

ΔΗΜΟΚΡΙΤΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΡΑΚΗΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΠΡΟΓΡ. ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
«ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΔΡΟΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΩΝ»

Υδρομετεωρολογία – Υδρολογία και  
Κλιματική Αλλαγή

Αγγελίδης Π., Καθηγητής

Υδρολογική πρόγνωση με χρήση μοντέλων λεκάνης απορροής

# Εκτίμηση Απορροής

- Γιατί μας ενδιαφέρει;
- Αντιπλημμυρική προστασία
- Παροχή νερού – ύδρευση άρδευση



# Εκτίμηση Απορροής

- Πλημμύρες
- Ζημίες σε αγαθά
- Απώλειες ανθρώπινης ζωής

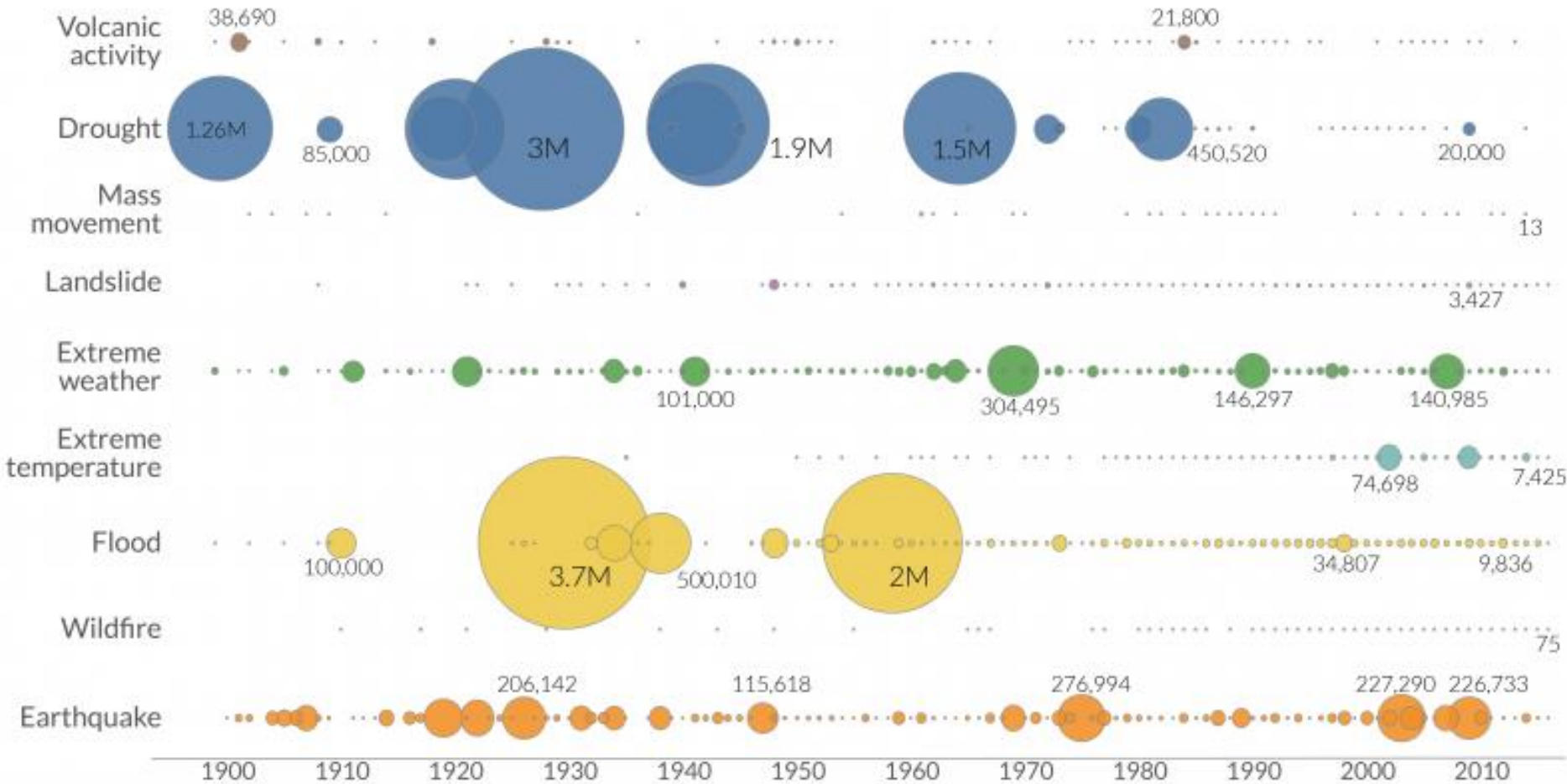


# Απώλειες ανθρώπινων ζώων παγκοσμίως από φυσικές καταστροφές 1900-2016

Our World  
in Data

## Global deaths from natural disasters (1900-2016)

The size of the bubble represents the total death count per year, by type of disaster.



Data source: EMDAT (2017): OFDA/CRED International Disaster Database, Université catholique de Louvain - Brussels - Belgium.  
OurWorldInData.org - Research and data to make progress against the world's largest problems.

Licensed under CC-BY by the authors Hannah Ritchie and Max Roser.

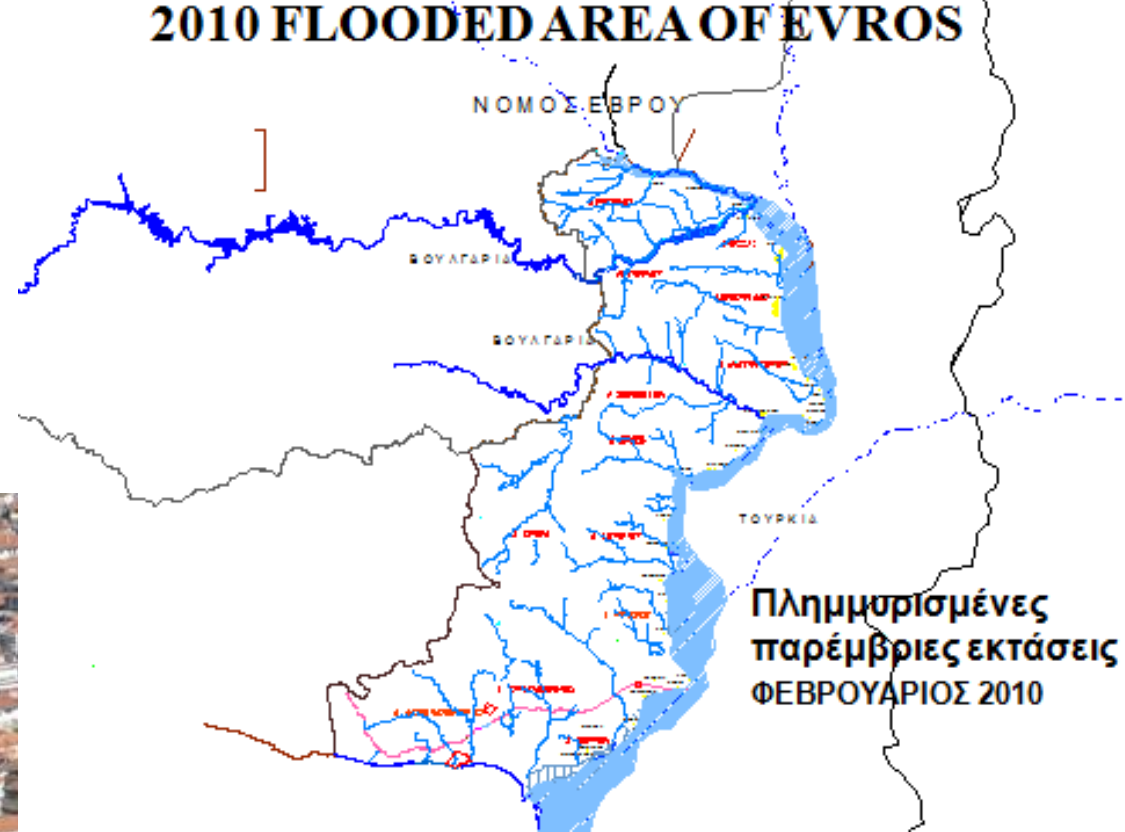
Δούναβης, χειμώνας 2021 στο Regensburg της Γερμανίας  
**Απαγορευτικά σήματα κυκλοφορίας με τη λέξη πλημμύρα  
(Hochwasser) στα γερμανικά**



**20 Ιουλίου 2021. Ξαφνικές πλημμύρες έπληξαν  
πολλές κοινότητες στη Γερμανία προκαλώντας  
τουλάχιστον 165 θανάτους**



# 2010 FLOODED AREA OF EVROS



## Ελλάδα – διακρατικός ποταμός Έβρος



# ΑΝΤΙΠΛΗΜΜΥΡΙΚΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ

2006 --FLOODED VYSSA RURAL  
AREA





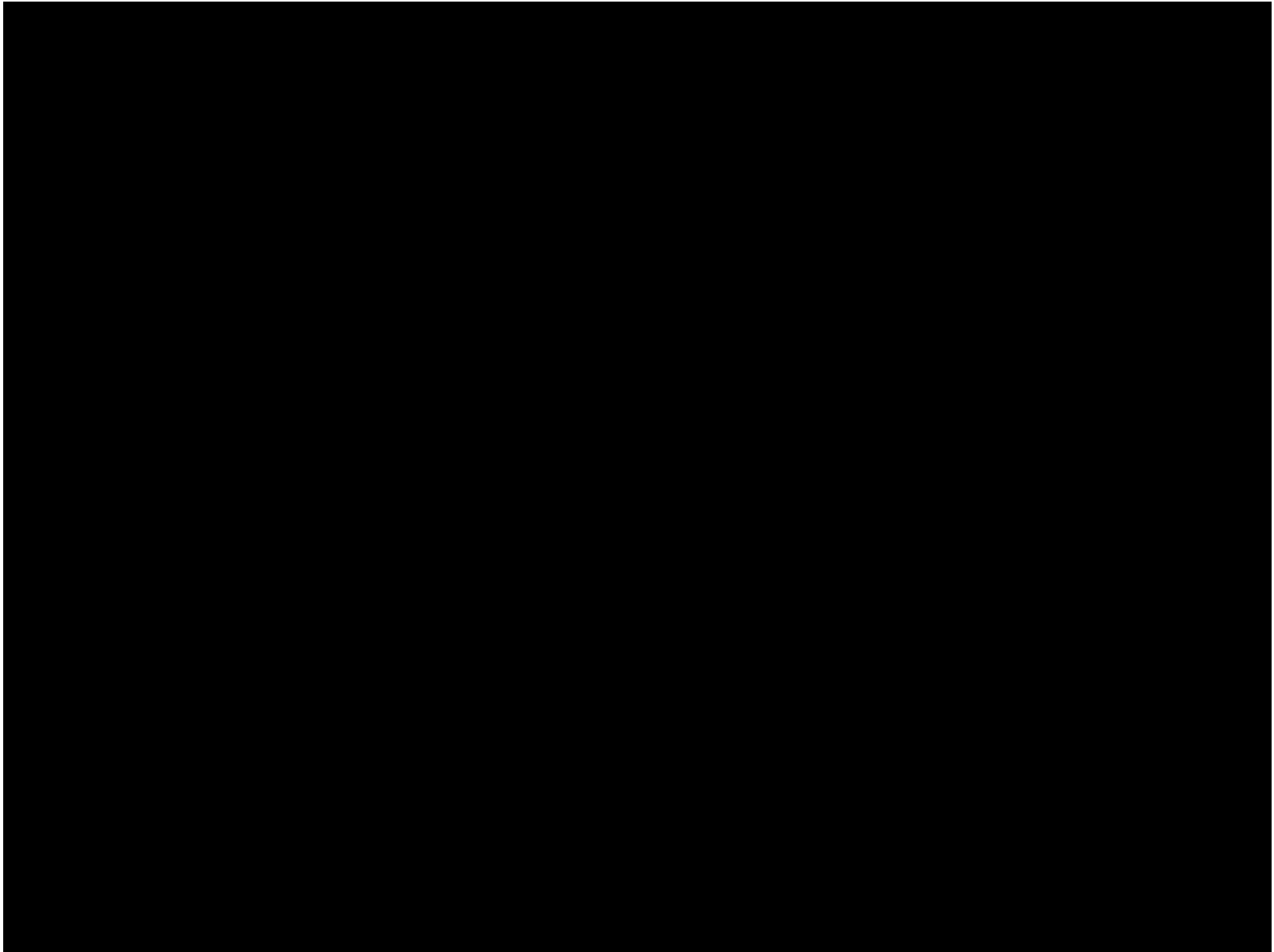
# Μάνδρα Αττικής πλημμύρα 15 -11-2017

<https://www.youtube.com/watch?v=pD4xNX1ZdAk>



# Καρδίτσα, πλημμύρα 21-09-2020

<https://www.youtube.com/watch?v=brwQgrsT52M>



# Εκτίμηση πλημμυρικής αιχμής

- Αρχικά εμπειρικοί μέθοδοι
- Μοναδιαίο υδρογράφημα
- Συνθετικά μοναδιαίο υδρογράφημα
- Μοντέλα βροχής - απορροής
- Ανάλυση συχνότητας εμφάνισης πλημμυρών

