



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΠΑΤΡΩΝ  
UNIVERSITY OF PATRAS

ΑΝΟΙΚΤΑ ακαδημαϊκά  
μαθήματα ΠΠ

# Αιολική Ενέργεια & Ενέργεια του Νερού

## Ενότητα 9: Υδραυλικά Φαινόμενα

Γεώργιος Λευθεριώτης, Επίκουρος Καθηγητής  
Τμήμα Φυσικής



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

# Σκοποί ενότητας

- Γνωριμία με γενικά φαινόμενα υδρολογίας
- Παρουσίαση μεθόδων εκτίμησης κατακρημνισμάτων
- Φυσικό και μαθηματικό υπόβαθρο υπολογισμού παροχών σε ανοιχτά/κλειστά κανάλια, σωλήνες πίεσεως. Σύνδεση με τις παροχές υδροηλεκτρικών και ενεργειακοί υπολογισμοί επί αυτών.
- Εξοικίωση με υδρογραφήματα, διαγράμματα καμπύλης παροχών, διάγραμμα Moody, διάγραμμα ειδικής ενέργειας
- Γνωριμία με εξειδικευμένα υδραυλικά φαινόμενα (άμλα, πλήγμα, σπηλαίωση, κύματα νερού)

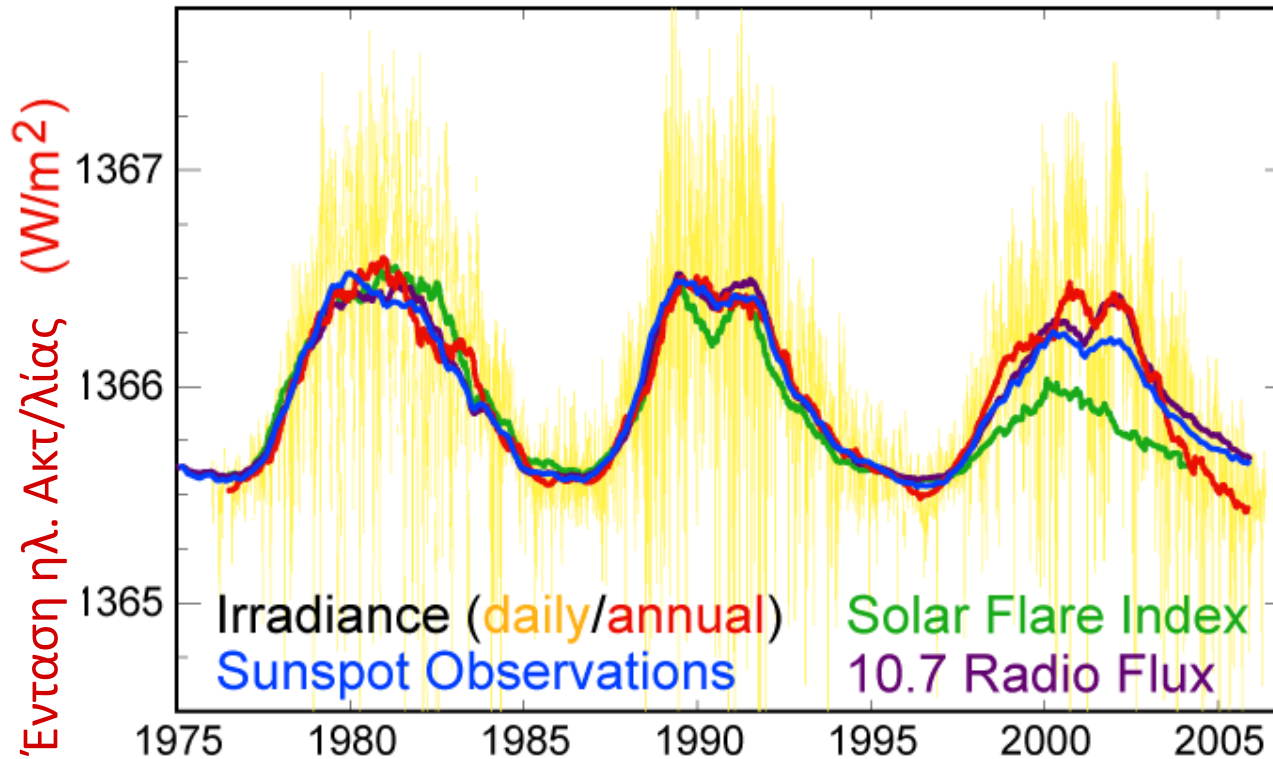
# Περιεχόμενα ενότητας (1)

- Στοιχεία υδρολογίας
  - Επίδραση 11ετούς κύκλου στις παροχές
  - Υδρολογικός κύκλος
- Λεκάνες απορροής
- Κατακρημνίσματα
  - Βροχόμετρα
  - εκτίμηση όγκου – πολύγωνα Thiessen
- Μέτρηση/αξιοποίηση παροχών
  - Καμπύλη διάρκειας παροχών
  - Ελληνικά ποτάμια

# Περιεχόμενα ενότητας (2)

- Ενεργειακοί υπολογισμοί υδροηλεκτρικών
- Ροή σε σωλήνες πιέσεως
- Ροή νερού σε ανοιχτά κανάλια: Ειδική ενέργεια Froude
- Εφαρμογή: Υδραυλικό άλμα
- Υδραυλικό πλήγμα
- Σπηλαιώση
- Κύματα στο νερό

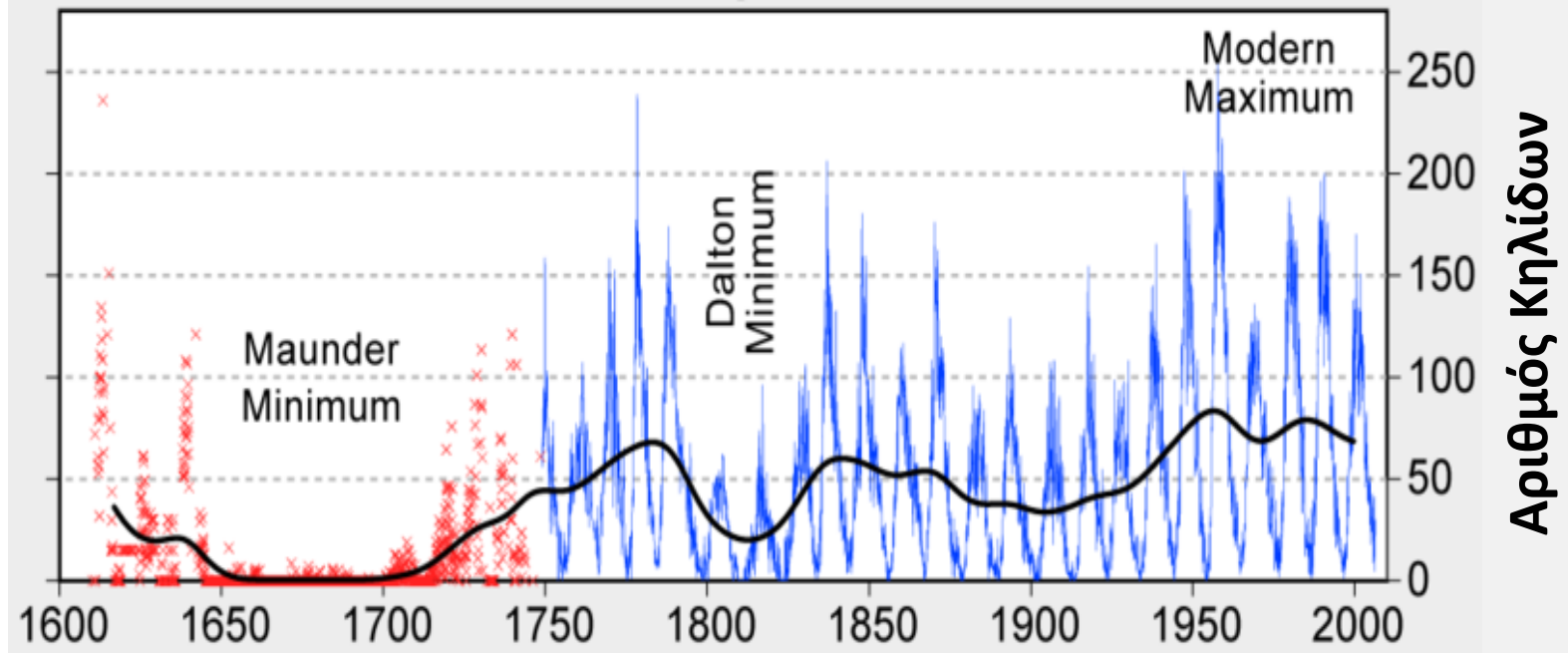
# Στοιχεία Υδρολογίας (1)



[http://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_maximum](http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_maximum)

