



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

## *Διόδευση πλημμύρας*

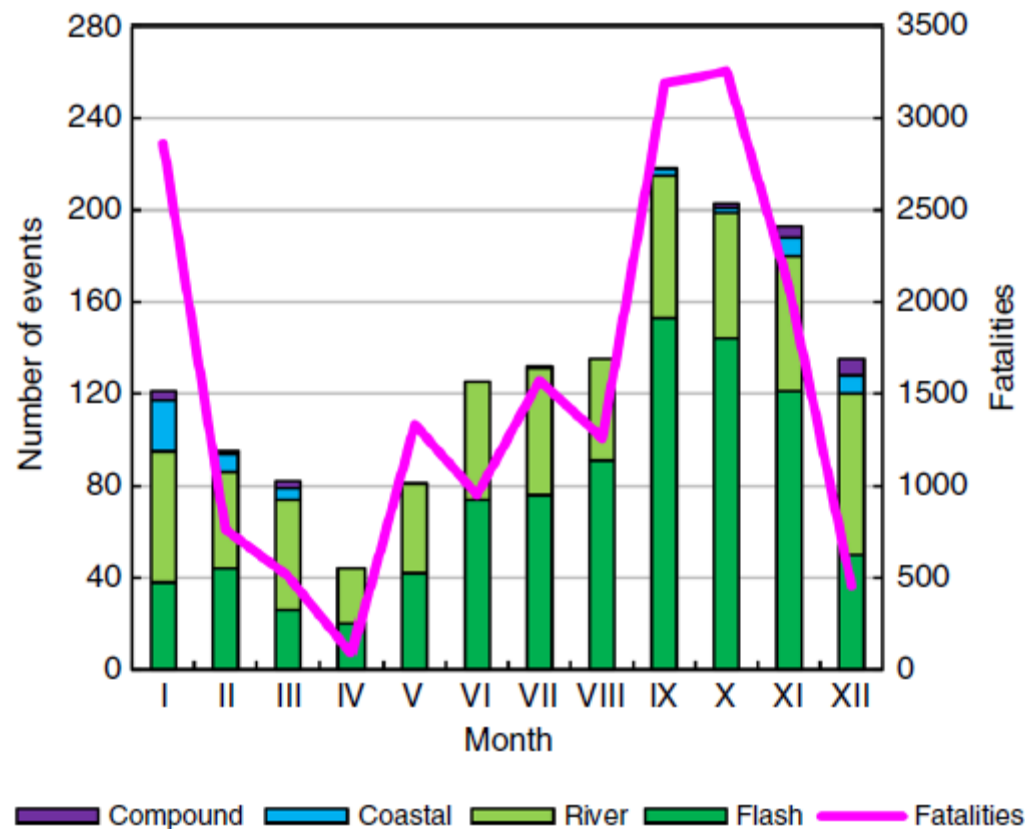
Δρ. Βασίλης Μπέλλος

# Πλημμύρες

- Προσωρινή κάλυψη από νερό εδάφους το οποίο, υπό φυσιολογικές συνθήκες, δεν καλύπτεται από νερό
- Πολλαπλοί μηχανισμοί
  - Υπερχείλιση ποταμού → fluvial scale
  - Άμεση βροχόπτωση → pluvial flooding
  - Αστοχία τεχνικού έργου → θραύση φράγματος
  - Παράκτια ζώνη → παλιρροιακό κύμα
  - Συνδυαστικά γεγονότα → compound events
- Χρονική διάσταση
  - Βραδεία απόκριση
  - Μέση απόκριση
  - Ταχεία απόκριση → flash floods

# Αιτίες πλημμύρας

Ευρώπη 1870-2016



Πηγή: Paprotny, D., Sebastian, A., Morales-Napoles, O., Jonkman, S.N. (2018). Trends in flood losses in Europe over the past 150 years. Nature Communications, 9, 1985.

# Πλημμυρικό πεδίο

- **Φυσικό περιβάλλον**

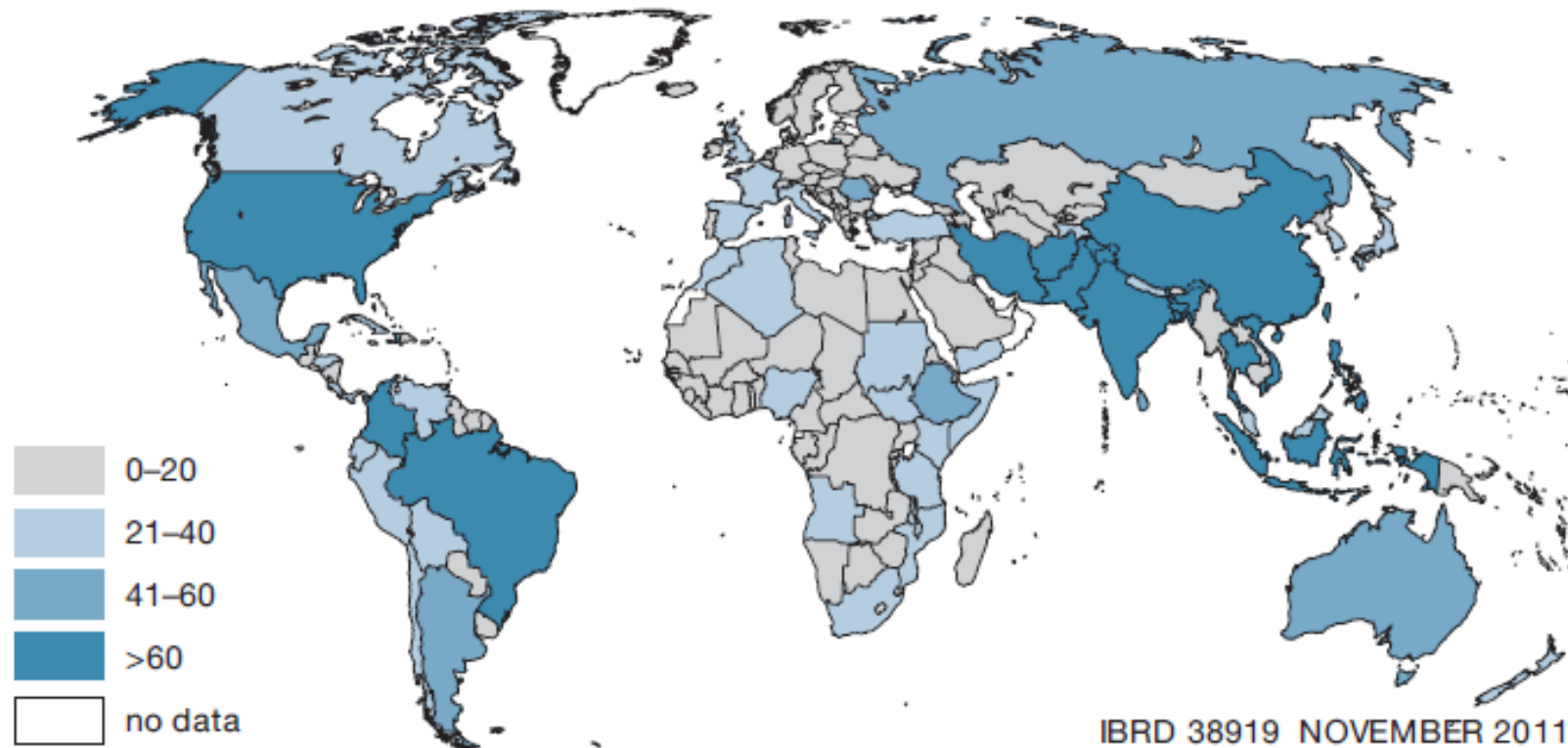
- Όλοι οι μηχανισμοί
- Όχι τόσο συνηθισμένη η πλημμύρα λόγω άμεσης βροχόπτωσης

- **Αστικό περιβάλλον**

- Όλοι οι μηχανισμοί
- Κυρίως πλημμύρες λόγω άμεσης βροχόπτωσης
- Πλημμύρες ταχείας απόκρισης

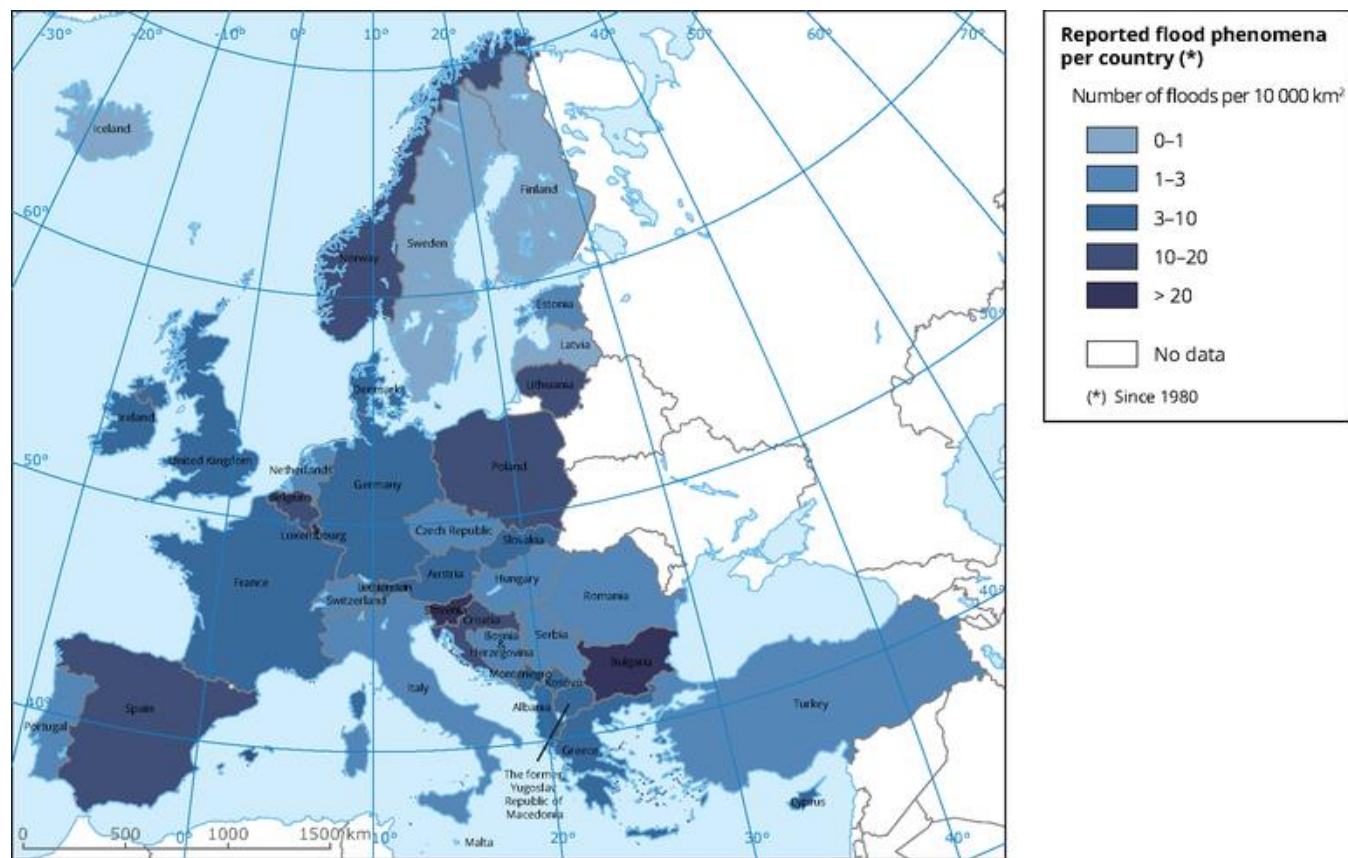
# Πλημμυρικά γεγονότα

1970-2011



**Πηγή:** Jha, K.A., Bloch, R., Lamond, J. (2012). Cities and Flooding: A guide to integrated urban flood risk management for the 21st century. The World Bank Publications.

