



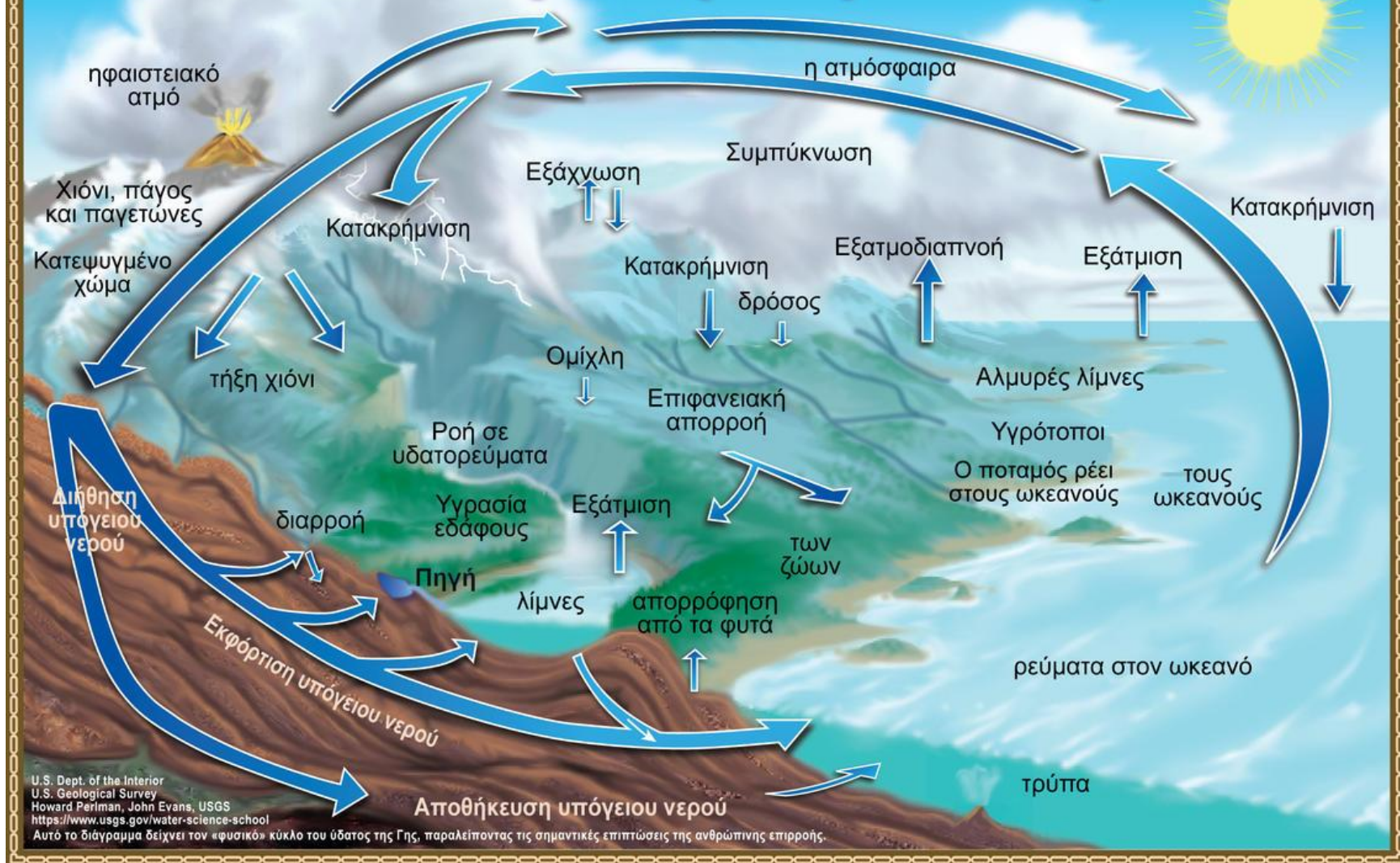
Το παρόν έργο αδειοδοτείται υπό τους όρους της άδειας Creative Commons Αναφορά Δημιουργού - Μη Εμπορική Χρήση - Όχι Παράγωγα Έργα 4.0. Για να δείτε ένα αντίγραφο της άδειας αυτής επισκεφτείτε το σύνδεσμο: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

Υδατικό ισοζύγιο

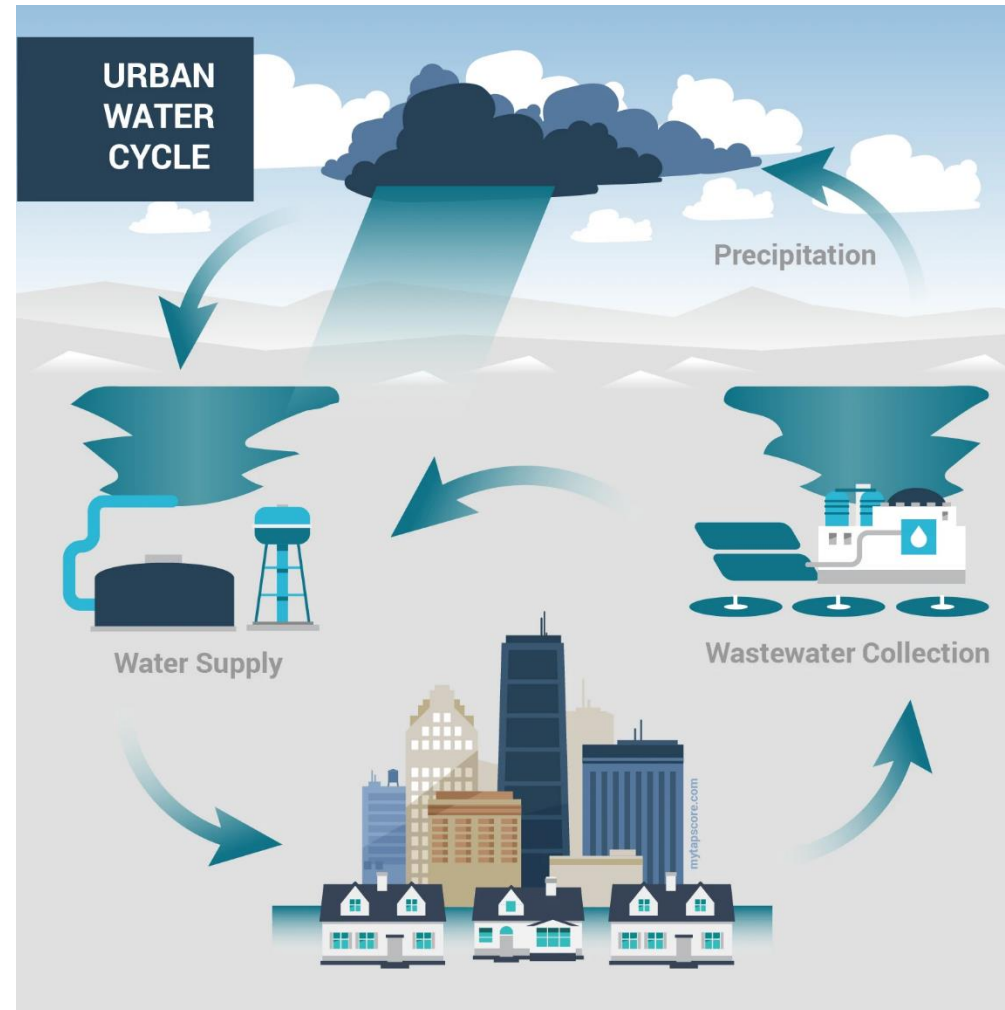
Δρ. Βασίλης Μπέλλος

Ο υδρολογικός κύκλος



U.S. Dept. of the Interior
U.S. Geological Survey
Howard Perlman, John Evans, USGS
<https://www.usgs.gov/water-science-school>
Αυτό το διάγραμμα δείχνει τον «φυσικό» κύκλο του ύδατος της Γης, παραλείποντας τις σημαντικές επιπτώσεις της ανθρώπινης επιρροής.

Η ανθρώπινη διάσταση



Υδατικό ισοζύγιο

- Αρχή διατήρησης μάζας → το ισοζύγιο σε έναν όγκο αναφοράς είναι μηδενικό
- Όγκος αναφοράς
 - Λεκάνη απορροής
 - Ταμιευτήρας
 - Υπόγειος υδροφόρας
 - ...
- Αναλόγως τον όγκο αναφοράς και τη χρονική κλίμακα αφαιρούμε διεργασίες από το ισοζύγιο

Υδατικό ισοζύγιο

$$\frac{dS(t)}{dt} = I(t) - O(t)$$

S αποθήκευση

I εισροή

O εκροή

Υδατικό ισοζύγιο

$$\frac{dS(t)}{dt} = I(t) - O(t) \longrightarrow \frac{\Delta S}{\Delta t} = \bar{I} - \bar{O}$$

S αποθήκευση

I εισροή

O εκροή

Υδατικό ισοζύγιο

$$\frac{dS(t)}{dt} = I(t) - O(t) \longrightarrow \frac{\Delta S}{\Delta t} = \bar{I} - \bar{O} \longrightarrow \frac{S_2 - S_1}{\Delta t} = \frac{I_1 + I_2}{2} - \frac{O_1 + O_2}{2}$$

S αποθήκευση

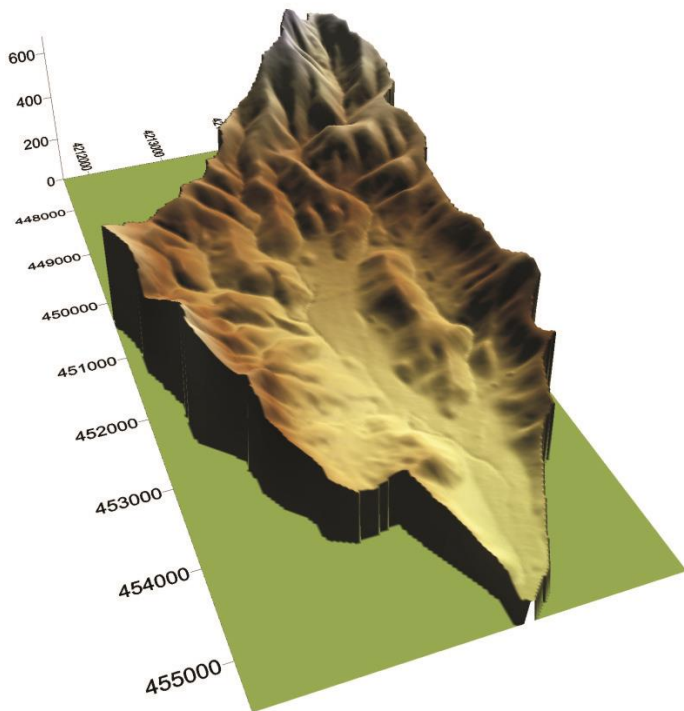
I εισροή

O εκροή

Λεκάνη απορροής

- Μέτρηση εξάτμισης σε ετήσια βάση

$$\Delta S = P - R - G - E - T$$

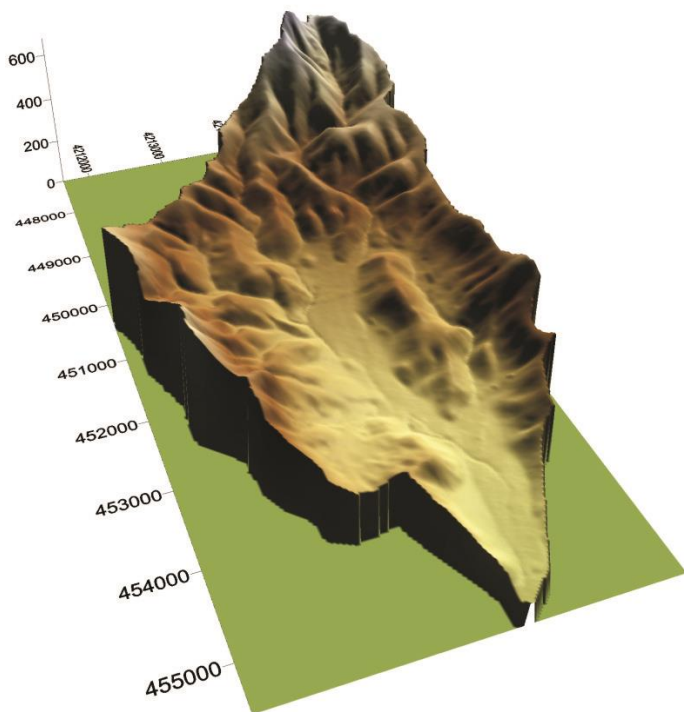


<i>S</i>	αποθήκευση
<i>P</i>	κατακρήμνιση
<i>R</i>	επιφανειακή ροή
<i>G</i>	υπόγεια ροή
<i>E</i>	εξάτμιση
<i>T</i>	διαπνοή

Λεκάνη απορροής

- Μέτρηση εξάτμισης σε ετήσια βάση

$$\Delta S = P - R - G - E - T$$



<i>S</i>	αποθήκευση
<i>P</i>	κατακρήμνιση
<i>R</i>	επιφανειακή ροή
<i>G</i>	υπόγεια ροή
<i>E</i>	εξάτμιση
<i>T</i>	διαπνοή

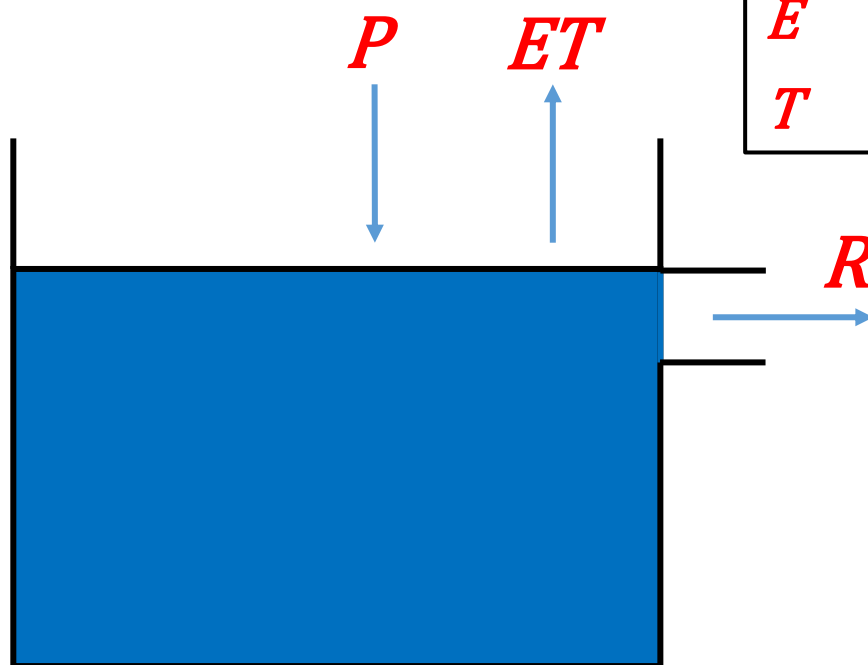
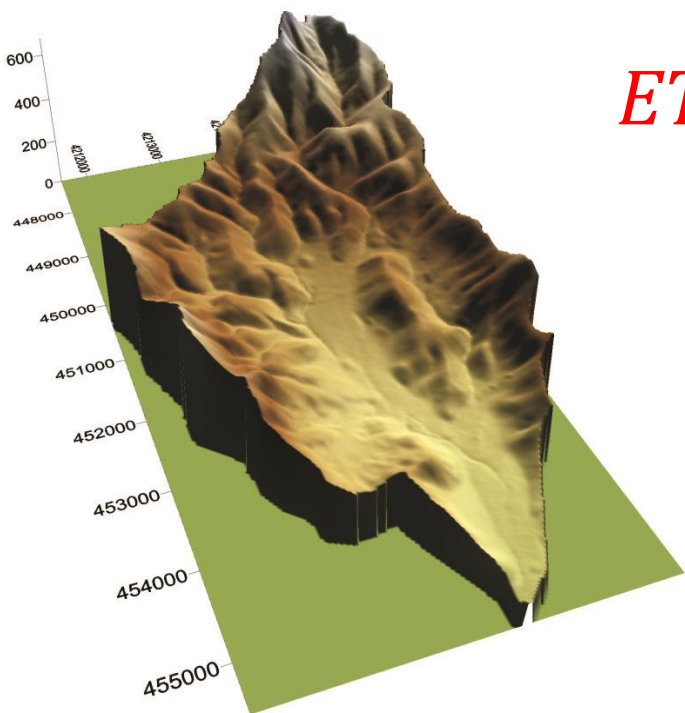
Λεκάνη απορροής

- Μέτρηση εξάτμισης σε ετήσια βάση

$$\Delta S = P - R - G - E - T$$

$$ET = P - R$$

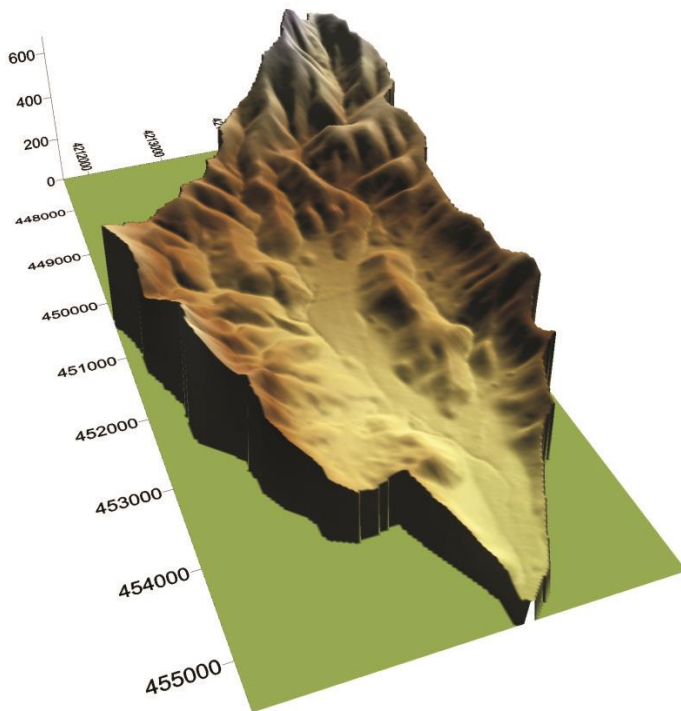
<i>S</i>	αποθήκευση
<i>P</i>	κατακρήμνιση
<i>R</i>	επιφανειακή ροή
<i>G</i>	υπόγεια ροή
<i>E</i>	εξάτμιση
<i>T</i>	διαπνοή



Λεκάνη απορροής

- Μέτρηση διήθησης σε πλημμυρικό γεγονός

$$\Delta S = P - R - G - E - T$$

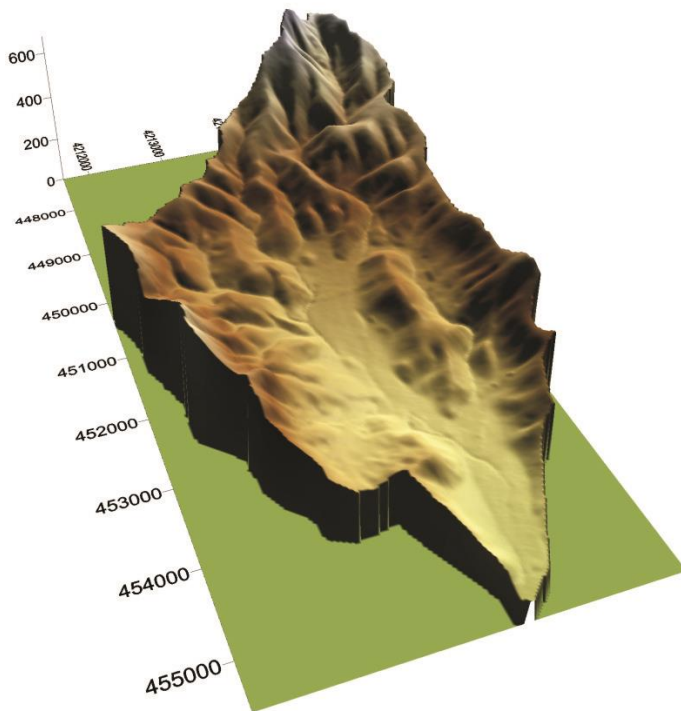


<i>S</i>	αποθήκευση
<i>P</i>	κατακρήμνιση
<i>R</i>	επιφανειακή ροή
<i>G</i>	υπόγεια ροή
<i>E</i>	εξάτμιση
<i>T</i>	διαπνοή

Λεκάνη απορροής

- Μέτρηση διήθησης σε πλημμυρικό γεγονός

$$\Delta S = P - R - G - E - T$$



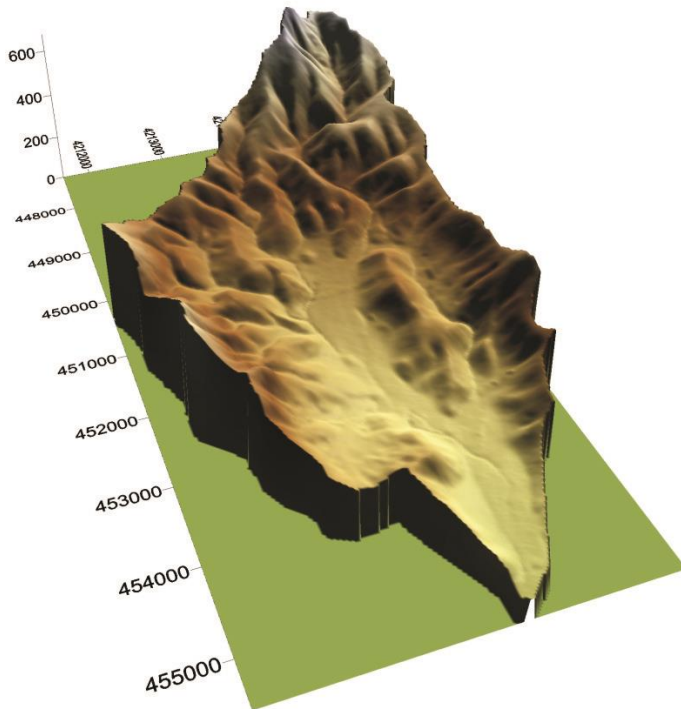
<i>S</i>	αποθήκευση
<i>P</i>	κατακρήμνιση
<i>R</i>	επιφανειακή ροή
<i>G</i>	υπόγεια ροή
<i>E</i>	εξάτμιση
<i>T</i>	διαπνοή

Λεκάνη απορροής

- Μέτρηση διήθησης σε πλημμυρικό γεγονός

$$\Delta S = P - R - G - E - T$$

$$\Delta S = P - R$$



<i>S</i>	αποθήκευση
<i>P</i>	κατακρήμνιση
<i>R</i>	επιφανειακή ροή
<i>G</i>	υπόγεια ροή
<i>E</i>	εξάτμιση
<i>T</i>	διαπνοή

Ταμιευτήρας

- Φράγματα → το πιο σημαντικό έργο αποθήκευσης
- Σχεδιασμός
 - Υδατικό ισοζύγιο
 - Όγκος → υπερετήσια βάση
 - Υπερχειλιστής → ακραίο γεγονός

Σώμα φράγματος

- **Κατηγορία I**

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

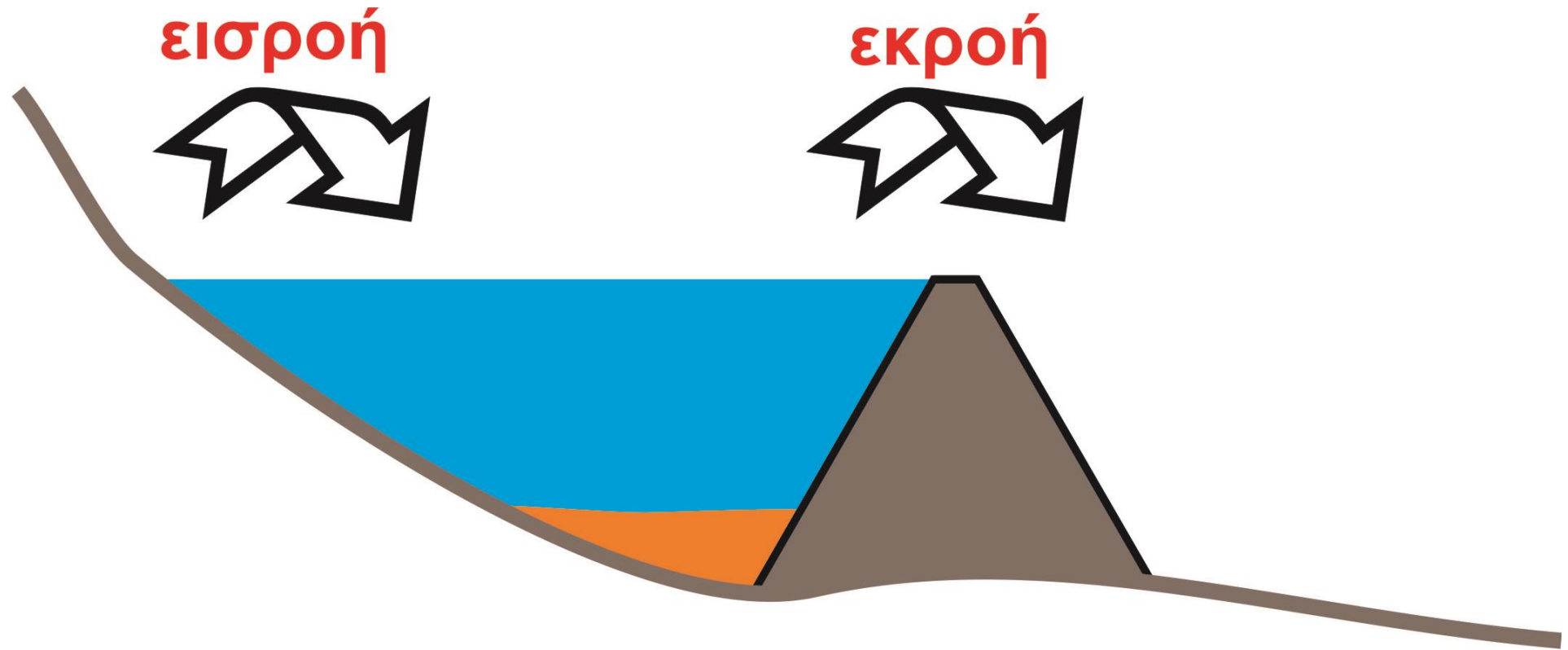
- **Κατηγορία II**

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

- **Κατηγορία III**

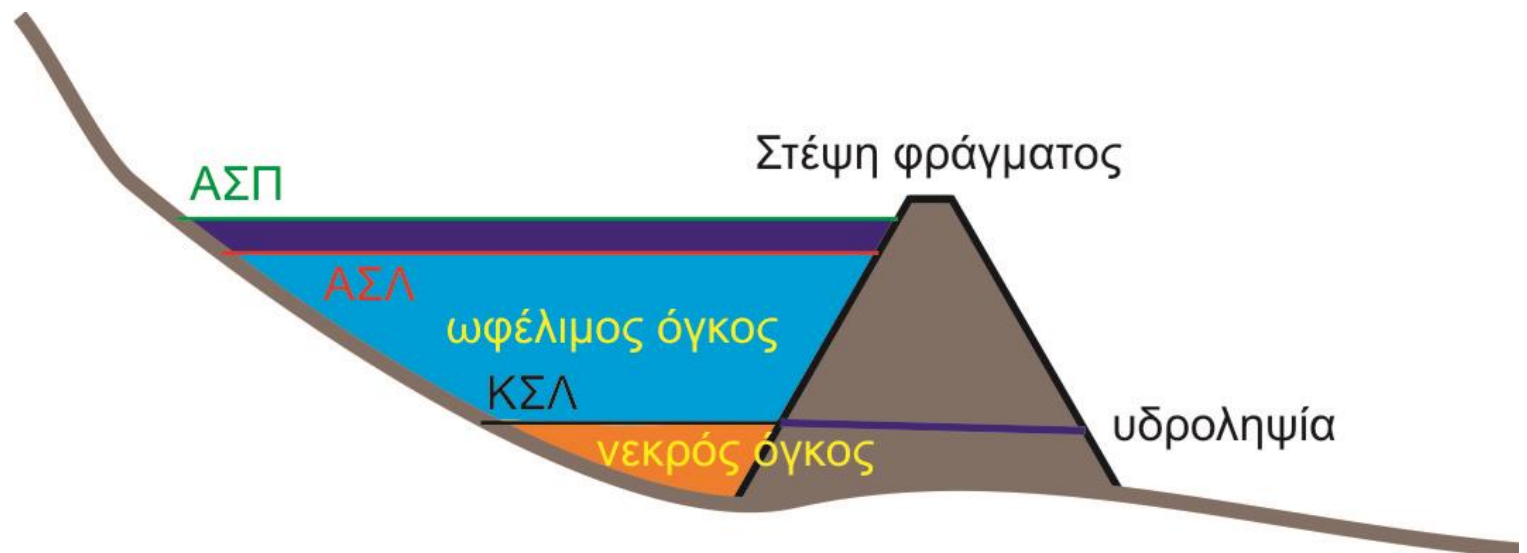
- Ό,τι δεν εντάσσεται στις κατηγορίες I, II