# Στοιχεία Υδρολογίας (2)

## 400 Χρόνια Παρατήρησης Ηλιακών Κηλίδων

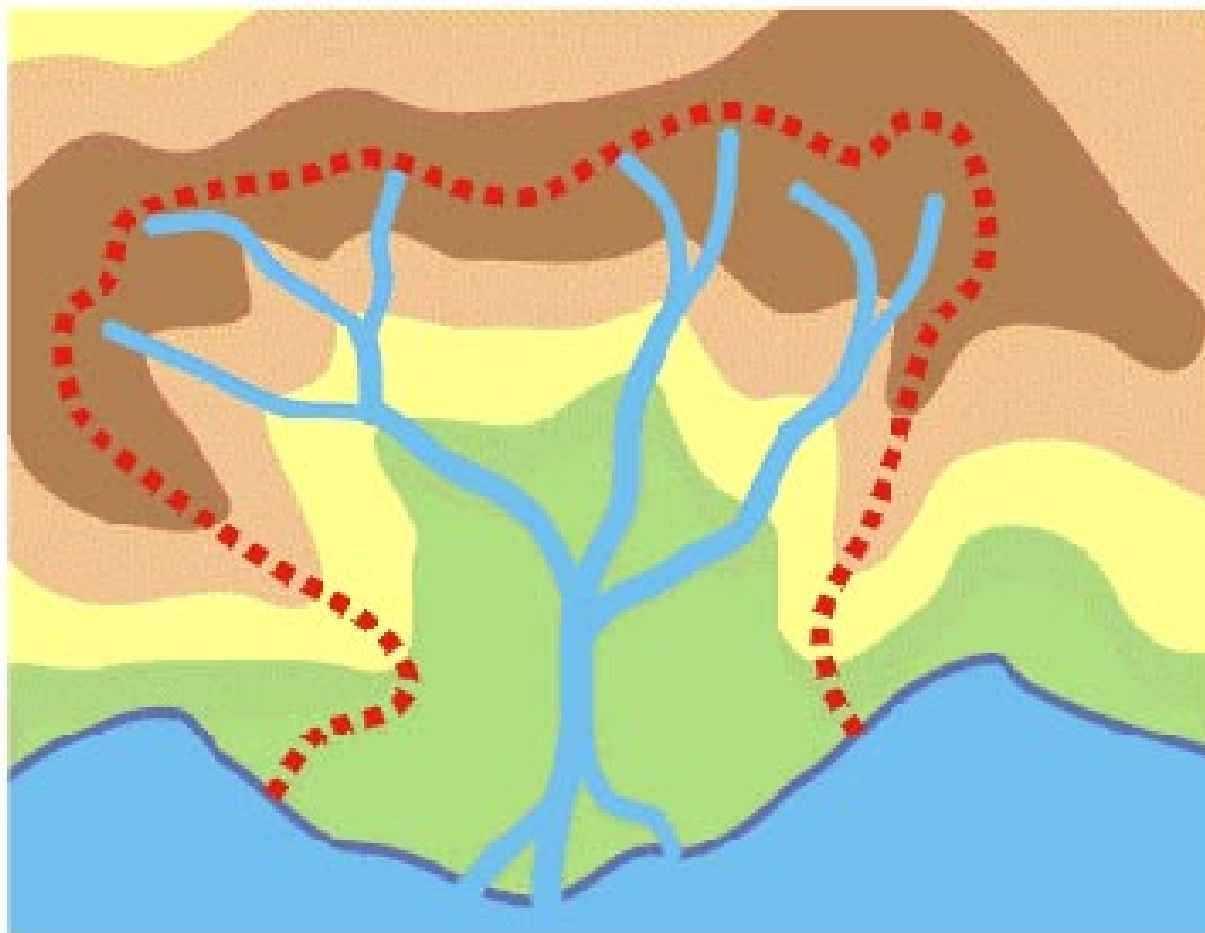


[http://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_maximum](http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_maximum)

# Ο υδρολογικός Κύκλος



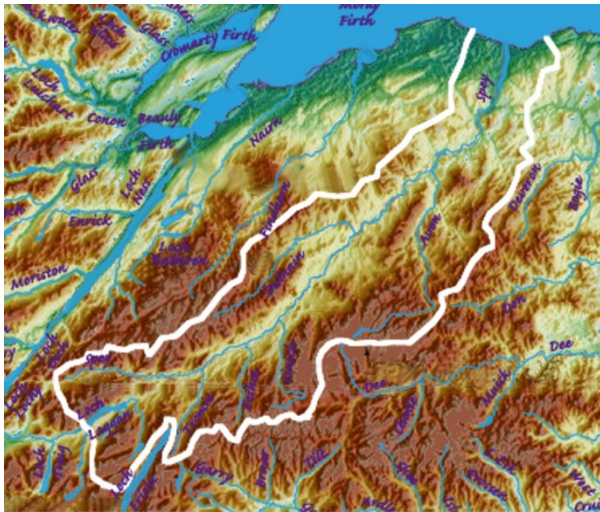
# Λεκάνη απορροής - Υδροκρίτης



[http://www.oocities.org/zorbopoulou/a\\_enot.html](http://www.oocities.org/zorbopoulou/a_enot.html)



# Είδη λεκανών απορροής



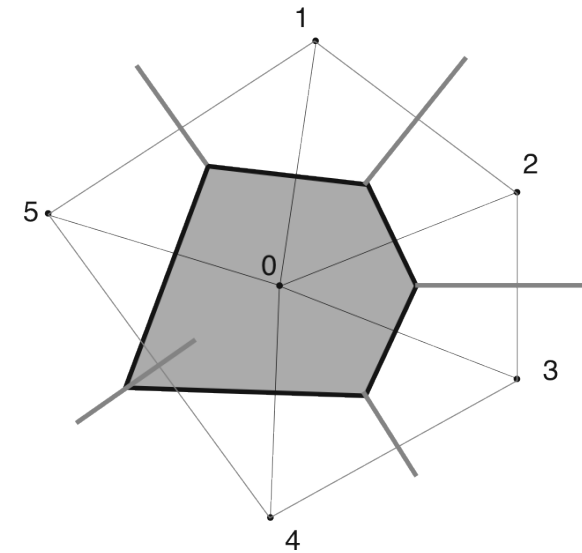
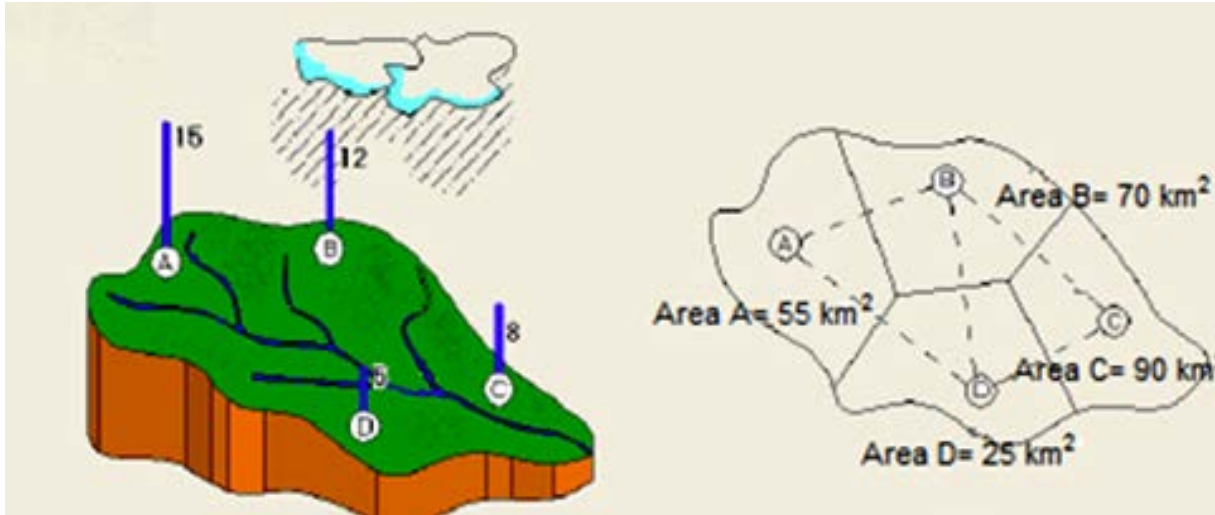
<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tweed.catchment.jpg>

