



Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

# ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ

Ενότητα 9: Μέθοδοι εκτίμησης πλημμύρας σχεδιασμού

Καθ. Αθανάσιος Λουκάς

Εργαστήριο Υδρολογίας και Ανάλυσης Υδατικών Συστημάτων

Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών

Πολυτεχνική Σχολή

# ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

- Πλημμύρα ονομάζεται η κατάσταση κατά την οποία περιοχές, που συνήθως είναι στεγνές, καλύπτονται από ποσότητες νερού για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.
- Οι πλημμυρικοί όγκοι νερού προέρχονται από
  - τη βροχόπτωση ή/και την τήξη του χιονιού,
  - την υπερχείλιση ποταμού,
  - την εισροή της θάλασσας σε παράκτιες περιοχές, και
  - τη θραύση φράγματος.
- Οι πλημμύρες είναι φυσικά φαινόμενα (αφού συνήθως προέρχονται από μετεωρολογικές καταστάσεις), όμως συμβαίνουν όταν η χωρητικότητα του συστήματος αποστράγγισης (φυσικού ή ανθρωπογενούς), δεν μπορεί να διοχετεύσει τον όγκο νερού που παράγεται από τη βροχόπτωση. Τα φυσικά φαινόμενα που προκαλούν πλημμύρες δεν μπορούν να ελεγχθούν, αλλά οι γεωλογικές, γεωμορφολογικές και εδαφολογικές συνθήκες της λεκάνης απορροής είναι δυνατόν να τροποποιηθούν με την ανθρώπινη επέμβαση.



# ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

- Οι πλημμύρες προέρχονται από την αλληλεπίδραση:
  - φυσικών φαινομένων (βροχόπτωση), των συνθηκών της λεκάνης απορροής και τη χωρητικότητα του συστήματος αποστράγγισης (φυσικού ή ανθρωπογενούς)
- Ο πλημμυρικός κίνδυνος είναι συνάρτηση της πιθανότητας εμφάνισης του φυσικού φαινομένου και της επίδρασης που θα έχει στην ανθρώπινη κοινωνία.
- Σε μια δεδομένη βροχόπτωση οι ζημιές που θα προκληθούν λόγω πλημμύρας, εξαρτώνται από τρεις κύριους παράγοντες:
  - a) την παρουσία αντιπλημμυρικών έργων,
  - b) την αλλοίωση του φυσικού περιβάλλοντος που έχει αποτέλεσμα την αύξηση του πλημμυρικού όγκου και τη μείωση του χρόνου συρροής των νερών και
  - c) την ένταση της ανθρώπινης δραστηριότητας σε περιοχές που αποτελούν πεδία πλημμυρών με κάποια πιθανότητα.



# ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

## ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΟΥ ΚΙΝΔΥΝΟΥ

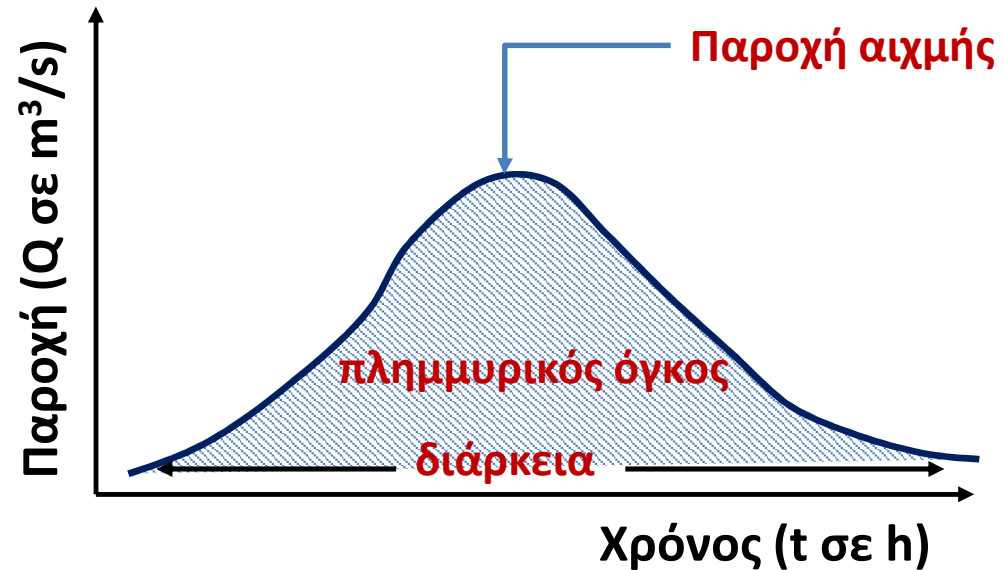
| Συνιστώσα             | Χαρακτηριστικά                              | Αύξηση πλημμυρικού κινδύνου                              |
|-----------------------|---|--|
| Ατμόσφαιρα            | Χωροχρονική κατανομή βροχόπτωσης            | Μεγαλύτερες εντάσεις βροχής ή/και μεγαλύτερο ύψος βροχής |
| Λεκάνη απορροής       | Συντελεστής απορροής<br>Χρόνος συγκέντρωσης | Αύξηση<br>Μείωση   |
| Σύστημα αποστράγγισης | Παροχετευτική ικανότητα                     | Μείωση   |
| Πλημμυρικό πεδίο      | Ένταση και αξία δραστηριοτήτων              | Αύξηση   |



# ΠΛΗΜΜΥΡΕΣ - ΦΥΣΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

Τα τρία κύρια μεγέθη της πλημμύρας είναι:

- η παροχή αιχμής και η αντίστοιχη στάθμη στο υδατόρευμα
- ο πλημμυρικός όγκος
- η χρονική διάρκεια

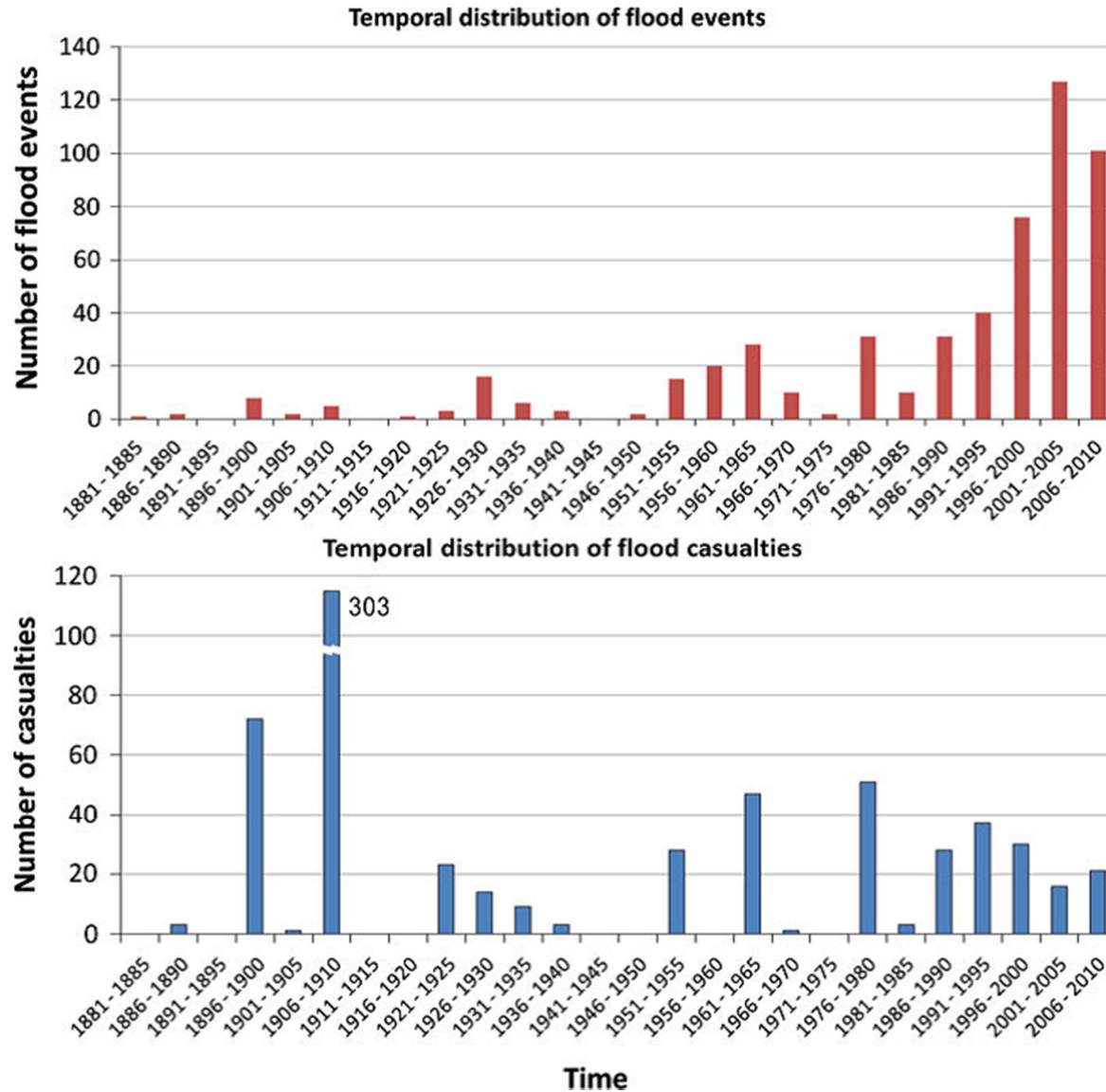


Τα μεγέθη των πλημμυρών συνδέονται με τα χαρακτηριστικά:

- της βροχόπτωσης (συνολικό ύψος, ένταση, διάρκεια)
- της λεκάνης απορροής (έκταση, συντελεστής απορροής, χρόνος συρροής)
- των υδατορευμάτων (διατομή, κλίση, τραχύτητα, κατάντη στάθμες)



# ΠΛΗΜΜΥΡΕΣ – ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

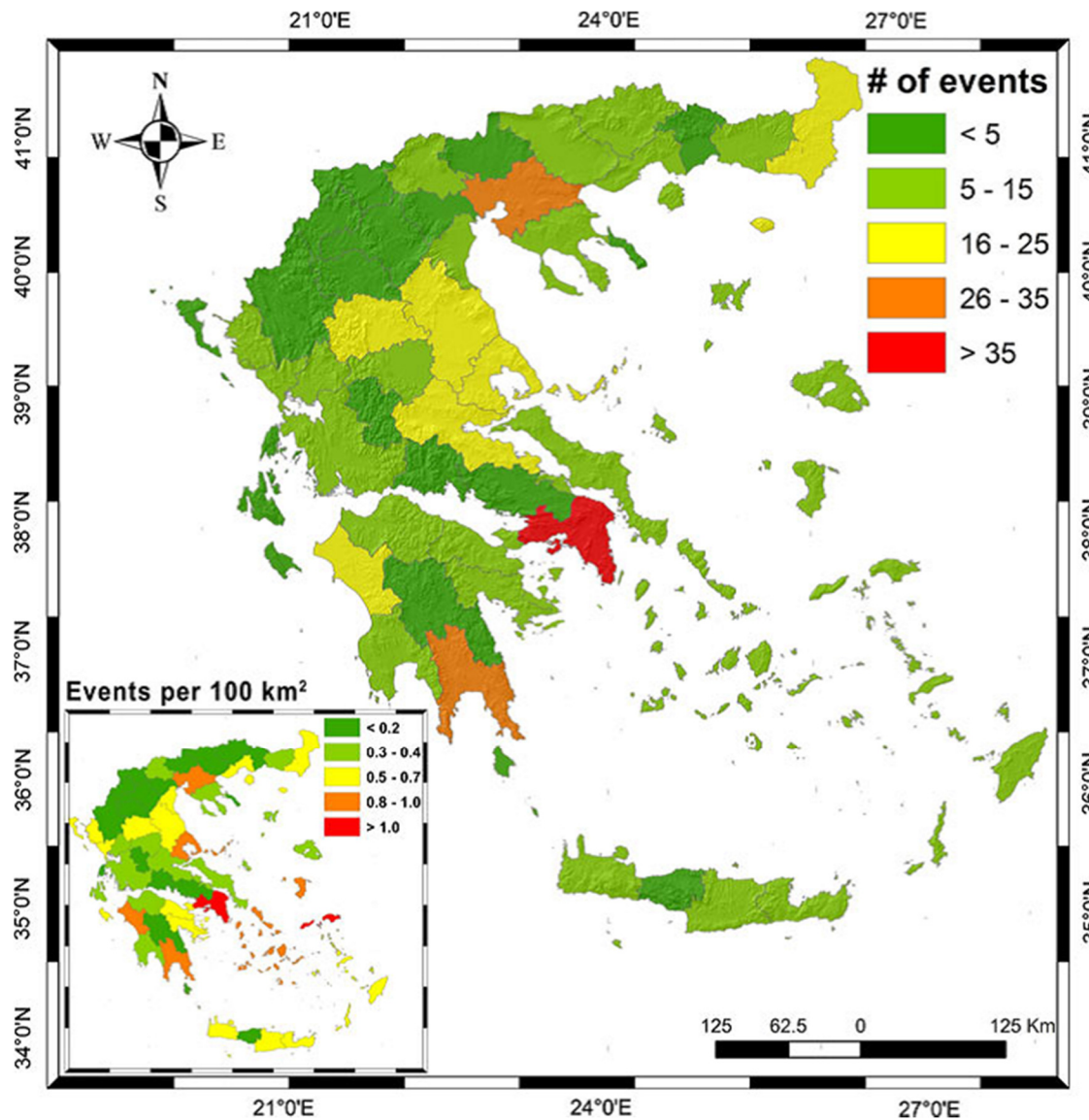


Χρονική κατανομή πλημμυρικών επεισοδίων και ανθρώπινες απώλειες λόγω πλημμυρών μεταξύ 1881 και 2010 (Diakakis et al., 2012)

Πηγή:  
Diakakis, M., Mavroulis, S. and Deligiannakis, G., 2012. Floods in Greece, a statistical and spatial approach. *Natural Hazards*, 62, 485-500.