# Επιλογή Μεθόδου

1. Επιδιωκόμενος Σκοπός

2. Διαθέσιμα Δεδομένα

3. Χαρακτηριστικά Υδρολογικής Λεκάνης



**ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΗΣ ΔΙΧΜΗΣ**

**ΟΡΘΟΛΟΓΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ**

# Ορθολογική μέθοδος εκτίμησης της αιχμής

- ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΕΙΤΑΙ: Μικρές λεκάνες, επιφάνεια ομαλή και αδιαπέρατη, μικρό ποσοστό φυτοκάλυψης,
- ΌΧΙ: Μεγάλες λεκάνες απορροής, ανώμαλο σχετικά διαπερατό έδαφος, μεγάλο ποσοστό φυτοκάλυψης,

της πλημμύρας και ο χρόνος που συμβαίνει. Λόγω της ευκολίας στη χρήση αυτών των μεθόδων για τη μελέτη έργων αποχέτευσης οικισμών, γηπέδων, αεροδρομίων και έργων αποστράγγισης γεωργικών εκτάσεων οι μέθοδοι αυτές χρησιμοποιούνται και σήμερα σε μεγάλη έκταση.

Από τις υπάρχουσες εμπειρικές μεθόδους στην παράγραφο αυτή αναφέρεται η λεγόμενη *Ορθολογική Μέθοδος (Rational Method)* που εφαρμόζεται στην Ελλάδα για λεκάνες απορροής μικρότερες των 10 Km<sup>2</sup>.

Σύμφωνα με την Ορθολογική Μέθοδο η αιχμή της πλημμύρας υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$R_{\max} = 0.278 \cdot C \cdot r \cdot A \quad (11.19)$$

όπου:

$R_{\max}$  = η αιχμή άμεσης απορροής,  $m^3/s$

$C$  = ο συντελεστής απορροής (αδιάστατος) (Κεφ. 7)

$r$  = η κρίσιμη ένταση της βροχής που προκύπτει από την όμβρια καμπύλη για διάρκεια ίση με το χρόνο συγκέντρωσης της λεκάνης,  $mm/hr$  και

$A$  = η έκταση της λεκάνης απορροής,  $Km^2$ .

Όπως είναι φανερό η παραπάνω εξίσωση στηρίζεται στην υπόθεση ότι είναι γνωστός ο χρόνος συγκέντρωσης. Ο χρόνος συγκέντρωσης,  $t_c$ , μπορεί να υπολογισθεί από εμπειρικές εξισώσεις όπως του Kirpich (1940):

$$t_c = 0.02 \cdot L^{0.77} \cdot S^{-0.385} \quad (\text{min}) \quad (11.20)$$

όπου:

$L$  = η απόσταση κατά μήκος του κυρίου ρεύματος από το πιο απομακρυσμένο σημείο μέχρι την έξοδο της λεκάνης,  $m$

$S$  = η μέση κλίση κατά μήκος του μήκους της διαδρομής  $L$ ,  $m/m$ .



## Εμπειρικές μέθοδοι εκτίμησης μεγεθών πλημμύρας

Ένας άλλος εμπειρικός τρόπος εκτίμησης του χρόνου συγκέντρωσης που έχει χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν σε μελέτες είναι η Εξίσωση Giandotti:

$$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{\Delta H}} \quad (\text{hr}) \quad (11.21)$$

όπου:

$A$  = η έκταση της λεκάνης απορροής,  $\text{Km}^2$

$L$  = η απόσταση κατά μήκος του κυρίου ρεύματος μέχρι την έξοδο της λεκάνης,  $\text{Km}$

$\Delta H$  = η υψομετρική διαφορά μεταξύ μέσου υψομέτρου της λεκάνης και της κοίτης του ρεύματος στην έξοδο της λεκάνης,  $\text{m}$ .

- Συντελεστής απορροής εξαρτάται από:
  - Ανάγλυφο
  - Έκταση, πυκνότητα φυτοκάλυψης
  - Κλίση λεκάνης
  - Σύσταση εδάφους
  - Υγρασία εδάφους, έναρξη βροχής
  - Κλίση ρέματος
  - Αποθήκευση νερού στην επιφάνεια
  - Ένταση βροχόπτωσης

# ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΟΧΩΝ ΟΜΒΡΙΩΝ

## Η ορθολογική μέθοδος – Συντελεστής απορροής C

Από όλα τα μεγέθη της ορθολογικής μεθόδου ο συντελεστής απορροής παρουσιάζει την πιο μεγάλη αβεβαιότητα στην εκτίμησή του. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ενσωματώνει όλες τις ασάφειες που προκύπτουν από τις υπεραπλουστεύσεις της μεθόδου.

Στην πραγματικότητα ο συντελεστής απορροής δεν είναι σταθερός, όπως υπονοεί η εφαρμογή της ορθολογικής μεθόδου, αλλά παρουσιάζει έντονες μεταβολές, ακόμα και στην ίδια λεκάνη απορροής, αφού επηρεάζεται από τη χρονική κατανομή της βροχόπτωσης, από τη χρονική απόσταση από την προηγούμενη βροχόπτωση αλλά και από άλλες μετεωρολογικές και φυσιολογικές παραμέτρους.

Υπενθυμίζεται ότι ο συντελεστής απορροής συνεκτιμά αδιακρίτως:

1. τις απώλειες κατακράτησης από τη χλωρίδα,
2. τις απώλειες επιφανειακής παγίδευσης στις μικροκοιλότητες του εδάφους που πρακτικά υπάρχουν σε όλες τις επιφάνειες,
3. τις απώλειες διήθησης σε υδροπερατά εδάφη, και
4. τις απώλειες εξατμοδιαπνοής οι οποίες πάντως είναι ασήμαντες στην χρονική κλίμακα των βροχοπτώσεων σχεδιασμού των αποχετεύσεων.

# ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΟΧΩΝ ΟΜΒΡΙΩΝ

## Η ορθολογική μέθοδος – Συντελεστής απορροής C

Πίνακας 3.2 Συντελεστής απορροής σύμφωνα με τις ελληνικές προδιαγραφές αποχετεύσεων (ΠΔ 696, 1974)

Περιγραφή περιοχής	Συντελεστής απορροής
Ορεινή	0.60
Λοφώδης	0.50
Πεδινή	0.30

# ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΟΧΩΝ ΟΜΒΡΙΩΝ

## Η ορθολογική μέθοδος – Συντελεστής απορροής C

Πίνακας 3.3 Μέσοι συντελεστές απορροής ανάλογα με τα γενικά χαρακτηριστικά της αστικής περιοχής, σύμφωνα με τις αμερικανικές ενώσεις WPCF & ASCE (1976).

Περιγραφή περιοχής	Συντελεστής απορροής
Εμπορική	
Κέντρο	0.70-0.95
Περιφέρεια	0.50-0.70
Οικιστική, αστική	
Μονοκατοικίες	0.30-0.50
Πολυκατοικίες σε πανταχόθεν ελεύθερο σύστημα	0.40-0.60
Πολυκατοικίες σε συνεχές σύστημα	0.60-0.75
Οικιστική, υποαστική	0.25-0.40
Βιομηχανική	
Ελαφρά	0.50-0.80
Βαριά	0.60-0.90
Μη ανεπτυγμένη	0.10-0.30
Πάρκα, νεκροταφεία	0.10-0.25
Γήπεδα	0.20-0.35

(πηγή: Κουτσογιάννης 2016)

# ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΟΧΩΝ ΟΜΒΡΙΩΝ

## Η ορθολογική μέθοδος – Συντελεστής απορροής C

Πίνακας 3.4 Συντελεστής απορροής για συγκεκριμένες επιφάνειες, σύμφωνα με τις Αμερικανικές ενώσεις WPCF & ASCE (1990).

Τύπος επιφάνειας	Συντελεστής απορροής
Πεζοδρόμια δρόμοι	
Σκυρόδεμα - Ασφαλτοσκυρόδεμα	0.70-0.95
Πλίνθοι	0.70-0.85
Στέγες	0.75-0.95
Αγροί, αμμώδη εδάφη	
Ήπια κλίση, 2%	0.05-0.10
Μέση κλίση, 2% μέχρι 7%	0.10-0.15
Απότομη κλίση, 7%	0.15-0.20
Αγροί, βαριά εδάφη	
Ήπια κλίση, 2%	0.13-0.17
Μέση κλίση, 2% μέχρι 7%	0.18-0.22
Απότομη κλίση, 7%	0.25-0.35

# Εμπειρικοί Μέθοδοι

- Ορθολογική μέθοδος εκτίμησης της αιχμής ΜΟΝΟ ΜΙΑ ΑΠΟ ΤΙΣ ΔΕΚΑΔΕΣ
- Χρησιμοποιούνται όταν τα υδρολογικά δεδομένα είναι ανεπαρκή
- Δυσκολίες εφαρμογής
  - Έλλειψη γνώσεων ειδικών συνθηκών που μπορούν να εφαρμοστούν.
- Πιο άπλες και συνηθισμένες χρησιμοποιούν την έκταση της υδρολογικής λεκάνης απορροής

**ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΗΣ ΔΙΧΜΗΣ**

**ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΟΝΑΔΙΑΙΟΥ ΥΔΡΟΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ**



# Μοναδιαίο Υδρογράφημα

Ως *Μοναδιαίο Υδρογράφημα* μιας βροχής διάρκειας περισεύματος  $t_R$  ομοιόμορφα κατανεμημένης σε μια λεκάνη απορροής ονομάζεται το αντίστοιχο υδρογράφημα της άμεσης απορροής που προήλθε από περίσσευμα βροχής  $h_R = 1 \text{ cm}$ . Το Μοναδιαίο Υδρογράφημα (που συνήθως αναφέρεται ως ΜΥΓ) είναι ουσιαστικά ένα μοντέλο που περιλαμβάνει όλα τα χαρακτηριστικά της λεκάνης και αναφέρεται στην συγκεκριμένη διάρκεια περισεύματος βροχής. Για κάθε δηλαδή διάρκεια περισεύματος υπάρχει και ένα διαφορετικό μοναδιαίο υδρογράφημα το οποίο αποτελεί τη βάση (τη μονάδα) για τον υπολογισμό του υδρογραφήματος άμεσης απορροής από οποιοδήποτε ύψος περισεύματος της ίδιας διάρκειας. Αυτός είναι και ο λόγος που ονομάζεται μοναδιαίο.