Ταμιευτήρας



Στάθμες

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



Ισοζύγιο ταμειευτήρα

$$\Delta S = P + Q - R - G - E - T$$

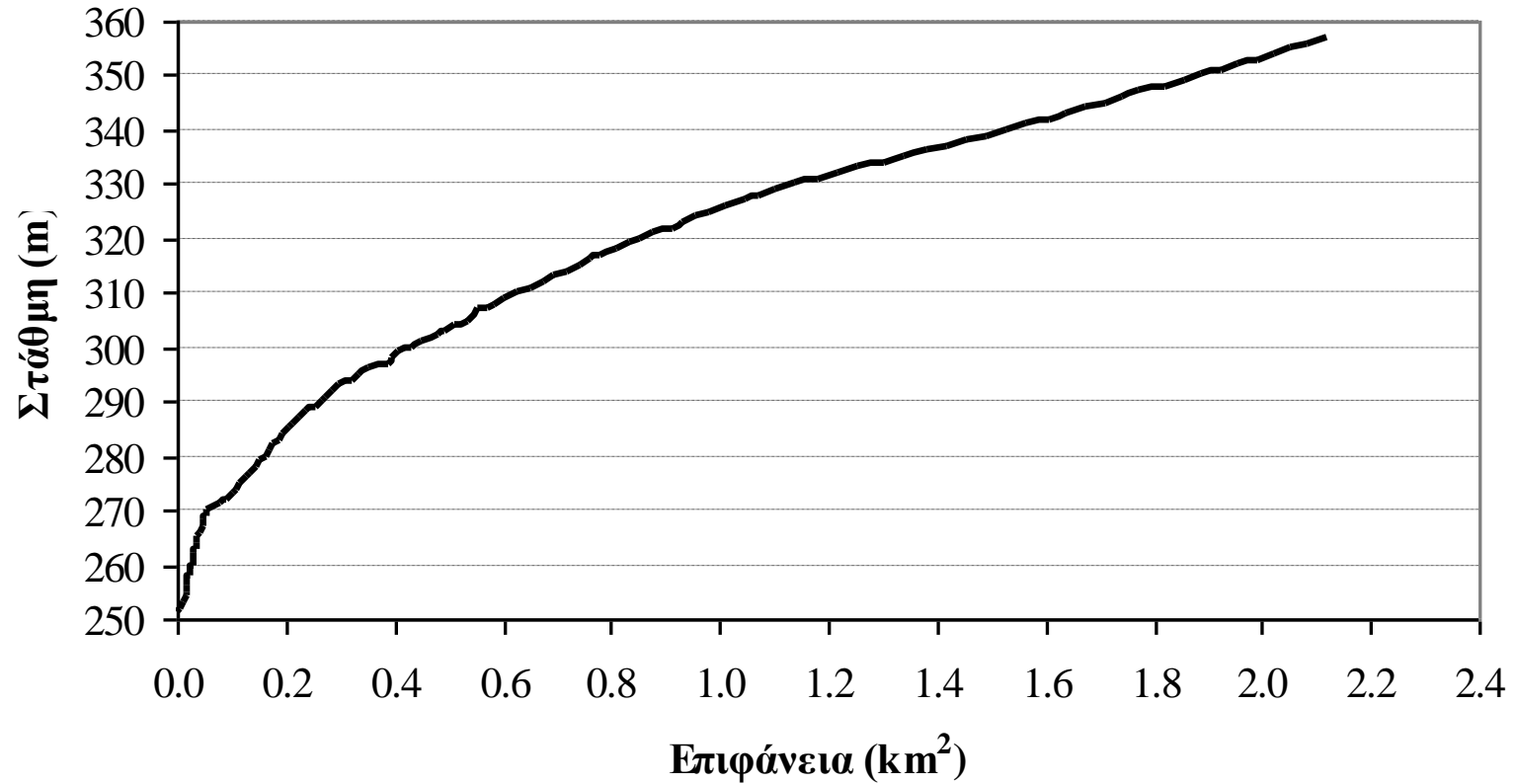
<i>S</i>	αποθήκευση
<i>P</i>	κατακρήμνιση
<i>Q</i>	εισροή
<i>R</i>	εκροή
<i>G</i>	υπόγεια ροή
<i>E</i>	εξάτμιση
<i>T</i>	διαπνοή

Αποθήκευση

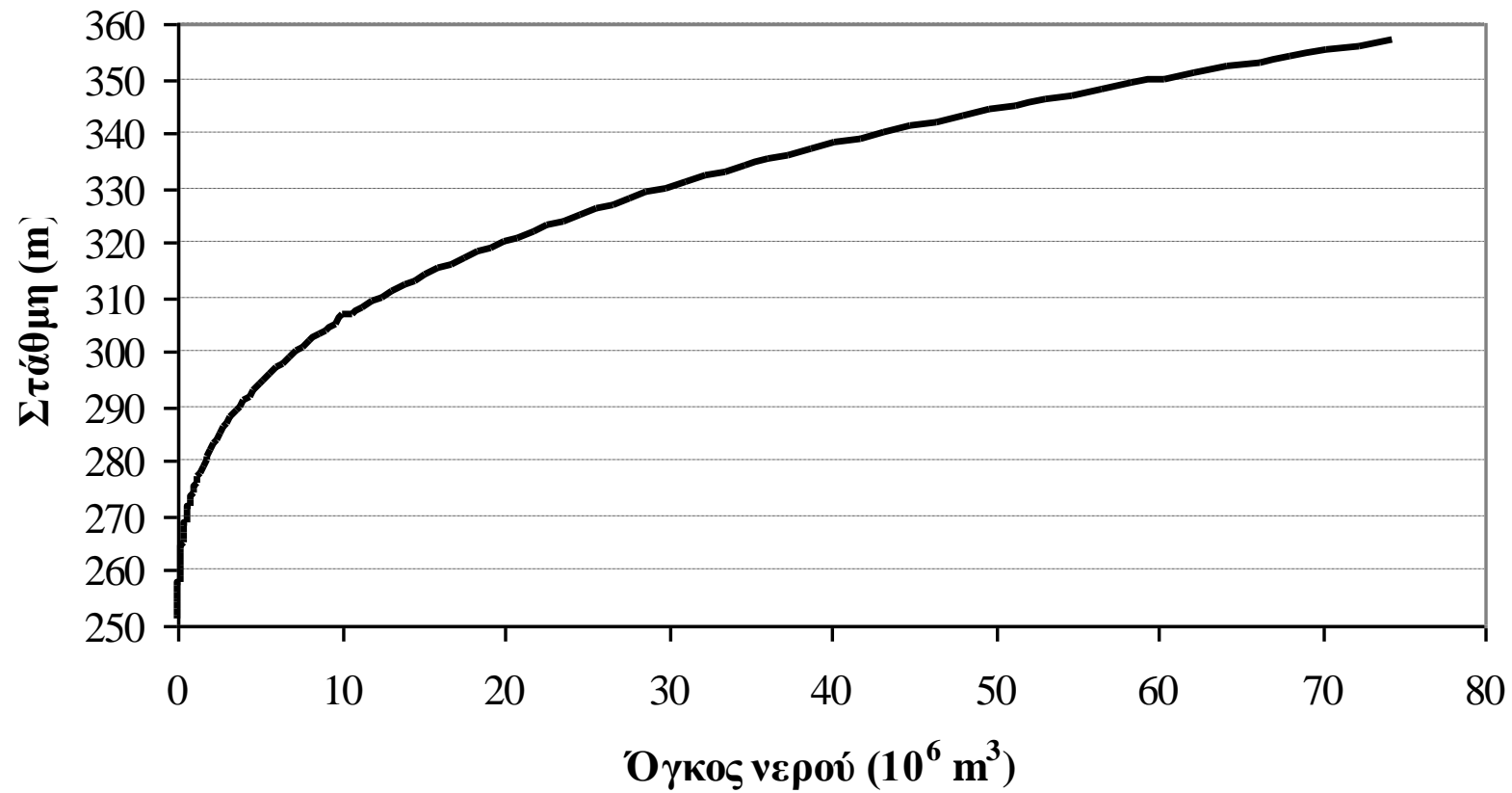
Καμπύλες

- **Σχέση στάθμης-επιφάνειας**
 - Κατακρήμνιση
 - Εξατμισοδιαπνοή
- **Σχέση στάθμης-όγκου**
 - Υπερχείλιση
 - Απόληψη
 - Υπόγεια ροή

Στάθμη - Επιφάνεια



Στάθμη - Όγκος

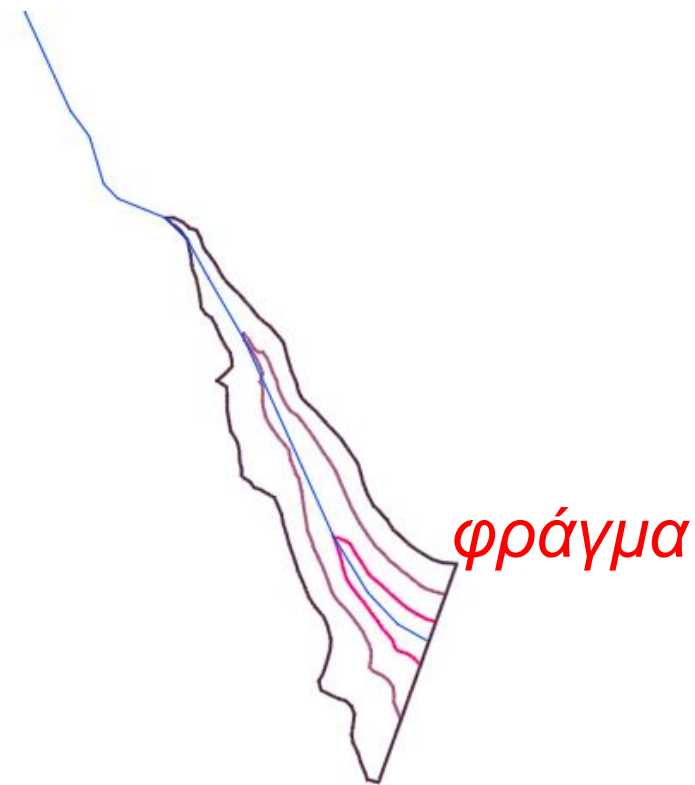
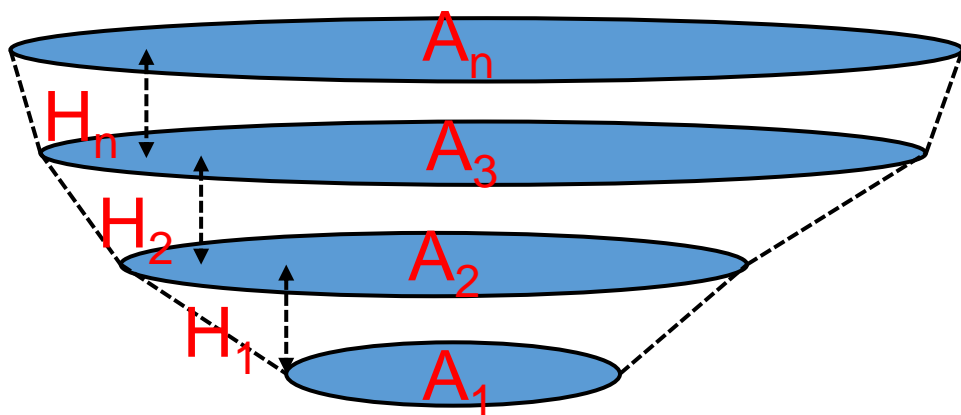


Αριθμητική ολοκλήρωση

- **Δεδομένα**

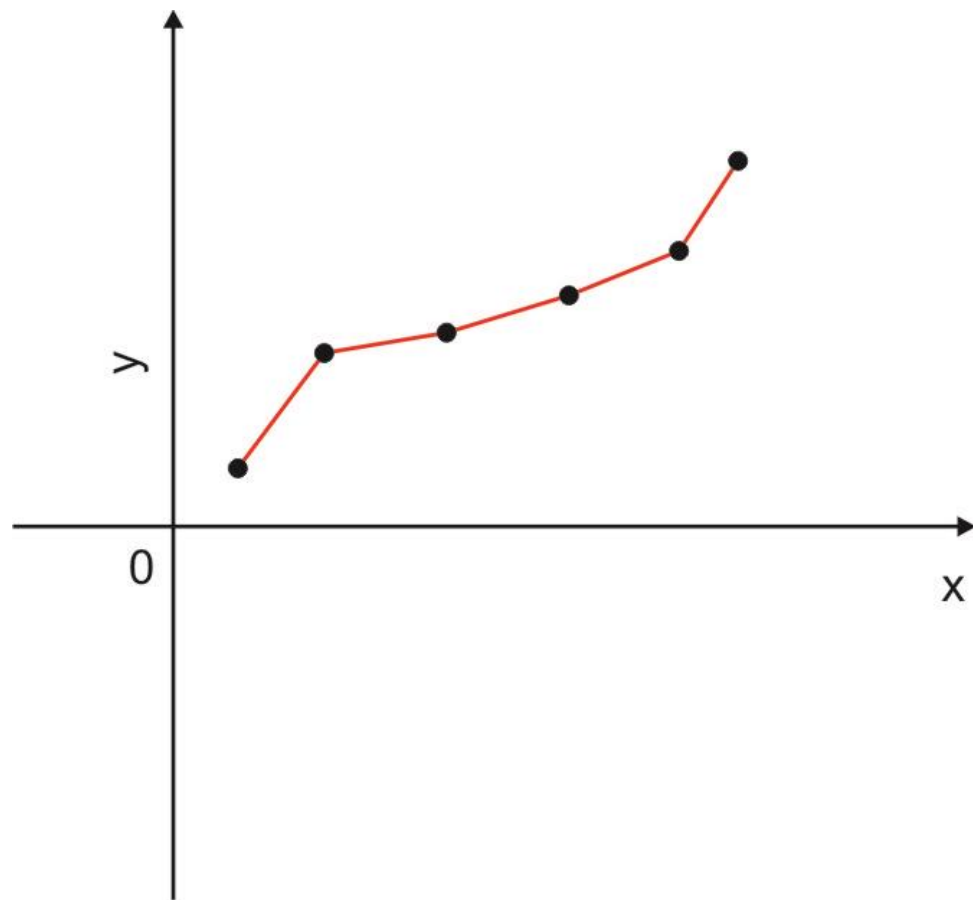
- Στάθμες
- Εμβαδά επιφάνειας

$$V = \left[\frac{A(H_i) + A(H_{i+1})}{2} \right] (H_{i+1} - H_i)$$

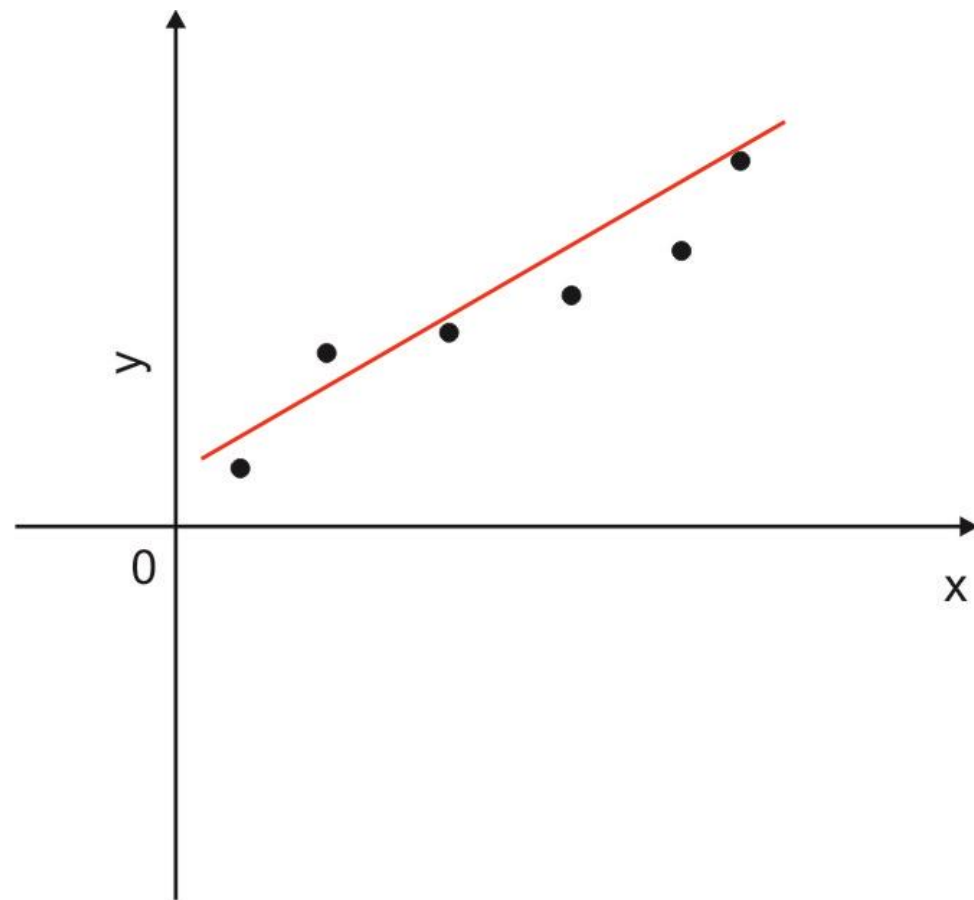


Πως κινούμαι;

Παρεμβολή



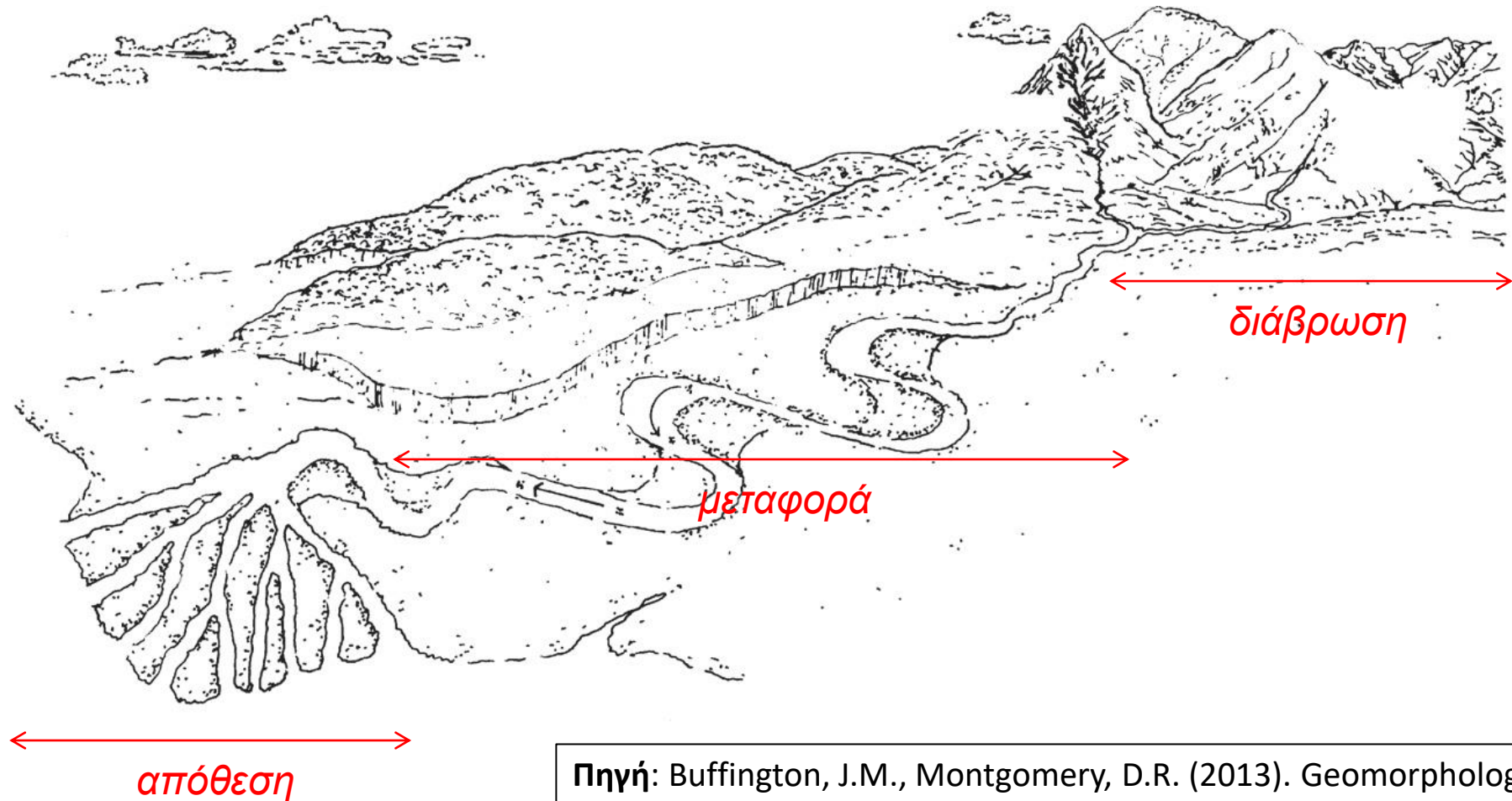
Παλινδρόμηση



Νεκρός όγκος

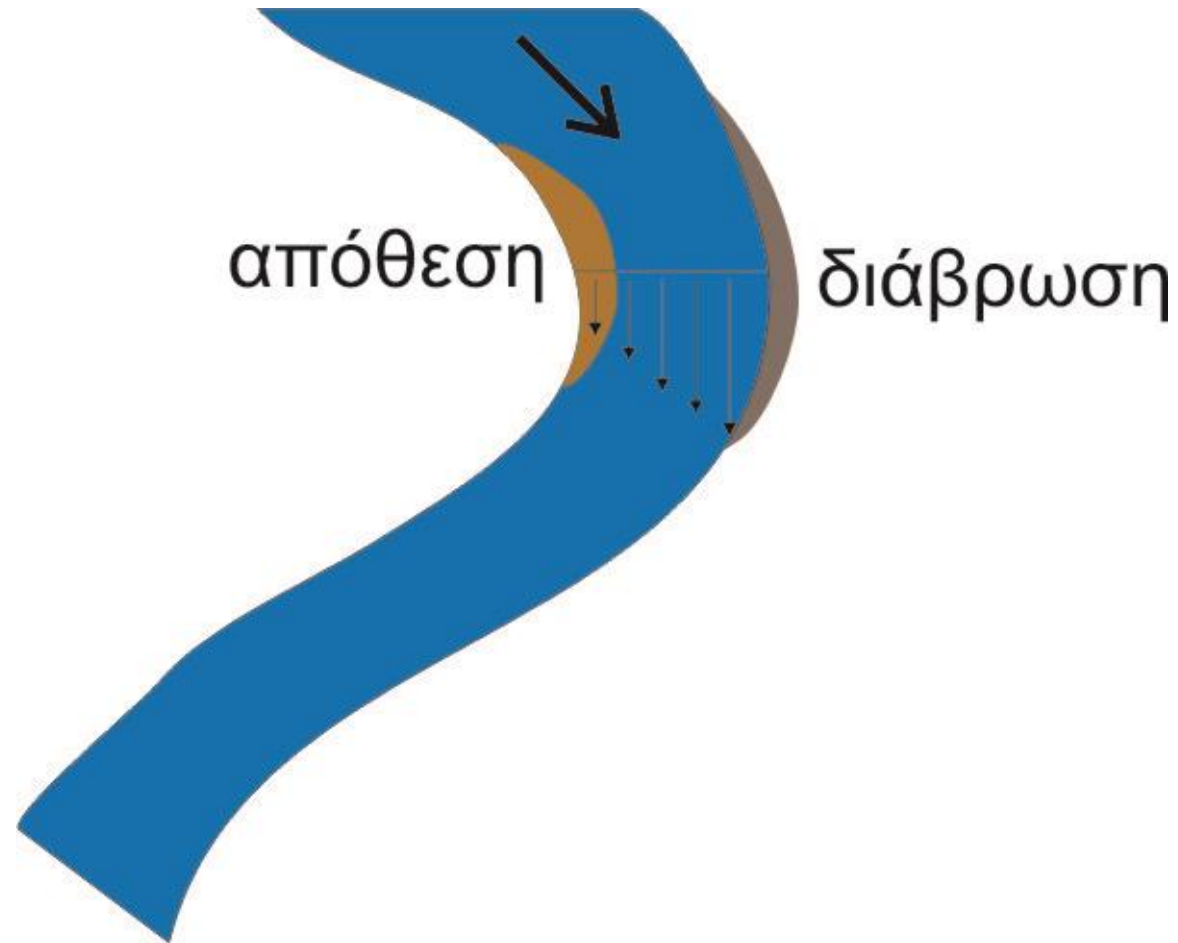
- **Είναι ο όγκος που εναποτίθεται στον πυθμένα του ταμιευτήρα λόγω διάβρωσης**
 - Απόσπαση
 - Μεταφορά
- **Στερεό φορτίο**
 - Απόπλυση
 - Φορτίο κοίτης σε αιώρηση
 - Φορτίο κοίτης σε σύρση

Μορφολογία ποταμών



Πηγή: Buffington, J.M., Montgomery, D.R. (2013). Geomorphological classification of rivers. In: Shroder, J. (Editor in chief), Wohl, E. (Ed.), *Treatise on Geomorphology*. Academic Press, San Diego, CA, USA, 9, Fluvial Geomorphology, 730-767.

Σε όλες τις κλίμακες!



Στερεοπορροή

- Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας → f(διαβρωτικότητας βροχής, διαβρωσιμότητας εδάφους, αναγλύφου, φυτοκάλυψης, ελέγχου διάβρωσης)

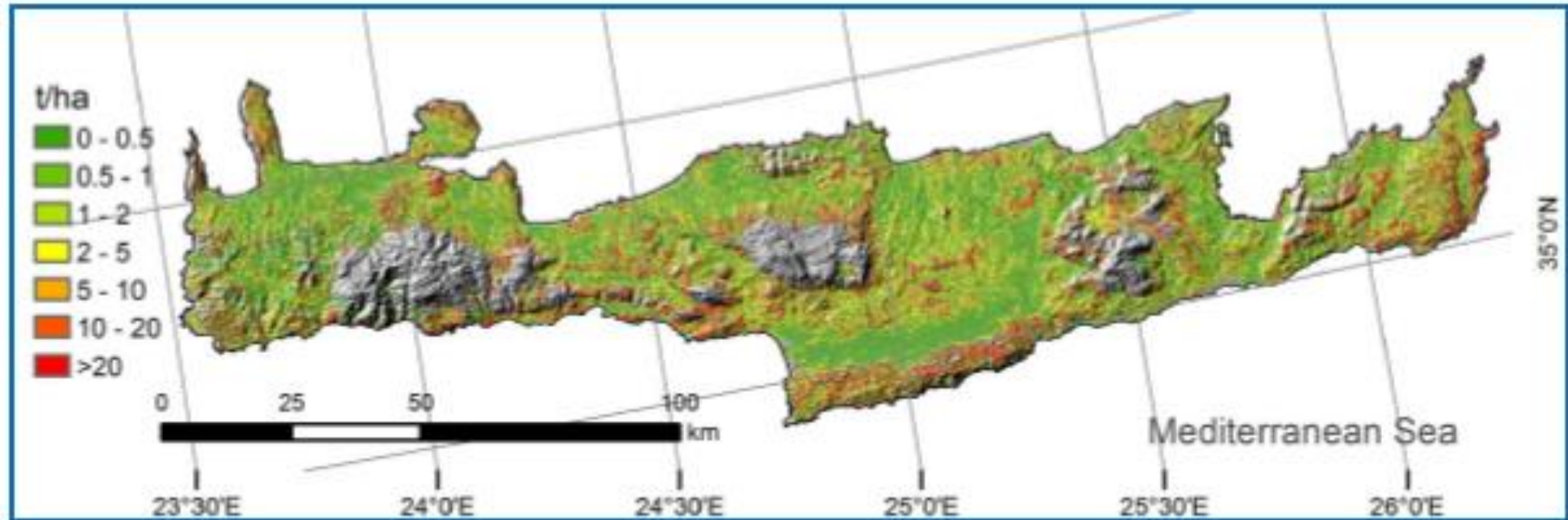
$$SL(t/ha/year) = 2.242 \cdot R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$$

- Κουτσογιάννης και Ταρλά, 1987 → f(διαβρωσιμότητας, κατακρήμνισης)

$$SL(t/km^2/year) = 15\gamma e^{3P}$$

- Χάρτες διάβρωσης

Χάρτες διάβρωσης



Συντελεστής γ

- Γεωλογικός συντελεστής

$$\gamma = \kappa_1 \rho_1 + \kappa_2 \rho_2 + \kappa_3 \rho_3$$

- Συντελεστές διαβρωσιμότητας κ

- Υψηλή (αλλούβια, φλύσχης) $\kappa_1=1.0$
- Μέτρια (Μάργες, ψαμμίτες, σχιστόλιθοι) $\kappa_2=0.5$
- Χαμηλή (ασβεστόλιθοι, δολομίτες, μεταμορφωμένα, εκρηξιγενή) $\kappa_3=0.1$

Λειτουργία ταμιευτήρα

- **Κατηγορίες ταμιευτήρα με βάση τη λειτουργία**
 - I Αποθέσεις σχεδόν πάντα βυθισμένες
 - II Σημαντικές πτώσεις στάθμης
 - III Άδειοι ταμιευτήρες
 - IV Ταμιευτήρες που δέχονται φορτίο κοίτης

Στερεοπορροή → Όγκος

- Αρχική πυκνότητα αποθέσεων (άργιλος, ιλύς, άμμος)

$$W_0 = W_C p_C + W_M p_M + W_S p_S$$

W_C	πυκνότητα αργίλου
p_C	ποσοστό αργίλου
W_M	πυκνότητα ιλύος
p_M	ποσοστό ιλύος
W_S	πυκνότητα άμμου
p_S	ποσοστό άμμου

- Τελική πυκνότητα μετά από T έτη

$$W_T = W_0 + 0.4343K \frac{T}{T-1} (\ln T) - 1$$

Πυκνότητες

- **I Αποθέσεις σχεδόν πάντα βυθισμένες**
 - $W_C=416 \text{ kg/m}^3$
 - $W_M=1200 \text{ kg/m}^3$
 - $W_S=1500 \text{ kg/m}^3$
- **II Σημαντικές πτώσεις στάθμης**
 - $W_C=561 \text{ kg/m}^3$
 - $W_M=1400 \text{ kg/m}^3$
 - $W_S=1500 \text{ kg/m}^3$
- **III Άδειοι ταμιευτήρες**
 - $W_C=641 \text{ kg/m}^3$
 - $W_M=1500 \text{ kg/m}^3$
 - $W_S=1500 \text{ kg/m}^3$
- **IV Ταμιευτήρες που δέχονται φορτίο κοίτης**
 - $W_C=961 \text{ kg/m}^3$
 - $W_M=1700 \text{ kg/m}^3$
 - $W_S=1500 \text{ kg/m}^3$

Παράγοντας K

- **I Αποθέσεις σχεδόν πάντα βυθισμένες**

- $K_C=256 \text{ kg/m}^3$
- $K_M=91 \text{ kg/m}^3$
- $K_S=0 \text{ kg/m}^3$

- **II Σημαντικές πτώσεις στάθμης**

- $K_C=135 \text{ kg/m}^3$
- $K_M=29 \text{ kg/m}^3$
- $K_S=0 \text{ kg/m}^3$

$$K = K_C \rho_C + K_M \rho_M + K_S \rho_S$$

- **III Άδειοι ταμιευτήρες**

- $K_C=0 \text{ kg/m}^3$
- $K_M=0 \text{ kg/m}^3$
- $K_S=0 \text{ kg/m}^3$

- **IV Ταμιευτήρες που δέχονται φορτίο κοίτης**

- $K_C=0 \text{ kg/m}^3$
- $K_M=0 \text{ kg/m}^3$
- $K_S=0 \text{ kg/m}^3$

Εφαρμογή 1

- Λεκάνη απορροής με έκταση $A=123.57 \text{ km}^2$, αποτελείται κατά 45% από υλικά υψηλής διαβρωσιμότητας, 35% από υλικά μέτριας διαβρωσιμότητας και 20% από υλικά χαμής διαβρωσιμότητας. Αν η ετήσια μέση βροχόπτωση είναι 457 mm να βρεθεί ο νεκρός όγκος αν τα ποσοστά του εδαφικού υλικού στη λεκάνη είναι: Άργιλος 30%, Ιλύς 45%, Άμμος 25% και η ωφέλιμη ζωή του έργου είναι $T=100$ έτη. Να θεωρηθεί ότι η λειτουργία του ταμιευτήρα ανήκει στην κατηγορία I.