# Κατακρημνίσματα-βροχόμετρα



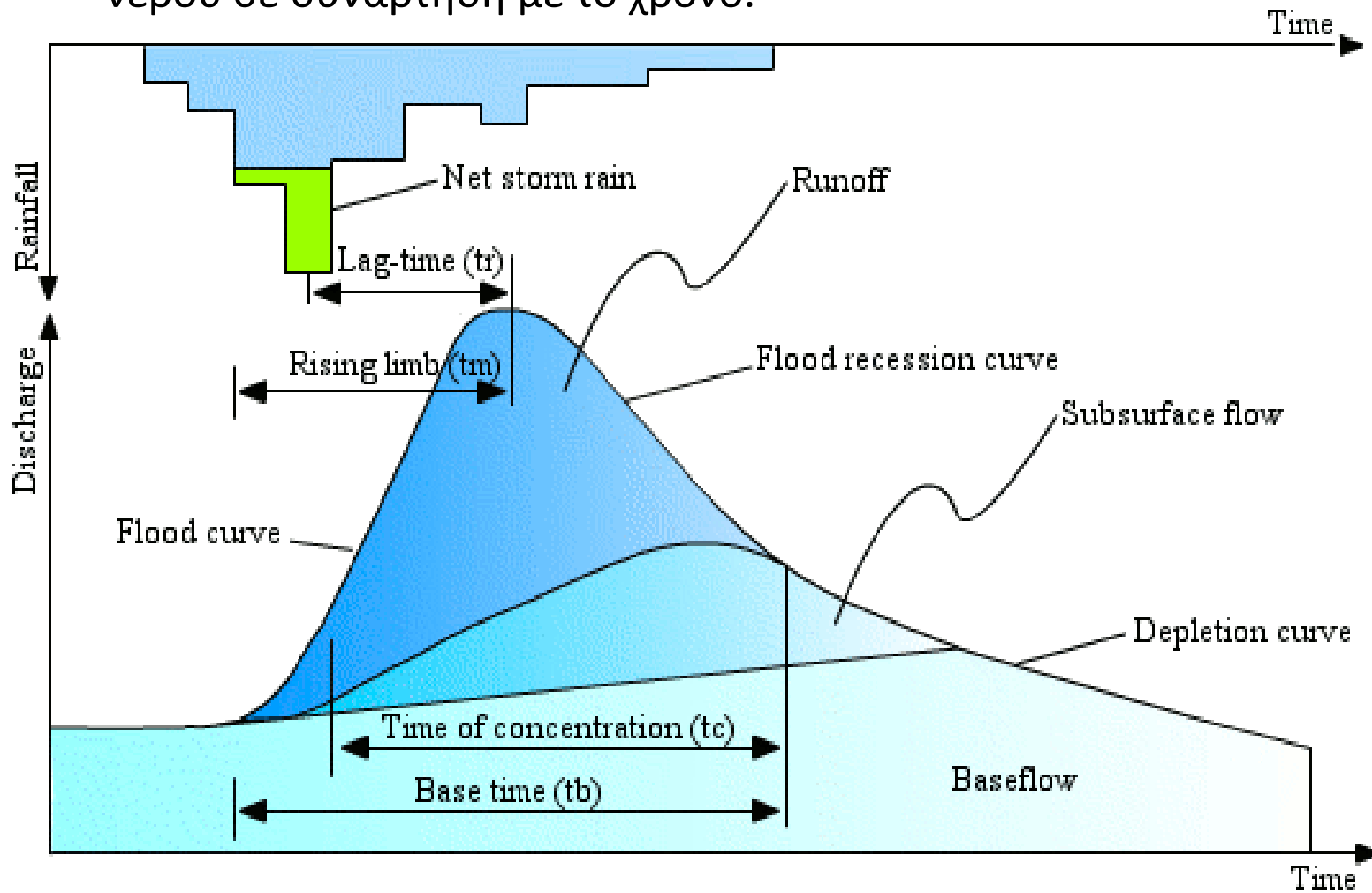
<http://commons.wikimedia.org>

# Εκτίμηση όγκου - Πολύγωνα Thiessen

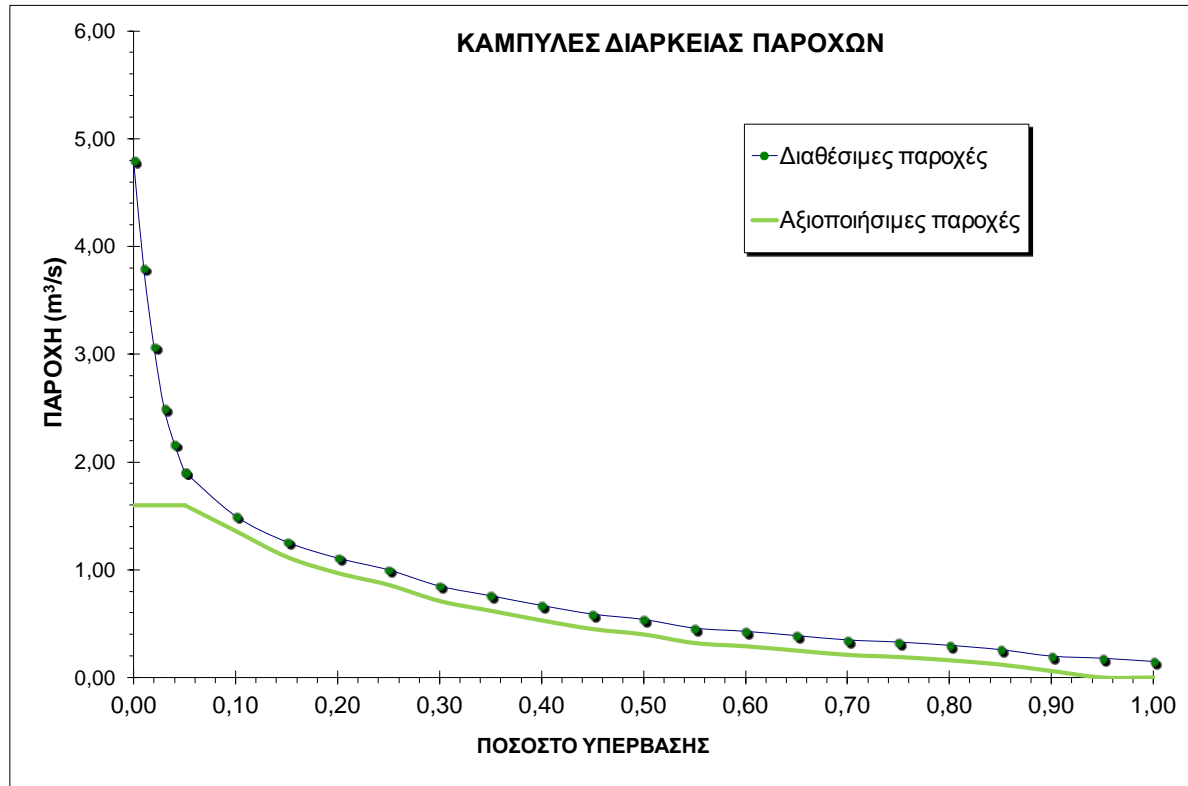


# Υδρογράφημα

**Υδρογράφημα** : πρόκειται για διάγραμμα της παροχής όγκου νερού σε συνάρτηση με το χρόνο.



# Αξιοποίηση παροχών



- **Δεν** μπορώ να πάρω όλη την ποσότητα νερού του ποταμιού. Η ποσότητα που πρέπει να μείνει λέγεται **οικολογική ποσότητα**.
- Για μεγαλύτερη αξιοποίηση του διαθέσιμου δυναμικού θα πρέπει  $Q_{max}$  το να βρίσκεται όσο το δυνατόν ψηλότερα και το  $Q_{min}$  όσο το δυνατόν πιο κάτω.

# Ενεργειακοί υπολογισμοί υδροηλεκτρικών (1)

Το νερό βρίσκεται σε ύψος  $H$  και η δυναμική του ενέργεια μετατρέπεται σε κινητική από τον υδροστρόβιλο και κατόπιν σε ηλεκτρική από τη γεννήτρια.

**Νόμος Bernoulli:**  $\rho gH = \frac{1}{2} \rho V^2 \Rightarrow V = \sqrt{2gH}$

**Διαθέσιμη ισχύς:**  $P = \frac{mgH}{t} \xrightarrow{\frac{m}{t} = \rho Q} P = \rho gHQ$

$$P = \frac{\frac{1}{2} mV^2}{t} \xrightarrow{\frac{m}{t} = \rho Q, V^2 = 2gH} P = \rho gHQ$$

# Ενεργειακοί υπολογισμοί υδροηλεκτρικών (2)

**Μέση ισχύς:**  $P_{av} = \eta \rho g H Q_{av}$ ,  $\eta = \eta_{στρ} \eta_{μηχ} \eta_{ηλ}$

**Μέγιστη ισχύς:**  $P_{max} = \eta \rho g h' Q_{max}$

**Συντ αποδοτικότητα:**  $CF = \frac{P_{ave}}{P_{max}}$        $CF \approx \frac{Q_{ave}}{Q_{max}}$

**Ενέργεια που παράγεται από υδροηλεκτρικό έργο  
σε ένα χρόνο:**

$$E_{av} = P_{av} \cdot t \quad (t \rightarrow \text{hours})$$

$$E_{av} = \eta \rho g H Q_{av} \times 8640h \quad (\text{σε } MWh)$$

# Ενεργειακοί υπολογισμοί υδροηλεκτρικών (3)

Βαθμός ενεργειακής ή αξιοποίησης των παροχών  
– ΒΕΑ –

$$BEA = \frac{\text{Αξιοποιήσιμος όγκος νερού}}{\text{Διαθέσιμος όγκος νερού}}$$

Μας δείχνει που βρίσκονται τα  $Q_{max}$ ,  $Q_{min}$  σε σχέση με την καμπύλη παροχών

Όταν κατεβάζουμε το  $Q_{max}$  μειώνουμε το ΒΕΑ αλλά αυξάνουμε την ενεργειακή αξιοποίηση.



# Υπολογισμός $Q_{av}$ (1)

**Αριθμητική μέθοδος ολοκλήρωσης του τραπεζιού**

$$E = \frac{(B + \beta)\nu}{2}$$

$$E_i = \frac{\Delta t}{2} [Q(t_i) + Q(t_i + 1)]$$

$$E_{i+1} = \frac{\Delta t}{2} [Q(t_i + 1) + Q(t_i + 2)]$$

Τελικά λοιπόν:

$$\int_{t_0}^{t_N} Q(t) dt \approx \frac{\Delta t}{2} \left( Q(t_0) + Q_{t_N} + 2 \sum_{i=1}^{N-1} Q(t_i) \right)$$

Εάν έχουμε προσεγγίσει την καμπύλη διάρκειας παροχών με μια εκθετική συνάρτηση:

$$Q_{av} = Q_{\text{περ}(1)} + Q_{\text{περ}(2)} \Rightarrow Q_{av} = Q_{mt_0} + Q_0 \int_{t_0}^{t_i} e^{-At} dt \Rightarrow$$

$$Q_{av} = Q_{mt_0} - \frac{Q_0}{A} (e^{-At_i} - e^{-At_0}) \quad (1)$$

# Υπολογισμός $Q_{av}$ (2)

Από την καμπύλη προκύπτει όμως:

$$Q_{\min} = Q_0 e^{-At_0} \Rightarrow \frac{Q_m}{Q_0} = e^{-At_0} \Rightarrow \ln\left(\frac{Q_m}{Q_0}\right) = -At_0 \Rightarrow$$

$$t_0 = -\frac{\ln\left(\frac{Q_m}{Q_0}\right)}{A} \quad (2)$$

Επίσης:  $Q_{\min} = Q_0 e^{-At_i} \Rightarrow KQ_m = Q_0 e^{-At_i} \Rightarrow \frac{KQ_m}{Q_0} = e^{-At_i} \Rightarrow \ln\left(\frac{KQ_m}{Q_0}\right) = -At_i \Rightarrow$

$$t_i = -\frac{\ln\left(\frac{KQ_m}{Q_0}\right)}{A} \quad (3)$$

$$(1) \xrightarrow{(2)} \xrightarrow{(3)} Q_{av} = -\frac{Q_m}{A} \ln\left(\frac{Q_m}{Q_0}\right) - \frac{Q_0}{A} \left(\frac{KQ_m}{Q_0} - \frac{Q_m}{Q_0}\right) \Rightarrow Q_{av} = -\frac{Q_m}{A} \ln\left(\frac{Q_m}{Q_0}\right) - \frac{1}{A} (KQ_m - Q_m) \Rightarrow$$

$$Q_{av} = \frac{Q_m}{A} \ln \left[ 1 - K - \ln\left(\frac{Q_m}{Q_0}\right) \right] \quad (\text{Εάν πολ / σω } Q_{ave} \text{ με } t \text{ προκύπτει η } E_{ave})$$