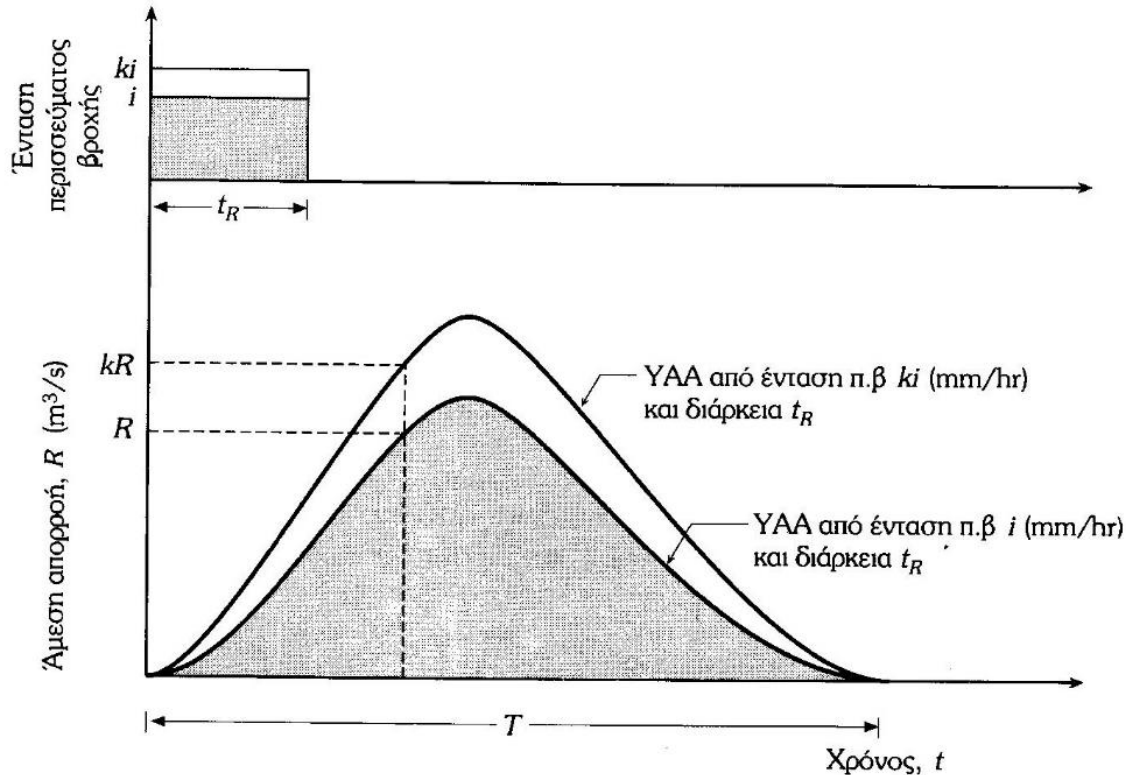
Η χρησιμότητα του μοναδιαίου υδρογραφήματος είναι μεγάλη γιατί όπως θα αναπτυχθεί παρακάτω το ΜΥΓ μπορεί να μετασχηματίσει κάτω από ορισμένες παραδοχές οποιοδήποτε περίσσευμα ραγδαίας βροχής διαφορετικής έστω διάρκειας σε υδρογράφημα της άμεσης απορροής.

Οι αρχές που στηρίζεται η μέθοδος του μοναδιαίου υδρογραφήματος είναι οι ακόλουθες:

# Μοναδιαίο Υδρογράφημα

## i. Αρχή της Αναλογίας

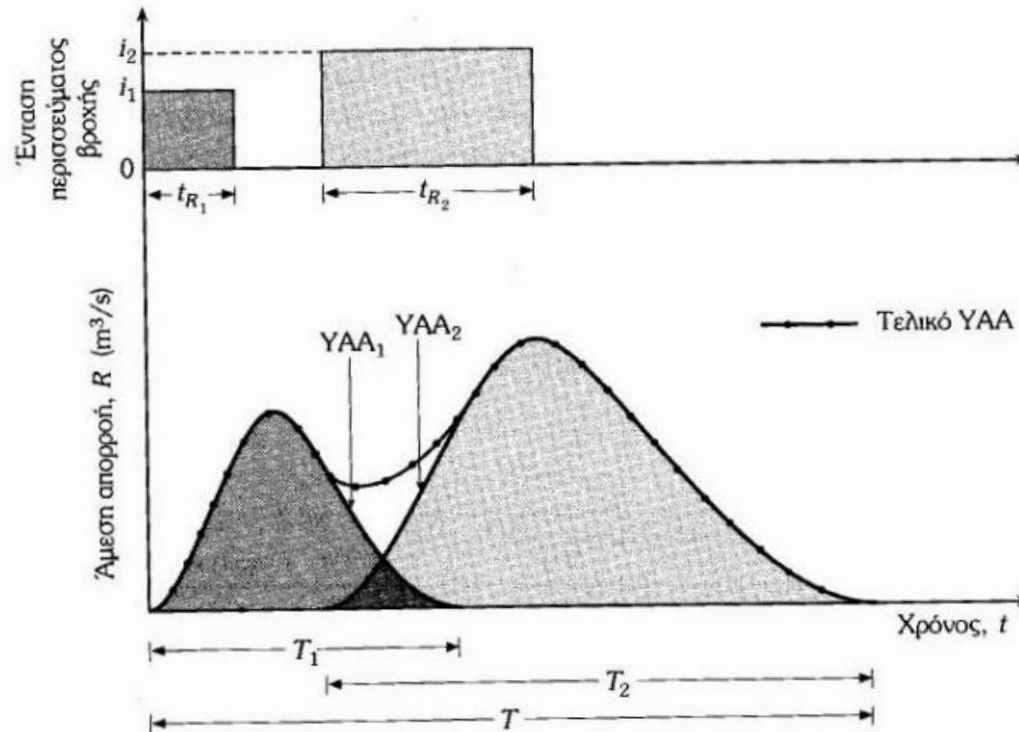
Σύμφωνα με την αρχή αυτή δύο βροχές με περίσσευμα βροχόπτωσης της ίδιας διάρκειας αλλά με διαφορετικές εντάσεις περισσεύματος βροχόπτωσης δημιουργούν υδρογραφήματα άμεσης απορροής με την ίδια χρονική βάση αλλά με τεταγμένες σε κάθε χρονική στιγμή που έχουν λόγο μεταξύ τους ίσο με το λόγο των εντάσεων. Δηλαδή για εντάσεις με λόγο  $k$  μεταξύ τους αλλά της ίδιας διάρκειας προκύπτουν υδρογραφήματα άμεσης απορροής (ΥΑΑ) με τεταγμένες που έχουν λόγο  $k$  και την ίδια χρονική βάση  $T$



# Μοναδιαίο Υδρογράφημα

## ii. Αρχή της Επαλληλίας

Σύμφωνα με την αρχή της επαλληλίας το συνολικό ΥΑΑ που προκύπτει από επιμέρους βροχοπτώσεις είναι το υδρογράφημα με τεταγμένες το άθροισμα των τεταγμένων των ΥΑΑ των επιμέρους βροχοπτώσεων (Σχ. 11.6).



Σχ. 11.6: Η αρχή της επαλληλίας.

Οι παραπάνω αρχές πηγάζουν ουσιαστικά από τις ακόλουθες παραδοχές (Linsley κ.ά. 1949) που αποτελούν και προϋποθέσεις για τη χρήση του μοναδιαίου υδρογραφήματος:

- (i) Η κατανομή του περισεύματος της βροχής στο χώρο και στο χρόνο είναι η ίδια για βροχές με την ίδια διάρκεια.
- (ii) Η ένταση της βροχής είναι σταθερή κατά τη διάρκεια του γεγονότος

# Μοναδιαίο Υδρογράφημα

## ΚΡΙΤΗΡΙΑ

- Η άμεση απορροή που προκαλείται από μια συγκεκριμένη βροχή είναι ανεξάρτητη από βροχές που έπεσαν πριν ή θα πέσουν μετά από αυτή την βροχή.
- Η κατάσταση της υδρολογικής λεκάνης παραμένει αμετάβλητη σε σχέση με το χρόνο.

# Εφαρμογή Μοναδιαίου Υδρογραφήματος

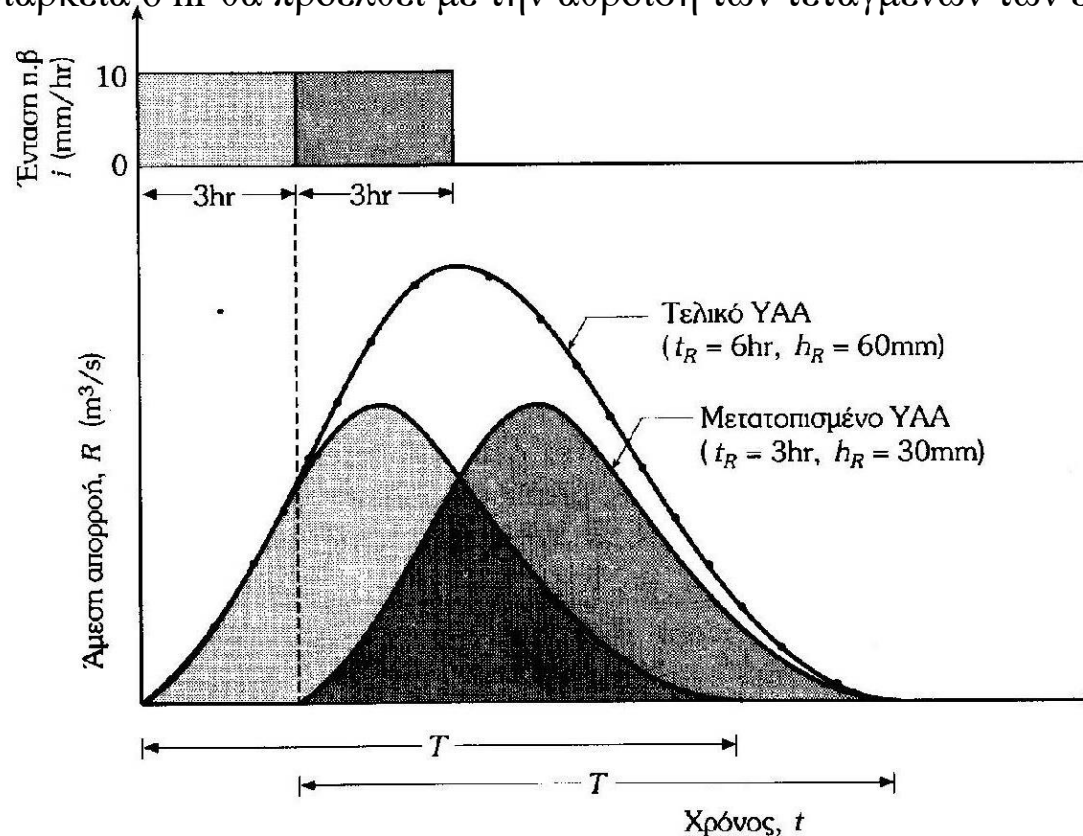
- Χαρακτηριστικά ρεμάτων αμετάβλητα
- Μικρή δυνατότητα συγκράτησης νερού στην επιφάνεια
- Προβλήματα με παρουσία λιμνών
- Προβλήματα με υπερχείλιση νερού στα πεδινά
- Προβλήματα όταν η απορροή από τήξη χιονιού

# Μοναδιαίο Υδρογράφημα

3. Αν είναι γνωστό το ΥΑΑ ορισμένης διάρκειας και έντασης τότε είναι δυνατός ο προσδιορισμός του ΥΑΑ που προέρχεται από πολλαπλάσια διάρκεια αλλά την ίδια ένταση.

*Παράδειγμα.* Δίνεται το ΥΑΑ περισσέυματος βροχής  $h_R = 30$  mm διάρκειας 3 hr και ζητείται το ΥΑΑ της ίδιας έντασης διάρκειας 6 hr (Σχ. 11.7).

Αν το δεύτερο 3ωρο θεωρηθεί μεμονωμένο θα έχει ως αποτέλεσμα ένα όμοιο ΥΑΑ αλλά μετατοπισμένο κατά 3 hr. Σύμφωνα με την αρχή της επαλληλίας το τελικό ΥΑΑ από το περίσσευμα βροχής 60 mm με διάρκεια 6 hr θα προέλθει με την άθροιση των τεταγμένων των επιμέρους ΥΑΑ



**Σχ. 11.7:** Προσδιορισμός ΥΑΑ από βροχή πολλαπλάσιας διάρκειας αλλά της ίδιας έντασης περισσέυματος.

# Παράδειγμα ΥΔΡ3

Παράδειγμα. Δίνεται το ΜΥΓ 1 hr (Στήλες 1 ÷ 3 του Πίν. 11.1) και ζητείται το ΜΥΓ διάρκειας 2 hr. Στον Πίν. 11.1 φαίνεται αναλυτικά η πορεία που ακολουθείται. Μ' αυτό τον τρόπο από τις τεταγμένες του ΜΥΓ 1 hr,  $U_i$ , υπολογίζονται οι τεταγμένες του ΜΥΓ 2 hr,  $U'_i$ .