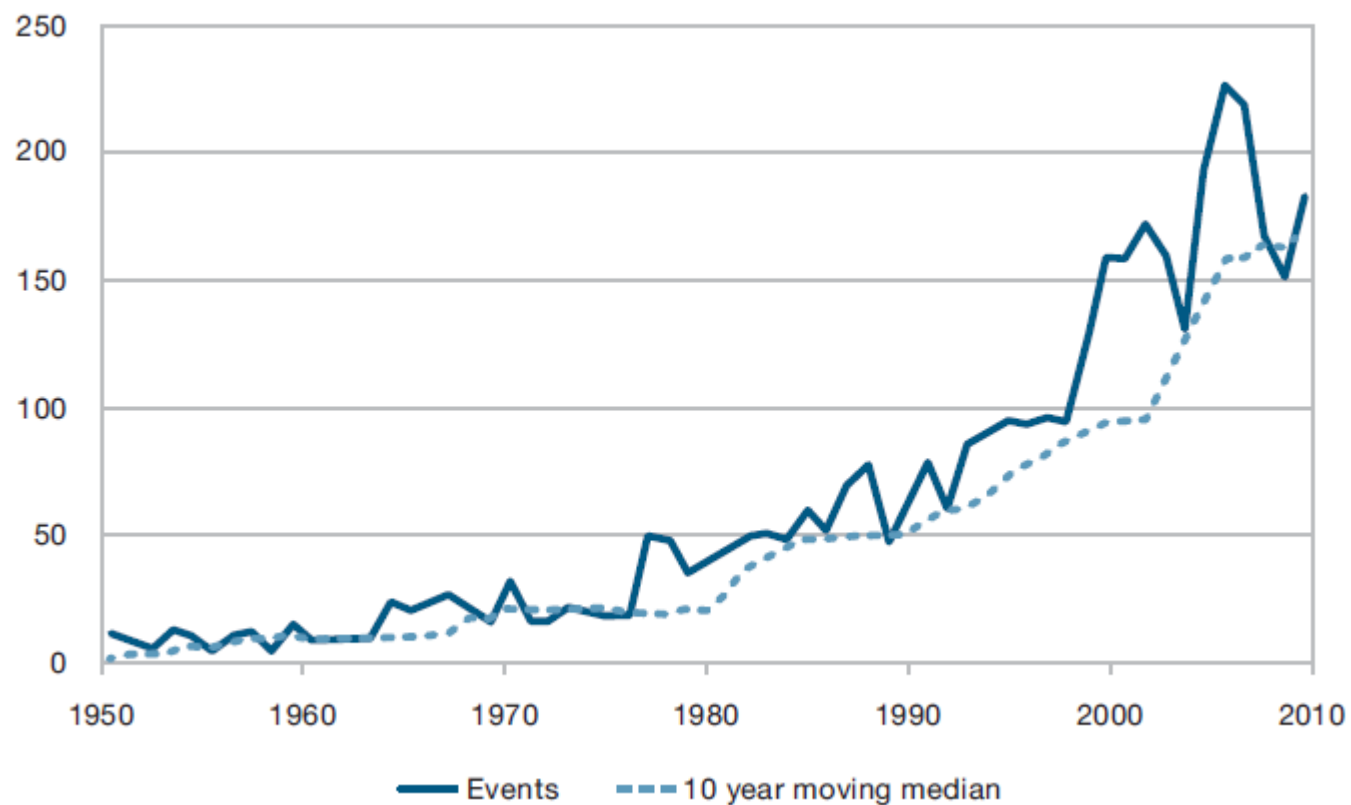
# Πλημμυρικά γεγονότα 1980-2015



Πηγή: European Environmental Agency ([www.eea.europa.eu](http://www.eea.europa.eu)).

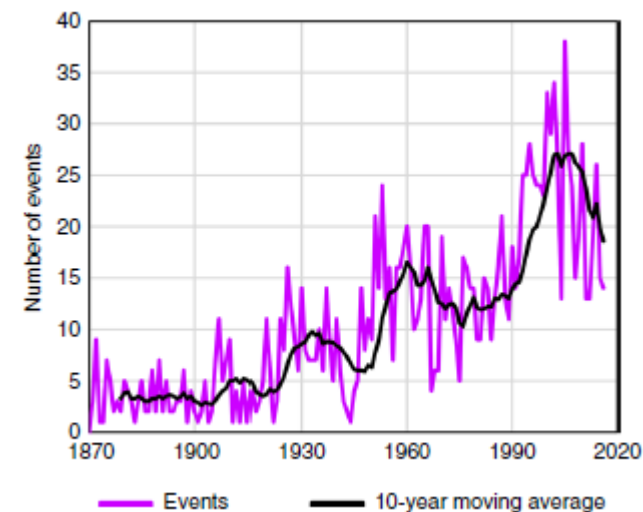
# Πλημμυρικά γεγονότα

*παγκόσμια*



**Πηγή:** Jha, K.A., Bloch, R., Lamond, J. (2012). Cities and Flooding: A guide to integrated urban flood risk management for the 21st century. The World Bank Publications.

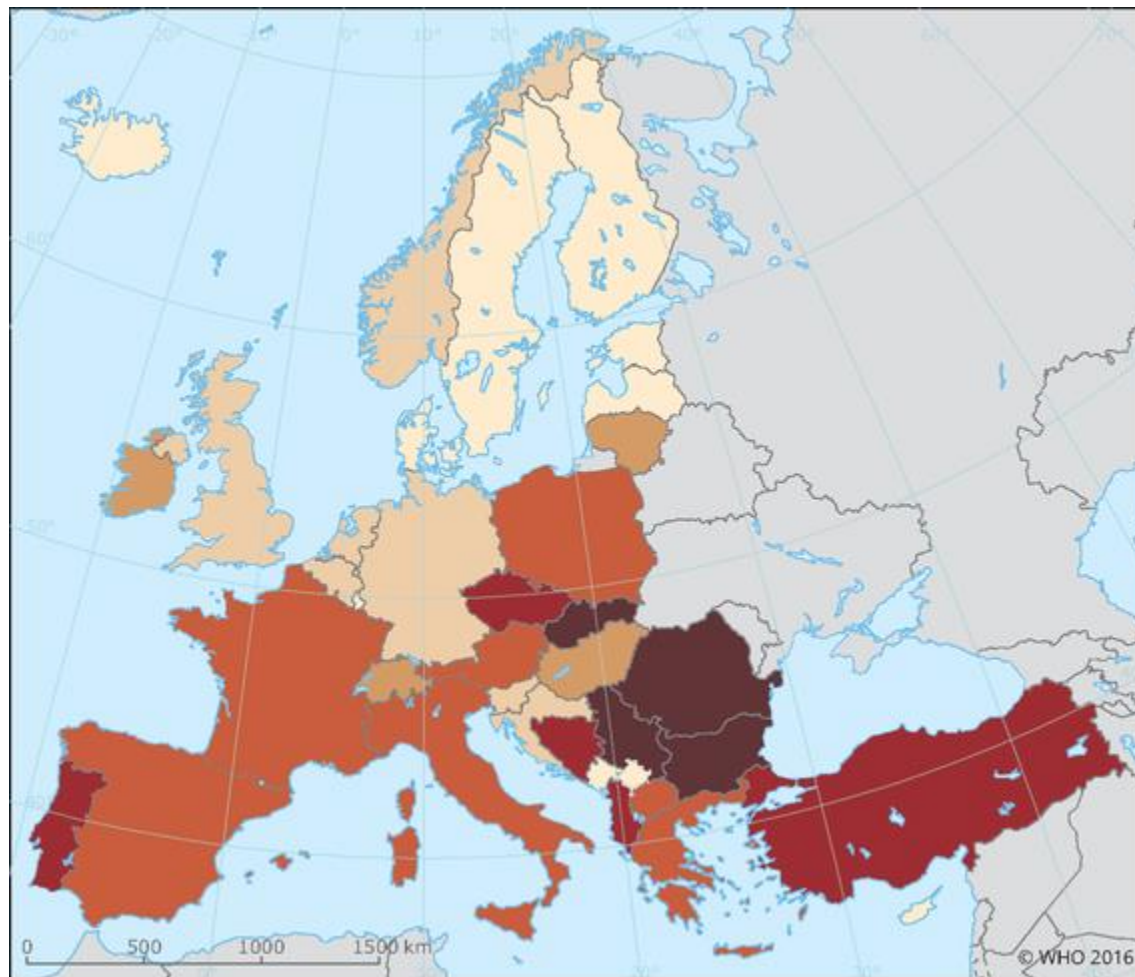
*Ευρώπη*



**Πηγή:** Paprotny, D., Sebastian, A., Morales-Napoles, O., Jonkman, S.N. (2018). Trends in flood losses in Europe over the past 150 years. Nature Communications, 9, 1985.

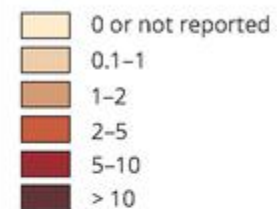
# Αριθμός νεκρών

## Ευρώπη 1991-2015



Deaths per million inhabitants related to flooding in Europe for the period 1991-2015

Rate per 1 000 000 inhabitant



Outside coverage

The designations employed and the presentation of this material do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of the Secretariat of the World Health Organization concerning the legal status of any country, territory, city or area or of its authorities, or concerning the delimitation of its frontiers and boundaries.

Dotted and dashed lines on maps represent approximate borders for which there may not be full agreement.

Πηγή: European Environmental Agency ([www.eea.europa.eu](http://www.eea.europa.eu)).



# Ελλάδα

**1970-2010**

- 53 πλημμυρικά γεγονότα με απώλειες
- 151 νεκροί
- Οι περισσότεροι νεκροί στο μητροπολιτικό συγκρότημα της Αθήνας → αστικοποίηση
- Ρεκόρ → 44 νεκροί το 1977 (39 στην Αττική)

**Πηγή:** Diakakis, M. And Deligiannakis, G. (2015). Flood fatalities in Greece: 1970–2010, *Journal of Flood Risk Management*, 10(1), 115-123.

# ΑΤΤΙΚΗ

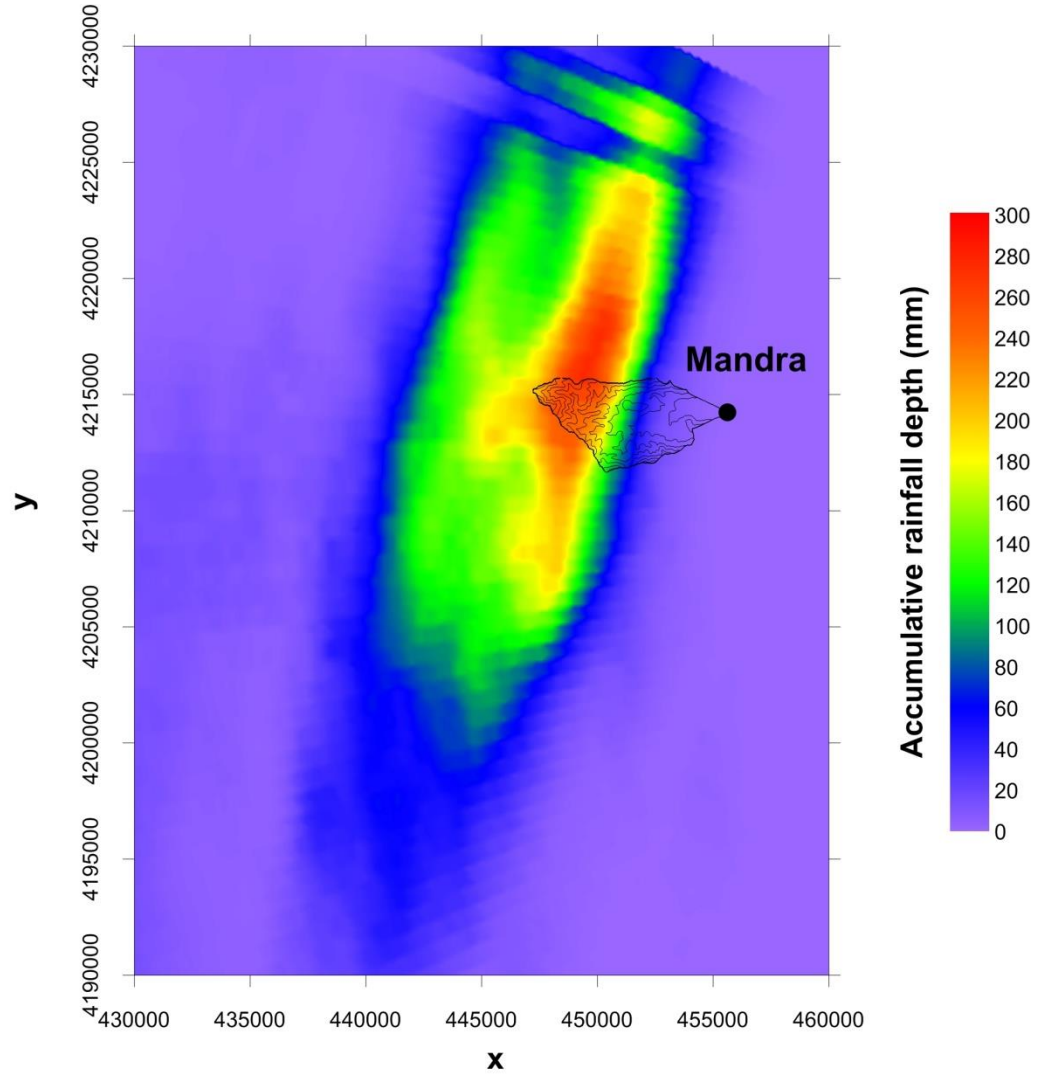
Ημερομηνία	Ύψος βροχόπτωσης (mm)	Νεκροί
26/11/1896	119.3	61
23/11/1925	93.0	8
21/2/1930	90.5	2
24/10/1930	43.1	2
17/10/1933	30.2	1
3/12/1933	56.4	2
22/11/1934	39.2	8
6/11/1936	57.4	2
31/10/1938	37.6	1
18/9/1949	142.9	1
6/11/1961	81.2	40
31/10/1972	50.8	1
2/11/1977	132.8	36
27/10/1980	46.7	1
5/10/1989	42.9	7
15/1/1991	25.3	1
21-22/10/1994	86.8	9
8/7/2002	91.0	1
	<b>Σύνολο</b>	<b>182</b>

**Πηγή:** Βλαχαβιώλος, Θ. (2011). Μεθοδολογία προσδιορισμού ευάλωτων περιοχών σε πλημμύρες σύμφωνα με την οδηγία 2007/60. Διπλωματική εργασία με επιβλέποντα το Ν. Μαμάση, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ.