Κατακρήμνιση

Κατακρήμνιση

- Βρέχει απευθείας στον καθρέφτη του ταμιευτήρα
- Όγκος νερού = ύψος βροχής x έκταση ταμιευτήρα
- Απαραίτητη η καμπύλη στάθμης - επιφάνειας

$$V = hA$$

Εφαρμογή 2

- Σε ταμιευτήρα με έκταση $A=2.57 \text{ km}^2$ πέφτει ετήσια βροχή ύψους $h=457 \text{ mm}$. Αν η στάθμη πριν τη βροχή είναι ίση με $H=261.5 \text{ m}$ και η έκταση του ταμιευτήρα παραμένει σταθερή, να βρεθεί η στάθμη μετά από ένα χρόνο αγνοώντας όλες τις άλλες εισροές/εκροές
- Η καμπύλη στάθμης-όγκου είναι η ακόλουθη:
 - $H=260 \text{ m} \rightarrow V=12.1 \times 10^6 \text{ m}^3$
 - $H=261 \text{ m} \rightarrow V=12.9 \times 10^6 \text{ m}^3$
 - $H=262 \text{ m} \rightarrow V=14.2 \times 10^6 \text{ m}^3$
 - $H=263 \text{ m} \rightarrow V=15.3 \times 10^6 \text{ m}^3$
 - $H=264 \text{ m} \rightarrow V=15.8 \times 10^6 \text{ m}^3$

Εισροή

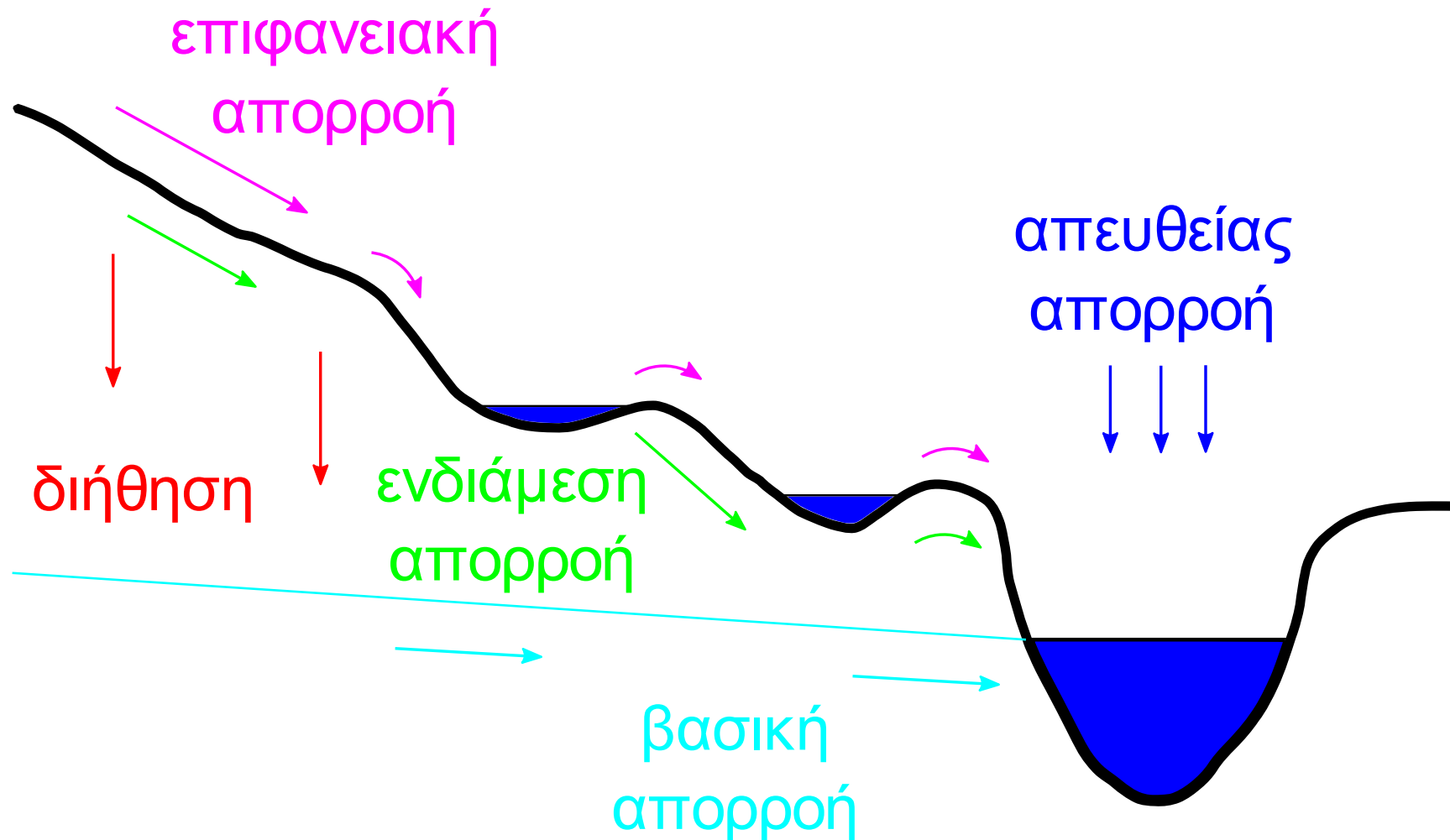
Εισροή

- Εισροή από τον ποταμό/ποταμούς που απορρέουν στον ταμιευτήρα
- Βροχή στη λεκάνη απορροής
- Απορροή μέσω του υδρογραφικού δικτύου
- Μοντέλα βροχόπτωσης-απορροής

Μέγεθος λεκανών

- **Μικρό μέγεθος**
 - μέχρι 5~10 km²
- **Μεσαίο μέγεθος**
 - μέχρι 100~5000 km²
- **Μεγάλο μέγεθος**
 - μεγάλα ποτάμια συστήματα

Απορροή



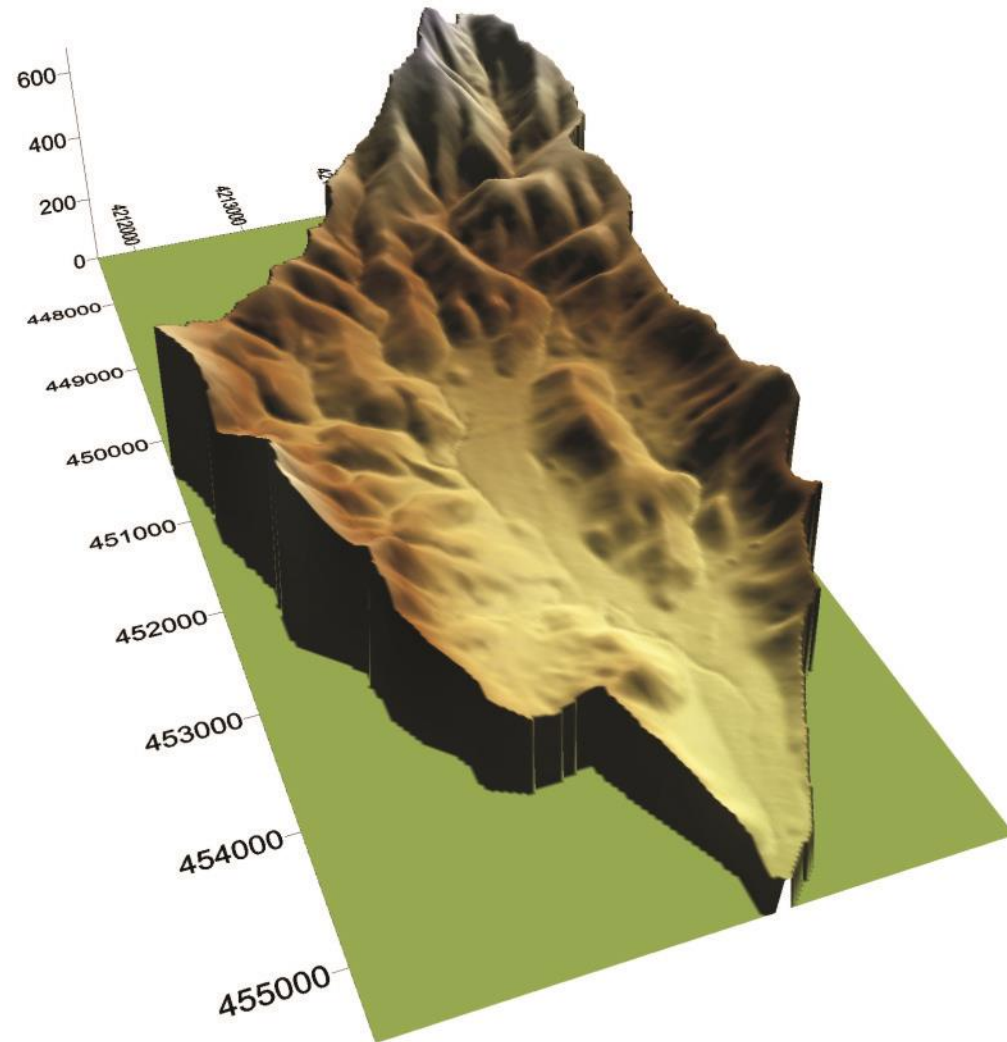
Απορροή

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

Χρόνος συγκέντρωσης

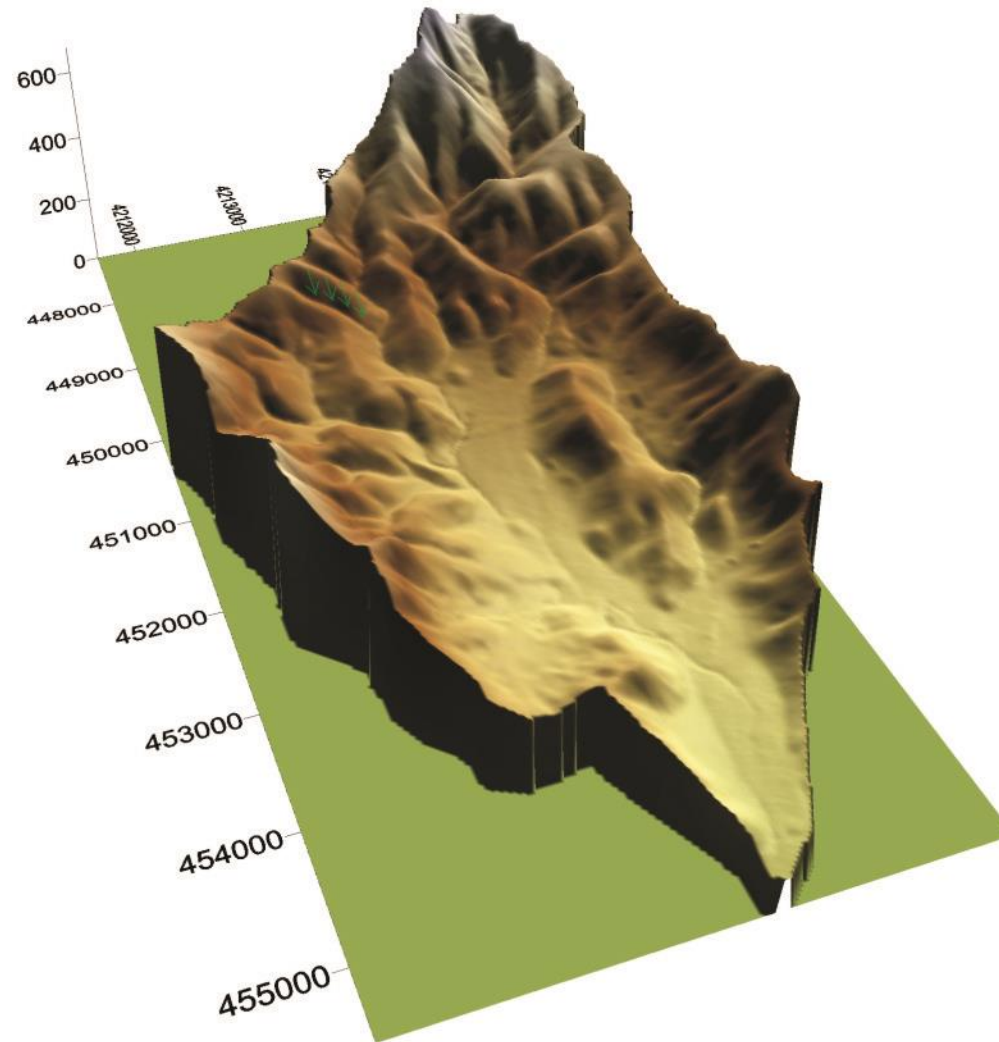
- Ο χρόνος που απαιτείται για να φτάσει η σταγόνα της βροχής από το πιο απομακρυσμένο σημείο της λεκάνης μέχρι την έξοδο αυτής
 - Επιφάνεια εδάφους
 - Μισγάγγεια
 - Υδατόρεμα

Διαδρομή νερού



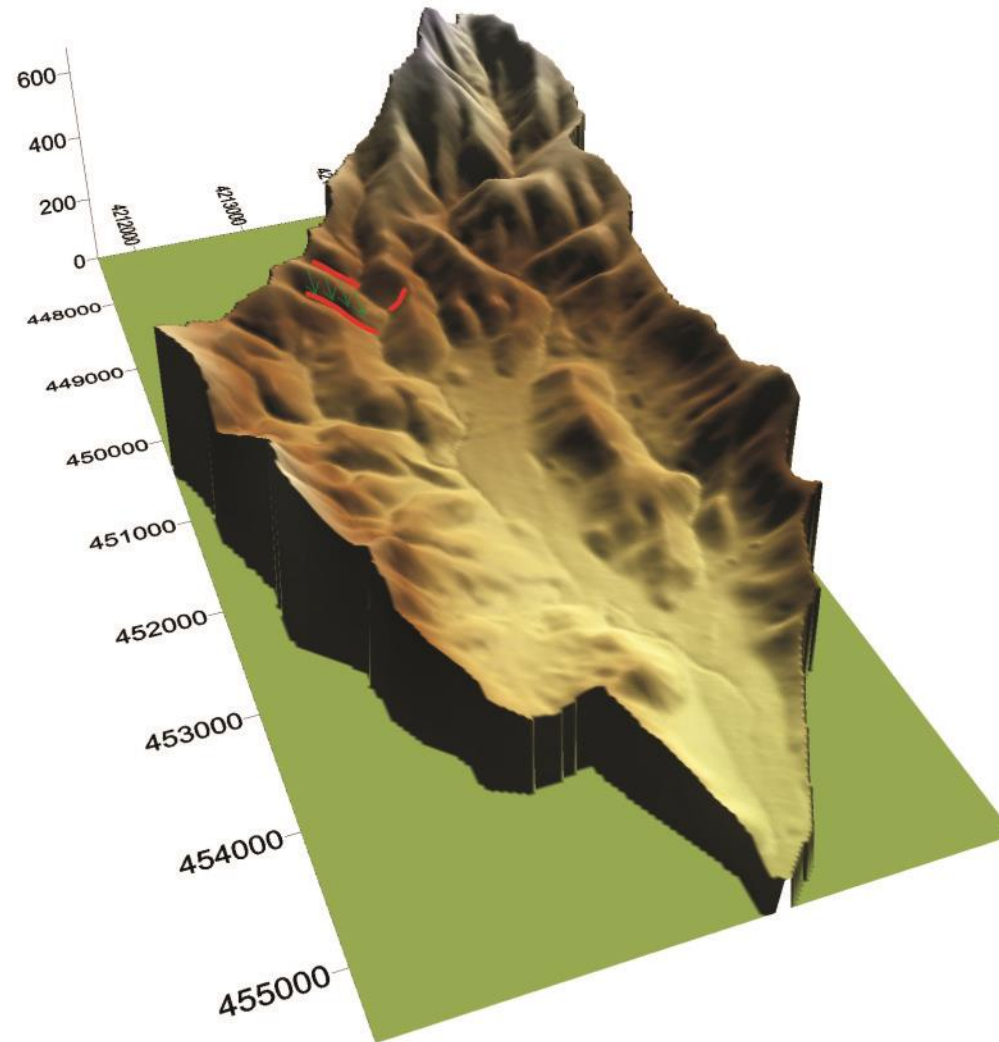
Διαδρομή νερού

- Έδαφος



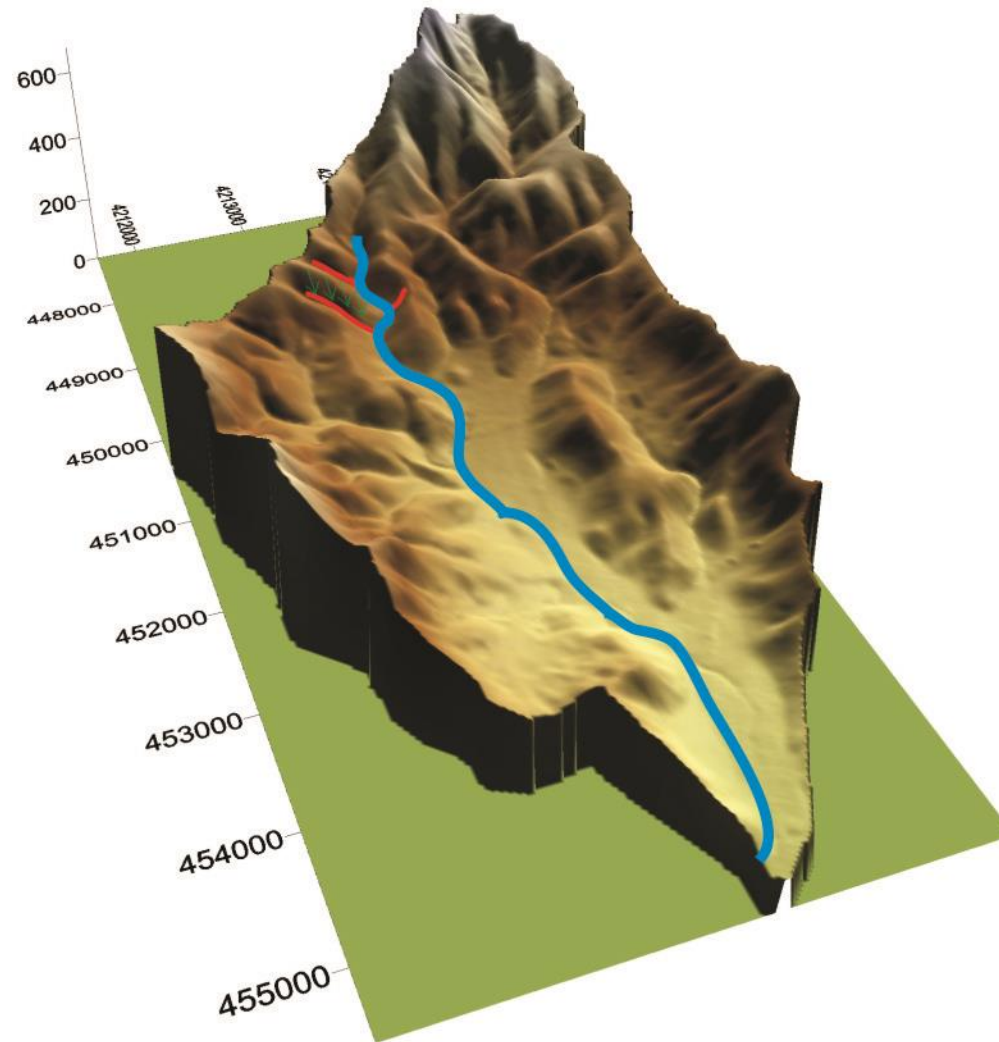
Διαδρομή νερού

- Έδαφος
- Μισγάγγεια



Διαδρομή νερού

- Έδαφος
- Μισγάγγεια
- Κυρίως ρέμα



Μισγάγγειες



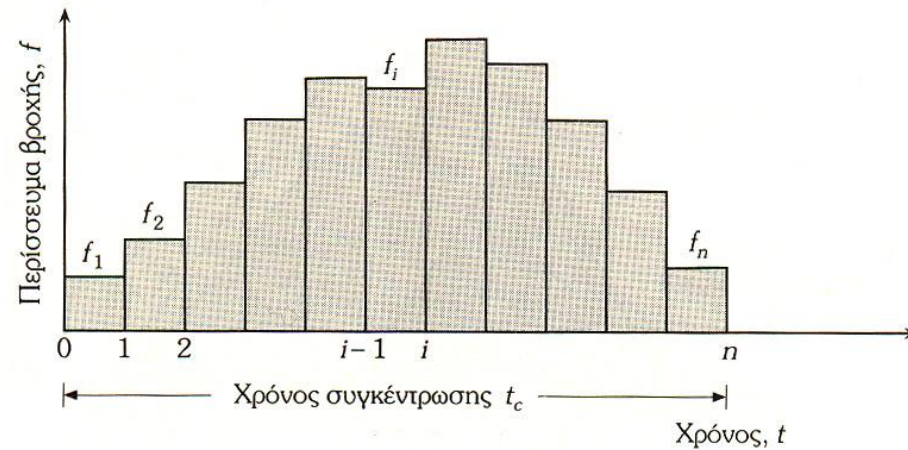
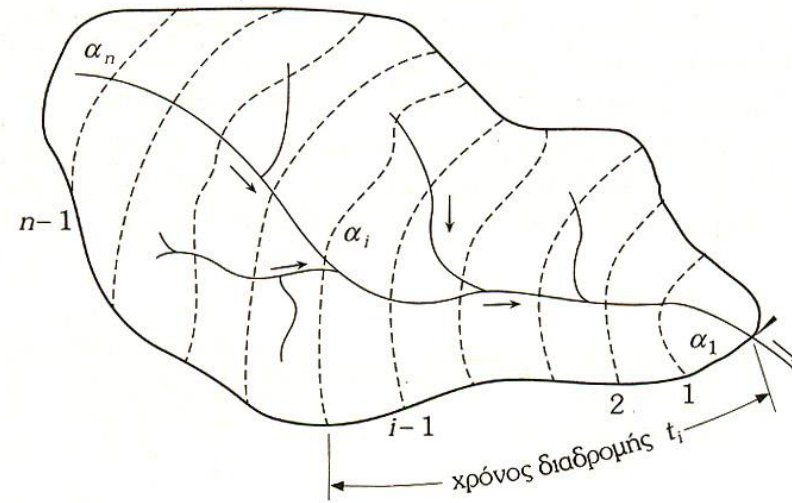
Η γέννηση ενός υδατορέματος



Υδατόρεμα



Χρόνος συγκέντρωσης



Εμπειρικές σχέσεις

- **Kirpich (min)**

$$t_c = 0.02L^{0.77} S^{-0.385}$$

L	απόσταση κατά μήκος του κυρίου ρέματος από το πιο απομακρυσμένο σημείο μέχρι την έξοδο της λεκάνης (m)
S	μέση κλίση κατά μήκος της διαδρομής (m/m)

- **Giandotti (h)**

$$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{\Delta H}}$$

- ...

A	εμβαδόν λεκάνης απορροής (km ²)
L	μήκος κυρίου ρέματος (km)
ΔH	υψομετρική διαφορά μεταξύ μέσου υψομέτρου λεκάνης και της κοίτης του ρέματος στην έξοδο της λεκάνης (m)

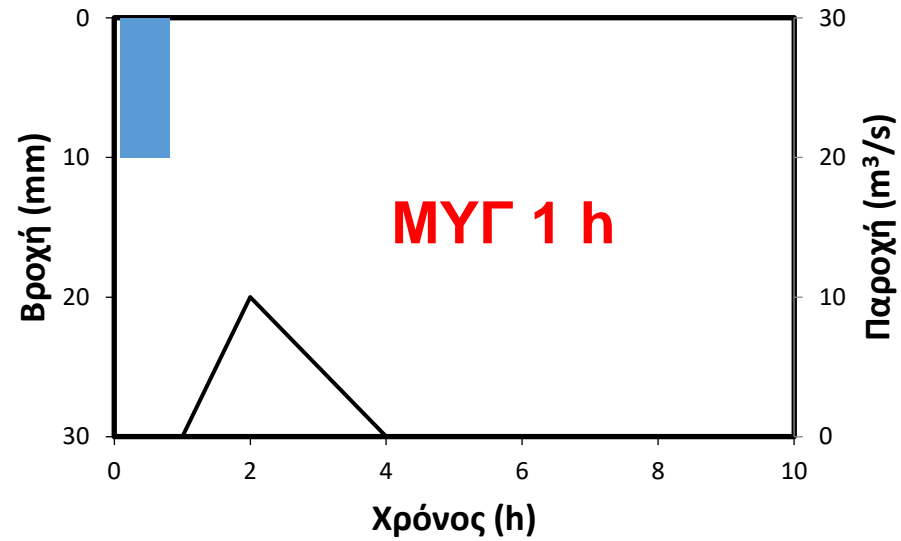
Μοντέλα βροχόπτωσης-απορροής

- **Μικρές χρονικές κλίμακες** → πλημμυρικό γεγονός
 - Ορθολογική μέθοδος
 - ΜΥΓ
 - Μοντέλα φυσικής βάσης
- **Μεγάλες χρονικές κλίμακες** → χρονοσειρές βροχής
 - ΜΥΓ
 - Μοντέλα αποθήκευσης
 - Συντελεστής απορροής

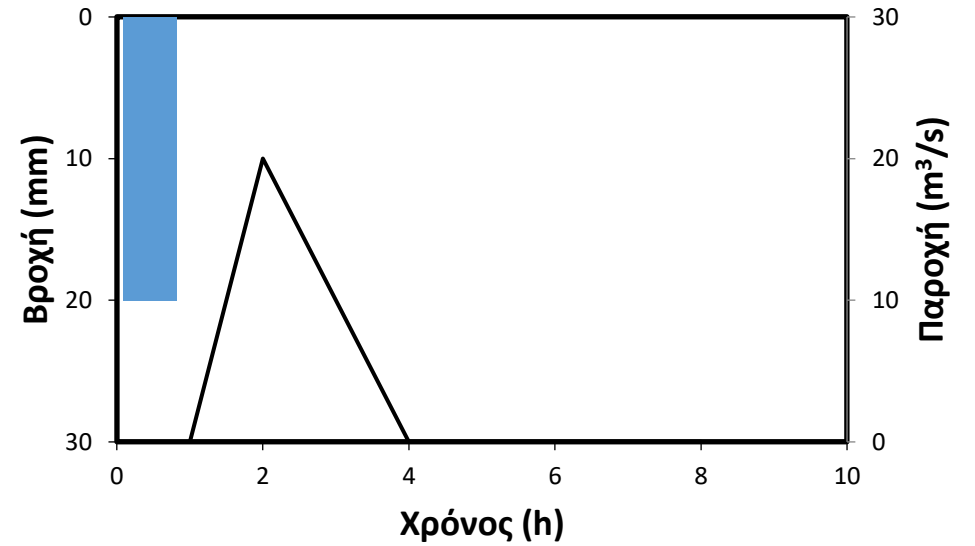
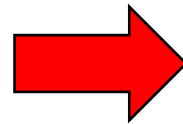
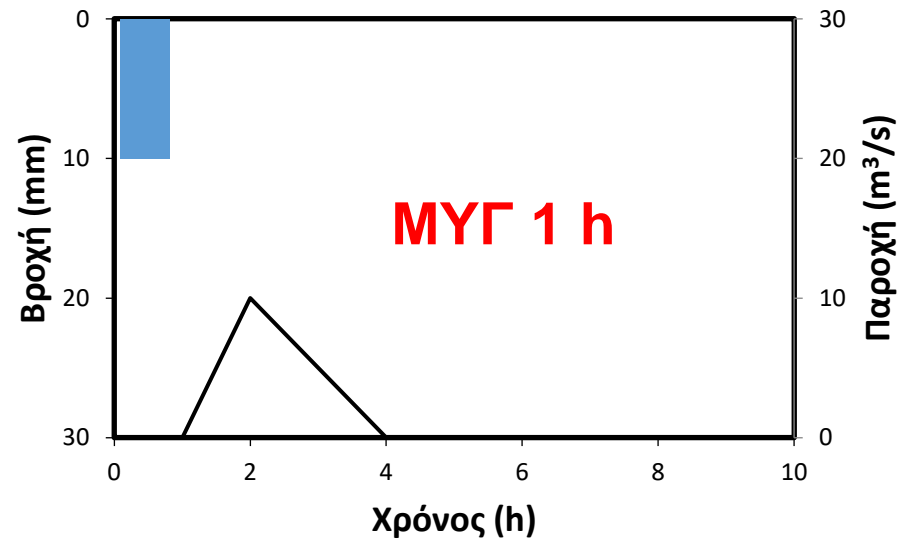
Μοναδιαίο Υδρογράφημα

