



Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ  
Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος  
9<sup>ο</sup> Εξάμηνο: Ολοκληρωμένο Θέμα Υδραυλικού Σχεδιασμού

# Υδρολογία πλημμυρών, κάποιες καινοτομίες και η εφαρμογή τους στην πράξη

Ανδρέας Ευστρατιάδης, Επικ. Καθηγητής ΕΜΠ

Νοέμβριος 2023

# Υδρολογία πλημμυρών: Γενικό πλαίσιο & παραδοχές

- Εκτίμηση χρονοσειρών παροχής σε μία ή περισσότερες θέσεις του υδρογραφικού δικτύου μιας λεκάνης, που παράγονται από **έντονα επεισόδια βροχής**, πραγματικά ή υποθετικά.
- Εξετάζονται οι υδρολογικές διεργασίες στη χρονική κλίμακα του **επεισοδίου πλημμύρας**, και όχι σε συνεχή βάση, όπως σε μελέτες εκτίμησης του υδατικού δυναμικού (event-based vs. continuous simulation) → μικρή χρονική διάρκεια προσομοίωσης (ώρες έως λίγες ημέρες), λεπτομερής χρονική διακριτότητα (κατά μέγιστο ωριαία).
- Σε μελέτες σχεδιασμού αντιπλημμυρικών έργων ή εκτίμησης του πλημμυρικού κινδύνου, τα πλημμυρογραφήματα αναφέρονται σε δεδομένη **περίοδο επαναφοράς**, που συμβατικά θεωρείται ίση με αυτή της βροχόπτωσης.
- Η υδρολογική μελέτη πλημμυρών συνδυάζεται με την υδραυλική μελέτη (**υδροδυναμική προσομοίωση**), που κατά κανόνα υλοποιείται σε περιορισμένο τμήμα της λεκάνης (στην περιοχή των τεχνικών έργων και τα χαμηλά τμήματα). Η **υδρολογική μελέτη αφορά στην πλήρη λεκάνη απορροής ανάντη της θέσης ενδιαφέροντος**.
- Τυπικό σχήμα προσομοίωσης: μετασχηματισμός βροχής σε πλημμυρική απορροή, σε κλίμακα **υπολεκάνης**, διόδευση πλημμυρικών ροών στο **υδρογραφικό δίκτυο**

# Ο κύκλος της πλημμύρας ως τεχνικό αντικείμενο

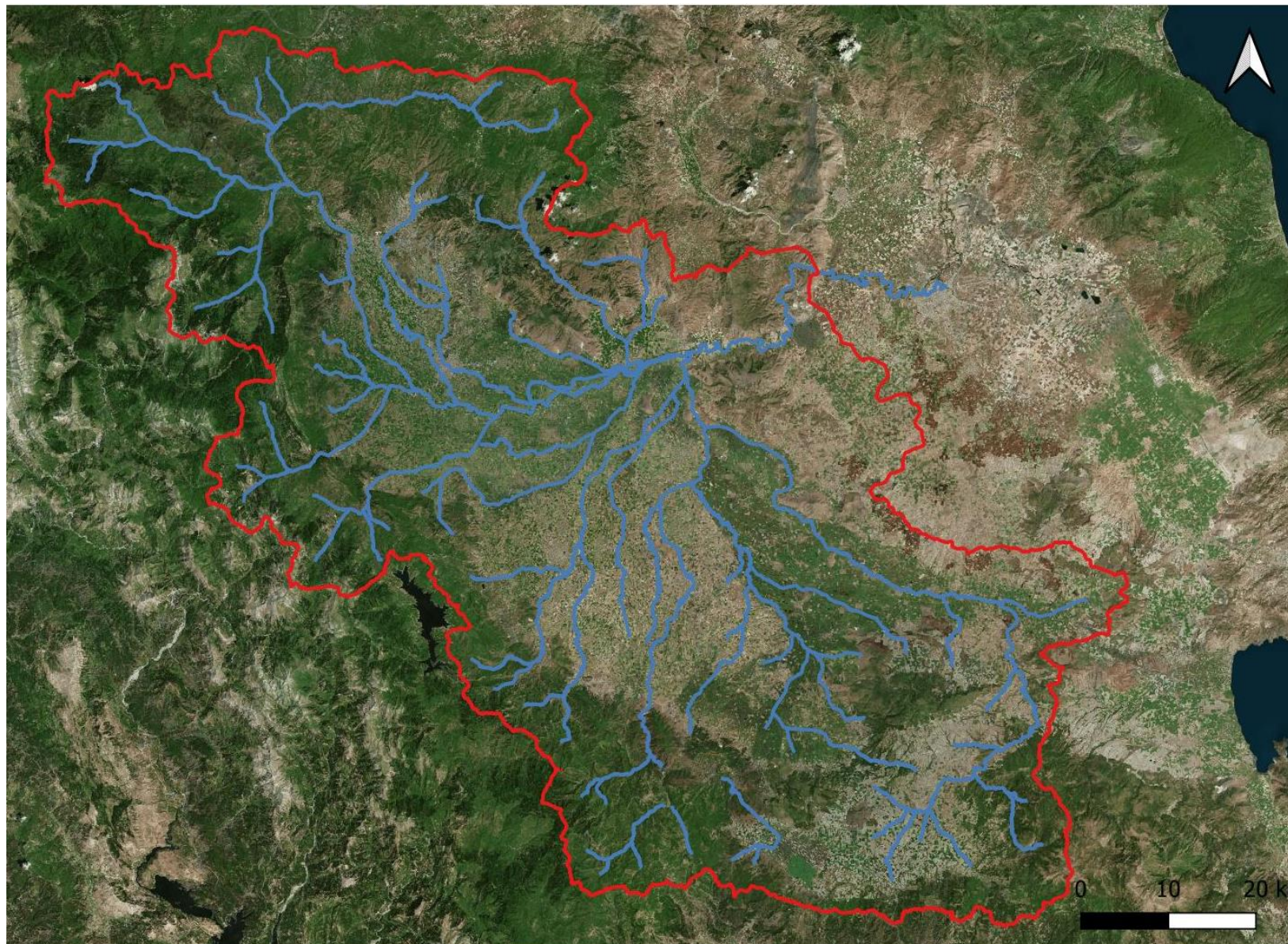
- **Γένεση πλημμύρας:**
  - Φυσικός μηχανισμός: βροχόπτωση (καταιγίδα) → απορροή
  - Διάκριση σε πλημμύρες από τοπική κατάκλυση λόγω της βροχόπτωσης (**pluvial flood**) ή από την υπερχείλιση υδατορευμάτων (**fluvial flood**)
  - Ειδικές περιπτώσεις: θραύση φράγματος, τσουνάμι, παράκτιες πλημμύρες
- **Μεταφορά - διόδευση:**
  - Φυσικό σύστημα: Εδαφική (υπολεκάνες) & εγκιβωτισμένη ροή (υδατορεύματα)
  - Τεχνικά έργα: κανάλια, τάφροι, δίκτυα ομβρίων (αστικές περιοχές), υπερχειλιστές
- **Ανάσχεση και προστασία:**
  - Ολική ή μερική συγκράτηση: φράγματα, λεκάνες κατάκλυσης
  - Αντιπλημμυρική προστασία: αναχώματα
  - Διαχείριση: θυροφράγματα
- **Επιπτώσεις:** κατακλυόμενες εκτάσεις, υποδομές, δραστηριότητες

# Αρχικές αποφάσεις

- **Διαμόρφωση υδρογραφικού δικτύου και διαχωρισμός σε υπολεκάνες:**
  - Επιδιωκόμενο επίπεδο λεπτομέρειας ανάλογα με τη σκοπιμότητα της μελέτης
  - Πύκνωση κόμβων υδρογραφικού δικτύου σε θέσεις ελέγχου (φράγματα, εγκάρσια τεχνικά έργα, είσοδος σε περιοχές υψηλής πλημμυρικής επικινδυνότητας)
  - Πύκνωση υπολεκανών για καλύτερη αποτύπωση της ετερογένειας
- **Χρονικά μεγέθη προσομοίωσης:**
  - Διάρκεια επεισοδίου βροχόπτωσης,  $D$ : πολλαπλάσιο του χρόνου συγκέντρωσης,  $t_c$ , της συνολικής λεκάνης απορροής
  - Χρονικό βήμα,  $\Delta t$ : μικρότερο από το μικρότερο  $t_c$  των υπολεκανών
  - Σύσταση: εκτίμηση χρόνου συγκέντρωσης κατά Giandotti
- **Περίοδος επαναφοράς:**
  - Σχεδιασμός έργου για βροχόπτωση πιθανότητας υπέρβασης  $1/T$
  - Έλεγχος ανθεκτικότητας (resilience) για μεγαλύτερα  $T$