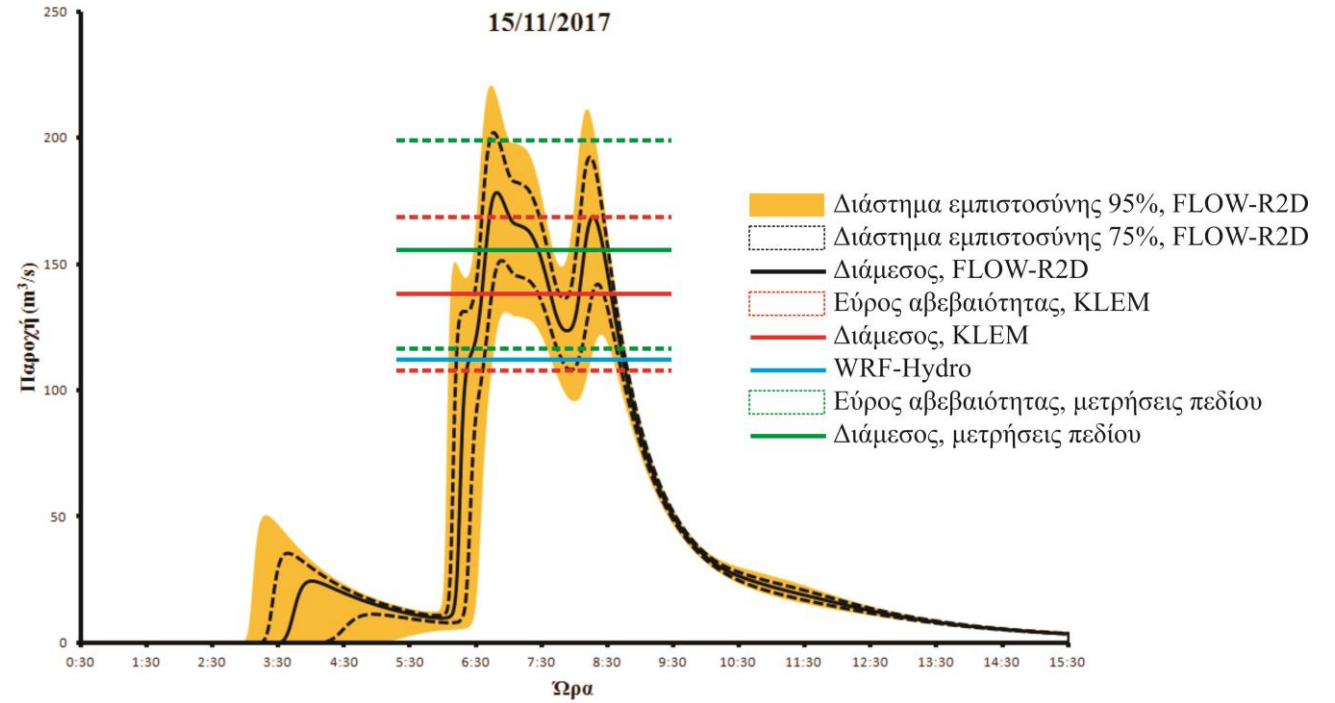
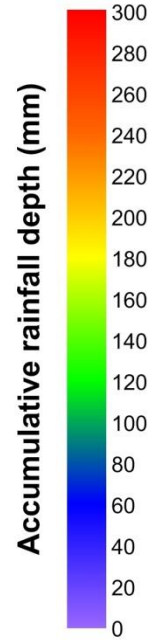
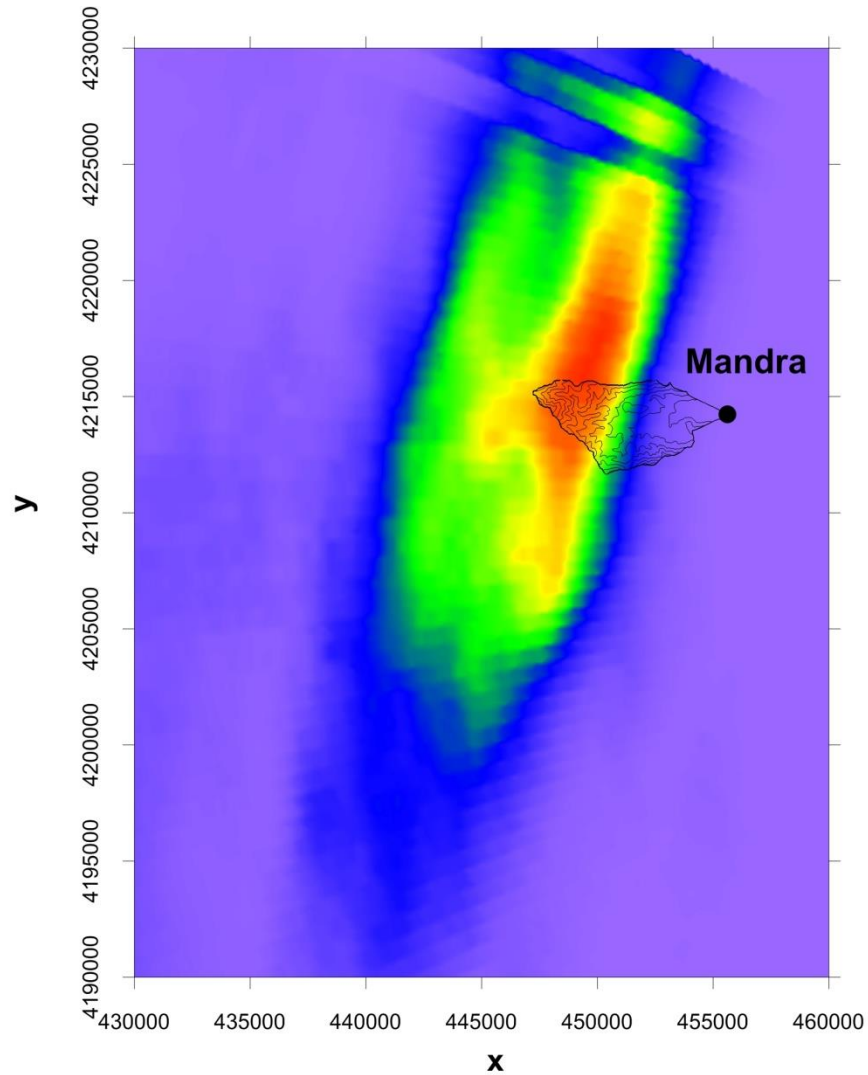
# Μάνδρα

- 15 Νοεμβρίου 2017
- 24 νεκροί
- Πλημμύρα ταχείας απόκρισης
- Έντονη χωρική ανομοιογένεια της βροχόπτωσης
- Έως και 300 mm βροχόπτωσης μέσα σε 10 h

# Μάνδρα



# Μάνδρα



# Αντιμετώπιση πλημμυρών

- Αντιπλημμυρικά έργα
- Θεσμικό πλαίσιο → **ευρωπαϊκή οδηγία 2007/60**
- Κατασκευαστικά μέτρα
  - Έργα ανάσχεσης
  - Έργα διοχέτευσης
  - Ήπιες παρεμβάσεις
- Μη κατασκευαστικά μέτρα
  - Ενημέρωση και εκπαίδευση κοινού
  - Συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης
  - ...

# Οδηγία 2007/60

- **Πρώτη φάση**

- Προκαταρκτική αξιολόγηση των περιοχών που κινδυνεύουν από πλημμύρες σε κάθε λεκάνη απορροής ποταμού ή τμήμα διεθνούς περιοχής λεκάνης απορροής ποταμού

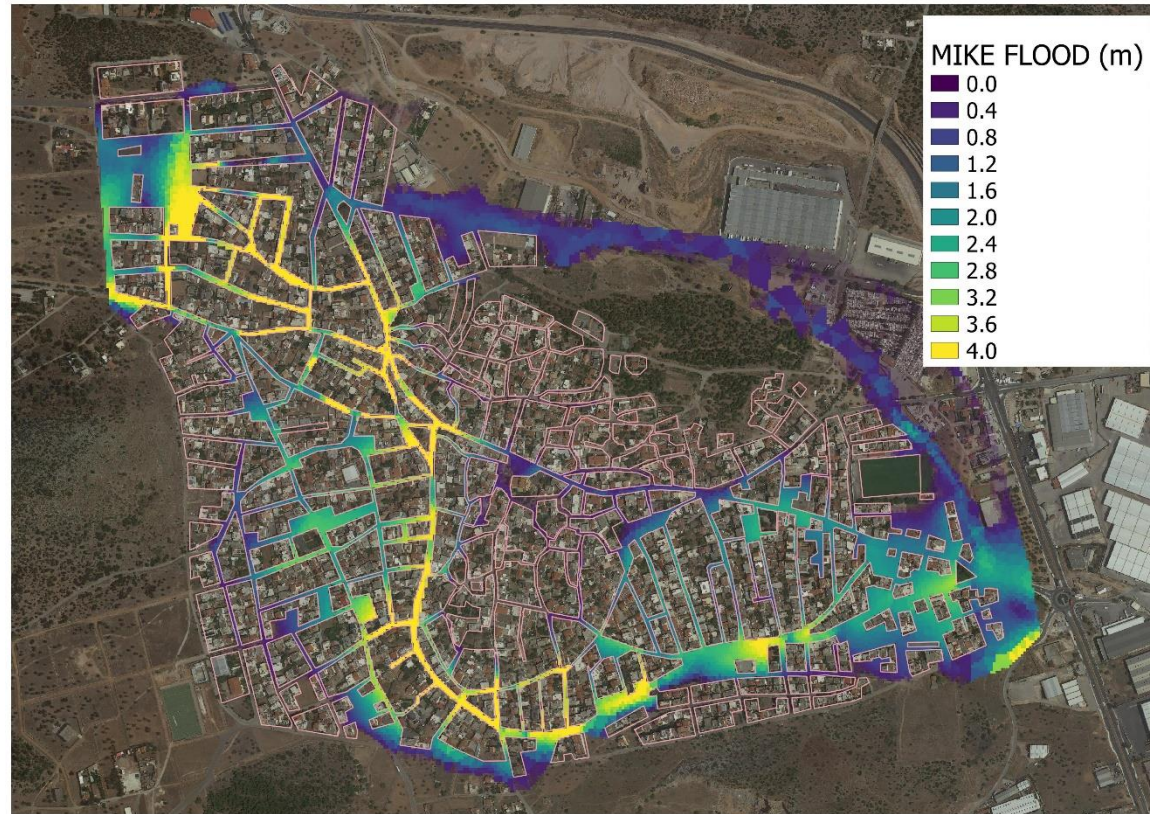
- **Δεύτερη φάση**

- Χάρτες πλημμυρικής επικινδυνότητας (hazard) → μέγιστα βάθη και ταχύτητες

- **Τρίτη φάση**

- Χάρτες πλημμυρικού κινδύνου (risk) → δυνητικές αρνητικές συνέπειες (οικονομικά μεγέθη)