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

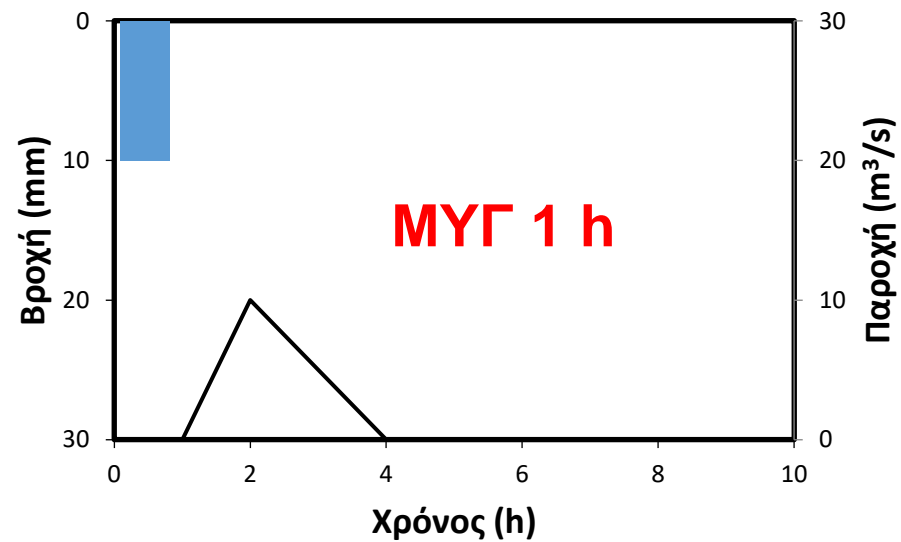
Αρχή της αναλογίας



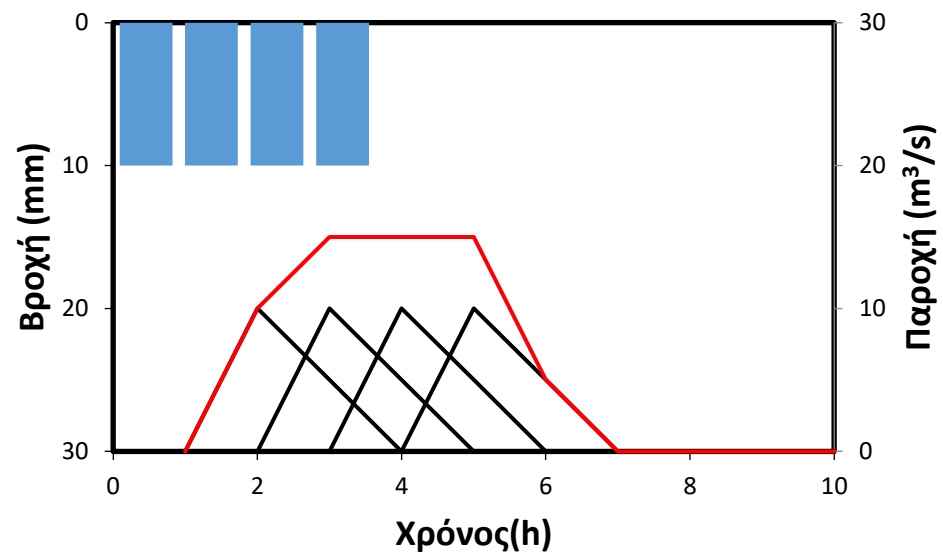
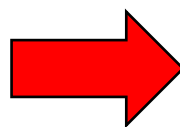
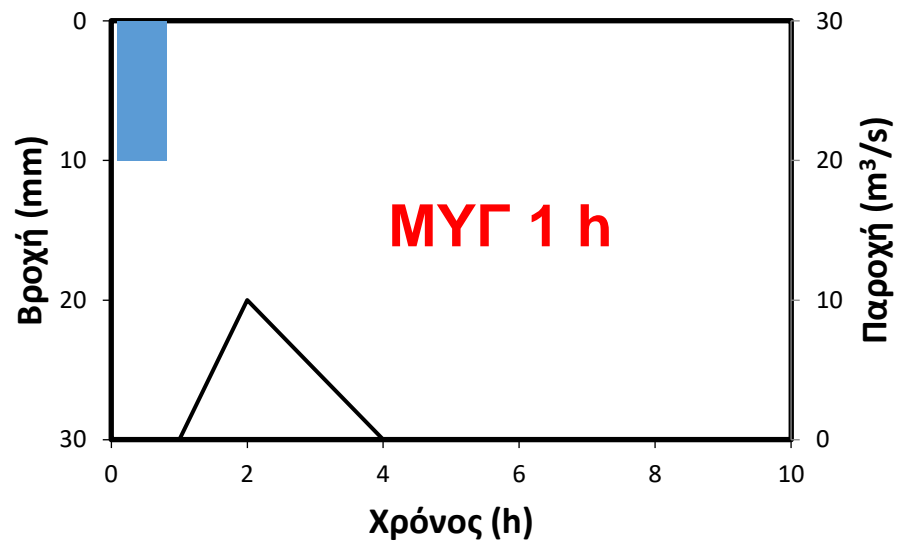
Αρχή της αναλογίας



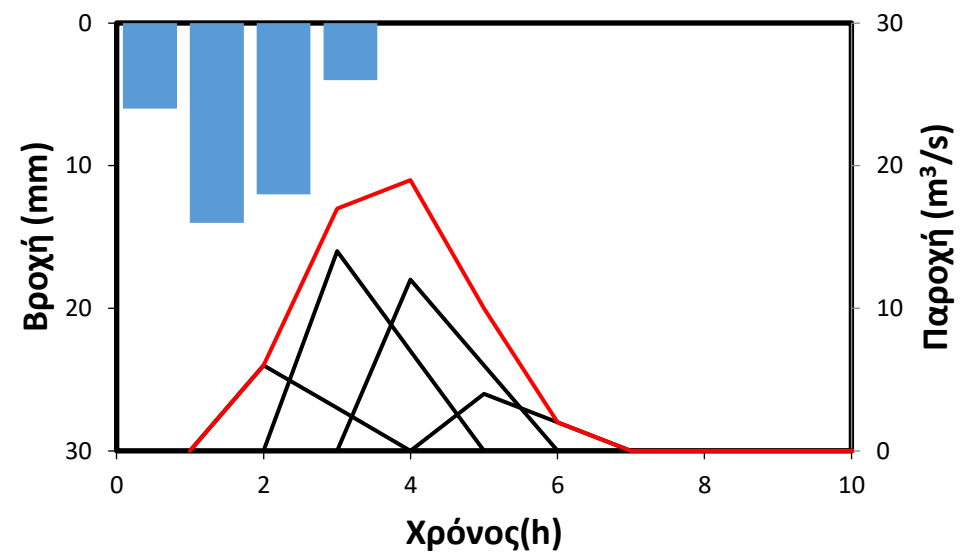
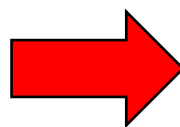
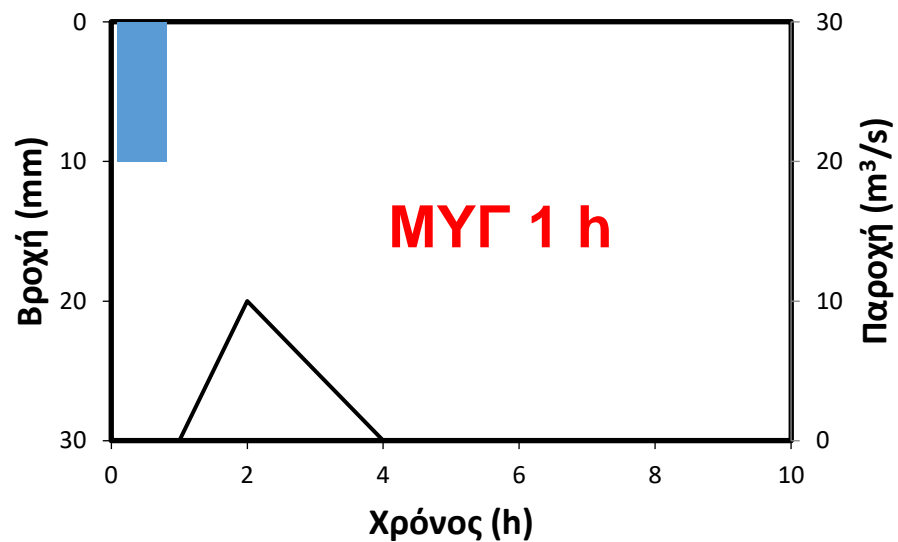
Αρχή της επαλληλίας



Αρχή της επαλληλίας



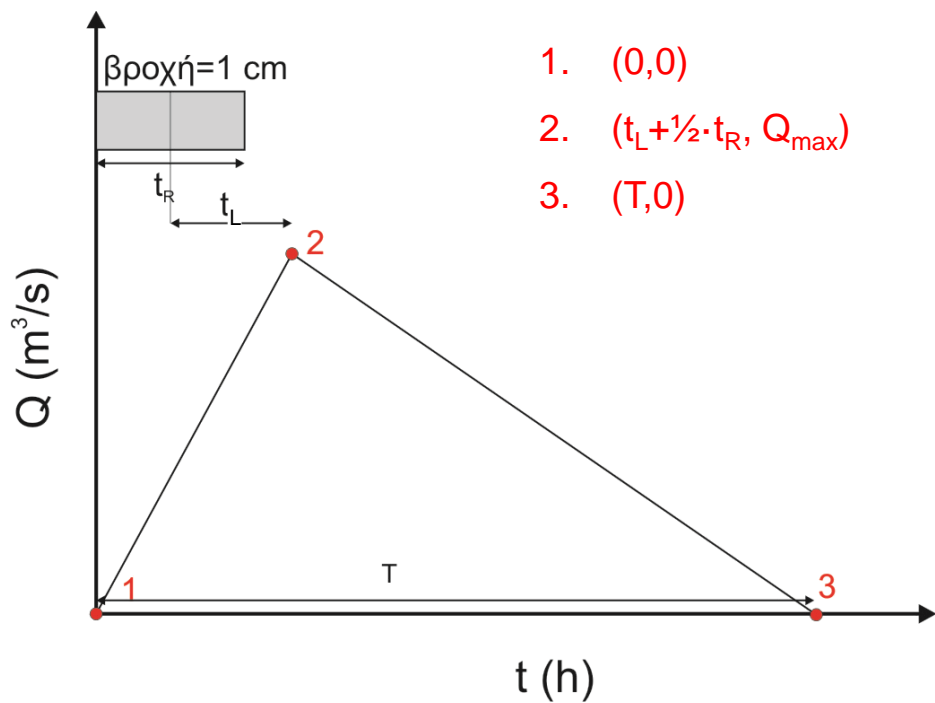
Σύνθετη βροχόπτωση



Εκτίμηση ΜΥΓ

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

ΣΥΝΘΕΤΙΚΟ ΜΥΓ SCS



$$t_L = 0.6t_c$$

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

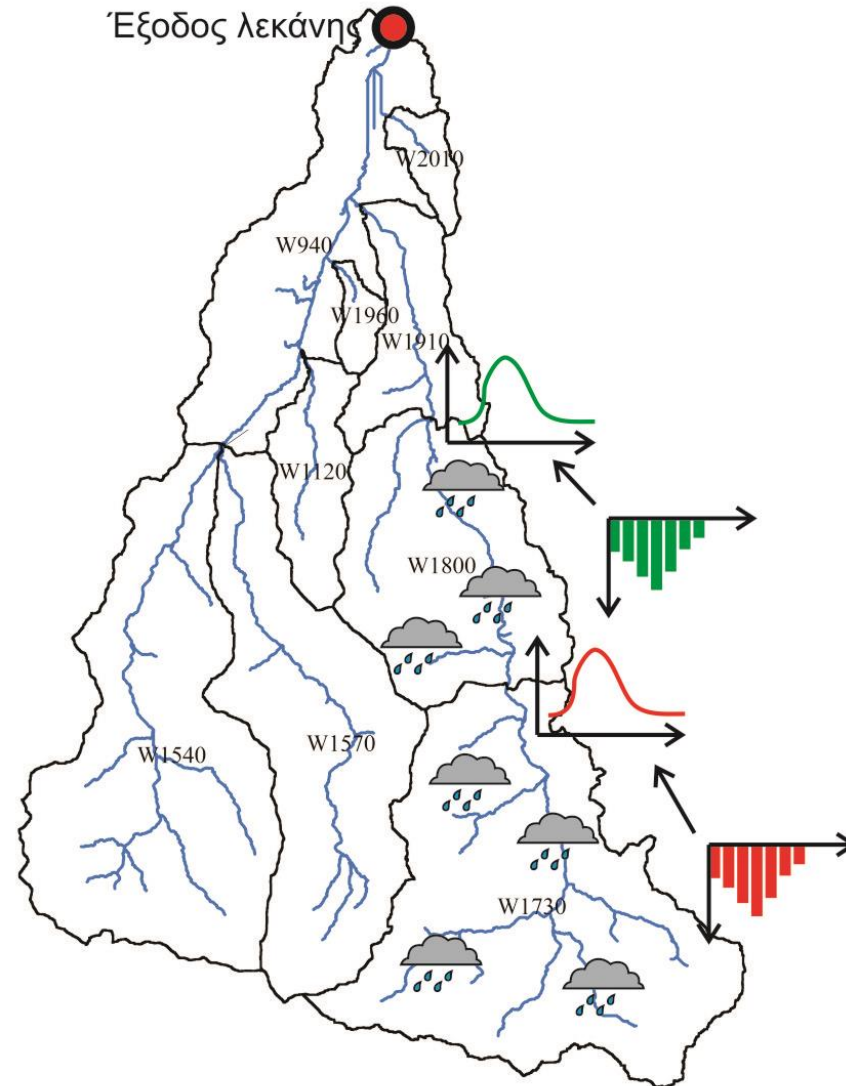
$$T = 2.67 \left(t_L + \frac{t_R}{2} \right)$$

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

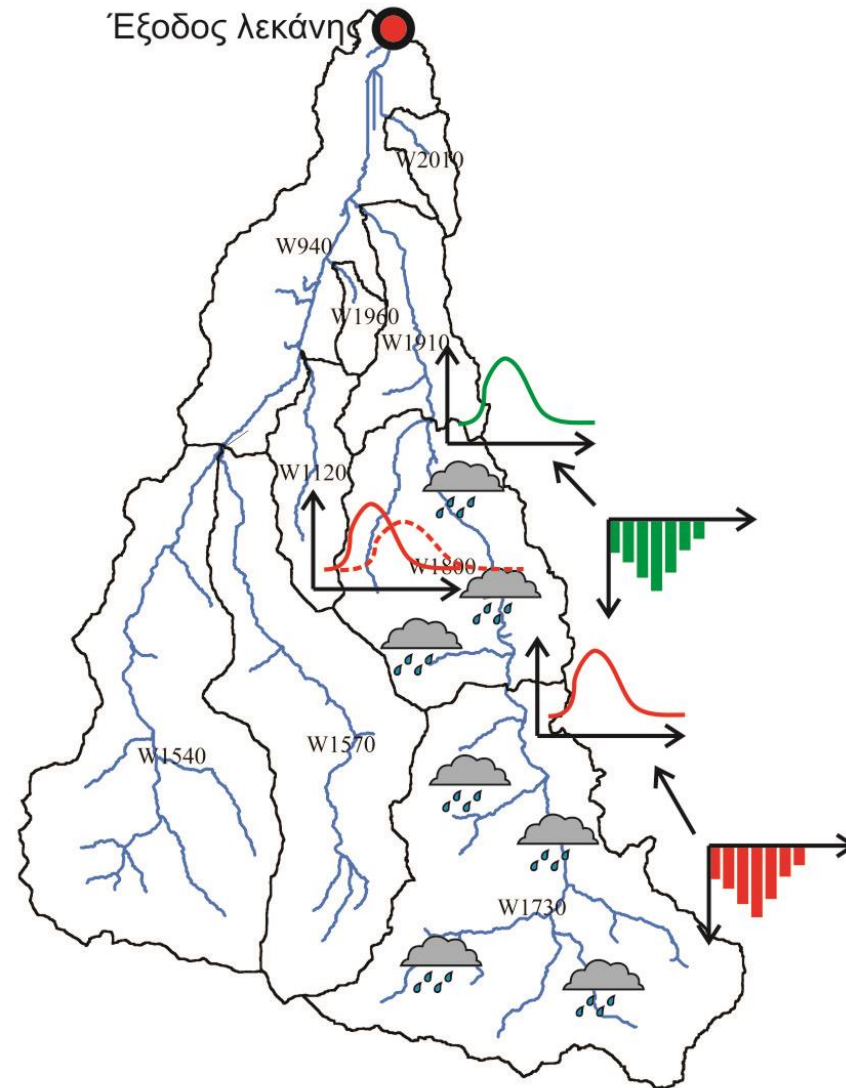
Υπολεκάνες

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

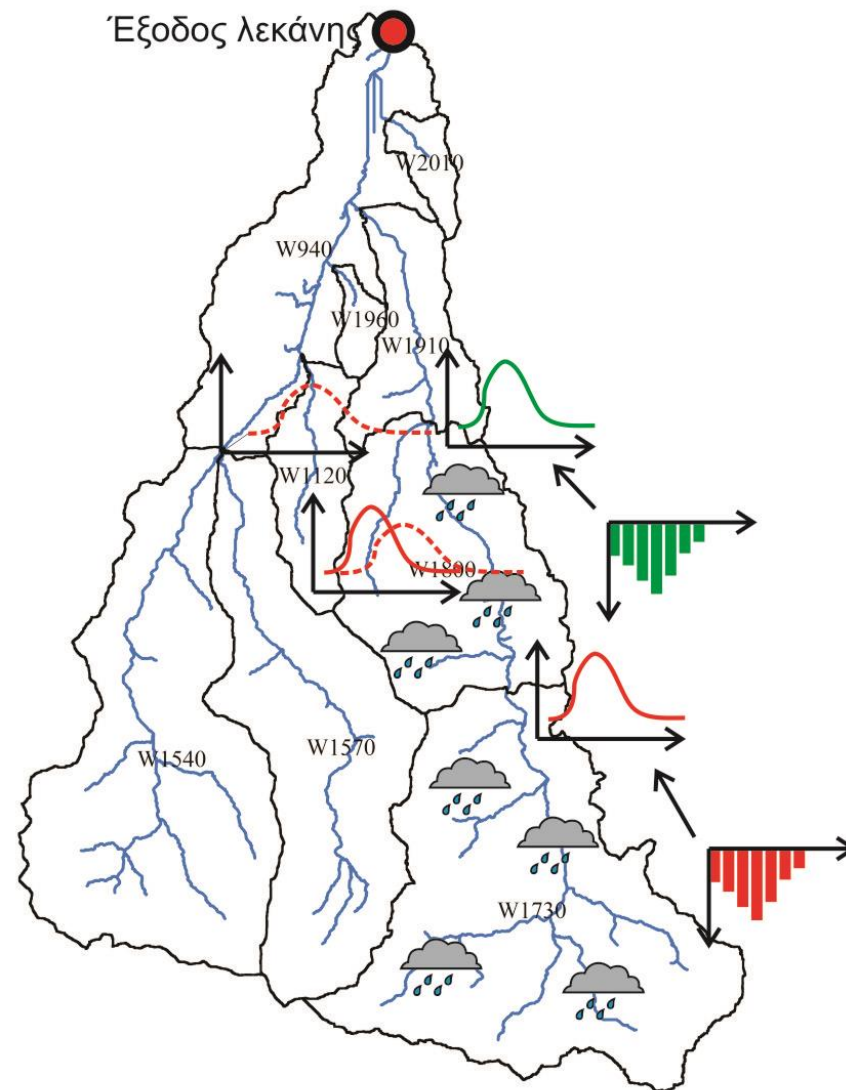
Υπολεκάνες



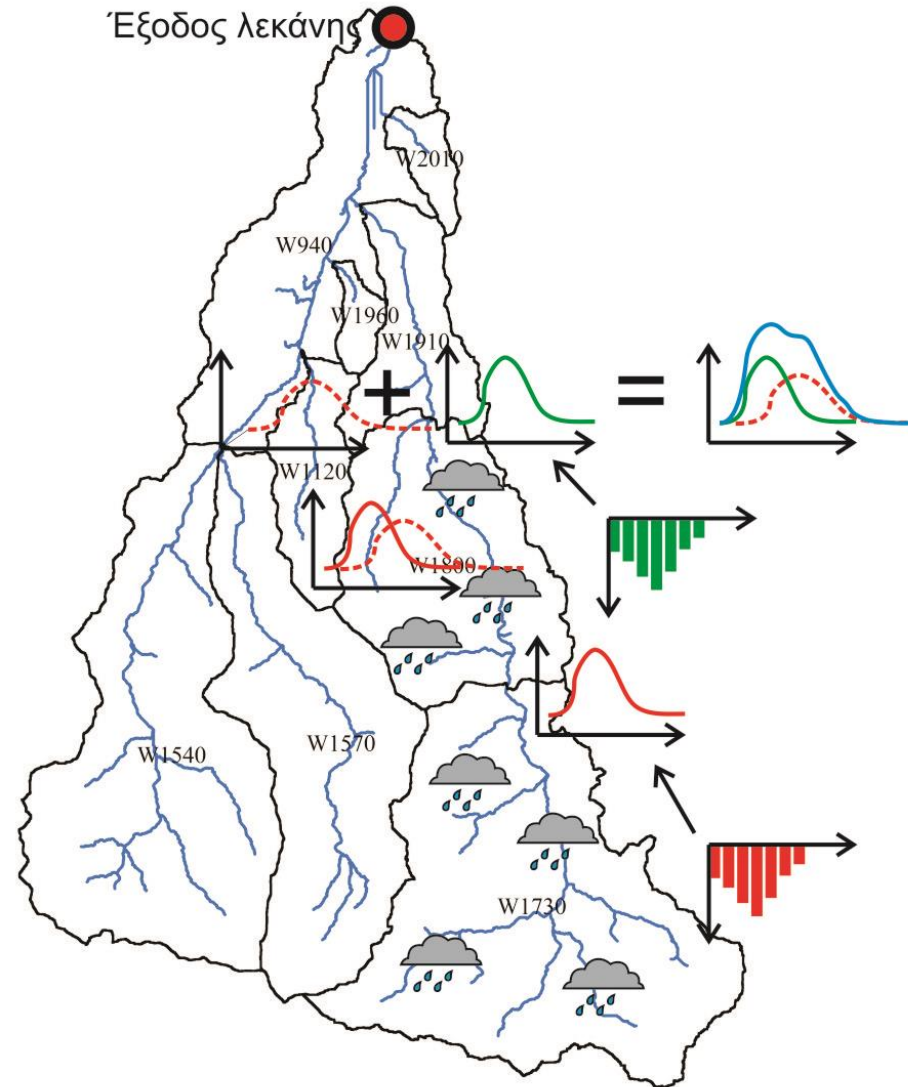
Διόδευση



Διόδευση



Σύνθεση



Μοντέλα διόδευσης

- Μοντέλα αποθήκευσης → **Συνήθης Διαφορική Εξίσωση**

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

→ παράμετρος K → μέσος χρόνος διαδρομής (μονάδες χρόνου)

- Μέθοδος Muskingum

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

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

Εφαρμογή 3

- Σε λεκάνη απορροής με έκταση $A=123.57 \text{ km}^2$ και με συντελεστή απορροής $C=0.48$ πέφτει η ετήσια βροχόπτωση του Πίνακα (μηνιαίο βήμα). Αν η αρχική στάθμη είναι $H=261 \text{ m}$ να βρεθεί η στάθμη κάθε μήνα. Να χρησιμοποιηθεί η καμπύλη στάθμης-όγκου της Εφαρμογής 2.

Month	h (mm)
Oct	24
Nov	32
Dec	87
Jan	65
Feb	46
Mar	33
Apr	26
May	57
Jun	37
Jul	6
Aug	16
Sep	28

Εκροή

Από τί αποτελείται;

- Υπερχείλιση
- Απόληψη
 - Αστική ζήτηση σε νερό
 - Άρδευση/Κτηνοτροφία
 - Ενέργεια
- Οικολογική παροχή

Υπερχείλιση

Υπερχειλιστές

- 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

- Έργα διοχέυσης
- Σχεδιασμός
 - Κατασκευαστικές
 - Κατασκευαστικές
 - Κατασκευαστικές (γεωτεχνικές)



Σχεδιασμός για την ασφαλή εκκένωση του όγκου που δεν αποθηκεύεται

Προβλεπόμενες (10000) → T=10000 έτη

Προβλεπόμενες (1000) → T=1000 (βαρύτητας), T=5000

Προβλεπόμενες (200) → T=200 (βαρύτητας), T=500 έτη

Υπερχειλιστές

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

Ogee



Φρεατοειδής



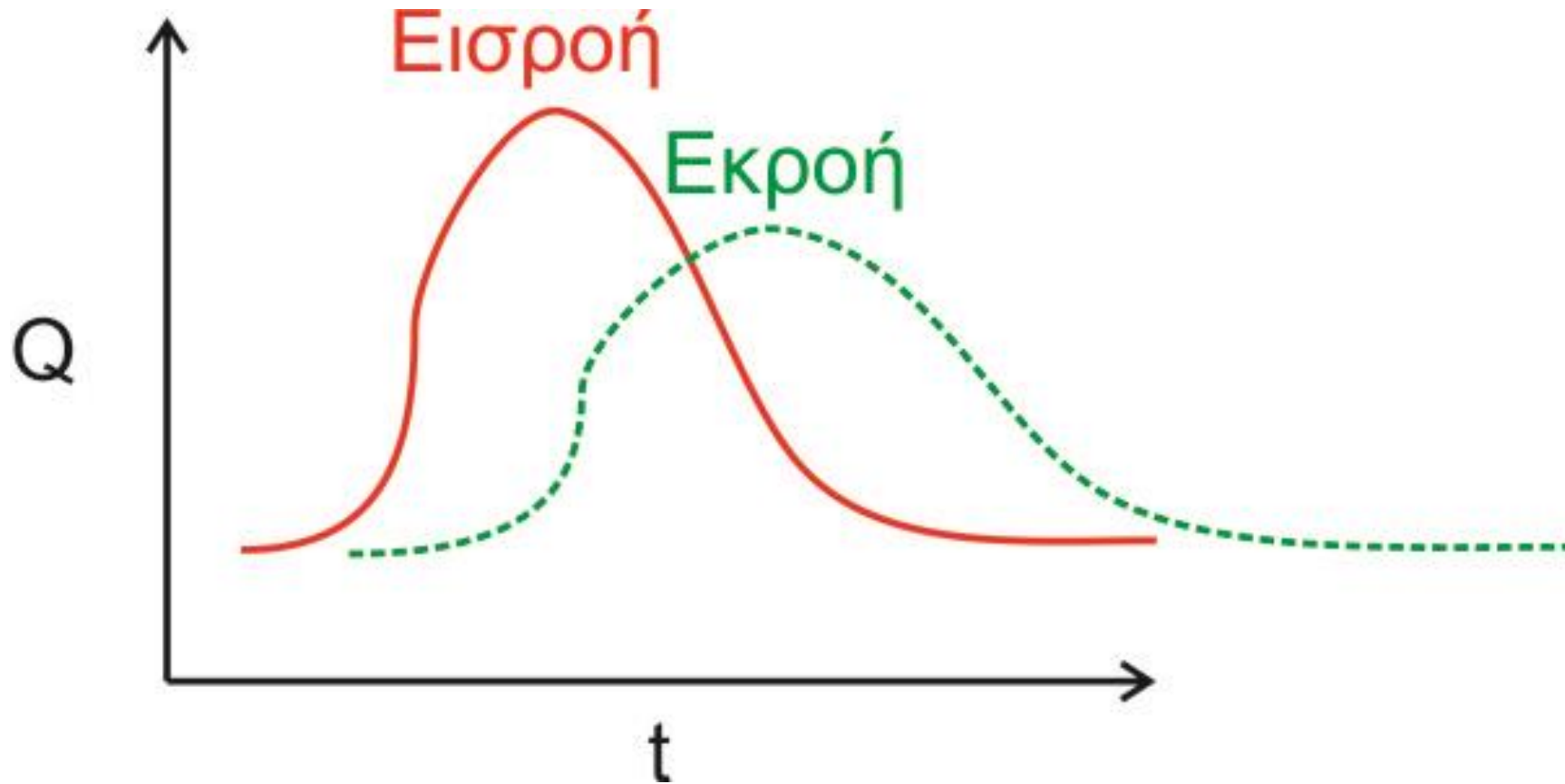
Θυροφράγματα



Θεωρητικό υπόβαθρο

- **Στις μικρές χρονικές κλίμακες → πλημμυρικό γεγονός**
 - Σχεδιασμός υπερχειλιστή
 - Εκτίμηση ΑΣΠ και στέψης φράγματος
 - Διόδευση μέσω ταμιευτήρα
- **Στις μεγάλες χρονικές κλίμακες → όταν η στάθμη υπερβεί την ΑΣΛ θεωρείται ότι ο όγκος αυτός υπερχειλίζει**
 - Διαχειριστική λειτουργία