**Πίν. 11.1:** Υπολογισμός του ΜΥΓ 2 hr από το ΜΥΓ 1 hr

$i$	$t$ (hr)	ΜΥΓ 1 hr $U_i$ (m <sup>3</sup> /s)	Μετατοπισμένο ΜΥΓ $U_{i-1}$ (m <sup>3</sup> /s)	Επαλληλία $U_i + U_{i-1}$ (m <sup>3</sup> /s)	ΜΥΓ 2 hr $U'_i$ (m <sup>3</sup> /s)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5) = (3) + (4)	(6) = (5)/2
1	0	0		0	0
2	1	3.18	0	3.18	1.59
3	2	11.38	3.18	14.56	7.28
4	3	16.74	11.38	28.12	14.06
5	4	14.24	16.74	30.98	15.49
6	5	9.04	14.24	23.28	11.64
7	6	5.86	9.04	14.90	7.45
8	7	3.68	5.86	9.54	4.77
9	8	2.18	3.68	5.86	2.93
10	9	1.42	2.18	3.60	1.80
11	10	0.84	1.42	2.26	1.13
12	11	0.54	0.84	1.38	0.69
13	12	0.35	0.54	0.89	0.45
14	13		0.35	0.35	0.18
15	14		0	0	0

**ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΗΣ ΔΙΧΜΗΣ**

**ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΥΝΘΕΤΙΚΟΥ ΜΟΝΑΔΙΑΙΟΥ ΥΔΡΟΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ**



# ΣΥΝΘΕΤΙΚΑ ΜΟΝΑΔΙΑΙΑ ΥΔΡΟΓΡΑΦΗΜΑΤΑ

## Συνθετικά Μοναδιαία Υδρογραφήματα

- Ποιο γνωστοί μέθοδοι
- Snyder
- Soil Conservation Service

# Συνθετικός προσδιορισμός του ΜΥΓ

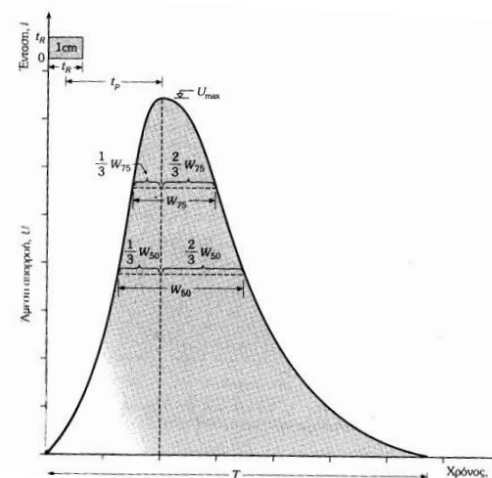
Σε περίπτωση έλλειψης μετρήσεων απορροών και κατάλληλων βροχοπτώσεων, το ΜΥΓ μπορεί να προσδιορισθεί συνθετικά από τα γεωμετρικά στοιχεία της λεκάνης. Η πιο γνωστή μέθοδος συνθετικού ΜΥΓ είναι η μέθοδος Snyder, που βελτιωμένη από το Σώμα των Μηχανικών Στρατού των Η.Π.Α. χρησιμοποιείται ευρύτατα. Η μέθοδος προέκυψε από ανάλυση μεγάλου αριθμού βροχών στην περιοχή των Απαλλαχίων στη Βόρεια Αμερική.

Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή προσδιορίζονται η χρονική επιβράδυνση ( $t_p$ ), η αιχμή του ΜΥΓ ( $U_{max}$ ), η χρονική βάση του ΜΥΓ ( $T$ ) και τα πλάτη του ΜΥΓ (σε χρόνο)  $W_{50}$  και  $W_{75}$  στα 50% και 75% της αιχμής σύμφωνα με τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$t_p = 0.752 C_t (L * L_c)^{0.3} \quad (\text{hr})$$

$$U_{max} = 2.78 \frac{C_p A}{t_p} \quad (\text{m}^3/\text{s})$$

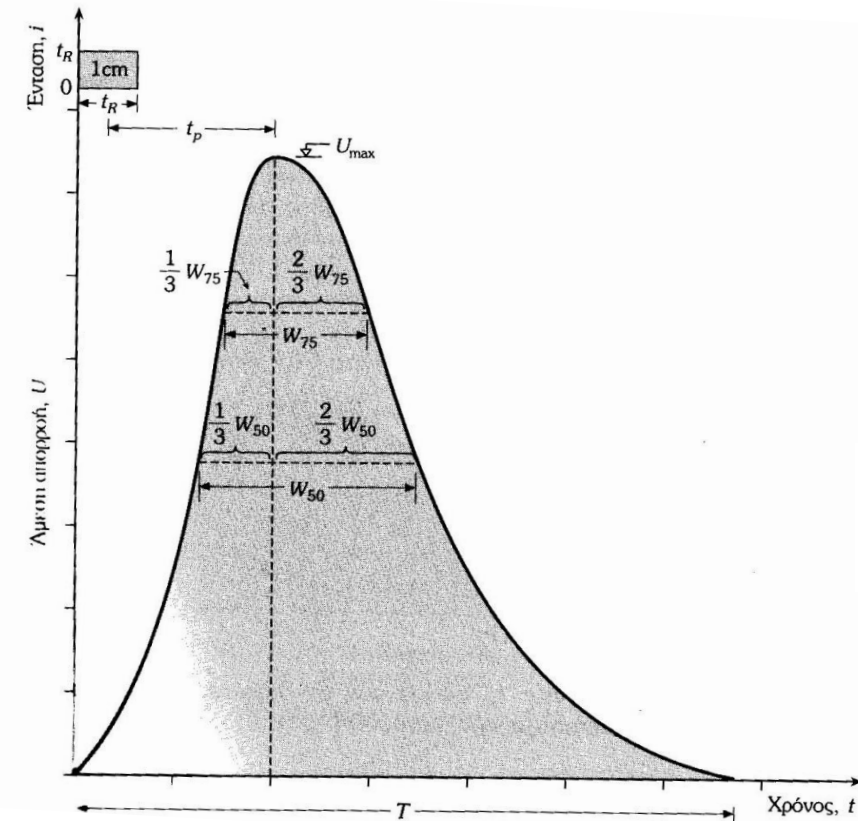
$$T = 24 + 3 t_p \quad (\text{hr})$$



όπου η χρονική επιβράδυνση  $t_p$  αντιστοιχεί σε διάρκεια περισσεύματος βροχής  $t_R$ , που συνδέονται με την ακόλουθη σχέση

$$t_R = t_p / 5.5 \quad (\text{hr}) \quad (11.15)$$

# Συνθετικός προσδιορισμός του ΜΥΓ



$$t_p = 0.752 C_t (L * L_c)^{0.3} \quad (\text{hr})$$

$$U_{max} = 2.78 \frac{C_p A}{t_p} \quad (\text{m}^3/\text{s})$$

$$T = 24 + 3 t_p \quad (\text{hr})$$

όπου η χρονική επιβράδυνση  $t_p$  αντιστοιχεί σε διάρκεια περισσέυματος βροχής  $t_R$

$$t_R = t_p / 5.5 \quad (\text{hr})$$

$L$  = μήκος κυρίου ρεύματος από το πιο απομακρυσμένο σημείο ως την έξοδο ακολουθώντας το κύριο ρεύμα (Km)

$L_c$  = μήκος του κυρίου ρεύματος από το πλησιέστερο στο κέντρο βάρους της λεκάνης μέχρι την έξοδο (Km)

$C_t$  = συντελεστής που αντιπροσωπεύει τα τοπογραφικά και εδαφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης (κυμαίνεται από 1.80 μέχρι 2.20). Για λεκάνες με μεγάλες κλίσεις η τιμή του  $C_t$  τείνει στη χαμηλότερη τιμή

$C_p$  = συντελεστής που αντιπροσωπεύει τις συνθήκες μεταφοράς του πλημμυρικού κύματος και της αποθήκευσης της λεκάνης (κυμαίνεται από 0.56 μέχρι 0.69)

$A$  = έκταση της λεκάνης ( $\text{Km}^2$ ).

# Συνθετικός προσδιορισμός του ΜΥΓ

Αν το ζητούμενο ΜΥΓ έχει διάρκεια  $t'_R$  μεγαλύτερη της  $t_R$  της Εξ. 11.12, η τελευταία αυτή εξίσωση αντικαθίσταται από την ακόλουθη:

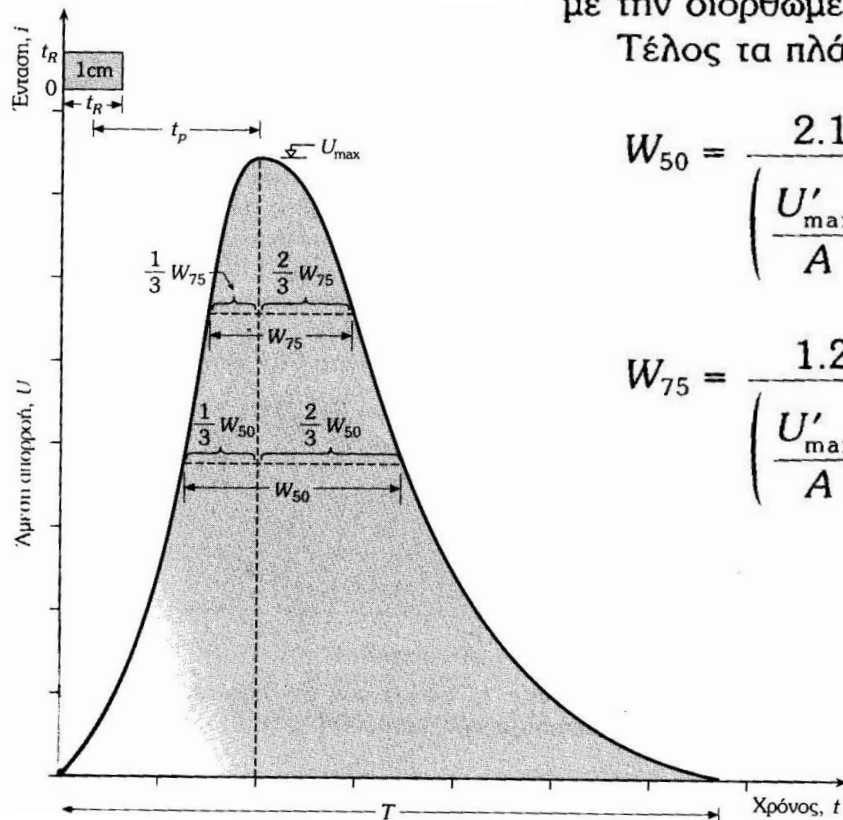
$$t'_p = t_p + (t'_R - t_R)/4 \quad (11.16)$$

Αντικαθιστώντας στις προηγούμενες σχέσεις την χρονική επιβράδυνση  $t_p$  με την διορθωμένη  $t'_p$  προκύπτουν οι νέες διορθωμένες τιμές  $U'_{\max}$  και  $T'$ .

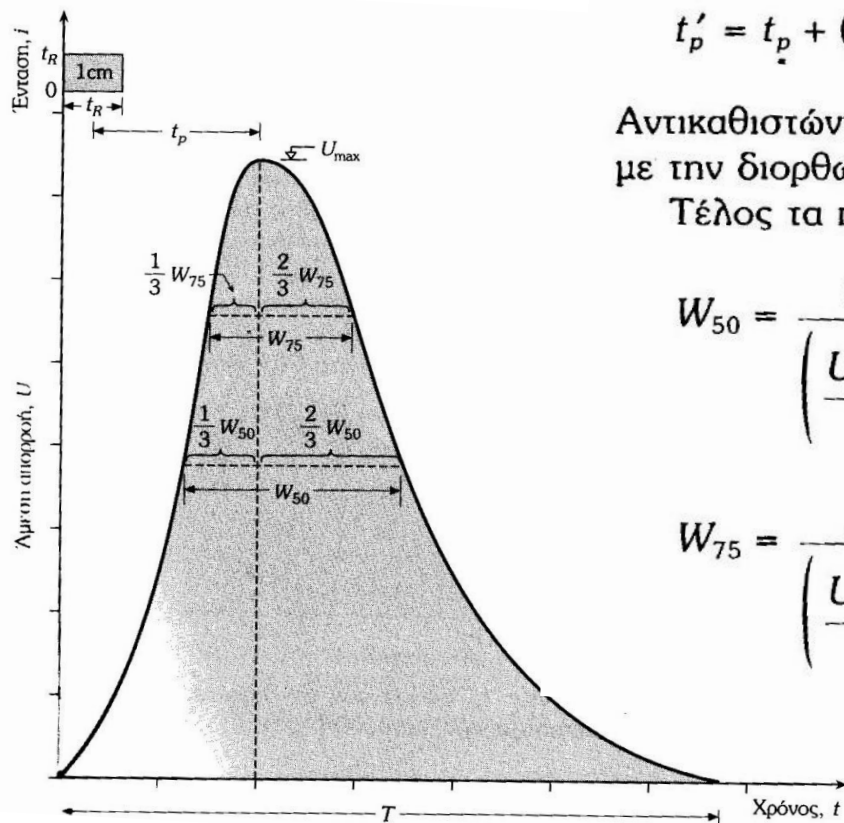
Τέλος τα πλάτη του ΜΥΓ  $W_{50}$  και  $W_{75}$  παρέχονται από τις σχέσεις

$$W_{50} = \frac{2.143}{\left(\frac{U'_{\max}}{A}\right)^{1.08}} \quad (11.17)$$

$$W_{75} = \frac{1.225}{\left(\frac{U'_{\max}}{A}\right)^{1.08}} \quad (11.18)$$



# Συνθετικός προσδιορισμός του ΜΥΓ



$$t'_p = t_p + (t'_R - t_R)/4 \quad (11.16)$$

Αντικαθιστώντας στις προηγούμενες σχέσεις την χρονική επιβράδυνση  $t_p$  με την διορθωμένη  $t'_p$  προκύπτουν οι νέες διορθωμένες τιμές  $U'_{\max}$  και  $T'$ . Τέλος τα πλάτη του ΜΥΓ  $W_{50}$  και  $W_{75}$  παρέχονται από τις σχέσεις

$$W_{50} = \frac{2.143}{\left(\frac{U'_{\max}}{A}\right)^{1.08}} \quad (11.17)$$

$$W_{75} = \frac{1.225}{\left(\frac{U'_{\max}}{A}\right)^{1.08}} \quad (11.18)$$

Τα πλάτη αυτά πρέπει να παίρνονται κατά το 1/3 αριστερά και κατά τα 2/3 δεξιά της κατακορύφου της αιχμής.