# ΠΛΗΜΜΥΡΕΣ – ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

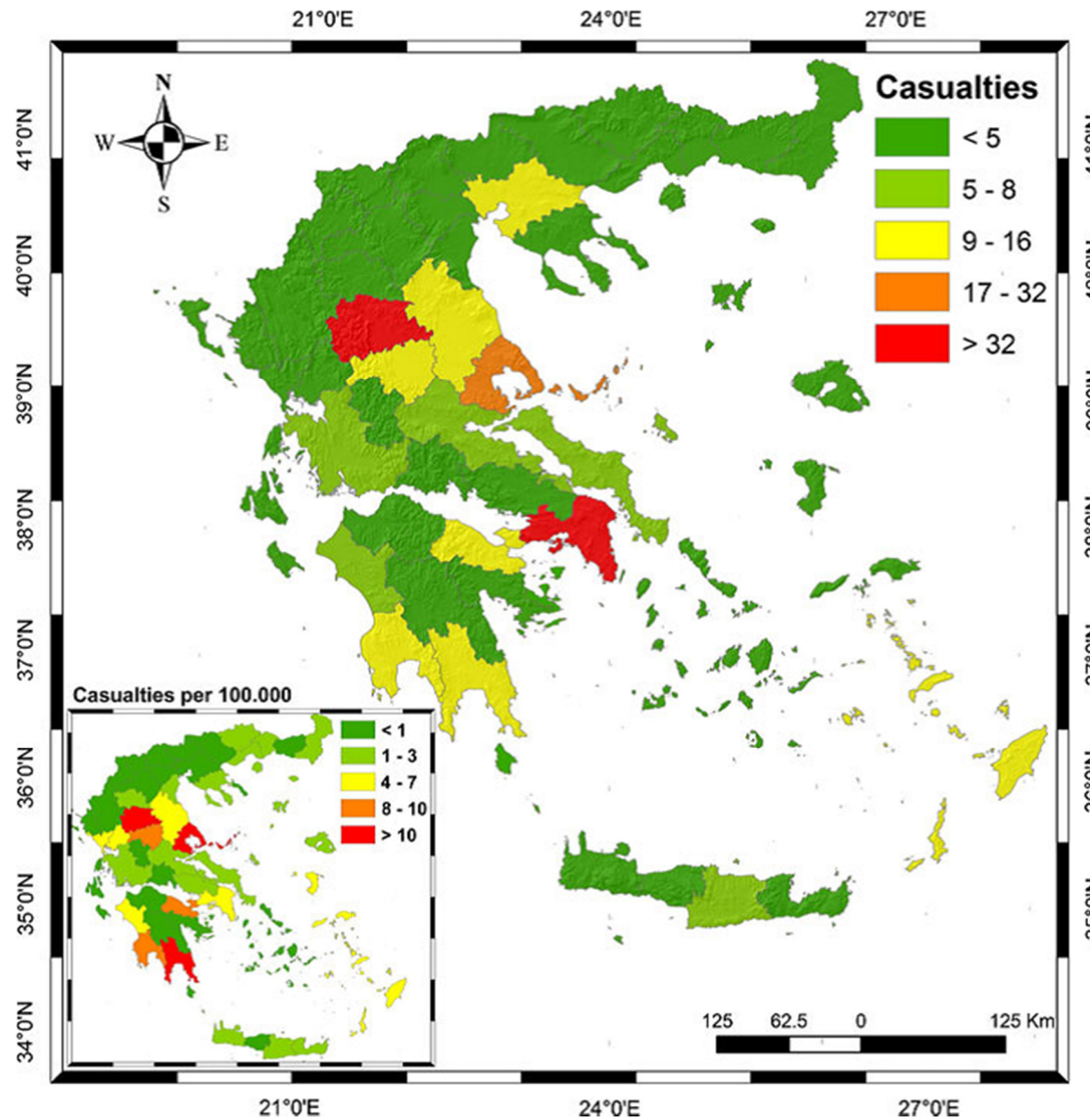


Κατανομή πλημμυρών στον ελλαδικό χώρο για την περίοδο 1880-2010. Στο κάτω αριστερό σχήμα η κατανομή των πλημμυρικών επεισοδίων ανάγεται με βάση τα 100 km<sup>2</sup> (Diakakis et al., 2012)

Πηγή:  
Diakakis, M., Mavroulis, S. and Deligiannakis, G., 2012. Floods in Greece, a statistical and spatial approach. *Natural Hazards*, 62, 485-500.



# ΠΛΗΜΜΥΡΕΣ – ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ



Κατανομή ανθρώπινων απωλειών λόγω πλημμύρας στον ελλαδικό χώρο για την περίοδο 1880-2010. Στο κάτω αριστερό σχήμα η κατανομή ανθρώπινων απωλειών λόγω πλημμύρας σταθμίζεται με τον πληθυσμό των 100000 κατοίκων (ELSTAT 2001) (Diakakis et al., 2012)

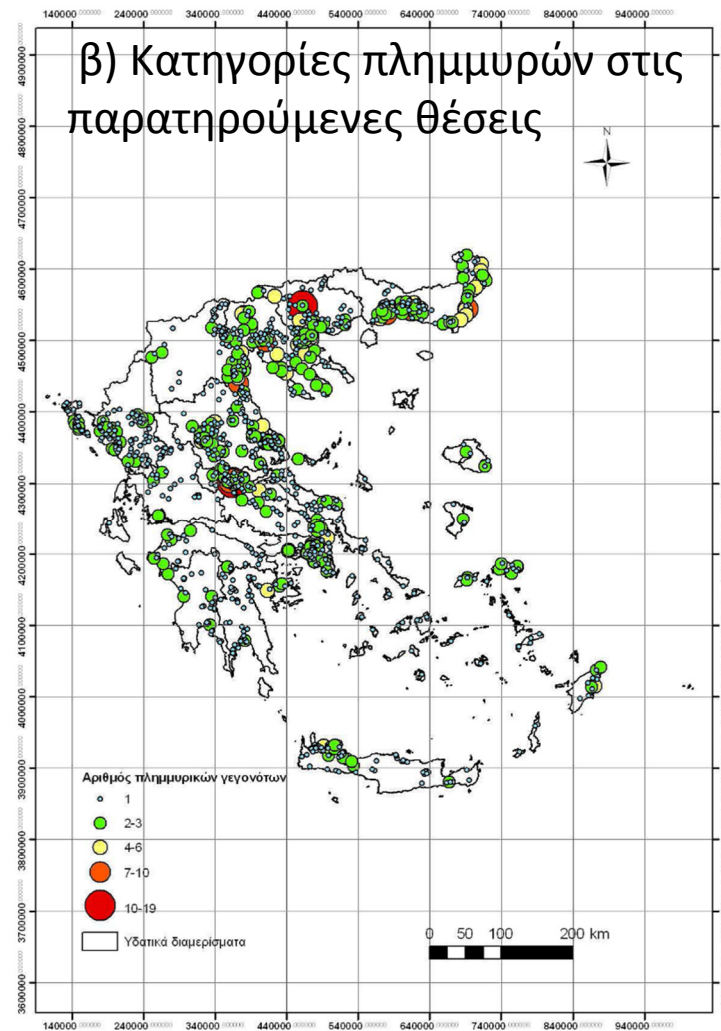
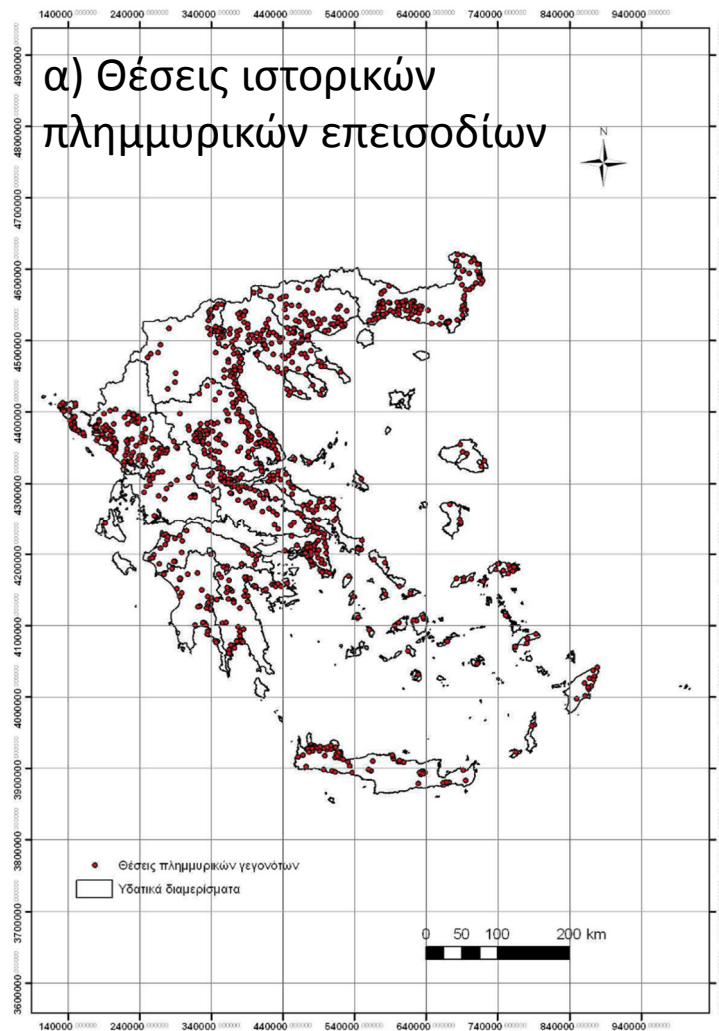
Πηγή:  
Diakakis, M., Mavroulis, S. and Deligiannakis, G., 2012. Floods in Greece, a statistical and spatial approach. *Natural Hazards*, 62, 485-500.





# ΠΛΗΜΜΥΡΕΣ – ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Ειδική Γραμματεία Υδάτων - Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής, 2012.  
Εφαρμογή Οδηγίας 2007/60/ΕΚ. Προκαταρκτική Αξιολόγηση Κινδύνων Πλημμύρας

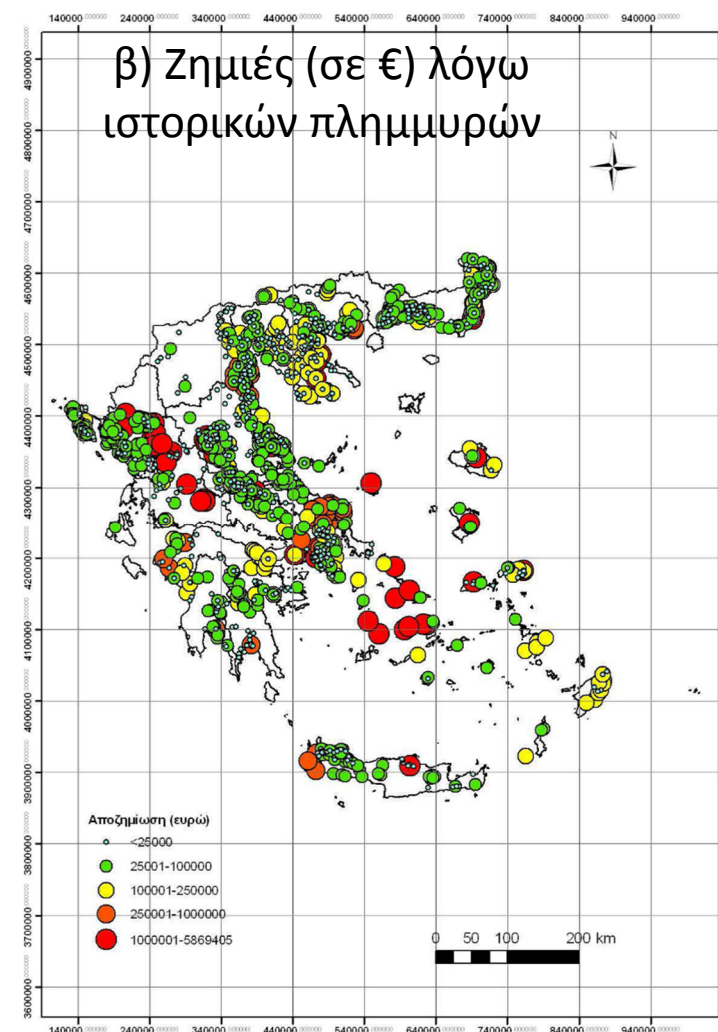
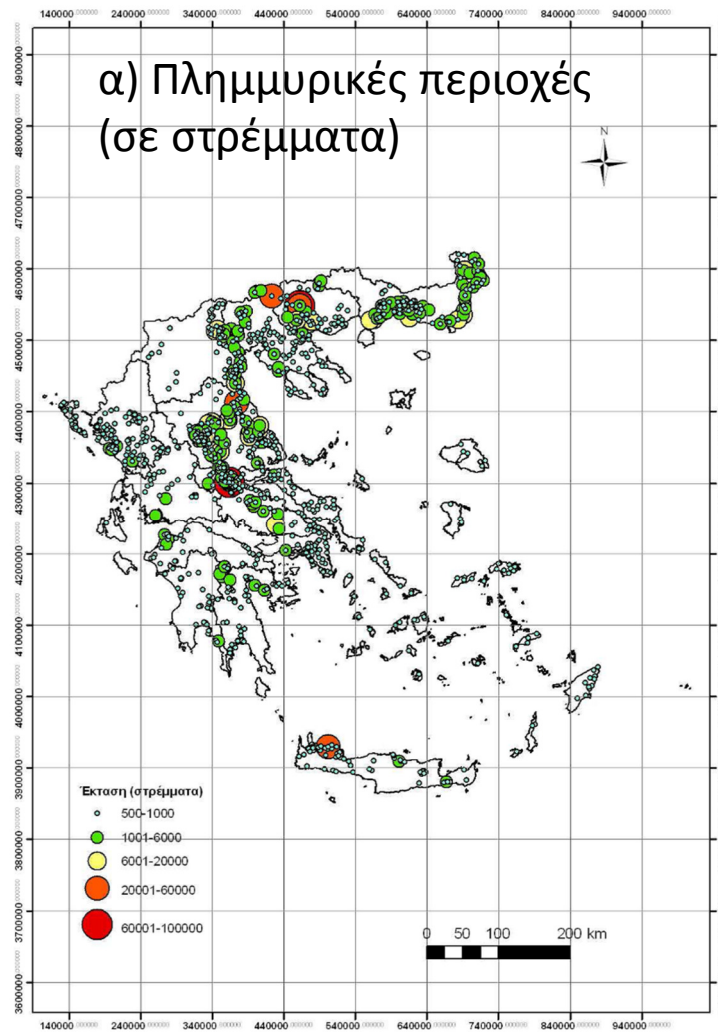


Πηγή:  
ΕΓΥ –  
ΥΠΕΚΑ,  
2012



# ΠΛΗΜΜΥΡΕΣ – ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Ειδική Γραμματεία Υδάτων - Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής, 2012.  
Εφαρμογή Οδηγίας 2007/60/ΕΚ. Προκαταρκτική Αξιολόγηση Κινδύνων Πλημμύρας

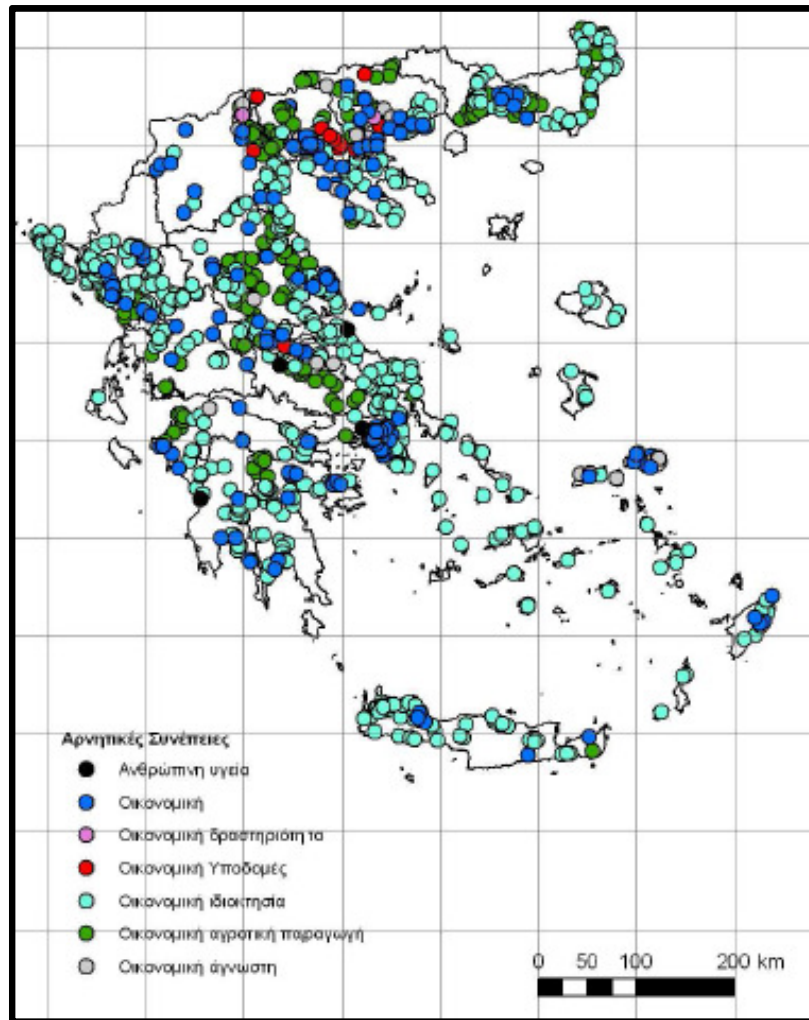


Πηγή:  
ΕΓΥ –  
ΥΠΕΚΑ,  
2012



# ΠΛΗΜΜΥΡΕΣ – ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Ειδική Γραμματεία Υδάτων - Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής, 2012.  
Εφαρμογή Οδηγίας 2007/60/ΕΚ. Προκαταρκτική Αξιολόγηση Κινδύνων Πλημμύρας



Κατηγορίες ανά Τύπο  
Καταστροφής

Πηγή: ΕΓΥ – ΥΠΕΚΑ, 2012



# Αντιμετώπιση Πλημμυρών

Η αντιμετώπιση των πλημμυρών γίνεται με μια σειρά μέτρων που διακρίνονται ανάλογα με:

- την κατασκευή ή όχι τεχνικών έργων (κατασκευαστικά-μη κατασκευαστικά μέτρα)
- το αν προστατεύουν συγκεκριμένες κατασκευές ή μεγαλύτερες περιοχές
- το αν έχουν σκοπό:
  - να διαφοροποιήσουν την πλημμύρα,
  - να μειώσουν την ευπάθεια σε πλημμύρα και
  - να μειώσουν την επίδραση της πλημμύρας.