Μικρή χρονική κλίμακα

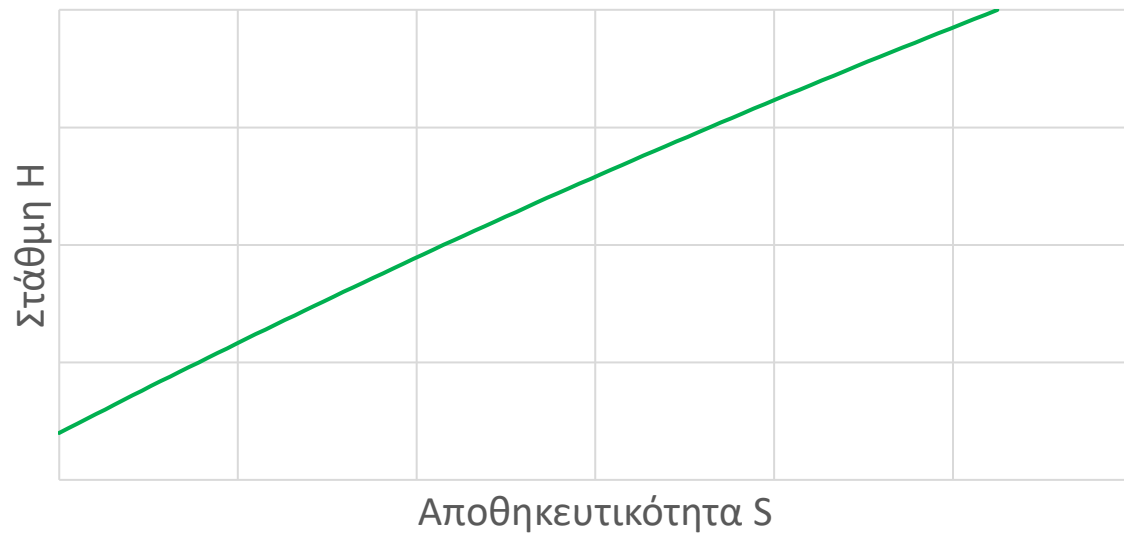


Θεωρητικό υπόβαθρο

- Μοντέλο αποθήκευσης → ΣΔΕ

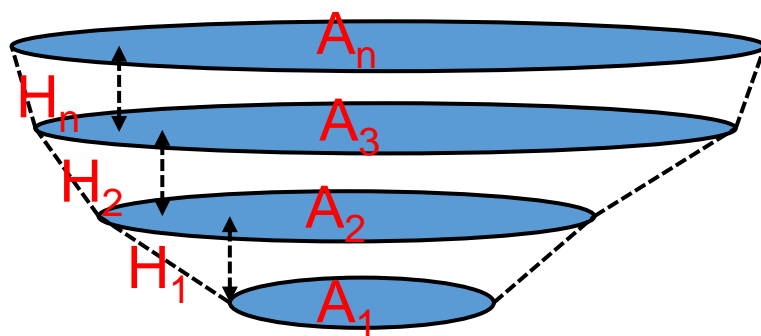
$$\frac{dS}{dt} = \bar{I} - \bar{Q}$$

Καμπύλες

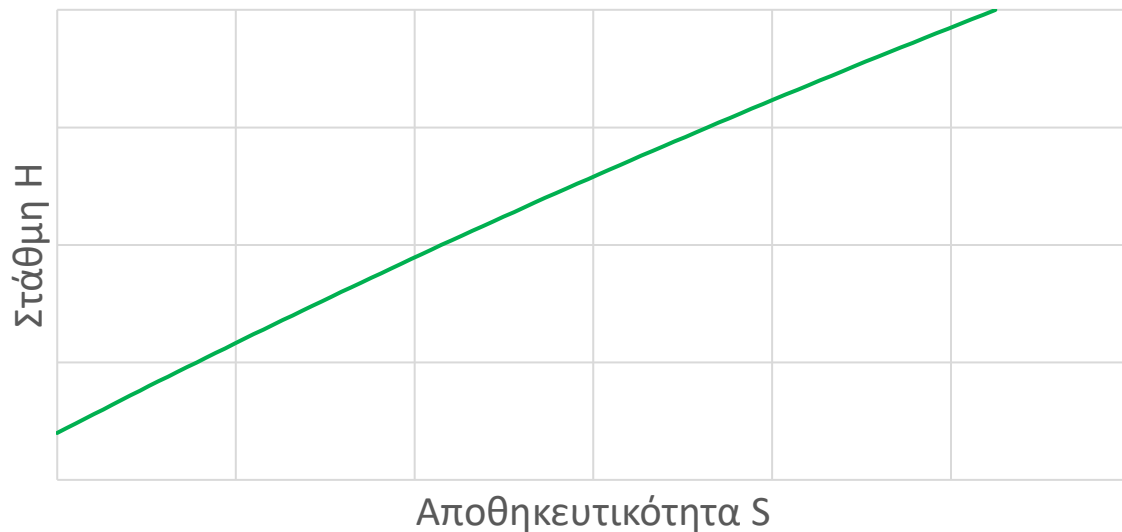


$$S = f_1(H)$$

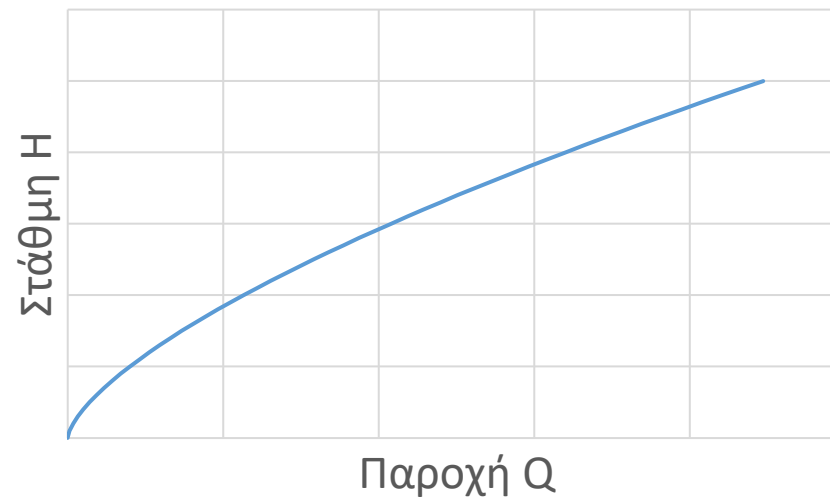
Συνάρτηση του
τοπογραφικού
ανάγλυφου



Καμπύλες

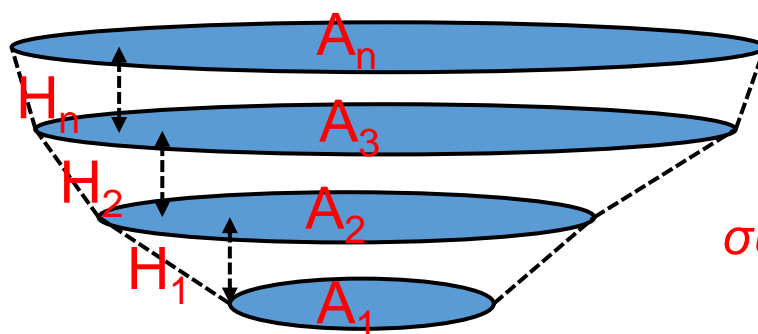


$$S = f_1(H)$$



$$Q = f_2(H)$$

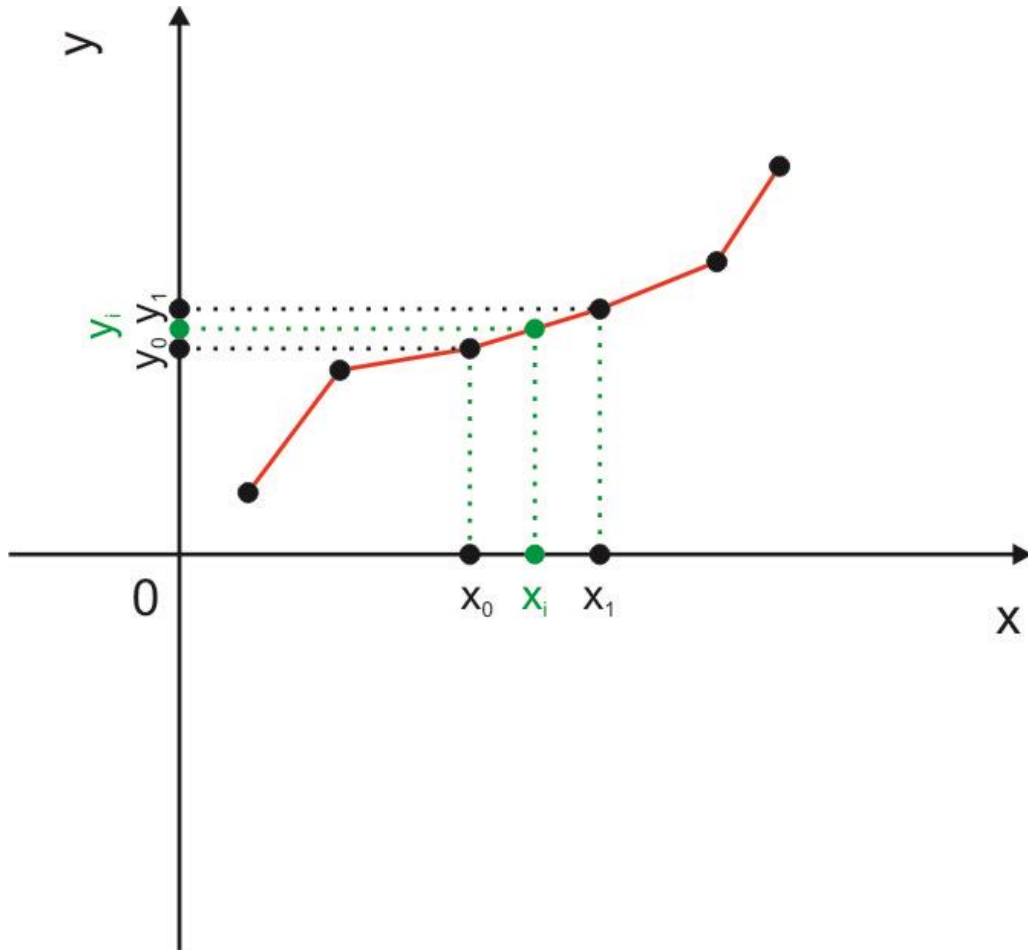
Συνάρτηση του
τοπογραφικού
ανάγλυφου



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

Annotations for the equation above:
- C_d : συντελεστής παροχής (discharge coefficient)
- L : μήκος υπερχείλισης (overflow length)
- $(H - z_0)^{3/2}$: υδραυλικό φορτίο (hydraulic head)

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

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

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

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

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

Συντελεστής παροχής

- Πειραματική προσέγγιση
- Εξαρτάται $C_d(T, G, H)$
 - Τύπο υπερχείλισης T
 - Γεωμετρικά χαρακτηριστικά υπερχείλισης G
 - Υδραυλικό φορτίο H
- Κατά τη διάρκεια της εκροής
 - Η παροχή μεταβάλλεται στο χρόνο $\rightarrow I(t)$
 - Το υδραυλικό φορτίο μεταβάλλεται στο χρόνο $\rightarrow H(t)$
 - Ο συντελεστής παροχής μεταβάλλεται στο χρόνο $\rightarrow C_d(t)$

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 πρανάς 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

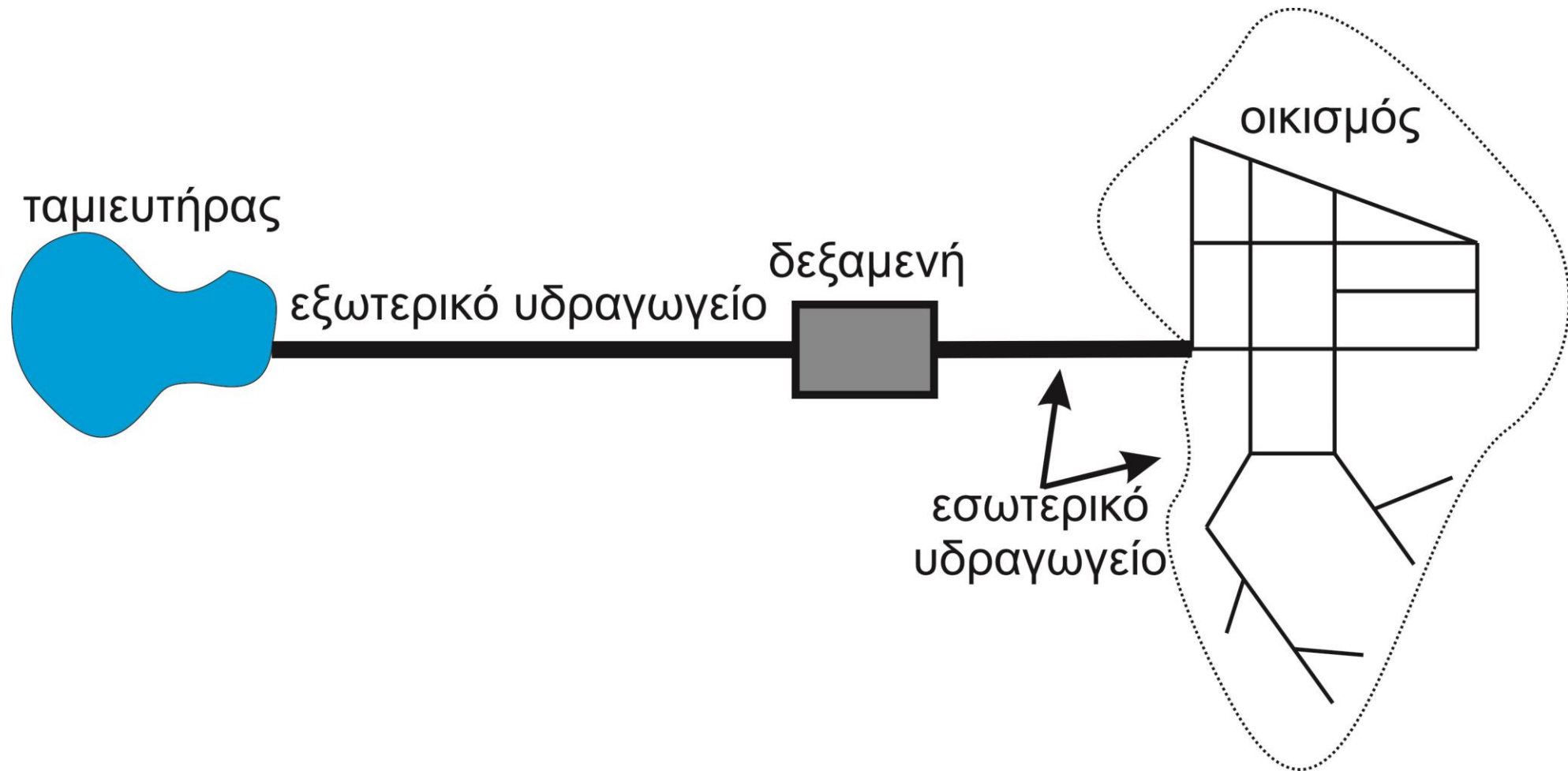
- Εύρεσης υψομέτρου στέψης φράγματος

Εφαρμογή 4

- Με τα στοιχεία της Εφαρμογής 3 να βρεθεί τότε θα πληρωθεί ο ταμιευτήρας αν η ΑΣΛ είναι στα 280 m, καθώς και ο συνολικός όγκος υπερχείλισης.

Απόληψη – Αστική ζήτηση σε νερό

Υδραγωγείο



Σχεδιασμός

- **Ανάγκες σε νερό → ζήτηση σε νερό**
 - L / κάτοικο / ημέρα
- **Τομείς**
 - Οικισμοί
 - Τουρισμός
 - Βιομηχανία
 - ...

Οικιακή κατανάλωση

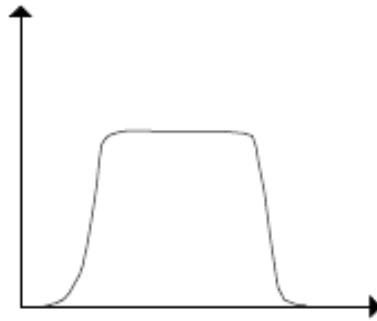
Δραστηριότητα	L/(κατ-ημέρα)
Πόση και μαγείρεμα	35
Πλύσιμο πιάτων	9
Ντους και λουτρό	87
WC	82
Διαρροές WC	15
Πλύσιμο Ρούχων	64

Κατανάλωση επιχειρήσεων

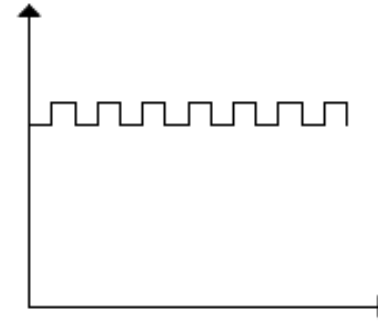
Είδος Επιχείρησης	Μονάδα	Απαιτούμενη ποσότητα νερού
Αρτοποιείο	L/(υπαλ·ημέρα)	150
Ζαχαροπλαστείο	L/(υπαλ·ημέρα)	200
Κρεοπωλείο	L/(υπαλ·ημέρα)	250
Κουρείο	L/(υπαλ·ημέρα)	250
Μικρές επιχειρήσεις με καθαρή παραγωγική διαδικασία	L/(υπαλ·ημέρα)	50
Μικρές επιχειρήσεις με βρώμικη παραγωγική διαδικασία	L/(υπαλ·ημέρα)	250
Εστιατόρια	L/((υπαλ+πελ)·ημέρα)	50
Ξενοδοχεία πολυτελείας με αναλογία υπαλλήλων/πελάτες<1	L/((υπαλ+πελ)·ημέρα)	600
Ξενοδοχεία μέσης κατηγορίας με αναλογία υπαλλήλων/πελάτες=0.5	L/((υπαλ+πελ)·ημέρα)	300
Απλά ξενοδοχεία αναλογία υπαλλήλων/πελάτες=0.25	L/((υπαλ+πελ)·ημέρα)	200

Ημερήσια διακύμανση

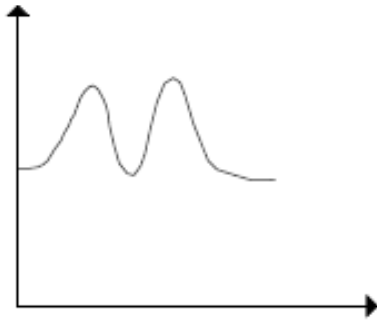
Επιχειρήσεις



Εργοστάσια



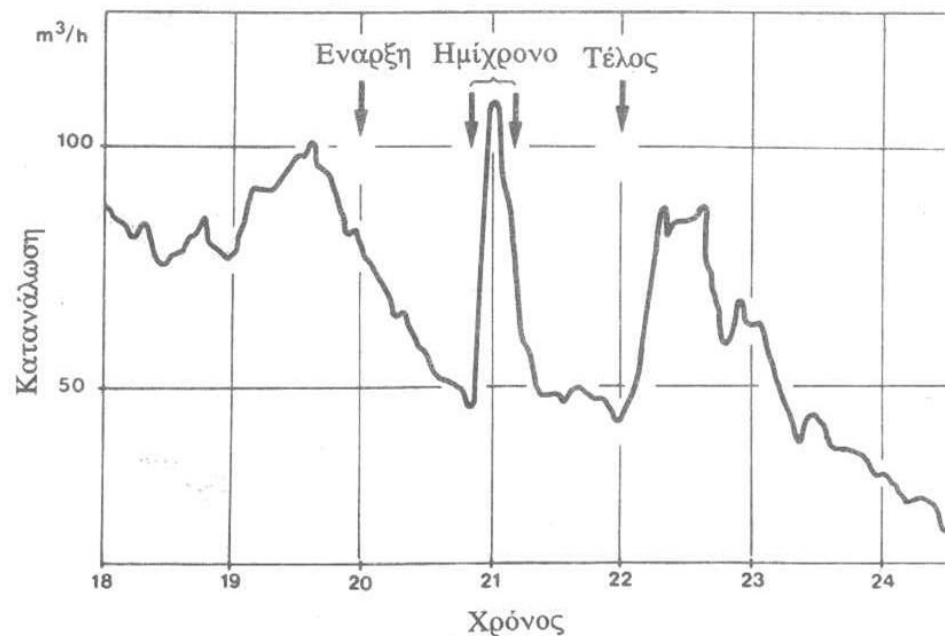
Οικογένεια



Εστιατόρια

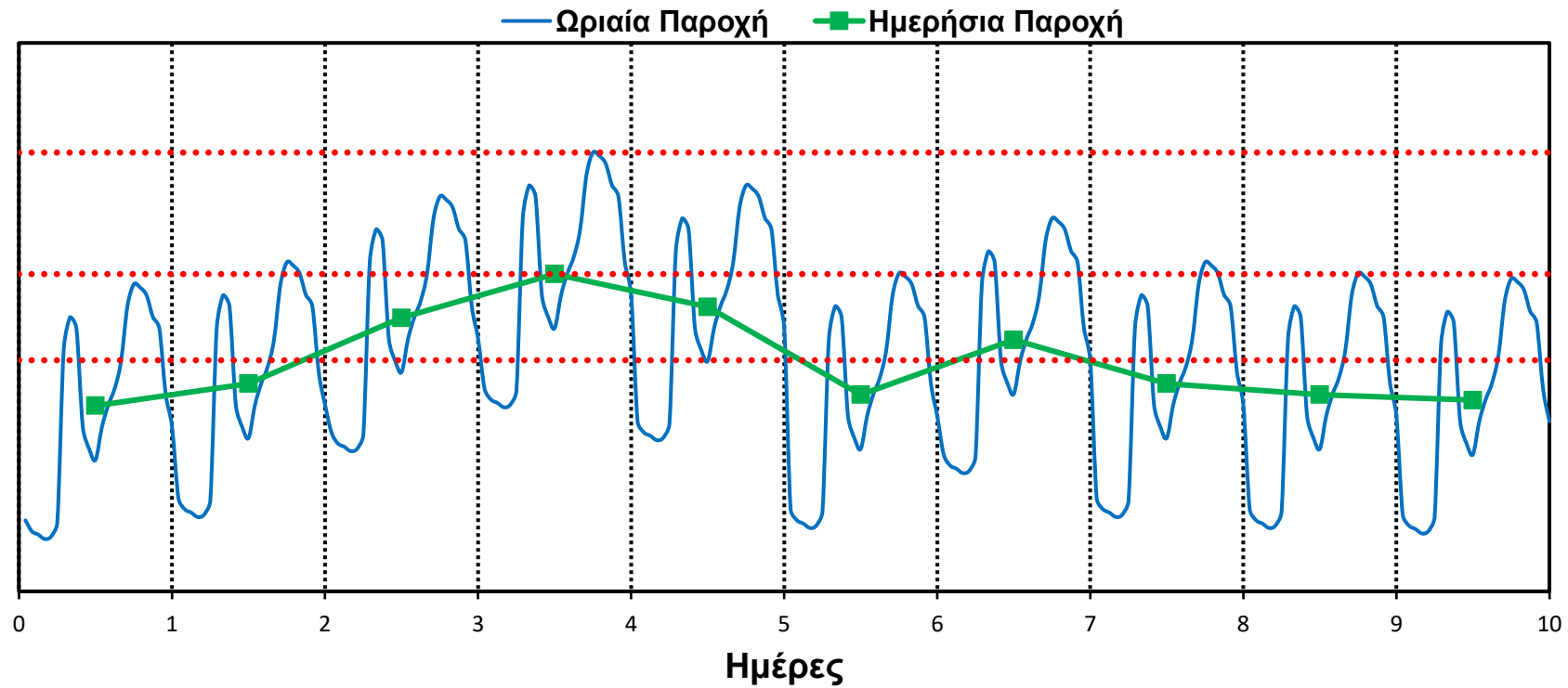


Ημερήσια διακύμανση



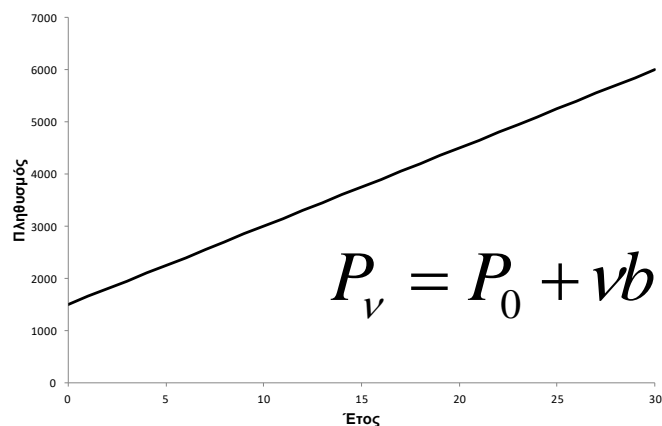
Κατανάλωση μίας περιοχής της πόλης του Dortmund κατά τη διάρκεια του τελικού αγώνα του Παγκόσμιου Κυπέλου ποδοσφαίρου Ιταλίας-Γερμανίας (11-7-1982)

Πολλαπλασιαστές ζήτησης

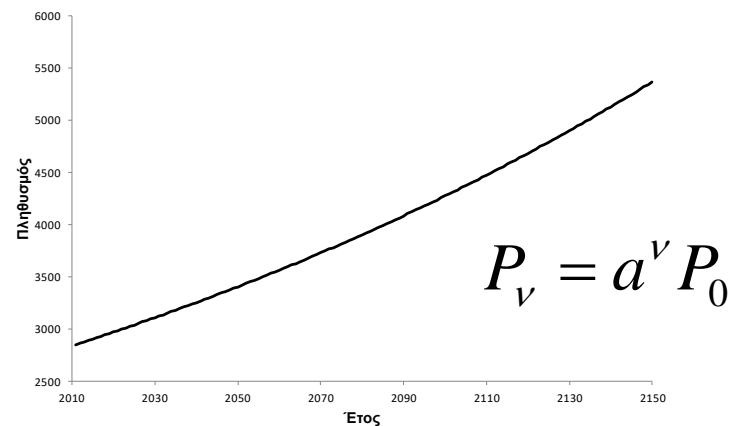


Μοντέλα αύξησης πληθυσμού

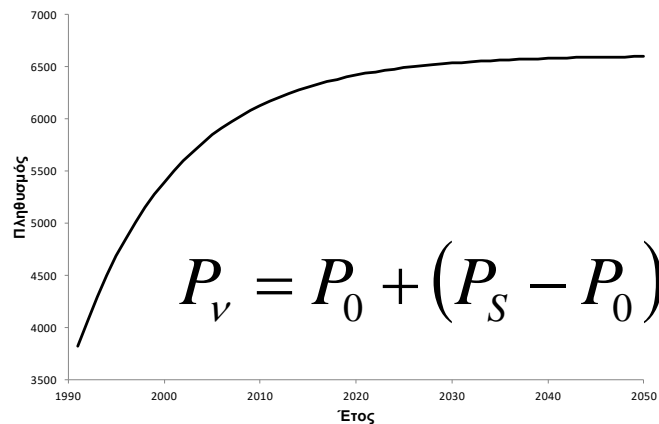
Γραμμικό



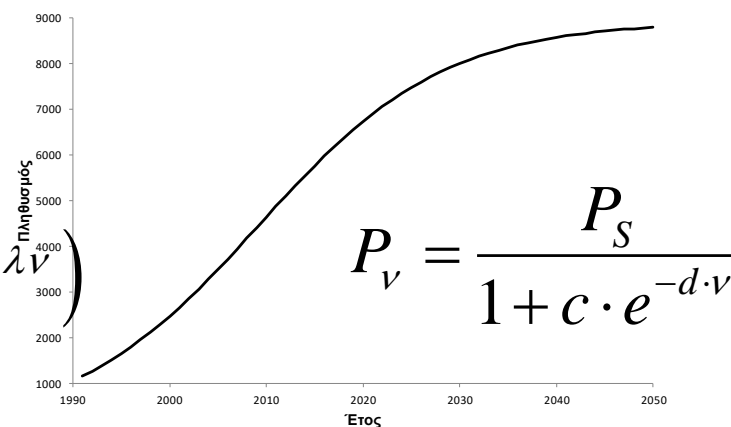
Γεωμετρικό



Φθίνοντος ρυθμού



Λογιστική καμπύλη



Εφαρμογή 5

- Με τα στοιχεία των Εφαρμογών 3 και 4 να βρεθεί η μελλοντική χρονοσειρά διακύμανσης της στάθμης για ένα έτος, αν ο ταμιευτήρας υδροδοτεί πόλη με τωρινό πληθυσμό 450000 κατοίκων. Η μέση ημερήσια κατανάλωση είναι 200 L/κάτοικο/day, η ωφέλιμη διάρκεια ζωής του έργου προβλέπεται να είναι 50 έτη και αναμένεται αύξηση 1000 κατοίκων ανά έτος. Η αρχική στάθμη είναι στα 280 m.