*Σημείωση.* Η χρονική βάση του ΜΥΓ για μικρές λεκάνες υπολογίζεται ως 3 μέχρι 5 φορές της  $t_p$  κατά παρέκλιση της Εξ. 11.14.

# Συνθετικός προσδιορισμός του ΜΥΓ. Παράδειγμα ΥΔΡ7

$$t_p = 0.752 C_t (L * L_c)^{0.3} \quad (\text{hr})$$

$$U_{\max} = 2.78 \frac{C_p A}{t_p} \quad (\text{m}^3/\text{s})$$

$$T = 24 + 3 t_p \quad (\text{hr})$$

όπου η χρονική επιβράδυνση  $t_p$  αντιβροχής  $t_R$ , που συνδέονται με την ακ

$$t_R = t_p / 5.5 \quad (\text{hr})$$

*Εφαρμογή.* Να βρεθεί η αιχμή και η χρονική βάση του ΜΥΓ 3 hr κατά Snyder για τα ακόλουθα δεδομένα:  $A = 200 \text{ Km}^2$ ,  $L = 15 \text{ Km}$ ,  $L_c = 6 \text{ Km}$ ,  $C_t = 2$  και  $C_p = 0.60$ .

Υπολογίζονται (Εξ. 11.12):

$$t_p = 0.752 \cdot 2 \cdot (15 \cdot 6)^{0.3} = 5.8 \text{ hr}$$

Η διάρκεια  $t_R$  στην οποία αντιστοιχεί είναι (Εξ. 11.15):

$$t_R = \frac{5.8}{5.5} \approx 1 \text{ hr}$$

Όμως το ζητούμενο ΜΥΓ είναι διάρκειας περισσεύματος  $t'_R = 3 \text{ hr} > t_R$  συνεπώς σύμφωνα με την Εξ. 11.16:

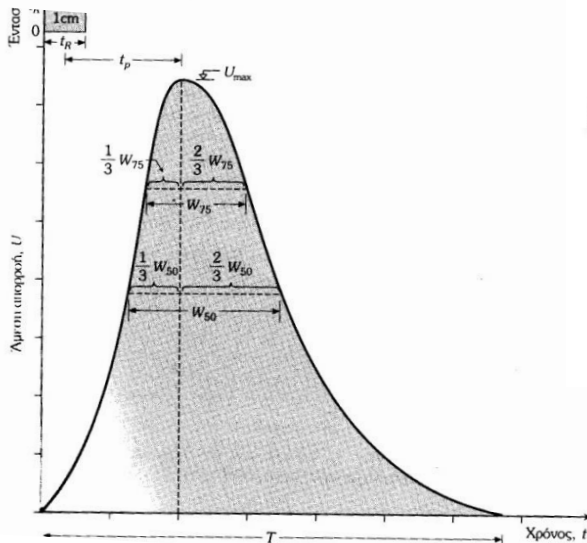
$$t'_p = 5.8 + (3 - 1)/4 = 6.3 \text{ hr}$$

Δηλαδή για το ΜΥΓ των 3 hr προκύπτουν:

$$U'_{\max} = 2.78 \frac{0.60 \cdot 200}{6.3} \approx 53 \text{ m}^3/\text{s} \quad (\text{Εξ. 11.13})$$

$$T' = 24 + 3 \cdot 6.3 \approx 43 \text{ hr} \quad (\text{Εξ. 11.14})$$

$$t'_p = t_p + (t'_R - t_R)/4$$

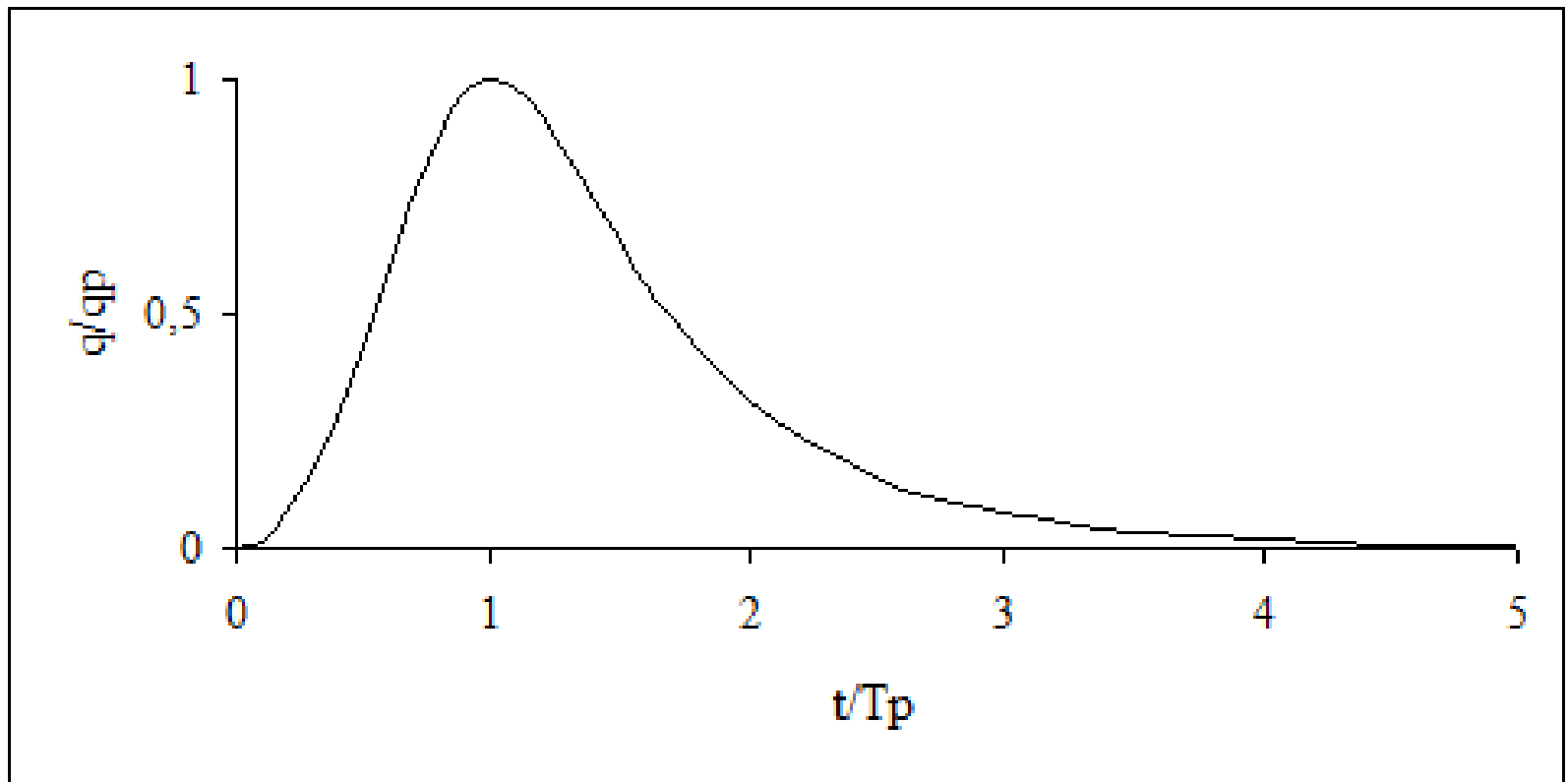


# **ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΗΣ ΔΙΧΜΗΣ**

**Συνθετικός προσδιορισμός του ΜΥΓ- ΜΕΘΟΔΟΣ SCS**

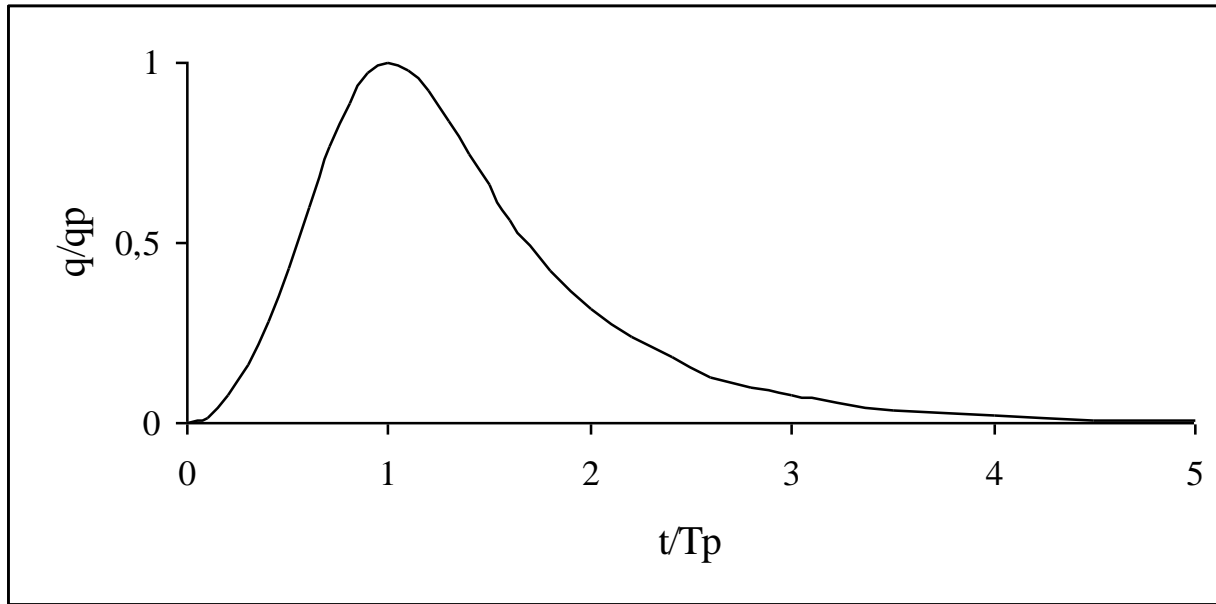
# Συνθετικός προσδιορισμός του ΜΥΓ- ΜΕΘΟΔΟΣ SCS

Το αδιάστατο υδρογράφημα της SCS είναι ένα συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα στο οποίο η παροχή εκφράζεται ως λόγος της παροχής  $q$  ως προς την παροχή αιχμής  $q_p$  και ο χρόνος ως λόγος του χρόνου  $t$  ως προς το χρόνο ανόδου του μοναδιαίου υδρογραφήματος  $T_p$ .





