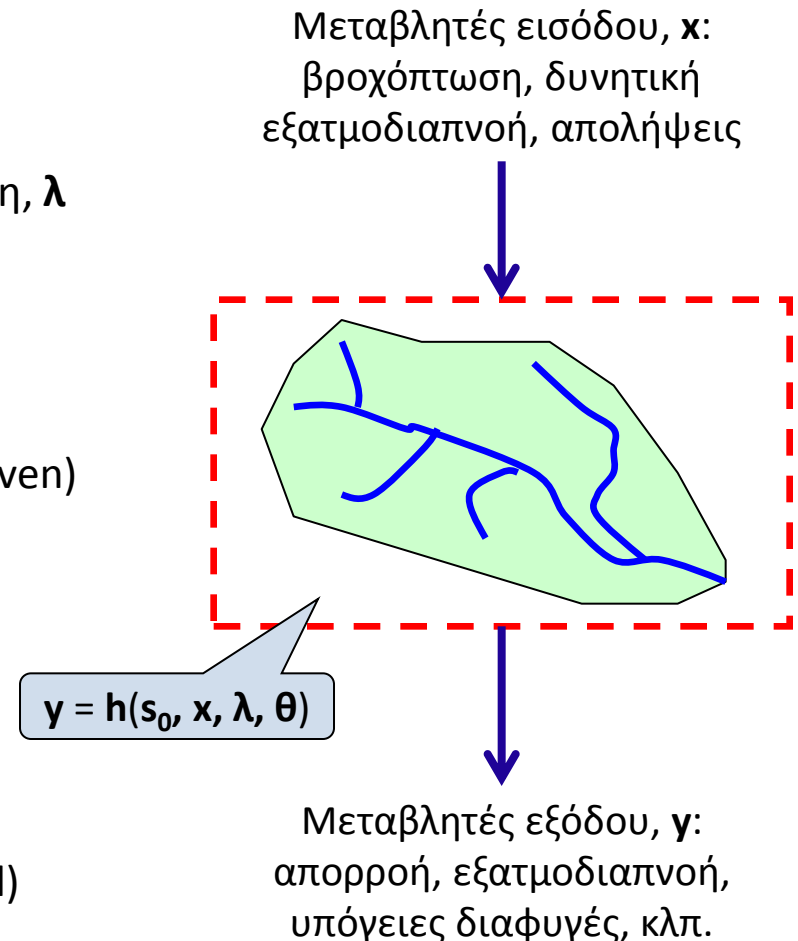


**Φράγμα Κρεμαστών:** Κατάκλυση του σταθμού παραγωγής λόγω υπερπήδησης του κατάντη προφράγματος (Νοέ. 1964) και αποκατάσταση με πασσαλοσανίδες (Μουτάφης, 2008)



# Υδρολογικά μοντέλα

- Μαθηματικοί μετασχηματισμοί που χρησιμοποιούν δεδομένα πεδίου και εύλογες υποθέσεις σχετικά με τις υδρολογικές διεργασίες, με στόχο την ποσοτική εκτίμηση των μεταβλητών του υδατικού ισοζυγίου της λεκάνης απορροής.
- Συνιστώσες μοντέλου:
  - Μεταβλητές εισόδου,  $\mathbf{x}$  (φορτίσεις)
  - Μεταβλητές εξόδου,  $\mathbf{y}$  (αποκρίσεις)
  - Αρχικές και οριακές συνθήκες,  $\mathbf{s}_0$
  - Μετρήσιμες ιδιότητες και γεωμετρικά μεγέθη,  $\lambda$
  - Μη μετρήσιμες ιδιότητες,  $\theta$  (παράμετροι)
- Κατηγορίες μοντέλων:
  - Ως προς το μαθηματικό υπόβαθρο
    - Μετασχηματισμού δεδομένων (data-driven)
    - Εννοιολογικά (conceptual)
    - Φυσικής βάσης (physically-based)
  - Ως προς τη διακριτοποίηση:
    - Αδιαμέριστα (lumped)
    - Ημικατανεμημένα (semi-distributed)
    - Πλήρως κατανεμημένα (fully-distributed)



# Παράδειγμα: Αδιαμέριστο μοντέλο υδατικού ισοζυγίου Thornthwaite-Mather

## □ Δεδομένα εισόδου

- Επιφανειακή βροχόπτωση λεκάνης,  $P_t$
- Δυνητική εξατμοδιαπνοή,  $PET_t$  (θεωρητικό άνω όριο, για εδάφη πλήρως κορεσμένα σε υγρασία)

## □ Μεταβλητές υδατικού ισοζυγίου λεκάνης

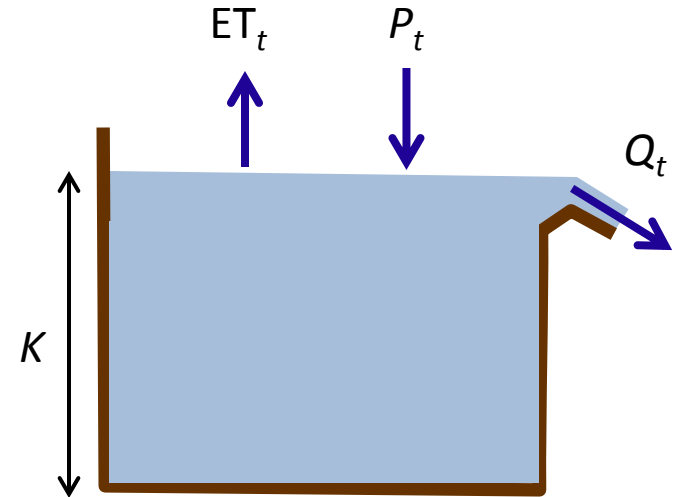
- Αποθήκευση υγρασίας,  $S_t$
- Πραγματική εξατμοδιαπνοή,  $ET_t$
- Επιφανειακή απορροή,  $Q_t$

## □ Θεμελιώδεις υποθέσεις

- Η μεταβολή της αποθήκευσης υγρασίας στην ακόρεστη ζώνη αναπαρίσταται από το ισοζύγιο εισροών-εκροών μιας δεξαμενής, δηλαδή:

$$\Delta S_t = P_t - ET_t - Q_t$$

- Αν η αποθήκευση υγρασίας υπερβεί τη χωρητικότητα της δεξαμενής  $K$  (παράμετρος μοντέλου, δηλαδή το έδαφος κορεστεί σε υγρασία, η πλεονάζουσα ποσότητα νερού διαφεύγει ως επιφανειακή απορροή (υπερχείλιση δεξαμενής).
- Αν η διαθέσιμη βροχόπτωση δεν επαρκεί για την ικανοποίηση της δυνητικής εξατμοδιαπνοής ( $P_t < PET$ ), παράγεται επιπλέον εξατμοδιαπνοή από το έδαφος, με ρυθμό ανάλογο του ποσοστού πλήρωσης της δεξαμενής,  $S_t/K$ .



# Κωδικοποίηση λειτουργίας μοντέλου – Εφαρμογή

## Εξισώσεις μοντέλου προσομοίωσης

- Εφόσον  $P_t \geq PET_t$

$$ET_t = PET_t$$

$$Q_t = \max(S_{t-1} + P_t - PET_t - K, 0)$$

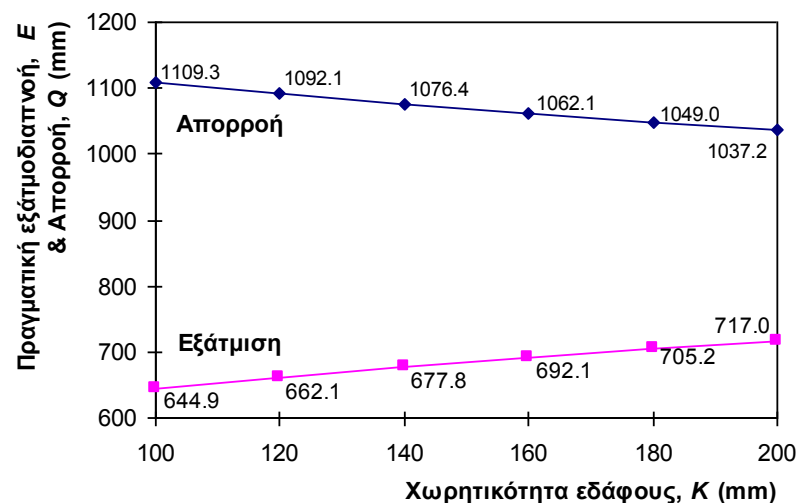
$$S_t = \min(S_{t-1} + P_t - PET_t, K)$$

- Εφόσον  $P_t < PET_t$

$$ET_t = P_t + S_{t-1} \{1 - \exp[(P_t - PET_t)/K]\}$$

$$Q_t = 0$$

$$S_t = S_{t-1} \exp[(P_t - PET_t)/K]$$



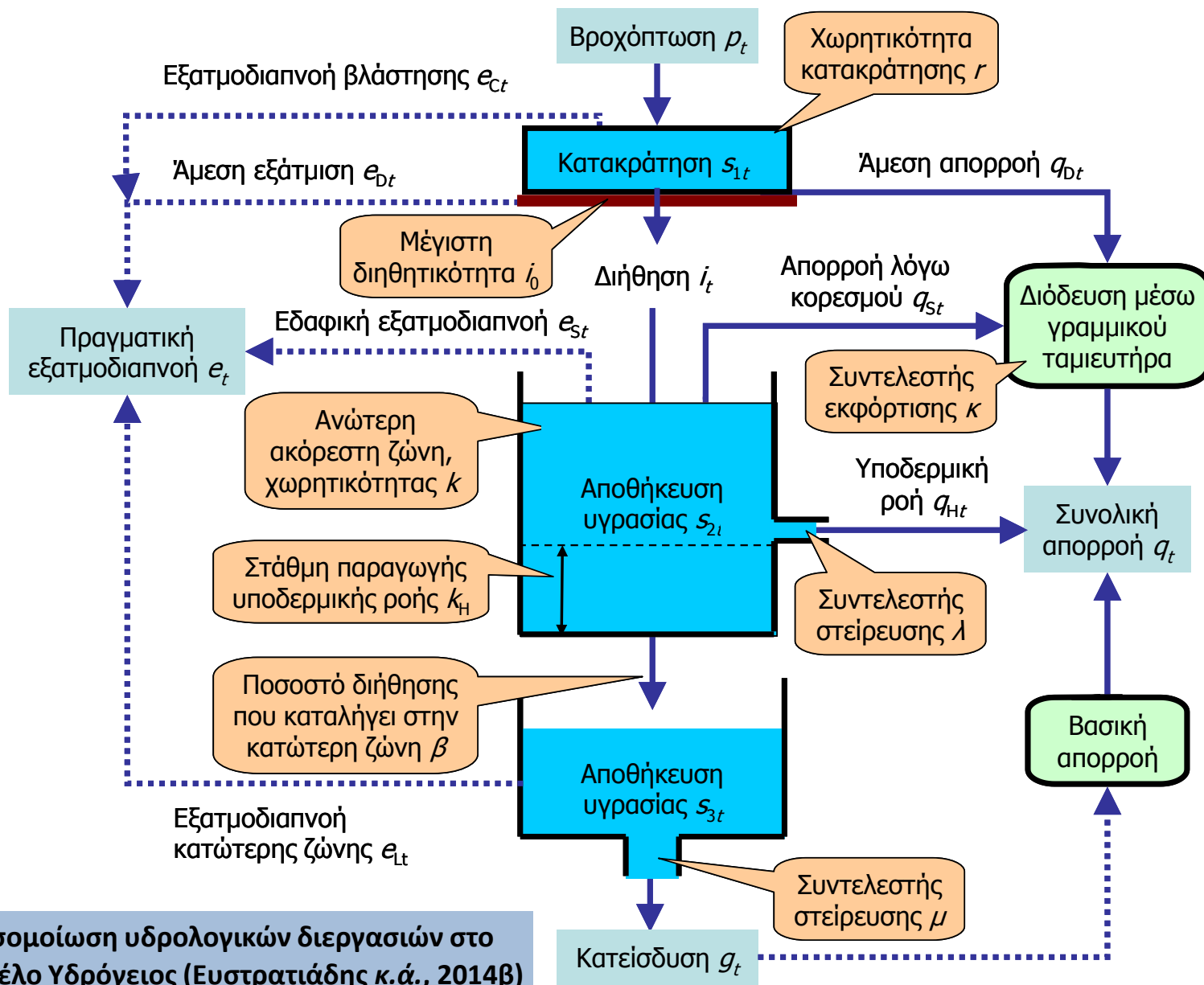
Μεταβολή ετήσιας πραγματικής εξατμοδιαπνοής και απορροής συναρτήσει της χωρητικότητας K

Μήνας	Βροχό- πτωση, P (mm)	Δυνητική εξατμοδια- πνοή, $E_p$ (mm)	Εδαφική αποθήκευση, S (mm)	Απορροή, Q (mm)	Πραγματι- κή εξατμο- διαπνοή, E (mm)
Σεπ			(0.0) <sup>†</sup> 9.4		
Οκτ	189.7	49.3	140.0	(0.4) <sup>†</sup> 9.8	49.3
Νοε	246.1	22.4	140.0	223.7	22.4
Δεκ	295.3	13.6	140.0	281.7	13.6
Ιαν	200.0	16.1	140.0	183.9	16.1
Φεβ	212.8	26.4	140.0	186.4	26.4
Μαρ	171.3	52.7	140.0	118.6	52.7
Απρ	156.5	84.2	140.0	72.3	84.2
Μαι	112.5	122.8	130.1	0.0	122.4
Ιουν	42.5	149.3	60.7	0.0	111.9
Ιουλ	29.0	158.8	24.0	0.0	65.7
Αυγ	33.2	137.3	11.4	0.0	45.8
Σεπ	65.3	92.3	9.4	0.0	67.3
Έτος	1754.2	925.2		1076.4	677.8

<sup>†</sup> Οι τιμές σε παρενθέσεις αποτελούν πρώτες προσεγγίσεις που διορθώνονται στο δεύτερο βήμα υπολογισμού.