# Αντιμετώπιση Πλημμυρών

## Κατασκευαστικά μέτρα

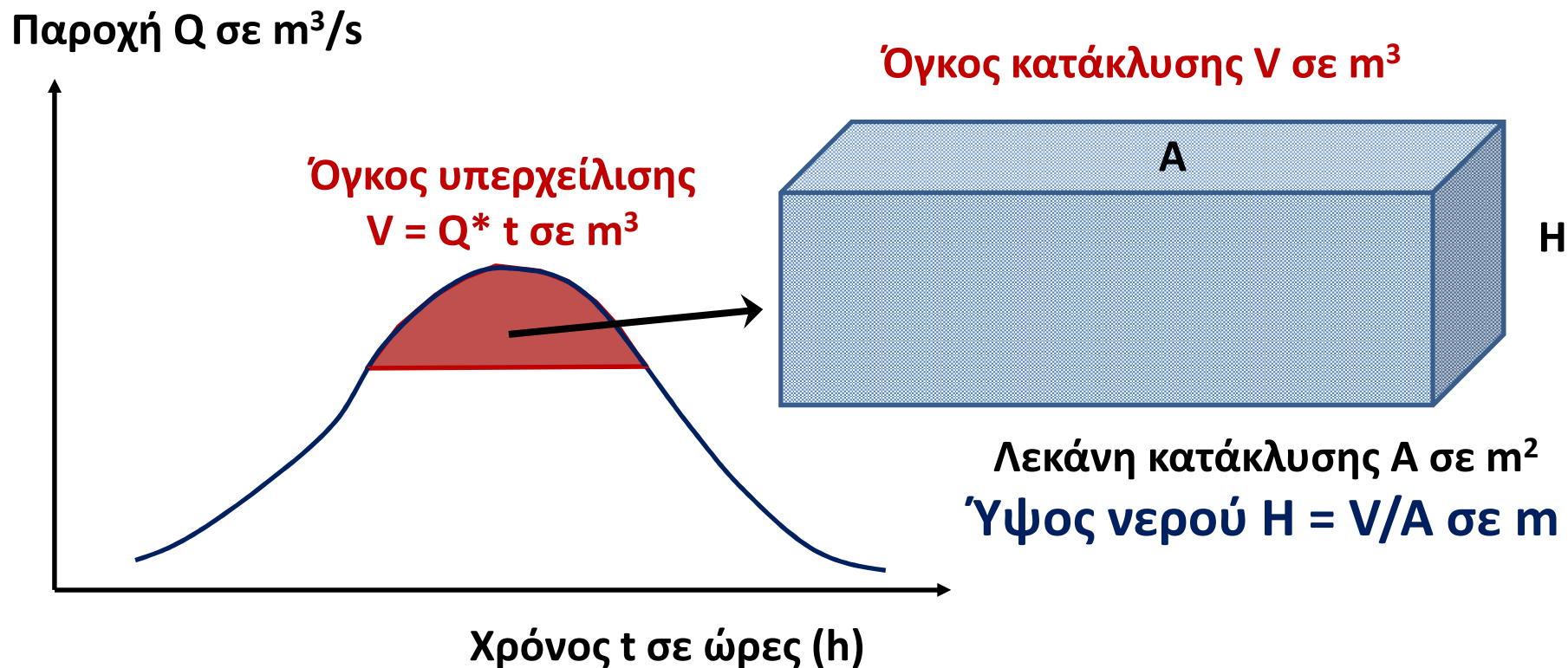
- αντιπλημμυρικοί ταμιευτήρες στα ανάντη της λεκάνης
- αναχώματα και προστατευτικοί τοίχοι
- λεκάνες κατάκλυσης δίπλα στο ποτάμι και στις χαμηλές περιοχές
- δίκτυα ομβρίων
- εκτροπές ποταμών
- παράκτια προστασία
- αύξηση της παροχετευτικότητας των ποταμών με καθαρισμό, εκβάθυνση και διάνοιξη των διατομών
- εισαγωγή πρόσθετων διαδρομών παράλληλα με το ποτάμι
- υπερχειλιστές σε ταμιευτήρες

Τα κατασκευαστικά μέτρα έχουν ως κύριους στόχους την αποθήκευση του νερού και την αύξηση της ικανότητας μεταφοράς του. Δεδομένου ότι οι κατασκευές είναι τρωτές στις πλημμύρες (αφού έχουν σχεδιαστεί για κάποια πιθανότητα) θα πρέπει να συνοδεύονται και από άλλα μη κατασκευαστικά μέτρα.



# Αντιμετώπιση Πλημμυρών

## Κατασκευαστικά μέτρα – Λεκάνες κατάκλυσης



# Αντιμετώπιση Πλημμυρών

## Μη κατασκευαστικά μέτρα

- διατήρηση και επέκταση των δασών στις ορεινές περιοχές της λεκάνης
- διατήρηση των υγροτόπων και των πλημμυρικών πεδίων από ανθρώπινες επεμβάσεις και χρήσεις ώστε οι φυσικές ζώνες πλημμυρών να καθυστερούν τη ροή
- προσαρμογή των χρήσεων των πλημμυρικών πεδίων στη πιθανότητα καταστροφής και χωροθέτηση των σημαντικών εγκαταστάσεων σε ακίνδυνες περιοχές
- διατήρηση των μαιάνδρων των ποταμών και των φυσικών συνδέσεων τους με τις πλημμυρικές περιοχές
- έλεγχος και συντήρηση των αποχετευτικών συστημάτων στις αστικές περιοχές
- χρήση ιστορικών πληροφοριών, ανάπτυξη συστημάτων πρόγνωσης καταιγίδων και μοντέλων βροχής-απορροής
- συστήματα ειδοποίησης του κοινού
- μηχανισμός διαρκούς ενημέρωσης του κοινού και αναίρεση της εσφαλμένης αντίληψης για απόλυτη προστασία
- οργάνωση φορέων για πρόληψη και αντιμετώπιση φυσικών καταστροφών



# Εκτίμηση Πλημμυρών

- ❑ Μια σημαντική πρακτική εφαρμογή της υδρολογίας είναι η εκτίμηση των μεγάλων πλημμυρικών γεγονότων, αφού ο σχεδιασμός των έργων ανάπτυξης υδάτινων πόρων εξαρτάται από τη **συχνότητα εμφάνισης** και το **μέγεθος της ροής αιχμής**.
- ❑ Το πρόβλημα του προσδιορισμού της πιθανότητας εμφάνισης της πλημμυρικής απορροής γίνεται πολύ δύσκολο σε λεκάνες απορροής, στις οποίες δεν υπάρχουν μετρήσεις απορροής.
- ❑ Για τον υπολογισμό του πλημμυρικού όγκου και της πλημμυρικής παροχής εφαρμόζονται διάφορες μεθοδολογίες εκτίμησης πλημμυρικής αιχμής όπως:
  - **Εμπειρικοί τύποι και υδρολογικά προσομοιώματα** (Ορθολογική Μέθοδος, Μοναδιαία Υδρογραφήματα και Υδρολογικά Μοντέλα Βροχής-Απορροής).





# Εμπειρικοί τύποι υπολογισμού πλημμυρικής αιχμής

- **Τύπος των Klement-Wunderlich:**

Η  $maxQ$  (σε  $m^3/s$ ) εκτιμάται από την έκταση της λεκάνης απορροής ( $A$ , σε  $km^2$ ):

$$maxQ = 5,5 * A^{5/6}$$

- **Τύπος του Wundt:**

Η  $maxQ$  (σε  $m^3/s$ ) εκτιμάται από την έκταση της λεκάνης απορροής ( $A$ , σε  $km^2$ ):

$$maxQ = 13,8 * A^{0,6}$$

- **Τύπος της Εταιρείας Henry Boot:**

Η εταιρεία Henry Boot χρησιμοποίησε στην Ελλάδα την σχέση:

$$maxQ = a * A^{0,05}$$

όπου  $a$  είναι ένας συντελεστής που για την Θεσσαλία παίρνει τη μέγιστη τιμή  $a = 4$  και  $A$  η έκταση της λεκάνης απορροής.



# Εμπειρικοί τύποι υπολογισμού πλημμυρικής αιχμής

- Τύπος του Kreps:

Ο τύπος του Kreps εκτιμά το συνολικό όγκο μιας πλημμυρικής αιχμής από την έκταση της λεκάνης απορροής ( $A$ , σε  $\text{km}^2$ ):

$$V = 65000 * A$$

Εάν θεωρηθεί ότι το υδρογράφημα πλημμυρικής απορροής έχει τριγωνική μορφή με χρονική βάση, σύμφωνα με την Soil Conservation Service (Παπαμιχαήλ, 2001), τότε η χρονική βάση του υδρογραφήματος είναι:

$$t_b = t_p + 1,67 \cdot t_p = 2,67 \cdot t_p$$

όπου  $t_p$  είναι ο χρόνος ανόδου του υδρογραφήματος.

Η  $\max Q$  εκτιμάται από την σχέση:

$$\max Q = \frac{2 * V}{t_b}$$



# Εμπειρικοί τύποι υπολογισμού πλημμυρικής αιχμής

- Τύπος του U.S. Department of Agriculture:

Η  $\max Q$  (σε  $m^3/s$ ) εκτιμάται από την έκταση της λεκάνης απορροής ( $A$ , σε  $km^2$ ), το χρόνο ανόδου του υδρογραφήματος,  $t_p$ , και το ύψος της απορροϊκής βροχής (καθαρή βροχή που δημιουργεί απορροή),  $P_e$ :

$$\max Q = \frac{0,21 * A * P_e}{t_p}$$

όπου:

$P_e$  είναι η απορροϊκή βροχή



# Εμπειρικοί τύποι υπολογισμού πλημμυρικής αιχμής

- Τύποι του Fuller:

Οι τύποι του Fuller εκτιμούν:

- Τη μέγιστη ημερήσια πλημμυρική παροχή ενός έτους (σε m<sup>3</sup>/s):

$$Q_1 = C_F \cdot A^q$$

- Η μέγιστη ημερήσια πλημμυρική παροχή με περίοδο επαναφοράς T (σε m<sup>3</sup>/s):

$$\max Q_{d,T} = Q_1 \cdot (1 + \beta \cdot \log T)$$

- Η μέγιστη στιγμιαία πλημμυρική παροχή με περίοδο επαναφοράς T (σε m<sup>3</sup>/s):

$$\max Q_T = \max Q_{d,T} \cdot \left(1 + \frac{2,66}{A^{0,3}}\right)$$



# Εμπειρικοί τύποι υπολογισμού πλημμυρικής αιχμής

- Τύπος του Fuller: (Π.Δ. 696/8-10-1974)

$$Q_1 = C_F \cdot A^q \Rightarrow Q_1 = 1,80 \cdot A^{0,80}$$

$$\max Q_{p,T} = Q_1 \cdot (1 + \beta \cdot \log T) \cdot \left(1 + \frac{2,66}{A^{0,3}}\right)$$

$$\max Q_{p,T} = 1,80 \cdot A^{0,80} \cdot (1 + 0,8 \cdot \log T) \cdot \left(1 + \frac{2,66}{A^{0,3}}\right)$$

Π.Δ. 696/8-10-1974. Περί αμοιβών μηχανικών δια σύνταξιν μελετών, επίβλεψιν, παραλαβή κ.λ.π. Συγκοινωνιακών, Υδραυλικών και Κτιριακών Έργων, ως και Τοπογραφικών, Κτηματογραφικών και Χαρτογραφικών Εργασιών και σχετικών τεχνικών προδιαγραφών μελετών.



# ΟΡΘΟΛΟΓΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

- Η **ορθολογική μέθοδος** (rational method) χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της αιχμής απορροής μικρών σχετικά υδρολογικών λεκανών (Έκταση λεκάνης απορροής,  $A < 25 \text{ km}^2$ ) (Παπαμιχαήλ, 2001).
- Βασίζεται στην παραδοχή ότι για βροχές με ομοιόμορφη ένταση και κατανομή πάνω στη λεκάνη, η μέγιστη απορροή εμφανίζεται όταν το νερό από όλα τα σημεία της λεκάνης φτάσει στην έξοδο της.
- Η απορροή αυτή αποτελεί ένα συγκεκριμένο ποσοστό της έντασης της βροχής που την προκαλεί.



# ΟΡΘΟΛΟΓΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

Η ορθολογική μέθοδος εκφράζεται από την σχέση:

$$Q = 0.278 * C * i * A$$

όπου:

|                            |  |
|----------------------------|--|
| $Q$ (m <sup>3</sup> /sec): | η αιχμή της απορροής                               |
| $C$ :                      | ο συντελεστής απορροής                             |
| $i$ (mm/h):                | η ένταση της βροχόπτωσης για το χρόνο συγκέντρωσης |
| $A$ (km <sup>2</sup> ) :   | η έκταση της υδρολογικής λεκάνης                   |

Για να φτάσει η πλημμυρική παροχή την μέγιστη αιχμή, πρέπει ο χρόνος βροχόπτωσης πρέπει να είναι ίσος με τον χρόνο συγκέντρωσης της λεκάνης ώστε όλα τα σημεία της λεκάνης να συνεισφέρουν στην απορροής ταυτόχρονα.



# ΟΡΘΟΛΟΓΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

## ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ

- Η ορθολογική μέθοδος έχει αποδειχθεί πολύ χρήσιμη για την εκτίμηση των αιχμών απορροής μικρών λεκανών (Τσακίρης, 1995).
- Στη μέθοδο υπάρχει η παραδοχή ότι η ένταση της βροχής σε όλη τη διάρκεια της είναι ομοιόμορφη, με ομοιόμορφη επίσης κατανομή πάνω στην υδρολογική λεκάνη. Η παραδοχή αυτή προσεγγίζεται στην πραγματικότητα όταν οι υδρολογικές λεκάνες είναι μικρές.
- Ένα άλλο σημείο που πρέπει να προσεχθεί είναι η εκτίμηση της έντασης της βροχής. Για να φτάσουμε στην μέγιστη αιχμή, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, νερό πρέπει να φθάσει στην έξοδο της λεκάνης από όλα τα σημεία της, δηλαδή η διάρκεια της βροχής με την ομοιόμορφη ένταση πρέπει να είναι ίση με το χρόνο συγκέντρωσης,  $t_c$ , της λεκάνης απορροής. Αυτό υποδηλώνει ότι η μέθοδος δεν μπορεί να εφαρμοστεί για διάρκειες βροχής μικρότερες του  $t_c$ .