Απόληψη – Άρδευση/Κτηνοτροφία

Ορισμοί

- **Εξάτμιση**

- Υδάτινες μάζες → υδρατμοί

- **Διαπνοή**

- Το νερό το οποίο χρησιμοποιείται από τα φυτά για το μεταβολισμό και την ανάπτυξή τους → υδρατμοί μέσω των στομάτων του φυλλώματος

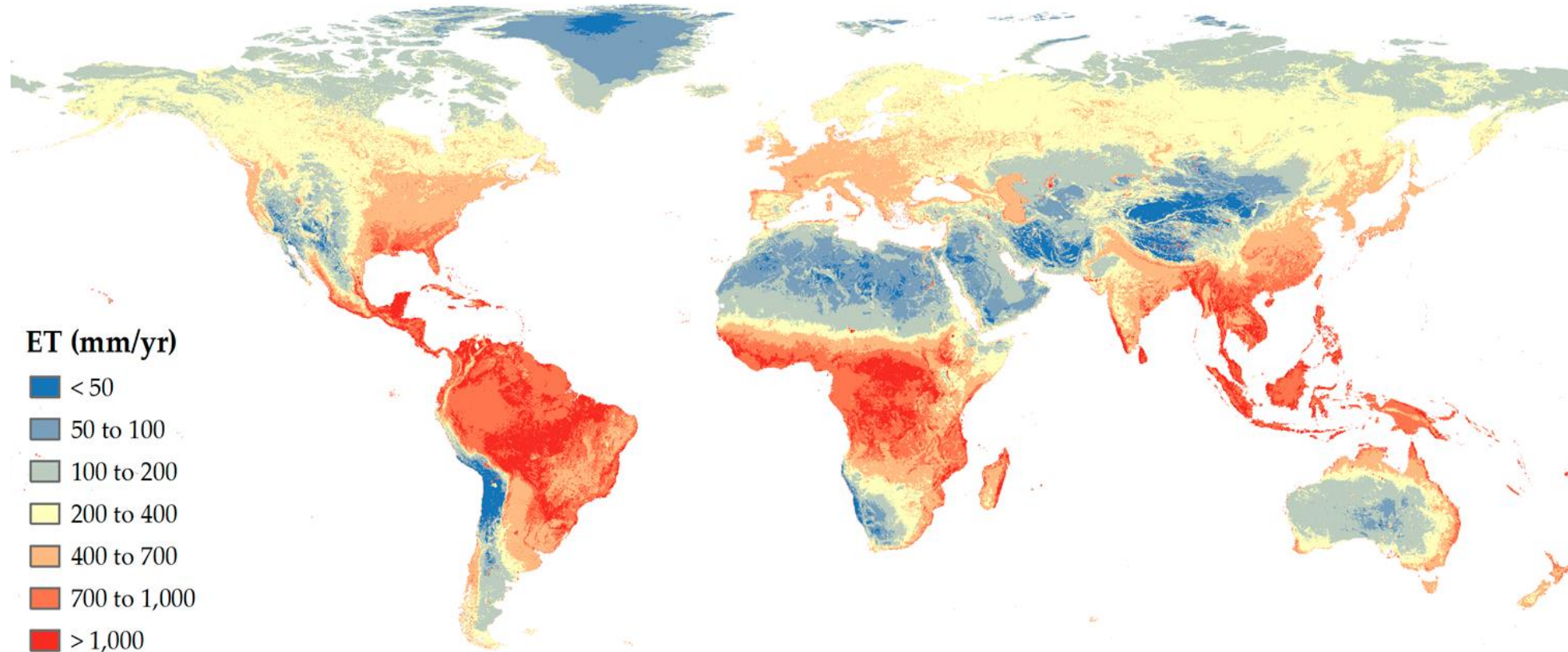
- **Πραγματική Εξατμισοδιαπνοή**

- Εξάτμιση + Διαπνοή (δύσκολο να διαχωριστούν)

- **Δυνητική Εξατμισοδιαπνοή**

- Η εξατμισοδιαπνοή αν το νερό ήταν απεριόριστα διαθέσιμο

Παγκόσμια κατανομή εξατμισοδιαπνοής



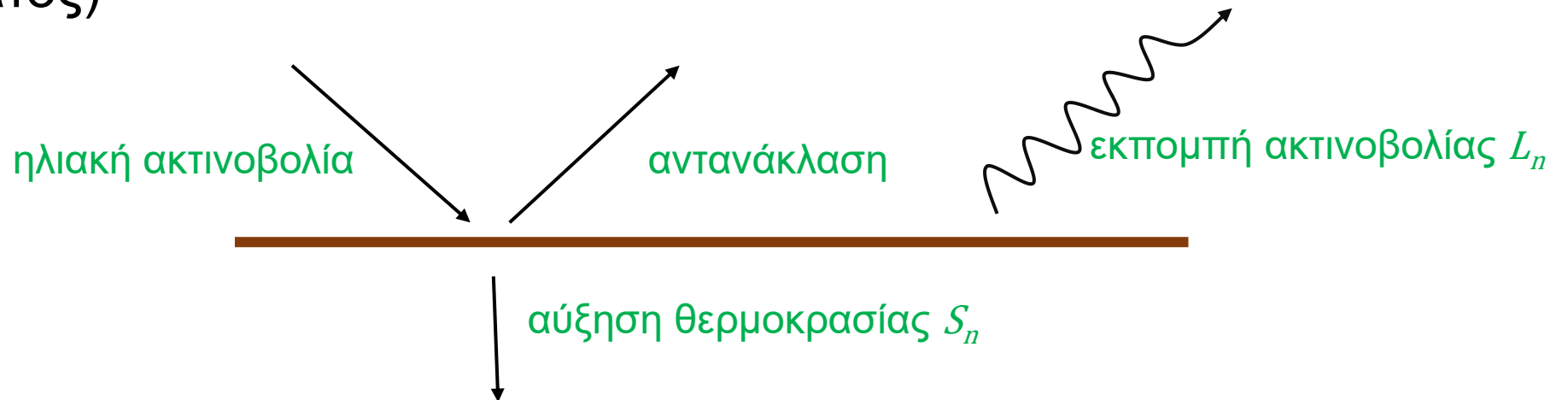
Πηγή: Raoufi, R.; Beighley, E. Estimating Daily Global Evapotranspiration Using Penman–Monteith Equation and Remotely Sensed Land Surface Temperature. *Remote Sens.* **2017**, *9*, 1138.

Ενέργεια

- **Εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία → απορρόφηση από τη γη και μετατροπή σε εσωτερική ενέργεια**
 - Ακτινοβολία που επανεκπέμπεται
 - Αισθητή θερμότητα: Επιφάνεια → Ατμόσφαιρα
 - Εξάτμιση
 - Μεταφορά θερμότητας στην επιφάνεια
- **Μεγάλη λανθάνουσα θερμότητα**
 - Μεταφορά και ανακατανομή σημαντικών ποσοτήτων ενέργειας
- **Εξατμισοδιπανοή → συνδεδετικός κρίκος υδατικού και ενεργειακού ισοζυγίου**

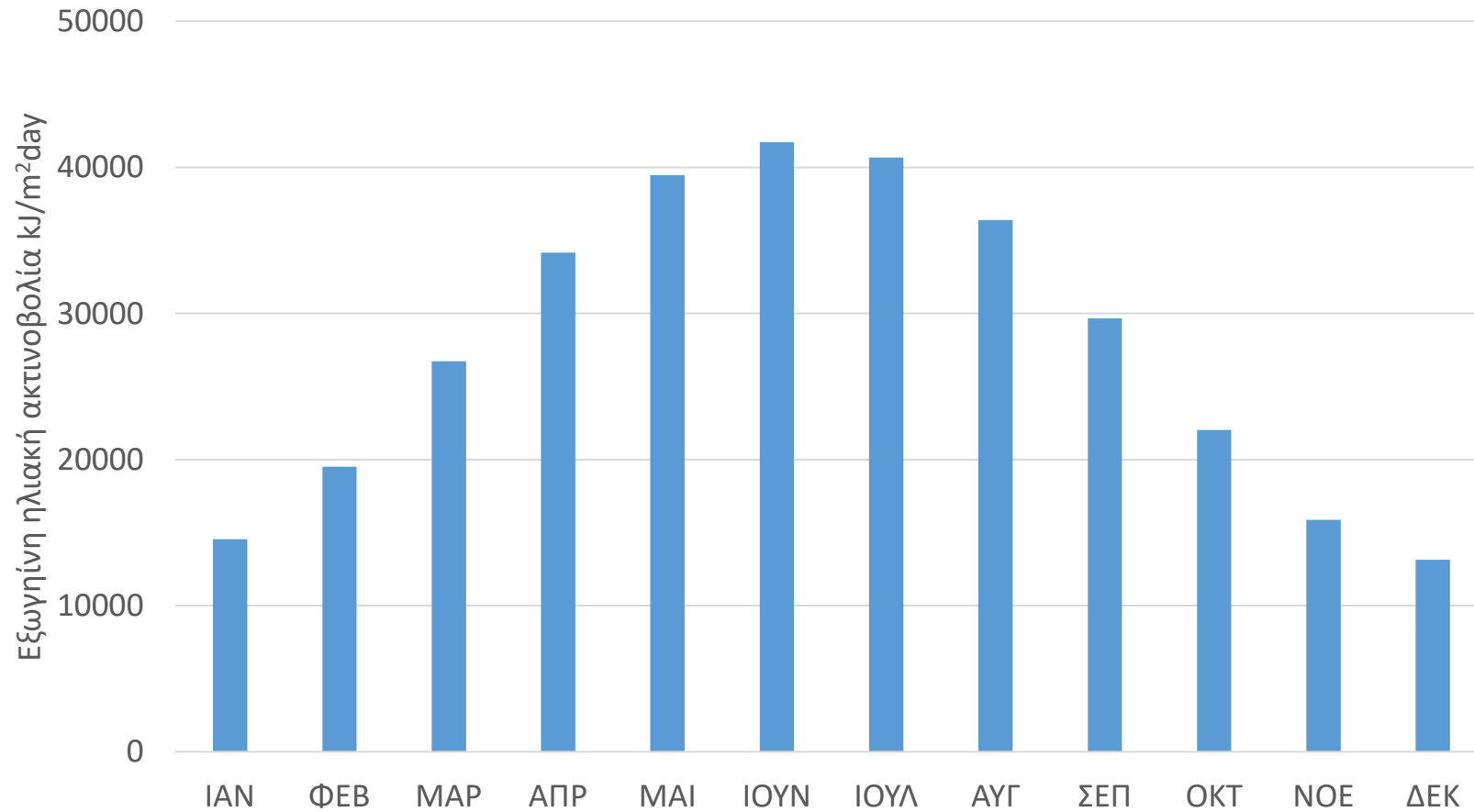
Ηλιακή ακτινοβολία

- **Εξωγήινη ηλιακή ακτινοβολία (μικρό μήκος κύματος)**
 - Απορρόφηση από ατμόσφαιρα
 - Εισέρχεται στην επιφάνεια της γης → αύξηση θερμοκρασίας εδάφους
 - Αντανάκλαση από την επιφάνεια της γης πίσω στην ατμόσφαιρα (μικρό μήκος κύματος)
 - Αύξηση θερμοκρασίας εδάφους → εκπομπή ακτινοβολίας (μακρύ μήκος κύματος)



Εξωγηίνη ηλιακή ακτινοβολία

$\phi=41^{\circ}\text{C}$



Ολική καθαρή ενέργεια

$$R_n = S_n - L_n$$

- Απαιτούμενο μέγεθος για τον υπολογισμό της εξάτμισης
- Η διαφορά της καθαρής ακτινοβολίας μικρού κύματος που εισέρχεται στην επιφάνεια της γης μείον την καθαρή θερμική ακτινοβολία της γης μακρού κύματος
- Μονάδες \rightarrow kJ/m²day

Διαπνοή

- **Ανοιγοκλείσιμο στομάτων φυτών → φυσιολογικοί και περιβαλλοντικοί παράγοντες**
- **Φυσιολογικοί παράγοντες**
 - Πυκνότητα και συμπεριφορά στομάτων
 - Έκταση και χαρακτηριστικά προστατευτικών καλυμμάτων
 - Δομή φύλων
 - Ασθένειες φύλλων
- **Περιβαλλοντικοί παράγοντες**
 - Καμπύλη κορεσμού υδρατμών
 - Θερμοκρασία
 - Ηλιακή ακτινοβολία
 - Άνεμος
 - Διαθέσιμη εδαφική υγρασία

Εξατμισοδιαπνοή

- Λόγω πολυπλοκότητας και αλληλεξάρτησης η εξάτμιση και διαπνοή εκτιμώνται μαζί ως ένα ενιαίο μέγεθος → εξατμισοδιαπνοη
- Άμεσες μέθοδοι εκτίμησης
 - Μετρήσεις
- Έμμεσες μέθοδοι εκτίμησης
 - Υδατικό ισοζύγιο
 - Κλιματικά δεδομένα

Μέθοδοι κλιματικών δεδομένων

- Penman-Monteith
 - Thornthwaite
 - Blanney-Criddle
 - Jensen-Haise
 - Makkink
 - Hargreaves
 - TURC
 - Coutagne
- } Πραγματική εξατμισοδιαπνοή

Μέθοδος Penman-Monteith

$$E' = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma'} \frac{R_n}{\lambda} + \frac{\gamma'}{\Delta + \gamma'} F(u) D$$

- Μέθοδος Penman → υδρατμοί στο όριο της υδάτινης επιφάνειας είναι κορεσμένοι
- Τροποποίηση Monteith → επιφανειακή αντίσταση φυλλωμάτων στην εξάτμιση
- Μονάδες → (kg/m²day)

Μέθοδος Penman-Monteith

$$E' = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma'} \frac{R_n}{\lambda} + \frac{\gamma'}{\Delta + \gamma'} F(u) D$$

- Μέθοδος Penman → υδρατμοί στο όριο της υδάτινης επιφάνειας είναι κορεσμένοι
- Τροποποίηση Monteith → επιφανειακή αντίσταση φυλλωμάτων στην εξάτμιση

Ισοζύγιο ενέργειας

Μεταφορά μάζας

Μέθοδος Penman-Monteith

- Δ Κλίση καμπύλης κορεσμού υδρατμών (hPa/°C)

$$\Delta = \frac{4098e_s}{(T + 237.3)^2}$$

- Τροποποιημένη έκφραση ψυχομετρικού συντελεστή \rightarrow αντίσταση στομάτων, $f(\text{ταχύτητας ανέμου } u)$ (hPa/°C)

$$\gamma' = (1 + 0.33u)\gamma$$

- Τροποποιημένη μορφή συνάρτησης ανέμου $f(\text{θερμοκρασίας } T, \text{ ταχύτητας ανέμου } u)$

$$F(u) = \frac{90}{T + 275} u$$

- Μονάδες

- T (°C)
- u (m/s)

- Τροποποίηση βαθμού ανακλαστικότητας \rightarrow μεγαλύτερες τιμές

Μέθοδος Thornthwaite

$$E_p = 16 \left(\frac{10t_i}{J} \right)^{\alpha} \frac{\mu N}{360}$$

- E_p δυνητική εξατμισοδιαπνοή (mm/month)
- t_i μέση μηνιαία θερμοκρασία (°C)
- J ετήσιος δείκτης θερμοκρασίας
- α εμπειρική παράμετρος $f(J)=0.016J+0.5$
- μ ημέρες μήνα
- N αστρονομική διάρκεια ημέρας

Μέθοδος Thornthwaite

- Ετήσιος δείκτης θερμοκρασίας

$$J = \sum_{i=1}^{12} j_i$$

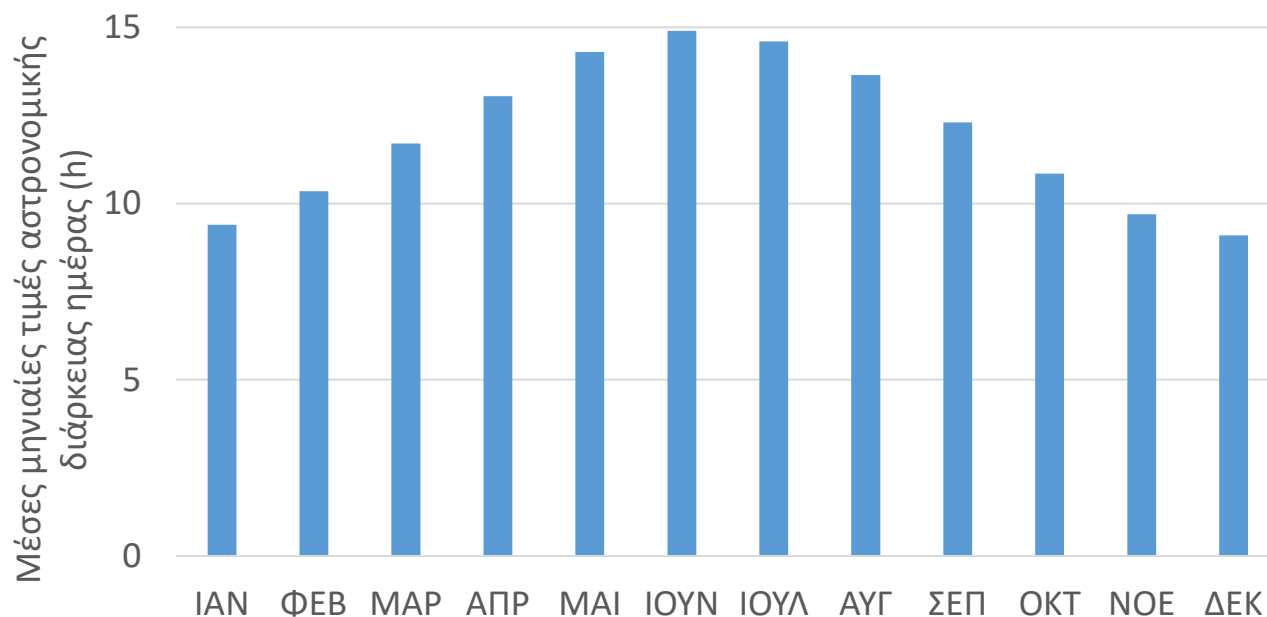
- Μηνιαίος δείκτης θερμοκρασίας

$$j_i = 0.09t_i^{3/2}$$

Μέθοδος Thornthwaite

$$E_p = 16 \left(\frac{10t_i}{J} \right)^a \frac{\mu N}{360}$$

$\phi=41^\circ\text{C}$



Μέθοδος Blaney-Criddle

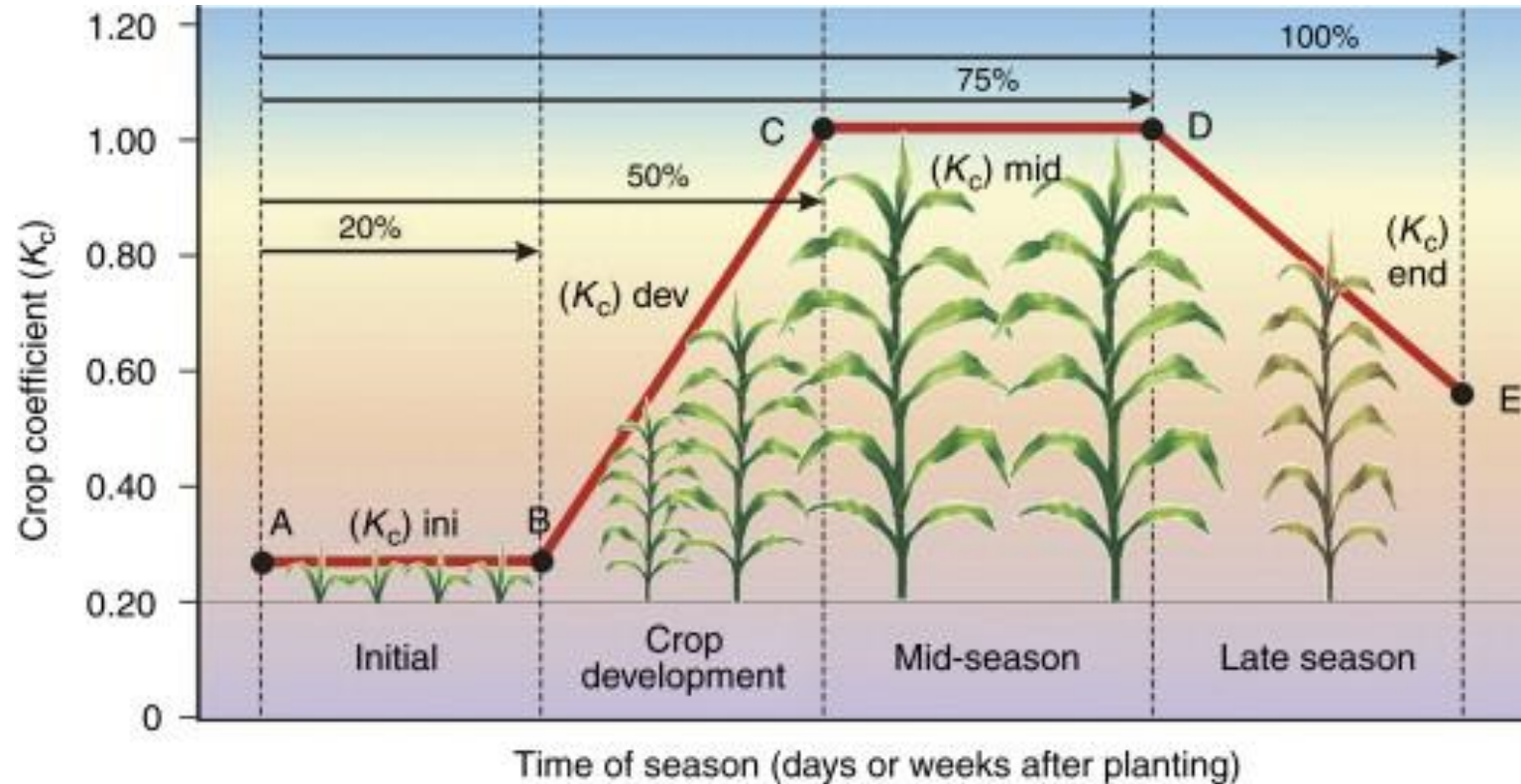
$$ET = k \frac{(1.8T + 32)}{3.94} \frac{100\mu N}{365 \cdot 12}$$

- ET δυνητική εξατμισοδιαπνοή (mm/month)
- k εμπειρικός συντελεστής για κάθε καλλιέργεια
- T μέση μηνιαία θερμοκρασία αέρα ($^{\circ}\text{C}$)
- μ αριθμός ημερών
- N μέση αστρονομική διάρκεια ημέρας

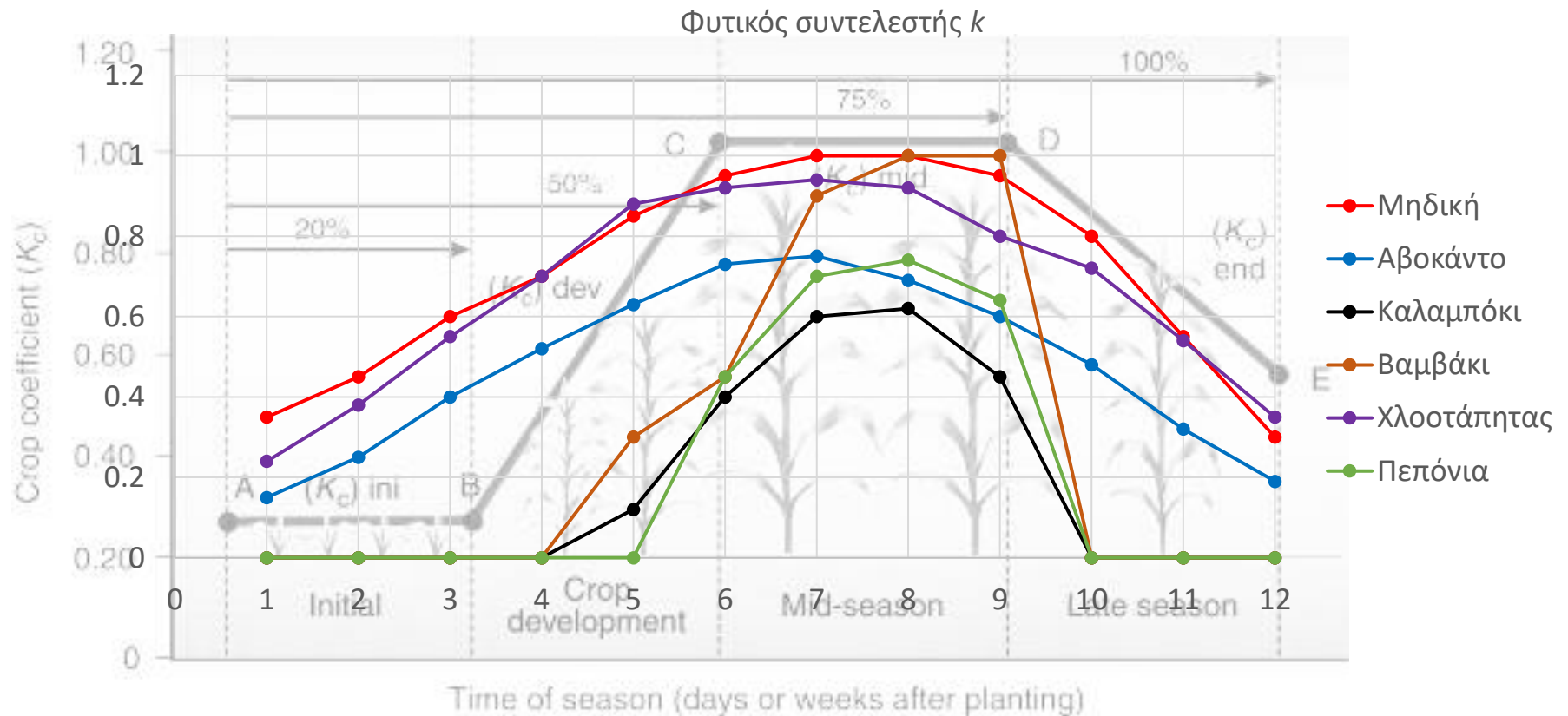
Συντελεστής k

Καλλιέργεια	Διάρκεια βλαστικής περιόδου (month)	k
Μηδική	Μεταξύ παγετών	0.80-0.85
Αραβόσιτος	4	0.75-0.85
Βαμβάκι	7	0.60-0.70
Σιτηρά	3	0.75-0.85
Εσπεριδοειδή	12	0.45-0.55
Φυλλοβόλα Οπωροφόρα	Μεταξύ παγετών	0.60-0.70
Φυτικό λιβάδι	Μεταξύ παγετών	0.75-0.85
Πατάτα	3-5	0.65-0.75
Ρύζι	3-5	1.00-1.10
Ζαχαρότευτλα	6	0.65-0.75
Ντομάτα	4	0.65-0.70
Λαχανικά	2-4	0.60-0.70

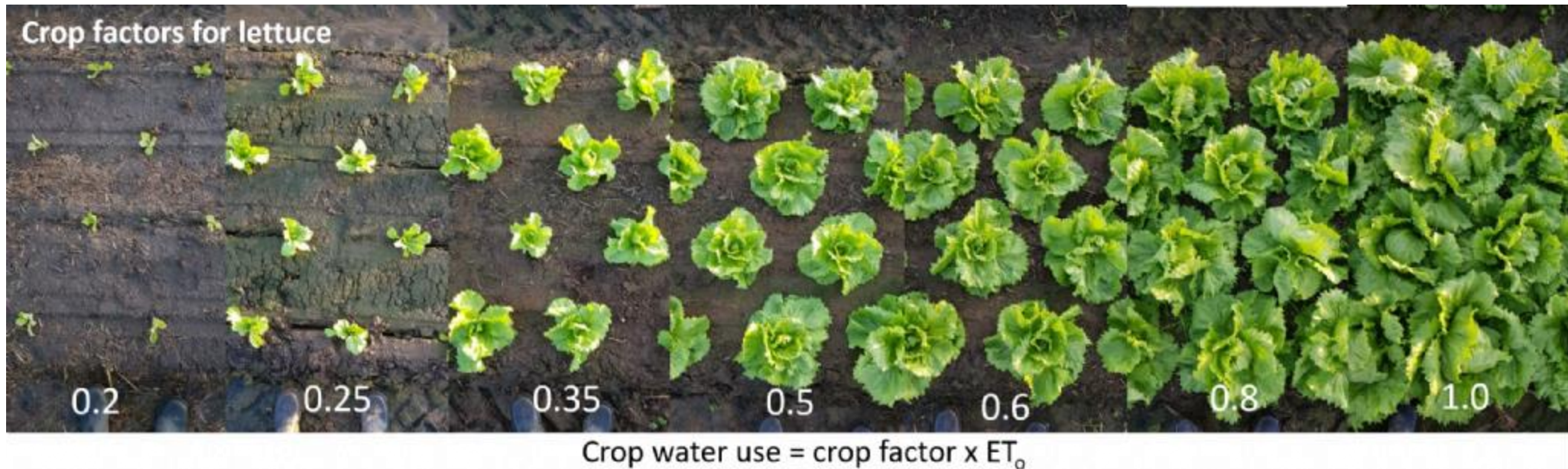
Συντελεστής k



Συντελεστής k



Συντελεστής k



Κτηνοτροφία

Είδος Επιχείρησης	Μονάδα	Απαιτούμενη ποσότητα νερού
Μεγάλο ζώο	L/(ζώο·ημέρα)	50
Μεγάλο ζώο με ξέπλυμα κοπριάς χωρίς διάστρωση αχύρων	L/(ζώο·ημέρα)	60
Μεγάλο ζώο με ξέπλυμα κοπριάς με διάστρωση αχύρων	L/(ζώο·ημέρα)	70
Μικρό ζώο	L/(ζώο·ημέρα)	1/5 της ποσότητας του μεγάλου ζώου
Σταθμός συγκέντρωσης γάλατος	L/L	1.5
Επαγγελματικοί κήποι οπωρολαχανικών	L/m ²	0.8

Εφαρμογή 6

- Με τα στοιχεία των Εφαρμογών 3, 4 και 5 να βρεθεί η χρονοσειρά διακύμανσης της στάθμης για ένα έτος, αν επιπλέον αρδεύονται 40000 στρέμματα από τα οποία το 60% είναι ροδακινιές και το 40% καλαμπόκι. Η αρχική στάθμη είναι στα 280 m. Δίνονται επίσης οι μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες, η μέση αστρονομική διάρκεια της ημέρας, καθώς και οι φυτικοί συντελεστές.