# Χάρτες πλημμυρικού κινδύνου





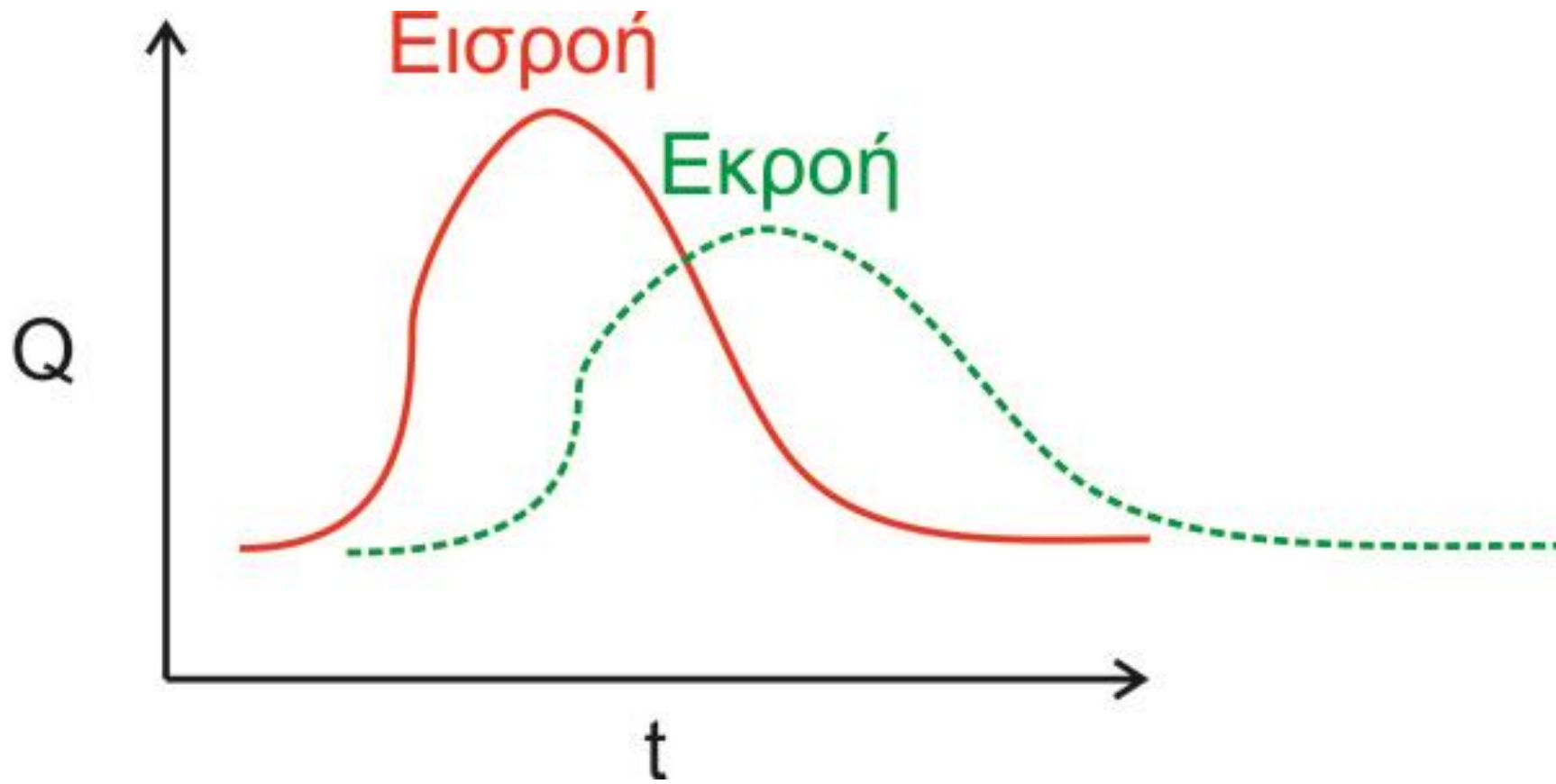
# Κατασκευαστικά μέτρα

- **Ανάσχεση πλημμύρας**
  - Ελεγχόμενη υπερχείλιση
  - Δεξαμενή
  - Ταμιευτήρας
  - ...
- **Διοχέτευση πλημμύρας**
  - Αναχώματα
  - Αγωγοί μερικής εκτροπής (flood bypass)
  - ...
- **Ήπιες παρεμβάσεις**
  - Πράσινες στέγες
  - Πορώδη πεζοδρόμια

# Ανάσχεση

- Δημιουργία πλημμυρικής επιφάνειας σε ελεγχόμενη περιοχή που έχει σχεδιαστεί για αυτό το λόγο
- Αποθήκευση πλημμυρικού όγκου
- Άμεση ανάσχεση → στην κοίτη του ποταμού
- Έμμεση ανάσχεση → μεταφορά με σχετικό έργο
- Κλίμακες
  - Μικρές εκτάσεις ανακούφισης εντός της κοίτης
  - Μεσαίοι αποθηκευτικοί χώροι (δεξαμενές, ταμιευτήρες)
  - Μεγάλοι ταμιευτήρες

# Στόχος



# Ταμιευτήρας

- Η τεχνητή λίμνη που δημιουργείται με την κατασκευή φράγματος
- Φράγμα → το τεχνικό έργο κάθετο στη ροή του ποταμού

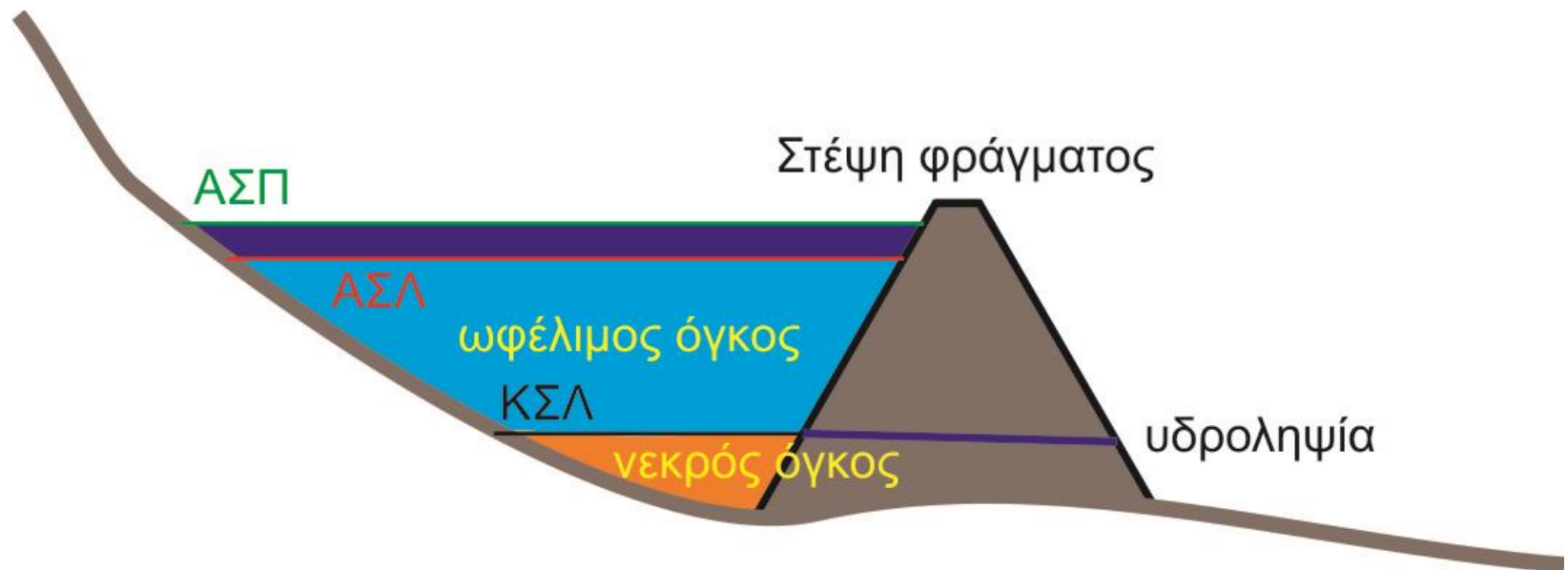


# Σκοπιμότητα

- Ύδρευση
- Άρδευση
- Παραγωγή ενέργειας
- Αντιπλημμυρική προστασία
- Τουρισμός
- Πολλαπλή σκοπιμότητα

# Στάθμες

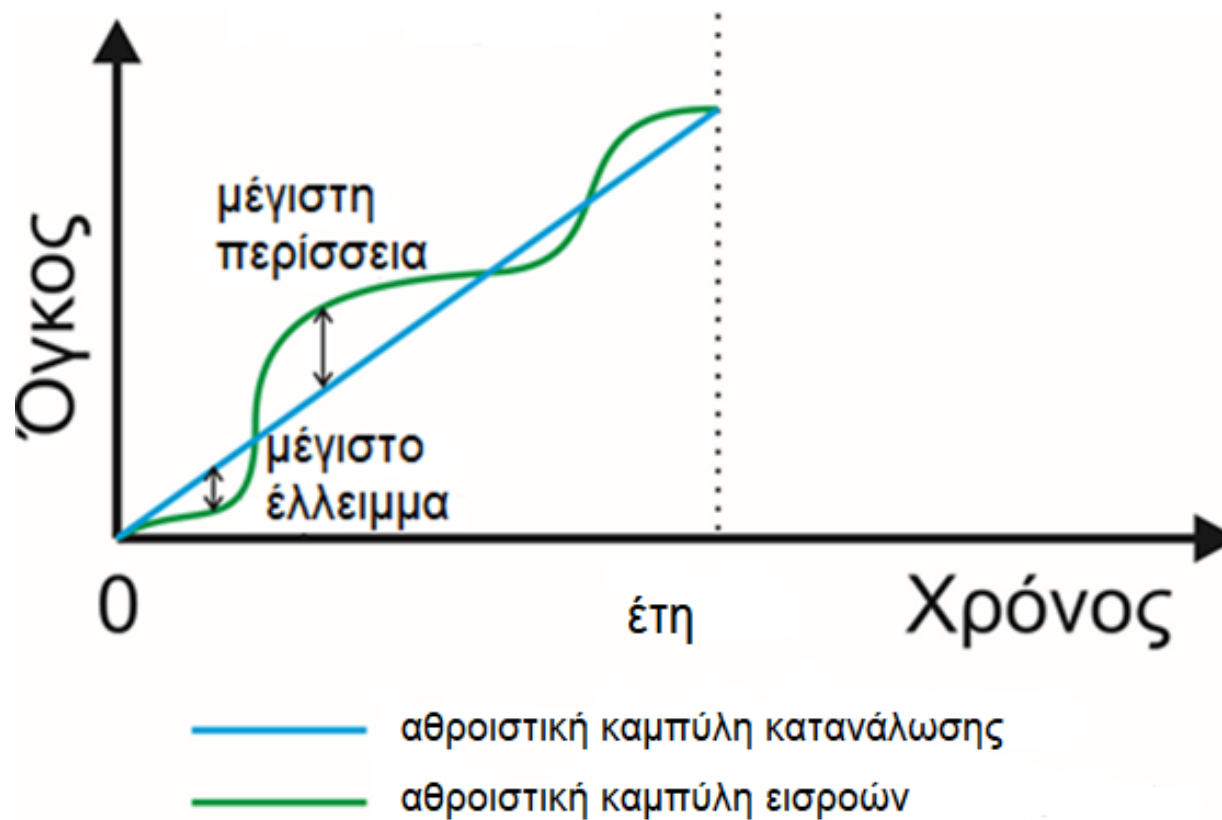
- Κατώτερη στάθμη Λειτουργίας (ΚΣΛ)
- Ανώτατη Στάθμη Λειτουργίας (ΑΣΛ)
- Ανώτατη Στάθμη Πλημμύρας (ΑΣΠ)
- Στέψη φράγματος



# Νεκρός όγκος

- Όγκος λόγω συσσώρευσης φερτών υλών στον πυθμένα
- Στερεοπαροχή → **εναποτιθέμενος όγκος φερτών**
- Στάθμη υδροληψίας > Στάθμη νεκρού όγκου
- Πολλαπλές υδροληψίες

# Ωφέλιμος όγκος



$\text{Ωφέλιμος Όγκος} = \text{Μέγιστη Περίσσεια} + \text{Μέγιστο Έλλειμμα}$



# Φράγμα

- Έργα εκτροπής
- Σώμα φράγματος
- Έργα υπερχείλισης
  - Τεχνικό έργο υπερχείλισης
  - Διώρυγα απαγωγής/πτώσης
  - Έργα καταστροφής ενέργειας
- Έργα προσαρμογής με την κατάντη κοίτη
- Έργα υδροληψίας
- Έργα εκκένωσης