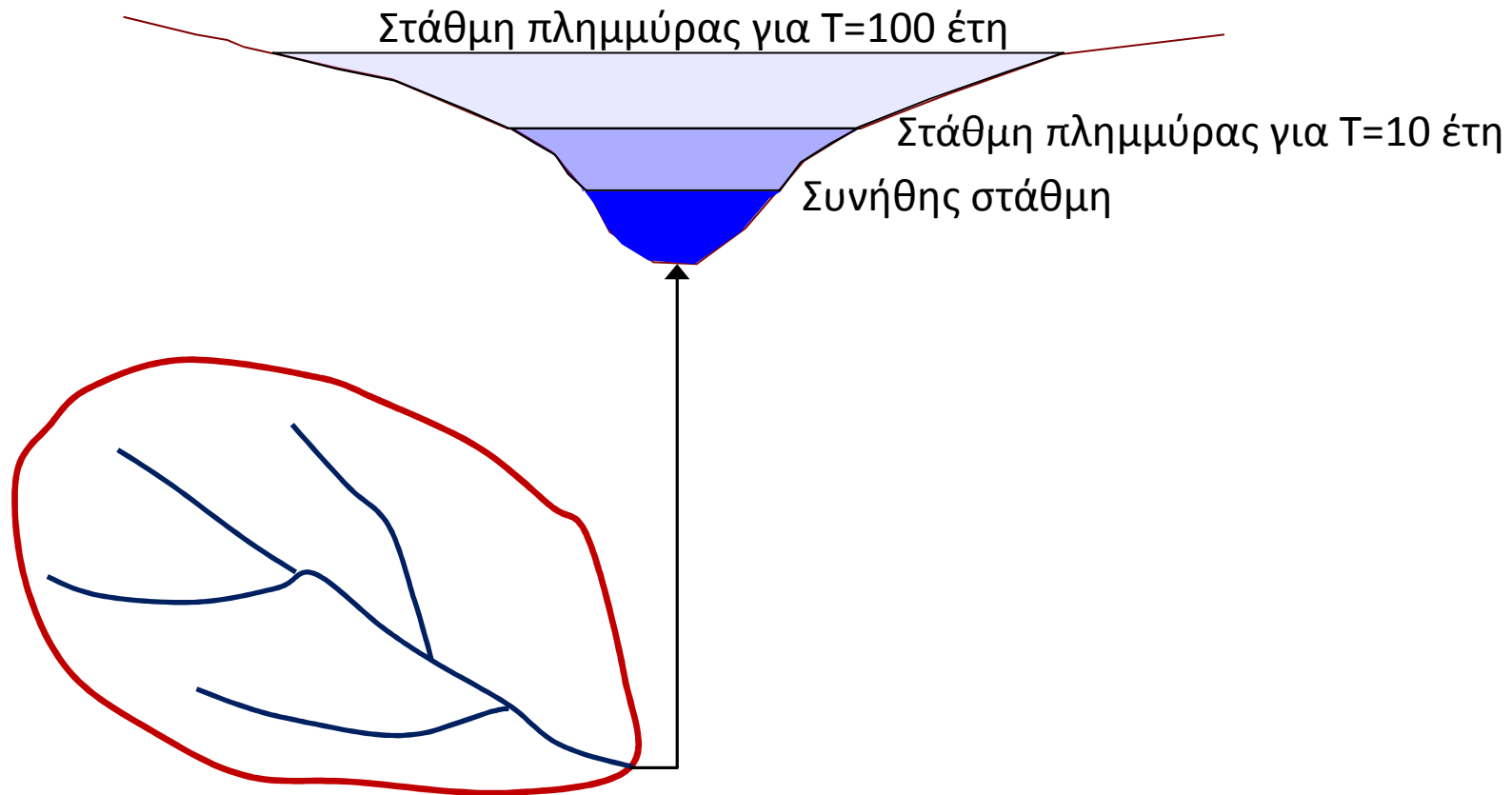
# ΟΡΘΟΛΟΓΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ – RATIONAL METHOD

- **Βήματα Υπολογισμού**
  - Επιλογή Περιόδου Επαναφοράς
  - Υπολογισμός Χρόνου Συγκέντρωσης
  - Σχέσεις Έντασης – Διάρκειας – Συχνότητας Βροχών (IDF Analysis)  
(Όμβριες Καμπύλες – Κατασκευή και χρήση)
  - Υπολογισμός Συντελεστή Απορροής
  - Επιφανειακή Αναγωγή Ομβρίων Καμπυλών και εκτίμηση έντασης βροχής για το χρόνο συγκέντρωσης
  - **Εκτίμηση Πλημμυρικής Αιχμής από την εξίσωση της Ορθολογικής Μεθόδου (και Πλημμυρικού Όγκου-Προσοχή!!!)**



# ΟΡΘΟΛΟΓΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

- Επιλογή Περιόδου Επαναφοράς



# ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ

## Περίοδοι επαναφοράς (έτη) για αντιπλημμυρικά έργα

### ΑΓΩΓΟΙ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΩΝ

Μικρής κυκλοφορίας (5-10)  
Μεσαίας κυκλοφορίας (10-25)  
Μεγάλης κυκλοφορίας (50-100)

### ΓΕΦΥΡΕΣ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΩΝ

Δευτερεύον (10-50)  
Πρωτεύον δίκτυο (50-100)

### ΑΠΟΣΤΡΑΓΓΙΣΗ ΑΓΡΟΤΙΚΩΝ ΕΚΤΑΣΕΩΝ (5-50)

### ΑΠΟΣΤΡΑΓΓΙΣΗ ΠΟΛΕΩΝ

Μικρές πόλεις (2-25)  
Μεγάλες πόλεις (25-50)

### ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΑ

Μικρής (5-10)  
Μεσαίας (10-25)  
Μεγάλης κυκλοφορίας (50-100)

### ΑΝΑΧΩΜΑΤΑ

Σε αγροτικές εκτάσεις (2-50)  
Σε πόλεις (50-200)



# ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ

## Περίοδοι επαναφοράς (έτη) για φράγματα

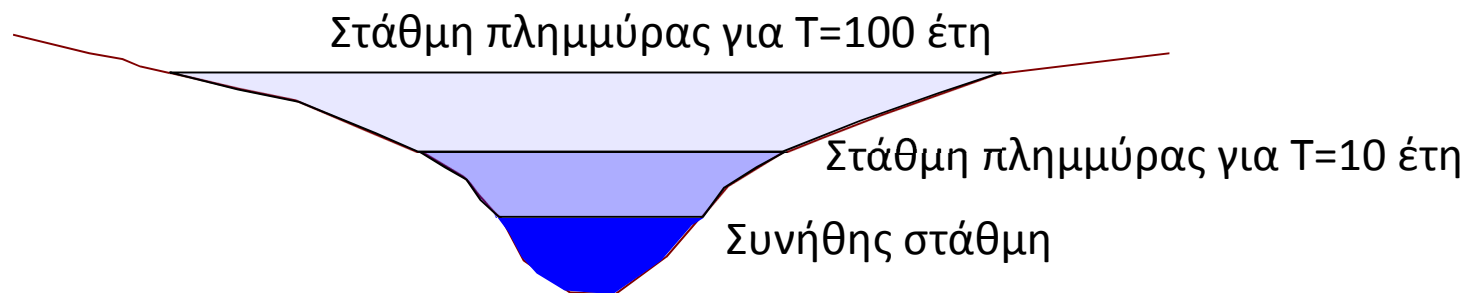
|   | Μικρά     | Μεσαία   | Μεγάλα   |
|---|-----------|----------|----------|
| <b>ΦΡΑΓΜΑΤΑ ΧΑΜΗΛΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ</b><br>(χωρίς πιθανότητα απώλειας ζωής) | 50-100    | >100     | 50-100%* |
| <b>ΦΡΑΓΜΑΤΑ ΜΕΣΑΙΑΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ</b><br>(πιθανή απώλεια ζωής)            | >100      | 50-100%* | 100%*    |
| <b>ΦΡΑΓΜΑΤΑ ΥΨΗΛΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ</b><br>(υψηλή πιθανότητα απώλειας ζώων)  | 50- 100%* | 100%*    | 100%*    |

\* Στην περίπτωση αυτή η πλημμύρα σχεδιασμού εκτιμάται ως ποσοστό της τιμής η οποία προκύπτει από μεθόδους που βασίζονται στον υπολογισμό της πιθανής μέγιστης κατακρήμνισης ή της μέγιστης πιθανής πλημμύρας



# Πιθανοτικό πλαίσιο

## Ανάλυση Διακινδύνευσης



Η πιθανότητα  $R$  να πραγματοποιηθεί μέσα σε  $n$  έτη τιμή που αντιστοιχεί σε περίοδο επαναφοράς  $T$

Πιθανότητα μη υπέρβασης σε ένα έτος:

$$F=1-F_1=(1-1/T)$$

Πιθανότητα μη υπέρβασης σε  $n$  έτη:

$$(1-1/T)^n$$

Πιθανότητα υπέρβασης σε  $n$  έτη

(Διακινδύνευση):

$$R=1-(1-1/T)^n$$

### Παραδείγματα

T=10 έτη

n=10 έτη

$$R=1-(1-1/10)^{10}=0.65=65\%$$

T=1000 έτη

n=100 έτη

$$R=1-(1-1/1000)^{100}=0.095=9.5\%$$

T=5000 έτη

n=100 έτη

$$R=1-(1-1/5000)^{100}=0.02=2\%$$



## Αντιστοιχία περιόδου επαναφοράς πλημμύρας και περιόδου επαναφοράς βροχής σχεδιασμού

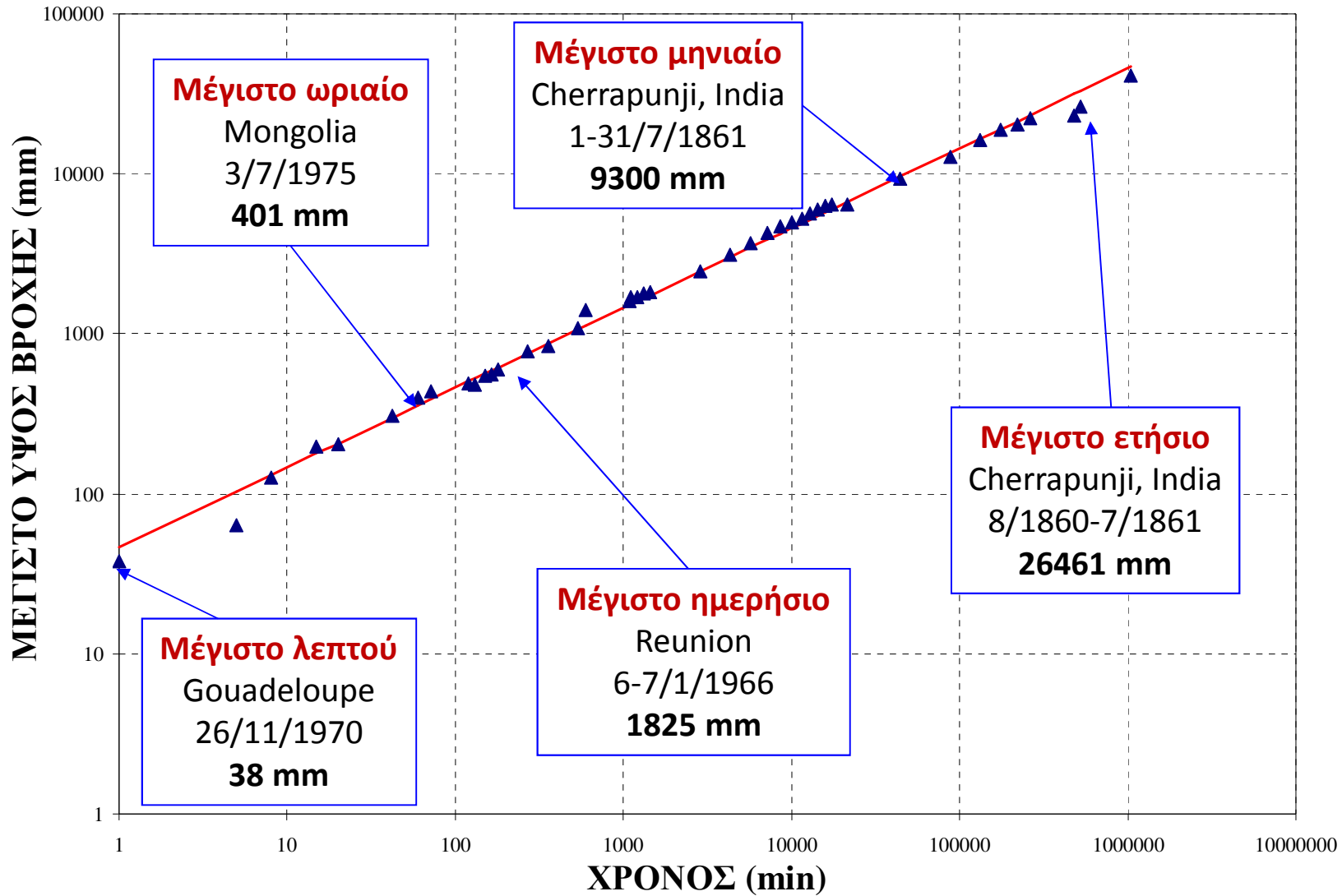
$$T_{\text{πλημμύρας}} \neq T_{\text{βροχόπτωσης}}$$

### Αντιστοιχία περιόδου επαναφοράς πλημμύρας και περιόδου επαναφοράς βροχής σχεδιασμού (σε έτη)

| Περίοδος επαναφοράς πλημμύρας |   |    |    |    |                            |     |     | $(T_{\text{πλημμύρας}})$ |      |
|-------------------------------|---|----|----|----|----------------------------|-----|-----|--------------------------|------|
| 2,33                          | 5 | 10 | 20 | 30 | 50                         | 100 | 250 | 500                      | 1000 |
| Περίοδος βροχής σχεδιασμού    |   |    |    |    | $(T_{\text{βροχόπτωσης}})$ |     |     |                          |      |
| 2                             | 8 | 17 | 35 | 50 | 81                         | 140 | 300 | 520                      | 1000 |

# ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΕΙΣ

## Μέγιστα παρατηρημένα ύψη βροχής



(Πηγή: Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, 2012)



## ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΕΙΣ

## Μέγιστα παρατηρημένα ύψη βροχής

| ΛΕΠΤΑ | ΩΡΕΣ | mm   | ΠΕΡΙΟΧΗ                           | ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ     |
|-------|------|------|-----------------------------------|----------------|
| 1     | 0    | 38   | Barot, Guadeloupe                 | 26 Nov 1970    |
| 5     | 0    | 64   | Haynes Camp, CA USA               | 2 Feb 1976     |
| 8     | 0    | 126  | Fussen, Bavaria                   | 25 May 1920    |
| 15    | 0    | 198  | Plumb Point, Jamaica              | 12 May 1916    |
| 20    | 0    | 206  | Curtea-de-Arges, Romania          | 7 Jul 1889     |
| 42    | 1    | 305  | Holt, USA                         | 22 Jun 1947    |
| 60    | 1    | 401  | Shangdi, Nei Monggol, China       | 3 Jul 1975     |
| 72    | 1    | 440  | Gapj, Gansu, China                | 12 Aug 1985    |
| 120   | 2    | 489  | Yujiawanzi, Inner Mongolia, China | 19 Jul 1975    |
| 130   | 2    | 483  | Rockport, USA                     | 18 Jul 1889    |
| 150   | 3    | 550  | Bainaobao, Hebei, China           | 25 Jun 1932    |
| 165   | 3    | 559  | D'Hanis, USA                      | 31 May 1935    |
| 180   | 3    | 600  | Duan Jiazhuang, Hebei, China      | 28 Jun 1973    |
| 270   | 5    | 782  | Smethport, USA                    | 18 Jul 1942    |
| 360   | 6    | 840  | Muduocaidang, China               | 1 Aug 1977     |
| 540   | 9    | 1087 | Belouve, La Réunion               | 28 Feb 1964    |
| 600   | 10   | 1400 | Muduocaidang, China               | 1 Aug 1977     |
| 1080  | 18   | 1589 | Foc Foc, La Réunion               | 7-8 Jan 1966   |
| 1110  | 19   | 1689 | Belouve, La Réunion               | 28-89 Feb 1964 |
| 1200  | 20   | 1697 | Foc Foc, La Réunion               | 7-8 Jan 1966   |
| 1320  | 22   | 1780 | Foc Foc, La Réunion               | 7-8 Jan 1966   |
| 1440  | 24   | 1825 | Foc Foc, La Réunion               | 7-8 Jan 1966   |

(Πηγή: Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, 2012)





## ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΕΙΣ

## Μέγιστα παρατηρημένα ύψη βροχής

| ΛΕΙΠΑ   | ΩΡΕΣ  | mm    | ΠΕΡΙΟΧΗ               | ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ          |
|---------|-------|-------|-----------------------|---------------------|
| 2880    | 48    | 2467  | Aurere, La Réunion    | 7-9 Apr 1958        |
| 4320    | 72    | 3130  | Aurere, La Réunion    | 6-9 Apr 1958        |
| 5760    | 96    | 3721  | Cherrapunji, India    | 12-15 Sep 1974      |
| 7200    | 120   | 4301  | Commerson, La Réunion | 23-27 Jan 1980      |
| 8640    | 144   | 4653  | Commerson, La Réunion | 22-27 Jan 1980      |
| 10080   | 168   | 5003  | Commerson, La Réunion | 21-27 Jan 1980      |
| 11520   | 192   | 5286  | Commerson, La Réunion | 20-27 Jan 1980      |
| 12960   | 216   | 5692  | Commerson, La Réunion | 19-27 Jan 1980      |
| 14400   | 240   | 6028  | Commerson, La Réunion | 18-27 Jan 1980      |
| 15840   | 264   | 6299  | Commerson, La Réunion | 17-27 Jan 1980      |
| 17280   | 288   | 6401  | Commerson, La Réunion | 16-27 Jan 1980      |
| 21600   | 360   | 6433  | Commerson, La Réunion | 14-28 Jan 1980      |
| 44640   | 744   | 9300  | Cherrapunji, India    | 1-31 Jul 1861       |
| 87840   | 1464  | 12767 | Cherrapunji, India    | Jun-Jul 1861        |
| 131760  | 2196  | 16369 | Cherrapunji, India    | May-Jul 1861        |
| 175680  | 2928  | 18738 | Cherrapunji, India    | Apr-Jul 1861        |
| 219600  | 3660  | 20412 | Cherrapunji, India    | Apr-Aug 1861        |
| 263520  | 4392  | 22454 | Cherrapunji, India    | Apr-Sep 1861        |
| 483120  | 8052  | 22990 | Cherrapunji, India    | Jan-Nov 1861        |
| 525600  | 8760  | 26461 | Cherrapunji, India    | Aug 1860 - Jul 1861 |
| 1051200 | 17520 | 40768 | Cherrapunji, India    | 1860 - 1861         |

**Φεβρουάριος 2007.** Στο νησί La Reunion (σταθμός Commerson) κατά τη διάρκεια του κυκλώνα Gamede μετρήθηκαν σε 24 ώρες 1625 mm, σε 48 ώρες 2463 mm, σε 72 ώρες 3929 mm, σε 96 ώρες 4869 mm και σε 8 ημέρες 5510 mm.