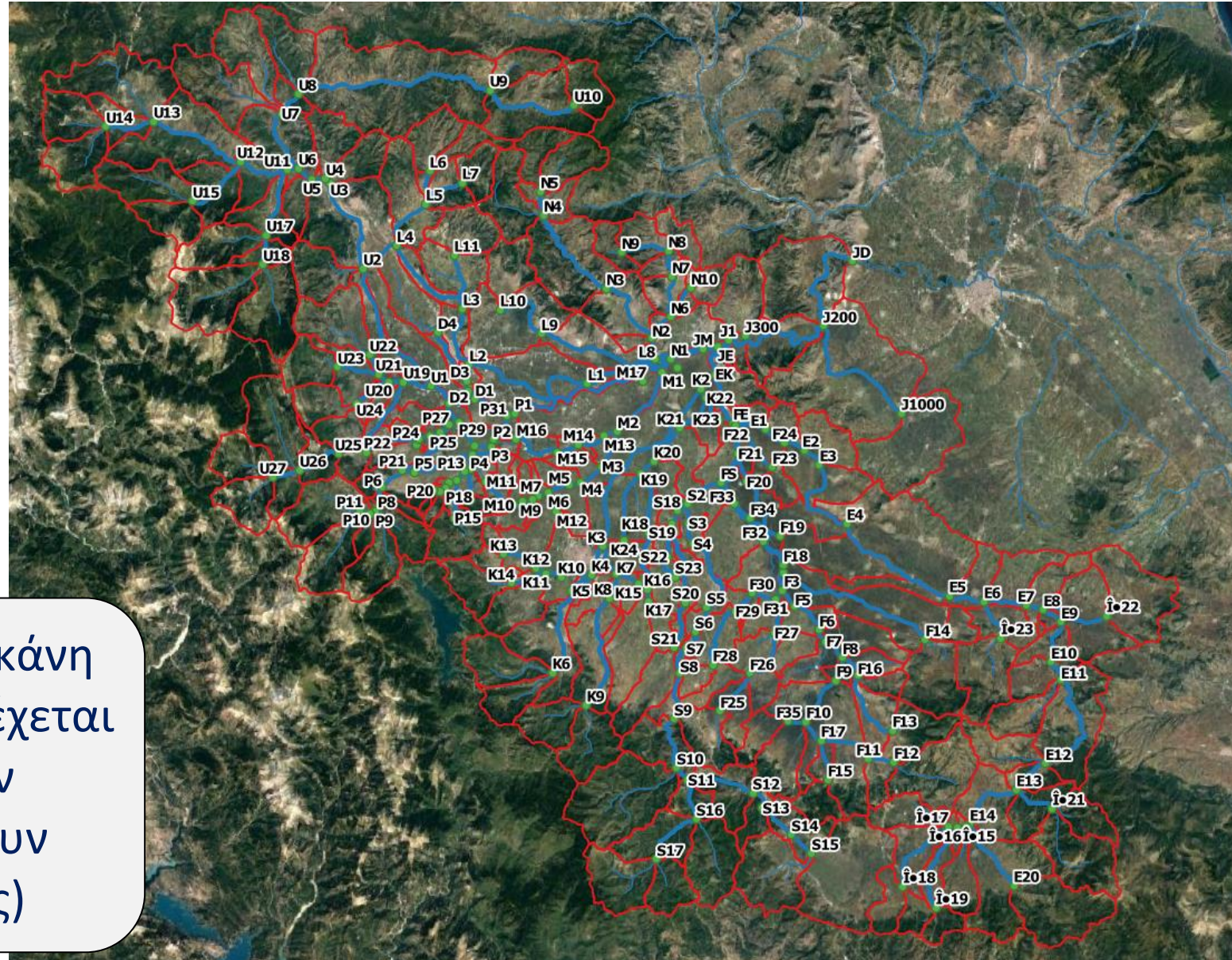
# Παράδειγμα: Λεκάνη απορροής Πηνειού (Δυτική Θεσσαλία)

- **Σκοπός μελέτης:** Στρατηγικό σχέδιο αντιπλημμυρικής προστασίας Δυτ. Θεσσαλίας
- Πεδινό τμήμα **έντονα τροποποιημένο** (διευθετημένα κανάλια, αναχώματα, τάφροι)
- Έκταση λεκάνης απορροής: 6397 km<sup>2</sup>
- **Σχηματοποίηση:** διαμόρφωση εννοιολογικού δικτύου αποτελούμενου από κόμβους, κλάδους και υπολεκάνες



# Σχηματοποίηση υδρολογικού συστήματος

- 212 κόμβοι
- 210 κλάδοι
- 306 υπολεκάνες
- Αυτόματη χάραξη φυσικού συστήματος, με χρήση ΣΓΠ
- Χειροκίνητη χάραξη πεδινών λεκανών & τεχνητών τμημάτων του υδρογραφικού δικτύου



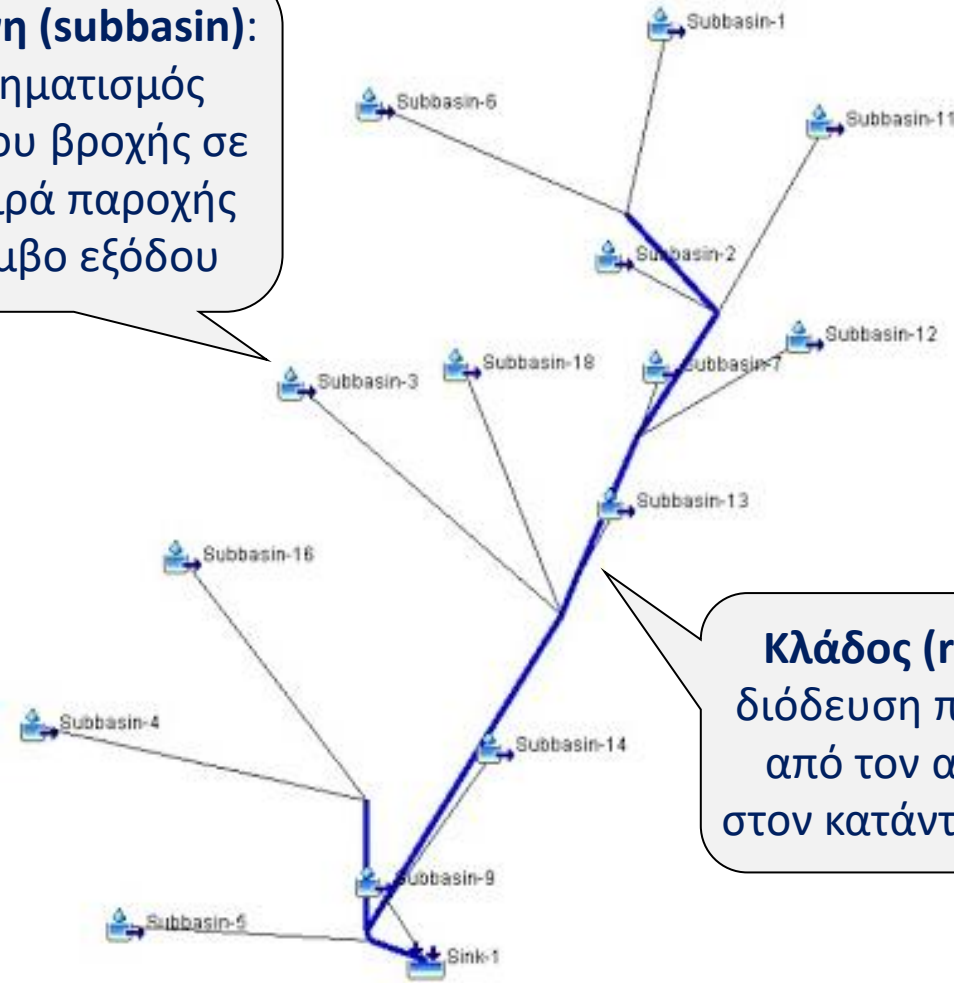
**Τοπολογικοί κανόνες:** Κάθε υπολεκάνη απορρέει σε έναν κόμβο και διατρέχεται από έναν και μόνο κλάδο (πλην των ανάντη υπολεκανών, που απορρέουν απευθείας στον κόμβο εξόδου τους)

