



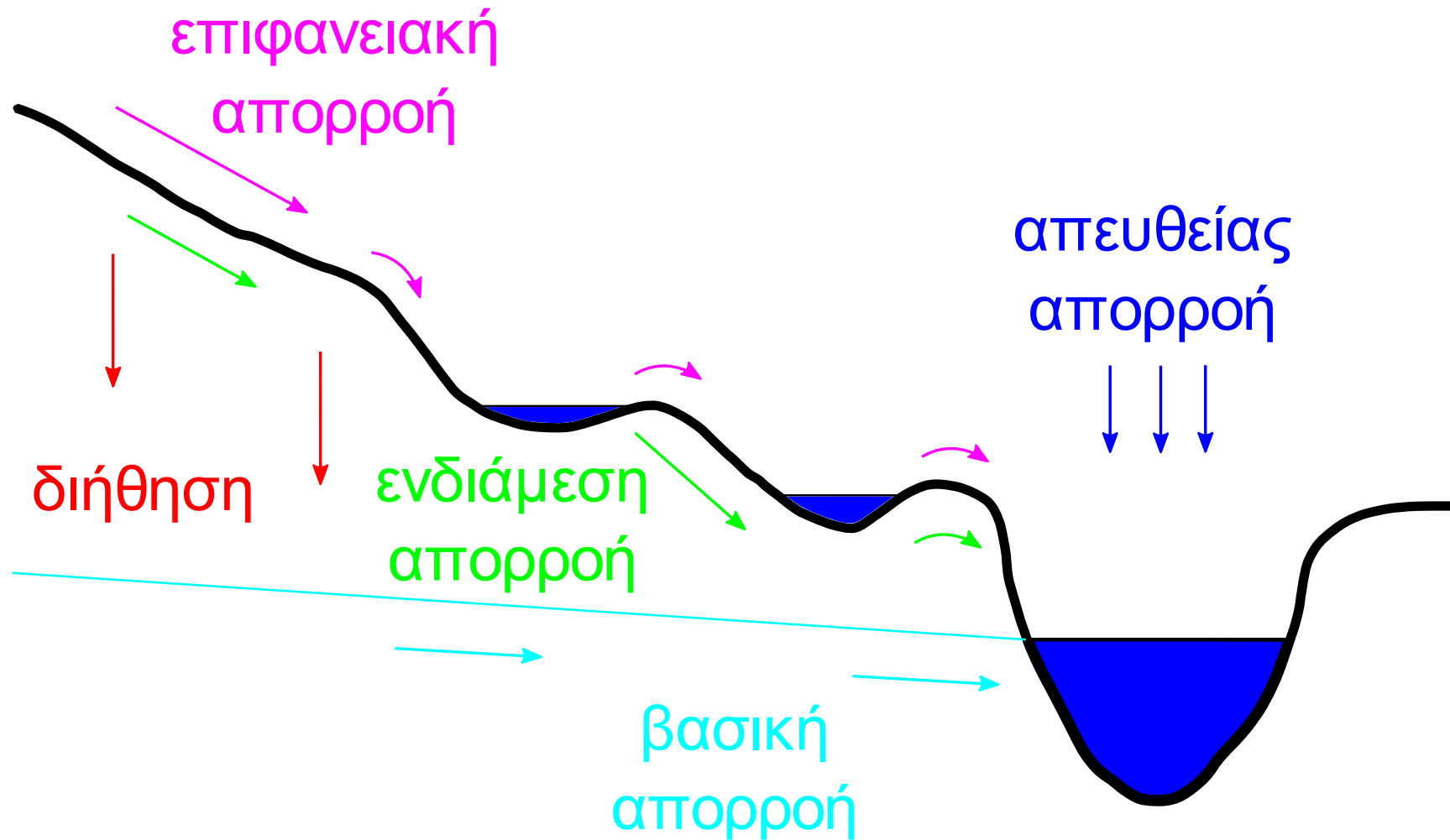
Το παρόν έργο αδειοδοτείται υπό τους όρους της άδειας Creative Commons Αναφορά Δημιουργού - Μη Εμπορική Χρήση - Όχι Παράγωγα Έργα 4.0. Για να δείτε ένα αντίγραφο της άδειας αυτής επισκεφτείτε το σύνδεσμο: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

# ΤΕΧΝΙΚΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ

## *Απορροή: μεσαίες και μεγάλες λεκάνες*

Δρ. Βασίλης Μπέλλος

# Απορροή



# Απορροή

- Το νερό που κινείται πάνω και κάτω από την επιφάνεια του εδάφους
- Απορροή = Βροχόπτωση – Απώλειες
- Επάνω στην επιφάνεια του εδάφους → επιφανειακή απορροή
- Επιφανειακή απορροή + ενδιάμεση απορροή → άμεση απορροή
- Υπόγειο νερό που συμβάλλει στην κοίτη του ποταμού → βασική απορροή

# Υδρογράφημα

- Η βασική μονάδα μέτρησης της απορροής είναι η παροχή σε μία διατομή ενός υδατορέματος
- Θεμελιώδεις μονάδες  $\rightarrow [L^3T^{-1}]$
- Συνήθεις μονάδες  $\rightarrow m^3/s$  ή  $L/s$
- Υδρογράφημα  $\rightarrow$  η μεταβολή της παροχής σε σχέση με το χρόνο

# Μέγεθος λεκανών

- **Μικρό μέγεθος**
  - Μέχρι 5~10 km<sup>2</sup>
- **Μεσαίο μέγεθος**
  - Μέχρι 100~5000 km<sup>2</sup>
- **Μεγάλο μέγεθος**
  - Μεγάλα ποτάμια συστήματα

# Αριθμητικά μοντέλα

- Βροχόπτωσης-απορροής
- Διόδευσης υδρογραφήματος (routing) } «Υδρολογικά» μοντέλα
- Αποχέτευσης
- Μονάδας Επεξεργασίας Υγρών Αποβλήτων } Αστική Υδρολογία
- Υδατορέματος/Ποταμού
- Πλημμυρικού πεδίου } «Υδραυλικά» μοντέλα
- Υπόγεια νερά

# Αριθμητικά μοντέλα

- Βροχόπτωσης-απορροής
  - Διόδευσης υδρογραφήματος (routing)
- » «Υδρολογικά» μοντέλα
- Αποχέτευσης
  - Μονάδας Επεξεργασίας Υγρών Αποβλήτων
- » Αστική Υδρολογία
- Υδατορέματος/Ποταμού
  - Πλημμυρικού πεδίου
- » «Υδραυλικά» μοντέλα
- Υπόγεια νερά