Παράδειγμα εφαρμογής του μοντέλου στη λεκάνη απορροής του ποταμού Πορταϊκού (παραποτάμου του Πηνειού στη Δυτική Θεσσαλία), ανάντη του υδρομετρικού σταθμού Πύλης, με βάση τα μέσα μηνιαία υδρομετεωρολογικά δεδομένα της λεκάνης (βροχόπτωση, δυνητική εξατμοδιαπνοή), και υποθέτοντας χωρητικότητα εδαφικής υγρασίας  $K = 140$  mm (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999, σ. 238-243)

# Εννοιολογικά μοντέλα σύνθετης δομής



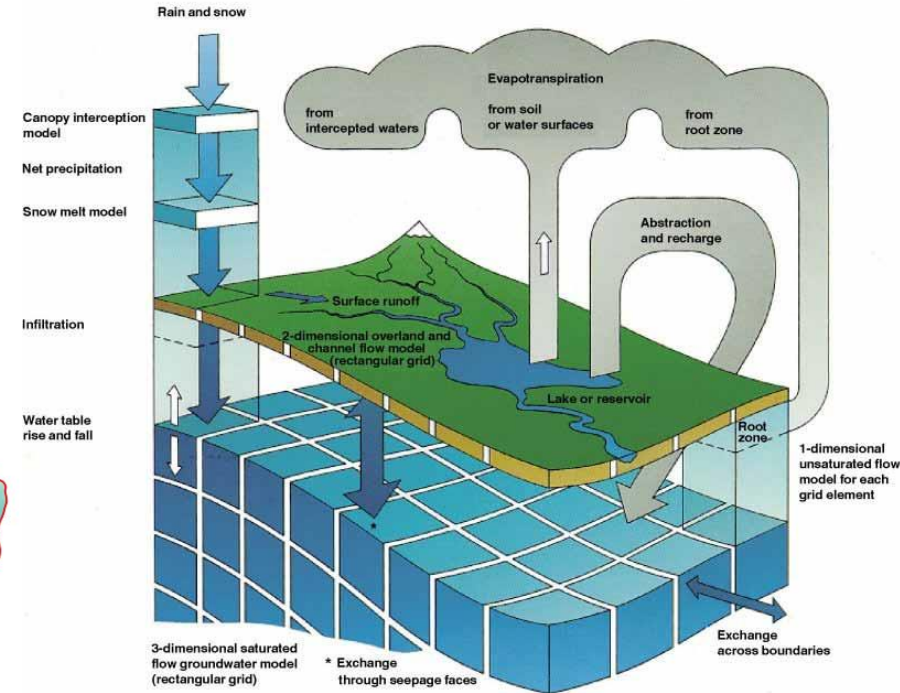
Προσομοίωση υδρολογικών διεργασιών στο μοντέλο Υδρόγειος (Ευστρατιάδης κ.ά., 2014β)

# Ημι-κατανεμημένα και πλήρως κατανεμημένα μοντέλα

- Ημι-κατανεμημένα μοντέλα (εννοιολογικά)
  - Χωρισμός σε υπολεκάνες, που κάθε μία δέχεται διαφορετική φόρτιση
  - Διόδευση απορροής υπολεκανών στο υδρογραφικό δίκτυο
  - Διαφοροποίηση παραμέτρων ανά υπολεκάνη ή άλλη χωρική ενότητα
- Πλήρως κατανεμημένα μοντέλα (φυσικής βάσης)
  - Λεπτομερής χωρική διακριτοποίηση (π.χ. ορθογωνικός κάρναβος)
  - Διατύπωση θεωρητικών εξισώσεων ροής
  - Παράμετροι → ιδιότητες πεδίου (;)



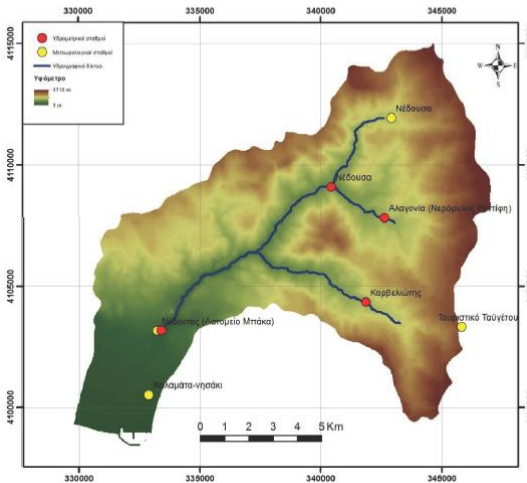
Παράδειγμα ημικατανεμημένης σχηματοποίησης λεκάνης Σοφαδίτη



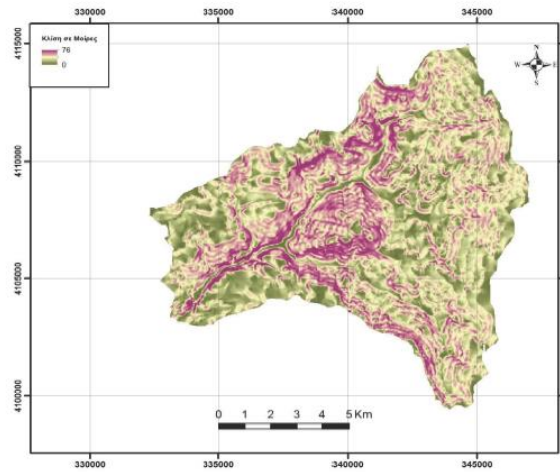
Σχηματική απεικόνιση κατανεμημένου μοντέλου MIKE SHE (<http://www.dhisoftware.com/mikeshe>)



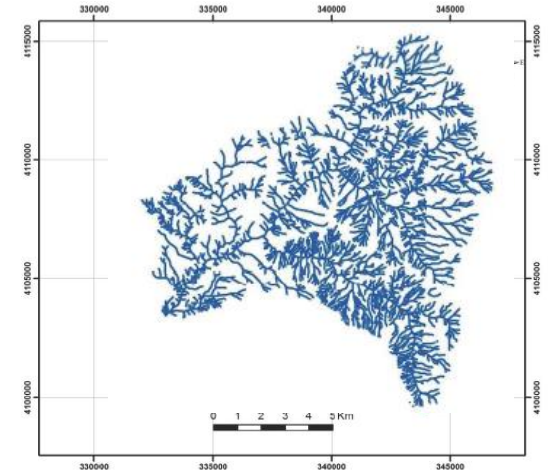
# Χωρικά δεδομένα υδρολογικών μοντέλων – Συστήματα γεωγραφικής πληροφορίας (ΣΓΠ, GIS)



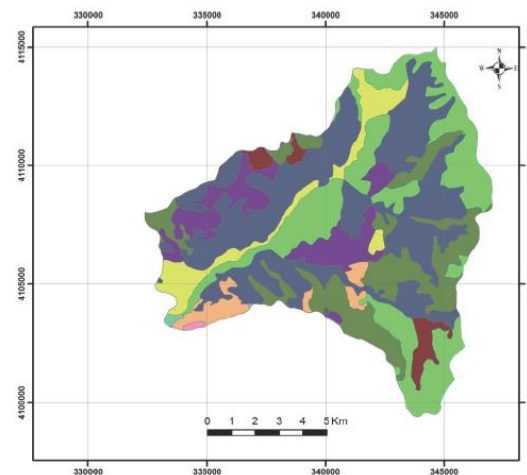
Ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων



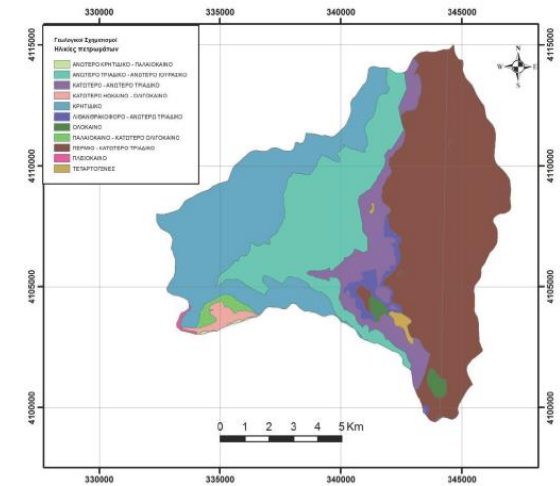
Κλίσεις εδάφους



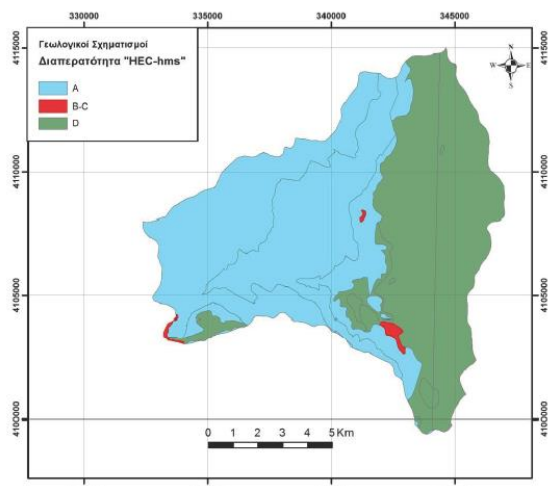
Υδρογραφία



Χρήσεις γης – κάλυψη γης



Γεωλογικοί σχηματισμοί



Υδρολιθολογία – περατότητα

# Μελέτες πλημμυρών φραγμάτων: Υδρογραφήματα σχεδιασμού (ανάντη λεκάνη απορροής)

## □ Μοντέλα γεγονότος (event-based)

- Θεμελιώδης παραδοχή: περίοδος επαναφοράς πλημμύρας = περίοδος επαναφοράς καταιγίδας σχεδιασμού
- Εννοιολογικά μοντέλα απλής δομής (περιγράφονται μόνο οι σημαντικές διεργασίες στη διάρκεια του πλημμυρικού επεισοδίου)
- Παραδοχές συνθηκών εδαφικής υγρασίας κατά την έναρξη της καταιγίδας (αρχικές συνθήκες μοντέλου, συνήθως θεωρούνται «μέσες» συνθήκες υγρασίας)
- Τυπικό σχήμα μοντέλων:
  - Όμβριες καμπύλες → υετογράφημα σχεδιασμού λεκάνης ανάντη φράγματος
  - Υετογράφημα → ενεργός βροχόπτωση (μοντέλο ελλειμμάτων)
  - Ενεργός βροχόπτωση → πλημμυρογράφημα (μοναδιαίο υδρογράφημα)
  - Πλημμυρογράφημα + βασική απορροή = υδρογράφημα εισόδου