Month	T (°C)	N (h)	$k_{\text{ροδ}}$	$k_{\text{καλ}}$
Oct	14.8	11.1	0	0
Nov	10.3	10.1	0	0
Dec	5.6	9.6	0	0
Jan	4.3	9.8	0	0
Feb	5.5	10.6	0	0
Mar	8.4	11.7	0	0
Apr	12.4	12.9	0	0.35
May	17.3	13.9	0.45	0.60
Jun	21.7	14.4	0.50	0.85
Jul	24.5	14.2	0.80	0.85
Aug	25.1	13.4	0.65	0.43
Sep	20.3	12.2	0.60	0

Απόληψη – Ενέργεια

Υδροδυναμικά έργα

- **Η δυναμική + κινητική ενέργεια → μηχανική ενέργεια**
 - Υδροστρόβιλος
- **Μηχανική ενέργεια → ηλεκτρική ενέργεια**
 - Γεννήτρια
- **Απώλειες ενέργειας**
 - Θερμότητα

Υδροδυναμικά έργα



Βασικά μεγέθη

- **Ολικό ύψος πτώσης**

- Η υψομετρική διαφορά μεταξύ της ελεύθερης στάθμης του ταμιευτήρα και της ελεύθερης στάθμης της διώρυγας φυγής όταν ο σταθμός παραγωγής δεν λειτουργεί

- **Ωφέλιμο ύψος πτώσης**

- Ολικό ύψος – γραμμικές και τοπικές απώλειες στο σύστημα προσαγωγής και στη διώρυγα φυγής

- **Διαθέσιμη παροχή**

- Παροχή του νερού που προσφέρεται για παραγωγή ενέργειας

Υδροδυναμικά έργα

- Ισχύς (σε kW) \rightarrow f(διαθέσιμης παροχής, ωφέλιμου ύψους πτώσης, βαθμός απόδοσης υδροστροβίλου)

$$I = 9.81 Q_m H_n n_\sigma$$

- Ενέργεια (σε kWh) \rightarrow ισχύς x χρόνος

$$E = I t$$

Ενεργειακές απώλειες

- Συνολικές απώλειες

$$\sum h_f = h_f + h_f'$$

- Γραμμικές απώλειες

$$h_f = RQ^n$$

- Τοπικές απώλειες

$$h_f' = K \frac{V^2}{2g}$$

Γραμμικές απώλειες

	Γραμμικές απώλειες	Αντίσταση αγωγού	Εκθέτης
Darcy-Weisbach	$h_f=RQ^n$	$R = \frac{8fL}{g\pi^2 D^5}$	n=2
Hazen-Williams	$h_f=RQ^n$	$R = \frac{10.7La}{C^{1.852} D^{4.87}}$	n=1.852
Manning	$h_f=RQ^n$	$R = \frac{10.29n_{man}^2 L}{D^{5.33}}$	n=2

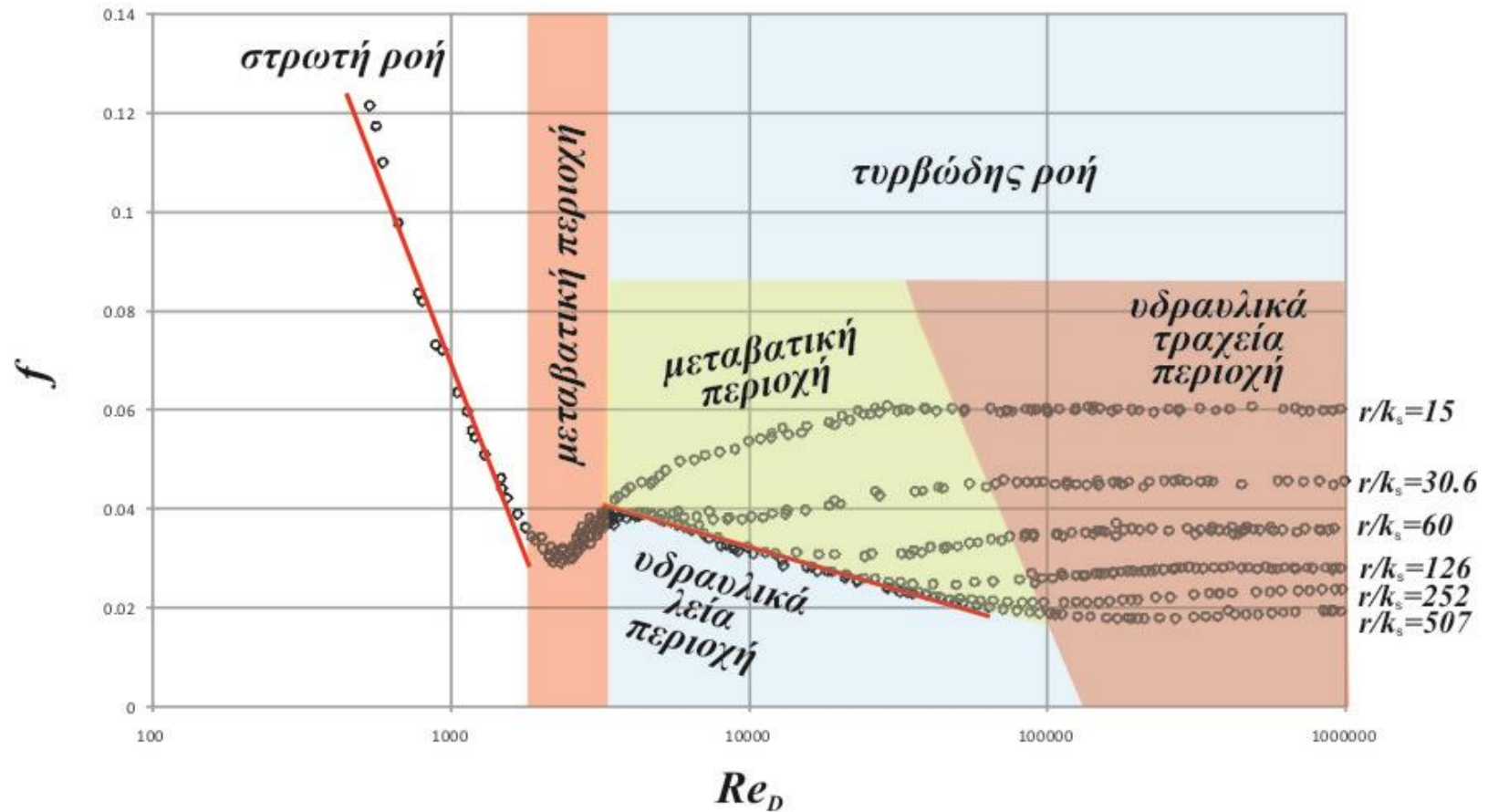
Darcy-Weisbach

$$h_f = \frac{8fL}{g\pi^2 D^5} Q^2$$

Darcy-Weisbach

διάγραμμα Nikuradse

$$h_f = \frac{8 f L}{g \pi^2 D^5} Q^2$$

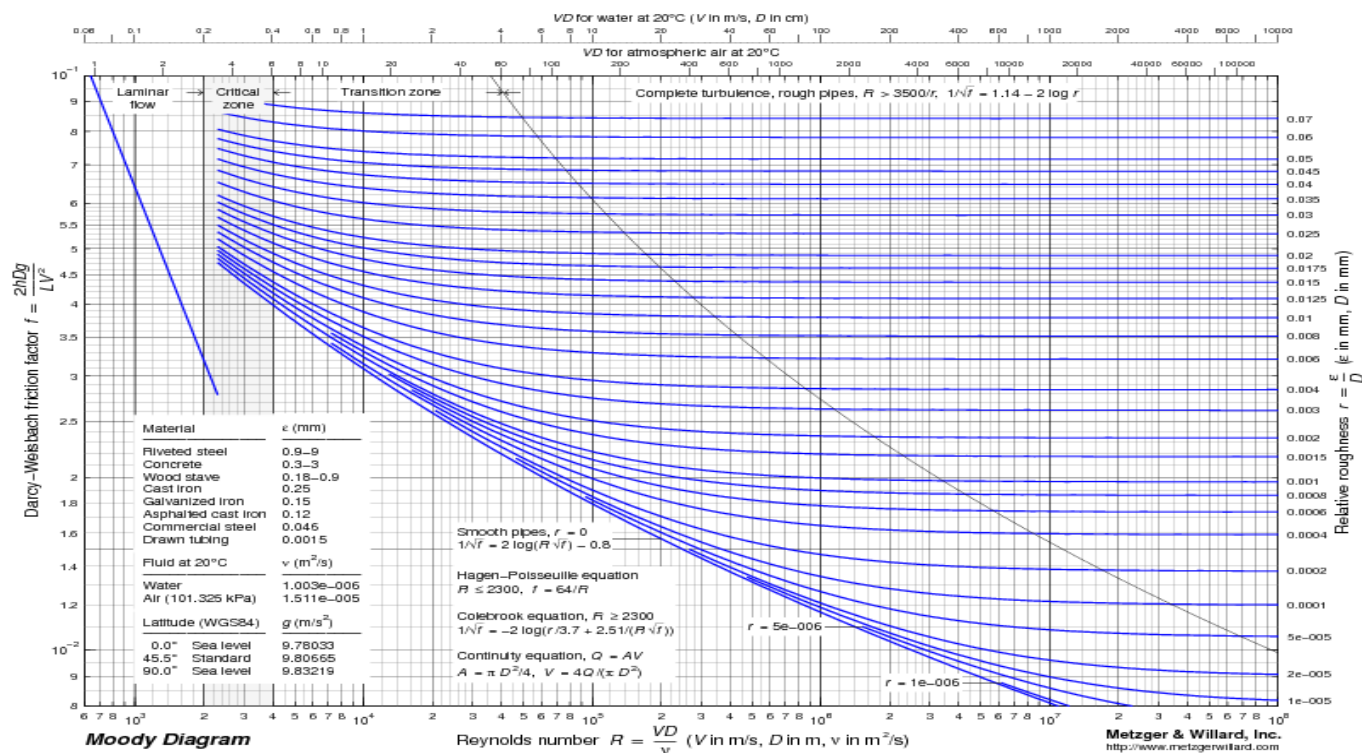


Συντελεστής τριβής f

- Colebrook-White → τυρβώδης ροή $\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{k}{3.7D} + \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right)$

Συντελεστής τριβής f

- Colebrook-White → **τυρβώδης ροή**
 - Διάγραμμα Moody
- $$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{k}{3.7D} + \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right)$$



Συντελεστής τριβής f

- Swamee and Jain → ρητή προσέγγιση της Colebrook-White

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{5.74}{\text{Re}^{0.9}} + \frac{k/D}{3.7} \right) \right]^2}$$

Δυναμικό

- **Ολικό θεωρητικό υδροδυναμικό E_{Θ}**
 - Δε λαμβάνονται υπόψη οι απώλειες
 - Το ολικό ύψος πτώσης υπολογίζεται με σημείο αναφοράς τη θάλασσα
 - Η λειτουργία των στροβίλων είναι συνεχής με απόδοση 100%
- **Τεχνικά εκμεταλλεύσιμο δυναμικό $E_T = \sim 0.2-0.3 \times E_{\Theta}$**
 - Απώλειες στη λεκάνη απορροής (διαθέσιμη παροχή)
 - Απώλειες στην υδροδυναμική εγκατάσταση (απώλειες ενέργειας)
 - Υδροδυναμικό μικρών παραποτάμων
- **Οικονομικά εκμεταλλεύσιμο δυναμικό $E_O = \sim 0.2-0.8 \times E_T$**
 - Είναι δυνατόν να παραχθεί με την κατασκευή έργων που είναι οικονομικά αποδοτικά

Ταξινόμηση

- **Ωφέλιμο ύψος πτώσης**
 - Μικρό ύψος πτώσης $< \sim 20-30$ m
 - Μέσο ύψος πτώσης $> \sim 20-30$ m, $< \sim 170-200$ m
 - Μεγάλο ύψος πτώσης $> \sim 170-200$ m
- **Ταμιευτήρας**
 - Σημαντική χωρητικότητα
 - Μικρή χωρητικότητα
 - Χωρίς ταμιευτήρα

Παραγωγή ενέργειας

- **Πρωτεύουσα**

- Η εξασφαλισμένη υδροηλεκτρική ενέργεια που μπορεί να παραχθεί με τις δυσμενέστερες υδρολογικές συνθήκες για την κάλυψη των αναγκών της κατανάλωσης

- **Δευτερεύουσα**

- Κάθε παραγόμενη υδροηλεκτρική ενέργεια επί πλέον της πρωτεύουσας

- **Ενέργεια βάσης**

- **Ενέργεια αιχμής**

Εφαρμογή 7

- Με τα στοιχεία της Εφαρμογής 3 και με δεδομένο ότι δεν υπάρχει άλλη απόληψη, να βρεθεί η πρωτεύουσα και η δευτερεύουσα ενέργεια, καθώς και η ενέργεια που χάνεται, αν δεν υπάρχει ταμιευτήρας και με δεδομένο ότι υπάρχει υδροδυναμική εγκατάσταση που λειτουργεί συνεχώς με τα εξής στοιχεία:
 - Εγκατεστημένη ισχύς 0.4 MW
 - Ωφέλιμο ύψος 40 m
 - Βαθμός απόδοσης 0.8
- Να βρεθούν τα ίδια στοιχεία αν υπάρχει ταμιευτήρας που διασφαλίζει ότι υπάρχει σταθερή παροχή ίση με $1 \text{ m}^3/\text{s}$ και όλη η επιπλέον παροχή (αν υπάρχει) είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ενέργειας

Οικολογική παροχή

Περιβαλλοντική διάσταση

- Το δόγμα «καμία σταγόνα νερού στη θάλασσα» έχει ξεπεραστεί
- Πλέον σε κάθε έργο υπολογίζεται μία ελάχιστη περιβαλλοντική ροή (οικολογική παροχή) για τη διατήρηση της ισορροπίας του κατάντη συστήματος

Μέθοδοι

- **Μέθοδος Tenant**

- 10% της μέσης ετήσιας παροχής (για επιβίωση ενδονοσοκομείων), 30% της μέσης ετήσιας παροχής (για ικανοποιητική υγεία ενδονοσοκομείων), ή 60-100% της μέσης ετήσιας παροχής (για διατήρηση παρθένων οικοσυστημάτων)

- **Μέθοδος ελάχιστης ετήσιας παροχής**

- Μέση μηνιαία παροχή κατά τον ξηρότερο μήνα του έτους

- **Μέθοδος καμπύλης διάρκειας παροχής**

- Κατάταξη σε φθίνουσα σειρά → πιθανότητα υπέρβασης 70%

- **Πιο σύνθετες μέθοδοι που βασίζονται σε βιολογικούς δείκτες**

Εξατμισοδιαπνοή

Ταμιευτήρας

- Μέτρηση εξάτμισης σε ετήσια βάση

$$\Delta S = P + Q - R - G - E - T$$

A απόληψη *Υ* υπερχείλιση

<i>S</i>	αποθήκευση
<i>P</i>	κατακρήμνιση
<i>Q</i>	εισροή
<i>R</i>	εκροή
<i>G</i>	υπόγεια ροή
<i>E</i>	εξάτμιση
<i>T</i>	διαπνοή

Ταμιευτήρας

- Μέτρηση εξάτμισης σε ετήσια βάση

$$\Delta S = P + Q - R - G - E - T$$

A απόληψη

Y υπερχείλιση

$$\Delta S = P + Q - A - Y - ET$$

<i>S</i>	αποθήκευση
<i>P</i>	κατακρήμνιση
<i>Q</i>	εισροή
<i>R</i>	εκροή
<i>G</i>	υπόγεια ροή
<i>E</i>	εξάτμιση
<i>T</i>	διαπνοή

Σχεδιασμός

- Κυρίως είναι η άμεση εξάτμιση που συμβαίνει στον καθρέφτη του ταμιευτήρα
- Πρακτικά ισχύει ό,τι και για την εξατμισοδιαπνοή για την άρδευση
- Χρειάζεται η καμπύλη στάθμης – επιφάνειας ταμιευτήρα → η εξάτμιση εξαρτάται από την υδάτινη επιφάνεια

Υπόγεια ροή

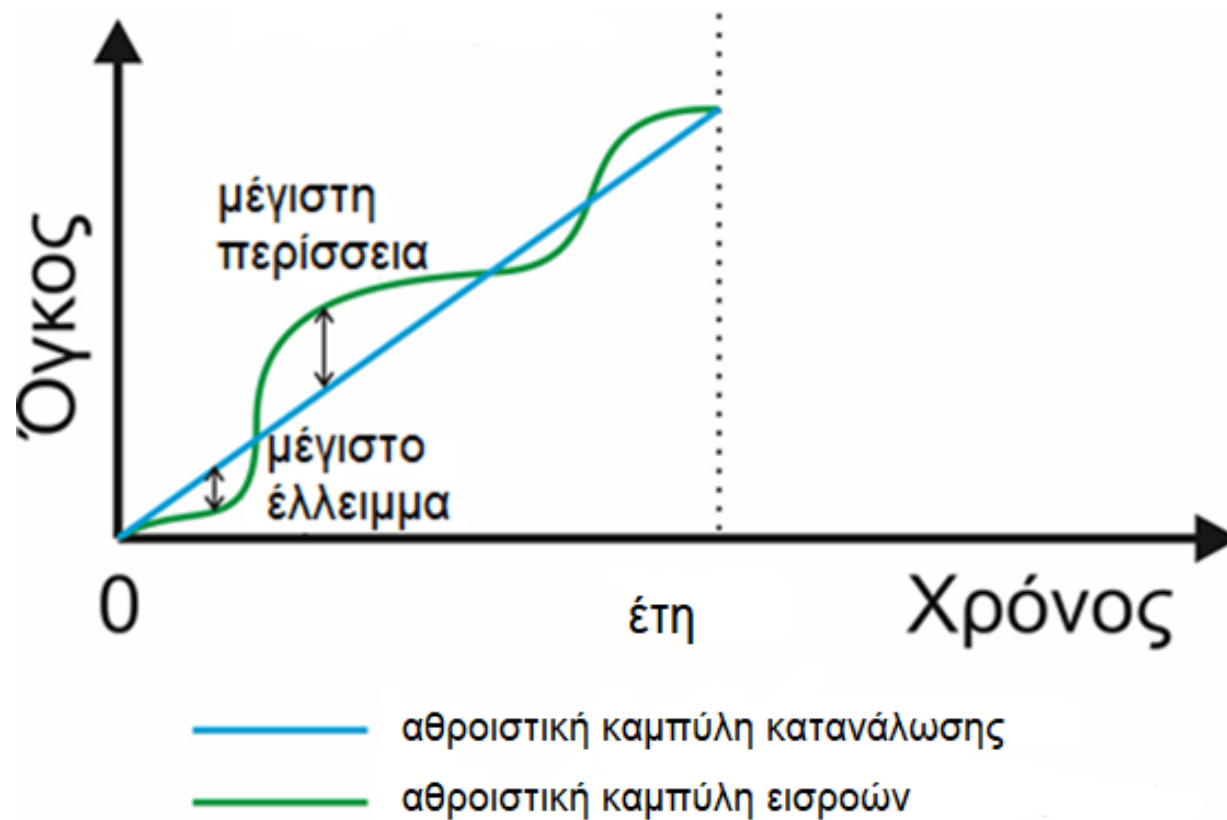
Ροή σε πορώδες μέσο

- **Το νερό που διαφεύγει από το σώμα του φράγματος**
 - Αντιστηρίξεις
 - Θεμέλια
- **Το νερό που φεύγει από τη λεκάνη απορροής σε άλλες λεκάνες**
 - Μπορεί να είναι σημαντικές ποσότητες → καρστικά φαινόμενα
- **Συνήθως λαμβάνεται ως ένα ποσοστό του υδάτινου όγκου**
→ <1%

Σχεδιασμός

- Γραφική μέθοδος
- Sequent peak
- Βελτιστοποίηση
- Στοχαστικές χρονοσειρές

Ωφέλιμος όγκος



Ωφέλιμος Όγκος = Μέγιστη Περίσσεια + Μέγιστο Έλλειμμα

Μέθοδος Sequent Peak

- Υπολογιστική διαδικασία

- ωφέλιμος όγκος V
- αθροιστικός όγκος εισροών I = αθροιστικός όγκος εκροών O

$$V(t) = O(t) - I(t) + V(t-1)$$

$$V(0) = 0$$

$$V(t) < 0 \rightarrow V(t) = 0$$

$$V_{\max}$$

Εφαρμογή 8

- Με τα στοιχεία της Εφαρμογής 3 και με δεδομένο ότι όλη η εισροή γίνεται εκροή, να βρεθεί ο ωφέλιμος όγκος του ταμιευτήρα.

Οι σύγχρονες προσεγγίσεις

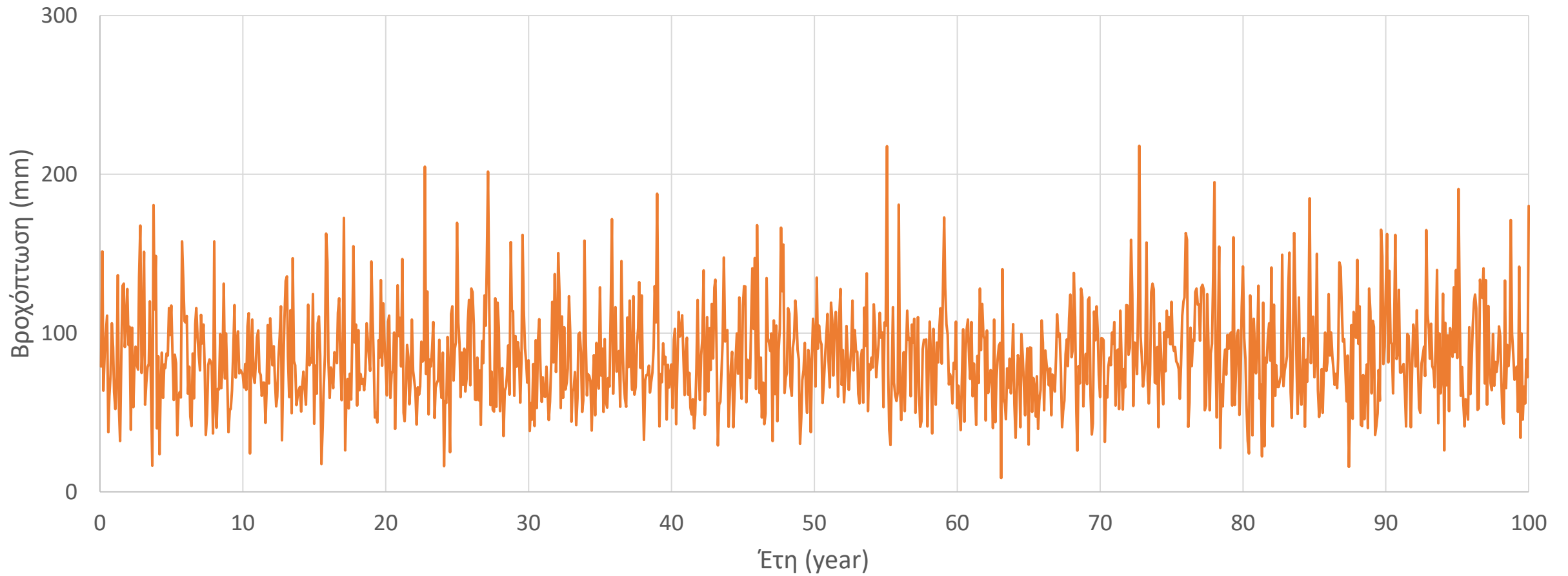
- **Βελτιστοποίηση**
- **Συνάρτηση στόχος**
 - Μέγιστος όγκος απόληψης
 - Μέγιστο όφελος
 - ...
- **Περιορισμοί**
 - Όγκος απόληψης → ελάχιστη δυνατή στάθμη
 - Περιορισμός υπερχείλισης
 - Ετήσια πιθανότητα αστοχίας → 1% για ύδρευση, 12.5% για άρδευση

Φτάνουν οι μετρήσεις μας;

- Οι χρονοσειρές είναι περιορισμένες → 30-50 έτη στην καλύτερη περίπτωση
- Απαιτούνται πολλά χρόνια (π.χ. πώς υπολογίζεται η ετήσια πιθανότητα αστοχίας 1% με χρονοσειρά κάτω των 100 ετών;)
- Παραγωγή χρονοσειρών με στοχαστικές διεργασίες