# Μοντέλα βροχόπτωσης-απορροής

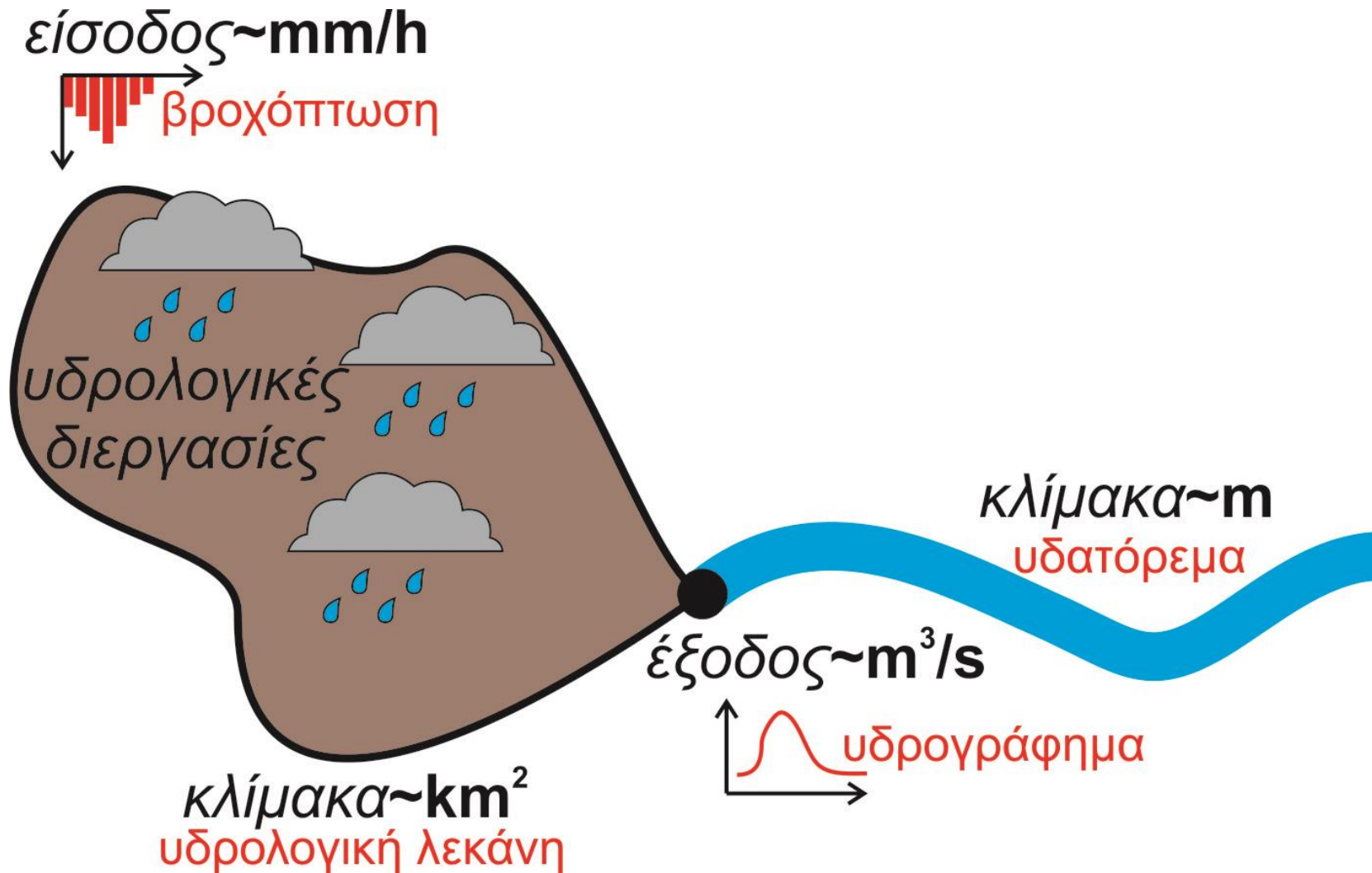
- **Ορθολογική μέθοδος** → **εμπειρικό μοντέλο**
  - Μόνο σε μικρές λεκάνες (<10 km<sup>2</sup>)
- **Μοναδιαίο Υδρογράφημα (ΜΥΓ)** → **εννοιολογικό μοντέλο**
  - Μετρήσεις
  - Συνθετικό ΜΥΓ
- **Μοντέλα φυσικής βάσης**
  - Κατανεμημένα
  - Λογισμικά



# Εφαρμογή

	μικρές λεκάνες	μεσαίες λεκάνες	μεγάλες λεκάνες
ορθολογική μέθοδος	συνήθως	δεν εφαρμόζεται	δεν εφαρμόζεται
μοναδιαίο υδρογράφημα	δεν εφαρμόζεται	συνήθως	κατά περίπτωση
μοντέλα διόδευσης	κατά περίπτωση	κατά περίπτωση	συνήθως

# Κλίμακες



# Μοναδιαίο Υδρογράφημα

- **Sherman 1932**
- **Χαρακτηριστικά βροχής**
  - Ομοιόμορφα κατανεμημένα στο χώρο
  - Ομοιόμορφη ένταση
- **Υδρογράφημα άμεσης απορροής για βροχή διάρκειας  $t$  και περισεύματος βροχής ύψους 1 cm**
  - ΜΥΓ 1 h
  - ΜΥΓ 2 h
  - ...

# Παραδοχές ΜΥΓ για τη λεκάνη

- Οι βροχές ίσης διάρκειας δίνουν ίδιο τύπο υδρογραφήματος ανεξάρτητα από την ένταση βροχής
- Η άμεση απορροή που προκαλείται από μία βροχή είναι ανεξάρτητη από τις προηγούμενες ή τις επόμενες βροχές
- Η υδρολογική κατάσταση παραμένει αμετάβλητη

# Ισχύουν στη φύση;

- Όσο μεγαλύτερη η ένταση → μεγαλύτερη αποθήκευση στο υδρογραφικό δίκτυο → επιμήκυνση της απορροής → μεγαλύτερη βάση στο υδρογράφημα απορροής
- Η προηγούμενη βροχή επηρεάζει τη βασική απορροή → ΜΥΓ μόνο για άμεση απορροή → υγρασία εδάφους/επιφανειακές κοιλότητες;
- Στη χρονική κλίμακα που εξετάζουμε ισχύει η μη μεταβολή της υδρολογικής κατάστασης → ανθρωπογενείς παρεμβάσεις;

# Τυπικές διάρκειες

- **Sherman (1949)**

- $>2500 \text{ km}^2 \rightarrow \text{MYΓ } 12 \text{ h} \sim \text{MYΓ } 24 \text{ h}$
- $250 \text{ km}^2 \sim 2500 \text{ km}^2 \rightarrow \text{MYΓ } 6 \text{ h} \sim \text{MYΓ } 12 \text{ h}$
- $50 \text{ km}^2 \sim 250 \text{ km}^2 \rightarrow \text{MYΓ } 2 \text{ h} \sim \text{MYΓ } 6 \text{ h}$
- $<50 \text{ km}^2 \rightarrow \text{MYΓ } 1/3 \sim 1/4 t_c \text{ h}$

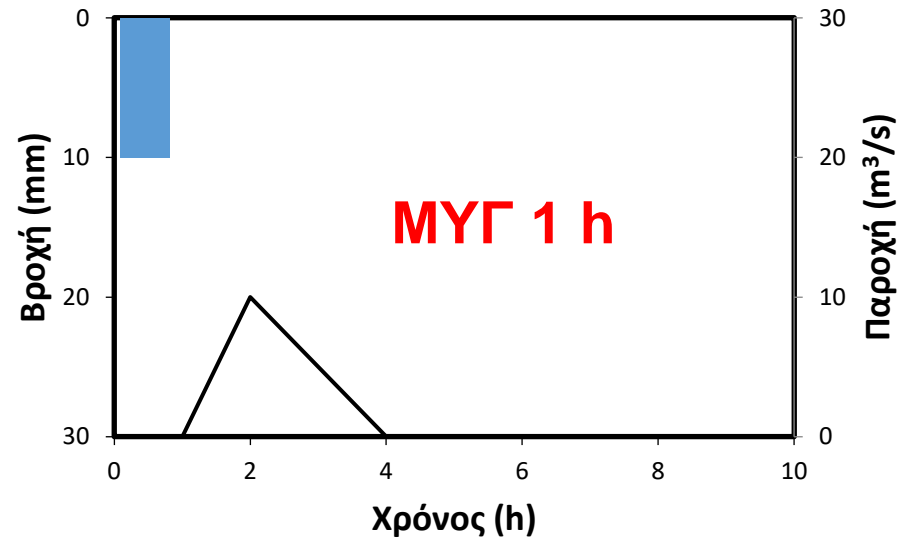
- **Linsey et al. (1949)**

- $\text{MYΓ } 1/4 t_L \text{ h}$

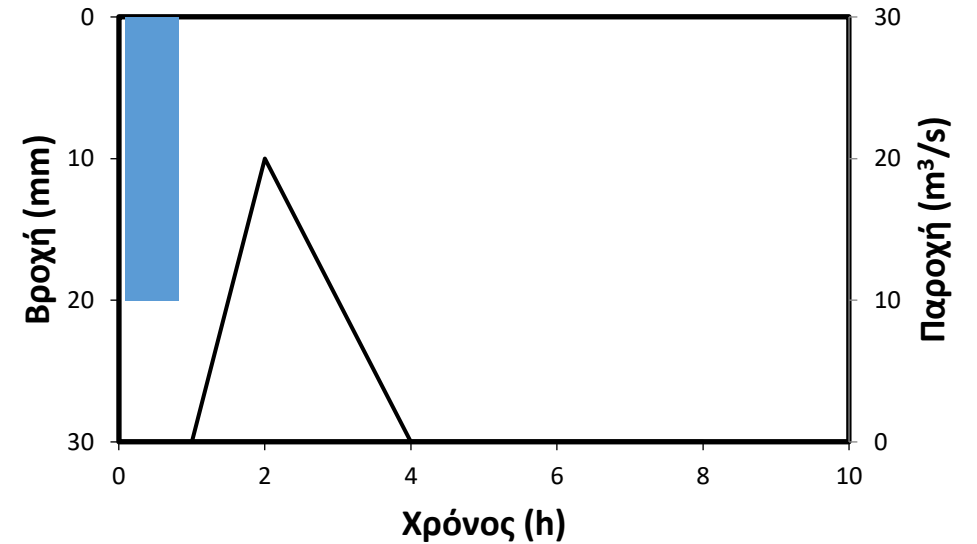
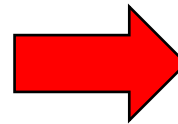
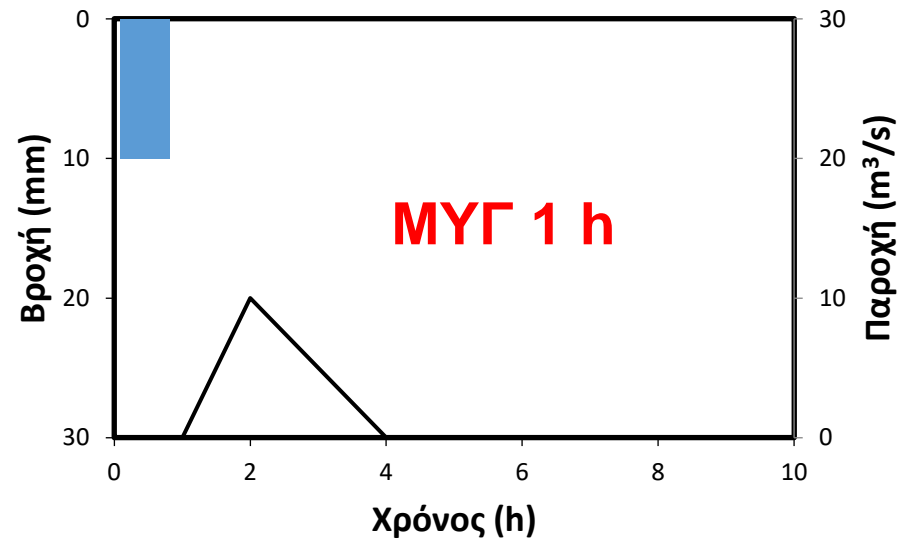
- **US Army Corps of Engineers (1948)**