# Υπολογισμός $Q_{av}$ (3)

Για να προκύψει το καλύτερο  $Q_m$  πρέπει:

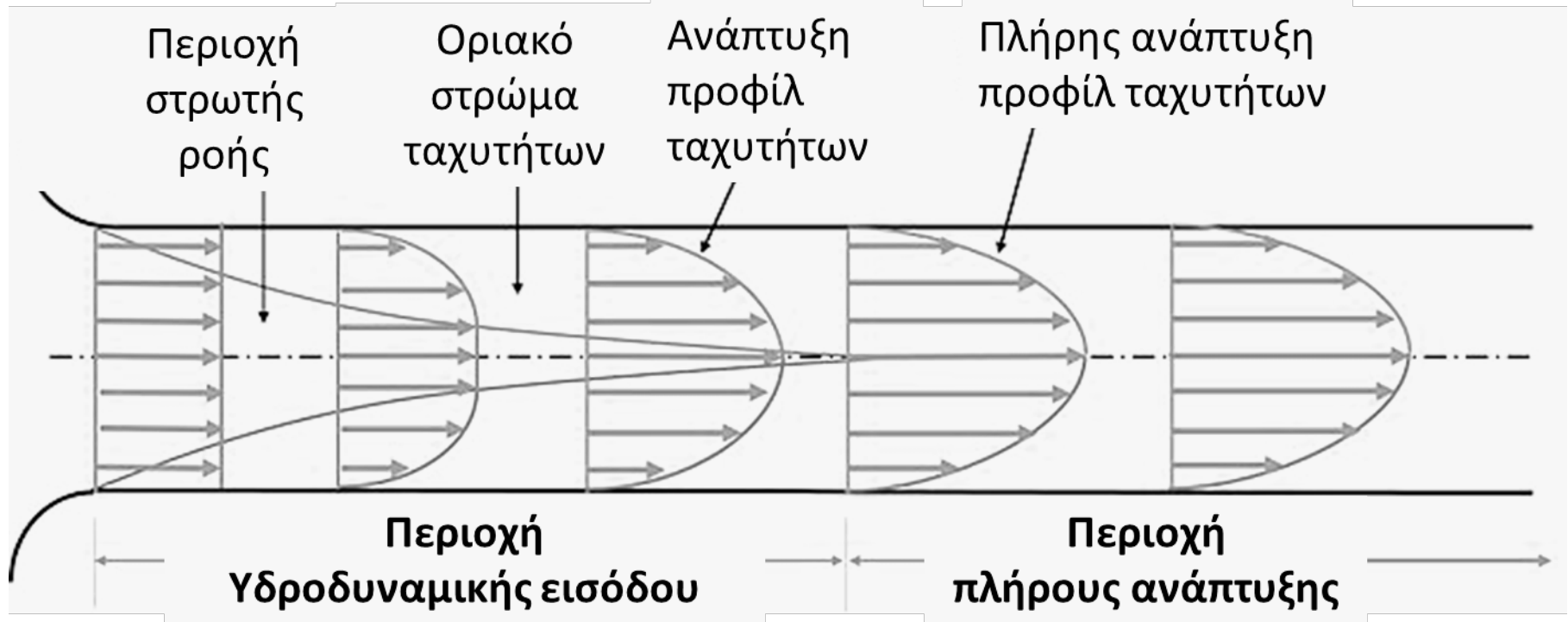
$$\frac{dQ_{av}}{dQ_m} = 0 \Rightarrow \frac{1}{A} - \frac{K}{A} - \frac{1}{A} \ln\left(\frac{Q_m}{Q_0}\right) - \frac{Q_m}{A} \frac{1}{\frac{Q_m}{Q_0}} \frac{Q_m}{Q_0} = 0 \Rightarrow$$

$$\frac{1}{A} - \frac{K}{A} - \frac{1}{A} \ln\left(\frac{Q_m}{Q_0}\right) - \frac{\cancel{Q_m}}{A} \frac{\cancel{Q_0}}{\cancel{Q_m}} \frac{1}{\cancel{Q_0}} = 0 \Rightarrow \frac{1}{A} - \frac{K}{A} - \frac{1}{A} \ln\left(\frac{Q_m}{Q_0}\right) - \frac{1}{A} = 0$$

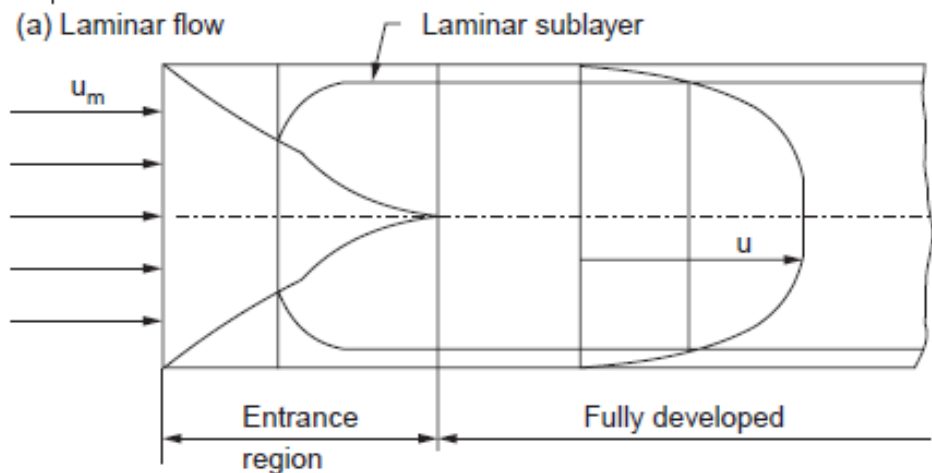
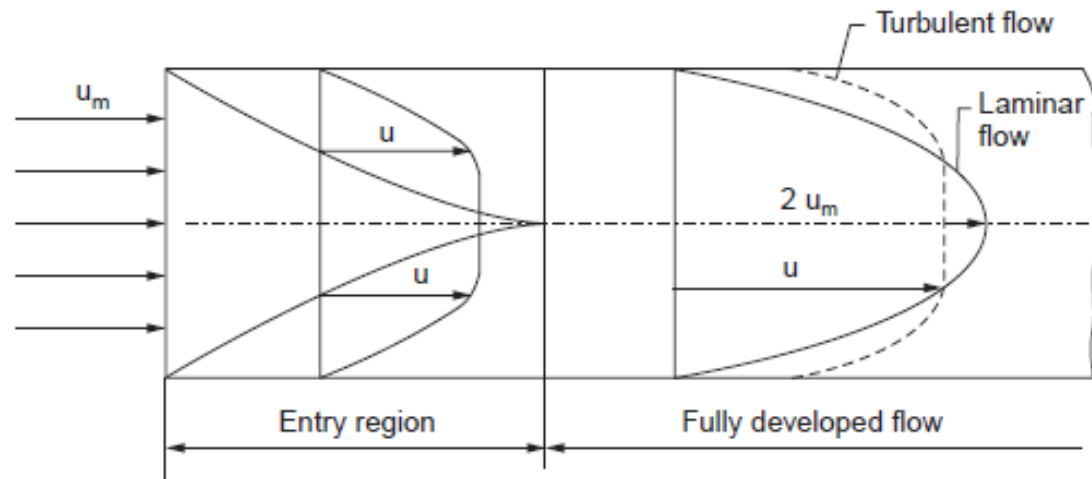
$$-K - \ln\left(\frac{Q_m}{Q_0}\right) = 0 \Rightarrow K + \ln\left(\frac{Q_m}{Q_0}\right) = 0 \Rightarrow \ln\left(\frac{Q_m}{Q_0}\right) = -K \Rightarrow Q_m = Q_0 e^{-K}$$

$$\frac{d^2 Q_{av}}{dQ_m^2} = -\frac{1}{A} \frac{Q_0}{Q_m} \frac{1}{Q_0} < 0 \text{ (Μέγιστο)}$$