Πηγή: <http://www.meteo.fr>

(Πηγή: Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, 2012)



# ΟΡΘΟΛΟΓΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

- Σχέσεις Έντασης – Διάρκειας – Συχνότητας Βροχών (IDF Analysis)

Όμβριες Καμπύλες – Κατασκευή και χρήση



# ΟΡΘΟΛΟΓΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

## Όμβριες Καμπύλες

- ❑ Προσαρμόζεται μία στατιστική κατανομή ακραίων τιμών π.χ. EVI (Gumbel) (βλ. Θεματική Ενότητα 3 και 4). Η κατανομή εφαρμόζεται σε κάθε διάρκεια ξεχωριστά. Εξετάζεται αν η κατανομή προσαρμόζεται επαρκώς στα δεδομένα.
- ❑ Κατασκευή διαγράμματος Ύψους – Διάρκειας – Συχνότητας βροχόπτωσης. Για κάθε διάρκεια γίνεται εκτίμηση της βροχόπτωσης για περιόδους επαναφοράς 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500 και 1000 χρόνια. Οι τιμές αυτές για όλους τους σταθμούς τοποθετούνται σε ένα διάγραμμα με άξονα τετμημένων τη διάρκεια και τεταγμένων τη βροχόπτωση. Ενώνονται με καμπύλες τα σημεία που αντιστοιχούν στην ίδια περίοδο επαναφοράς.



# ΟΡΘΟΛΟΓΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

## Όμβριες Καμπύλες

- ❑ Οι αναλυτικές σχέσεις μεταξύ της έντασης της βροχόπτωσης και της διάρκειας για δεδομένη περίοδο επαναφοράς  $T$  της μορφής :

$$i = \frac{kT^\alpha}{(D + b)^m}$$

$i$  : ένταση βροχόπτωσης (mm/h),  $D$  : διάρκεια της βροχής (h),  $\alpha, k, b, m$  : σταθερές.

- ❑ Η απόκτηση των σχέσεων για πολλές περιόδους επαναφοράς δίνουν τις όμβριες καμπύλες ( $i, D, T$ ).

- ❑ Οι όμβριες καμπύλες είναι ευθείες σε διπλό λογαριθμικό χαρτί με παράμετρο το  $T$  και άξονες  $i$  και  $(D+b)$ .

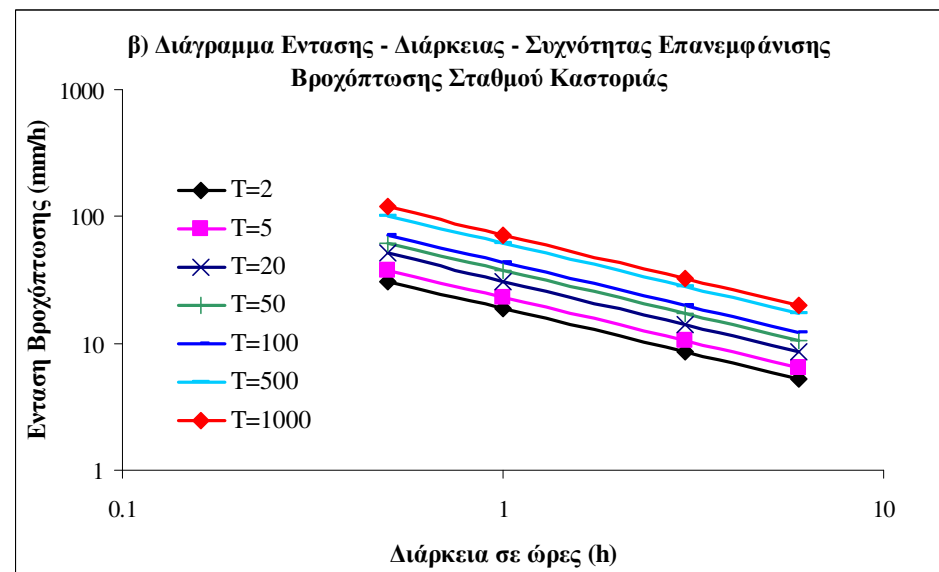
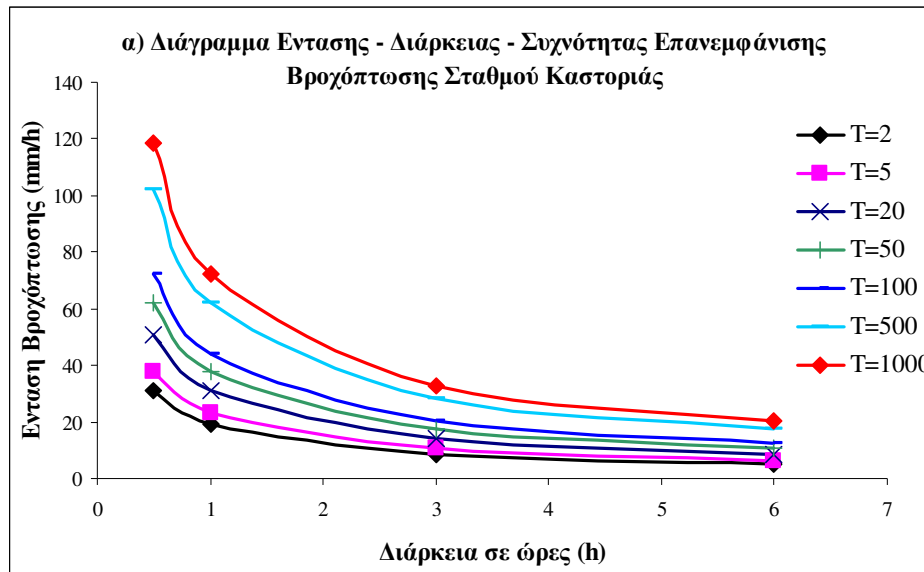
$$\log i = \log(kT^\alpha) - m \log(D + b)$$



# ΟΡΘΟΛΟΓΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

## Καμπύλες έντασης – διάρκειας – συχνότητας βροχόπτωσης (Intensity-Duration-Frequency, IDF curves)

Όμβριες καμπύλες διάρκειας – έντασης βροχοπτώσεων, για διάφορες περιόδους επαναφοράς, του σταθμού Καστοριάς: α) κοινό γραμμικό διάγραμμα, και β) λογαριθμικό διάγραμμα.



$$i = \frac{kT^\alpha}{(D+b)^m}$$

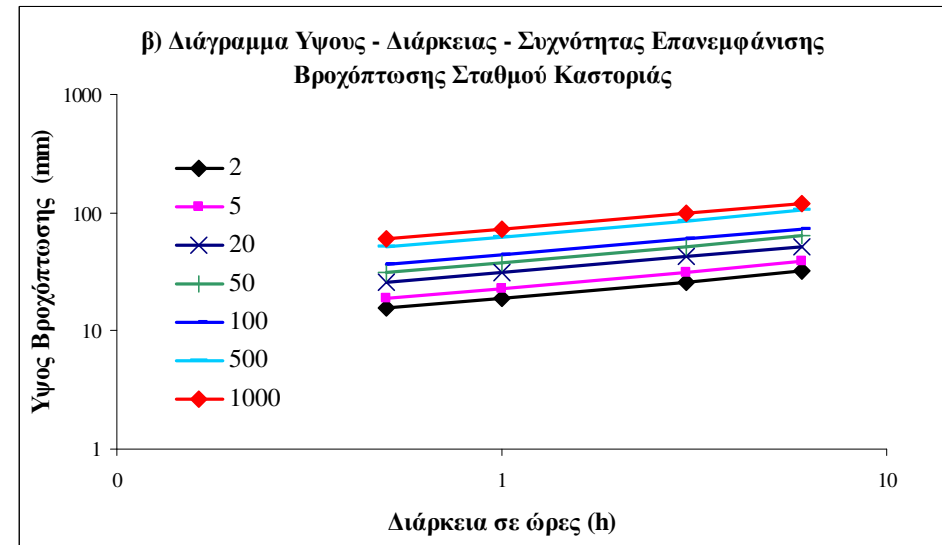
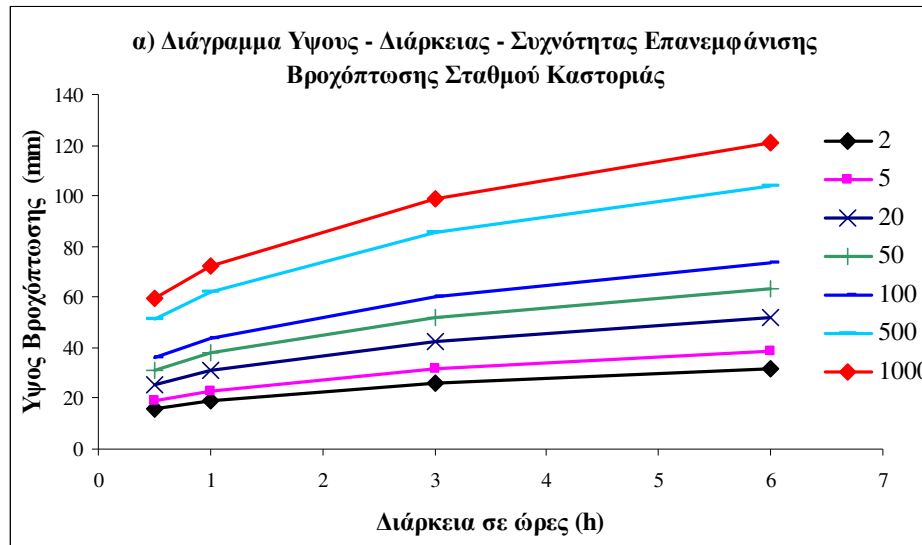
$$i = \frac{16.31851 * T^{0.2155}}{D^{0.714}}$$



# ΟΡΘΟΛΟΓΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

## Καμπύλες ύψους – διάρκειας – συχνότητας βροχόπτωσης (Depth-Duration-Frequency, DDF curves)

Όμβριες καμπύλες διάρκειας – ύψους βροχοπτώσεων, για διάφορες περιόδους επαναφοράς, του σταθμού Καστοριάς: α) κοινό γραμμικό διάγραμμα, και β) λογαριθμικό διάγραμμα.



$$P = kT^{\alpha} (D + b)^{(1-m)}$$

$$P = 16.31851 * T^{0.2155} * D^{0.286}$$



# Υπολογισμός Χαρακτηριστικών Χρόνων Υδρογραφήματων

- **Χρόνος συγκέντρωσης (*time of concentration*)**
- **Χρόνος υστέρησης (*lag time*)**
- **Χρόνος ανόδου του υδρογραφήματος (ή χρόνος αιχμής του υδρογραφήματος) (*time to peak*)**

Gericke, O.J., and J.C. Smithers, 2014. Review of methods used to estimate catchment response time for the purpose of peak discharge estimation, *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 59, Iss. 11, 1935-1971.



# Υπολογισμός Χρόνου Συγκέντρωσης

- Εξίσωση Giandotti:

$$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{H_{mref} - H_{ref}}}$$

όπου:

$t_c$  = ο χρόνος συγκέντρωσης της λεκάνης απορροής σε ώρες (h)

$A$  = η έκταση της λεκάνης σε km<sup>2</sup>

$L$  = το μέγιστο μήκος του υδατορρεύματος της λεκάνης σε km

$H_{mref}$  = το μέσο υψόμετρο της λεκάνης ανάντη του σημείου αναφοράς σε m

$H_{ref}$  = το υψόμετρο πυθμένα στην εξεταζόμενη περιοχή σε m

Giandotti, M. 1934. Previsione delle piene e delle magre dei corsi d'acqua. *Istituto Poligrafico dello Stato*, 8: 107-117.





# Υπολογισμός Χρόνου Συγκέντρωσης

- Εξίσωση Kirpich:

Ο Kirpich (1940) παρουσίασε μία από τις πρωταρχικές έρευνες πάνω στον χρόνο συγκέντρωσης λεκανών απορροής. Χρησιμοποίησε δεδομένα από έξη μικρές λεκάνες απορροής στον Tennessee , ΗΠΑ , με έκταση από 0.0051 έως 0.433 km<sup>2</sup>, και ανέπτυξε μια γραφική συσχέτιση του  $L/\sqrt{S_s}$  με τον χρόνο συγκέντρωσης. Ο Kirpich πρότεινε ότι οι καμπύλες μπορούν να είναι εφαρμόσιμες για μικρές γεωργικές λεκάνες απορροής με έκταση από 0.003 έως 0.5 km<sup>2</sup>. Βασισμένοι στα δεδομένα του Kirpich και σε άλλα δεδομένα, οι Rowe και Thomas (1942) δημιούργησαν την παρακάτω εξίσωση:

$$t_c = 0.000325 \left( \frac{L}{\sqrt{S_s}} \right)^{0.77}$$

όπου:

$t_c$  = ο χρόνος συγκέντρωσης της λεκάνης απορροής σε ώρες (h)

$L$  = το μήκος κεντρικής κοίτης σε m

$S_s$  = κλίση κεντρικής κοίτης (αδιάστατος αριθμός)

Kirpich, Z.P., 1940. Time of concentration of small agricultural watersheds. *Civil Engineering*, 10 (6), 362.



# Υπολογισμός Χρόνου Συγκέντρωσης

- Εξίσωση των Papadakis και Kazan:

Οι Papadakis & Kazan (1987) ανέλυσαν δεδομένα από 84 αγροτικές λεκάνες απορροής με έκταση μικρότερη από 5 km<sup>2</sup> και πειραματικά δεδομένα από το Σώμα μηχανικών του Αμερικάνικου στρατού, Πανεπιστήμιο του Colorado και του Illinois, Urbana-Champaign. Σε σύνολο 375 σημειακά δεδομένα αναλύθηκαν και μια εξίσωση παλινδρόμησης προσαρμόστηκε σε αυτά με αποτέλεσμα ο χρόνος συγκέντρωσης να λάβει την εξής μορφή:

$$t_c = 2.154 \left[ \frac{n^{0.52} L^{0.5}}{i^{0.38} S^{0.31}} \right]$$

όπου:

$t_c$  = ο χρόνος συγκέντρωσης της λεκάνης απορροής σε ώρες (h)

$L$  = το μέγιστο μήκος του υδατορρεύματος σε km

$S$  = κλίση κεντρικής κοίτης του υδατορρεύματος (m/m )

$i$  = ένταση βροχής για διάρκεια ίση με  $t_c$  (mm/h)

$n$  = Συντελεστής τραχύτητας του Manning  
(Manning's roughness parameter)

Papadakis, K.N. and Kazan, M.N., 1987. Time of concentration in small rural watersheds. In: *Proceedings of the ASCE engineering hydrology symposium*. Williamsburg, VA: ASCE, 633–638.