- $<250 \text{ km}^2 \rightarrow \text{MYΓ } 1/2 t_L \text{ h}$

# Αρχή της αναλογίας

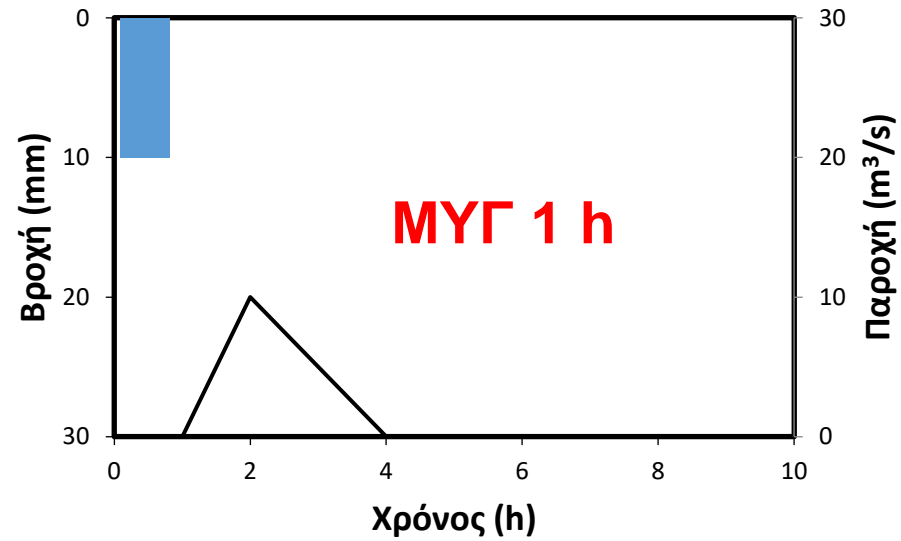


# Αρχή της αναλογίας

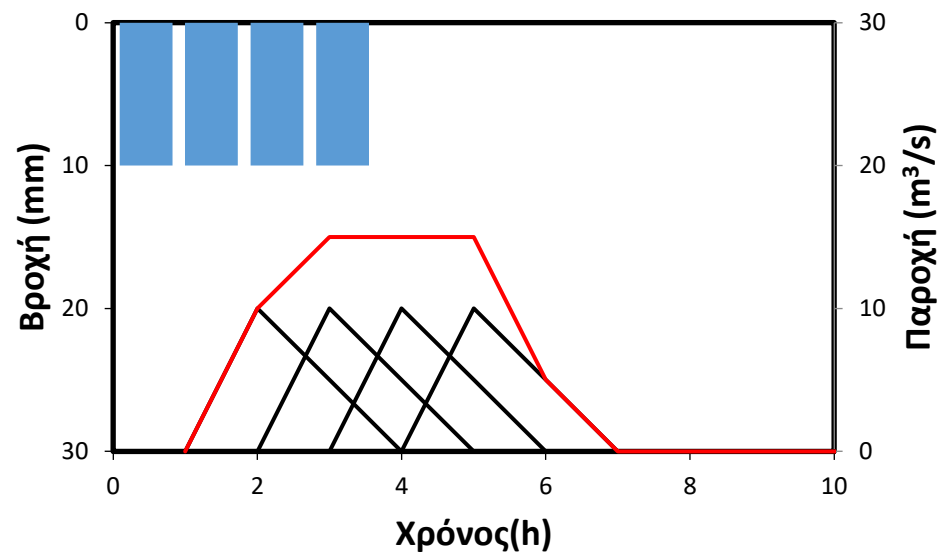
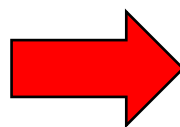
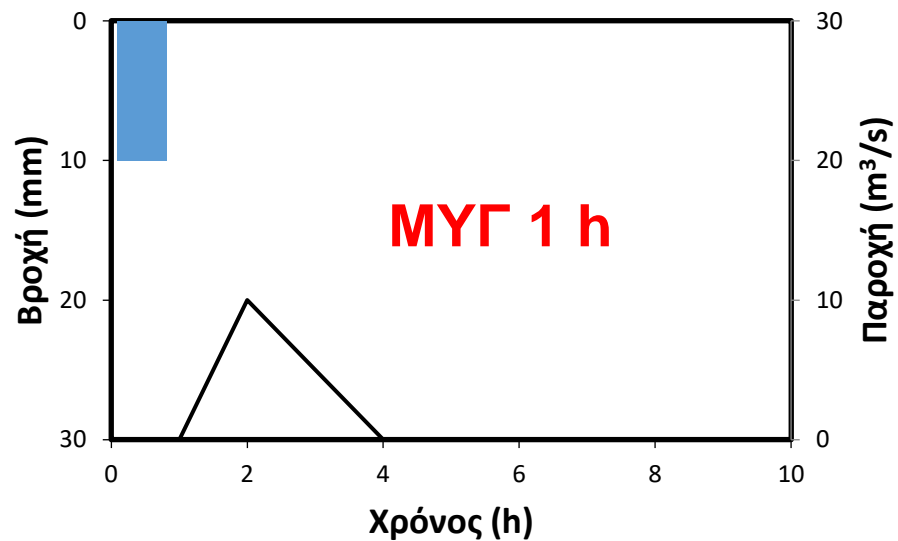




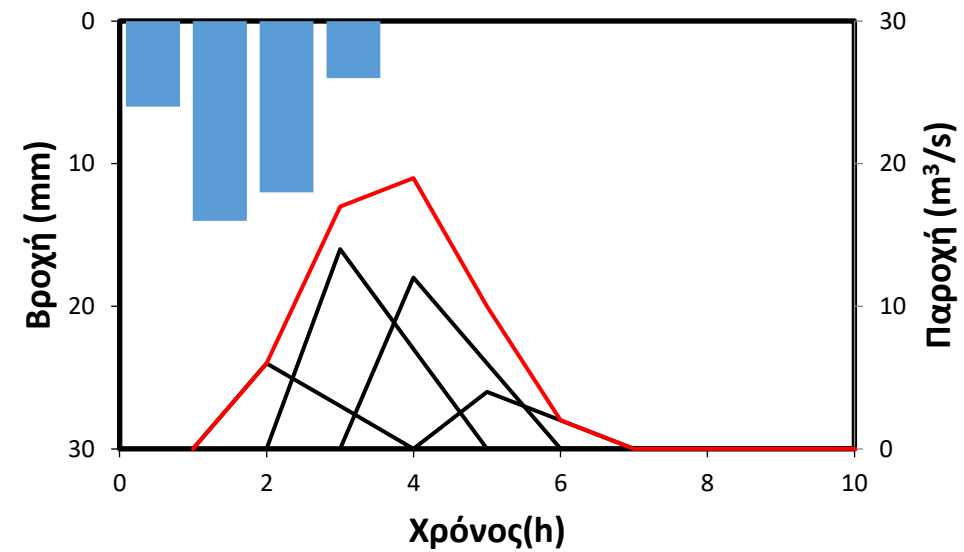
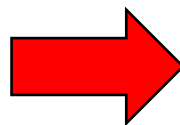
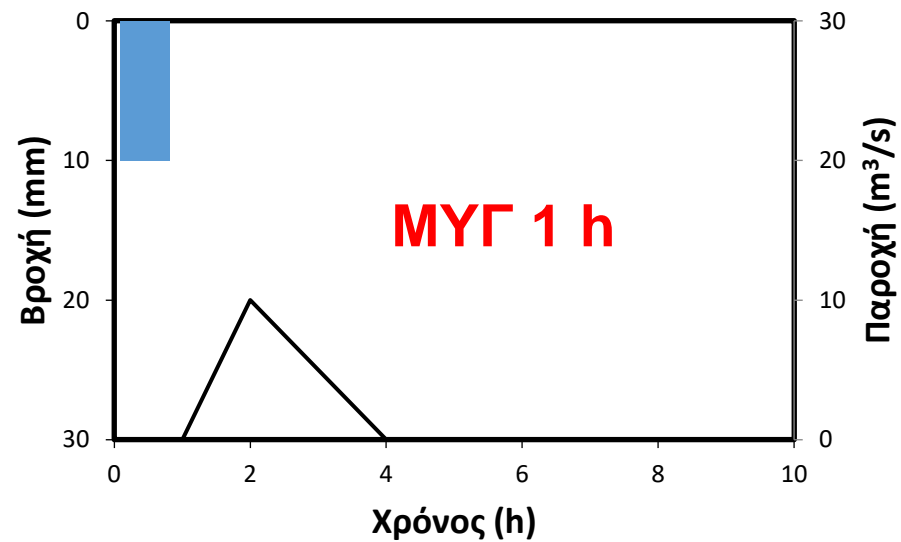
# Αρχή της επαλληλίας