# Ροή σε σωλήνες πιέσεως (1)



# Ροή σε σωλήνες πίεσης (3)

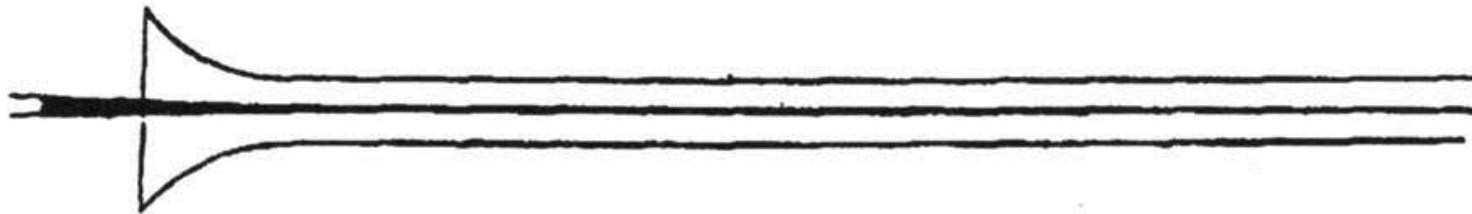


(b) Turbulent flow

# Ροή σε σωλήνες πίεσεως (4)

**Στρωτή Ροή (Laminar flow)**

$Re < 2000$

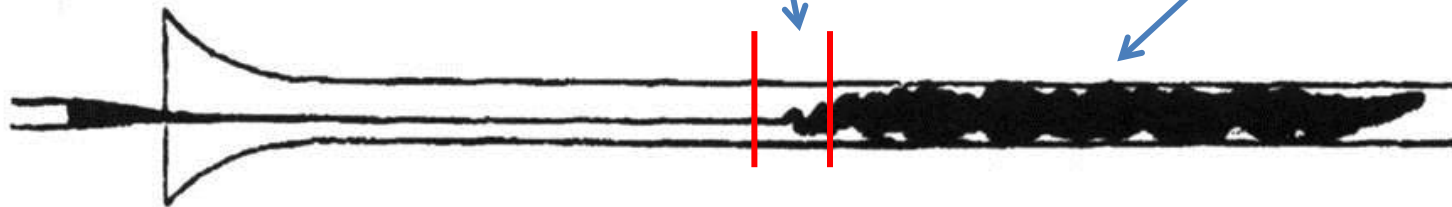


**Τυρβώδης Ροή (Turbulent flow)**

$Re > 4000$

**Μεταβατικό Στάδιο (Transition)**

$2000 < Re < 4000$



# Ροή σε σωλήνες πιέσεως (5)

**Μήκος εισόδου:**  $\frac{x}{d} = \frac{Re}{30}, Re = \frac{\rho V d}{\mu}$

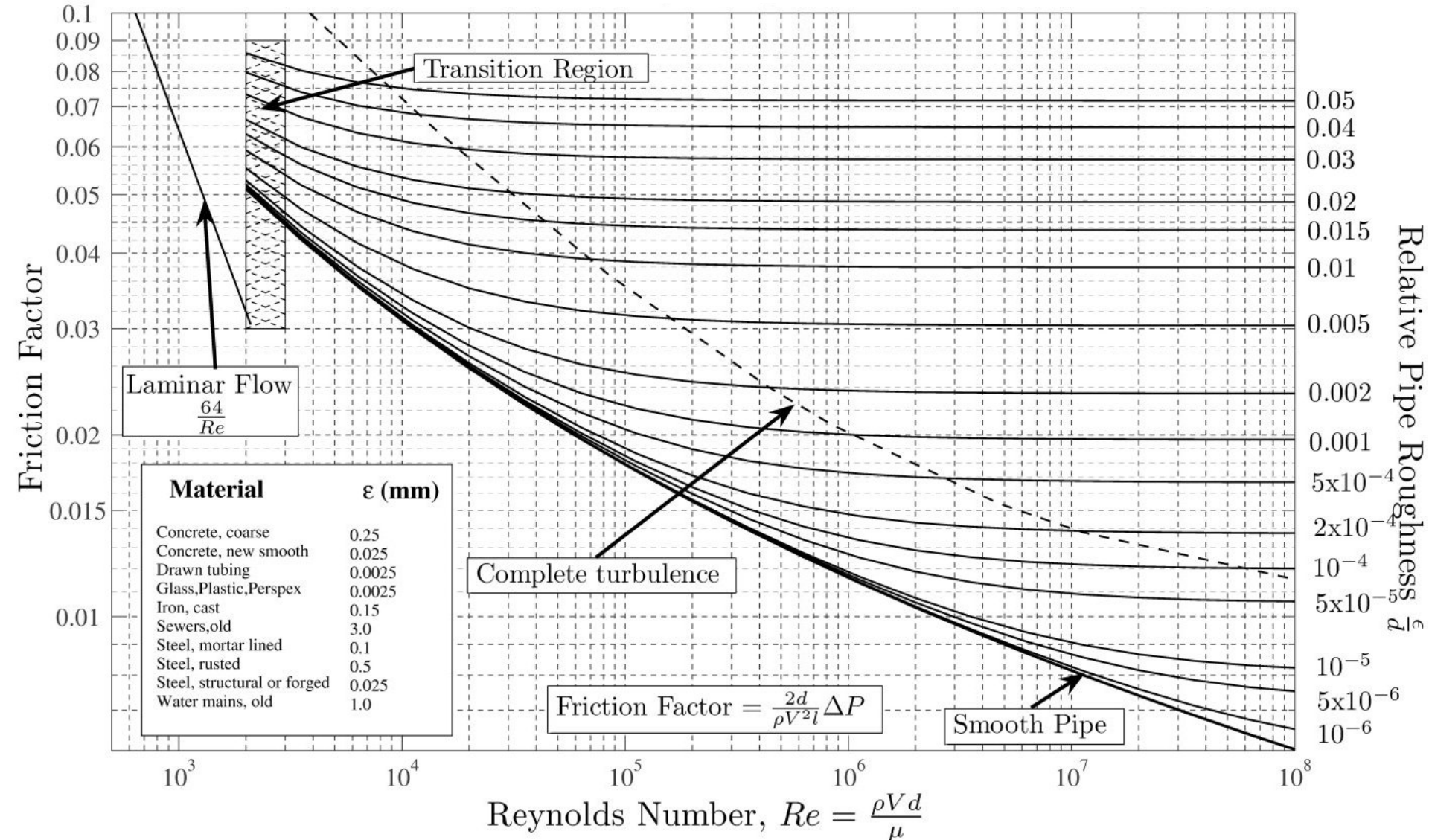
**Μέση ταχύτητα:**  $V = \frac{Q}{S} = \frac{4 Q}{\pi d^2}$       **Παροχή:**  $Q = SV = \frac{\pi d^2}{4} V$

**Πτώση πίεσης κατά μήκος του σωλήνα (γραμμικές απώλειες)**  
**Νόμος Darcy-Weisbach**

$$P = \lambda \frac{L}{d} \frac{\rho V^2}{2} \quad \text{ή} \quad \lambda \frac{L}{d^5} \frac{8 \rho Q^2}{\pi^2}$$

**Ισοδύναμο ύψος:**  $\Delta h = \lambda \frac{L}{d} \frac{V^2}{2g} \quad (P = \rho g h)$

# Διάγραμμα Moody





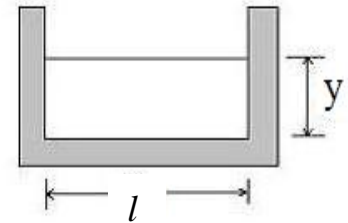
# Ροή νερού σε ανοιχτά κανάλια: Ειδική ενέργεια

Ενέργεια:  $E = mgy + \frac{1}{2}mV^2$

Ενέργεια ανά μονάδα όγκου:  $\frac{E}{U} = \rho gy + \frac{1}{2}\rho V^2$  μονάδες πίεσης

Ενέργεια ανά μονάδα βάρους:  $\frac{E}{U\rho g} = y + \frac{V^2}{2g}$  μονάδες μήκους

Κανάλι με ορθογώνια διατομή, πλάτος  $l$ :  $Q = Vyl$



$E = y + \frac{Q^2}{2l^2 g y^2}$  Η εξίσωση είναι 3<sup>ου</sup> βαθμού ως προς  $y$  και έχει πολλαπλές λύσεις  
Ελαχιστοποίηση της ενέργειας:

$$\frac{dE}{dy} = 0 \Rightarrow 1 - \frac{Q^2}{l^2 g y^3} = 0 \Rightarrow y^3 = \frac{Q^2}{l^2 g} \xrightarrow{Q=Vyl} \frac{V^2}{gy} = 1$$

# Ροή νερού σε ανοιχτά κανάλια: Αριθμός Froude

$$Fr^2 = \frac{\rho V^2}{\rho g y} = \frac{\text{Δυνάμεις αδράνειας}}{\text{Δυνάμεις βαρύτητας}}$$

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g y}} = \frac{\text{ταχύτητα νερού}}{\text{ταχύτητα κύματος}}$$