# Χαρακτηριστικά μεγέθη

- Ύψος
- Μήκος
- Όγκος σώματος
- Όγκος ταμειυτήρα
- Κλίσεις πρανών

# Σώμα φράγματος

## υλικό

- Άκαμπτα φράγματα

- Σκυρόδεμα
- RCC

- μεγάλες κλίσεις πρανών
- μικρός όγκος έργου

- Εύκαμπτα φράγματα

- Χωμάτινα
- Λιθόρριπτα
- Γεώδη υλικά

- ήπιες κλίσεις πρανών
- μεγάλος όγκος έργου

# Σώμα φράγματος

## δομή

- Βαρύτητας
- Τοξωτά
- Γεωφράγματα

# Σώμα φράγματος

## δομή

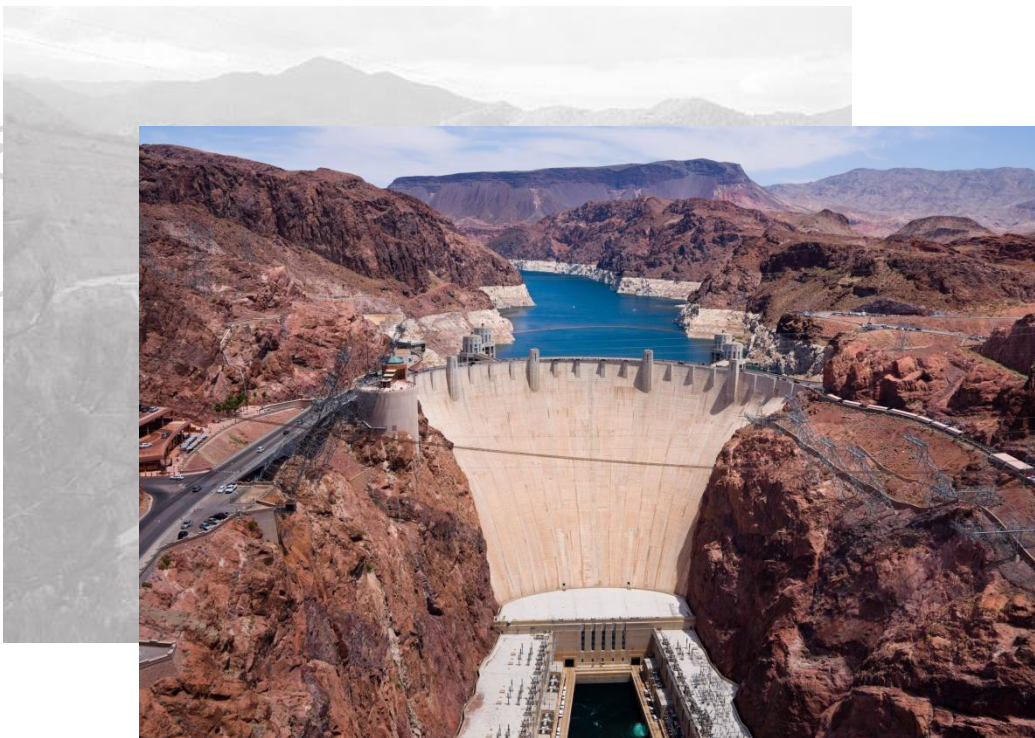
- Βα
- Τοδ
- Γεο



# Σώμα φράγματος

## δομή

- Βα
- Τοδ
- Γεο



# Σώμα φράγματος

## δομή

- Βα
- Τοδ
- Γεο



# Σώμα φράγματος

## μέγεθος

- **Κατηγορία I**

- Ορατό ύψος φράγματος  $\rightarrow H > 40 \text{ m}$
- Όγκος ταμιευτήρα  $\rightarrow V > 10\,000\,000 \text{ m}^3$

- **Κατηγορία II**

- Ορατό ύψος φράγματος  $\rightarrow 20 < H < 40 \text{ m}$
- Όγκος ταμιευτήρα  $\rightarrow > 1\,000\,000 \text{ m}^3$

- **Κατηγορία III**

- Ό,τι δεν εντάσσεται στις κατηγορίες I, II



# Υπερχειλιστές

## σχεδιασμός

- Έργα στη στέψη του φράγματος για την ασφαλή διοχέτευση του πλημμυρικού όγκου που δεν αποθηκεύεται
- Σχεδιασμός
  - Κατηγορία 1 (υψηλές συνέπειες) →  $T=10000$  έτη
  - Κατηγορία 2 (σημαντικές συνέπειες) →  $T=1000$  έτη (βαρύτητας),  $T=5000$  έτη (γεωφράγματα)
  - Κατηγορία 3 (χαμηλές συνέπειες) →  $T=200$  έτη (βαρύτητας),  $T=500$  έτη (γεωφράγματα)

# Υπερχειλιστές

## σχεδιασμός

- Έργα διοχέυσης
  - Σχεδιασμός
    - Κατασκευαστικές (σεισμοαντοχής) →  $T=10000$  έτη
    - Κατασκευαστικές (άνεμης) →  $T=1000$  (βαρύτητας),  $T=5000$  έτη
    - Κατασκευαστικές (γεωτεχνικές) →  $T=200$  (βαρύτητας),  $T=500$  έτη
- Έργα διαχείρισης κινδύνου για την ασφαλή μεταφορά του κού όγκου που δεν αποθηκεύεται

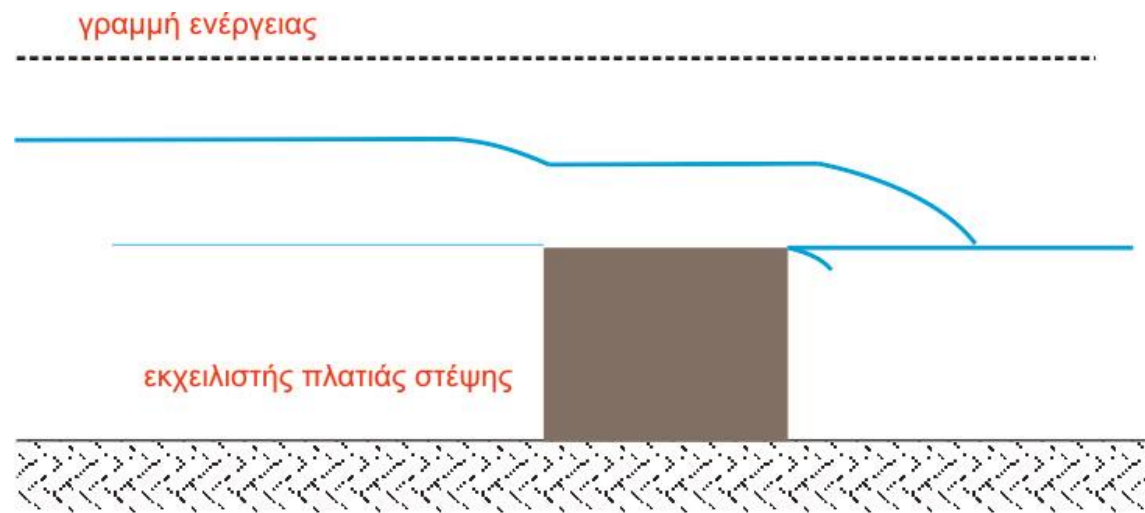
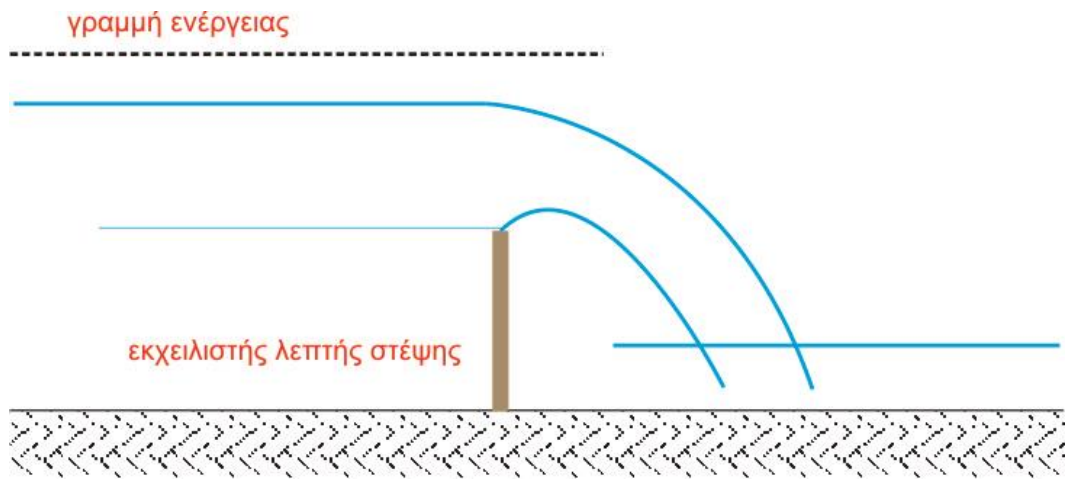


# Υπερχειλιστές

## ΤΥΠΟΙ

- Ελεύθερη υπερχείλιση
- Ακολουθώντας το σχήμα της υδατόπτωσης (ogee)
- Φρεατοειδής (morning glory)
- Θυροφράγματα
- Σιφωνοειδής
- Λαβυρίνθου
- Βαθμιδωτός

# Ελεύθερη υπερχείλιση



# Ogee



# Φρεατοειδής



# Θυροφράγματα



# Διώρυγα απαγωγής/πτώσης

- **Σώμα φράγματος**
  - Επάνω (φράγματα βαρύτητας)
  - Παραπλεύρως
  - Μακριά από το σώμα του φράγματος
- **Βαθμιδωτή**
  - Καταστροφή ενέργειας



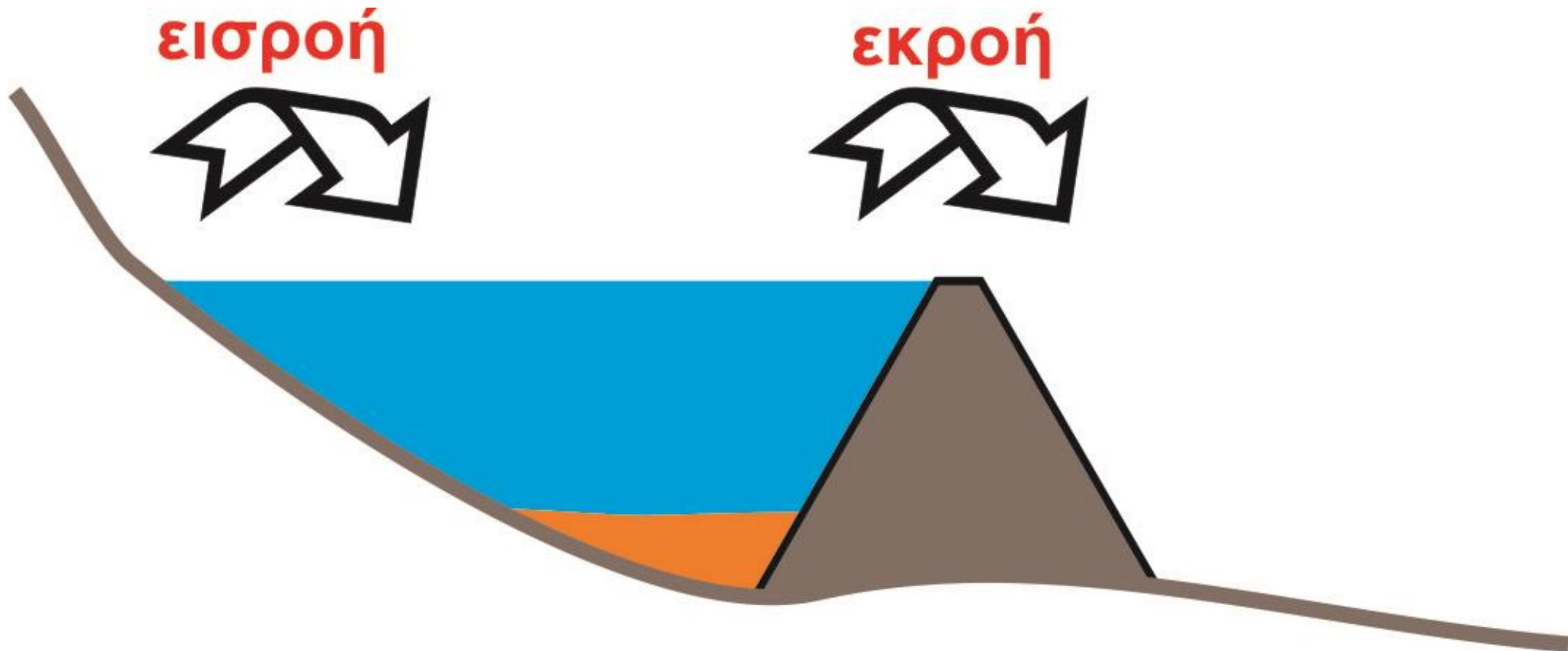
# Βαθμιδωτή



# Έργα καταστροφής ενέργειας

- Λεκάνη καταστροφής ενέργειας (πόδι φράγματος)
- Εκτόξευση πίδακα νερού σε λεκάνη αποτόνωσης ενέργειας (flip bucket)
- Εμπόδια στη ροή
- Βαθμίδες