# Αρχή της επαλληλίας



# Σύνθετη βροχόπτωση



# Εκτίμηση ΜΥΓ

- **Προσδιορισμός ΜΥΓ από μετρήσεις**
  - Μεμονωμένη ραγδαία βροχή
  - Σύνθετες ραγδαίες βροχές
- **Προσδιορισμός ΜΥΓ από ΜΥΓ άλλης διάρκειας**
- **Συνθετικά ΜΥΓ**
  - Snyder
  - SCS
  - British Hydrological Society
  - ...
- **Μοντέλα φυσικής βάσης**

# Μεμονωμένη βροχή

- Μετρήσεις περισσεύματος βροχής-απορροής
- Διαχωρισμός άμεσης και βασικής απορροής
- Άμεση απορροή  $\times$  (10/ύψος βροχής)  $\rightarrow$  σε mm
- Διάρκεια ΜΥΓ = διάρκεια βροχής

# Σύνθετη βροχή

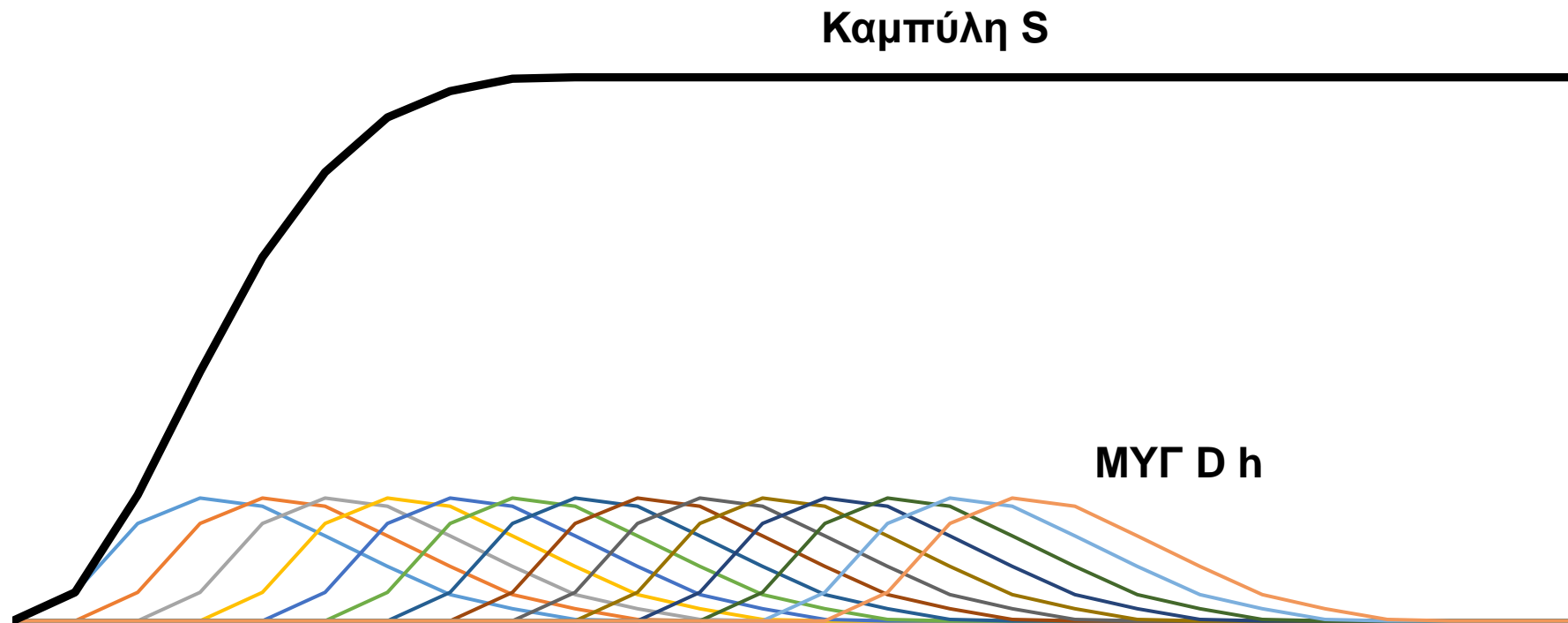
$$\mathbf{I} \cdot \mathbf{H} = \mathbf{Q}$$

$$I = \begin{array}{c} \overbrace{\hspace{1.5cm}}^j \\ \left[ \begin{array}{ccccc} i_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ i_2 & i_1 & 0 & \dots & 0 \\ i_3 & i_2 & i_1 & \dots & 0 \\ \dots & i_3 & i_2 & \dots & 0 \\ i_n & \dots & i_3 & \dots & \dots \\ 0 & i_n & \dots & \dots & i_1 \\ 0 & \dots & i_n & \dots & \dots \\ \dots & 0 & \dots & \dots & i_{n-1} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & i_n \end{array} \right] \end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{c} \overbrace{\hspace{1.5cm}}^j \\ \left[ \begin{array}{ccccc} i_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ i_2 & i_1 & 0 & \dots & 0 \\ i_3 & i_2 & i_1 & \dots & 0 \\ \dots & i_3 & i_2 & \dots & 0 \\ i_n & \dots & i_3 & \dots & \dots \\ 0 & i_n & \dots & \dots & i_1 \\ 0 & \dots & i_n & \dots & \dots \\ \dots & 0 & \dots & \dots & i_{n-1} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & i_n \end{array} \right]} \right\} n+j-1$$

$$H = \left[ \begin{array}{c} h_1 \\ h_2 \\ \dots \\ h_j \end{array} \right] \left. \vphantom{\left[ \begin{array}{c} h_1 \\ h_2 \\ \dots \\ h_j \end{array} \right]} \right\} j \quad Q = \left[ \begin{array}{c} Q_1 \\ Q_2 \\ \dots \\ Q_{n+j-1} \end{array} \right] \left. \vphantom{\left[ \begin{array}{c} Q_1 \\ Q_2 \\ \dots \\ Q_{n+j-1} \end{array} \right]} \right\} n+j-1$$