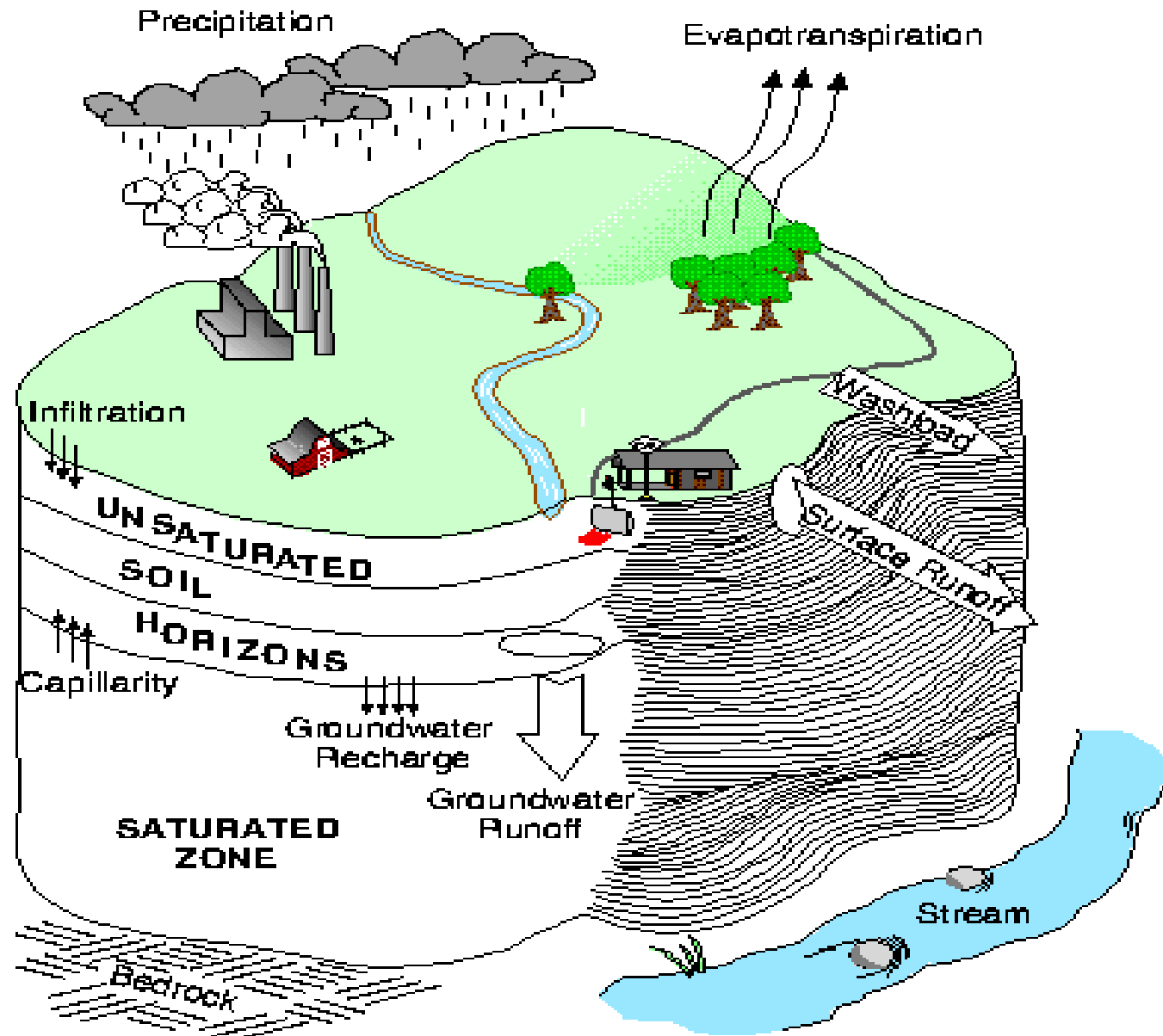
# Συνθετικός προσδιορισμός του ΜΥΓ- ΜΕΘΟΔΟΣ SCS



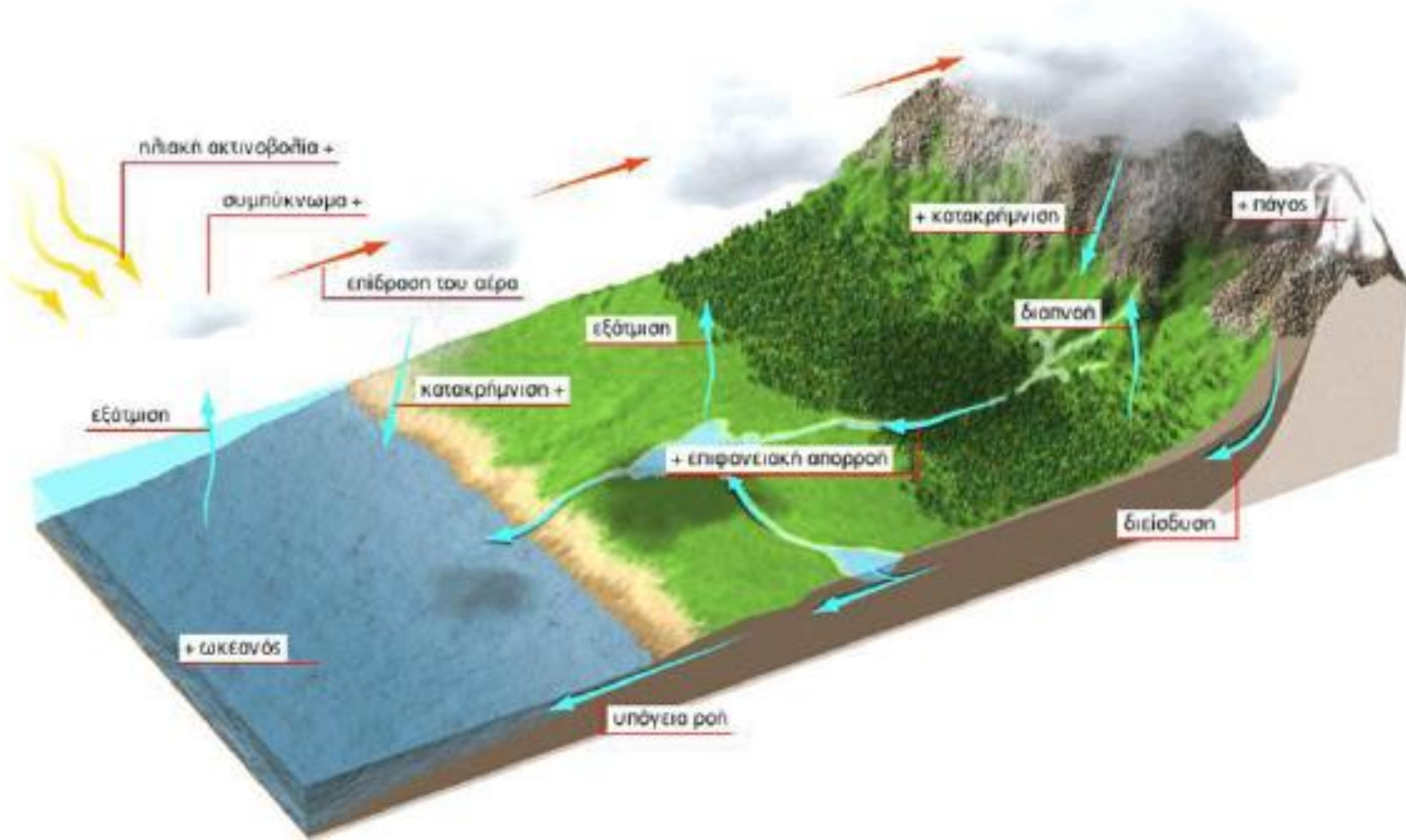
Με δεδομένα την παροχή αιχμής και τη χρονική επιβράδυνση για συγκεκριμένη διάρκεια περισεύματος βροχόπτωσης, το μοναδιαίο υδρογράφημα μπορεί να εκτιμηθεί από το συνθετικό αδιάστατο υδρογράφημα για μια δεδομένη λεκάνη.

Οι τιμές του  $q_p$  και του  $T_p$  μπορούν να εκτιμηθούν χρησιμοποιώντας ένα απλοποιητικό μοντέλο ενός τριγωνικού μοναδιαίου υδρογραφήματος.

# **ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΒΡΟΧΗΣ - ΑΠΟΡΡΟΗΣ**



# ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ



# ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ



# Συνιστώσες επιφανειακών διεργασιών

## Υπολεκάνη:

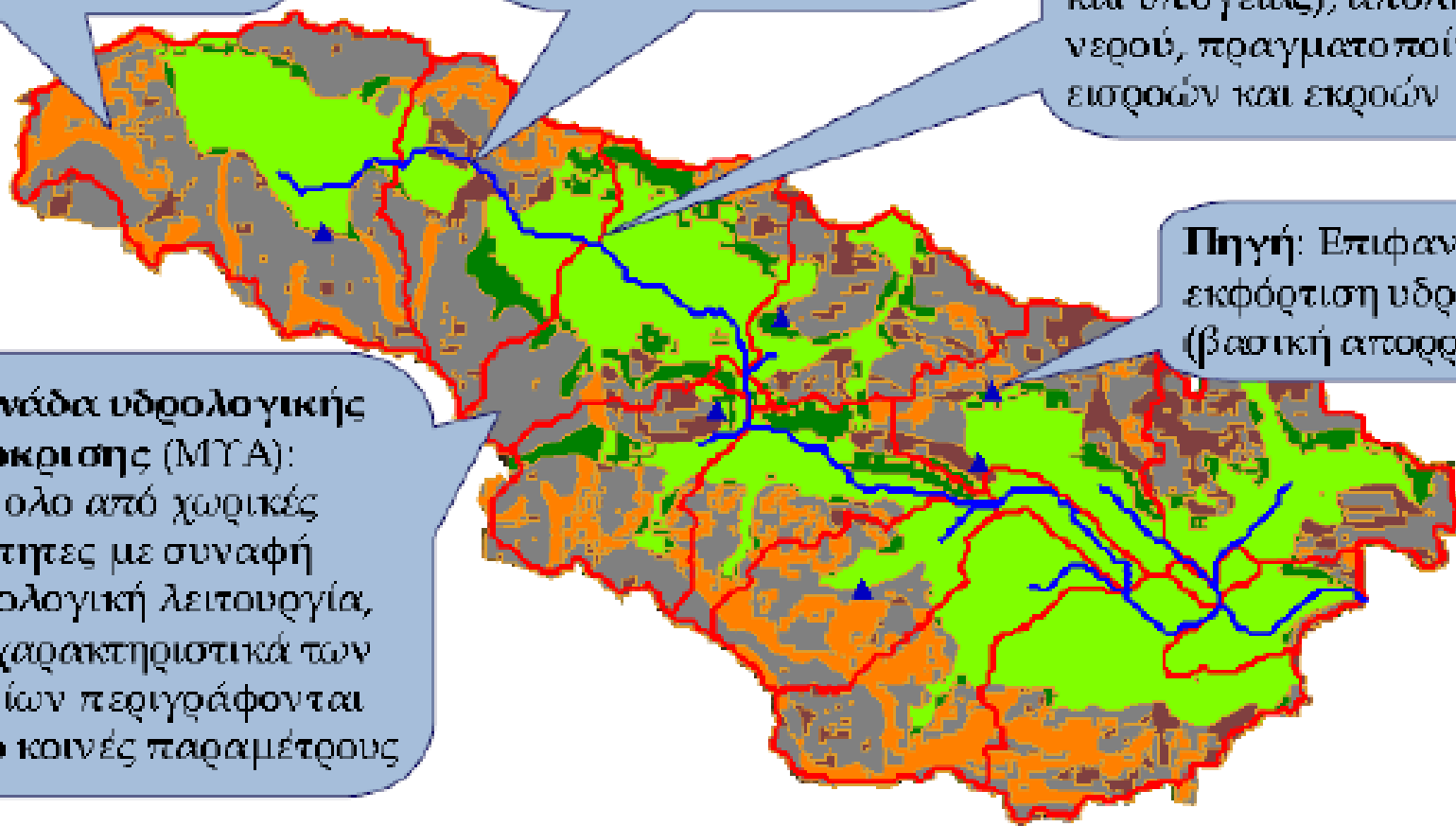
Πεδίο φορτίσεων  
(βροχόπτωση,  
δυνητική  
εξατμοδιαπνοή)

Υδατόρρευμα: Ανάσχεση  
πλημμυρικών παροχών,  
τροφοδοσία υδροφορέα  
μέσω διηθήσεων

Κόμβος: Συγκέντρωση  
απορροής (επιφανειακής  
και υπόγειας), απόληψη  
νερού, πραγματοποίηση  
εισροών και εκροών

Πηγή: Επιφανειακή  
εκφόρτιση υδροφορέα  
(βασική απορροή)

Μονάδα υδρολογικής  
απόκρισης (ΜΥΑ):  
Σύνολο από χωρικές  
ενότητες με συναφή  
υδρολογική λειτουργία,  
τα χαρακτηριστικά των  
οποίων περιγράφονται  
από κοινές παραμέτρους



**Υδρολογικό μοντέλο:** είναι ένα ευρύ φάσμα μαθηματικών μετασχηματισμών που χρησιμοποιούν δεδομένα πεδίου και εύλογες υποθέσεις σχετικά με τους φυσικούς μηχανισμούς, με στόχο την ποσοτική εκτίμηση υδρολογικών μεταβλητών που ενδιαφέρουν σε εφαρμογές της πράξης.