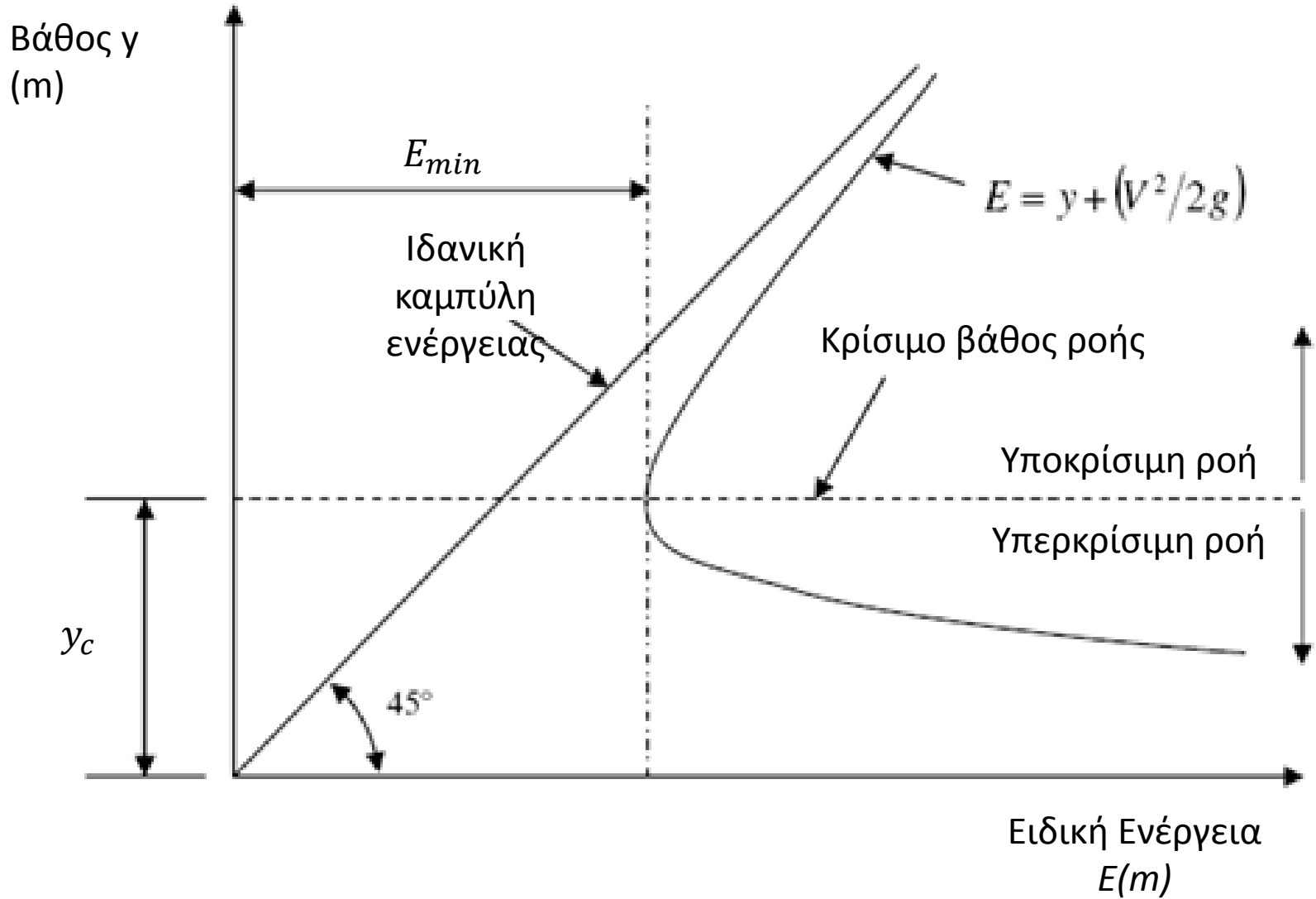
$$E = y \left( 1 + \frac{Fr^2}{2} \right), \quad \underline{Fr = 1} \Rightarrow E = \frac{3}{2} y \text{ " κρίσιμη ροή"}$$

$Fr > 1$  " υπερκρίσιμη ροή"  $Fr < 1$  " υποκρίσιμη ροή"

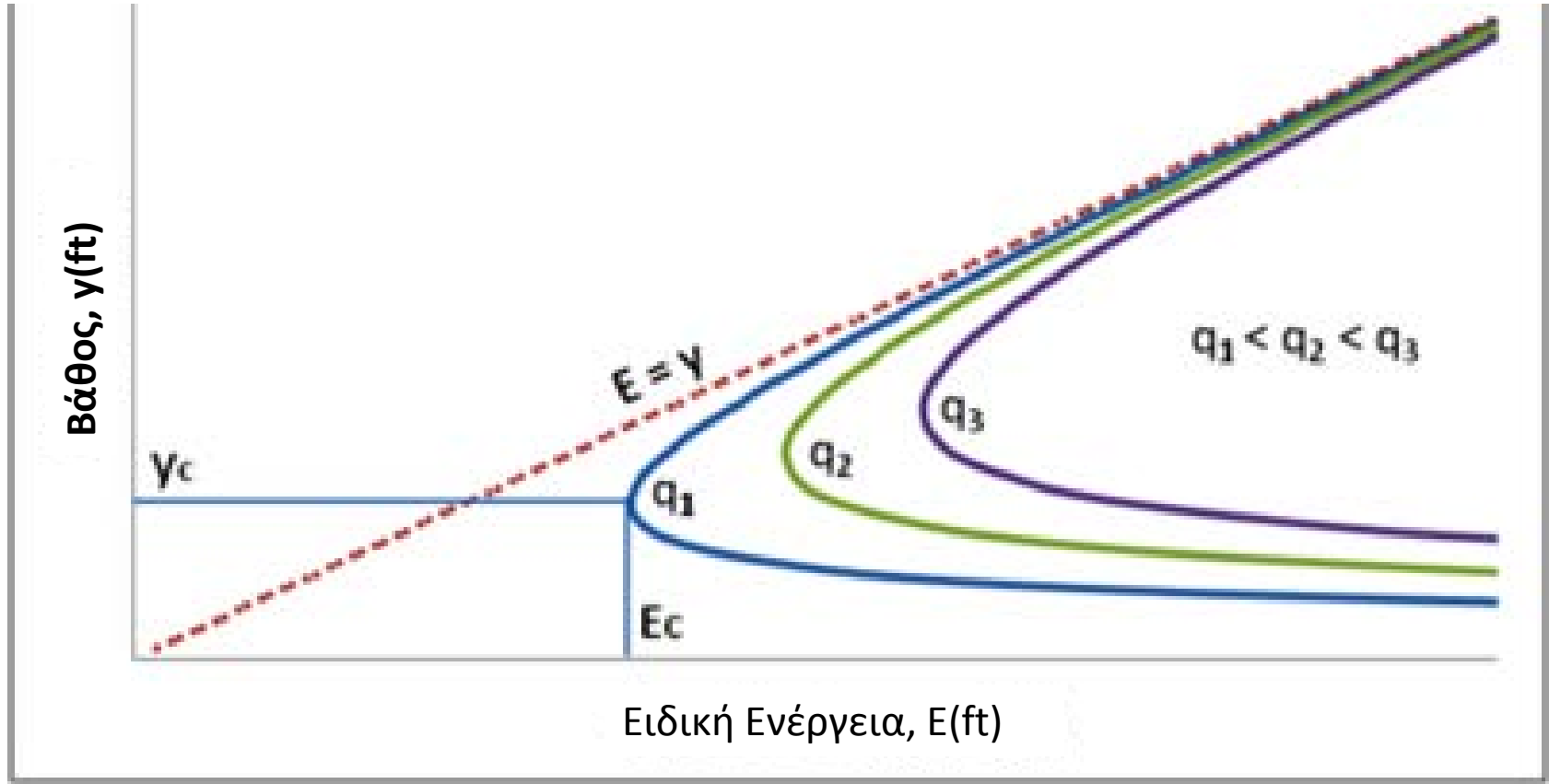
$$E = y + \frac{Q^2}{2l^2 g y^2} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} Q = 0, E = y \\ Q > 0 \text{ και } y \rightarrow \infty, E \rightarrow \infty \\ Q > 0 \text{ και } y \rightarrow 0, E \rightarrow \infty \end{array} \right.$$

**Διάγραμμα ειδικής ενέργειας →**

# Διάγραμμα ειδικής ενέργειας (1)



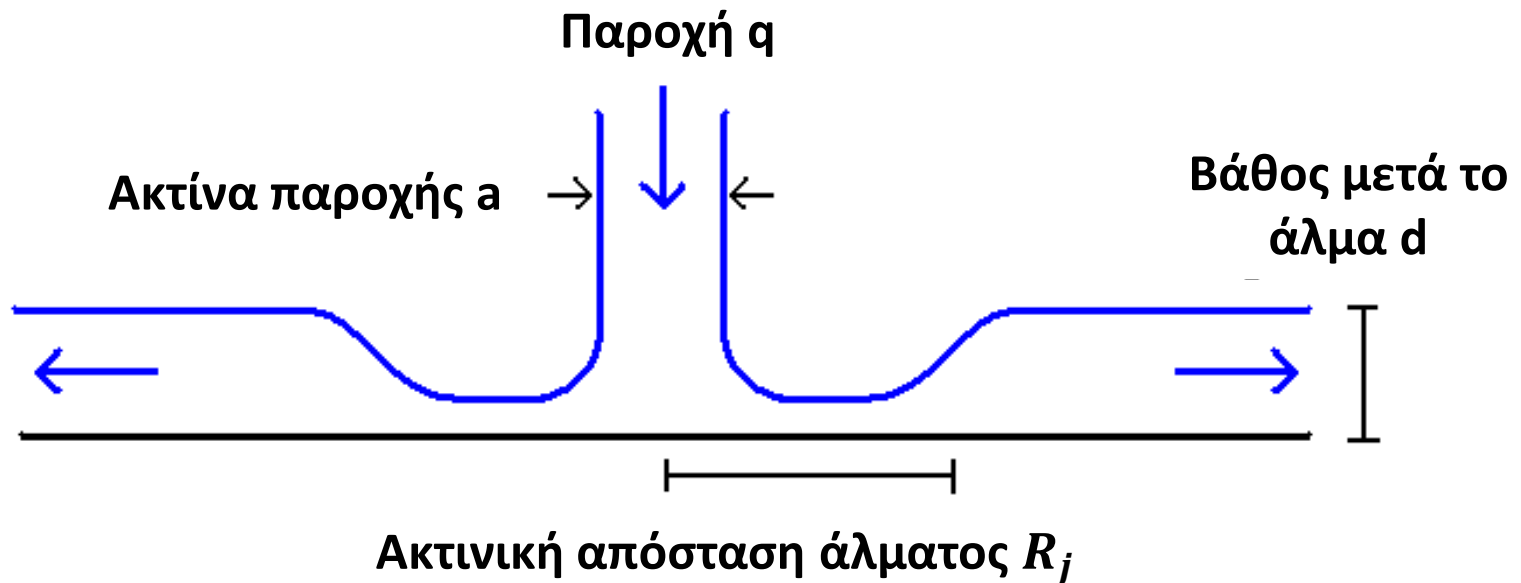
# Διάγραμμα ειδικής ενέργειας (2)