$$Q_i = \sum h_{1,n+j-1} h_{1,j}$$

# ΜΥΓ από ΜΥΓ άλλης διάρκειας



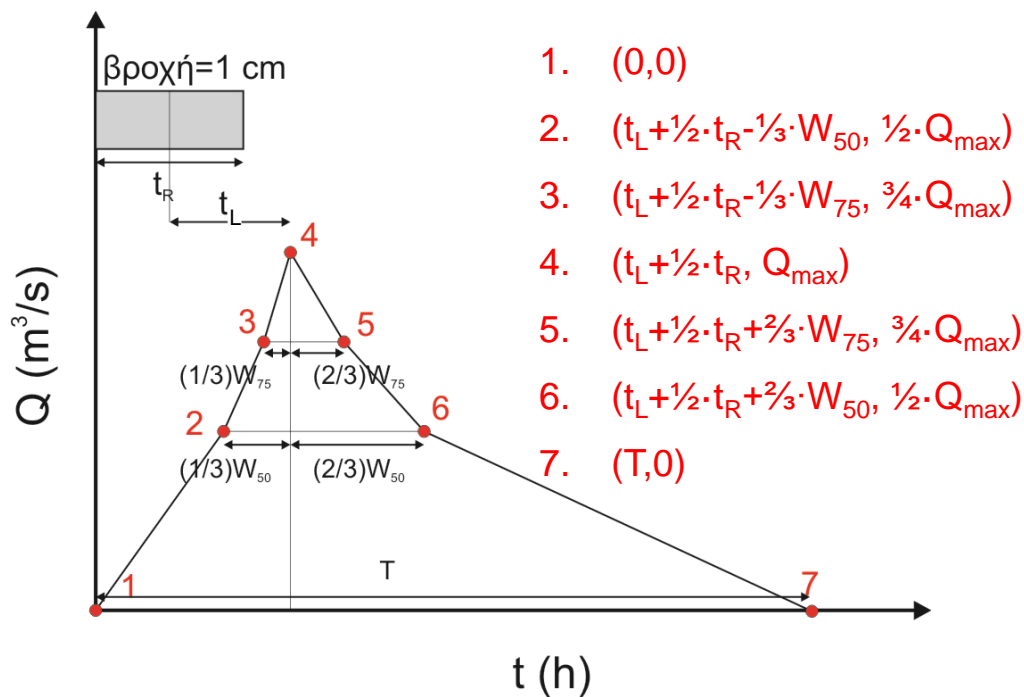
# ΜΥΓ από ΜΥΓ άλλης διάρκειας

- Μετατόπιση καμπύλη  $S$  κατά  $t$  ώρες
- Αφαίρεση της μετατοπισμένης καμπύλης  $\rightarrow$  υδρογράφημα όγκου  $t/D$
- Νέο ΜΥΓ  $\rightarrow$  πολλαπλασιασμός με το λόγο  $D/t$





# Συνθετικό ΜΥΓ Snyder



$$t_L = 0.752C_t(LL_c)^{0.3} + \frac{5.5t_R - 0.752C_t(LL_c)^{0.3}}{22}$$

$$Q_{max} = 2.780 \frac{C_t A}{t_L}$$

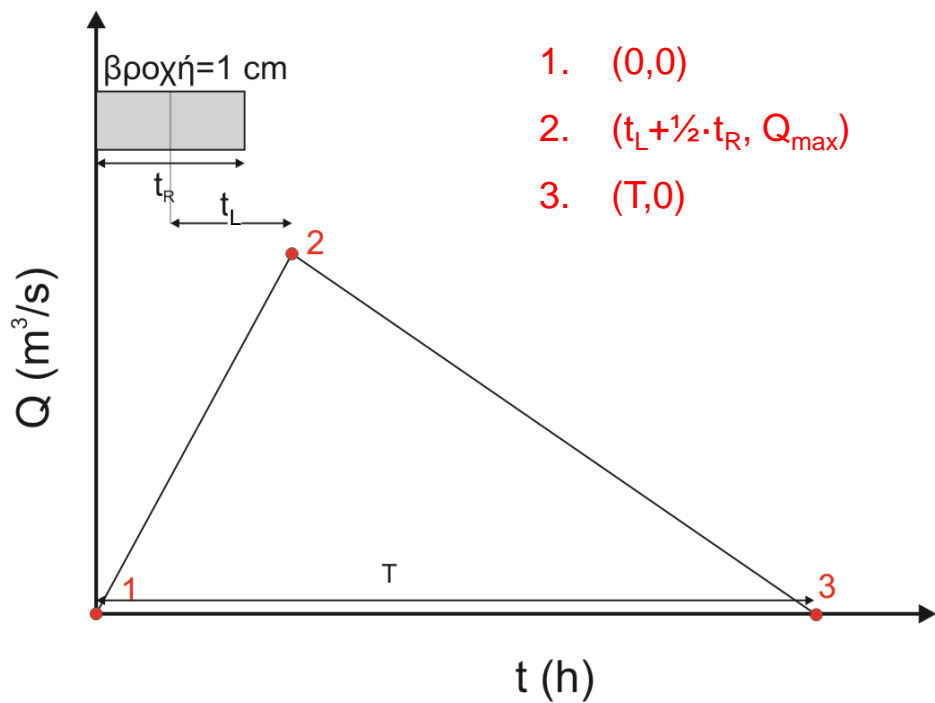
$$W_{50} = \frac{2.143}{\left(\frac{Q_{max}}{A}\right)^{1.08}}$$

$$W_{75} = \frac{1.225}{\left(\frac{Q_{max}}{A}\right)^{1.08}}$$

$$T = \frac{A}{0.09Q_{max}} - \frac{3}{2}W_{50} - W_{75}$$

- A → εμβαδόν λεκάνης (km<sup>2</sup>)
- L → μήκος κυρίου ρέματος (km)
- L<sub>c</sub> → απόσταση από την έξοδο της λεκάνης μέχρι το σημείο του κυρίου ρέματος που βρίσκεται κοντύτερα στο κέντρο της λεκάνης (km)
- C<sub>t</sub> → παράμετρος που σχετίζεται με την τοπογραφία και το εδαφικό υλικό της λεκάνης και κυμαίνεται μεταξύ 1.8-2.2, ενώ όσο πιο απότομη η λεκάνη, τόσο μικρότερη η τιμή της παραμέτρου (αδιάστατη)
- C<sub>p</sub> → παράμετρος που σχετίζεται με τη διάδοση του πλημμυρικού κύματος, την αποθηκευτική ικανότητα της λεκάνης και η οποία κυμαίνεται μεταξύ 0.56-0.69 (αδιάστατη)

# ΣΥΝΘΕΤΙΚΟ ΜΥΓ SCS



$$t_L = 0.6t_c$$

$$Q_{max} = \frac{A}{0.18T}$$

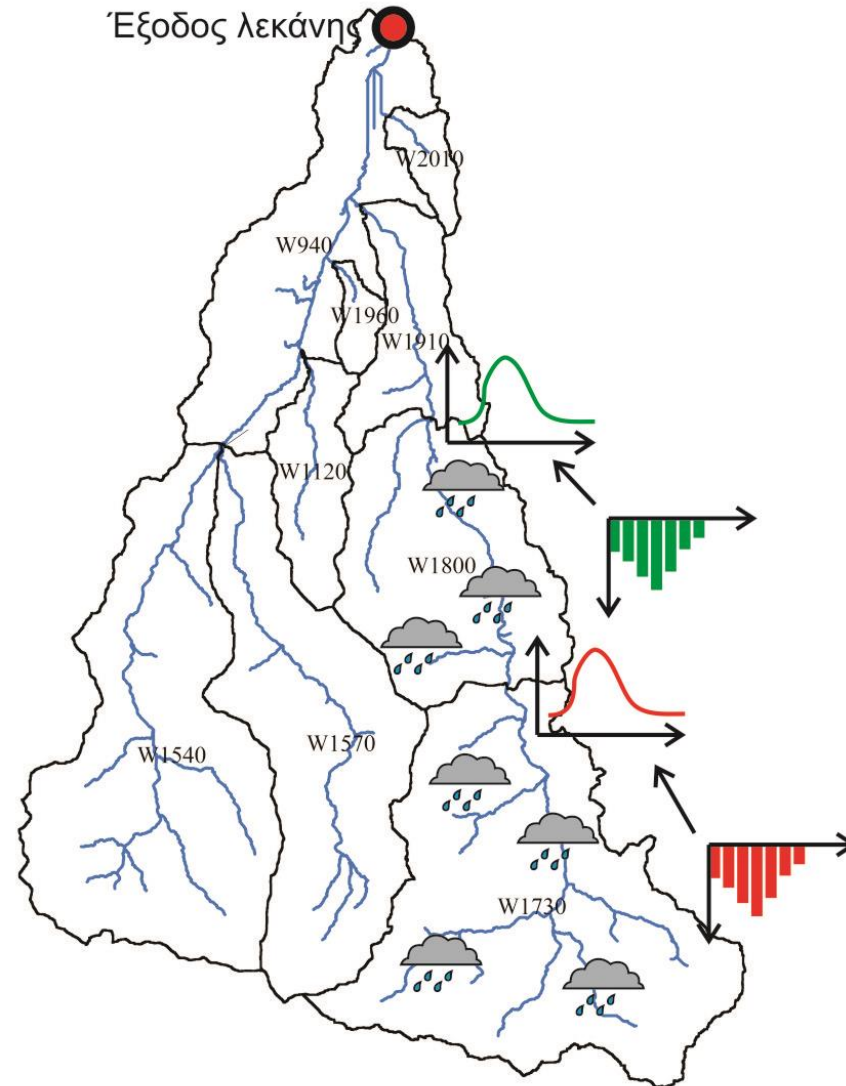
$$T = 2.67 \left( t_L + \frac{t_R}{2} \right)$$