# Απεικόνιση μοντέλου δικτύου στο περιβάλλον HEC-HMS



Catchments and drainage lines

**Υπολεκάνη (subbasin):**  
μετασχηματισμός  
επεισοδίου βροχής σε  
χρονοσειρά παροχής  
στον κόμβο εξόδου



**Κλάδος (reach):**  
διόδευση παροχής  
από τον ανάντη  
στον κατάντη κόμβο

Sub-basins and reaches

# Όμβριες καμπύλες

- Υπόβαθρο για την παραγωγή **υετογραφημάτων σχεδιασμού**
- **Στατιστική ανάλυση** ακραίων βροχοπτώσεων → σχέσεις έντασης βροχόπτωσης  $i$  (mm/h), διάρκειας (ακριβέστερα: χρονικής κλίμακας)  $k$  (h) και περιόδου επαναφοράς  $T$  (έτη)
- Διατίθενται «επίσημες» όμβριες καμπύλες σε **εθνικό επίπεδο** (<https://floods.ypeka.gr>)
- Επανεκτίμηση μετά από τεκμηρίωση
- **Γενική συναρτησιακή σχέση** 5 παραμέτρων:

$$i(k, T) = \lambda \frac{(T/\beta)^\xi - 1}{(1 + k/\alpha)^\eta}$$

## Πρόσφατη επικαιροποίηση (2023)

- Τυπικές τιμές για όλη την επικράτεια:  $\xi = 0.180$  («ουρά» κατανομής) και  $\alpha = 0.180$
- Μικρή μεταβλητότητα παραμέτρου σχήματος  $\eta$  (ενιαίες τιμές ανά Υδατικό Διαμέρισμα)
- Παράμετροι  $\lambda$  και  $\beta$ : χάρτες χωρικής κατανομής, προσαρμόζοντας επιφάνειες παλινδρόμησης στις σημειακές τιμές 940 βροχομετρικών σταθμών της χώρας (+ αναλύσεις δορυφορικών δεδομένων)

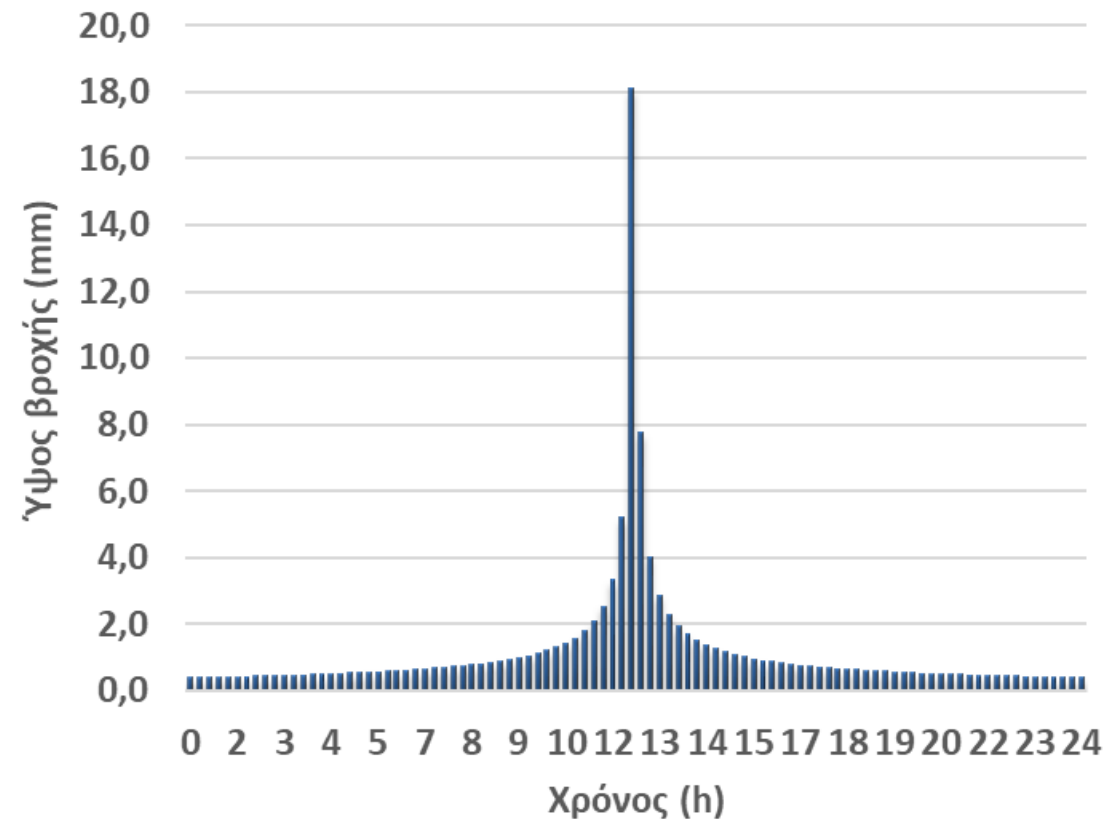


# Υετογράφημα σχεδιασμού

- Στόχος: διαμόρφωση συνθετικού επεισοδίου καταιγίδας δεδομένης περιόδου επαναφοράς
- Γενική παραδοχή: Εκτίμηση **επιμέρους εντάσεων** βροχής για όλες τις κλίμακες  $k = \Delta t, 2\Delta t \dots, n \Delta t = D$  από την όμβρια καμπύλη  $i(k, T)$ , υποθέτοντας κοινό  $T$
- **Επιφανειακή αναγωγή** (απομείωση) σημειακών εντάσεων με την εμπειρική σχέση ( $A$ : έκταση λεκάνης σε  $\text{km}^2$ ):

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

- Υπολογισμός αθροιστικών και επιμέρους υψών βροχής.
- Κατάταξη ανηγμένων υψών σε συγκεκριμένη χρονική σειρά, με βάση τυπικά **χρονικά προφίλ** της βιβλιογραφίας (εναλλασσόμενα μπλοκ, δυσμενέστερη διάταξη)



# Επιφανειακή απορροής λεκάνης – Μέθοδος NRCS-CN

- Ανάπτυξη μεθόδου: Soil Conservation Service (πλέον Natural Resources Conservation Service), με βάση πολύ μεγάλο δείγμα μετρήσεων σε λεκάνες των ΗΠΑ
- Παράγεται αθροιστική απορροή,  $h_e$  (ενεργός βροχόπτωση) όταν το αθροιστικό ύψος βροχής,  $h$ , υπερβεί κάποια οριακή τιμή,  $h_{a0}$  (**αρχικό έλλειμμα**)
- Το επιπλέον ελλειμματικό ύψος κατά τη διάρκεια μιας μεγάλης βροχόπτωσης δεν μπορεί να ξεπεράσει μια μέγιστη τιμή  $S$  (**μέγιστη δυνητική κατακράτηση**)
- Προκύπτει η ακόλουθη σχέση, που ισχύει για **οποιαδήποτε χρονική κλίμακα**:

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

- Η τιμή του  $S$  εξαρτάται από τις **προηγούμενες συνθήκες υγρασίας** του εδάφους, άρα από την προηγούμενη βροχόπτωση (κορεσμένο έδαφος:  $S \approx 0, h_e \approx h - h_{a0}$ )
- Παράμετροι μοντέλου:  $S$  και  $h_{a0}$