# Εισροή-Εκροή



# Εισροή-Εκροή

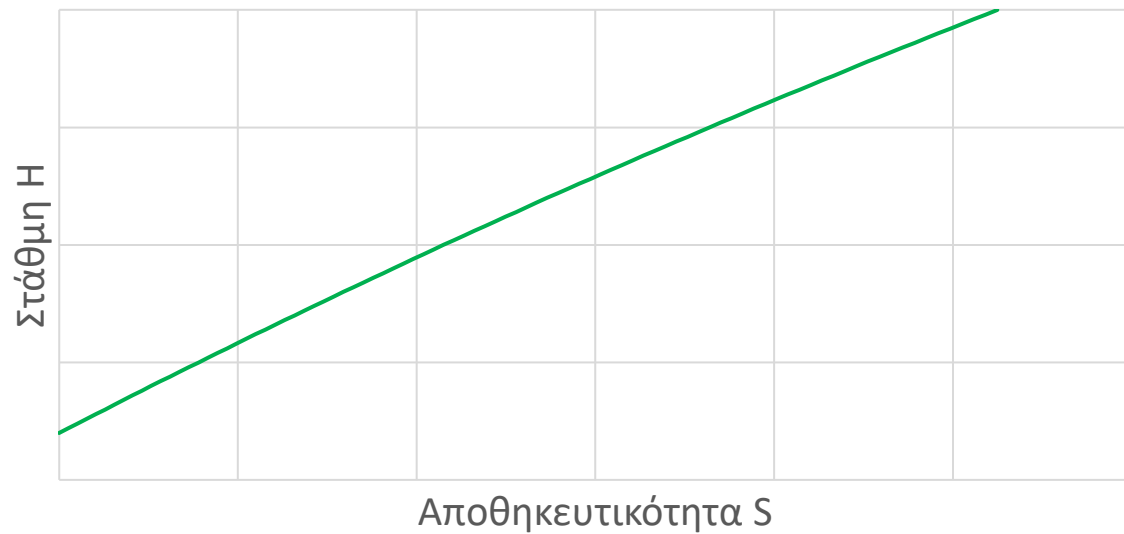
- **Εισροή**
  - Υδρογράφημα εισροής στον ταμιευτήρα
  - Άμεση βροχόπτωση στον ταμιευτήρα
- **Εκροή**
  - Ύδρευση
  - Άρδευση
  - Παραγωγή ενέργειας
  - Υπερχείλιση
  - Οικολογική παροχή
  - Εξατμισοδιαπνοή

# Θεωρητικό υπόβαθρο

- Μοντέλο αποθήκευσης → ΣΔΕ

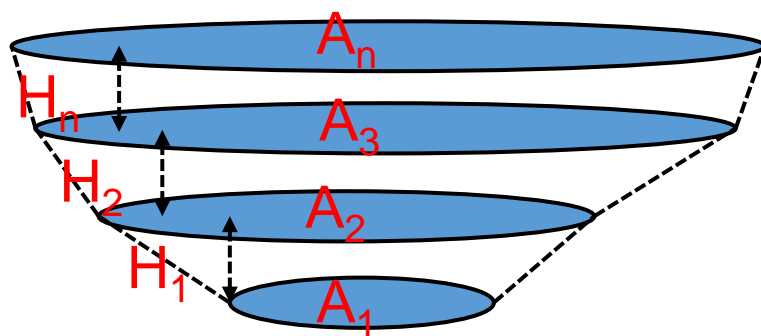
$$\frac{dS}{dt} = \bar{I} - \bar{Q}$$

# Καμπύλες

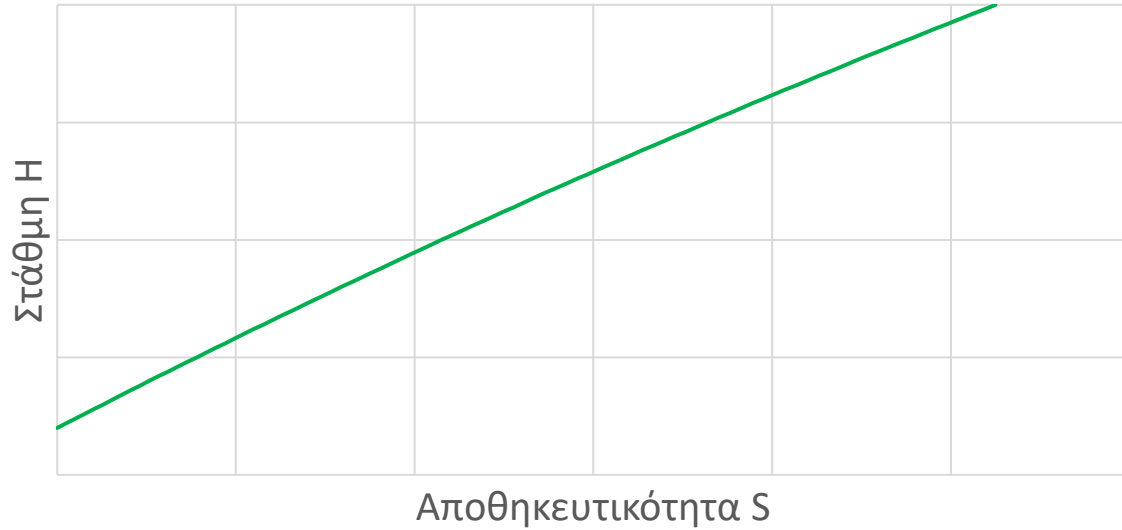


$$S = f_1(H)$$

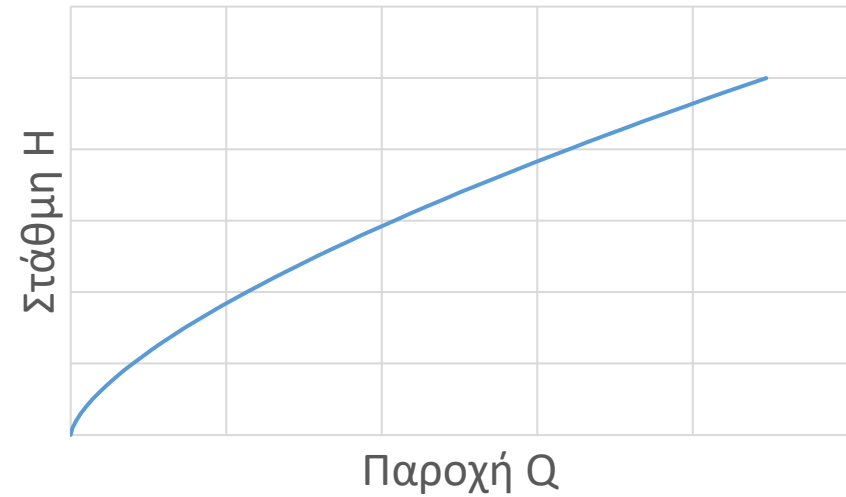
Συνάρτηση του  
τοπογραφικού  
ανάγλυφου



# Καμπύλες

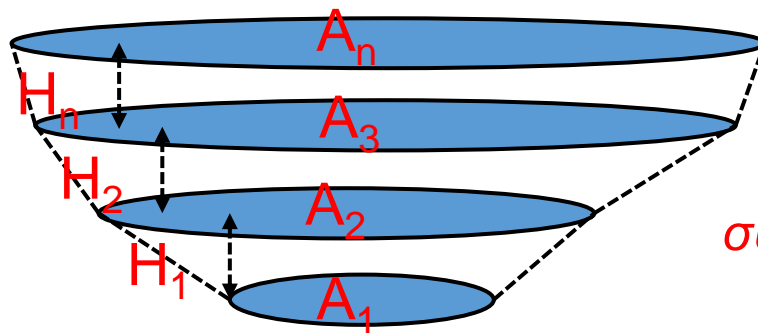


$$S = f_1(H)$$



$$Q = f_2(H)$$

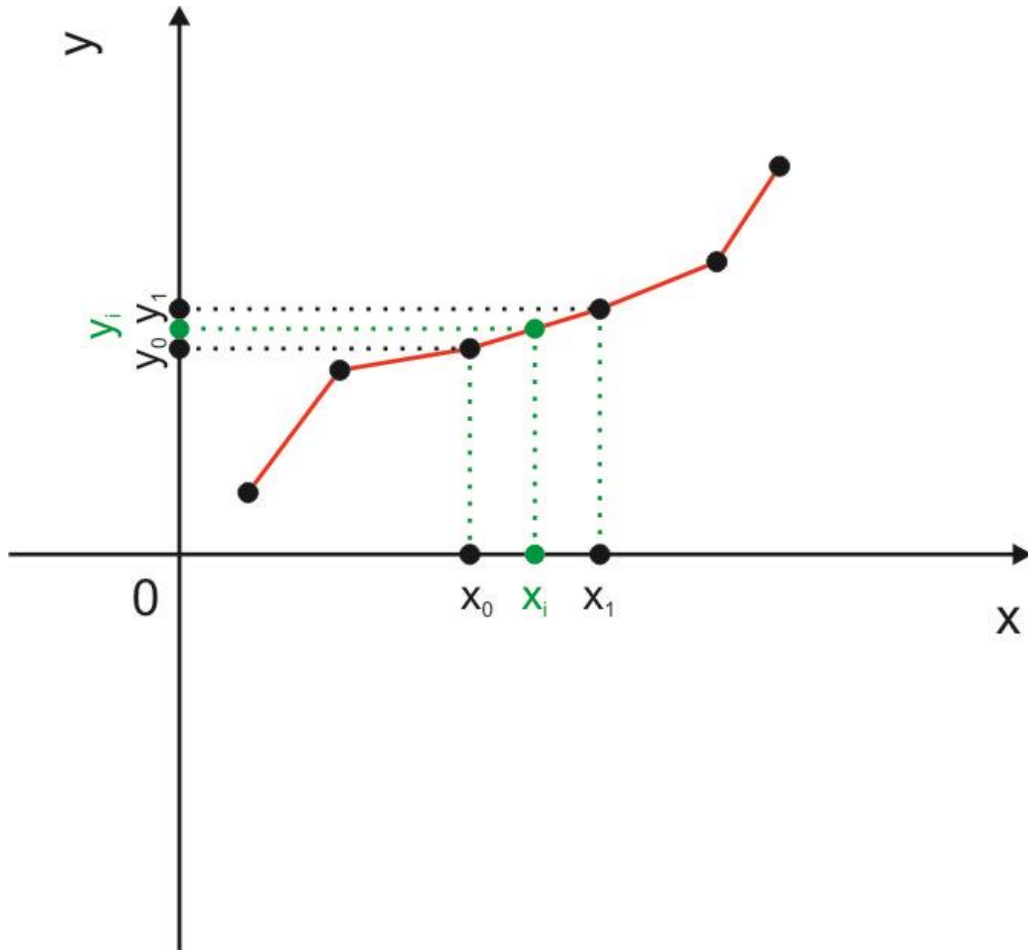
Συνάρτηση του  
τοπογραφικού  
ανάγλυφου



$$C_d \times L \times (H - z_0)^{3/2}$$

← συντελεστής παροχής  
↓ μήκος υπερχείλισης  
↘ υδραυλικό φορτίο

# Γραμμική παρεμβολή



$$\frac{y_i - y_0}{x_i - x_0} = \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0}$$



$$y_i = y_0 + (x_i - x_0) \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0}$$



# Διακριτοποίηση

- Εμπρόσθια διαφορά

$$\frac{S_{i+1} - S_i}{\Delta t} = \frac{I_{i+1} + I_i}{2} - \frac{Q_{i+1} + Q_i}{2}$$

# Διακριτοποίηση

- Εμπρόσθια διαφορά

$$\frac{S_{i+1} - S_i}{\Delta t} = \frac{I_{i+1} + I_i}{2} - \frac{Q_{i+1} + Q_i}{2} \rightarrow \frac{S_{i+1}}{\Delta t} + \frac{Q_{i+1}}{2} = \frac{S_i}{\Delta t} - \frac{Q_i}{2} + \frac{I_{i+1} + I_i}{2}$$

# Διακριτοποίηση

$$-\frac{Q_i}{2} = \frac{Q_i}{2} - Q_i$$

- Εμπρόσθια διαφορά

$$\frac{S_{i+1} - S_i}{\Delta t} = \frac{I_{i+1} + I_i}{2} - \frac{Q_{i+1} + Q_i}{2} \rightarrow \frac{S_{i+1}}{\Delta t} + \frac{Q_{i+1}}{2} = \frac{S_i}{\Delta t} - \frac{Q_i}{2} + \frac{I_{i+1} + I_i}{2}$$