- $A \rightarrow$  εμβαδόν λεκάνης ( $km^2$ )
- $t_c \rightarrow$  χρόνος συγκέντρωσης (h)

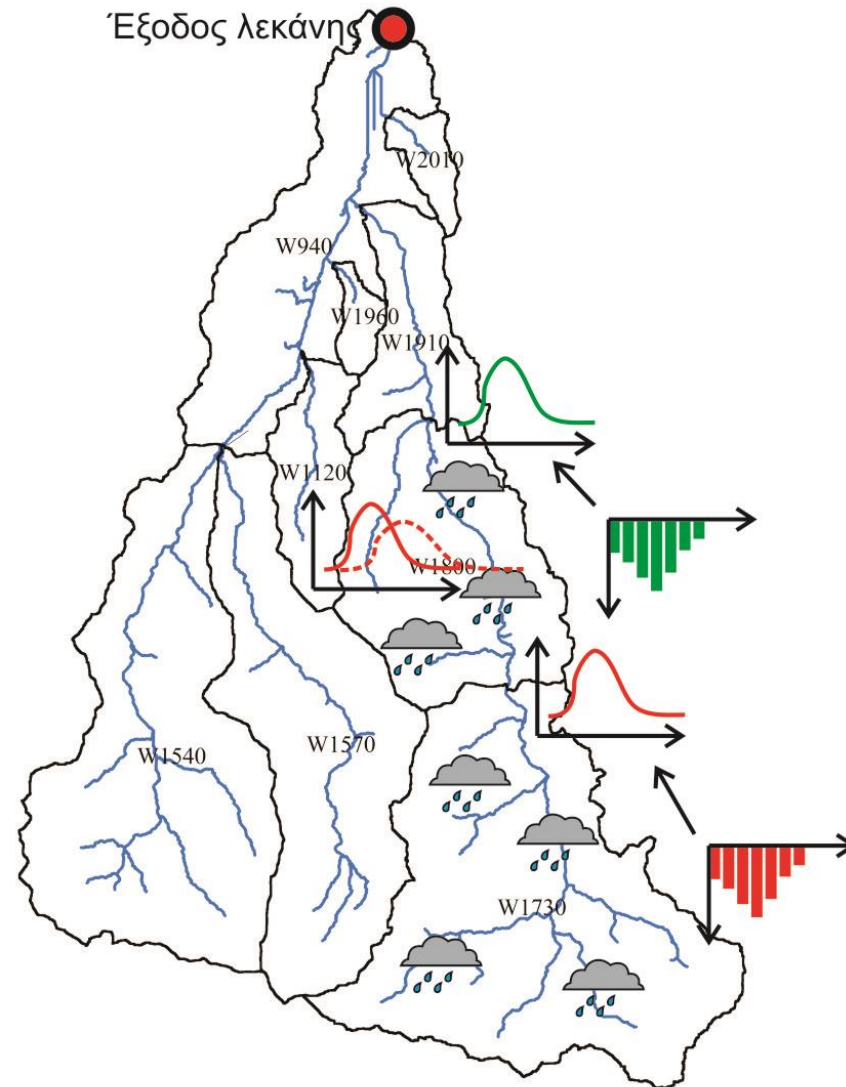
# Υπολεκάνες

- Χωρισμός λεκάνης απορροής σε υπολεκάνες
- Σε κάθε υπολεκάνη → **μοντέλο βροχόπτωσης-απορροής**
- Διόδευση απορροής υπολεκάνης μέσω της κατάντη υπολεκάνης → **μοντέλα διόδευσης**
- **Μη ομογενές σύστημα**
  - Διαφορετική βροχόπτωση (είσοδος)
  - Διαφορετικές παράμετροι στο μοντέλο βροχόπτωσης-απορροής
  - Διαφορετικές παράμετροι στο μοντέλο διόδευσης