## □ Μοντέλα συνεχούς προσομοίωσης (continuous simulation)

- Στοχαστικά μοντέλα γέννησης συνθετικών βροχοπτώσεων σε λεπτή χρονική κλίμακα (π.χ. ωριαία), για πολύ μεγάλο μήκος προσομοίωσης (ώστε να είναι εφικτή η εμπειρική εκτίμηση της περιόδου επαναφοράς της πλημμύρας)
- Υδρολογικά μοντέλα πλήρους προσομοίωσης των υδρολογικών διεργασιών
- Στατιστική ανάλυση προσομοιωμένων παροχών

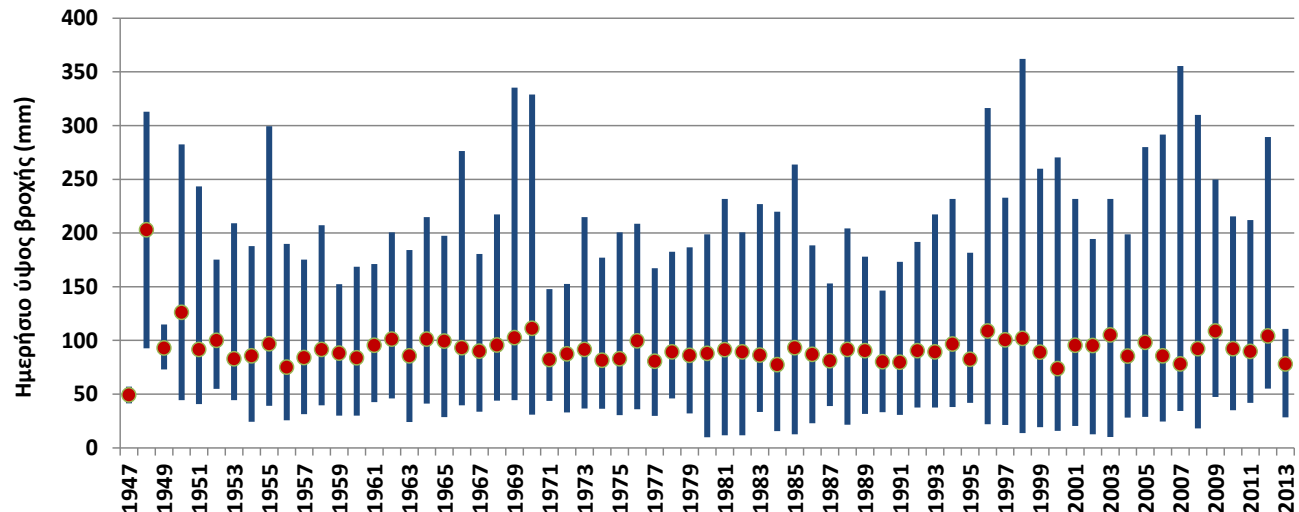
# Υδρολογικά μεγέθη λεκάνης: Όμβριες καμπύλες

- Στα μοντέλα επεισοδίου, η καταιγίδα σχεδιασμού παράγεται με βάση τις **όμβριες καμπύλες** της λεκάνης, που προκύπτουν από στατιστική ανάλυση των παρατηρημένων επεισοδίων ισχυρών καταιγίδων, σε διάφορες χρονικές κλίμακες (από 5 λεπτά έως 48 ώρες).
- Στην Ελλάδα εφαρμόζεται η γενική συναρτησιακή σχέση:

$$i(d, T) = \frac{\lambda' (T^{\kappa} - \psi')}{(1 + d/\vartheta)^{\eta}}$$

- Η έκφραση του αριθμητή αντιστοιχεί σε μια κατανομή τύπου Pareto, και περιλαμβάνει τρεις παραμέτρους (παραμέτρος κλίμακας  $\lambda'$ , παράμετρος θέσης  $\psi'$ , παράμετρος σχήματος  $\kappa$ ), που εκτιμώνται από δείγματα βροχομέτρων και βροχογράφων διάρκειας 24 και 48 ωρών.
- Η έκφραση του παρονομαστή υποδηλώνει μια συνάρτηση διάρκειας, και περιλαμβάνει δύο παραμέτρους,  $\vartheta$  και  $\eta$ , που εκτιμώνται από δείγματα βροχογράφων σε όλες τις διαθέσιμες χρονικές κλίμακες.

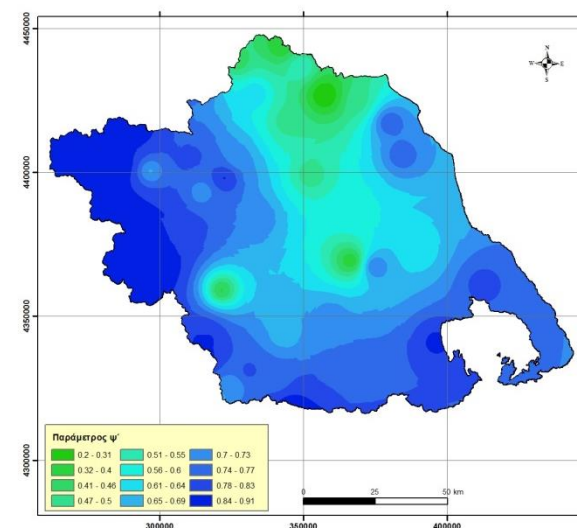
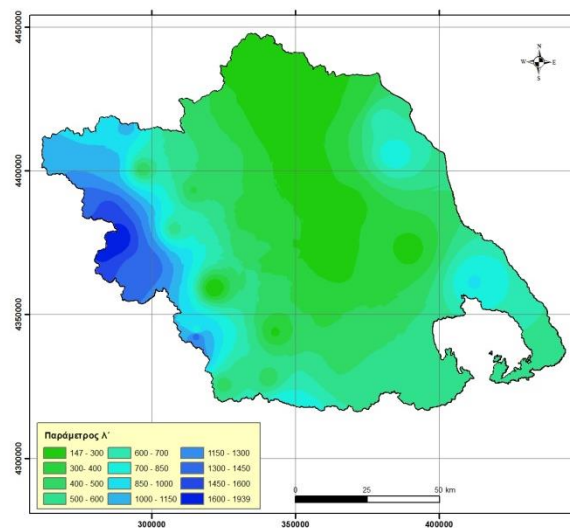
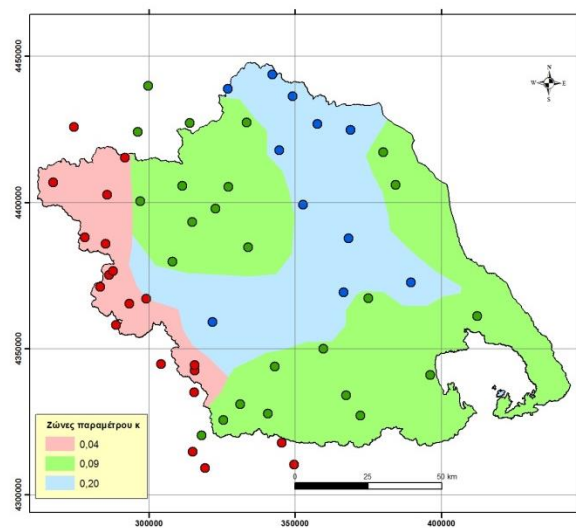
**Υδατικά Διαμερίσματα Δυτικής Στερεάς Ελλάδας και Ηπείρου:** Εύρος τιμών και μέσος όρος μεγίστων ημερήσιων υψών βροχής ανά υδρολογικό έτος (πλήθος βροχομετρικών σταθμών εν λειτουργία από 40 έως 100)



# Χωρική μεταβλητότητα παραμέτρων όμβριων καμπυλών

Σύμφωνα με τις μελέτες που εκπονούνται σε εφαρμογή της Οδηγίας-Πλαίσιο 2007/60/ΕΚ σε όλα τα Υδατικά Διαμερίσματα (ΥΔ) της Ελλάδας:

- Οι τιμές των παραμέτρων  $\vartheta$  και  $\eta$  είναι κοινές σε κάθε ΥΔ (ειδικότερα, ο εκθέτης  $\eta$  της συνάρτησης διάρκειας κυμαίνεται μεταξύ 0.60 και 0.70, σε όλη την ελληνική επικράτεια)
- Η τιμή της παραμέτρου  $\kappa$  διαφοροποιείται σε ευρύτερες υδροκλιματικές ζώνες (π.χ. ορεινές, παραλιακές, ηπειρωτικές, προσήνεμες-υπήνεμες), και κυμαίνεται σε ένα εύρος από 0.03 έως 0.20 (παγκόσμιος μέσος όρος  $\kappa = 0.13$ ).
- Οι παράμετροι  $\lambda'$  και  $\psi'$  παρουσιάζουν έντονη χωρική μεταβλητότητα (παράγονται χάρτες κατανεμημένων τιμών και ορίων εμπιστοσύνης, σε όλη την Ελλάδα).



**Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας:** Διαχωρισμός σε τρεις ζώνες σταθερών τιμών παραμέτρου σχήματος, με  $\kappa_1 = 0.04$ ,  $\kappa_2 = 0.09$  και  $\kappa_3 = 0.20$  (αριστερά), και χωρική απεικόνιση παραμέτρων κλίμακας  $\lambda'$  (μέσον) και θέσης  $\psi'$  (δεξιά).

# Επιφανειακή αναγωγή σημειακών εντάσεων βροχής

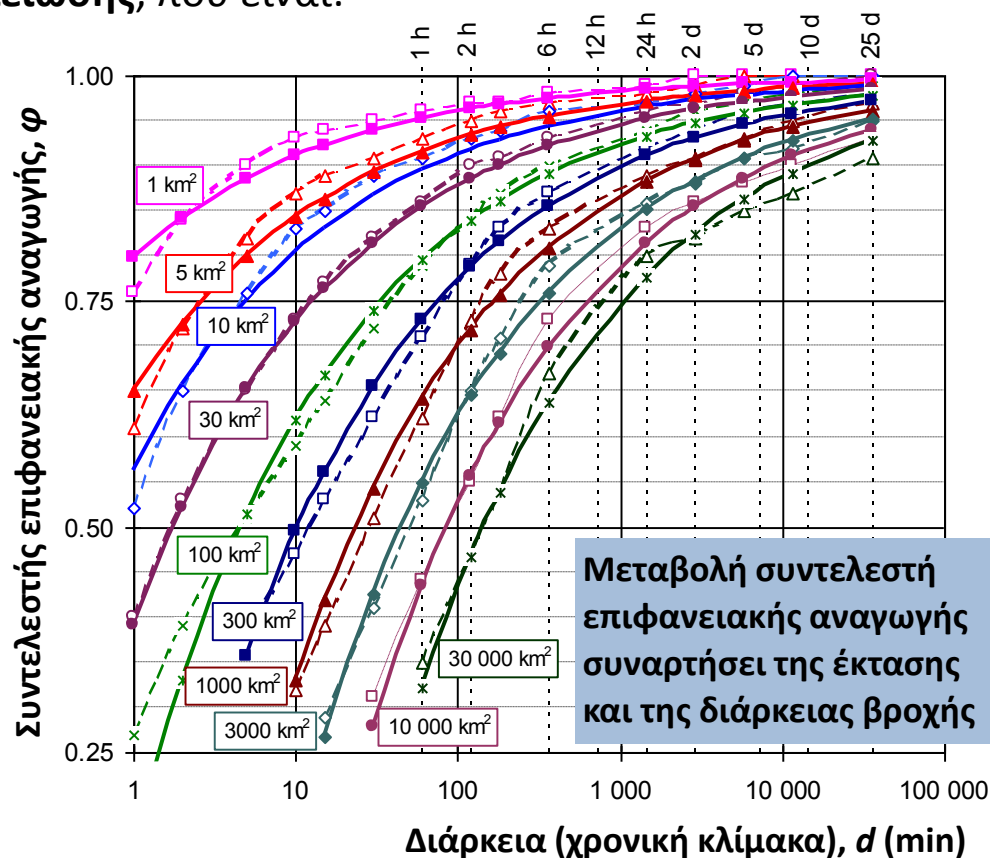
- Όταν οι όμβριες καμπύλες παράγονται από σημειακά δεδομένα, οι τιμές των εκτιμώμενων εντάσεων βροχής θεωρείται ότι αναφέρονται σε σημείο (π.χ. στη θέση του βροχομετρικού σταθμού, απ' όπου έχει ληφθεί το αντίστοιχο δείγμα, ή στο κέντρο βάρους της λεκάνης, αν η εκτίμηση έχει γίνει από χάρτες χωρικής παρεμβολής παραμέτρων).
- Προκειμένου να γίνει **αναγωγή της σημειακής εκτίμησης** της έντασης βροχής στην επιφάνεια της λεκάνης, η τιμή που εκτιμάται από την όμβρια καμπύλη πολλαπλασιάζεται με έναν **συντελεστή επιφανειακής απομείωσης**, που είναι:

- φθίνουσα συνάρτηση της έκτασης
- αύξουσα συνάρτηση της διάρκειας.