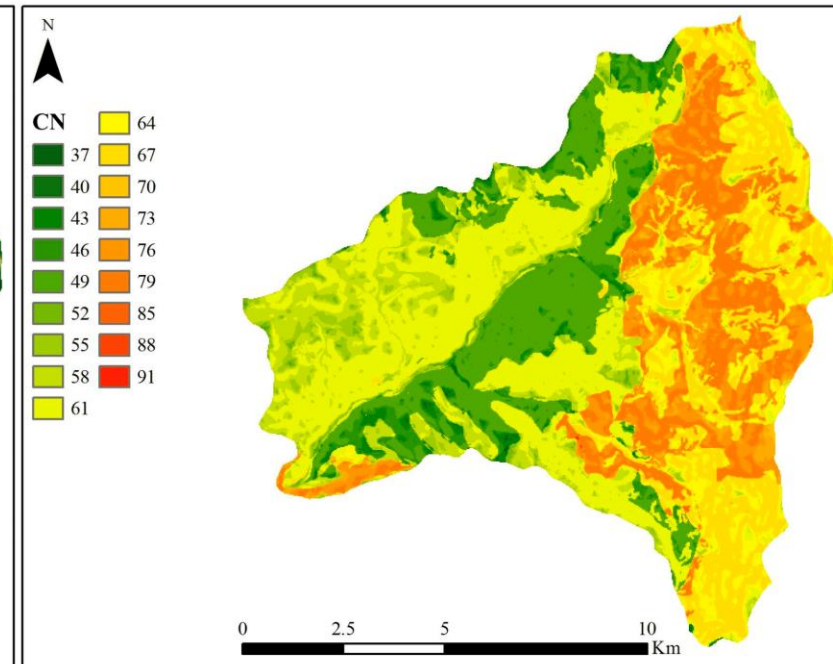
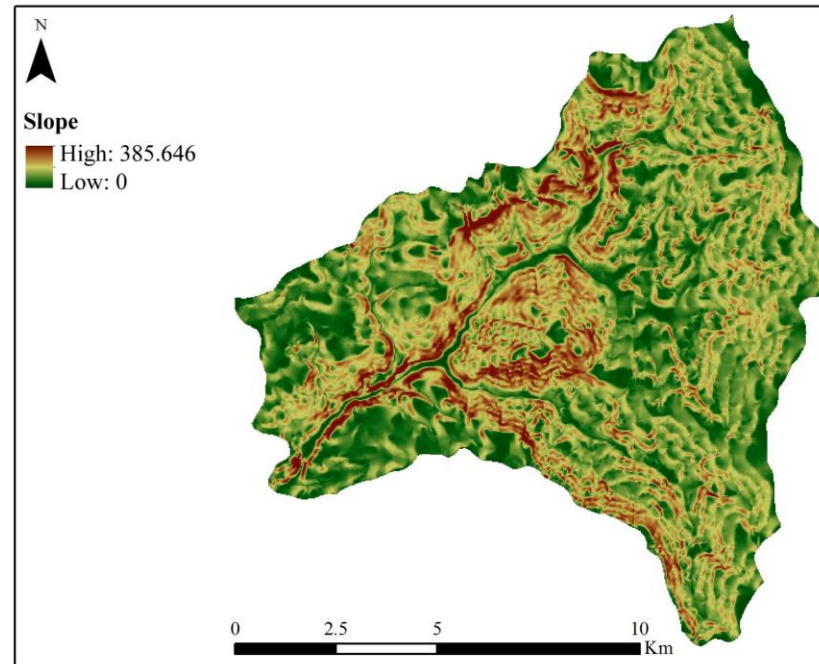
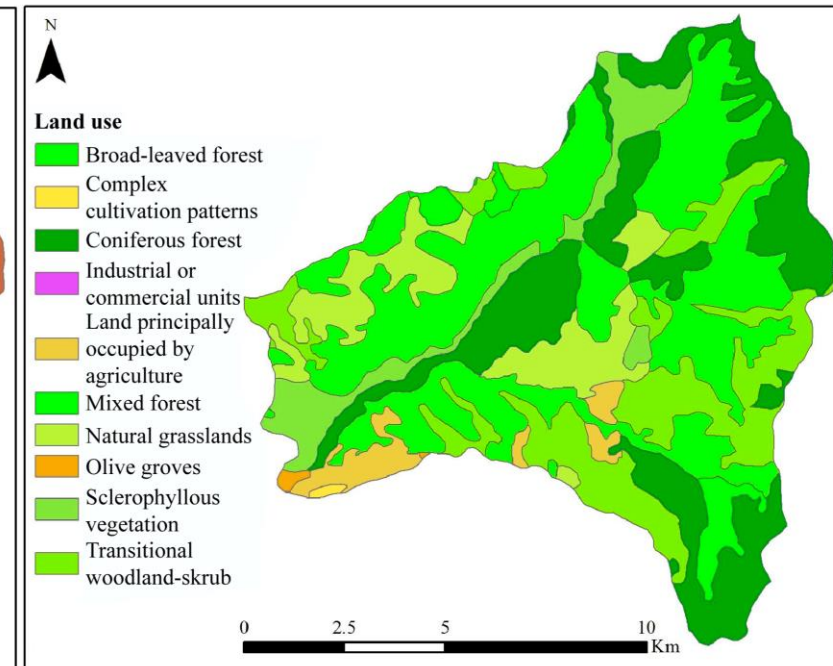
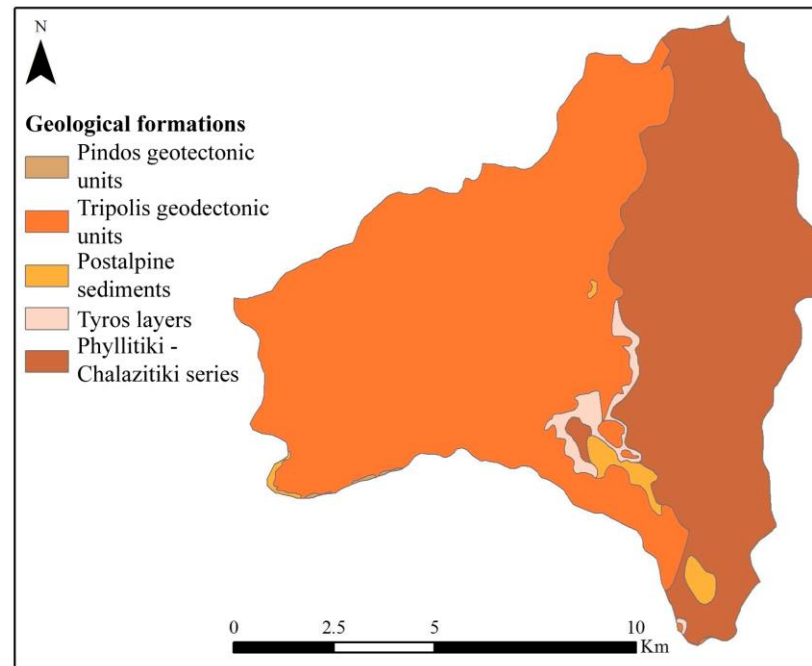
# Μέγιστη δυνητική κατακράτηση

- Εκτιμάται ως συνάρτηση ενός χαρακτηριστικού υδρολογικού μεγέθους της λεκάνης, που καλείται **αριθμός καμπύλης απορροής** (runoff curve number, *CN*):

$$S = 254(100/CN - 1)$$

- Η παράμετρος *CN* συμπυκνώνει τα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά μιας χωρικής ενότητας (π.χ. λεκάνη απορροής) σε μια ενιαία τιμή, από 0 έως 100 (πρακτικά, από 28 έως 100).
- Για δεδομένες συνθήκες εδαφικής υγρασίας, η τιμή του *CN* εξαρτάται από τα εδαφολογικά χαρακτηριστικά και τις χρήσεις γης της λεκάνης.
- Εκτίμηση *CN* για **μέσες συνθήκες υγρασίας** (τύπος II), με βάση πίνακες της Soil Conservation Service (διαχωρισμός εδαφών σε τέσσερις **υδρολογικούς τύπους**, ανάλογα με την υδατοπερατότητά τους, και συνδυασμός με **χρήσεις γης**).
- Αναγωγή σε **υγρές** (τύπος I) και **ξηρές** (τύπος III) συνθήκες, μέσω εμπειρικών σχέσεων.
- Νέα προσέγγιση: κατηγοριοποίηση τριών (αντί δύο) φυσιογραφικών χαρακτηριστικών του εδάφους σε κλάσεις (υδατοπερατότητα, φυτοκάλυψη, αποστραγγιστική ικανότητα) και εκτίμηση *CN* ως σταθμισμένο άθροισμα τριών δεικτών.