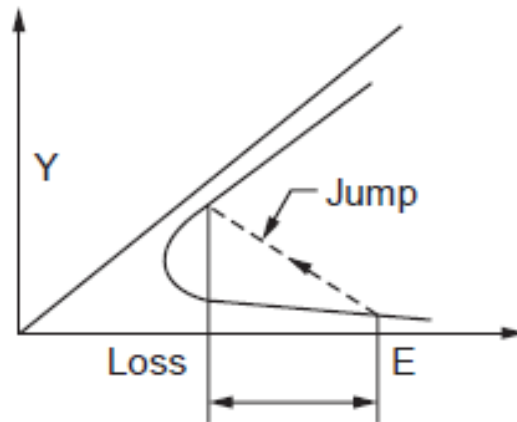
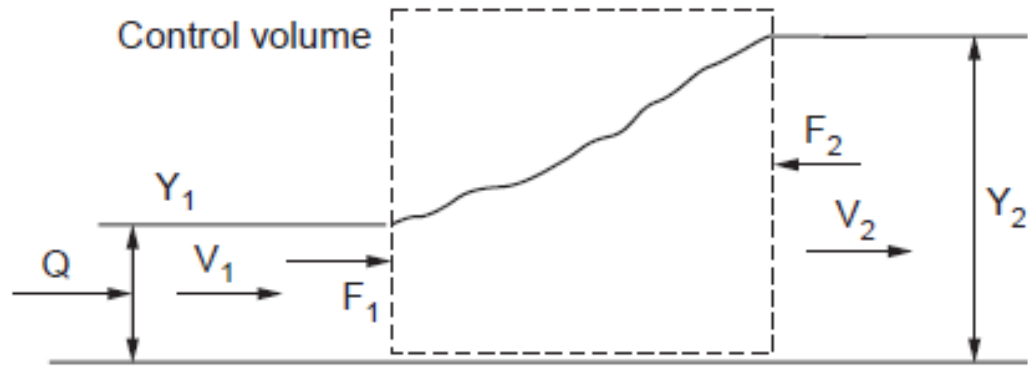
# Εφαρμογή: Υδραυλικό άλμα (1)



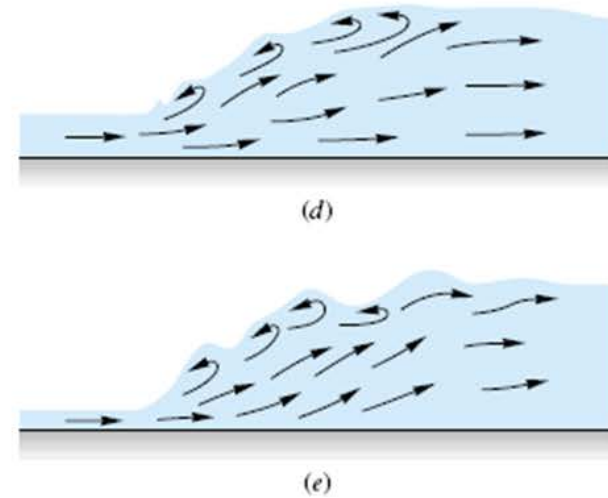
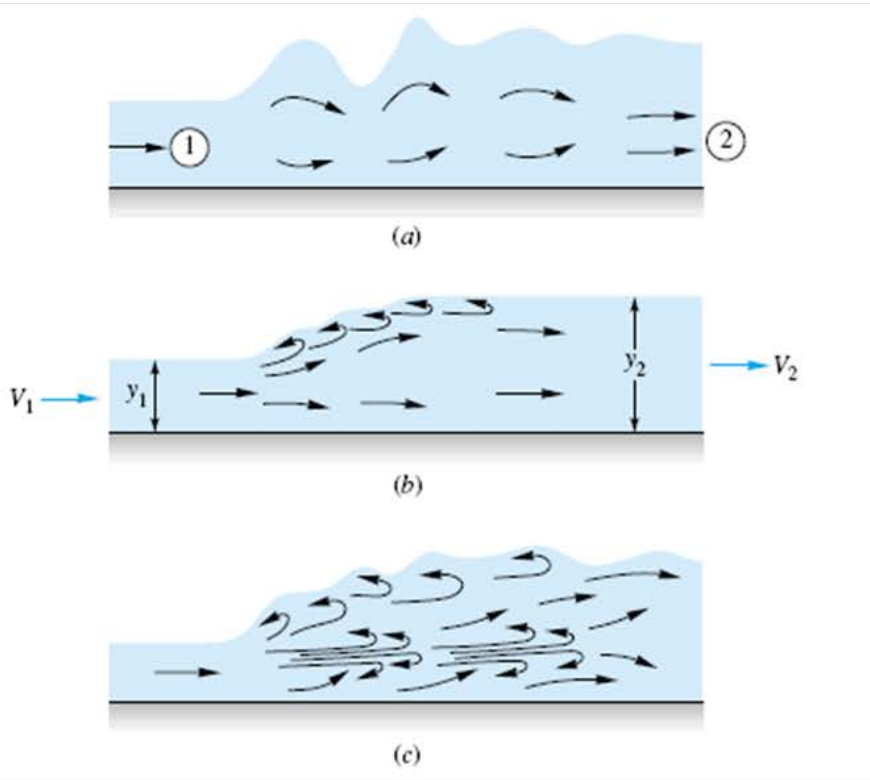
[http://en.wikipedia.org/wiki/Hydraulic\\_jump](http://en.wikipedia.org/wiki/Hydraulic_jump)



# Εφαρμογή: Υδραυλικό άλμα (2)



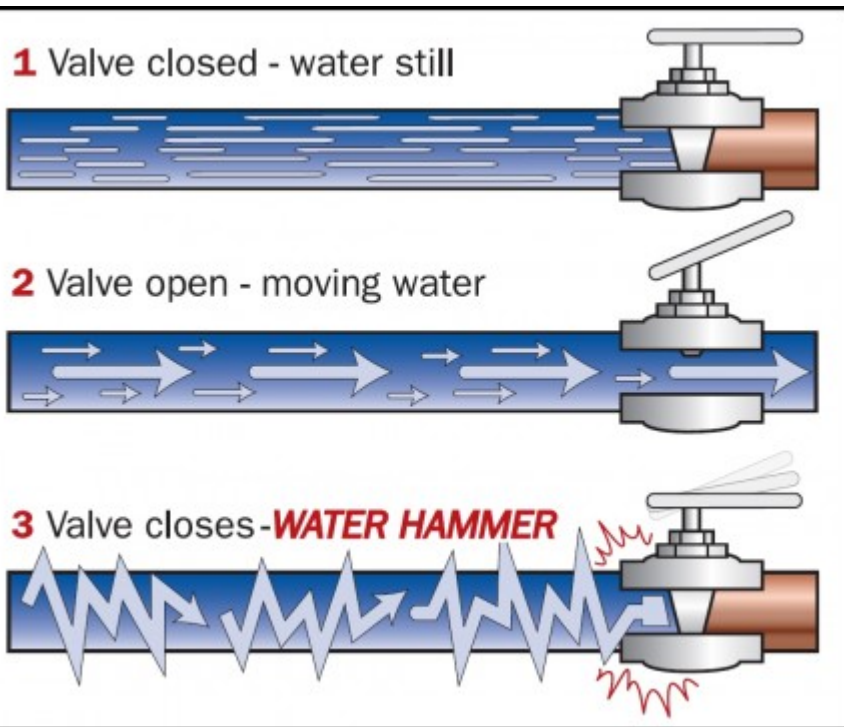
# Εφαρμογή: Υδραυλικό άλμα (4)



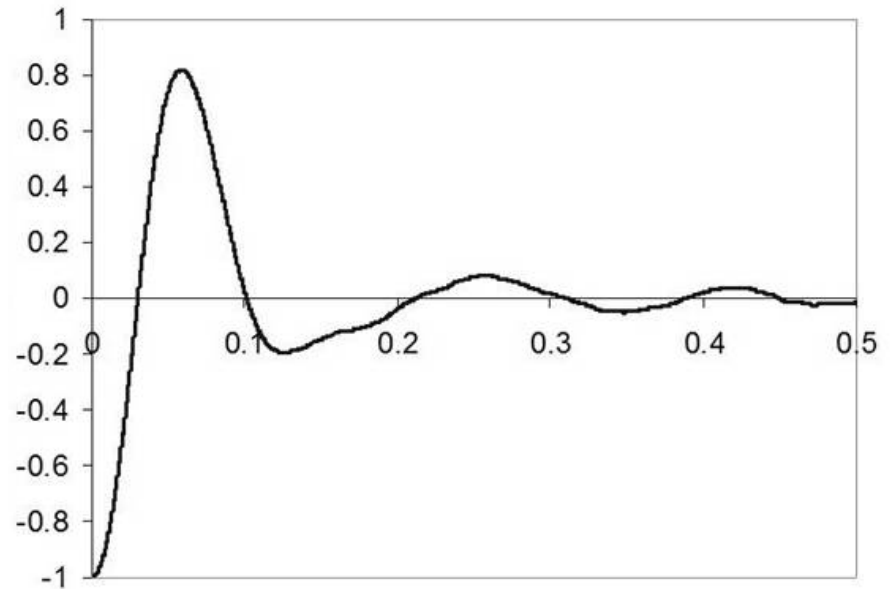
## Κατηγοριοποίηση υδραυλικού άλματος

- Αν  $F1$ : 1-1,7 κυματοειδές άλμα
- Αν  $F1$ : 1,7-2,5 ασθενές άλμα
- Αν  $F1$ : 2,5-4,5 παλλόμενο άλμα
- Αν  $F1$ : 4,5-9 σταθερό άλμα
- Αν  $F1$ : >9 ισχυρό