- **Μεμονωμένα γεγονότα (event-type ή event-based models):**
- **Συνεχούς προσομοίωσης, που περιγράφουν τη διαχρονική εξέλιξη του υδρολογικού κύκλου σε μια πεπερασμένη χωρική ενότητα (π.χ. λεκάνη απορροής) (continuous models)**

# Κατηγορίες υδρολογικών μοντέλων

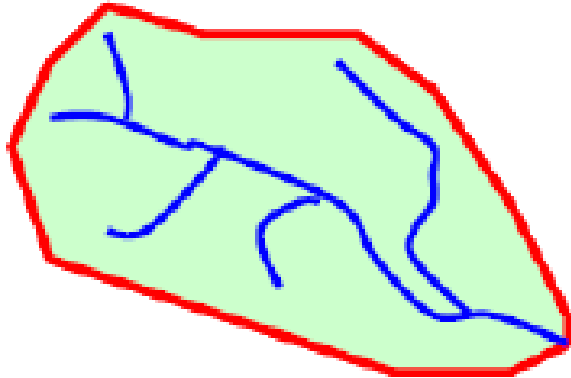
- το σκοπό της μελέτης
- την εμπειρία του μελετητή|
- τα διαθέσιμα δεδομένα

Οι Singh and Woolhiser (2002), σε μια εκτενή βιβλιογραφική επισκόπηση, ξεχωρίζουν ένα πλήθος 70 περίπου καταξιωμένων υδρολογικών σχημάτων, τα οποία χωρίζονται σε διάφορες κατηγορίες, ανάλογα με:

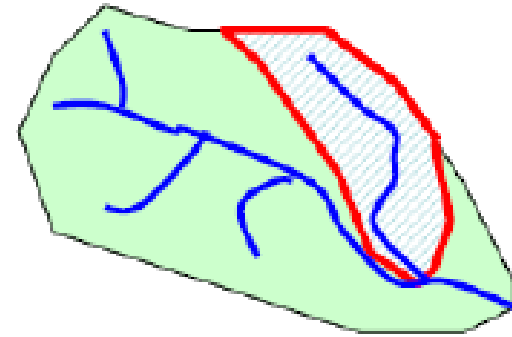
- το πεδίο εφαρμογής τους·
- τη χωρική τους κλίμακα·
- την μαθηματική τους δομή·
- τη χρονική τους διακριτότητα.



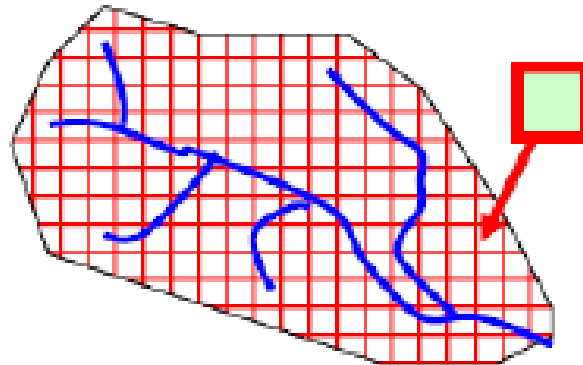
# Κατηγορίες υδρολογικών μοντέλων Χωρική Κλίμακα



*Αδιαμέριστα (lumped)*



*Ημι-κατανεμημένα (semi-distributed)*



*Κατανεμημένα (distributed)*

# Κατηγορίες υδρολογικών μοντέλων

## Χρονική Διακριτότητα

Ανάλογα με τον σκοπό του μοντέλου:

- Μοντέλα που χρησιμοποιούνται για διαχειριστικούς σκοπούς υιοθετούν τη μηνιαία ή σπανιότερα την ημερήσια κλίμακα,
- ενώ τα μοντέλα πλημμυρών ή τα συνδυαστικά υδρολογικά-υδροδυναμικά μοντέλα υιοθετούν μικρότερες κλίμακες, με μέγιστη την ημερήσια.

## Μαθηματική Δομή

- μοντέλα φυσικής βάσης
- εννοιολογικά μοντέλα
- στατιστικά και στοχαστικά μοντέλα
- μοντέλα «μαύρου κουτιού»

# Κατηγορίες υδρολογικών μοντέλων

## Σύγκριση υδρολογικών μοντέλων με βάση τη μαθηματική τους δομή

Τύπος μοντέλου	Θεωρητικό υπόβαθρο	Φυσική συνέπεια
<b>Φυσικής Βάσης</b>	Εξισώσεις ακόρεστης και κορεσμένης ροής, άλλες εμπειρικές εξισώσεις από πειραματικές λεκάνες	Θεωρητικά πλήρης, αλλά μόνο σε πολύ μικρή χωρική κλίμακα
<b>Εννοιολογικά</b>	Παραμετρικές σχέσεις σε υδρολογικά ανάλογα που αναπαριστούν τις κύριες υδρολογικές διεργασίες	Σχετική, εφόσον οι παράμετροι θεωρηθούν αντιπροσωπευτικές των μακροσκοπικών ιδιοτήτων της λεκάνης
<b>Στατιστικά και Στοχαστικά</b>	Σχέσεις που αναπαράγουν τη στατιστική δομή των παρατηρημένων δειγμάτων	Στοιχειώδης φυσική συνέπεια, ελεγχόμενη (από το μοντέλο) στατιστική συνέπεια
<b>«Μαύρου Κουτιού»</b>	Μη γραμμικοί μετασχηματισμοί	Απολύτως καμία

## Μοντέλα φυσικής βάσης (physically-based)

Αναπαριστούν τις υδρολογικές διεργασίες μικρής κλίμακας, βασιζόμενα στους φυσικούς νόμους που σχετίζονται με την κίνηση του νερού (δηλαδή της ακόρεστης και κορεσμένης ροής), καθώς και σε ημιεμπειρικές σχέσεις που έχουν προκύψει από έρευνες σε πειραματικές λεκάνες.

Απαιτούν εισαγωγή πολλών μεγεθών που αντιπροσωπεύουν τις φυσικές ιδιότητες του εδάφους και του υπεδάφους.

Αυτό είναι και το σημαντικότερο μειονέκτημα, αφού η έντονη ετερογένεια των φυσικών διεργασιών, προϋποθέτει την ύπαρξη των σχετικών πληροφοριών σε όσο το δυνατό πιο λεπτομερή χωρική κλίμακα.

Η διεθνής εμπειρία δείχνει ότι η χρήση τους αποκλειστικά για την πρόγνωση και προσομοίωση της απορροής, είναι υπολογιστικά ασύμφορη και δεν παρέχει κανένα πλεονέκτημα ως προς την ακρίβεια των προγνώσεων σε σχέση με τα εννοιολογικά μοντέλα.

## Εννοιολογικά Μοντέλα (conceptual)

Δεν αναπαριστούν τους φυσικούς νόμους αλλά παραμετρικές σχέσεις που αναπαριστούν τις υδρολογικές διεργασίες στη λεκάνη ή υπολεκάνη.

Αναφέρονται και ως μοντέλα συγκέντρωσης της εδαφικής υγρασίας καθώς το υδραυλικό ανάλογο που χρησιμοποιούν είναι μια υποθετική δεξαμενή νερού, η στάθμη της οποίας αναπαριστά το μέσο ύψος υγρασίας στην ακόρεστη ζώνη του εδάφους.

Το πλεονέκτημα των εννοιολογικών σχημάτων είναι η απλότητά τους, που επιτρέπει την προσομοίωση πολύπλοκων φυσικών διεργασιών με έντονη χωρική ανομοιογένεια, μέσω ενός μικρού αριθμού παραμέτρων.

## Στοχαστικά – στατιστικά μοντέλα

Βασίζονται στην πιθανοτική προσέγγιση των υδρολογικών διεργασιών, τις οποίες αντιμετωπίζουν ως τυχαίες μεταβλητές.

Είναι κατάλληλα για περιπτώσεις όπου η πραγματοποίηση ενός υδρολογικού φαινομένου (π.χ. πλημμύρας) είναι ή μπορεί να θεωρηθεί ανεξάρτητη από κάθε άλλη πραγματοποίηση του ίδιου φαινομένου.

Σε αντίθεση με τα μοντέλα φυσικής και εννοιολογικής βάσης, τα στατιστικά-στοχαστικά μοντέλα δεν δίνουν μονοσήμαντες προγνώσεις των μεταβλητών που αναπαριστούν, αλλά ποσοτικοποιούν την αβεβαιότητα των προγνώσεων.

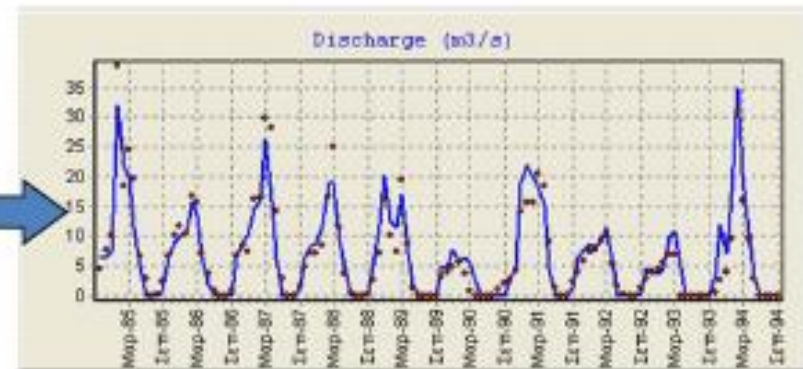
# Μοντέλα μαύρου κουτιού (black-box models)

- Στα **μοντέλα μαύρου κουτιού (black-box)**, οι εξισώσεις δεν αναπαριστούν τις ενδιάμεσες διεργασίες τον υδρολογικού κύκλου, όπως συμβαίνει με τα εννοιολογικά και τα φυσικής βάσης μοντέλα. Το πλεονέκτημά τους είναι η δυνατότητα περιγραφής οσοδήποτε πολύπλοκων συστημάτων, με πολύ μικρότερο (σχεδόν αμελητέο) υπολογιστικό φόρτο σε σχέση με τα αναλυτικά μοντέλα προσομοίωσης.
- Στην υδρολογία, ως μοντέλα μαύρου κουτιού αναφέρονται κυρίως τα **νευρωνικά δίκτυα**, που διατυπώνουν έντονα μη γραμμικούς μετασχηματισμούς των μεταβλητών εισόδου σε εξόδους. Η δομή (αριθμός νευρώνων και κρυμμένων επιπέδων) και οι παράμετροί τους δεν έχουν φυσικό υπόβαθρο, και προκύπτουν μέσω μιας αυτοματοποιημένης διαδικασίας προσαρμογής που βασίζεται στη χρήση γενετικών, συνήθως, αλγορίθμων και είναι γνωστή ως *εκπαίδευση* (training) του δικτύου. Στην πράξη, το νευρωνικό δίκτυο είναι ένας κρυφός υπολογιστικός κώδικας, στον οποίο δεν έχει πρόσβαση ο χρήστης.
- Άλλη κατηγορία μοντέλων μαύρου κουτιού είναι τα **γενετικού προγραμματισμού**, στα οποία χρησιμοποιείται ένας γενετικός αλγόριθμος που εντοπίζει μια «βέλτιστη» σχέση ή και σύστημα εξισώσεων μεταξύ φορτίσεων και αποκρίσεων. Η διαφορά σε σχέση με τα νευρωνικά δίκτυα είναι ότι οι εξισώσεις του μοντέλου, αν και επίσης δεν έχουν φυσική ερμηνεία, είναι ορατές στον χρήστη, οπότε προσεγγίζουν περισσότερο την κατηγορία των εννοιολογικών προσεγγίσεων.
- Η διάδοση των νευρωνικών δικτύων στις υδρολογικές επιστήμες ξεκίνησε στις αρχές της δεκαετίας του 1990, και η συνηθέστερη εφαρμογή τους είναι για την βραχυπρόθεσμη πρόγνωση πλημμυρικών φαινομένων. Ο γενετικός προγραμματισμός έχει μικρό χρόνο ζωής στις επιστήμες των υδατικών πόρων, και ακόμα μικρότερη εφαρμογή στην προσομοίωση υδρολογικών διεργασιών.