# Χάρτες χωρικής μεταβολής του $CN$ ως επαλληλία τριών θεματικών επιπέδων (γεωλογία, κάλυψη γης, κλίσεις)



Τεκμηρίωση της μεθόδου και πρακτικές εφαρμογές στα υδρολογικά μοντέλα: Savvidou, E., A. Efstratiadis, A.D. Koussis, A. Koukouvinos, and D. Skarlatos, The curve number concept as a driver for delineating hydrological response units, *Water*, 10(2), 194, doi:10.3390/w10020194, 2018

# Αρχικό έλλειμμα

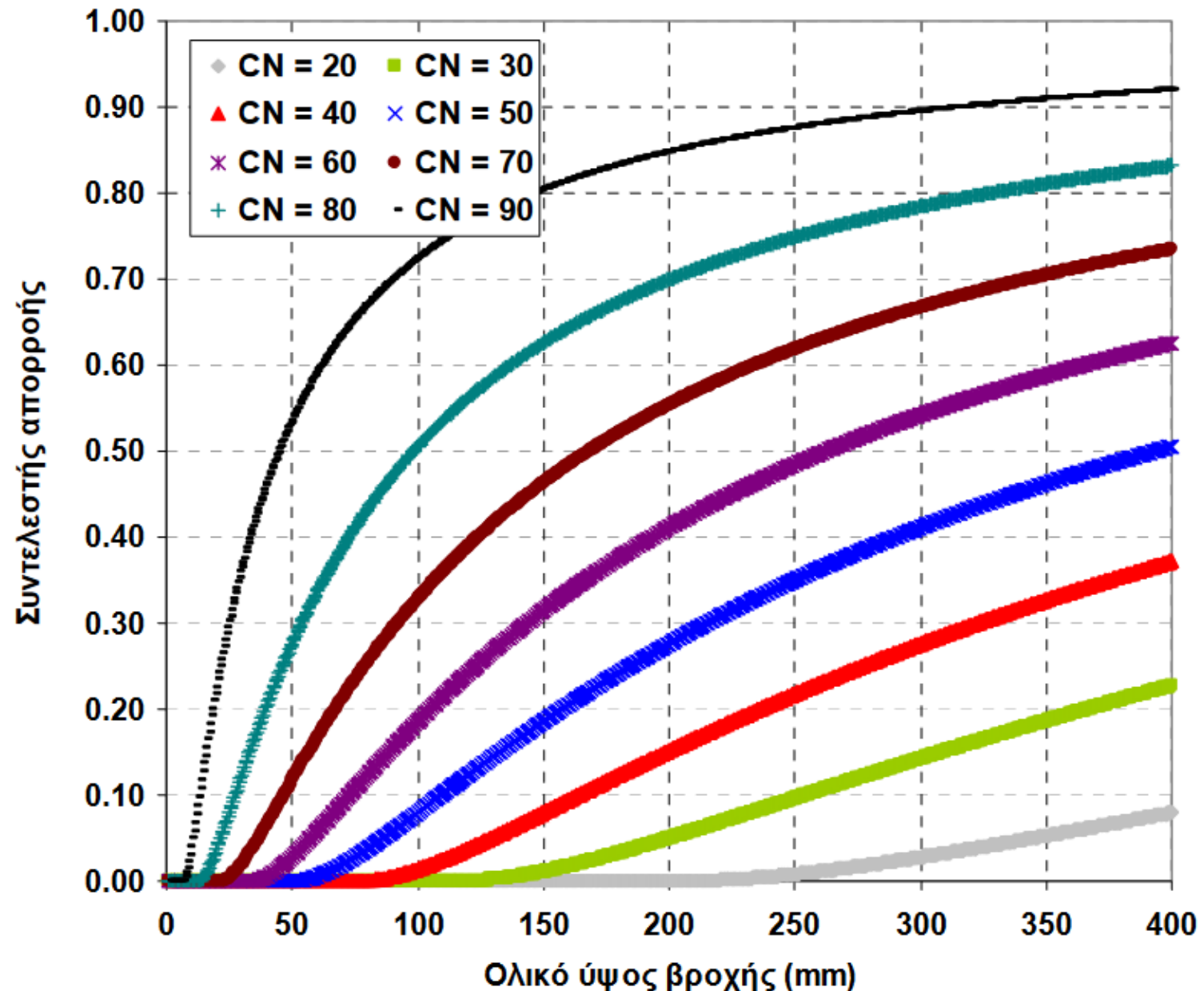
- Προσωρινή κατακράτηση νερού στο ανάγλυφο του εδάφους και τη βλάστηση, που στη συνέχεια μετατρέπεται εν μέρει σε απώλειες λόγω εξάτμισης και εν μέρει σε διήθηση.
- Κατά την Soil Conservation Service, εκτιμάται ως ποσοστό  $\lambda = 20\%$  της μέγιστης δυνητικής κατακράτησης, ήτοι  $h_{a0} = 0.20 S$ .
- Διεθνής εμπειρία και αναλύσεις στην Ελλάδα και την Κύπρο συνιστούν την εφαρμογή **ποσοστού 5%** → μικρότερη κατακράτηση → ταχύτερη απόκριση λεκάνης
- Για  $\lambda = 5\%$ , γίνεται αναγωγή του  $CN$  «αναφοράς» που εκτιμάται από φυσιογραφικά δεδομένα και αντιστοιχεί σε ποσοστό 20%, με βάση τη σχέση:

$$CN_{0.05} = CN_{0.20} / (1.42 - 0.0042 CN_{0.20})$$

- Σύσταση για σχεδιασμό:
  - **Ορεινές & ημιορεινές λεκάνες:**  $CN_{0.05}$
  - **Πεδινές λεκάνες:**  $CN_{0.20}$  (πιο μεγάλη αρχική κατακράτηση, λόγω ανάγλυφου και έργων ανάσχεσης, π.χ. σε αγροτικές περιοχές)