# Υδραυλικό Πλήγμα (1)



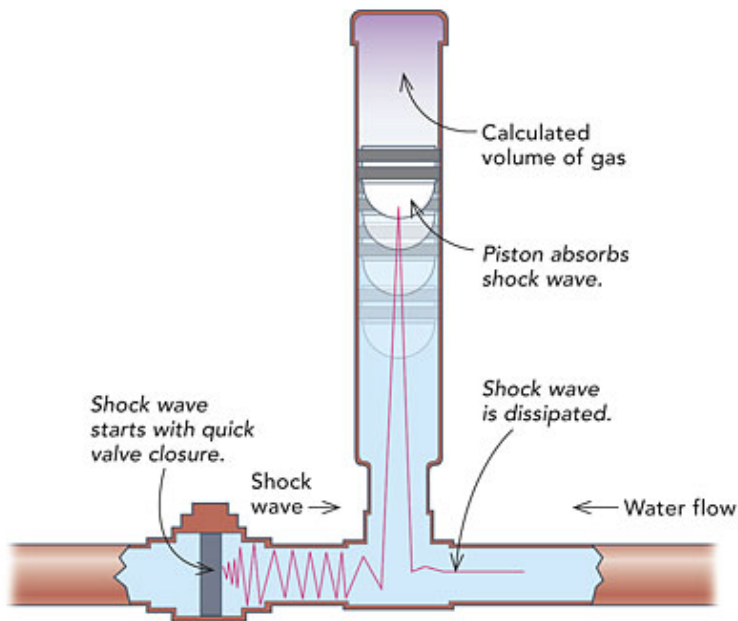
Κανονικοποιημένη μετρούμενη πίεση



Χρόνος μετά το κλείσιμο  
της βαλβίδας (s)



# Υδραυλικό Πλήγμα (2)

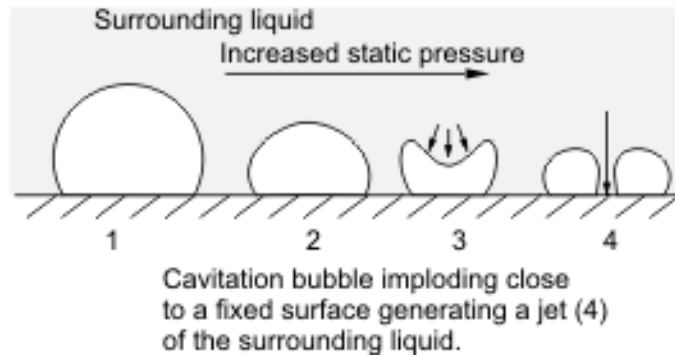


<http://www.finehomebuilding.com/how-to/qa/eliminate-water-hammer-banging-pipes.aspx>

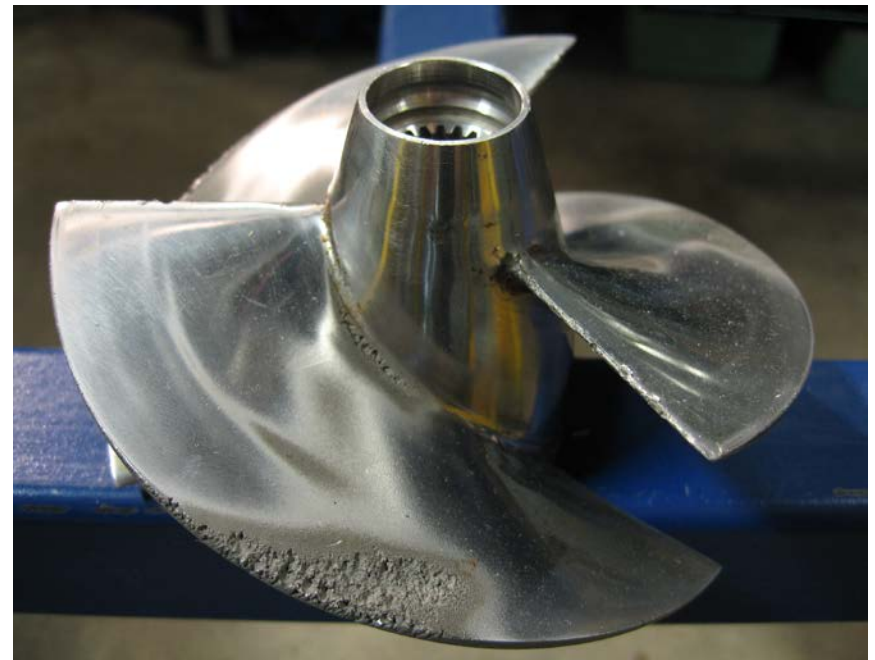
<http://www.bunnings.com.au/our-range/bathroom-plumbing/plumbing/tools/hammer-arrestors>

# Σπηλαιώση

[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cavitation\\_bubble\\_implosion.png](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cavitation_bubble_implosion.png)



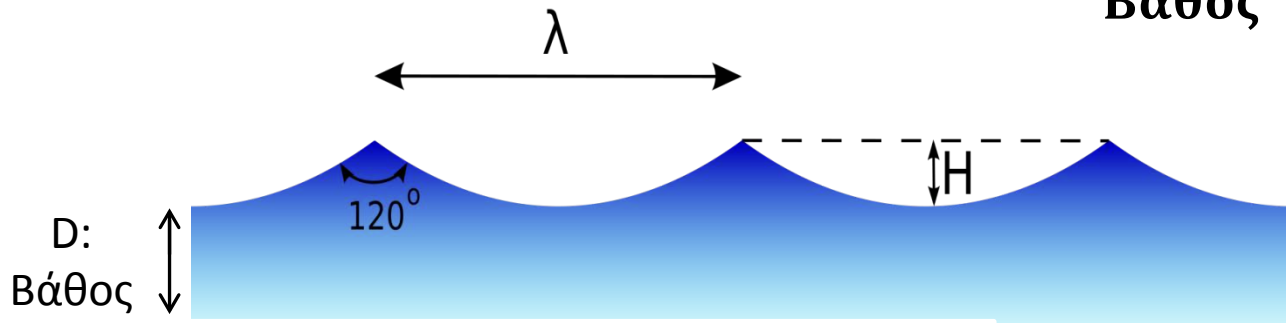
<http://en.wikipedia.org/wiki/Cavitation>



[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cavitation\\_Propeller\\_Damage.JPG](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cavitation_Propeller_Damage.JPG)

# Κύματα στο νερο (1)

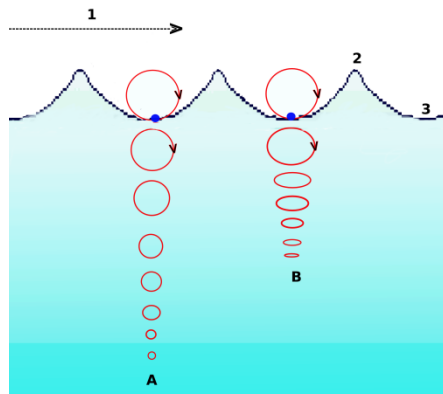
## Κύμα ρηχών υδάτων



$$\text{Βαθος} \leq \frac{1}{20} \text{ μήκος κύματος}$$

[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stokes\\_wave\\_max\\_height.svg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stokes_wave_max_height.svg)

## Κύμα βαθέων υδάτων



$$\text{Βαθος} \geq \frac{1}{2} \text{ μήκος κυματος}$$

[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wave\\_motion-i18n.png](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wave_motion-i18n.png)

# Τέλος Ενότητας



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης

# Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αθηνών**» 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.



# Σημείωμα Ιστορικού Εκδόσεων Έργου

Το παρόν έργο αποτελεί την έκδοση **1.0**.



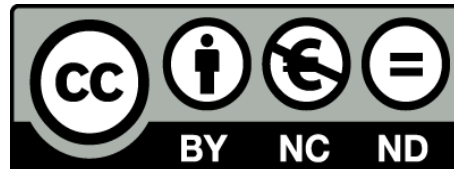
# Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Πανεπιστήμιο Πατρών, **Λευθεριώτης Γεώργιος, 2015**. «**Αιολική Ενέργεια & Ενέργεια του Νερού, Ενότητα: Υδραυλικά φαινόμενα**» Έκδοση: **1.0**. Πάτρα **2015**. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση:  
*<https://eclass.upatras.gr/modules/units/?course=PHY1954&id=4294>*



# Σημείωμα Αδειοδότησης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.





# Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.



# Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων

Οι πηγές των εικόνων είναι:

- [1] C.P Kothandraman, R. Rudramoorthey, Fluid Mechanics and Machinery, (2<sup>nd</sup> edition), New Age International Publishers, 2007, 1999
- [2] <http://optimist4u.blogspot.gr/>
- [3] <http://www.structuretech1.com/2012/06/water-hammer/>
- [4] <http://www.finehomebuilding.com/how-to/qa/eliminate-water-hammer-banging-pipes.aspx>
- [5] [http://echo2.epfl.ch/VICAIRE/mod\\_1a/chapt\\_8/main.htm](http://echo2.epfl.ch/VICAIRE/mod_1a/chapt_8/main.htm)

*\*Όλοι οι διαδικτυακοί ιστότοποι που αναφέρονται ως πηγές εικόνων είναι ενεργοί στις 28/2/2015*