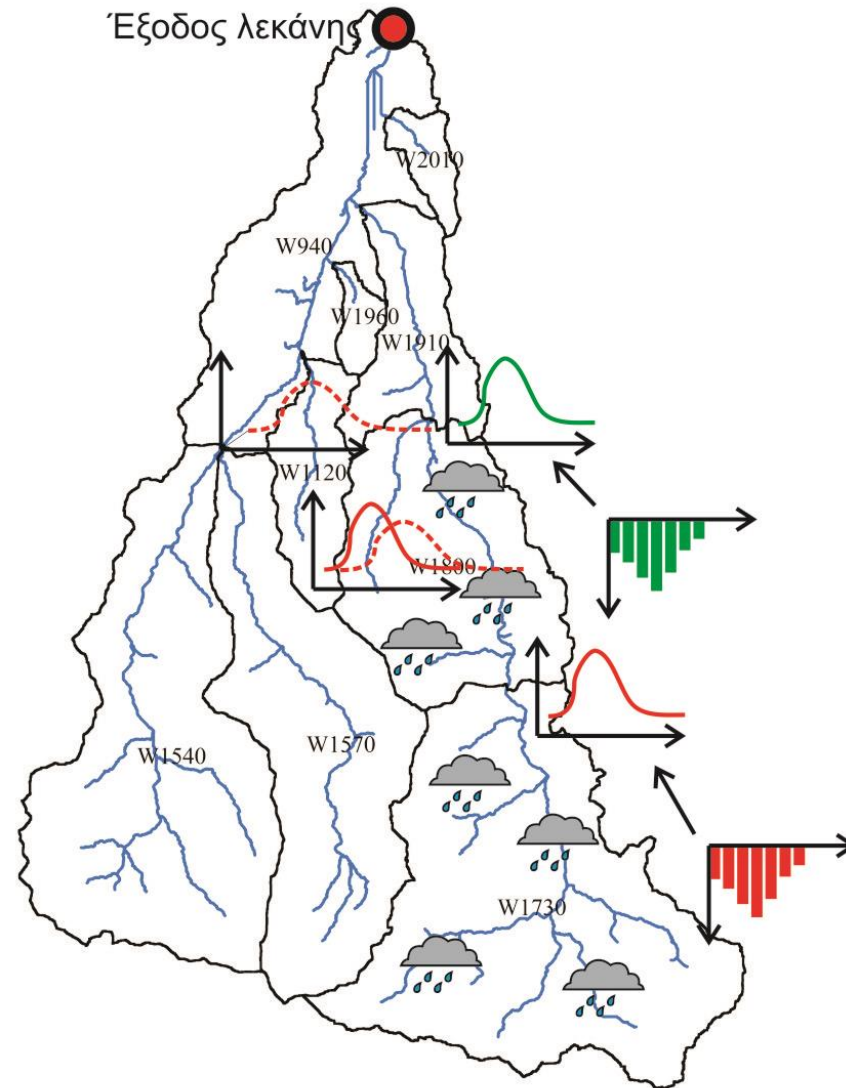
# Υπολεκάνες



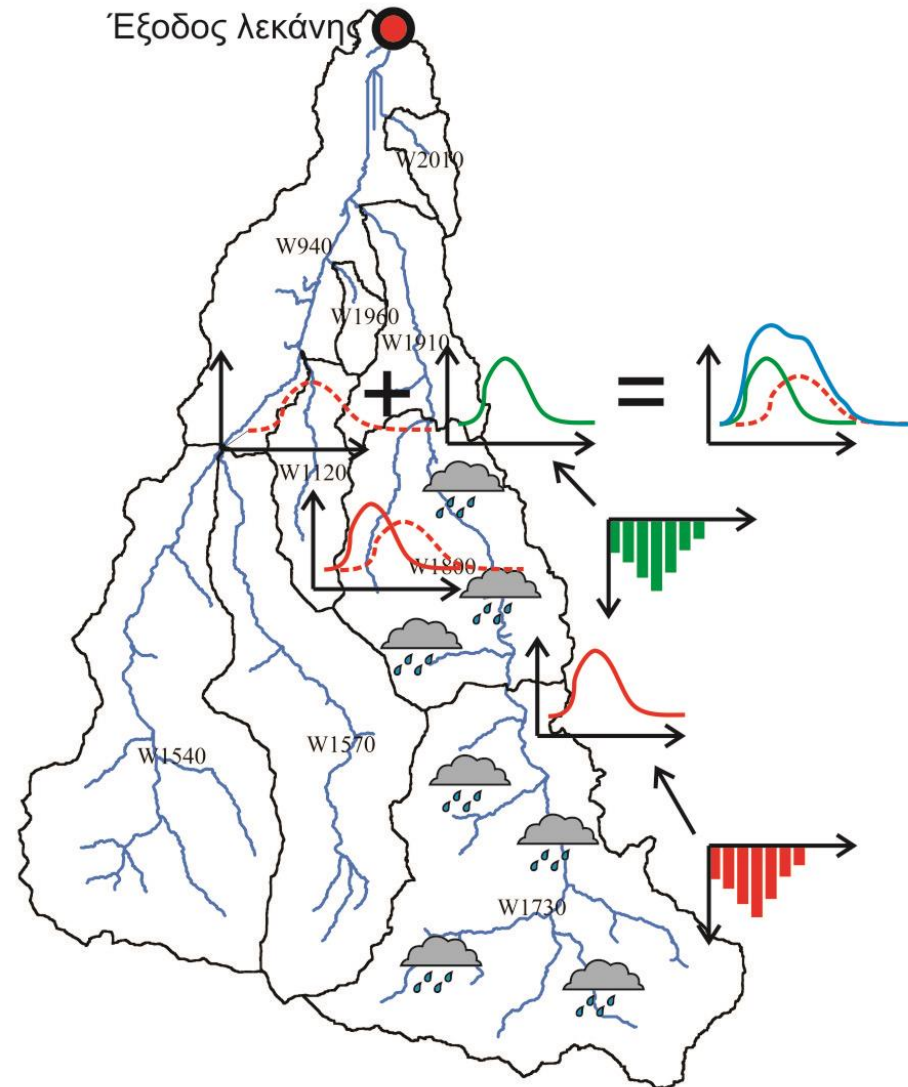
# Διόδευση



# Διόδευση



# Σύνθεση





# Μοντέλα διόδευσης

- Μοντέλα αποθήκευσης → **Συνήθης Διαφορική Εξίσωση**

$$\frac{dS}{dt} = I - O \quad S = K[XI + (1 - X)O]$$

→ παράμετρος  $K$  → μέσος χρόνος διαδρομής (μονάδες χρόνου)

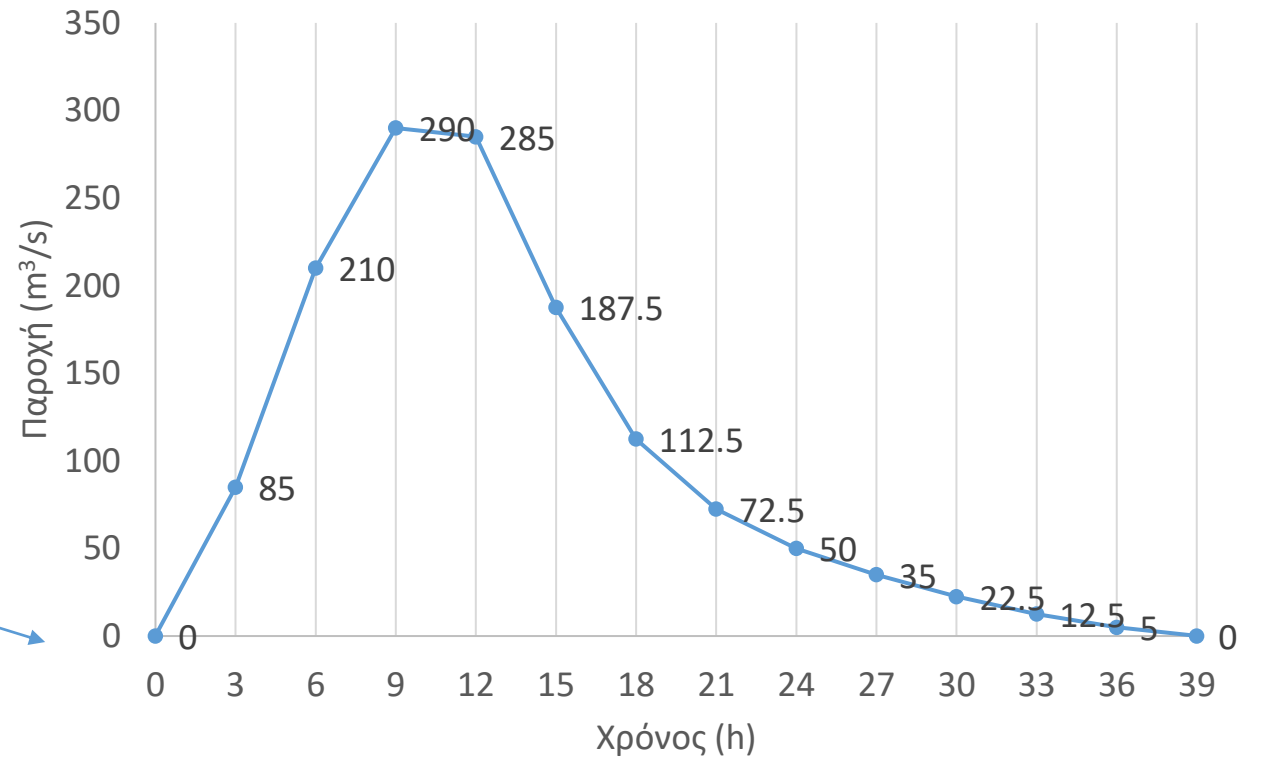
- Μέθοδος Muskingum

→ παράμετρος  $X$  → βάρος συμμετοχής εισροής με τιμές  $[0, 1]$  (αδιάστατη)

$$O_{i+1} = \frac{-KX + 0.5\Delta t}{K(1 - X) + 0.5\Delta t} I_{i+1} + \frac{KX + 0.5\Delta t}{K(1 - X) + 0.5\Delta t} I_i + \frac{K(1 - X) - 0.5\Delta t}{K(1 - X) + 0.5\Delta t} O_i$$

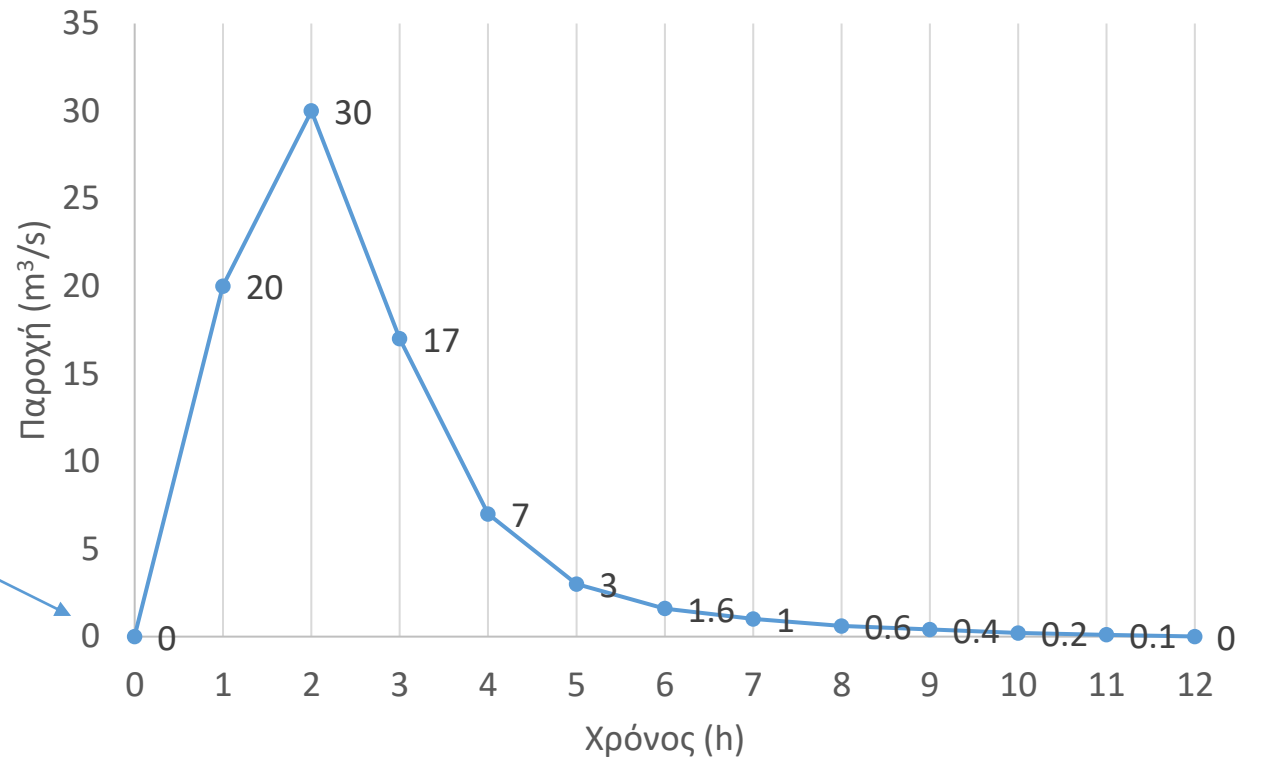
# Άσκηση 1

- Προσδιορισμός ΜΥΓ 6 h από μεμονωμένη εξάωρη βροχή
  - Περίσσευμα βροχής 25 mm
  - Μετρημένο πλημμυρικό υδρογράφημα