# Διακριτοποίηση

$$-\frac{Q_i}{2} = \frac{Q_i}{2} - Q_i$$

- Εμπρόσθια διαφορά

$$\frac{S_{i+1} - S_i}{\Delta t} = \frac{I_{i+1} + I_i}{2} - \frac{Q_{i+1} + Q_i}{2} \rightarrow \frac{S_{i+1}}{\Delta t} + \frac{Q_{i+1}}{2} = \frac{S_i}{\Delta t} - \frac{Q_i}{2} + \frac{I_{i+1} + I_i}{2}$$

$$\frac{S_{i+1}}{\Delta t} + \frac{Q_{i+1}}{2} = \frac{S_i}{\Delta t} + \frac{Q_i}{2} + \frac{I_{i+1} + I_i}{2} - Q_i$$

# Διακριτοποίηση

$$-\frac{Q_i}{2} = \frac{Q_i}{2} - Q_i$$

- Εμπρόσθια διαφορά

$$\frac{S_{i+1} - S_i}{\Delta t} = \frac{I_{i+1} + I_i}{2} - \frac{Q_{i+1} + Q_i}{2} \rightarrow \frac{S_{i+1}}{\Delta t} + \frac{Q_{i+1}}{2} = \frac{S_i}{\Delta t} - \frac{Q_i}{2} + \frac{I_{i+1} + I_i}{2}$$

$$\left(\frac{S_{i+1}}{\Delta t} + \frac{Q_{i+1}}{2}\right) = \left(\frac{S_i}{\Delta t} + \frac{Q_i}{2}\right) + \frac{I_{i+1} + I_i}{2} - Q_i \rightarrow N_{i+1} = N_i + \bar{I} - Q_i$$

$$N = \frac{S}{\Delta t} + \frac{Q}{2}$$

$$\bar{I} = \frac{I_{i+1} + I_i}{2}$$

# Διακριτοποίηση

$$-\frac{Q_i}{2} = \frac{Q_i}{2} - Q_i$$



- Εμπρόσθια διαφορά

$$\frac{S_{i+1} - S_i}{\Delta t} = \frac{I_{i+1} + I_i}{2} - \frac{Q_{i+1} + Q_i}{2} \rightarrow \frac{S_{i+1}}{\Delta t} + \frac{Q_{i+1}}{2} = \frac{S_i}{\Delta t} - \frac{Q_i}{2} + \frac{I_{i+1} + I_i}{2}$$

$$\left(\frac{S_{i+1}}{\Delta t} + \frac{Q_{i+1}}{2}\right) = \left(\frac{S_i}{\Delta t} + \frac{Q_i}{2}\right) + \frac{I_{i+1} + I_i}{2} - Q_i \rightarrow N_{i+1} = N_i + \bar{I} - Q_i$$

$$N = \frac{S}{\Delta t} + \frac{Q}{2}$$

$$\bar{I} = \frac{I_{i+1} + I_i}{2}$$

$$\Delta N = \bar{I} - Q_i$$

# Υψόμετρο στέψης φράγματος

- **Ανώτατη Στάθμη Πλημμύρας** →  **$A_{SP} = A_{SL} + H$** 
  - Ανώτατη Στάθμη Λειτουργίας
  - Υδραυλικό φορτίο υπερχείλισης
- **Στέψη Φράγματος** →  **$A_{SP} + E_{PA}$** 
  - Ανώτατη Στάθμη Πλημμύρας
  - Ελεύθερο Περιθώριο Ασφαλείας (EPA)
- **Ελεύθερο Περιθώριο Ασφαλείας** → **ελάχιστη τιμή 1 m**
  - Ανύψωση στάθμης λόγω ανέμου
  - Αναρρίχηση κυματισμών στο πραινές του φράγματος
  - Κάθιση στέψης φράγματος λόγω σεισμού
  - Αβεβαιότητες + κατασκευαστικοί λόγοι

# Βήματα σχεδιασμού

- Βροχόπτωση σχεδιασμού

*μοντέλο βροχόπτωσης-απορροής*

- Υδρογράφημα εισροής στον ταμιευτήρα → Υδρογράφημα σχεδιασμού υπερχειλιστή

*μοντέλο αποθήκευσης*

- Υδρογράφημα εκροής

*ΕΠΑ*

- Εύρεσης υψομέτρου στέψης φράγματος



# Διοχέτευση

- Ασφαλής διοχέτευση πλημμυρικού υδρογραφήματος
- Το νερό ρέει περιορισμένο εντός κοίτης
- Άμεση διοχέτευση → πλημμυρικά αναχώματα
- Έμμεση διοχέτευση → αγωγός μερικής εκτροπής

# Αναχώματα

πλημμυρικά αναχώματα



πλημμυρικά αναχώματα

# Αναχώματα



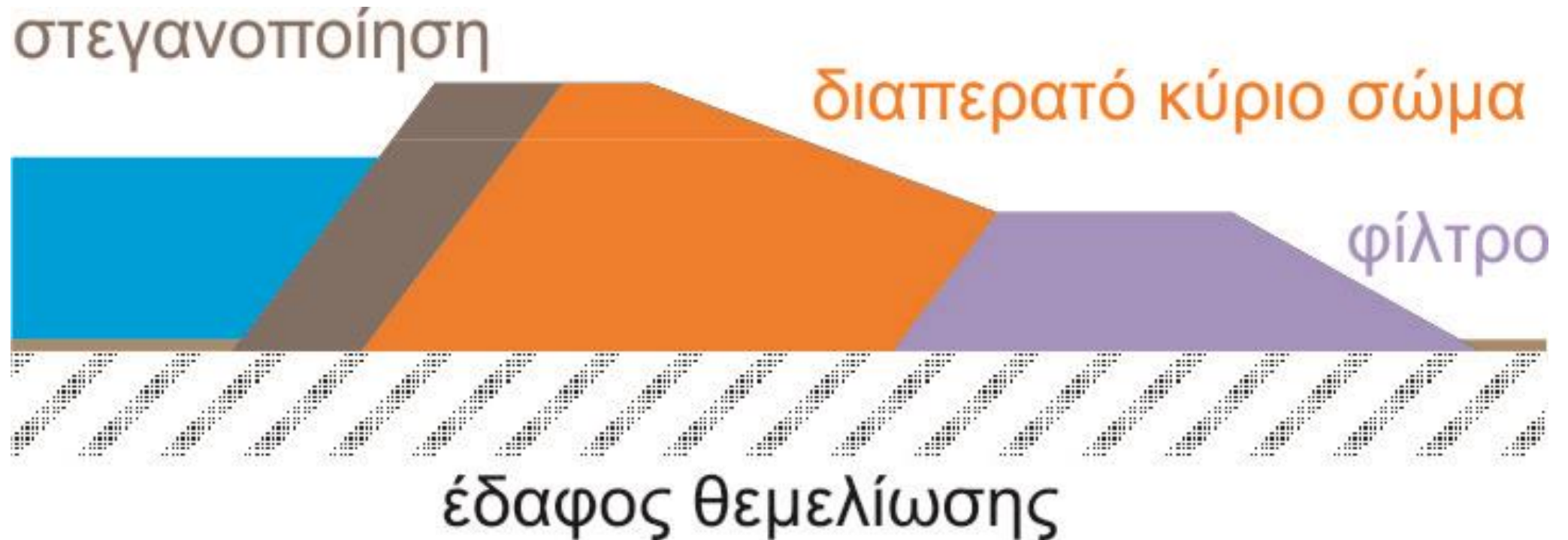
# Αναχώματα



# Υλικά αναχωμάτων

- Οπλισμένο σκυρόδεμα
- Συρματοκιβώτια
- Γεώδη υλικά
  - Χωμάτινα
  - Λιθόρριπτα
- Μεταλλικές κατασκευές
- Γυαλί
- Μη μόνιμες κατασκευές → **αμμόσακοι**

# Τυπικό ανάχωμα



# Βήματα σχεδιασμού

- Βροχόπτωση σχεδιασμού  
*μοντέλο βροχόπτωσης-απορροής*
- Υδρογράφημα/παροχή σχεδιασμού  
*υφιστάμενη κατάσταση*
- Εύραση ύψους αναχωμάτων

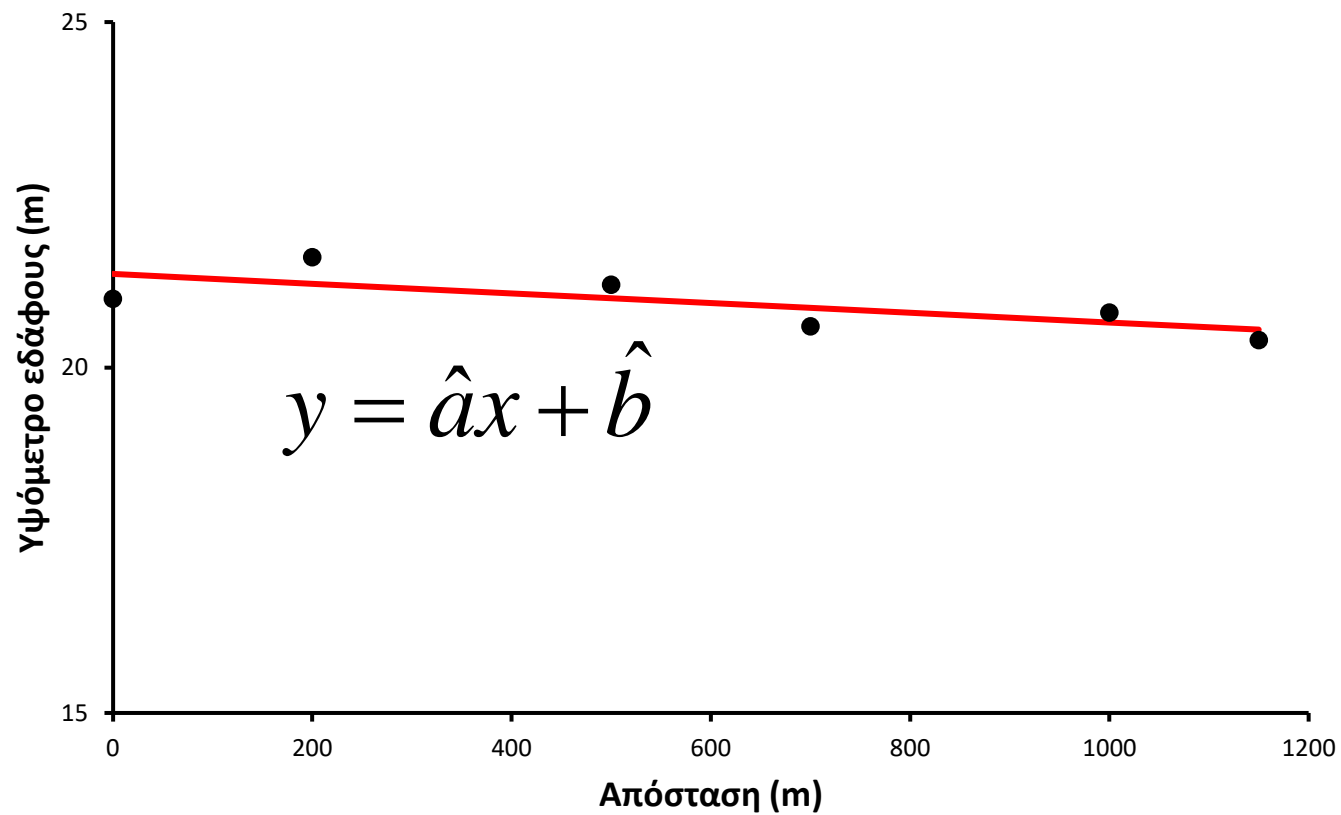
# Επιλογή διατομής

- **Κοντά στη φυσική κοίτη**
- **Μικρός όγκος εκσκαφών/επιχώσεων**
- **Ανάλογα το υλικό**
  - Ορθογωνική
  - Τραπεζοειδής
  - ...
- **Μείωση τραχύτητας**
  - Αλλαγή υλικού πυθμένα
  - Εξομάλυνση κοίτης