# Υπολογισμός Χρόνου Υστέρησης

- Εξίσωση του Chow:

Ως μέρος ενός προγράμματος για την ανάπτυξη μιας μεθόδου για τον υπολογισμό πλημμυρών σχεδιασμού στο Illinois, ΗΠΑ, ο Chow (1962) ανέλυσε δεδομένα από 20 λεκάνες απορροής του Illinois, Ohio, Missouri, Wisconsin, Indiana, Iowa και της Nebraska, με έκταση από 0.012 έως 18.5 km<sup>2</sup>. Ανέπτυξε την εξής εξίσωση:

$$t_1 = 0.00116 \left( \frac{L}{\sqrt{S_s}} \right)^{0.64}$$

όπου:

$t_1$  = ο χρόνος υστέρησης σε ώρες (h)

$L$  = το μήκος κεντρικής κοίτης σε m

$S_s$  = κλίση κεντρικής κοίτης του υδατορρέυματος (m/m)

Αυτή η εξίσωση μέχρι τώρα δεν είναι το ίδιο διαδεδομένη με την εξίσωση του Kirpich παρά το γεγονός ότι στηρίζεται σε δεδομένα λεκανών απορροής με μεγαλύτερο εύρος έκτασης και σε διάφορες γεωγραφικές περιοχές.

Chow, V.T., 1964. Runoff. In: V.T. Chow, ed. *Handbook of applied hydrology*. New York: McGraw-Hill, Ch. 14, 1–54.



# Υπολογισμός Χρόνου Υστέρησης

- Εξίσωση του Natural Environment Research Council (NERC):

Στις εκθέσεις για την έρευνα των πλημμυρών (Natural Environment Research Council, 1975), αναπτύχθηκε η παρακάτω εξίσωση όπου χρησιμοποιείται για λεκάνες απορροής χωρίς δεδομένα (μετεωρολογικά , υδρομετρικά) στην Αγγλία:

$$t_1 = 2.8 \left( \frac{L}{\sqrt{S_s}} \right)^{0.47}$$

όπου:

$t_1$  = ο χρόνος υστέρησης σε ώρες (h)

$L$  = το μήκος κεντρικής κοίτης σε km

$S_s$  = κλίση κεντρικής κοίτης του υδατορρεύματος (m/km)

NERC (Natural Environmental Research Council), 1975. *Flood studies report*. London: Natural Environment Research Council.



# Υπολογισμός Χρόνου Υστέρησης

- Τροποποιημένη εξίσωση Snyder:

Σε έρευνα σε λεκάνες απορροής στα Απαλάχια όρη, ο Snyder (1938) ανακάλυψε ότι ο χρόνος υστέρησης λεκάνης απορροής είναι συνάρτηση του μεγέθους και του σχήματος της λεκάνης. Η εξίσωση η οποία πρότεινε ο Snyder τροποποιήθηκε από το σώμα των Πολιτικών Μηχανικών του στρατού της Αμερικής (Linsley et al., 1988) και πήρε την εξής μορφή:

$$t_1 = C_b \left( \frac{LL_c}{\sqrt{S_s}} \right)^{0.38}$$

όπου:

$t_1$  = ο χρόνος υστέρησης σε ώρες (h)

$L$  = το μέγιστο μήκος κεντρικής κοίτης σε km

$L_c$  = το μήκος της κεντρικής κοίτης από το κέντρο βάρους της λεκάνης μέχρι την έξοδο της σε km

$S_s$  = κλίση κεντρικής κοίτης του υδατορρέυματος (m/m)

$C_b$  = συντελεστής που εξαρτάται από την μέση αντίσταση του νερού μέσα στο υδρογραφικό δίκτυο

Snyder, F.F., 1938. Synthetic unit hydrographs. *Transactions, American Geophysical Union*, 19, 447.

Linsley, R.K., Kohler, M.A., and Paulhus, J.L.H., 1988. In: S.I. Metric ed. *Hydrology for engineers*. Singapore: McGraw-Hill.



# Υπολογισμός Χρόνου Υστέρησης

- Εξίσωση Watt & Chow:

Οι Watt & Chow (1985) ανέπτυξαν μια εξίσωση για τον χρόνο υστέρησης λεκάνης απορροής χρησιμοποιώντας δεδομένα από 44 λεκάνες απορροής από τον Καναδά και τις ΗΠΑ. Η εξίσωση αναπτύχθηκε από δεδομένα λεκανών απορροής με έκταση από 0.01 έως 5840 km<sup>2</sup> και με κλίση κεντρικής κοίτης που κυμαίνεται μεταξύ 0.00121 και 0.0978. Η εξίσωση έχει την παρακάτω μορφή:

όπου:

$$t_1 = 0.000326 \left( \frac{L}{\sqrt{S_s}} \right)^{0.79}$$

$t_1$  = ο χρόνος υστέρησης σε ώρες (h)  
 $L$  = το μήκος κεντρικής κοίτης σε m  
 $S_s$  = κλίση κεντρικής κοίτης του υδατορρεύματος (m/m)

Watt, W.E. and Chow, K.C.A., 1985. A general expression for basin lag time. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 12, 294–300.



# Υπολογισμός Χρόνου Υστέρησης

- Εξίσωση Aron et al.:

Ο Aron και συνεργάτες (1991) ανέπτυξαν μια εξίσωση για τον χρόνο υστέρησης χρησιμοποιώντας δυναμικές κινηματικού κύματος και συγκεκριμένες υποθέσεις. Προσδιόρισαν την επιφανειακή ροή ως τον κύριο μηχανισμό παραγωγής απορροής και χρησιμοποίησαν την Ορθολογική μέθοδο για την ανάπτυξη της εξίσωσης:

$$t_1 = 0.93 \left( \frac{k^{5/12} n^{3/4} L^{7/12}}{c^{1/2} i_e^{1/4} S_s^{3/8}} \right)$$

όπου, το  $t_1$  είναι σε min, το  $L$  σε m, το  $S_s$  είναι αδιάστατο, το  $i_e$  είναι σε  $m m^{-1}$ , ο συντελεστής της μορφής της λεκάνης  $k = L/A^{3/5}$  είναι σε  $m^{-1/5}$ , όπου το  $A$  είναι σε  $m^2$ , και ο συντελεστής του σχήματος του καναλιού,  $c$ , εξαρτάται από το λόγο βάθος – πλάτος.

Aron, G., Ball, J. E. & Smith, T. A. (1991) Fractal concept used in time of concentration estimates. *J. Irrig. Drain. Engng. Div. ASCE* 117(5), 635-641.



# Υπολογισμός Χρόνου Ανόδου του υδρογραφήματος

Σε μερικές μεθοδολογίες είναι απαραίτητο να προσδιορισθεί ο **χρόνος ανόδου του υδρογραφήματος** ή ο χρόνος που μεσολαβεί από την αρχή ανόδου του υδρογραφήματος μέχρι την χρονική στιγμή εμφάνισης της μέγιστης παροχής,  $t_p$  (**χρόνος αιχμής του υδρογραφήματος**).

- Για λεκάνες που δεν διαθέτουν δεδομένα βροχής-απορροής, το  $t_p$  μπορεί να υπολογισθεί από τον χρόνο συγκέντρωσης,  $t_c$ , με τον εμπειρικό τύπο του Mockus (1957) (βλ. Παπαμιχαήλ, 2001):

$$t_p = 0,60 \cdot t_c + \sqrt{t_c}$$

$$\text{Χρόνος υστέρησης, } t_l = 0,50 - 0,6t_c$$

Mockus, V., 1957. *Use of storm and watershed characteristics in synthetic hydrograph analysis and application*. Washington, DC: USDA SCS.





# ΟΡΘΟΛΟΓΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

## Χρόνος συγκέντρωσης

- **Χρόνος συγκέντρωσης,  $t_c$** , μιας λεκάνης απορροής ορίζεται ως ο χρόνος που χρειάζεται το νερό να διανύσει την απόσταση από το πιο απομακρυσμένο σημείο της λεκάνης (ακολουθώντας το υδρογραφικό δίκτυο) έως το σημείο εξόδου του κυρίου υδατορρεύματος.
- Για τον υπολογισμό του χρόνου συγκέντρωσης, στη περίπτωση που δεν υπάρχουν δεδομένα βροχής-απορροής, διάφορες εμπειρικές σχέσεις έχουν προταθεί όπως π.χ. η σχέση του Kirpich, οι σχέσεις του Mockus, και η σχέση του Giandotti.
- Για τον Ελλαδικό χώρο, για τον υπολογισμό του χρόνου συγκέντρωσης ο τύπος του Giandotti (Τσακίρης, 1995) χρησιμοποιείται όπως ορίζει το Π.Δ. 696/74 (αρθ. 187, § 3) για απλές υδρολογικές λεκάνες με φυσική κοίτη ακανόνιστης διατομής.

Π.Δ. 696/8-10-1974. *Περί αμοιβών μηχανικών δια σύνταξιν μελετών, επίβλεψιν, παραλαβή κ.λ.π. Συγκοινωνιακών, Υδραυλικών και Κτιριακών Έργων, ως και Τοπογραφικών, Κτηματογραφικών και Χαρτογραφικών Εργασιών και σχετικών τεχνικών προδιαγραφών μελετών.*



# ΟΡΘΟΛΟΓΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

## Εμπειρικές σχέσεις χρόνου συγκέντρωσης

### Giandotti

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

- $t_c$  (h) χρόνος συγκέντρωσης  
 $A$  (km<sup>2</sup>) έκταση της λεκάνης  
 $L$  (km) το μήκος του κυρίου υδατορεύματος  
 $\Delta H$  (m) η διαφορά του μέσου υψομέτρου λεκάνης από το υψόμετρο στην έξοδο

### Kirpich

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

- $t_c$  (min) χρόνος συγκέντρωσης  
 $L$  (m) το μέγιστο μήκος διαδρομής του νερού στη λεκάνη  
 $S$  η κλίση ανάμεσα στο υψηλότερο σημείο της λεκάνης και την έξοδο

### Soil Conservation Service (SCS)

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

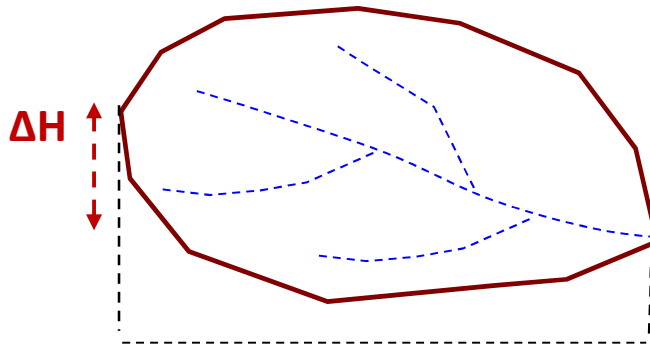
- $t_c$  (h) χρόνος συγκέντρωσης  
 $L$  (ft) το μήκος του κυρίου υδατορεύματος  
 $H$  (ft) η υψομετρική διαφορά μεταξύ του πλέον απομακρυσμένου σημείου της λεκάνης και της εξόδου



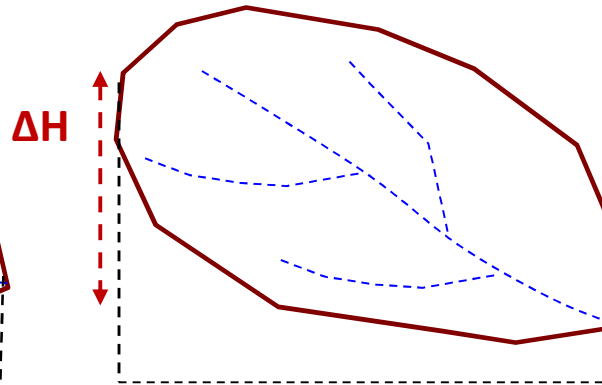
# Φυσικό πλαίσιο

## Επίδρασή του χρόνου συγκέντρωσης στα χαρακτηριστικά πλημμύρας

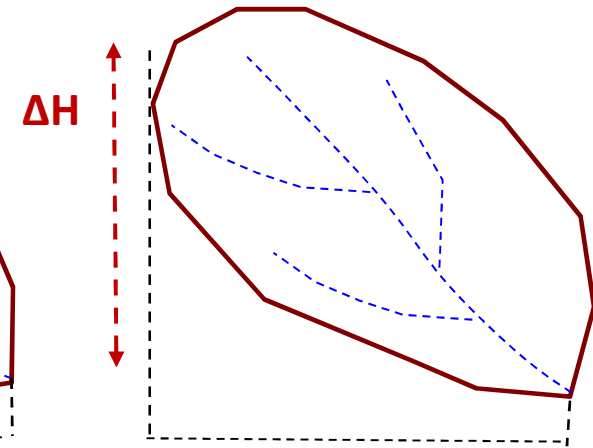
Μικρή κλίση  
Μεγάλος χρόνος  
συγκέντρωσης



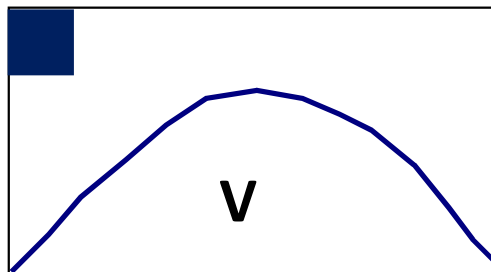
Μέτρια κλίση  
Μέτριος χρόνος  
συγκέντρωσης



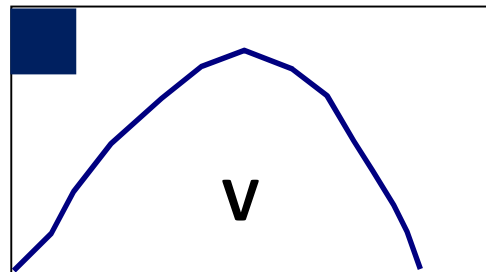
Μεγάλη κλίση  
Μικρός χρόνος  
συγκέντρωσης