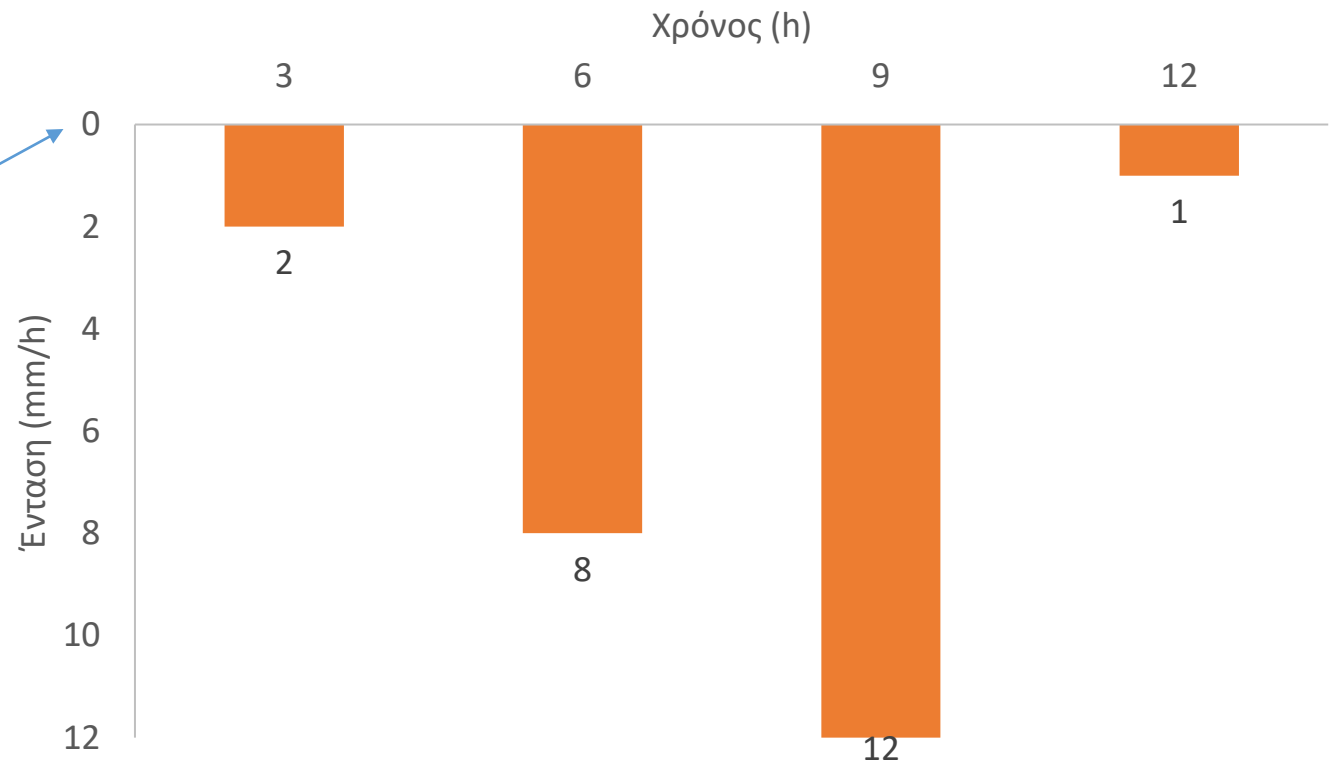
# Άσκηση 2

- Προσδιορισμός ΜΥΓ από ΜΥΓ άλλης διάρκειας
  - Δίνεται ΜΥΓ 1h
  - Να βρεθεί το ΜΥΓ 3h



# Άσκηση 3

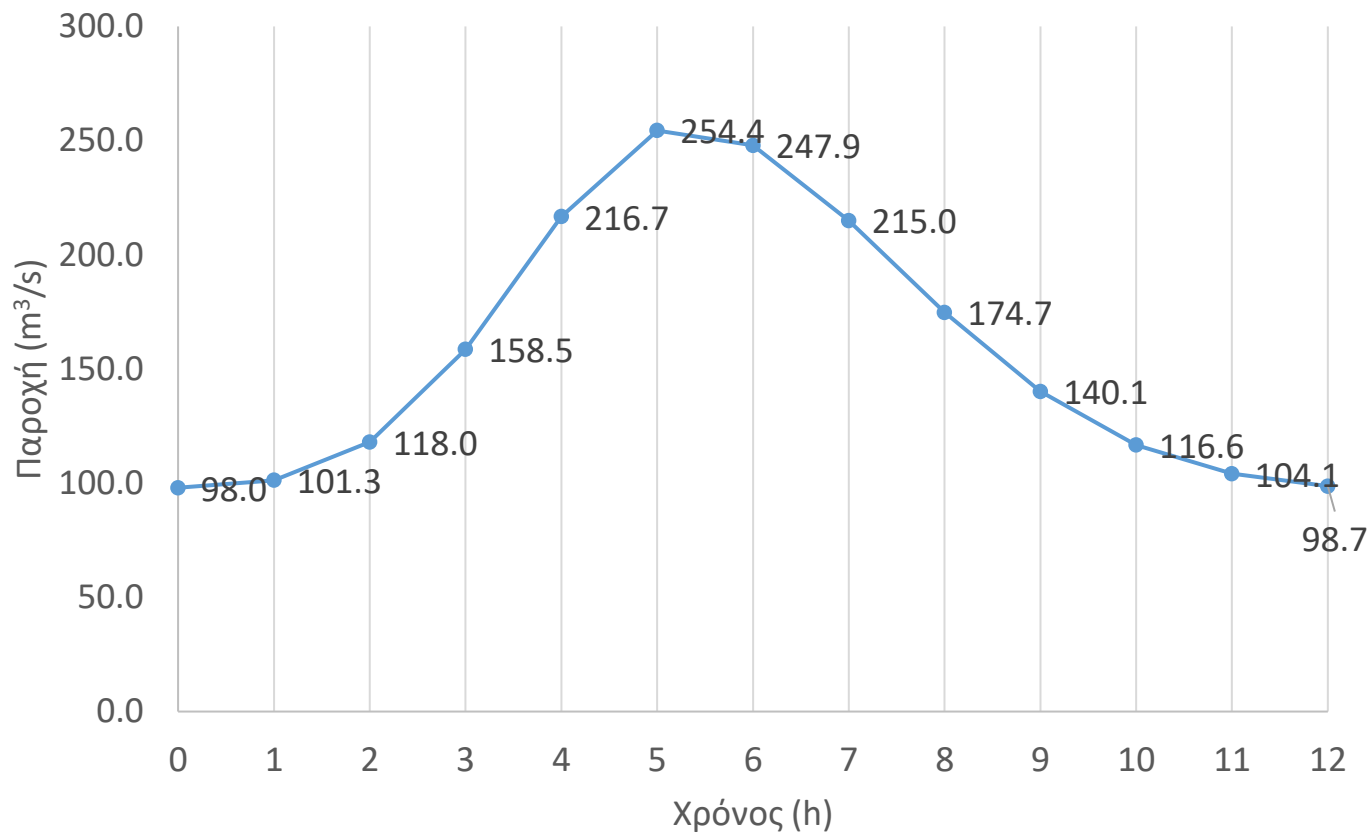
- Να βρεθεί το πλημμυρικό υδρογράφημα μετά από 12ωρη βροχή
  - Ένταση βροχής
  - Εμβαδόν λεκάνης απορροής 22 km<sup>2</sup>
  - Χρόνος συγκέντρωσης 2.5 h
  - Δείκτης απωλειών  $\phi=1.5$  mm/h
  - ΜΥΓ κατά SCS



# Άσκηση 4

- Διόδευση πλημμυρικού κύματος

- $\Delta t=1$  h
- $K=2$  h
- $X=0.2$



Κατά κύριο λόγο, η παρούσα διάλεξη άντλησε πληροφορίες από τα βιβλία «Τεχνική Υδρολογία» των Μ. Μιμίκου και Ε. Μπαλτά (2018, Εκδόσεις Παπασωτηρίου), «Υδατικοί Πόροι: Ι. Τεχνική Υδρολογία & Εισαγωγή στη Διαχείριση Υδατικών Πόρων» του Γ. Τσακίρη (2013, Εκδόσεις Συμμετρία), «Τεχνική Υδρολογία» των Δ. Κουτσογιάννη και Θ. Ξανθόπουλου - 4<sup>η</sup> έκδοση (2016, Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράμματα και Βοηθήματα), «Ποτάμια Υδραυλική και Τεχνικά Έργα» του Β. Χρυσάνθου (2015, Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράμματα και Βοηθήματα)