# Επιλογή κλίσης

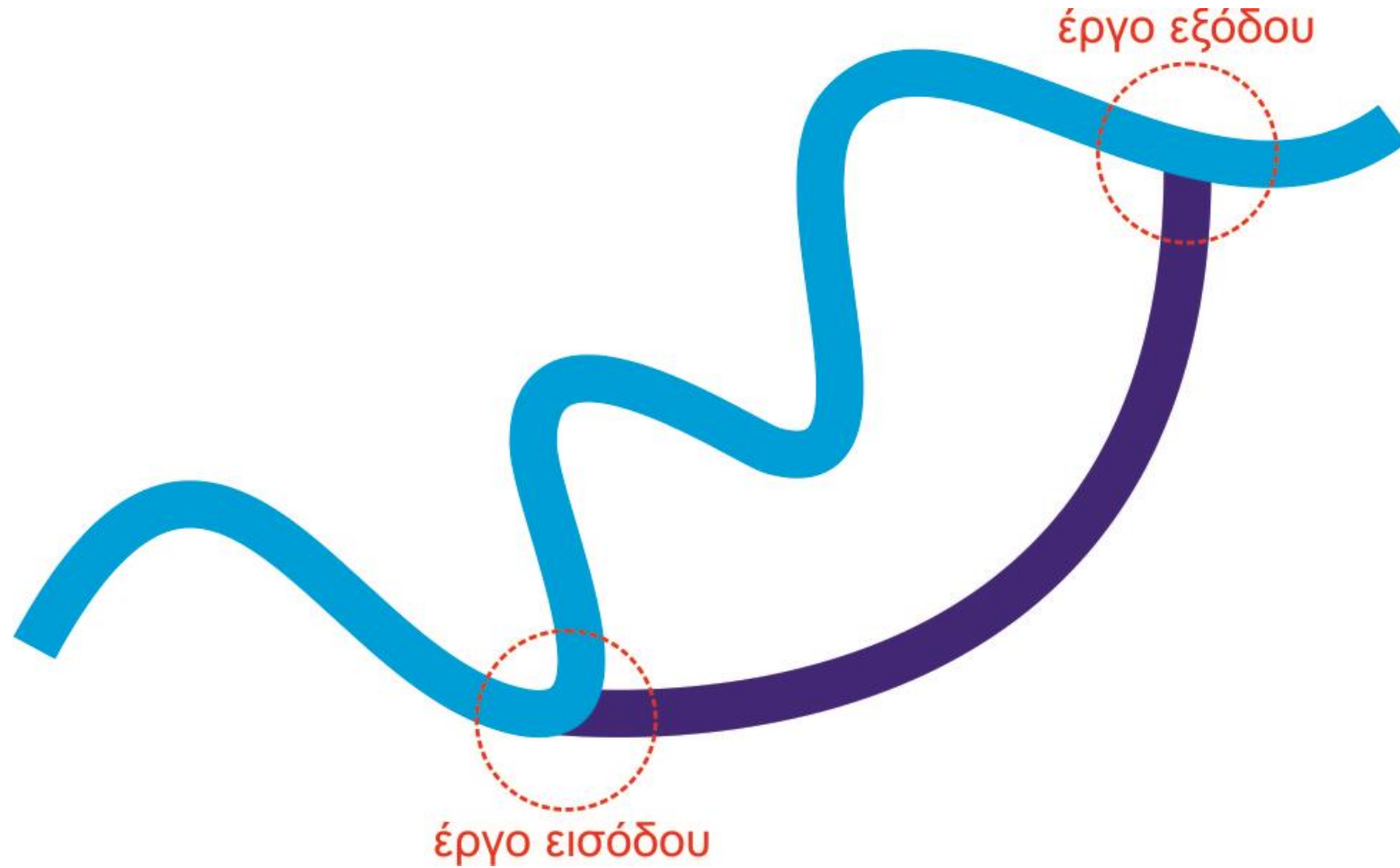
## μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων



$$\hat{a} = \frac{\sum [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sum [(x_i - \bar{x})^2]}$$

$$\hat{b} = \bar{y} - \hat{a}\bar{x}$$

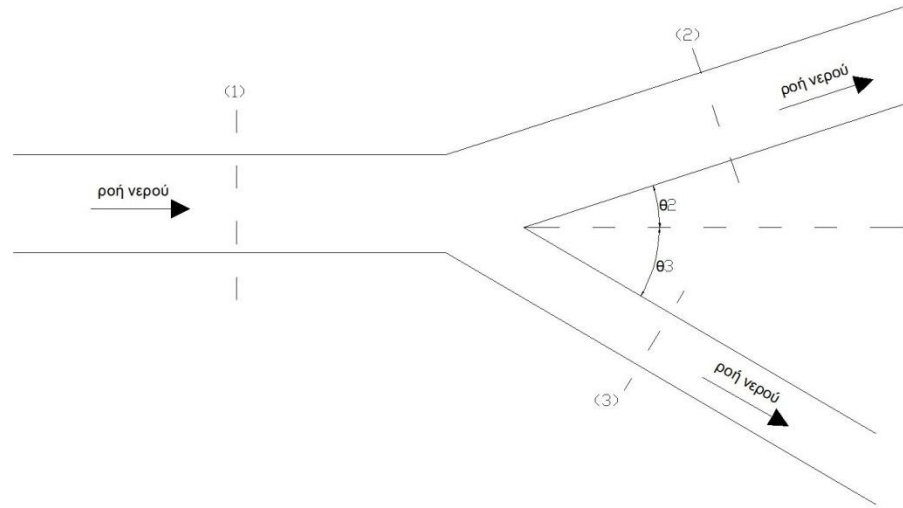
# Μερική εκτροπή



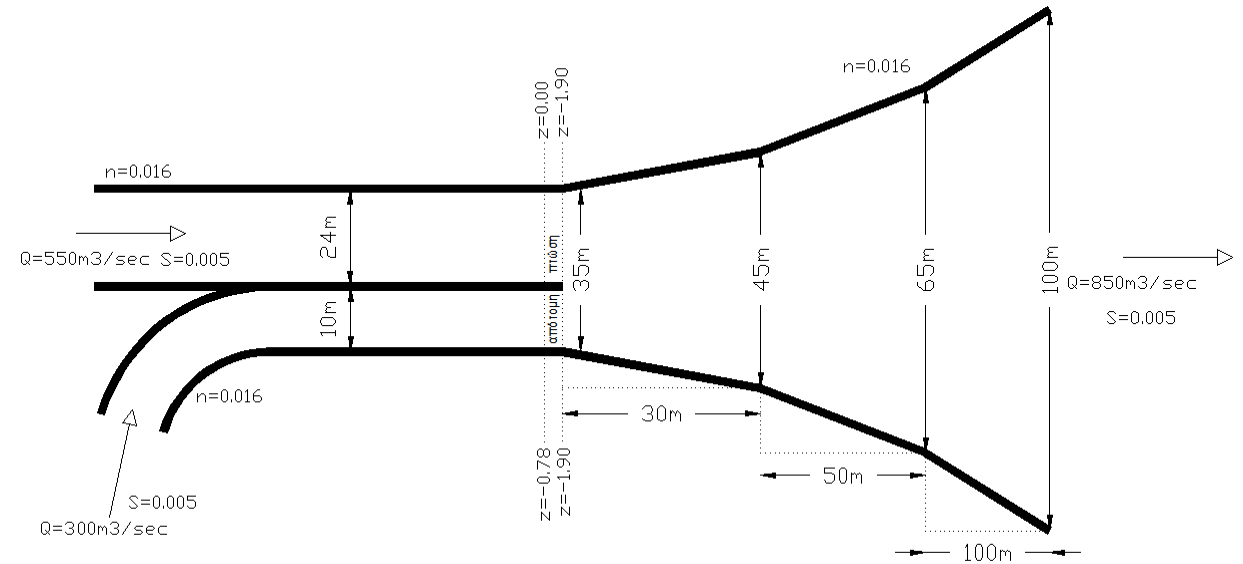
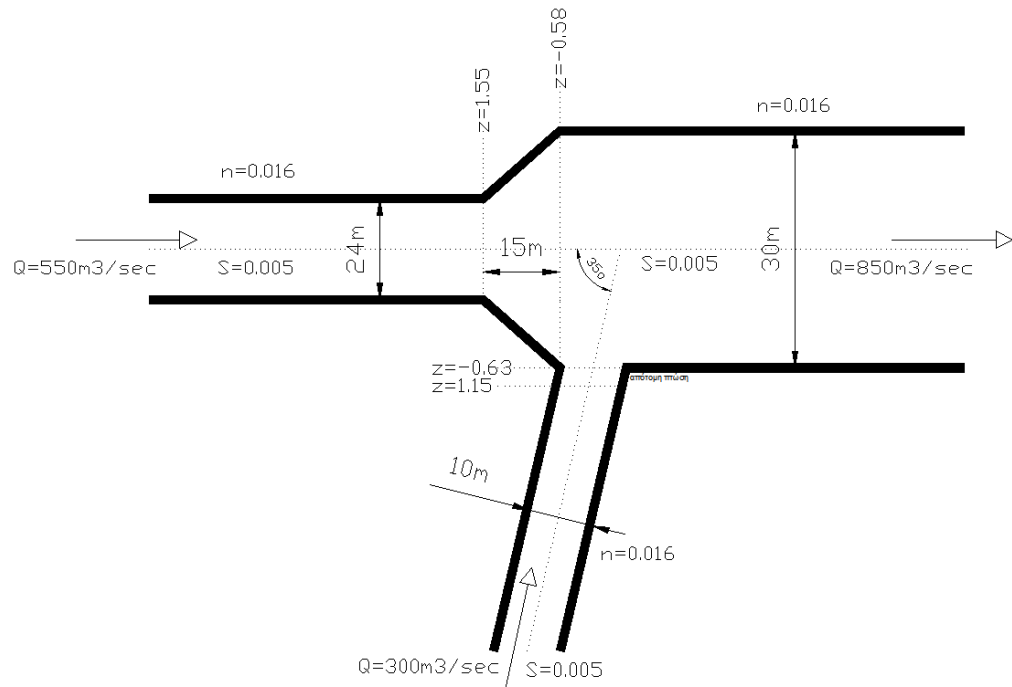
# Αγωγός εκτροπής

- Παραλαμβάνει παροχή από το κυρίως υδατόρεμα
- Ανοιχτός αγωγός
- Σήραγγα
- Τυποποιημένη διατομή
  - Ορθογωνική → ανοιχτός αγωγός
  - Πεταλοειδής → σήραγγα
  - ...

# Έργα εισόδου

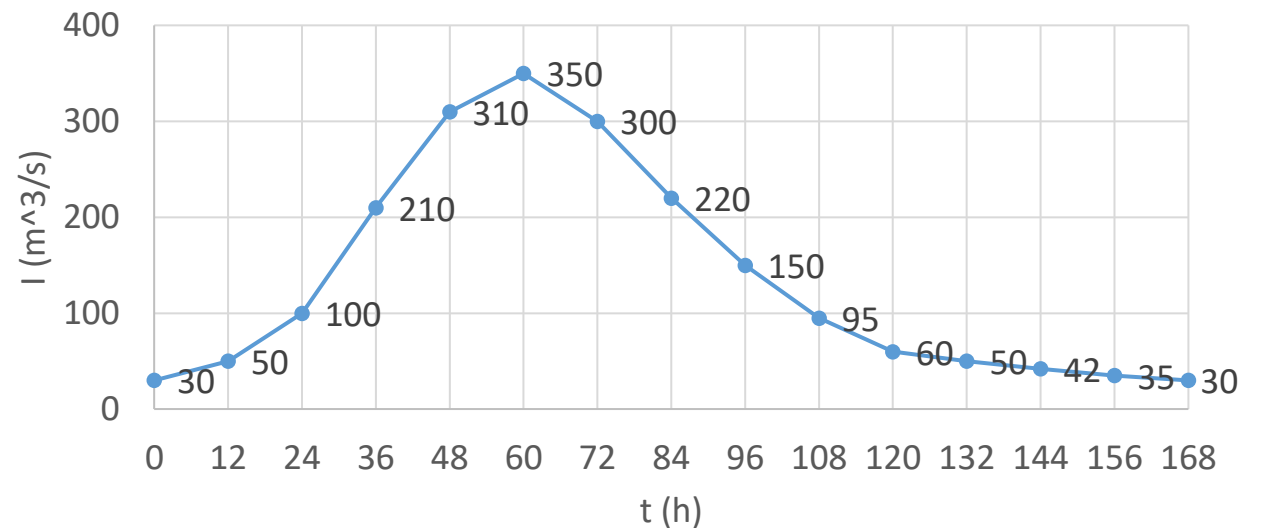


# Έργα εξόδου



# Εφαρμογή

- **Διόδευση υδρογραφήματος μέσω ταμιευτήρα**
  - Κατακόρυφες όχθες ταμιευτήρα επιφάνειας 1700 στρμ
  - Ανώτατη στάθμη λειτουργίας (στέψη υπερχειλιστή)  $z_0=+90$  m
  - Στάθμη ταμιευτήρα για  $t=0 \rightarrow H_0=+89$  m
  - $\Delta t=12$  h
  - $Q=4.8(H-z_0)^{1.5}$



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)