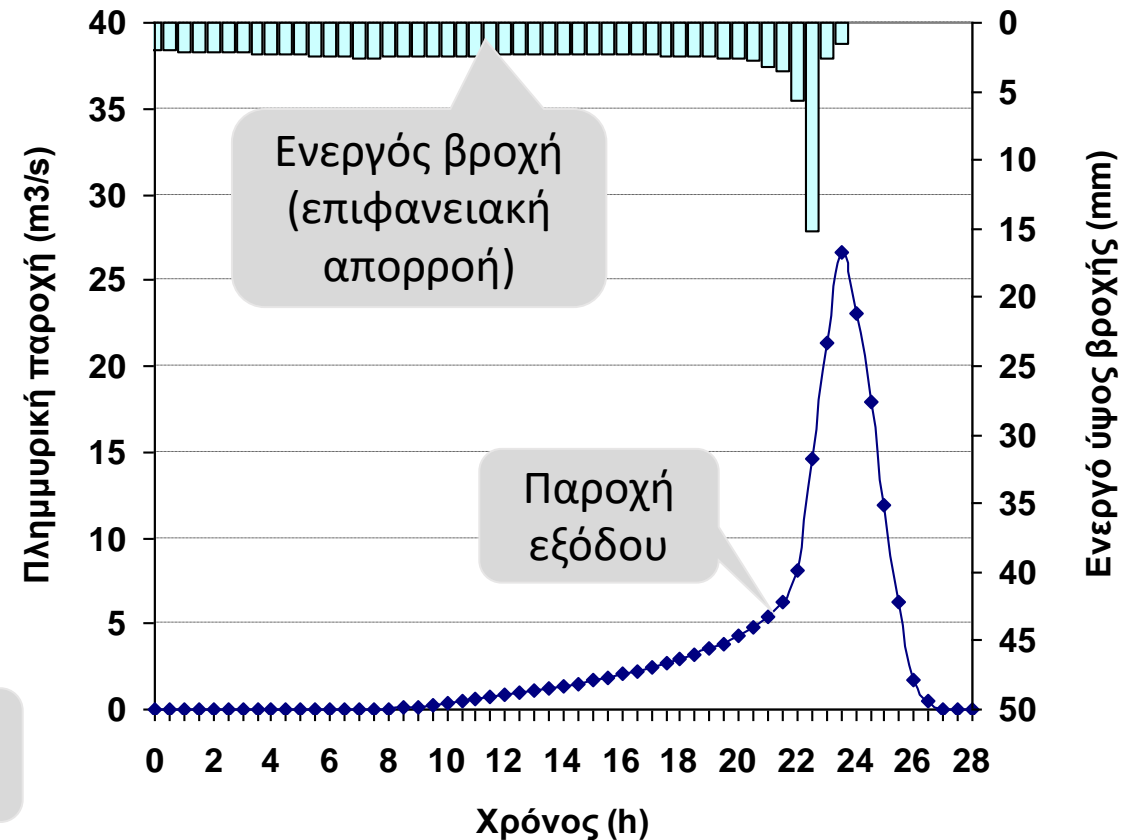
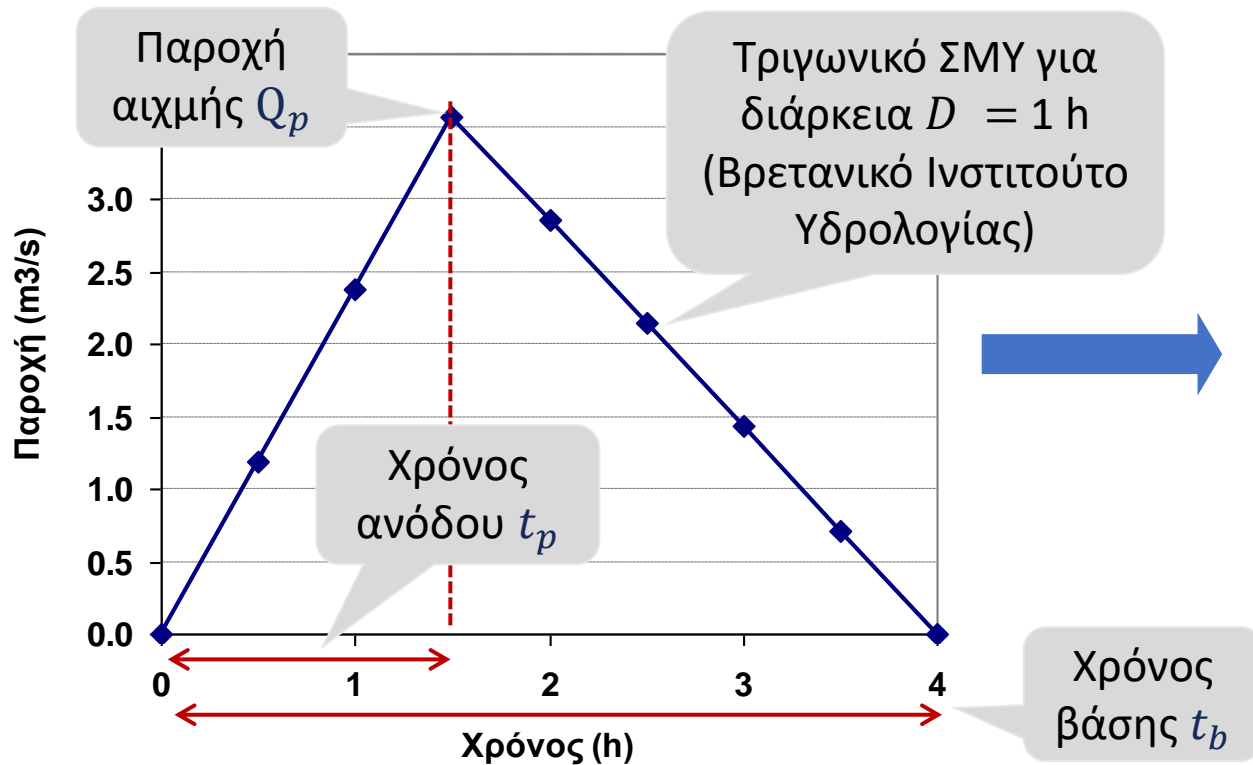
# Φυσική ερμηνεία μεθόδου NRCS-CN: Δυναμική μεταβολή συντελεστή απορροής κατά την εξέλιξη του επεισοδίου βροχής

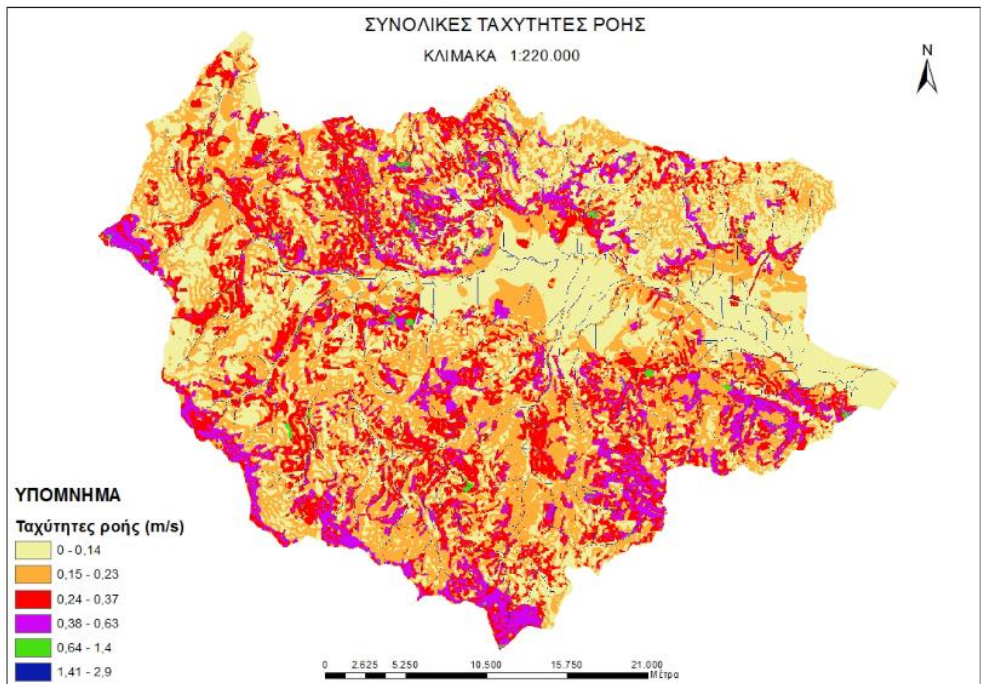
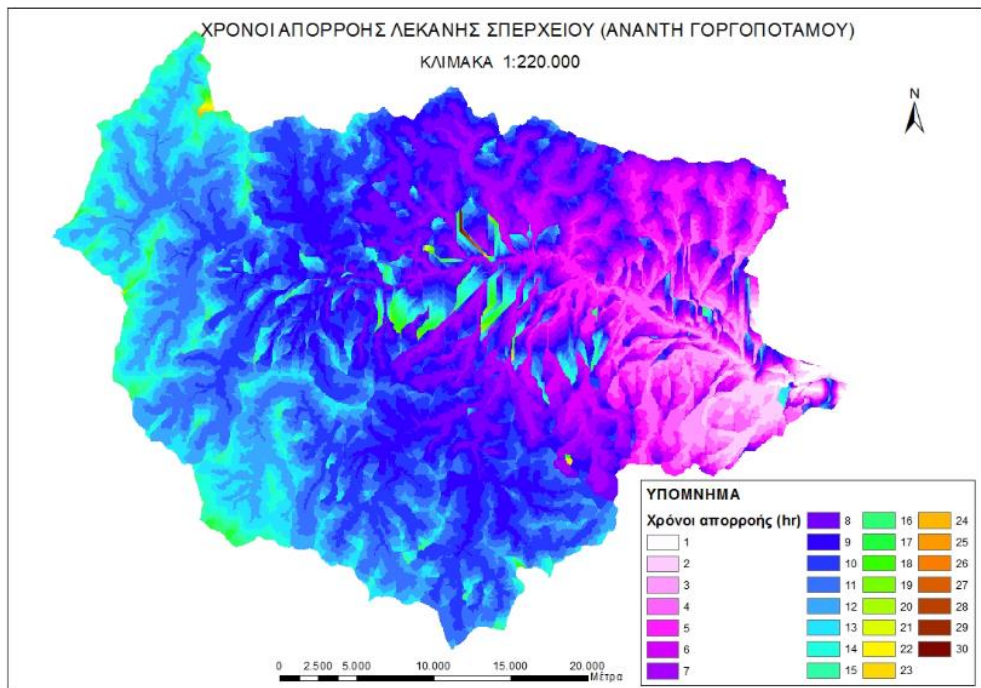
Καινοτομίες που παρήχθησαν με βάση μετρήσεις  
πλημμυρικών ροών στην Ελλάδα και την Κύπρο:  
Ευστρατιάδης κ.ά., Τεχνική έκθεση περιγραφής  
περιοχικών σχέσεων εκτίμησης χαρακτηριστικών  
υδρολογικών μεγεθών, ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ – Εκτίμηση  
πλημμυρικών ροών στην Ελλάδα σε συνθήκες  
υδροκλιματικής μεταβλητότητας: Ανάπτυξη φυσικά  
εδραιωμένου εννοιολογικού-πιθανοτικού πλαισίου  
και υπολογιστικών εργαλείων, Τομέας Υδατικών  
Πόρων & Περιβάλλοντος – ΕΜΠ, 146 σ., 2014