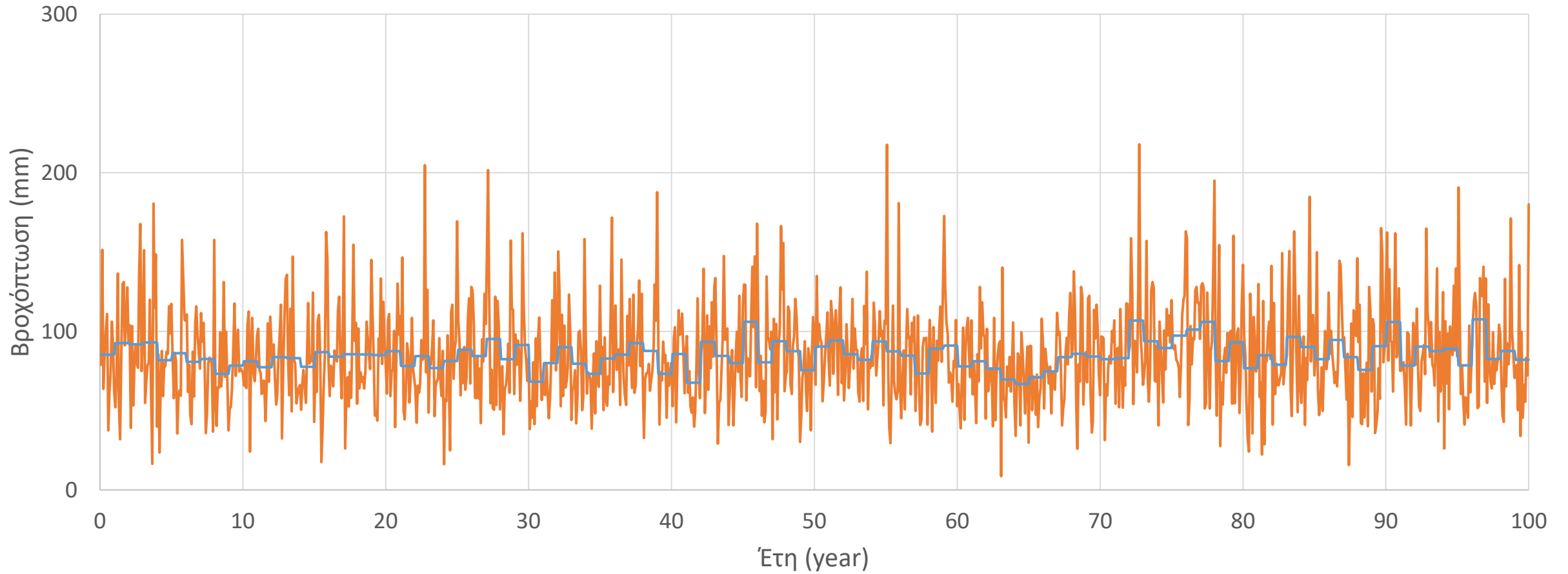
Χρονοσειρά

μηνιαία ύψη βροχής



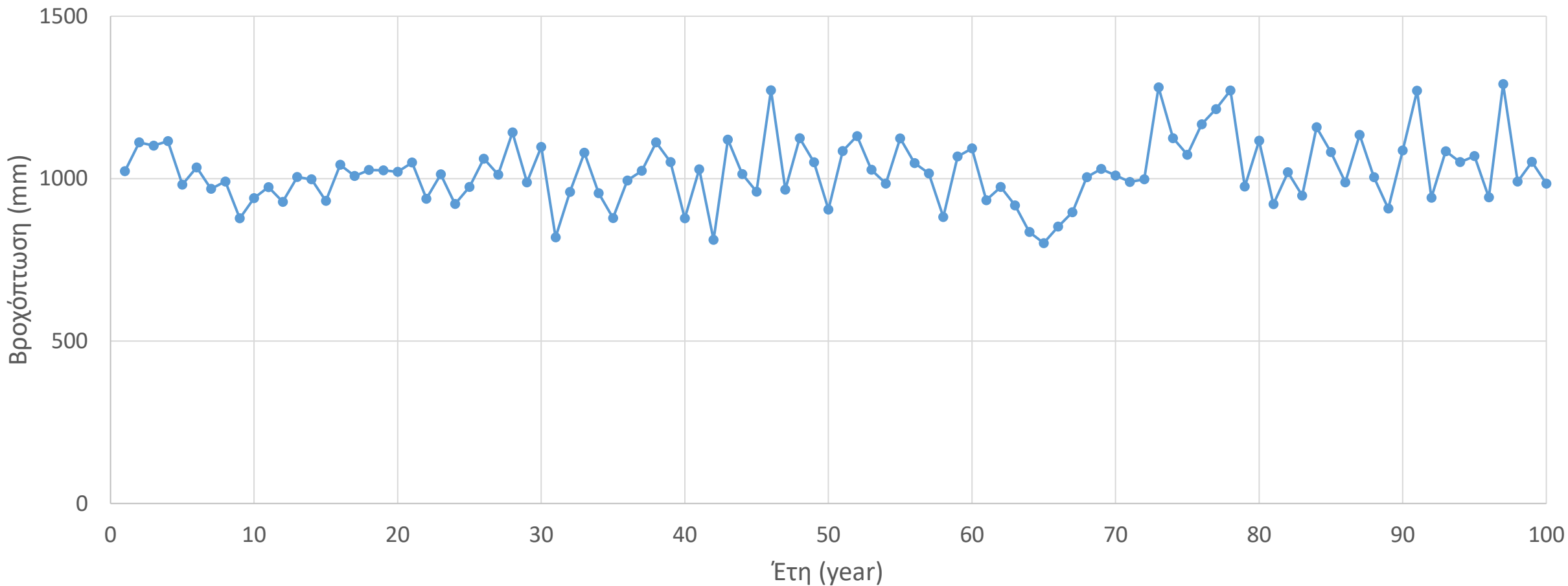
Χρονοσειρά

μέσο μηνιαίο ύψος



Χρονοσειρά

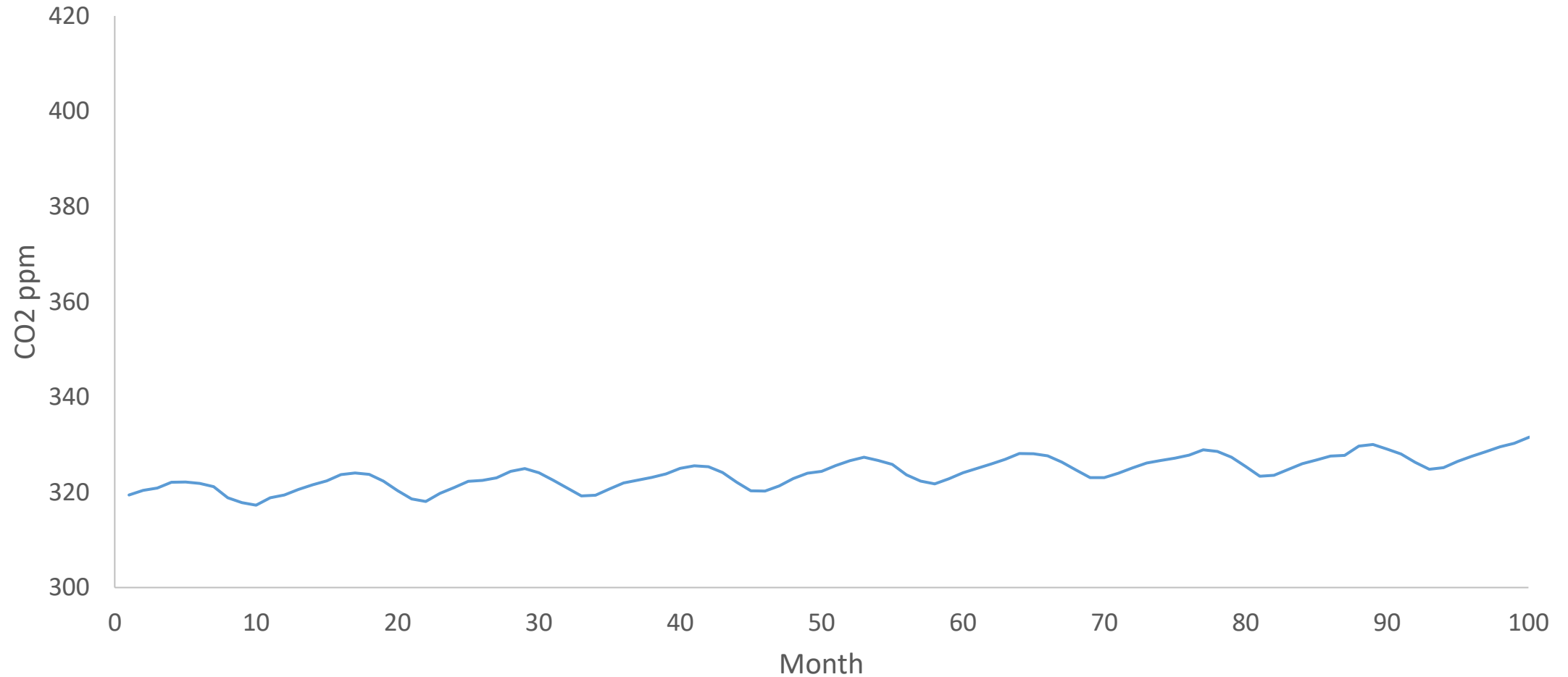
ετήσια ύψη βροχής



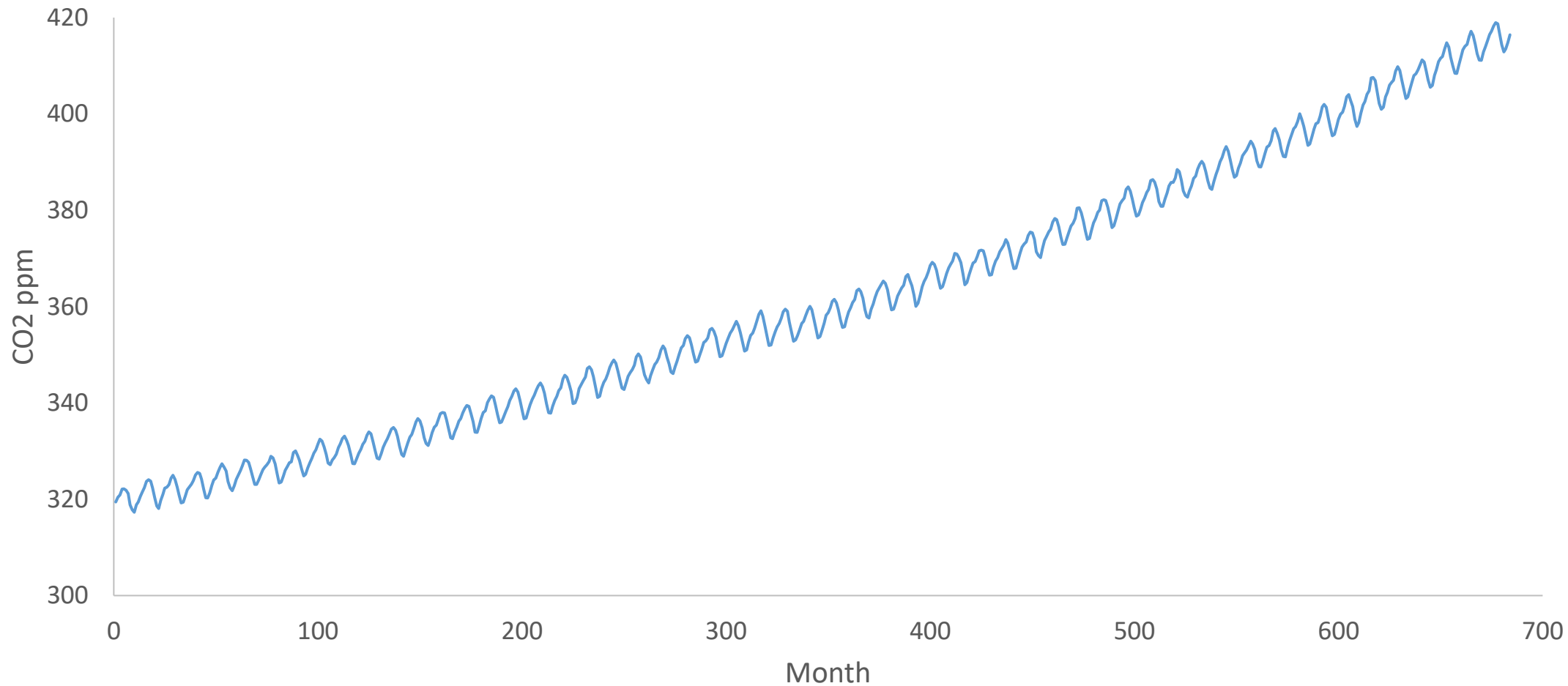
ΣΥΝΙΣΤΑΜΕΝΕΣ

- Ακραίο γεγονός
- Περιοδικότητα
- Γραμμική τάση
- Εμμονή

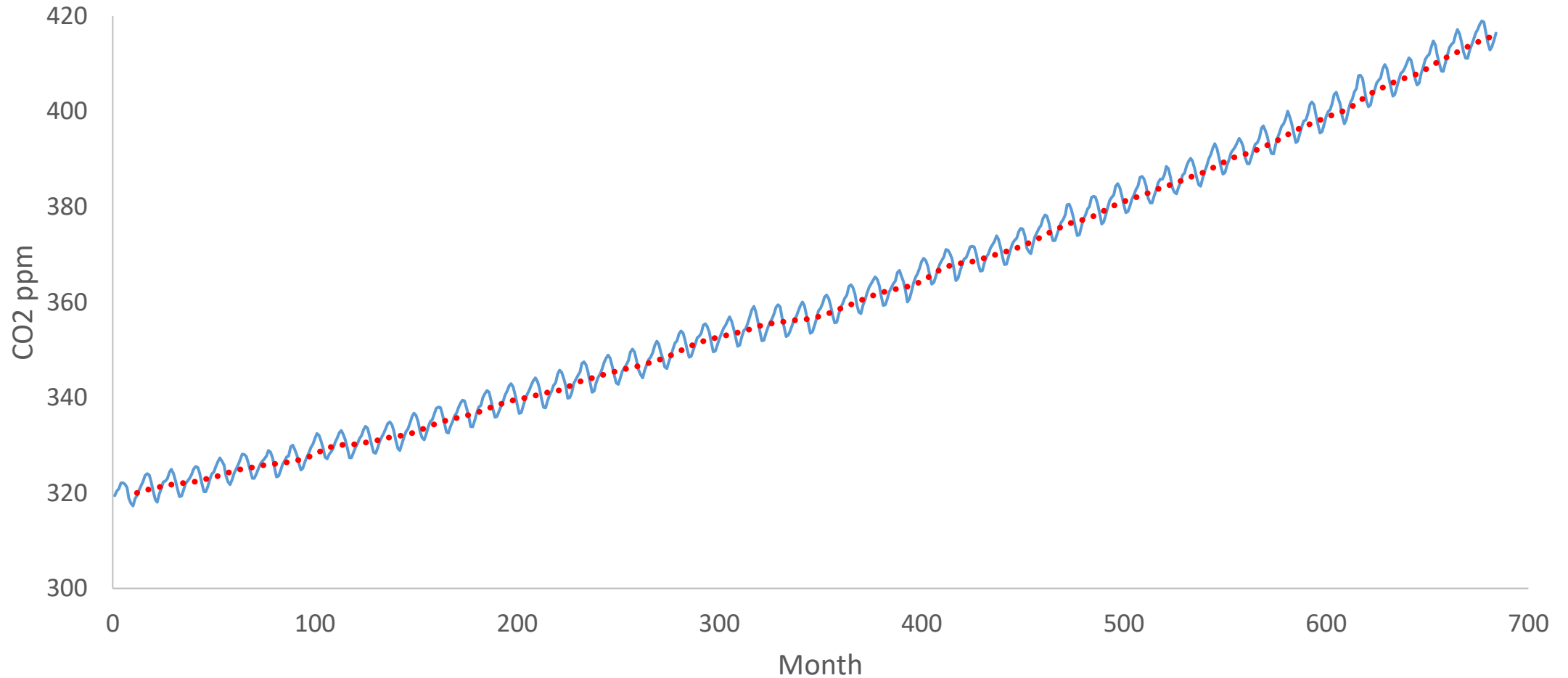
Περιοδικότητα



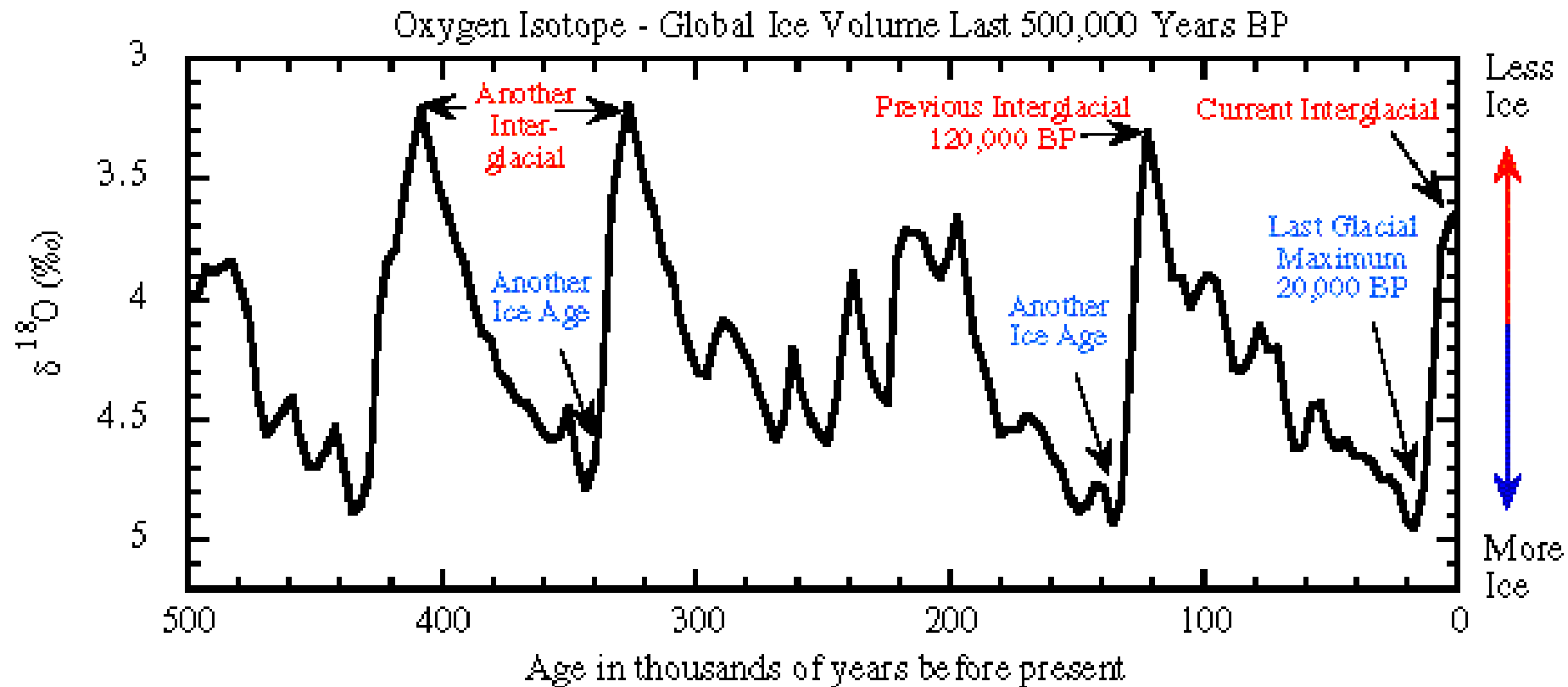
Περιοδικότητα



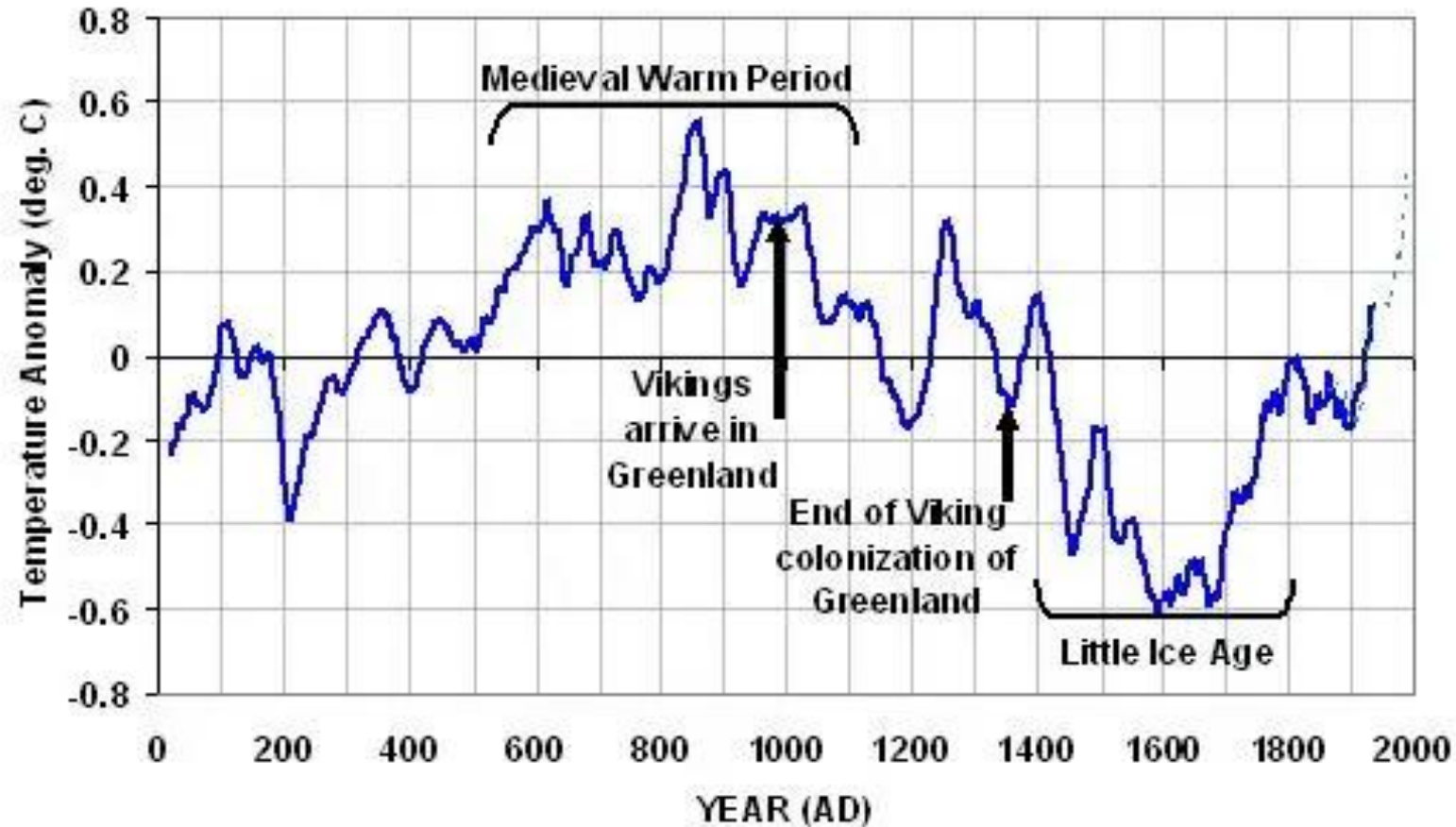
Γραμμική τάση



Ακραίο γεγονός

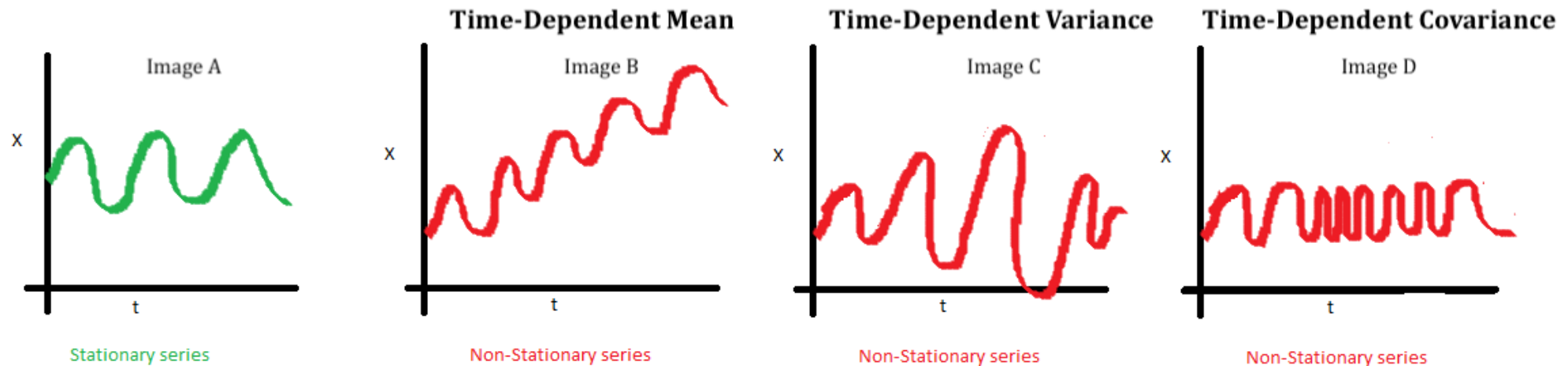


Εμμονή



Στασιμότητα

- Τα στατιστικά χαρακτηριστικά παραμένουν σταθερά σε όλες τις χρονικές κλίμακες
 - Μέσος όρος
 - Διακύμανση
 - Συνδιακύμανση



Κατασκευή χρονοσειρών

- Στοχαστικά μοντέλα
- Ο στόχος είναι η παραγωγή χρονοσειράς μεγάλου μήκους η οποία είναι ισοδύναμη στατιστικά με τη μητρική
- **ΠΡΟΣΟΧΗ** → δεν είναι πρόβλεψη για το μέλλον!!!

Στοχαστικά μοντέλα

- **Στάσιμες σειρές**
 - Μοντέλο αυτοσυσχέτισης *AR*
 - Μοντέλο κυλιόμενων ΜΟ *MA*
 - Σύνθετα μοντέλα *ARMA*
- **Μη στάσιμες σειρές**
 - Μοντέλα *ARIMA*
 - *FFGN* (διατήρηση εμμονής)

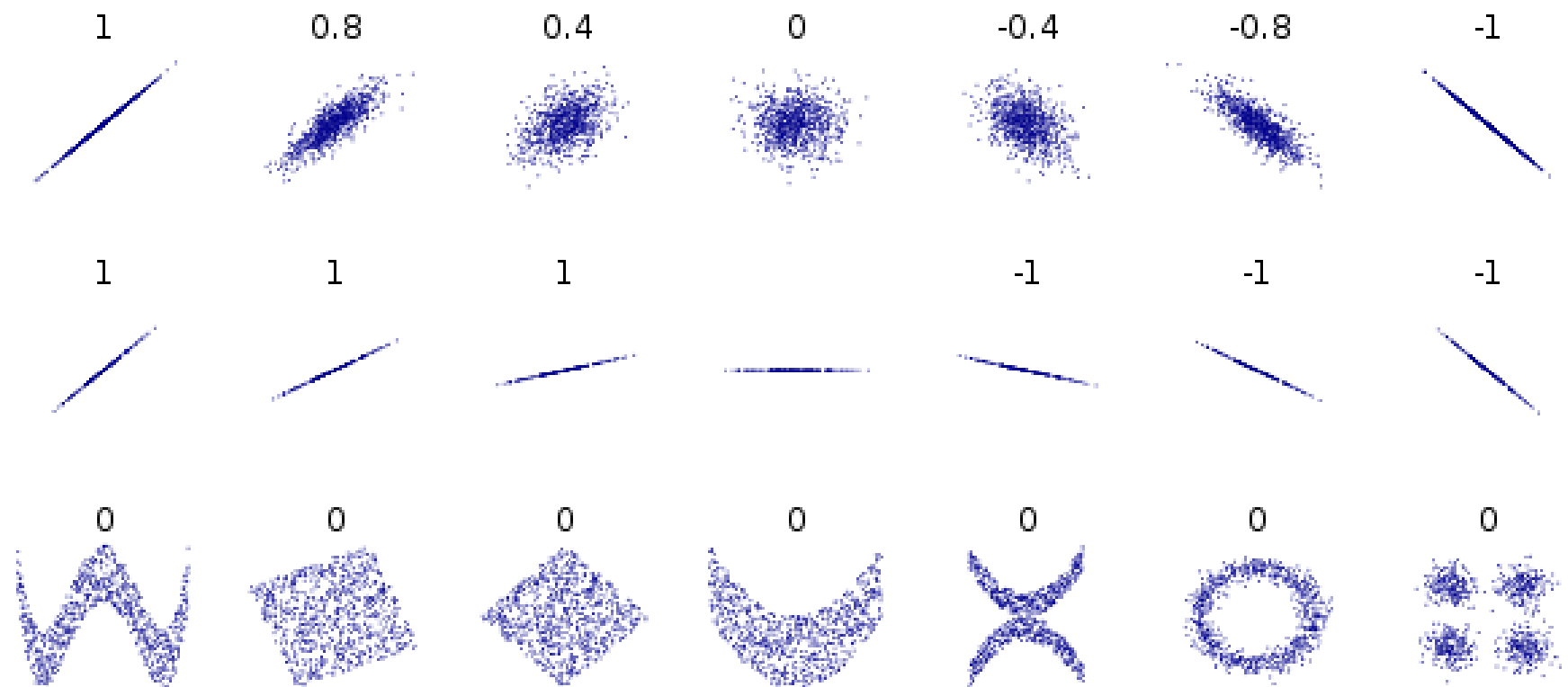
Μοντέλο Fiering

μοντέλο αυτοσυσχέτισης

$$q_i = \mu + \rho_1(q_{i-1} - \mu) + t_i\sigma\sqrt{1 - \rho_1^2}$$

q	η εκάστοτε μεταβλητή
μ	μέσος όρος
σ	τυπική απόκλιση
ρ_1	συντελεστής αυτοσυσχέτισης πρώτης τάξης
t_i	τυχαίος αριθμός με κανονική τιμή ($\mu=0, \sigma=1$)

Συσχέτιση



Συσχέτιση

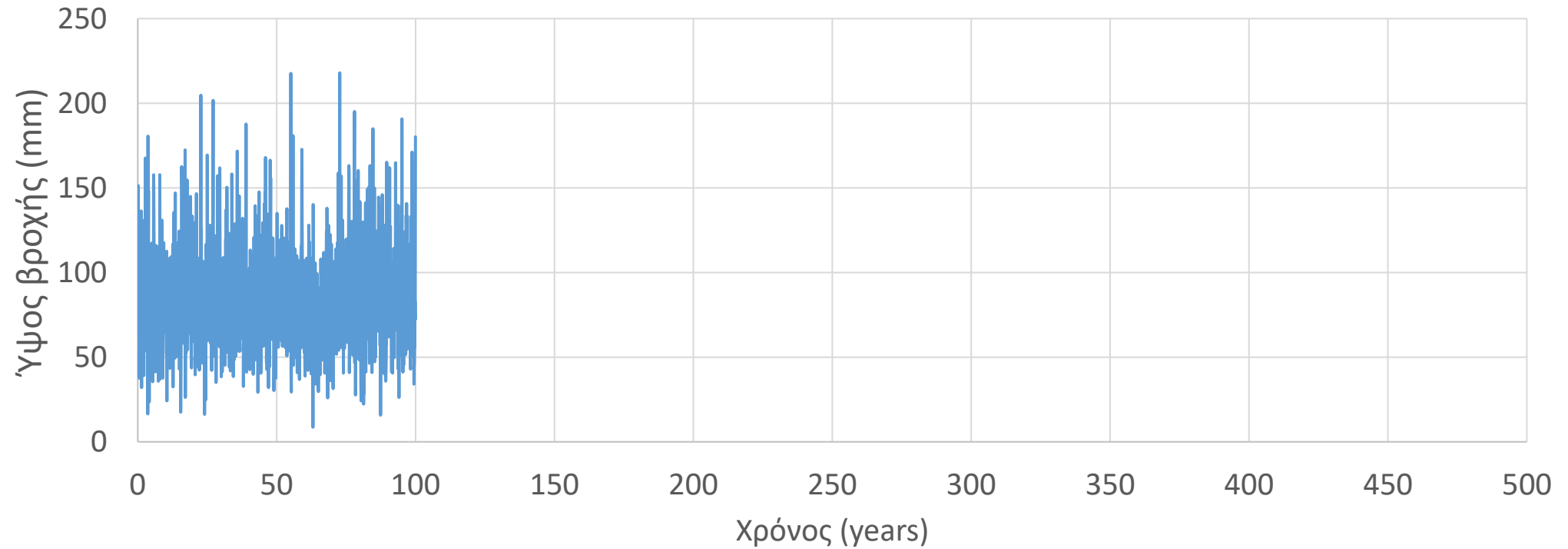
- Συντελεστής συσχέτισης

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

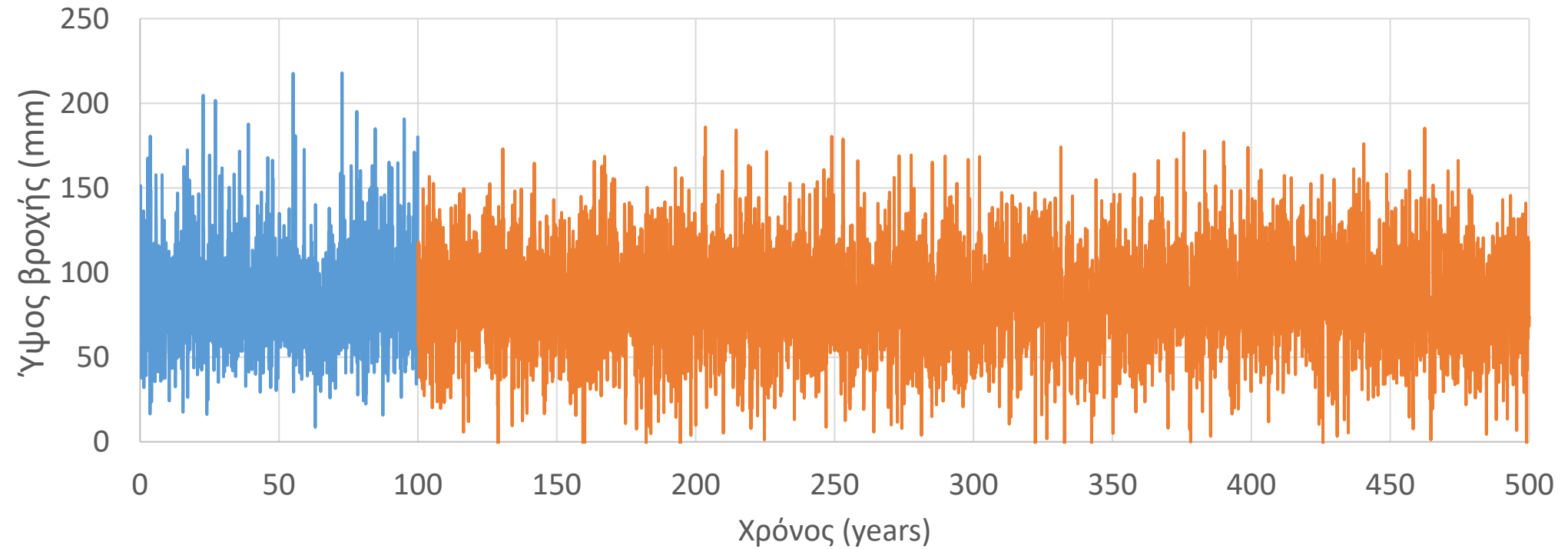
- Συντελεστής αυτοσυσχέτισης με υστέρηση $\tau \rightarrow$ τάξη

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^{n-\tau} (x_i - \bar{x})(x_{i+\tau} - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Χρονοσειρά βροχής



Χρονοσειρά βροχής



Εφαρμογή 9

- Να κατασκευαστεί μία χρονοσειρά 500 ετών χρησιμοποιώντας το στοχαστικό μοντέλο Fiering, έχοντας ως βάση την ιστορική χρονοσειρά βροχόπτωσης που έχει καταγραφεί στη Νέα Υόρκη