- Στην Ελλάδα εφαρμόζεται συνήθως η ακόλουθη σχέση, που βασίζεται σε πινακοποιημένα αποτελέσματα του Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας (Κουτσογιάννης, 2001, σ. 48):

$$\varphi = \left( 1 - \frac{0.048 A^{0.36 - 0.01 \ln A}}{d^{0.35}}, 0.25 \right)$$

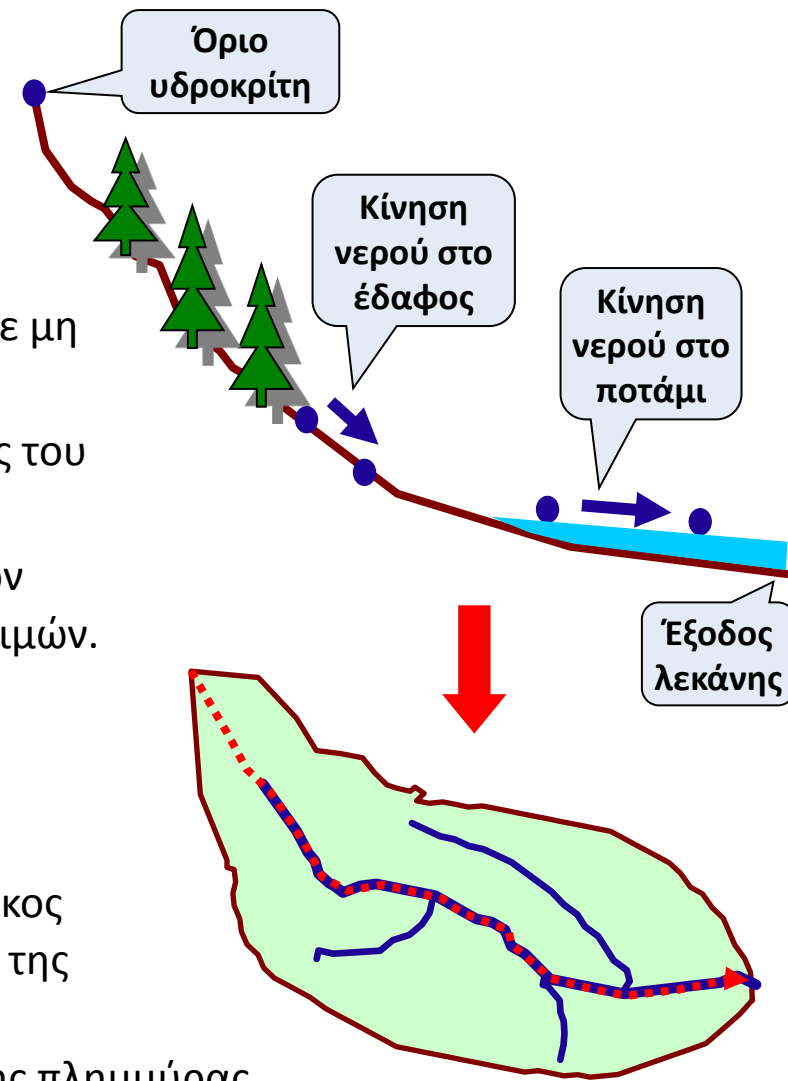
όπου  $A$  η έκταση της λεκάνης απορροής ( $\text{km}^2$ ) και  $d$  η διάρκεια της βροχής (h).





# Υδρολογικά μεγέθη λεκάνης: Χρόνος συγκέντρωσης

- Ο **χρόνος συγκέντρωσης** ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται για να φθάσει το νερό που απορρέει επιφανειακά από το **πιο απομακρυσμένο σημείο** της λεκάνης μέχρι τη **διατομή εξόδου**.
- Περιλαμβάνει δύο συνιστώσες:
  - τον χρόνο επιφανειακής ροής στο έδαφος και σε μη διαμορφωμένες μισγάγκειες
  - τον χρόνο που απαιτείται για τη ροή κατά μήκος του κύριου υδατορεύματος



- Για την εκτίμησή του διατίθεται πληθώρα εμπειρικών σχέσεων στη βιβλιογραφία, με πολύ μεγάλο εύρος τιμών.
- Για τις Ελληνικές λεκάνες (μη αστικές) συστήνεται η εφαρμογή της **εξίσωσης Giandotti** ( $t_c$  σε h):

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

όπου  $A$  η έκταση της λεκάνης ( $\text{km}^2$ ),  $L$  το μέγιστο μήκος ροής (km), και  $\Delta H$  η διαφορά του μέσου υψομέτρου της λεκάνης από το υψόμετρο της διατομής εξόδου (m).

- Λόγω της επιτάχυνσης της ροής σε συνθήκες μεγάλης πλημμύρας, συστήνεται η μείωση του χρόνου συγκέντρωσης κατά Giandotti, συναρτήσει της περιόδου επαναφοράς (π.χ. κατά 30%, για  $T = 1000$  έτη).

# Υδρολογικά μεγέθη λεκάνης: Αριθμός καμπύλης απορροής (runoff curve number, CN)

- ❑ Προτάθηκε από την Soil Conservation Service των ΗΠΑ (SCS) προκειμένου να συμπυκνώσει τα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά της λεκάνης σε μια αντιπροσωπευτική τιμή, η οποία κυμαίνεται από 0 (μηδενική απορροή) μέχρι 100 (πλήρως αδιαπέρατη επιφάνεια).
- ❑ Εξαρτάται από τα εδαφολογικά χαρακτηριστικά (υδατοπερατότητα), τις χρήσεις γης και τις προηγούμενες συνθήκες εδαφικής υγρασίας στη λεκάνη (πινακοποιημένες τιμές).
- ❑ Ορίζονται τρεις τύποι **προηγούμενων συνθηκών υγρασίας**:
  - **Τύπος I**: Ξηρές συνθήκες (εδάφη ξηρά, αλλά πάνω από το σημείο μαρασμού), που αντιστοιχούν στην περίπτωση που η βροχόπτωση των προηγούμενων πέντε ημερών είναι μικρότερη από 13 mm (ή <35 mm, για φυτοκάλυψη σε συνθήκες ανάπτυξης).
  - **Τύπος II**: Μέσες συνθήκες, που αντιστοιχούν σε βροχόπτωση των προηγούμενων πέντε ημερών μεταξύ 13 και 38 mm (ή μεταξύ 35 και 53 mm, για φυτοκάλυψη σε συνθήκες ανάπτυξης).
  - **Τύπος III**: Υγρές συνθήκες (εδάφη σχεδόν κορεσμένα), που αντιστοιχούν σε βροχόπτωση των προηγούμενων πέντε ημερών μεγαλύτερη των 38 mm (ή >53 mm, για φυτοκάλυψη σε συνθήκες ανάπτυξης).
- ❑ Οι παραπάνω τιμές έχουν προκύψει από μεγάλο αριθμό παρατηρημένων πλημμυρικών επεισοδίων σε μικρές αγροτικές λεκάνες στις ΗΠΑ, και θεωρείται ότι έχουν πιθανότητα υπέρβασης 10, 50 και 90% (για υγρές, μέσες και ξηρές συνθήκες, αντίστοιχα).

# Εκτίμηση παραμέτρου CN για μέσες συνθήκες υγρασίας

Κατάταξη εδαφών σε τέσσερις υδρολογικούς τύπους:

- ❑ **Ομάδα Α:** Εδάφη με υψηλούς ρυθμούς διήθησης, π.χ. αμμώδη και χαλικώδη, με πολύ μικρό ποσοστό ιλύος και αργίλου.
- ❑ **Ομάδα Β:** Εδάφη με μέσους ρυθμούς διήθησης, π.χ. αμμώδης πηλός.
- ❑ **Ομάδα C:** Εδάφη με μικρούς ρυθμούς διήθησης, π.χ. από αργιλοπηλό, με σημαντικό ποσοστό αργίλου, εδάφη φτωχά σε οργανικό υλικό.
- ❑ **Ομάδα D:** Εδάφη με πολύ μικρούς ρυθμούς διήθησης, π.χ. εδάφη που διογκώνονται σημαντικά όταν διαβραχούν, πλαστικές άργιλοι, εδάφη μικρού βάθους, με σχεδόν αδιαπέρατους οριζόντες κοντά στην επιφάνεια.

Περιγραφή χρήσης γης		Υδρολογικός τύπος εδάφους			
		A	B	C	D
Καλλιεργημένες εκτάσεις		62-72	71-81	78-88	81-91
Λιβάδια, βοσκότοποι		30-68	58-79	71-86	78-89
Δάση		25-45	55-66	70-77	77-83
Ανοιχτοί χώροι, πάρκα, νεκροταφεία κτλ.					
με κάλυψη από πράσινο > 75%		39	61	74	80
με κάλυψη από πράσινο < 75%		49	69	79	84
Εμπορικές περιοχές		89	92	94	95
Βιομηχανικές περιοχές (72% αδιαπέρατες)		81	88	91	93
Οικιστικές περιοχές					
Μέσο μέγεθος οικοπέδου (στρ.)	Ποσοστό αδιαπέρατης επιφάνειας (%)				
≤ 0.5	65	77	85	90	92
1.0	38	61	75	83	87
1.5	30	57	72	81	86
2.0	25	54	70	80	85
4.0	20	51	68	79	84
Δρόμοι					
με οδόστρωμα και αγωγούς ομβρίων		98	98	98	98
χαλικόστρωτοι		76	85	89	91
χωματόδρομοι		72	82	87	89

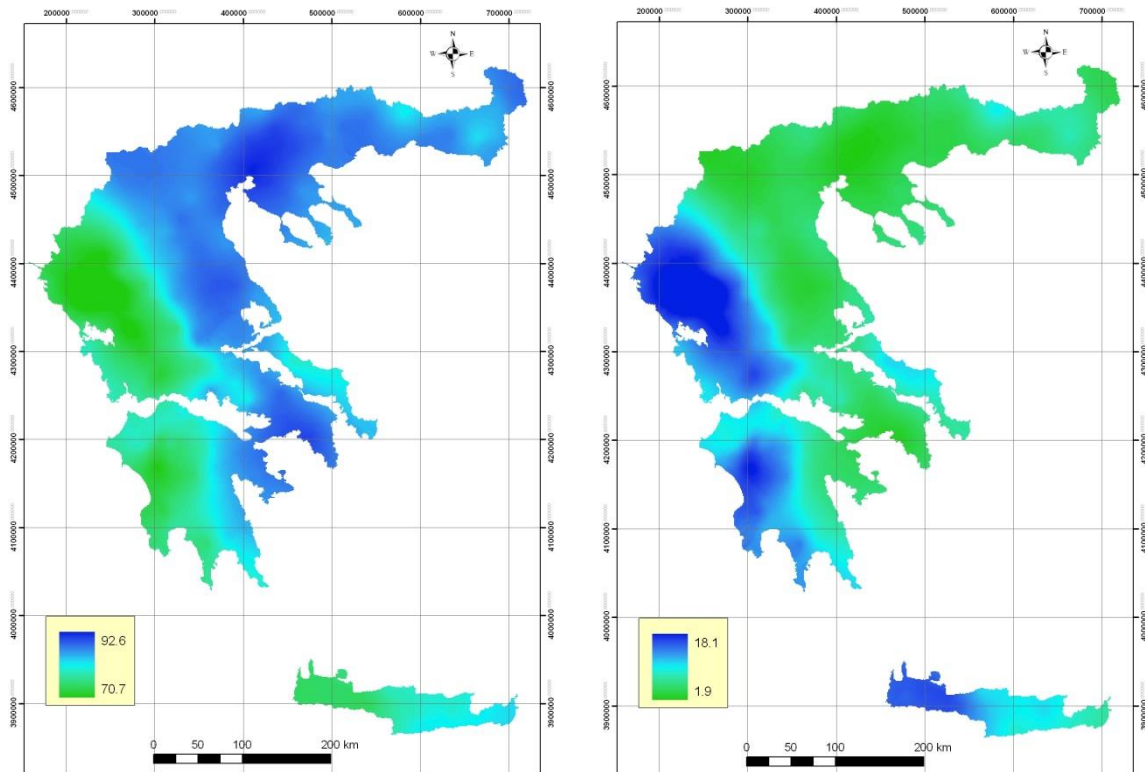
Πηγή: Κουτσογιάννης, 2011, σ. 126

# Αναγωγή μέσου CN για ξηρές και υγρές συνθήκες

- Για την εκτίμηση της τιμής του CN που αναφέρεται σε ξηρές (τύπου I) και υγρές (τύπου III) συνθήκες αρχικής εδαφικής υγρασίας, συναρτήσει της τιμής  $CN_{II}$ , που αναφέρεται σε μέσες συνθήκες υγρασίας (τύπου II), εφαρμόζονται οι σχέσεις αναγωγής:

$$CN_I = \frac{4.2 CN_{II}}{10 - 0.058 CN_{II}}$$

$$CN_{III} = \frac{23 CN_{II}}{10 + 0.13 CN_{II}}$$



Συχνότητα εμφάνισης ξηρών (αριστερά) και υγρών (δεξιά) συνθηκών αρχικής εδαφικής υγρασίας, σε ημερήσια κλίμακα (Ποντικός, 2014)