# Μοναδιαίο υδρογράφημα

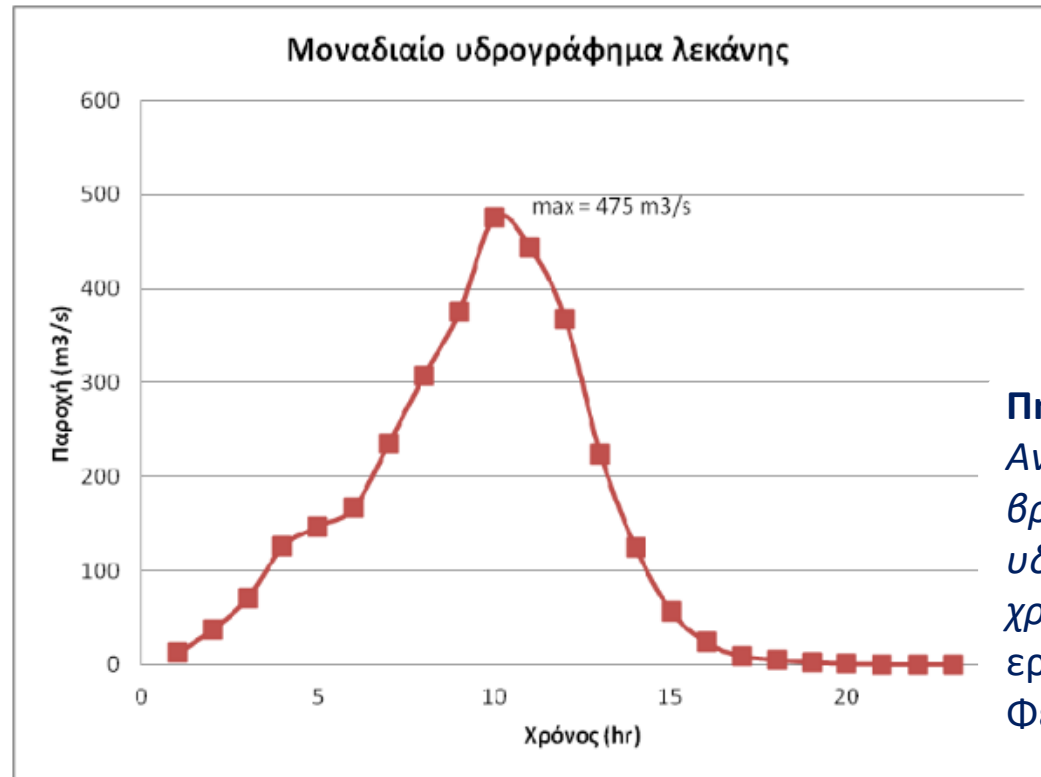
- **Εννοιολογικό υδραυλικό μοντέλο λεκάνης:** συνάρτηση μετασχηματισμού (convolution function) για τη διόδευση της πλημμυρικής απορροής σε παροχή στην έξοδο της λεκάνης
- **Θεμελιώδης παραδοχή:** η απόκριση της λεκάνης περιγράφεται ως σύστημα γραμμικών διαφορικών εξισώσεων → αρχές αναλογίας και επαλληλίας
- Στην πράξη εφαρμόζονται **συνθετικά ΜΥ**





# Φυσικό υπόβαθρο: Ισόχρονες

- Ταχύτητες ροής στο έδαφος (συνάρτηση της κλίσης και της τραχύτητας) και στο υδρογραφικό δίκτυο (συνάρτηση της τάξης του κάθε κλάδου)
- Συσσώρευση χωρικά ομοιόμορφης απορροής ύψους 10 mm στην έξοδο της λεκάνης



Πηγή: Καββαδά, Ο.,  
 Ανάλυση μεθόδων  
 βροχής-απορροής σε  
 υδρολογικά μοντέλα με  
 χρήση ΓΣΠ, Μεταπτυχιακή  
 εργασία, 166 σ., ΕΜΠ,  
 Φεβρουάριος 2012



# Συνθετικά ΜΥ της NRCS

- Αδιαστατοποιημένα, στη μορφή  $t/t_p$ ,  $Q/Q_p$
- **Χρόνος ανόδου** για διάρκεια ενεργού βροχής (απορροής)  $D$  και χρόνο υστέρησης  $t_L$ :

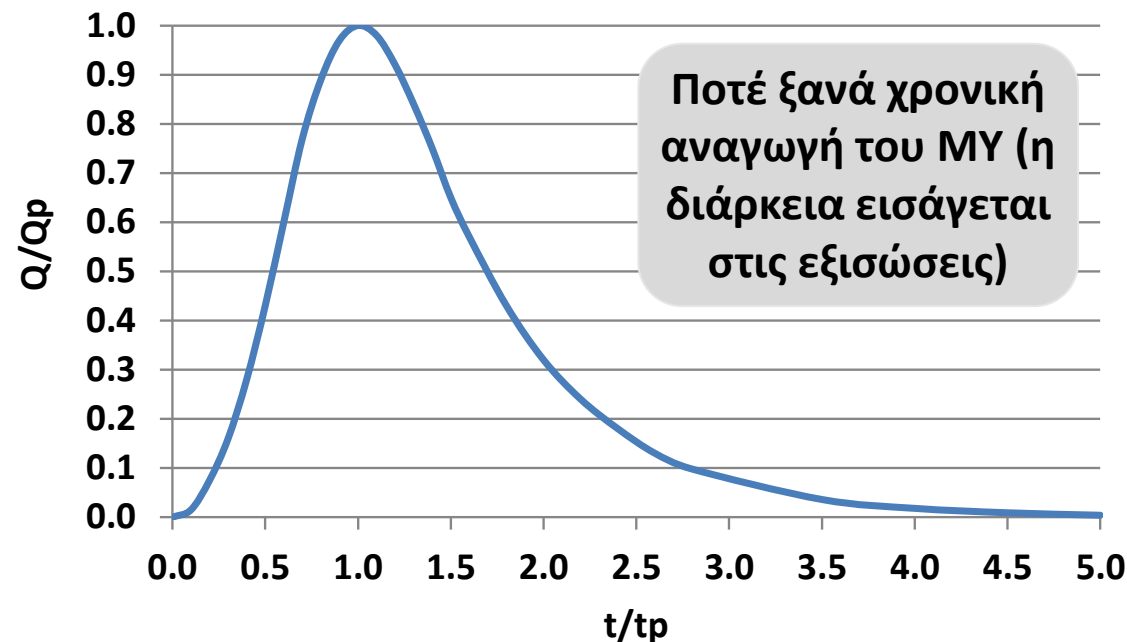
$$t_p = t_L + D/2 = 0.6 t_c + D/2$$

- **Παροχή αιχμής** για ομοιόμορφη απορροή  $h_0$ :

$$q_p = K A h_0 / t_p$$

όπου  $A$  η επιφάνεια της λεκάνης,  $h_0 = 10$  mm (ορισμός ΜΥ), και  $K$  παράγοντας ρυθμού της αιχμής (**peak rate factor**) που χαρακτηρίζει το σχήμα του ΜΥ.