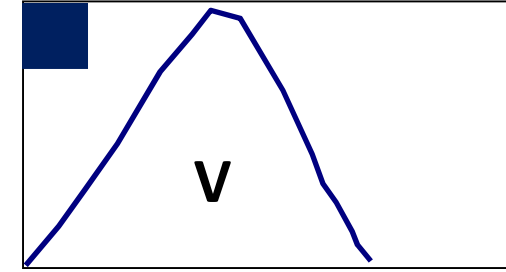
Βροχή ← Χρόνος συγκέντρωσης →



Βροχή ← Χρόνος συγκέντρωσης →



Βροχή ← Χρόνος συγκέντρωσης →

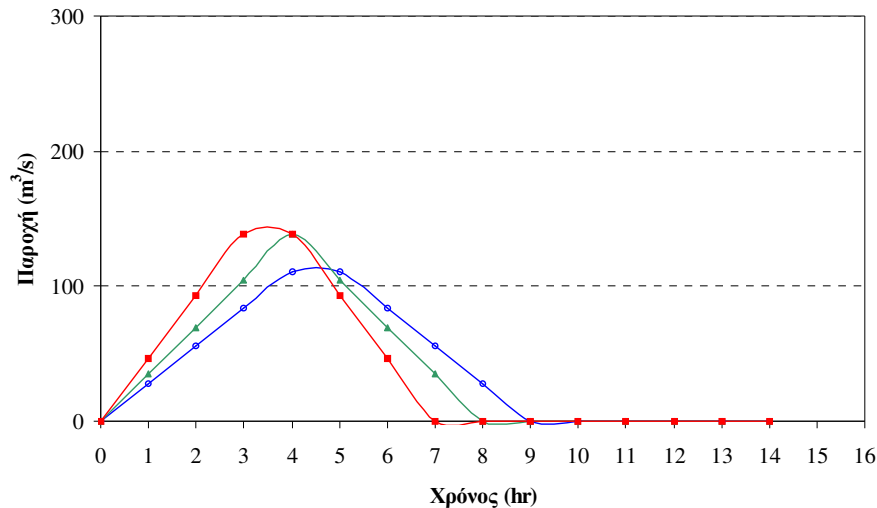


# Φυσικό πλαίσιο

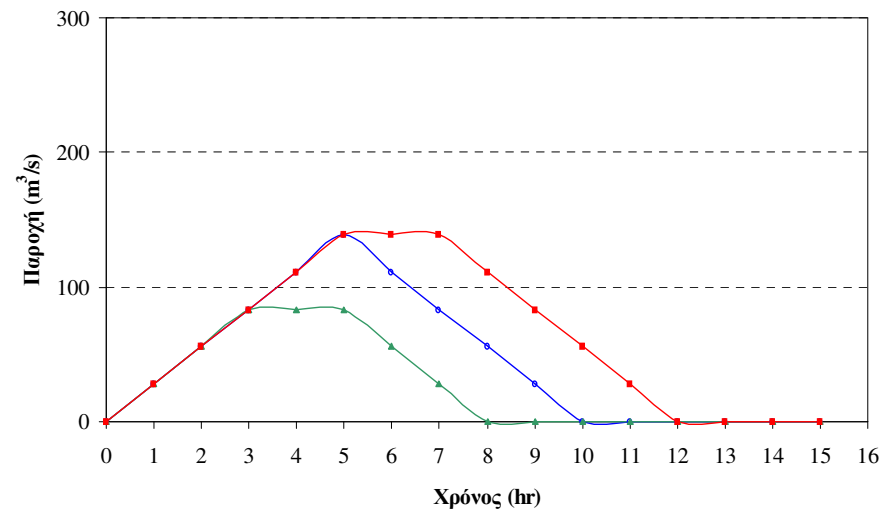
## Επίδρασή του χρόνου συγκέντρωσης και της διάρκειας βροχής στα χαρακτηριστικά πλημμύρας

|                                   |     |                                   |     |
|-----------------------------------|-----|-----------------------------------|-----|
| ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ              | 0,5 | ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ              | 0,5 |
| ΕΝΤΑΣΗ ΒΡΟΧΗΣ (mm/h)              | 10  | ΕΝΤΑΣΗ ΒΡΟΧΗΣ (mm/h)              | 10  |
| ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΒΡΟΧΗΣ (h)               | 4   | ΕΚΤΑΣΗ ΛΕΚΑΝΗΣ (km <sup>2</sup> ) | 100 |
| ΕΚΤΑΣΗ ΛΕΚΑΝΗΣ (km <sup>2</sup> ) | 100 | ΧΡΟΝΟΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ (h)           | 5   |

**Χρόνοι συγκέντρωσης: 3, 4, 5 h**  
**Πλημμυρικοί όγκοι: 2.0 hm<sup>3</sup>**



**Διάρκεια βροχής: 3, 5, 7 h**  
**Πλημμυρικοί όγκοι: 2.5, 3.5, 4.5 hm<sup>3</sup>**



(Πηγή: Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, 2012)



# Φυσικό πλαίσιο

## Επίδρασή του χρόνου συγκέντρωσης στα χαρακτηριστικά πλημμύρας

Έκταση: 20 km<sup>2</sup>

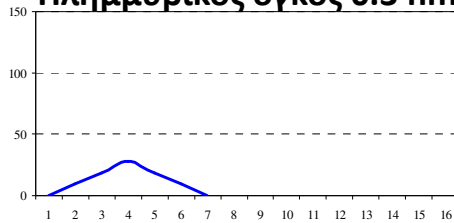
Χρόνος συγκέντρωσης: 3 h

Συντελεστές απορροής: 0.5

Ένταση βροχής: 10 mm/h

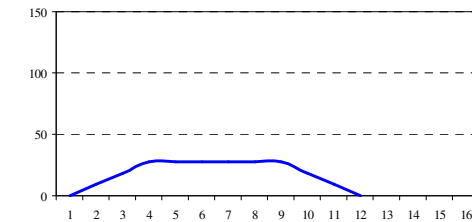
Διάρκεια βροχής 3 h

Πλημμυρικός όγκος 0.3 hm<sup>3</sup>

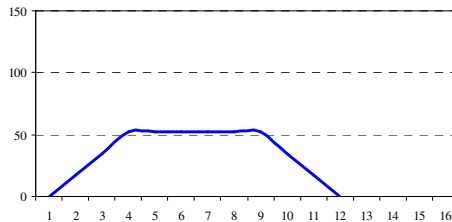


Διάρκεια βροχής 8 h

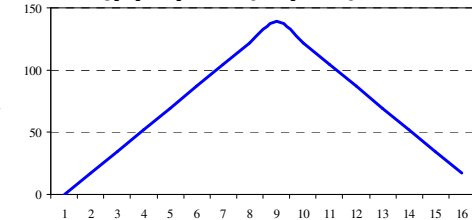
Πλημμυρικός όγκος 0.8 hm<sup>3</sup>



Πλημμυρικός όγκος 1.5 hm<sup>3</sup>



Πλημμυρικός όγκος 4.0 hm<sup>3</sup>



Έκταση: 100 km<sup>2</sup>

Χρόνος συγκέντρωσης : 8 h

(Πηγή: Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, 2012)



# ΟΡΘΟΛΟΓΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

## Υπολογισμός του συντελεστή απορροής

- Ο συντελεστής απορροής,  $C$ , πρέπει να επιλέγεται με βάση τους ακόλουθους παράγοντες:
  - 1) Το ανάγλυφο της επιφάνειας της λεκάνης απορροής
  - 2) Την έκταση και την πυκνότητα της φυτοκάλυψης
  - 3) Την κλίση των πρανών της λεκάνης απορροής
  - 4) Τη σύσταση του επιφανειακού εδάφους
  - 5) Την περιεχόμενη στο έδαφος υγρασία κατά την έναρξη της βροχής
  - 6) Την κλίση του κύριου ρεύματος της λεκάνης
  - 7) Την αποθήκευση νερού στην επιφάνεια του εδάφους
  - 8) Την ένταση της βροχής



# ΟΡΘΟΛΟΓΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

## Υπολογισμός του συντελεστή απορροής

Ο συντελεστής απορροής εκτιμάται σύμφωνα με την ΟΜΟΕ-ΑΣΥΕΟ (2002) από το άθροισμα των επιμέρους συντελεστών **C1, C2, C3, C4** ( $C=C1+C2+C3+C4$ ) οι οποίοι εξαρτώνται αντίστοιχα από:

ΥΠΕΧΩΔΕ, ΓΓΔΕ, 2002. Οδηγίες Μελετών Οδικών Έργων (ΟΜΟΕ). Τεύχος 8: Αποχέτευση - Στράγγιση Υδραυλικά Έργα Οδών (ΟΜΟΕ - ΑΣΥΕΟ).

1. το ανάγλυφο της επιφάνειας της λεκάνης
  2. τη διηθητικότητα του εδάφους
  3. την έκταση και την πυκνότητα της φυτοκάλυψης
  4. την κλίση των πρανών και την αποθηκευτική ικανότητα σε χαμηλά σημεία της επιφάνειας της λεκάνης απορροής
- Οι τιμές των επιμέρους συντελεστών παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα (Πηγή: ΟΜΟΕ-ΑΣΥΕΟ, 2002). Δεδομένου ότι οι τιμές του πίνακα ισχύουν για περιόδους επαναφοράς 5-10 έτη ο τελικός συντελεστής απορροής θα πρέπει να προσαυξάνεται κατά 10% για T=25 έτη, κατά 20% για T=50 έτη και κατά 25% για T=100 έτη παραμένοντας πάντως μικρότερος της μονάδας
  - Δεδομένου ο συντελεστής απορροής εξαρτάται (εκτός από τους προηγούμενους παράγοντες) από την εδαφική υγρασία κατά την έναρξη της βροχής και την ένταση της βροχόπτωσης συμπεραίνεται ότι δεν παραμένει σταθερός για την ίδια λεκάνη



|           | <b>Τιμές του συντελεστή απορροής C (ΟΜΟΕ-ΑΣΥΕΟ, 2002)</b>  |  |  |  |
|-----------|--|--|--|--|
|           | <b>Ακραίες</b>   | <b>Υψηλές</b>  | <b>Συνήθειες</b>   | <b>Χαμηλές</b>   |
| <b>C1</b> | <b>0,28 – 0,35</b><br>επικλινές, ανώμαλες επιφάνειες με μέσες κλίσεις >30%   | <b>0,14 – 0,20</b><br>λοφώδες με μέσες κλίσεις 10 – 30 %   | <b>0,14 – 0,20</b><br>κυματώδες με μέσες κλίσεις 5 – 10 %  | <b>0,08 – 0,14</b><br>σχετικά επίπεδο με μέσες κλίσεις 0 – 5 %   |
| <b>C2</b> | <b>0,12 – 0,16</b><br>με επηρεαζόμενο κάλυμμα εδάφους, είτε βραχώδες είτε μανδύας λεπτόκκοκου εδάφους αμελητέας διηθητικότητας | <b>0,08 – 0,12</b><br>βραδείας διηθητικότητας, άργιλοι ή αβαθή παχιά εδάφη χαμηλής διηθητικότητας, ατελώς ή πολύ μικρής αποστραγγιστικότητας         | <b>0,06 – 0,08</b><br>κανονικής διηθητικότητας καλά αποστραγγιζόμενο μικρής ή μεσσίας μακροϋφής εδάφη, αμμώδη παχιά εδάφη, ίλυες και ιλυώδη εδάφη  | <b>0,04 – 0,06</b><br>υψηλής διηθητικότητας βαθιά άμμος ή άλλο έδαφος που απορροφά το νερό, πολύ ελαφριά καλά αποστραγγιζόμενα εδάφη           |
| <b>C3</b> | <b>0,12 – 0,16</b><br>βλάστηση που δεν επηρεάζει, γυμνό ή πολύ αραιά κάλυψη  | <b>0,08 – 0,12</b><br>πτωχή έως μέτρια, καθαρές καλλιέργειες ή πτωχής φυσικής κάλυψης, λιγότερο από 20% της αποχετευόμενης επιφάνειας με καλή κάλυψη | <b>0,06 – 0,08</b><br>μέτρια ως καλή περίπου 50% της επιφάνειας είναι καλή φυτική γη ή δασώδες, λιγότερο από 50% της επιφάνειας είναι καλλιέργειες | <b>0,04 – 0,06</b><br>καλή έως άριστη περίπου 90% της αποχετευόμενης επιφάνειας είναι καλή φυτική γη, δασώδες ή ισοδύναμης κάλυψης             |
| <b>C4</b> | <b>0,10 – 0,12</b><br>αμελητέες ταπεινώσεις εδάφους και αβαθείς, μικροί διάδρομοι αποστράγγισης, καθόλου τέλματα               | <b>0,08 – 0,10</b><br>χαμηλή, καλά οριζόμενο σύστημα διαδρόμων αποστράγγισης, όχι λιμνάζοντα νερά ή τέλματα  | <b>0,06 – 0,08</b><br>κανονική, σημαντικές επιφανειακές ταπεινώσεις, λιμνάζοντα νερά και τέλματα   | <b>0,04 – 0,06</b><br>υψηλή, αποθηκευτικότητα, σύστημα αποστράγγισης όχι καλά οριζόμενο, μεγάλος αριθμός πλημμυριζόμενων επιφανειών ή τελμάτων |



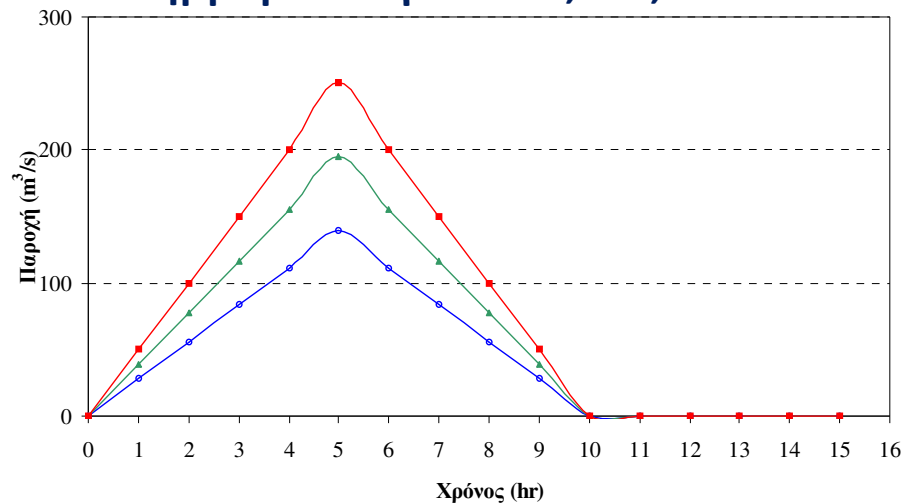


# Φυσικό πλαίσιο

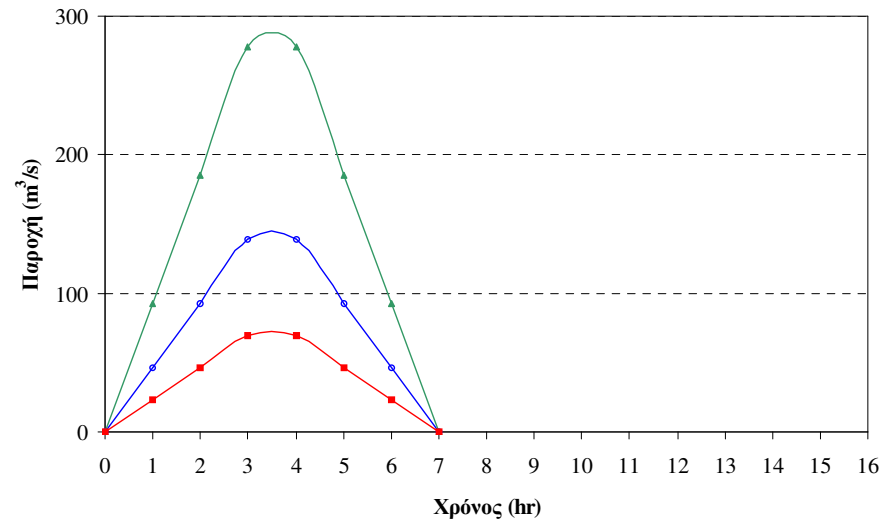
## Επίδρασή του συντελεστή απορροής και της έντασης βροχής στα χαρακτηριστικά πλημμύρας

|                                   |     |                                   |     |
|-----------------------------------|-----|-----------------------------------|-----|
| ΕΝΤΑΣΗ ΒΡΟΧΗΣ (mm/h)              | 10  | ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ              | 0.5 |
| ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΒΡΟΧΗΣ (h)               | 5   | ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΒΡΟΧΗΣ (h)               | 5   |
| ΕΚΤΑΣΗ ΛΕΚΑΝΗΣ (km <sup>2</sup> ) | 100 | ΕΚΤΑΣΗ ΛΕΚΑΝΗΣ (km <sup>2</sup> ) | 100 |
| ΧΡΟΝΟΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ (h)           | 5   | ΧΡΟΝΟΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ (h)           | 5   |

**Συντελεστές απορροής: 0.5, 0.7, 0.9**  
**Πλημμυρικοί όγκοι: 2.5, 3.5, 4.5 hm<sup>3</sup>**



**Εντάσεις βροχής: 5, 10, 20 mm/h**  
**Πλημμυρικοί όγκοι: 1, 2, 4 hm<sup>3</sup>**



(Πηγή: Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, 2012)



# ΟΡΘΟΛΟΓΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

## *Επιφανειακή αναγωγή όμβριων καμπυλών*

- Οι όμβριες καμπύλες που έχουμε ως τώρα αναπτύξει αναφέρονται σε **σημειακή ένταση βροχής**. Στην υδρολογική εφαρμογή ωστόσο χρειάζονται πάντα οι επιφανειακές μέσες εντάσεις για τη λεκάνη απορροής που μελετάται και όχι οι σημειακές εντάσεις. Κατά συνέπεια είναι απαραίτητη η αναγωγή τους σε επιφανειακές εντάσεις.
- Η αναγωγή επιτυγχάνεται με τον πολλαπλασιασμό επί ενός συντελεστή επιφανειακής αναγωγής  $\varphi$  (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος 1999).



# ΟΡΘΟΛΟΓΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

## *Επιφανειακή αναγωγή όμβριων καμπυλών*

- Ο συντελεστής αυτός έχει τις ακόλουθες, εμπειρικά διαπιστωμένες ιδιότητες:
  - 1) είναι πάντα μικρότερος από 1
  - 2) είναι φθίνουσα συνάρτηση της έκτασης
  - 3) είναι αύξουσα συνάρτηση της διάρκειας βροχής
  - 4) εξαρτάται σε κάποιο βαθμό από την περίοδο επαναφοράς (αύξηση της περιόδου επαναφοράς οδηγεί σε ασθενή μείωση του συντελεστή  $\phi$ ).
- Για τον υπολογισμό του συντελεστή  $\phi$  :

**A** : η έκταση της λεκάνης (km<sup>2</sup>)

**D** : η διάρκεια της βροχής (h) =  $t_c$

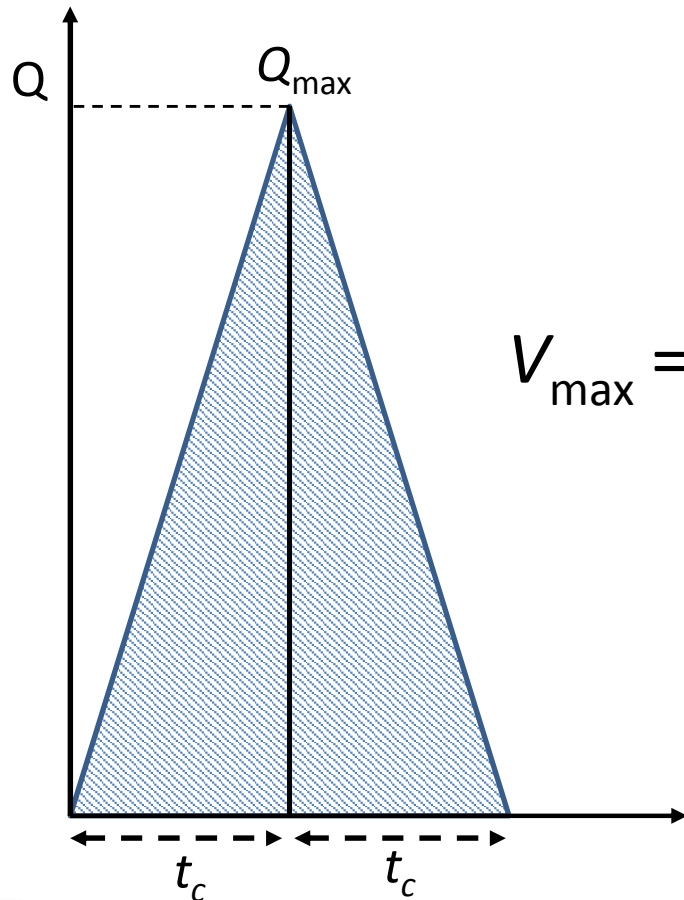
$$\phi = 1 - \frac{0.048A^{0.36-0.01\ln A}}{D^{0.35}} \geq 0.25$$



# ΟΡΘΟΛΟΓΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

- Εκτίμηση Πλημμυρικής Αιχμής και Πλημμυρικού Όγκου

Το τριγωνικό υδρογράφημα της ορθολογικής μεθόδου



$$V_{\max} = \frac{1}{2} * (2t_c) * Q_{\max} = Q_{\max} * t_c = 0.278 * C * I * A * t_c$$



# ΟΡΘΟΛΟΓΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

- Εκτίμηση Πλημμυρικής Αιχμής και Πλημμυρικού Όγκου

❖ Τελικά το  $Q$  δίνεται από τη σχέση:

$$Q_{\max} = 0.278 * C * i * A$$

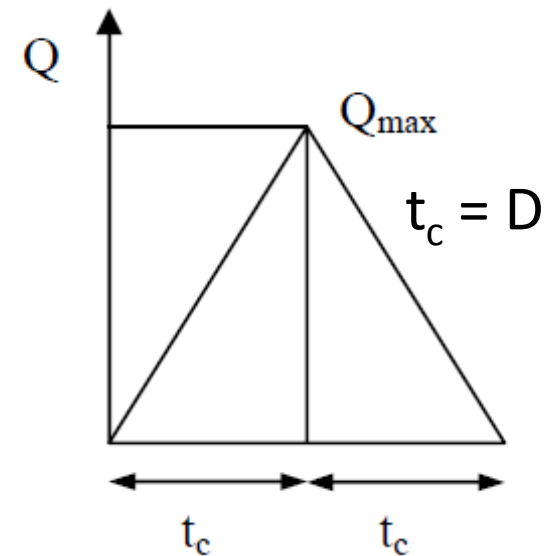
$i$  : Ένταση της βροχόπτωσης (mm/h)

$A$  : Εμβαδό λεκάνης απορροής (km<sup>2</sup>)

$Q$  : Παροχή αιχμής (m<sup>3</sup>/s)

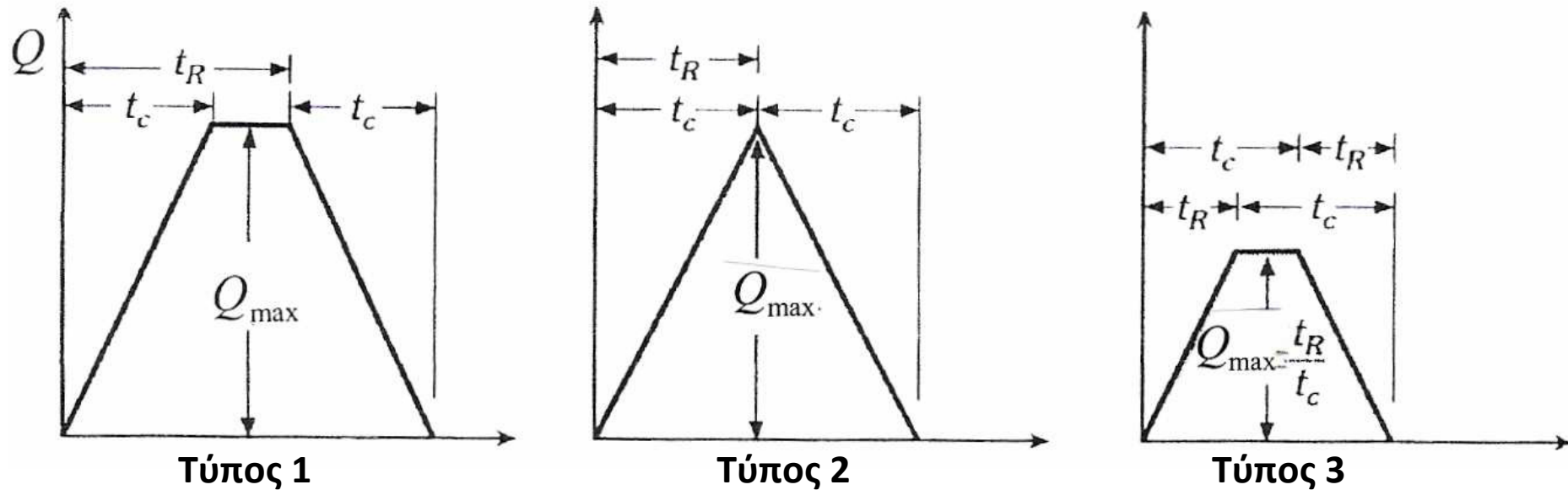
❖ Τελικός όγκος βροχόπτωσης:

$$V = Q_{\max} * t_c$$



# ΟΡΘΟΛΟΓΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

- Εκτίμηση Πλημμυρικής Αιχμής και Πλημμυρικού Όγκου  
Τύποι υδρογραφημάτων της ορθολογικής μεθόδου



**Τύπος 1:** Η διάρκεια περισσεύματος βροχής είναι μεγαλύτερη του χρόνου συγκέντρωσης ( $t_R > t_c$ ). Ο ανοδικός και καθοδικός κλάδος είναι ίσος με τον χρόνο συγκέντρωσης  $t_c$

**Τύπος 2:** Η διάρκεια βροχής είναι ίση με τον χρόνο συγκέντρωσης ( $t_R = t_c$ ). Ο ανοδικός και καθοδικός κλάδος είναι ίσος με τον χρόνο συγκέντρωσης  $t_c$

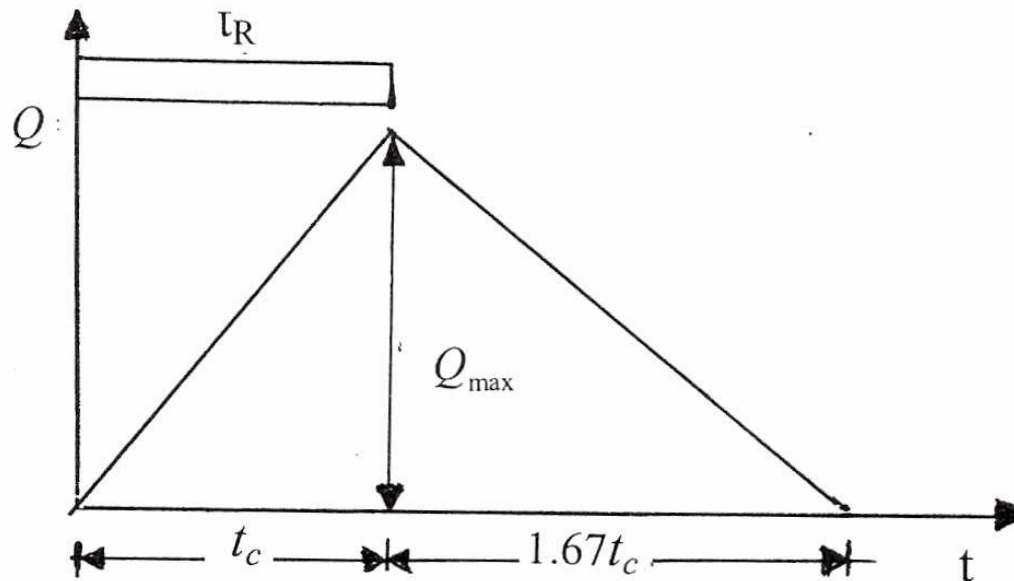
**Τύπος 3:** Η διάρκεια περισσεύματος βροχής είναι μικρότερη του χρόνου συγκέντρωσης ( $t_R < t_c$ ). Ο ανοδικός και καθοδικός κλάδος είναι ίσος με την διάρκεια  $t_R$



# ΟΡΘΟΛΟΓΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

- Εκτίμηση Πλημμυρικής Αιχμής και Πλημμυρικού Όγκου

Υδρογράφημα άμεσης απορροής της ορθολογικής μεθόδου σύμφωνα με τη μέθοδο SCS



- Παραλλαγή του ορθολογικού τύπου αποτελεί ο τύπος της SCS που προκύπτει αν το αρχικό τριγωνικό υδρογράφημα δεν είναι ισοσκελές αλλά έχει διάρκεια ανιόντος σκέλους  $t_c$  και κατιόντος σκέλους  $1.67t_c$ . Η μέγιστη παροχή προκύπτει:

$$Q_{max} = 0.208 * C * i * A$$



# ΟΡΘΟΛΟΓΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

- Η εφαρμογή της ορθολογικής μεθόδου υπερεκτιμά την τιμή του πλημμυρικού όγκου, γιατί θεωρεί ένα απλό τριγωνικό υδρογράφημα πλημμυρικής απορροής του οποίου η χρονική βάση παραμένει σταθερή και ίση με  $2t_c$  για όλες τις περιόδους επαναφοράς.





# ΣΥΝΟΛΙΚΟΣ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ

## Πλημμύρα Σχεδιασμού

1. Αντιστοίχιση περιόδου επαναφοράς πλημμύρας σχεδιασμού ( $T_{\text{πλημμύρας}}$ ) με την περίοδο επαναφοράς καταιγίδας σχεδιασμού ( $T_{\text{βροχόπτωσης}}$ ) ( $T_{\text{πλημμύρας}} \neq T_{\text{βροχόπτωσης}}$ ) ή υπόθεση ( $T_{\text{πλημμύρας}} = T_{\text{βροχόπτωσης}}$ )
2. Εκτίμηση κρίσιμης διάρκειας καταιγίδας σχεδιασμού,  $D$ :  
**Sherman (1949)**
  - i) Για λεκάνες με έκταση,  $A > 2500 \text{ km}^2$ ,  $12 \text{ h} \leq D \leq 24 \text{ h}$
  - ii) Για λεκάνες με έκταση,  $250 \text{ km}^2 \leq A \leq 2500 \text{ km}^2$ ,  $6 \text{ h} \leq D \leq 12 \text{ h}$
  - iii) Για λεκάνες με έκταση,  $50 \text{ km}^2 \leq A \leq 250 \text{ km}^2$ ,  $2 \text{ h} \leq D \leq 6 \text{ h}$
  - iv) Για λεκάνες με έκταση,  $A < 50 \text{ km}^2$ ,  $D \approx \frac{1}{3} t_c$  εως  $\frac{1}{4} t_c$**Linsley et al. (1949)**  $D \approx \frac{1}{4} t_c$   
**U.S. Army Corps of Engineers (1948)**  
Για λεκάνες με έκταση,  $A \leq 250 \text{ km}^2$ ,  $D \approx \frac{1}{2} t_c$
3. Εφαρμογή Όμβριων Καμπυλών με εισαγωγικά δεδομένα  $T_{\text{βροχόπτωσης}}$  και  $D$



# ΣΥΝΟΛΙΚΟΣ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ

## Πλημμύρα Σχεδιασμού

4. Επιφανειακή αναγωγή ύψους βροχόπτωσης
5. Χρονική κατανομή καταιγίδας σχεδιασμού (εφαρμογή μεθόδων τριγωνικού βροχογραφήματος, SCS, εναλλασόμενων υψών βροχής, δυσμενέστερου συνδυασμού)
6. Εφαρμογή Μοναδιαίου Υδρογραφήματος (ΜΥΓ) όταν υπάρχουν δεδομένα βροχόπτωσης-απορροής, ή Συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος (ΣυνΜΥΓ) ή/και Στιγμιαίου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος (ΣΜΥ) όταν δεν υπάρχουν δεδομένα βροχόπτωσης-απορροής
7. Εκτίμηση Υδρογραφήματος Πλημμύρας Σχεδιασμού:
  - i. *Εκτίμηση Μέγιστης Παροχής Πλημμύρας Σχεδιασμού*
  - ii. *Εκτίμηση Όγκου Πλημμύρας Σχεδιασμού*
  - iii. *Εκτίμηση Διάρκειας Πλημμύρας Σχεδιασμού*



# Βιβλιογραφία

Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. 2012. «Πλημμύρες-Εκτίμηση πλημμυρικών αιχμών», Διαφάνειες του μαθήματος «Τεχνική Υδρολογία»

[http://users.itia.ntua.gr/nikos/hydrology/EduMaterial/ydr\\_ombr\\_12.pdf](http://users.itia.ntua.gr/nikos/hydrology/EduMaterial/ydr_ombr_12.pdf)

Κουτσογιάννης, Δ., και Θ. Ξανθόπουλος. «Τεχνική Υδρολογία», Έκδοση 3, 418 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1999.

Κουτσογιάννης, Δ. «Στατιστική Υδρολογία», Έκδοση 4, 312 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1997.

Μιμίκου, Μ.Α. και Ε.Α. Μπαλτάς. «Τεχνική Υδρολογία», Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 5<sup>η</sup> Έκδοση, 2012.

Παπαμιχαήλ, Δ.Μ. «Τεχνική Υδρολογία Επιφανειακών Υδάτων», Εκδόσεις Γιαχούδη-Γιαπούδη, 2001.

Τσακίρης, Γ. «Υδατικοί Πόροι Ι. Τεχνική Υδρολογία», Εκδόσεις Συμμετρία, 1995.



# Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.