- Επισημάνσεις:
  - Το εύρος τιμών της παραμέτρου CN, μεταξύ των συνθηκών τύπου I και III, είναι πολύ μεγάλο, και μεγιστοποιείται στην τιμή  $CN_{II} = 50$ , για την οποία  $CN_I = 30$  και  $CN_{III} = 70$ .
  - Από πιθανοτικές αναλύσεις των καταστάσεων εδαφικής υγρασίας στην Ελλάδα προέκυψε ότι στην Ανατολική και Βόρεια Ελλάδα η συχνότητα των ξηρών συνθηκών είναι πολύ υψηλότερη του 10%, ενώ στη Δυτική Ελλάδα η συχνότητα των υγρών συνθηκών είναι αρκετά υψηλότερη του 10% (Ευστρατιάδης κ.ά., 2014α· Ποντικός, 2014).

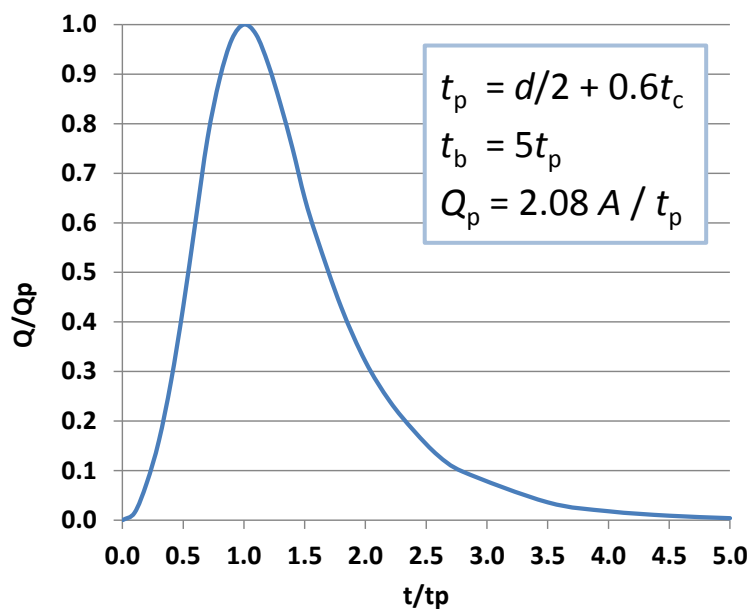
# Υδρολογικά μεγέθη λεκάνης: Μοναδιαίο υδρογράφημα

- Εκφράζει τον χωροχρονικό μετασχηματισμό (διόδευση) μιας μοναδιαίας (ύψους  $h_0 = 10 \text{ mm}$ ) ενεργού βροχόπτωσης διάρκειας  $d$ , ομοιόμορφα κατανομημένης στη λεκάνη, σε χρονοσειρά παροχής (πλημμυρογράφημα) στην έξοδο της λεκάνης.
- Θεωρητικό υπόβαθρο: υπόθεση γραμμικής λεκάνης (η απόκριση της λεκάνης περιγράφεται από ένα σύστημα γραμμικών διαφορικών εξισώσεων)
- Θεμελιώδεις ιδιότητες (ως συνέπεια της γραμμικότητας):
  - Αρχή αναλογίας (πολλαπλάσια ενεργός βροχόπτωση παράγει πολλαπλάσια παροχή)
  - Αρχή επαλληλίας (τα MY τμηματικών ενεργών βροχοπτώσεων αθροίζονται)
  - Αναλλοίωτο χρόνου υστέρησης,  $t_L$  (= χρονική απόσταση μεταξύ του κέντρου βάρους της ενεργού βροχόπτωσης και του κέντρου βάρους του MY, η τετμημένη του οποίου θεωρείται, κατά προσέγγιση, ότι ταυτίζεται με την αιχμή του υδρογραφήματος)
- Χαρακτηριστικά μεγέθη
  - Χρόνος βάσης (διάρκεια πλημμύρας) = χρόνος πλήρους απόκρισης της λεκάνης ( $> t_c$ )
  - Χρόνος ανόδου (εμφάνιση παροχής αιχμής MY):  $t_p = d/2 + t_L \approx d/2 + 0.6t_c$
  - Όγκος πλημμύρας:  $V_0 = A h_0$  ( $A$ : έκταση λεκάνης απορροής)
- Παρατηρήσεις:
  - Το σχήμα του MY εξαρτάται από τον χρόνο συγκέντρωσης  $t_c$
  - Η μείωση του χρόνου συγκέντρωσης, λόγω επιτάχυνσης της ροής, οδηγεί σε αυξημένη παροχή αιχμής (ώστε να διατηρηθεί ο μοναδιαίος όγκος  $V_0$ )  $\rightarrow$  μη γραμμικότητα



# Συνθετικά μοναδιαία υδρογραφήματα

- ❑ Στις υδρολογικές μελέτες εφαρμόζονται, ως επί το πλείστον, συνθετικά ΜΥ, καθώς δεν υπάρχουν υδρομετρικά δεδομένα (αλλά και όταν υπάρχουν, είναι εξαιρετικά επισφαλής η εξαγωγή του ΜΥ, καθώς απαιτεί πληθώρα παραδοχών).
- ❑ Τυπικά συνθετικά ΜΥ που χρησιμοποιούνται σε μελέτες στην Ελλάδα:
  - ❑ Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας (τριγωνικό ΜΥ)
  - ❑ Snyder (τροποποιημένο από τον ίδιο, για Ελληνικές λεκάνες με ισχυρές κλίσεις)
  - ❑ Αδιαστατοποιημένο λείο ΜΥ της SCS (εφαρμογή Οδηγίας-Πλαίσιο 2007/60/ΕΚ)



Χρόνος $t / t_p$	Παροχή $Q / Q_p$
0.0	0.000
0.1	0.015
0.2	0.075
0.3	0.160
0.4	0.280
0.5	0.430
0.6	0.600
0.7	0.770
0.8	0.890
0.9	0.970
1.0	1.000
1.1	0.980
1.2	0.920
1.3	0.840

Χρόνος $t / t_p$	Παροχή $Q / Q_p$
1.4	0.750
1.5	0.650
1.6	0.570
1.8	0.430
2.0	0.320
2.2	0.240
2.4	0.180
2.6	0.130
2.8	0.098
3.5	0.036
4.0	0.018
4.5	0.009
5.0	0.004

**Αδιαστατοποιημένο συνθετικό ΜΥ κατά SCS (γράφημα) και πινακοποιημένες τιμές (δεξιά)**

# Καταιγίδα (υετογράφημα) σχεδιασμού

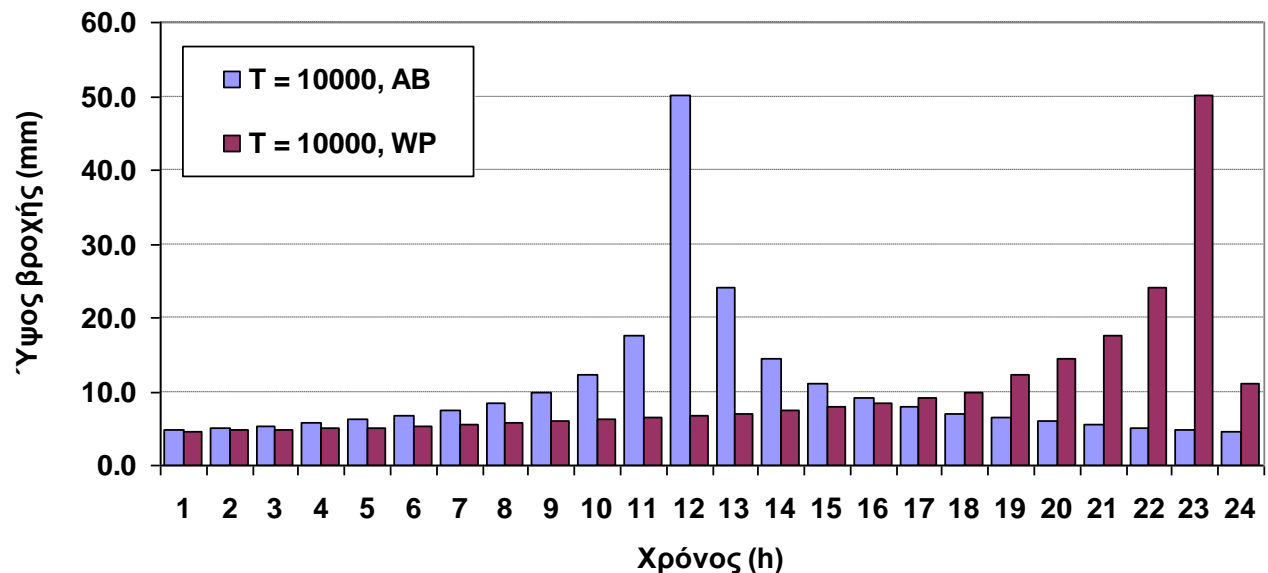
- Θεμελιώδη χρονικά μεγέθη καταιγίδας:
  - **Διάρκεια** → πολλαπλάσια του χρόνου συγκέντρωσης της λεκάνης (ενδεικτικά:  $d > 3t_c$ )
  - **Χρονικό βήμα** → υποπολλαπλάσιο του χρόνου συγκέντρωσης (ενδεικτικά:  $\Delta t < t_c/3$ )
- Περίοδος επαναφοράς
  - **Σήραγγα εκτροπής**:  $T = 20$  ως  $50$  έτη (μεγάλα φράγματα)
  - **Υπερχειλιστής**:  $T = 1\ 000$  έτη (μικρά φράγματα),  $T = 5\ 000$  ή  $10\ 000$  έτη (μεγάλα φράγματα, με πολύ σοβαρές δυνητικές επιπτώσεις),  $T = 60\ 000$  έτη (εκτιμάται ότι αντιστοιχεί στην περίοδο επαναφοράς της λεγόμενης πιθανής μέγιστης κατακρήμνισης)
- Αθροιστικό ύψος βροχής → όμβρια καμπύλη, συντελεστής επιφανειακής αναγωγής:
$$h(d, T, A) = \varphi(A, d) i(d, T) d$$
- Η βασικότερη παραδοχή στην κατάρτιση της καταιγίδας σχεδιασμού αφορά στη **χρονική κατανομή** του συνολικού ύψους βροχής, που γίνεται με τις εξής προσεγγίσεις:
  - Αδιάστατα προφίλ: επιμερισμός συνολικού ύψους βροχής με δεδομένα ποσοστά
  - Μέθοδοι διάταξης τμηματικών υψών βροχής: επιμερισμός με τρόπο ώστε για κάθε επιμέρους διάρκεια, το αντίστοιχο ύψος βροχής που εκτιμάται από την όμβρια καμπύλη να έχει την ίδια περίοδο επαναφοράς με το συνολικό ύψος
  - Μοντέλα στοχαστικού επιμερισμού: παραγωγή μεγάλου αριθμού σεναρίων, που αναπαράγουν την στατιστική δομή των παρατηρημένων καταιγίδων, δηλαδή τα περιθώρια στατιστικά χαρακτηριστικά και τις αυτοσυσχετίσεις

# Χρονικός επιμερισμός βροχόπτωσης: Μέθοδοι εναλλασσόμενων μπλοκ και δυσμενέστερης διάταξης

- Στη μέθοδο των **εναλλασσόμενων μπλοκ** (alternating block method), τα τμηματικά ύψη βροχής διατάσσονται σε χρονική ακολουθία με το μέγιστο στο μέσο της επιλεγμένης συνολικής διάρκειας βροχής και τα υπόλοιπα σε φθίνουσα σειρά εναλλακτικά αριστερά και δεξιά από το κεντρικό μπλοκ.
- Στη μέθοδο της **δυσμενέστερης διάταξης** (worst profile), τα τμηματικά ύψη βροχής αρχικά διατάσσονται σε χρονική αντιστοιχία με τις τεταγμένες του μοναδιαίου υδρογραφήματος, ενώ στη συνέχεια η διάταξη αντιστρέφεται, ώστε να προκύψει το τελικό υετογράφημα.
- Σε όλες τις χρονικές κλίμακες, τα τμηματικά ύψη βροχής πολλαπλασιάζονται με την τιμή του **συντελεστή επιφανειακής αναγωγής**  $\varphi(A, d)$  που αντιστοιχεί σε κάθε διάρκεια  $d$ .