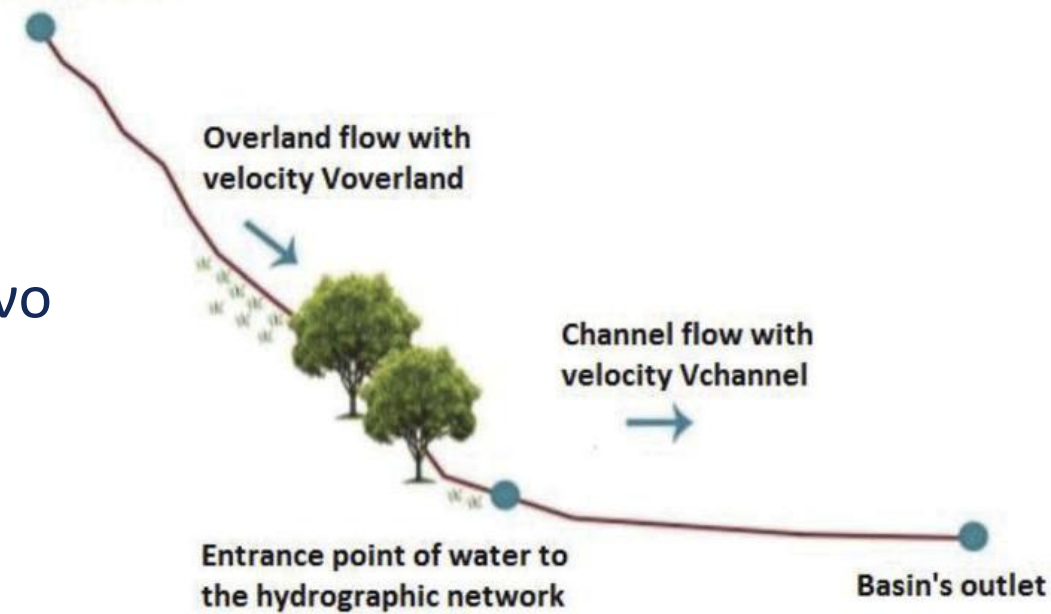
- **Χρόνος βάσης** για το τυποποιημένο ΜΥ **Standard PRF 484**:  $t_b = 5t_p$
- Σύσταση για **σχεδιασμό**:
  - **Ορεινές & ημιορεινές λεκάνες**: PRF 484
  - **Πεδινές λεκάνες**: πιο πεπλατυσμένα ΣΜΥ, με μεγαλύτερο χρόνο βάσης



# Κλασικός χρόνος συγκέντρωσης

- Διάφορες έννοιες χρονικών μεγεθών στην τεχνική υδρολογία, με διαφορετικούς ορισμούς
- Τυπικός ορισμός  $t_c$  όπως στο σχήμα, με βάση το χρόνο διαδρομής από το υδραυλικά πιο απομακρυσμένο σημείο της λεκάνης (;) ως την έξοδο αυτής
- Πληθώρα **εμπειρικών σχέσεων**, με βάση μετρήσεις πεδίου (**πόσες και πού;**)
- Χειρισμός ως χαρακτηριστικό μέγεθος της λεκάνης (**σταθερά**)
- Πολύ μεγάλο εύρος τιμών από τις διαφορετικές σχέσεις

The hydraulically most remote point of the basin



## ENGINEERS' NOTEBOOK

Ingenious Suggestions and Practical Data Useful in the Solution of a Variety of Engineering Problems

### Time of Concentration of Small Agricultural Watersheds

By Z. P. KIRPICH, JUN., AM. Soc. C.E.

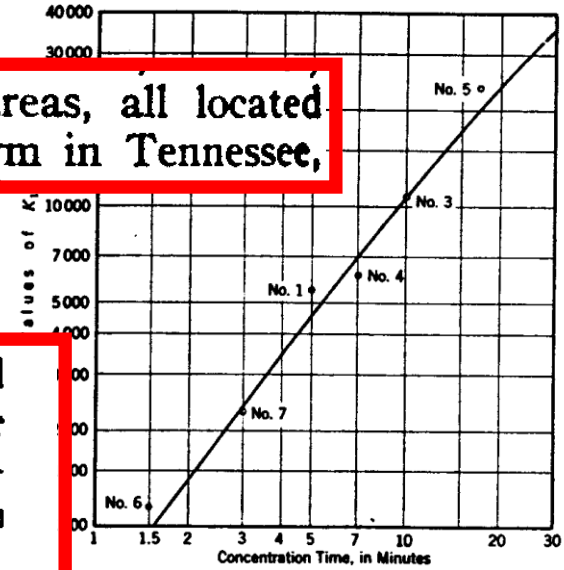
ASSISTANT HYDRAULIC ENGINEER, U.S. ENGINEERING OFFICE, BALTIMORE DISTRICT, BALTIMORE, MD.

TABLE I. CONCENTRATION DATA FROM SEVEN SMALL WATERSHEDS

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
WATER-SHED No.	TIME OF CONCENTRATION IN MINUTES	AREA IN ACRES	AVERAGE	AVERAGE				
1	5	20.7						
3	10	49.2						
4	7	15.7						
5	17	112.0						
6	1 1/2	1.25						
7	3	2.79						

These areas, all located on a farm in Tennessee,

concentration time and the  $K_1$  and  $K_2$ ; hence it is believed that the curves are applicable to the average small agricultural area ranging in size from 1 to 200 acres.



1. CONCENTRATION TIME OF SMALL AGRICULTURAL WATERSHEDS, BASED ON  $K_1$  AS DEFINED IN TEXT

Κριτική στις τρέχουσες πρακτικές: 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, doi:10.5194/nhess-14-1417-2014, 2014.

# Ο χρόνος συγκέντρωσης ως μεταβλητή

- Χρόνος = ταχύτητα προς μήκος → υδραυλικό μέγεθος
- Ταχύτητα εξαρτώμενη από την παροχή → παροχή εξαρτώμενη από τη βροχή → παροχή εξαρτώμενη από τη βροχή και τον χρόνο συγκέντρωσης
- Προτεινόμενη εμπειρική σχέση αναγωγής:

$$t_c(T) = t_c^* \sqrt{i(5)/i(T)}$$

όπου  $i(5)$  η κρίσιμη ένταση βροχής για  $T = 5$  έτη,  $t_c^*$  χρόνος αναφοράς που εκτιμάται με τη μέθοδο Giandotti, και  $i(T)$  η ένταση βροχής για την περίοδο επαναφοράς της μελέτης.

- Αύξηση **περιόδου επαναφοράς** επιδρά δυσμενώς ως προς **τρεις διαστάσεις**:
  - Αύξηση ύψους βροχής (όμβρια καμπύλη)
  - Αύξηση συντελεστή απορροής (μέθοδος NRCS-CN)
  - Μικρότεροι χρόνοι αιχμής και βάσης, μεγαλύτερη αιχμή (**στενότερο ΜΥ**)
  - Ταχύτερη διόδευση της πλημμύρας στο υδρογραφικό δίκτυο

# Διόδευση παροχών στους κλάδους

- Υδραυλικό πρόβλημα: μη μόνιμη ανομοιόμορφη ροή
- Απαιτείται ακριβής αναπαράστασή των διοδεύσεων στα χαμηλά τμήματα της λεκάνης, μέσω μοντέλων **υδροδυναμικής προσομοίωσης**
- Στο επίπεδο της υδρολογικής προσομοίωσης της πλήρους λεκάνης, εφαρμόζονται πολύ απλούστερες **υδρολογικές προσεγγίσεις** (το κατάντη δίκτυο μελετάται εκ νέου, υδραυλικά).
- Σύσταση για **σχεδιασμό**, με βάση την κλίση του κάθε κλάδου:
  - Κλίση  $>1\%$ : μέθοδος **χρονικής υστέρησης** (lag)  $\rightarrow$  χρονική μετατόπιση υδρογραφήματος
  - Κλίση  $<1\%$ : μέθοδος **Muskingum**  $\rightarrow$  χρονική μετατόπιση και εξομάλυνση
- Και οι δύο μέθοδοι απαιτούν τον ορισμό μιας χρονικής παραμέτρου (η μέθοδος Muskingum απαιτεί μία ακόμη παράμετρο)
- Για λόγους εσωτερικής συνέπειας του μοντέλου, θα πρέπει το άθροισμα να κλείνει στον χρόνο συγκέντρωσης της λεκάνης.

**Ημιεμπειρική διαδικασία εκτίμησης χρόνων ροής σε μοντέλα υδρολογικής προσομοίωσης και διάφορα άλλα πιο προχωρημένα:**

Efstratiadis, A., P. Dimas, G. Pouliasis, I. Tsoukalas, P. Kossieris, V. Bellos, G.-K. Sakki, C. Makropoulos, and S. Michas, Revisiting flood hazard assessment practices under a hybrid stochastic simulation framework, *Water*, 14(3), 457, doi:10.3390/w14030457, 2022