## Βαθμονόμηση υδρολογικών μοντέλων (calibration)

Είναι η συστηματική διαδικασία προσαρμογής των τιμών των παραμέτρων ενός υδρολογικού μοντέλου, ώστε οι προσομοιωμένες αποκρίσεις του να προσεγγίζουν όσο το δυνατό περισσότερο τις αντίστοιχες παρατηρημένες τιμές.

Η βαθμονόμηση ενός μοντέλου προϋποθέτει ένα επαρκές χρονικό διάστημα για το οποίο διατίθενται συστηματικές μετρήσεις (χρονοσειρές) απόκρισης του φυσικού συστήματος, ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση των ιστορικών με τα προσομοιωμένα δεδομένα.





# Ανάλυση Ευαισθησίας Μαθηματικών Μοντέλων

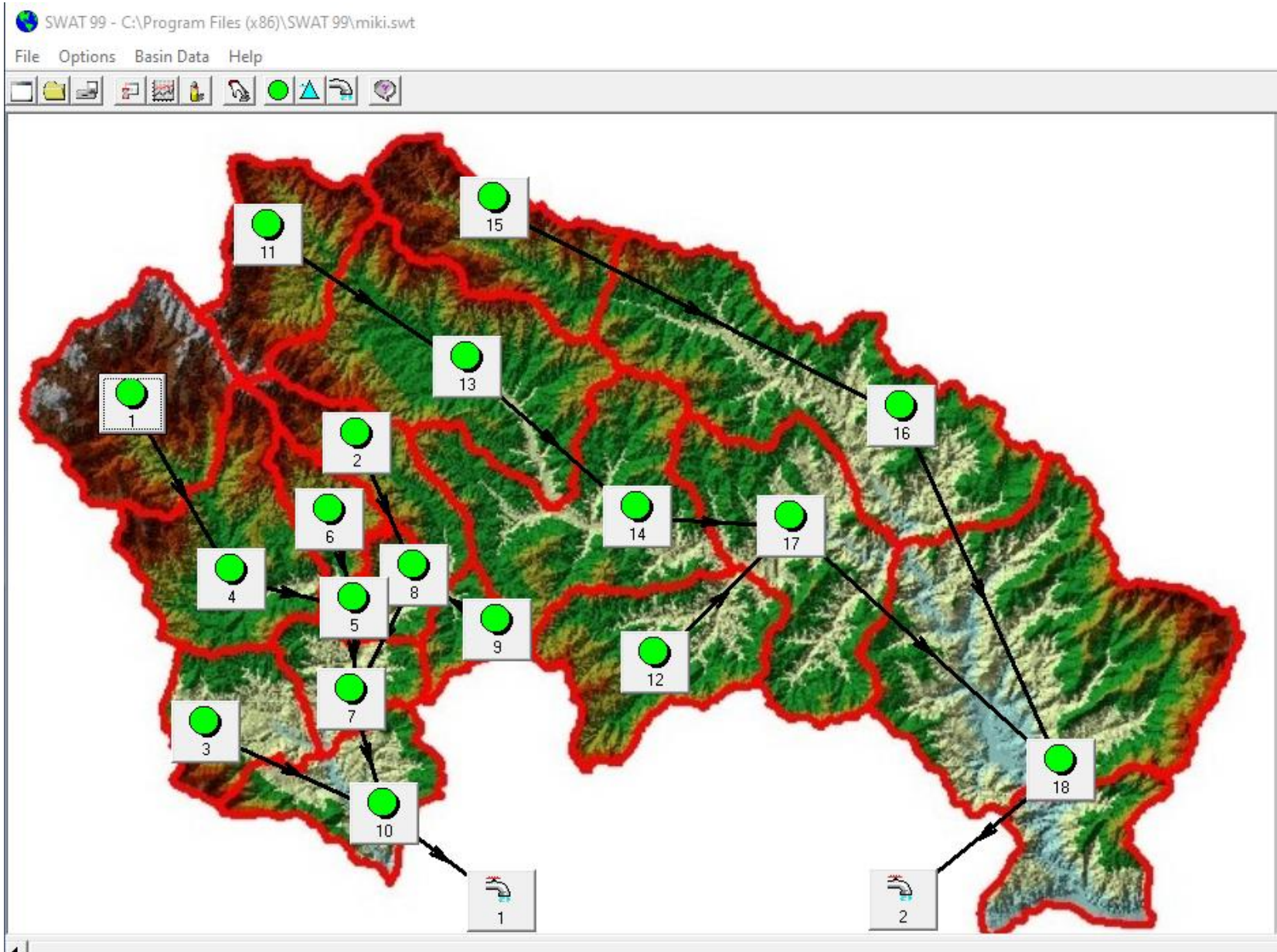
Η ανάλυση ευαισθησίας (sensitivity analysis) είναι μια διαδικασία αξιολόγησης της επίδρασης των παραμέτρων των μαθηματικών μοντέλων, για την ποσοτικοποίηση της ευαισθησίας τους στην εξεταζόμενη μεταβλητή (π.χ. απορροή)

- Αποσκοπεί στη μείωση του εύρους των παραμέτρων
- Στη γενίκευση των παραμέτρων χρησιμοποιώντας π.χ τυπικές ή περιοχικές τιμές
- Στην απαλοιφή ή ενσωμάτωση των παραμέτρων σε άλλες πιο γενικές κατηγορίες

# Επιλογή Κατάλληλου Μοντέλου

- Ποσότητα και ποιότητα διαθέσιμων δεδομένων εισόδου
- Διατιθέμενα τεχνολογικά και οικονομικά μέσα
- Εμπειρία ερευνητή
- Επιδιωκόμενο αποτέλεσμα από πλευράς ακριβείας

# Εννοιολογικά Μοντέλα – παραδείγματα εφαρμογής SWAT



# Εννοιολογικά Μοντέλα – παραδείγματα εφαρμογής

## HEC-HMS

HEC-HMS 4.2.1 [C:\...\\Documents\TSOUKALI\TSOUKALI.hms]

File Edit View Components Parameters Compute Results Tools Help

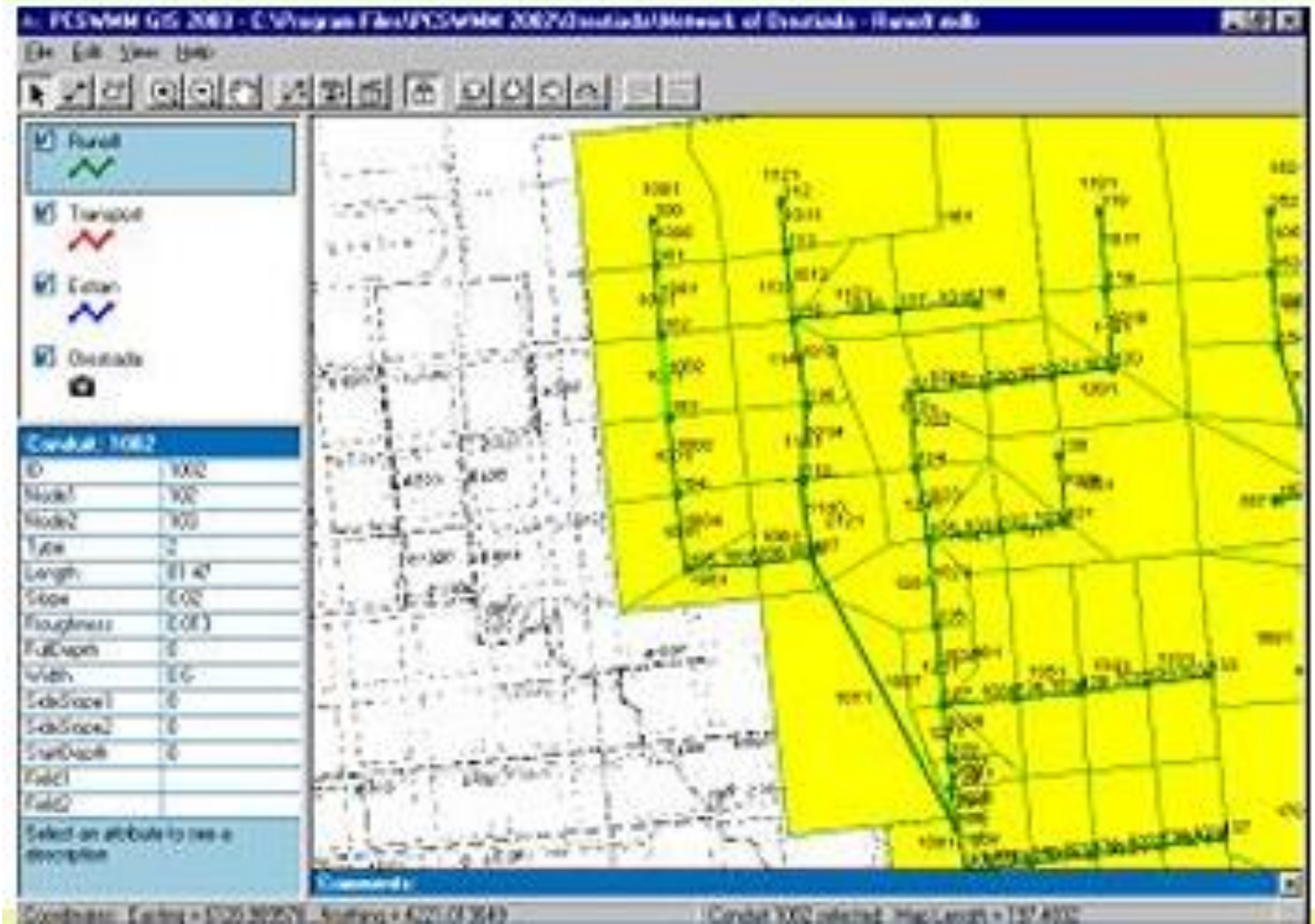
The screenshot displays the HEC-HMS 4.2.1 software interface. The top menu bar includes File, Edit, View, Components, Parameters, Compute, Results, Tools, and Help. Below the menu is a toolbar with various icons for file operations and navigation. The main window is divided into several panes:

- Project Tree (Left):** Shows a hierarchical view of the project. The root is 'TSOUKALI', which contains 'Basin Models', 'Meteorologic Models', 'Control Specifications', and 'Time-Series Data'. Under 'Basin Models', there is 'Basin 1', which contains 'Lekani\_Tsoukali' (highlighted) and 'Reach-1'.
- Basin Model [Basin 1] (Right):** A diagram showing a single node labeled 'Lekani\_Tsoukali' with a blue arrow pointing to a label 'Reach-1'.
- Components Panel (Bottom Left):** Contains tabs for 'Subbasin', 'Loss', 'Transform', and 'Options'. The 'Subbasin' tab is active, showing the following configuration:
  - Basin Name:** Basin 1
  - Element Name:** Lekani\_Tsoukali
  - Description:** (empty text box)
  - Downstream:** Reach-1 (dropdown menu)
  - \*Area (KM2):** 32,703
  - Latitude Degrees:** (empty text box)
  - Latitude Minutes:** (empty text box)
  - Latitude Seconds:** (empty text box)
  - Longitude Degrees:** (empty text box)
  - Longitude Minutes:** (empty text box)
  - Longitude Seconds:** (empty text box)
  - Canopy Method:** --None-- (dropdown menu)
  - Surface Method:** --None-- (dropdown menu)
  - Loss Method:** SCS Curve Number (dropdown menu)
  - Transform Method:** SCS Unit Hydrograph (dropdown menu)
  - Baseflow Method:** --None-- (dropdown menu)

At the bottom of the interface, there are two status messages:

- NOTE 10008: Begin opening project "TSOUKALI" in directory "C:\Users\dell-user\Documen
- NOTE 10019: Finished opening project "TSOUKALI" in directory "C:\Users\dell-user\Docum

# Εννοιολογικά Μοντέλα – παραδείγματα εφαρμογής PC-SWMM



# Εννοιολογικά Μοντέλα – παραδείγματα εφαρμογής

## HYDRO – δικής μας κατασκευής