## Φράγμα Αλμωπαίου (Καλής):

Επιφανειακά ανηγμένα υετογραφήματα σχεδιασμού καταιγίδας διάρκειας 24 h και συνολικού ύψους 279 mm, που παράγονται με τις μεθόδους των εναλλασσόμενων μπλοκ (AB) και της δυσμενέστερης διάταξης (WP), για περίοδο επαναφοράς  $T = 10\ 000$  έτη (έκταση λεκάνης απορροής ανάντη φράγματος 982 km<sup>2</sup>)

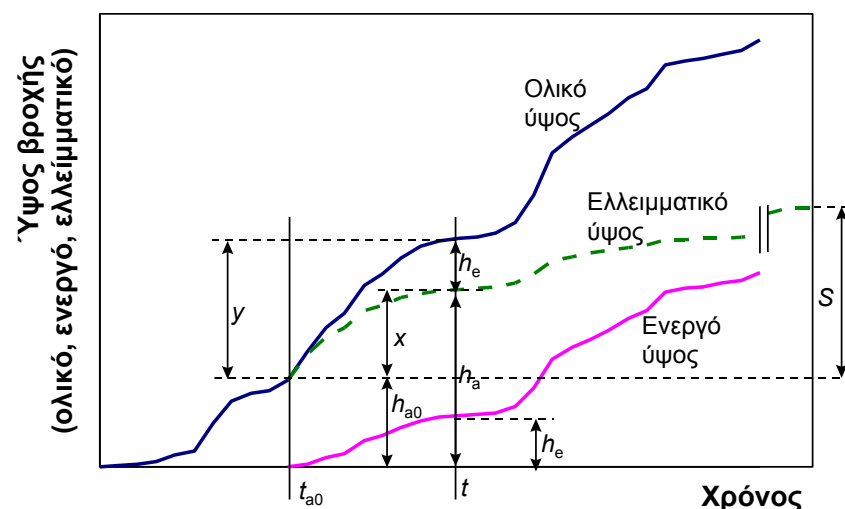


# Εκτίμηση υδρολογικών ελλειμμάτων: μέθοδος SCS-CN

- Ο μετασχηματισμός του υετογραφήματος σχεδιασμού σε πλημμυρική απορροή (ενεργός βροχόπτωση) γίνεται με αφαίρεση των **υδρολογικών ελλειμμάτων** (= βροχή που αρχικά κατακρατείται στο έδαφος και τη βλάστηση και, στη συνέχεια, εξατμίζεται ή διηθείται).
- Η μέθοδος SCS-CN αναπτύχθηκε από την Soil Conservation Service (1972, πλέον Natural Resources Conservation Service, NRCS), και περιγράφει τη χρονική εξέλιξη των ελλειμμάτων με βάση τις εξής παραδοχές (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999, σ. 274-278):
  - Για ένα αρχικό διάστημα  $t_{a0}$ , όλη η ποσότητα της βροχόπτωσης  $h_{a0}$  μετατρέπεται εξ ολοκλήρου σε έλλειμμα (**αρχικό έλλειμμα**), χωρίς να δίνει καθόλου απορροή.
  - Το επιπλέον, πέραν του αρχικού, έλλειμμα (δηλαδή η ποσότητα  $h_a - h_{a0}$ ) δεν μπορεί να ξεπεράσει μια μέγιστη τιμή  $S$ , η οποία καλείται **μέγιστη δυνητική κατακράτηση**.
  - Για κάθε χρονική στιγμή  $t > t_{a0}$ , οι λόγοι της ενεργού βροχόπτωσης και του επιπλέον του αρχικού ελλειμματος είναι ίσοι προς τα αντίστοιχα δυνητικά μεγέθη.
- Από τα παραπάνω προκύπτει:

$$h_e = \begin{cases} 0 & \text{αν } h \leq h_{a0} \\ \frac{(h - h_{a0})^2}{h - h_{a0} + S} & \text{αν } h > h_{a0} \end{cases}$$

- Για δεδομένη χρονική εξέλιξη της αθροιστικής βροχόπτωσης  $h(t)$ , εκτιμάται η αντίστοιχη χρονική εξέλιξη της αθροιστικής ενεργού βροχόπτωσης (πλημμυρική απορροή)  $h_e(t)$ .



# Εκτίμηση παραμέτρων μεθόδου SCS-CN

## □ Μέγιστη δυνητική κατακράτηση

- Φυσική ερμηνεία: μέγιστο ύψος νερού που μπορεί να αποθηκευτεί στο έδαφος, στη διάρκεια του επεισοδίου καταιγίδας
- Εξαρτάται από τη χωρητικότητα ακόρεστης ζώνης και την αποθηκευμένη υγρασία στην αρχή του επεισοδίου (μεταβλητή)
- Εκτιμάται συναρτήσει του αριθμού καμπύλης απορροής, από τη σχέση:

$$S = 254 (100/\text{CN} - 1) \quad (S \text{ σε mm})$$

## □ Αρχικό έλλειμμα

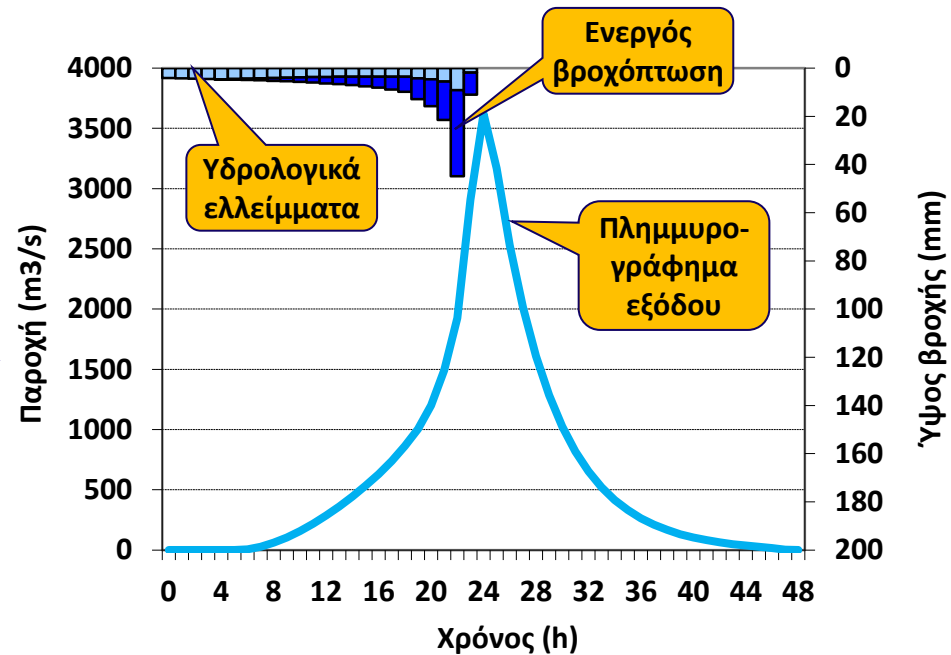
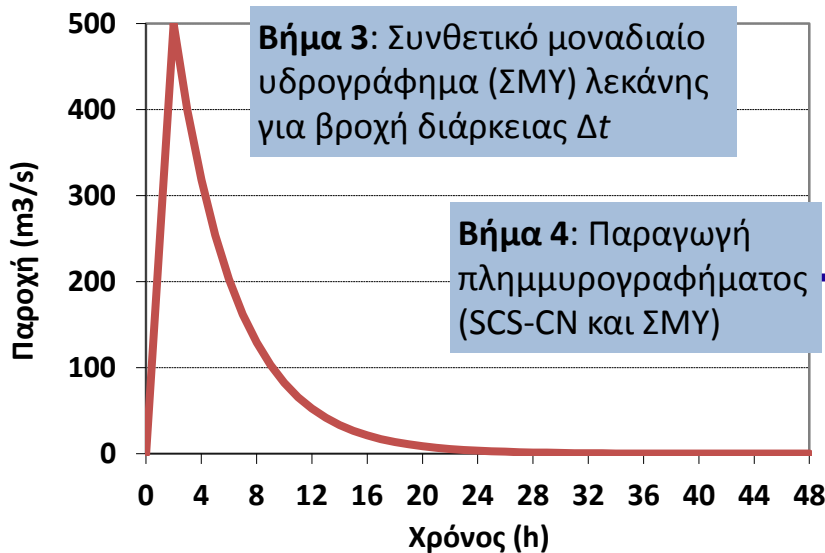
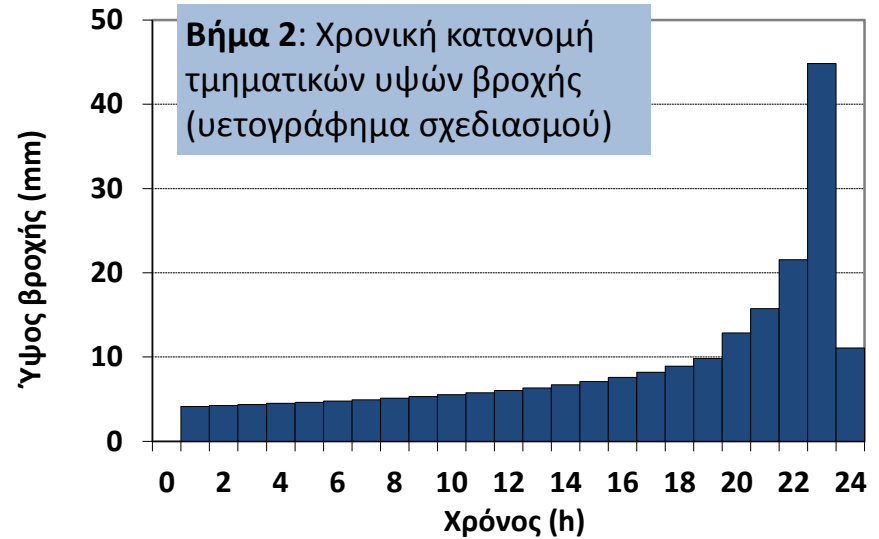
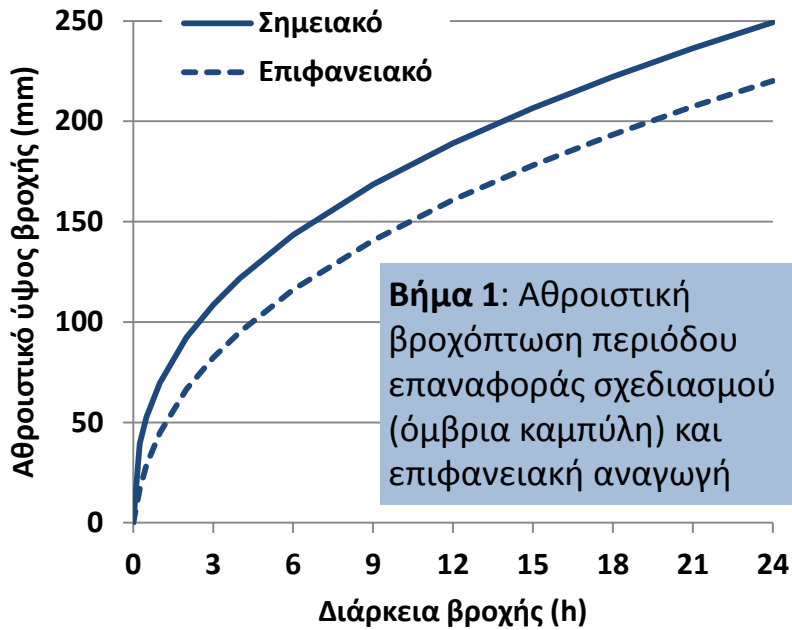
- Φυσική ερμηνεία: επιφανειακή κατακράτηση νερού
- Συνήθως ορίζεται ως ποσοστό της μέγιστης δυνητικής κατακράτησης, δηλαδή  $h_{a0} = \alpha S$
- Κατά κανόνα, λαμβάνεται  $\alpha = 20\%$ , οπότε:

$$h_{a0} = 0.20 S$$

- Η τιμή 20% έχει προκύψει ως μέσος όρος παρατηρήσεων σε μικρές αγροτικές λεκάνες των ΗΠΑ (ήπιες κλίσεις, έργα ανάσχεσης), από ένα εύρος τιμών μεταξύ 3 έως 38%.
- Με βάση μετρήσεις σε ορεινές λεκάνες στην Ελλάδα και την Κύπρο, προέκυψε ότι τα αρχικά ελλείμματα είναι συνήθως πολύ μικρά ( $\alpha < 5\%$ ), καθώς υπάρχει ταχεία απόκριση της λεκάνης στις καταιγίδες (σχεδόν άμεση παραγωγή πλημμυρικής απορροής).
- Προσοχή, αν εφαρμοστεί ποσοστό αρχικών ελλειμμάτων διαφορετικό του 20%, δεν ισχύουν οι τιμές αναφοράς του CN (βλ. Ευστρατιάδης κ.ά., 2014α).

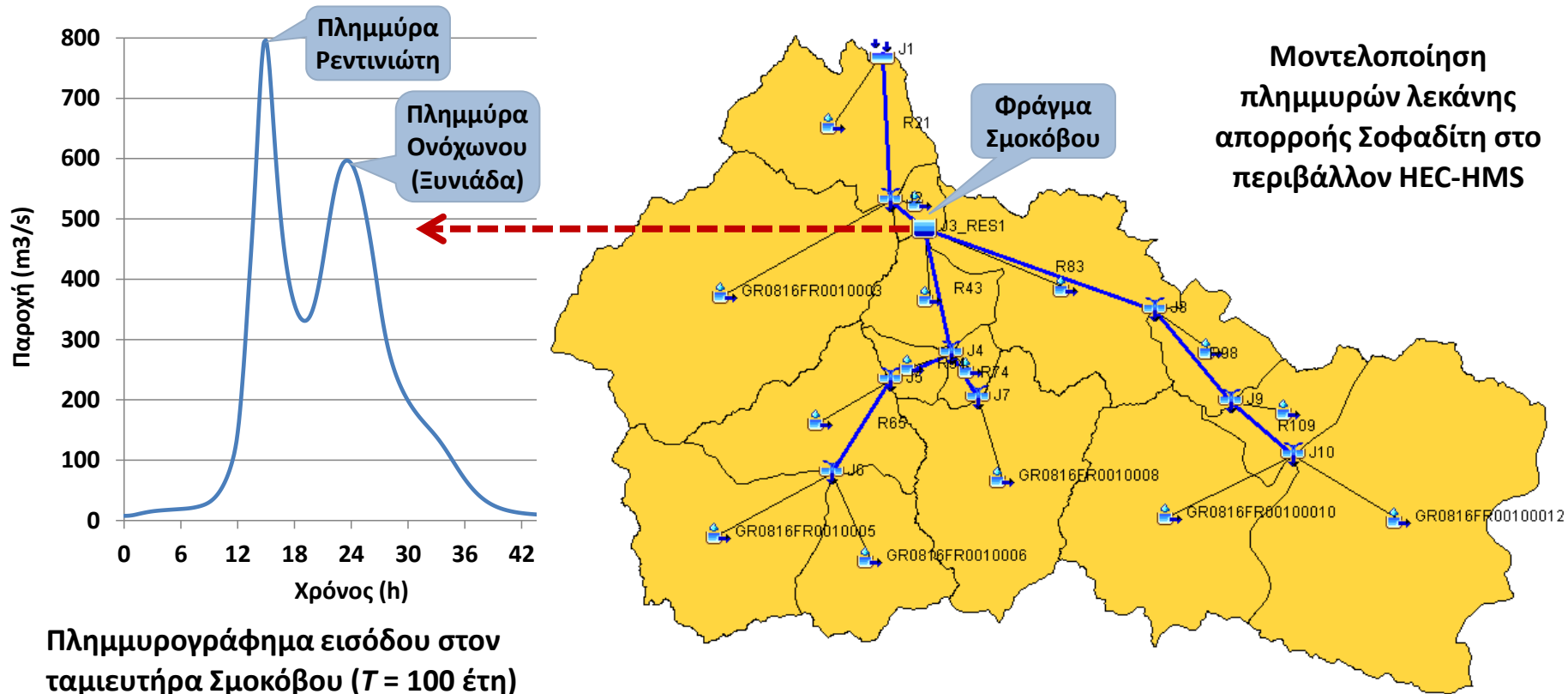


# Πλημμύρα σχεδιασμού: υπολογιστική διαδικασία



# Ημι-κατανεμημένα μοντέλα πλημμυρών

- Λόγω της ετερογένειας των φυσιογραφικών χαρακτηριστικών της συνολικής λεκάνης, δεν μπορούν να εφαρμοστούν ενιαίες τιμές παραμέτρων (π.χ. CN,  $t_c \rightarrow \Sigma MY$ ).
- Λόγω της σύνθετης γεωμετρίας του υδρογραφικού δικτύου, πρέπει να ληφθεί υπόψη ο χρονισμός των υδρογραφημάτων που παράγονται από κάθε υπολεκάνη (δεν αποκρίνονται όλα τα τμήματα της λεκάνης στον ίδιο χρόνο  $\rightarrow$  ευνοϊκό ως προς τις πλημμυρικές αιχμές).
- Στα αδιαμέριστα σχήματα δεν μπορεί να περιγραφούν φαινόμενα διόδευσης κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου (σημαντική ανάσχεση σε πεδινές περιοχές).



# Ειδικά θέματα υδρολογίας πλημμυρών

## □ Βασική απορροή

- Γενικά αποτελεί μικρό ποσοστό της πλημμυρικής απορροής, το οποίο μειώνεται όσο αυξάνει η περίοδος επαναφοράς.
- Εξαίρεση αποτελούν οι καρστικές λεκάνες, στις οποίες ο υδροφορέας μπορεί να έχει συγκρίσιμο χρόνο απόκρισης με το επιφανειακό υδρογραφικό δίκτυο.
- Συνήθως θεωρείται σταθερή και ίση με τη μέση ετήσια παροχή του ποταμού (ή τη μέση παροχή του υγρότερου μήνα), οπότε στο πλημμυρογράφημα σχεδιασμού προστίθεται ως σταθερή παροχή.
- Στις ορεινές λεκάνες, λαμβάνεται υπόψη και η απορροή λόγω τήξης χιονιού (1 cm χιονιού  $\approx$  1 mm απορροής).

## □ Διόδευση στο υδρογραφικό δίκτυο

- Στα ημικαταναμημένα μοντέλα θεωρείται ότι το υδρογράφημα κάθε υπολεκάνης μεταφέρεται στον (μοναδικό) κόμβο εξόδου.
- Οι κόμβοι συνδέονται μέσω κλάδων, που σχηματίζουν το υδρογραφικό δίκτυο.
- Κατά μήκος κάθε κλάδου, η παροχή διοδεύεται από τον ανάντη στον κατάντη κόμβο, μέσω υδρολογικών (π.χ. μέθοδος Muskingum) ή υδραυλικών προσεγγίσεων.



# Διόδευση πλημμυρών από ταμιευτήρα και υπερχειλιστή

- Δεδομένα εισόδου:
  - Πλημμυρογράφημα λεκάνης ανάντη φράγματος,  $i_t$  (πλημμυρογράφημα εισροής)
  - Σχέση στάθμης-αποθέματος ταμιευτήρα,  $s = s(z)$
  - Υψόμετρο στέψης υπερχειλιστή,  $z_c$  (ανώτατη στάθμη λειτουργίας ταμιευτήρα)
  - Σχέση στάθμης-παροχής υπερχειλιστή,  $q = q(z)$
- Ζητούμενα:
  - Πλημμυρογράφημα εκροής από τον υπερχειλιστή,  $q_t$ 
    - Διαστασιολόγηση υπερχειλιστή (εφόσον το πλημμυρογράφημα εισροής έχει εκτιμηθεί για την περίοδο επαναφοράς σχεδιασμού του υπερχειλιστή)
    - Σχεδιασμός κατάντη έργων (έργο εκτόξευσης, λεκάνη ηρεμίας)
  - Χρονική εξέλιξη στάθμης ταμιευτήρα,  $z_t$ 
    - Προσδιορισμός ύψους φράγματος (με βάση την ανώτατη στάθμη πλημμύρας)
    - Προσδιορισμός όγκου ανάσχεσης (αντιπλημμυρική προστασία κατάντη περιοχών)

Τυπική **εξίσωση στάθμης-παροχής** ελεύθερου υπερχειλιστή, ενεργού πλάτους  $b$ :

$$q = c b h^{3/2}$$

όπου  $c$  συντελεστής εξαρτωμένος από τα γεωμετρία του υπερχειλιστή και τα χαρακτηριστικά της ροής, με σύνηθες εύρος τιμών 1.6 έως 2.3, και  $h = z - z_c$  (ύψος νερού πάνω από την υπερχείλιση = υδραυλικό φορτίο).

# Διόδευση πλημμυρών: υπολογιστική διαδικασία

- Εξίσωση υδατικού ισοζυγίου (εξίσωση συνέχειας):

$$ds/dt = i(t) - q(t)$$

- Η παραπάνω γράφεται ως εξίσωση διαφορών στο χρονικό διάστημα  $\Delta t = t_j - t_{j-1}$ , δηλαδή:

$$s(z_j) - s(z_{j-1}) = [i_{j-1} + i_j - q(z_j) - q(z_{j-1})] \Delta t / 2$$

- Σε κάθε χρονικό βήμα  $j$ , είναι γνωστά τα μεγέθη  $s(z_{j-1})$ ,  $q(z_{j-1})$ ,  $i_{j-1}$  και  $i_j$ , ενώ είναι άγνωστα τα μεγέθη  $s_j$  και  $q_j$ , που είναι μη γραμμικές εξισώσεις της στάθμης  $z_j$ .

- Τυπικές παραδοχές:

- Κατά την έναρξη της πλημμύρας ( $j = 0$ ), ο ταμιευτήρας βρίσκεται στην ανώτατη στάθμη λειτουργίας, δηλαδή  $z_0 = z_c$  (συντηρητική παραδοχή)
- Οι λοιπές υδροληψίες (π.χ. στρόβιλοι) λειτουργούν με πλήρη παροχетеυτικότητα,  $q_0$ .

- Παρατηρήσεις:

- Η εξίσωση διαφορών, που είναι μη γραμμική ως προς την άγνωστη στάθμη  $z_j$ , μπορεί να λυθεί είτε βήμα προς βήμα είτε ως σύστημα εξισώσεων.
- Εφόσον λειτουργούν τα έργα υδροληψίας, από αυτά διέρχεται σταθερή παροχή  $q_0$ , μέχρι η εισροή ανάντη να προκαλέσει ανύψωση της στάθμης πάνω από τη στέψη του υπερχειλιστή, συνεπώς για  $z \leq z_c$  δεν πραγματοποιείται υπερχείλιση, ενώ για  $z > z_c$  διέρχεται παροχή  $q_0$  από τις υδροληψίες και παροχή  $q - q_0$  από τον υπερχειλιστή.
- Το πρόβλημα γίνεται πιο σύνθετο αν γίνεται ρύθμιση των εκροών από τις υδροληψίες ή αν υπάρχουν έργα ελέγχου (π.χ. θυροφράγματα, συμβατικά ή ανατρεπόμενα).



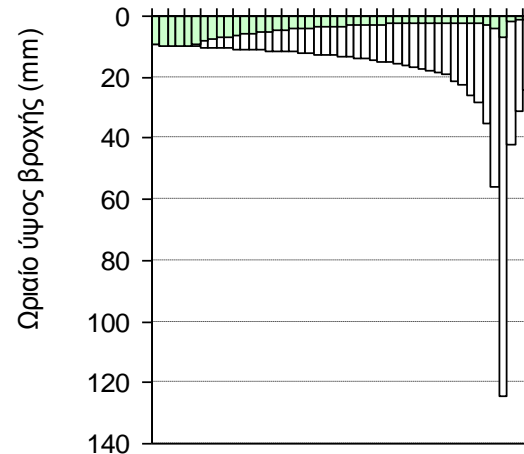
# Παράδειγμα: Ταμιευτήρας Αποσελέμη

## Παραδοχές μελέτης

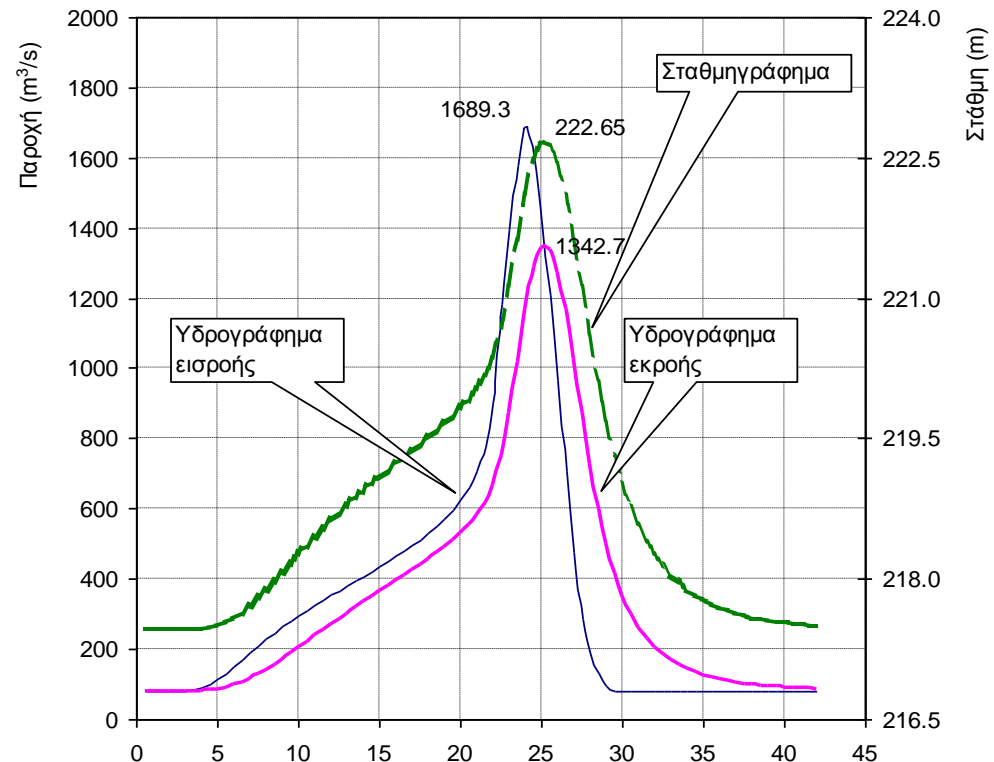
- Περίοδος επαναφοράς 60 000 έτη (πιθανή μέγιστη κατακρήμνιση)
- Βροχόπτωση διάρκειας 24 h
- Υετογράφημα δυσμενέστερης διάταξης
- Εκτίμηση ελλειμμάτων με τη μέθοδο SCS-CN, με CN = 55 και  $\alpha = 20\%$
- ΣΜΥ Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας
- Βασική απορροή  $81 \text{ m}^3/\text{s}$  (εισορή πηγών Κασταμονίτσας, εκτροπή από Οροπέδιο Λασιθίου, τήξη χιονιού)
- Υπερχειλιστής πλάτους  $b = 40 \text{ m}$ ,  $c = 2.2$

## Βασικά μεγέθη σχεδιασμού

- Συνολικό ύψος βροχής 902 mm
- Ενεργό ύψος βροχής 693 mm
- Όγκος πλημμύρας  $42.0 \text{ hm}^3$
- Συνολικός όγκος εισροής  $50.5 \text{ hm}^3$
- Παροχή αιχμής εισόδου  $1689 \text{ m}^3/\text{s}$
- Παροχή αιχμής εξόδου  $1342 \text{ m}^3/\text{s}$
- Μέγιστη στάθμη πλημμύρας  $+222.65 \text{ m}$
- Στέψη υπερχειλιστή  $+216.50 \text{ m}$



Υετογράφημα και υδρογραφήματα εισροής και εκροής σχεδιασμού του υπερχειλιστή και σταθμηγράφημα του ταμιευτήρα Αποσελέμη (Κουτσογιάννης κ.ά., 2001β)



# Αναφορές

- Ευστρατιάδης, Α., Α. Κουκουβίνος, Ε. Μιχαηλίδη, Ε. Γαλιούνα, Κ. Τζούκα, Α. Δ. Κούσης, Ν. Μαμάσης, και Δ. Κουτσογιάννης, Τεχνική έκθεση περιγραφής περιοχικών σχέσεων εκτίμησης χαρακτηριστικών υδρολογικών μεγεθών, *ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ – Εκτίμηση πλημμυρικών ροών στην Ελλάδα σε συνθήκες υδροκλιματικής μεταβλητότητας: Ανάπτυξη φυσικά εδραιωμένου εννοιολογικού-πιθανοτικού πλαισίου και υπολογιστικών εργαλείων*, Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος ΕΜΠ, 2014<sup>α</sup>.
- Ευστρατιάδης, Α., Α. Κουκουβίνος, Ν. Μαμάσης, και Δ. Κουτσογιάννης, Εναλλακτικά σενάρια διαχείρισης και βέλτιστης λειτουργίας ταμιευτήρα Σμοκόβου και συναφών έργων, *Διερεύνηση σεναρίων διαχείρισης του ταμιευτήρα Σμοκόβου*, Τεύχος 3, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος ΕΜΠ, 2008.
- Ευστρατιάδης, Α., Α. Κουκουβίνος, Π. Δημητριάδης, Ε. Ρόζος, και Α. Δ. Κούσης, Τεχνική έκθεση θεωρητικής τεκμηρίωσης μοντέλου υδρολογικής-υδραυλικής προσομοίωσης, *ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ – Εκτίμηση πλημμυρικών ροών στην Ελλάδα σε συνθήκες υδροκλιματικής μεταβλητότητας: Ανάπτυξη φυσικά εδραιωμένου εννοιολογικού-πιθανοτικού πλαισίου και υπολογιστικών εργαλείων*, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος ΕΜΠ, 2014β.
- Ευστρατιάδης, Α., Δ. Κουτσογιάννης, Ν. Μαμάσης, Π. Δημητριάδης, και Α. Μαχαίρας, Βιβλιογραφική επισκόπηση υδρολογίας πλημμυρών και συναφών εργαλείων, *ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ – Εκτίμηση πλημμυρικών ροών στην Ελλάδα σε συνθήκες υδροκλιματικής μεταβλητότητας: Ανάπτυξη φυσικά εδραιωμένου εννοιολογικού-πιθανοτικού πλαισίου και υπολογιστικών εργαλείων*, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος ΕΜΠ, 2012.
- Ευστρατιάδης, Α., και Ε. Ρόζος, Υδρολογική διερεύνηση, Έργα Ύδρευσης Ρόδου από το φράγμα Γαδουρά - Β φάση: Προμελέτες, οριστικές μελέτες κλπ. μελέτες έργων Υδραγωγείων και ΕΕΝ- Τεύχη Δημοπράτησης, Εργοδότης: ΥΠΕΧΩΔΕ, Ανάδοχος: Υδροεξυγιαντική, 57 σ., 2010.
- Καραβοκύρης & Συν/τες, Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών των Υδατικών Διαμερισμάτων Δυτικής Στερεάς Ελλάδας, Ηπείρου και Θεσσαλίας (GR04, GR05, GR08), Ειδική Γραμματεία Υδάτων, ΥΠΕΚΑ, 2015 (μελέτη σε εξέλιξη).
- Κουτσογιάννης, Δ. Α. Ευστρατιάδης, και Α. Κουκουβίνος, *Τεχνική έκθεση: Διερεύνηση πλημμυρικών παροχών λεκάνης απορροής Αλμωπαίου*, 2014.
- Κουτσογιάννης, Δ., Α. Ευστρατιάδης, Ν. Μαμάσης, Ι. Ναλμπάντης, και Λ. Λαζαρίδης, Υδρολογική μελέτη λειτουργίας του ταμιευτήρα, *Τεχνικός Σύμβουλος για το έργο "Ύδρευση Ηρακλείου και Αγίου Νικολάου από το φράγμα Αποσελέμη"*, Εργοδότης: ΥΠΕΧΩΔΕ, Ανάδοχος: Κ/Ξ Αποσελέμη, Αθήνα, 2001α.

# Αναφορές (συν.) & βιβλιογραφία

- Κουτσογιάννης, Δ., Ι. Ναλμπάντης, Ν. Μαμάσης, Α. Ευστρατιάδης, Λ. Λαζαρίδης, και Α. Δανιήλ, Υδρολογική μελέτη πλημμυρών, *Τεχνικός Σύμβουλος για το έργο "Υδρευση Ηρακλείου και Αγίου Νικολάου από το φράγμα Αποσελέμη"*, Εργοδότης: ΥΠΕΧΩΔΕ, Ανάδοχος: Κ/Ξ Αποσελέμη, Αθήνα, 2001β.
- Κουτσογιάννης, Δ., και Θ. Ξανθόπουλος, *Τεχνική Υδρολογία*, Έκδοση 3, 418 σ., ΕΜΠ, Αθήνα, 1999.
- Κουτσογιάννης, Δ., *Σχεδιασμός Αστικών Δικτύων Αποχέτευσης*, Έκδοση 4, 180 σ., ΕΜΠ, Αθήνα, 2011.
- Μουτάφης, Ν., Αστοχίες και ατυχή συμβάντα ελληνικών φραγμάτων, *1<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Μεγάλων Φραγμάτων με Διεθνή Συμμετοχή*, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Λάρισα, 2008.
- Ποντικός, Σ., *Πιθανοτική διερεύνηση καταστάσεων εδαφικής υγρασίας στην Ελληνική επικράτεια για χρήση τους στον υδρολογικό σχεδιασμό*, Διπλωματική εργασία, 83 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος ΕΜΠ, 2014.
- Chow, V.T., D.R. Maidment, and L.W. Mays, *Applied Hydrology*, McGraw-Hill, 1988.
- Efstratiadis, A., A.D. Koussis, D. Koutsoyiannis, and N. Mamassis, Flood design recipes vs. reality: can predictions for ungauged basins be trusted?, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14, 1417–1428, 2014.
- Grimaldi, S., A. Petroseli, F. Tauro, and M. Porfiri, Time of concentration: A paradox in modern hydrology, *Hydrological Sciences Journal*, 57(2), 217–228, 2012.
- Koutsoyiannis, D., D. Kozonis, and A. Manetas, A mathematical framework for studying rainfall intensity-duration-frequency relationships, *Journal of Hydrology*, 206(1-2), 118-135, 1998.
- Natural Resources Conservation Service (NRCS), Part 630 Hydrology, *National Engineering Handbook*, U.S. Department of Agriculture, Washington, DC, 2008.
- Ponce V. M., and R. H. Hawkins, Runoff Curve Number: has it reached maturity?, *Journal of Hydrologic Engineering*, 1(1), 11–19, 1996.
- Soil Conservation Service (SCS), *National Engineering Handbook*, Section 4, Hydrology (NEH-4), U.S. Department of Agriculture, Washington, DC, 1972.
- Thornthwaite, C. W., and J. R. Mather, The water balance, *Publications in Climatology*, 8(8), 1-104, Laboratory of Climatology, Climatologic Dresel Institute of Technology, 1955.
- U.K. National Environmental Research Council (UK-NERC), *Flood Studies Report*, Institute of Hydrology, Wallingford, 1975.
- U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, *Design of Arch Dams*, U.S. Government Printing Office, 1977.