



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ
UNIVERSITY OF PATRAS

ΑΝΟΙΚΤΑ ακαδημαϊκά
μαθήματα ΠΠ

Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Ενότητα 4: Υδραυλικά Φαινόμενα - Υδροηλεκτρικά

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)

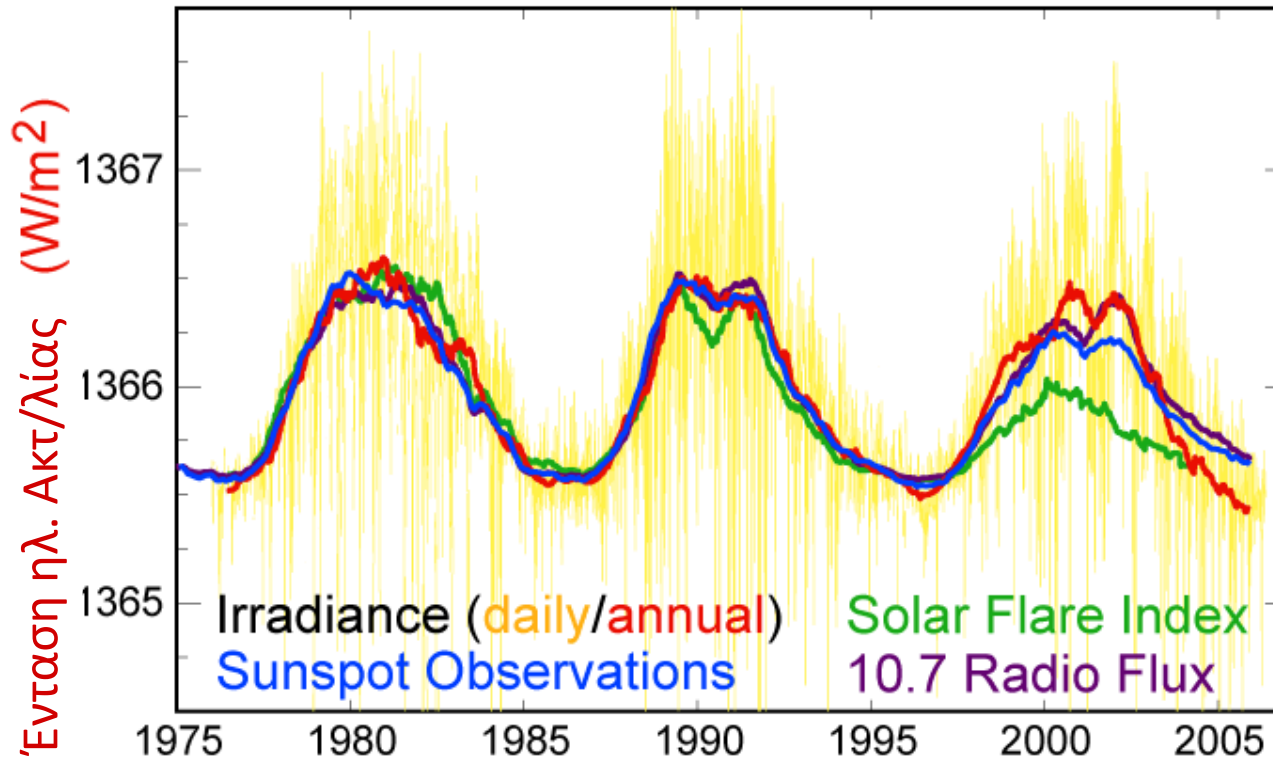
Περιεχόμενα ενότητας (1)

- 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

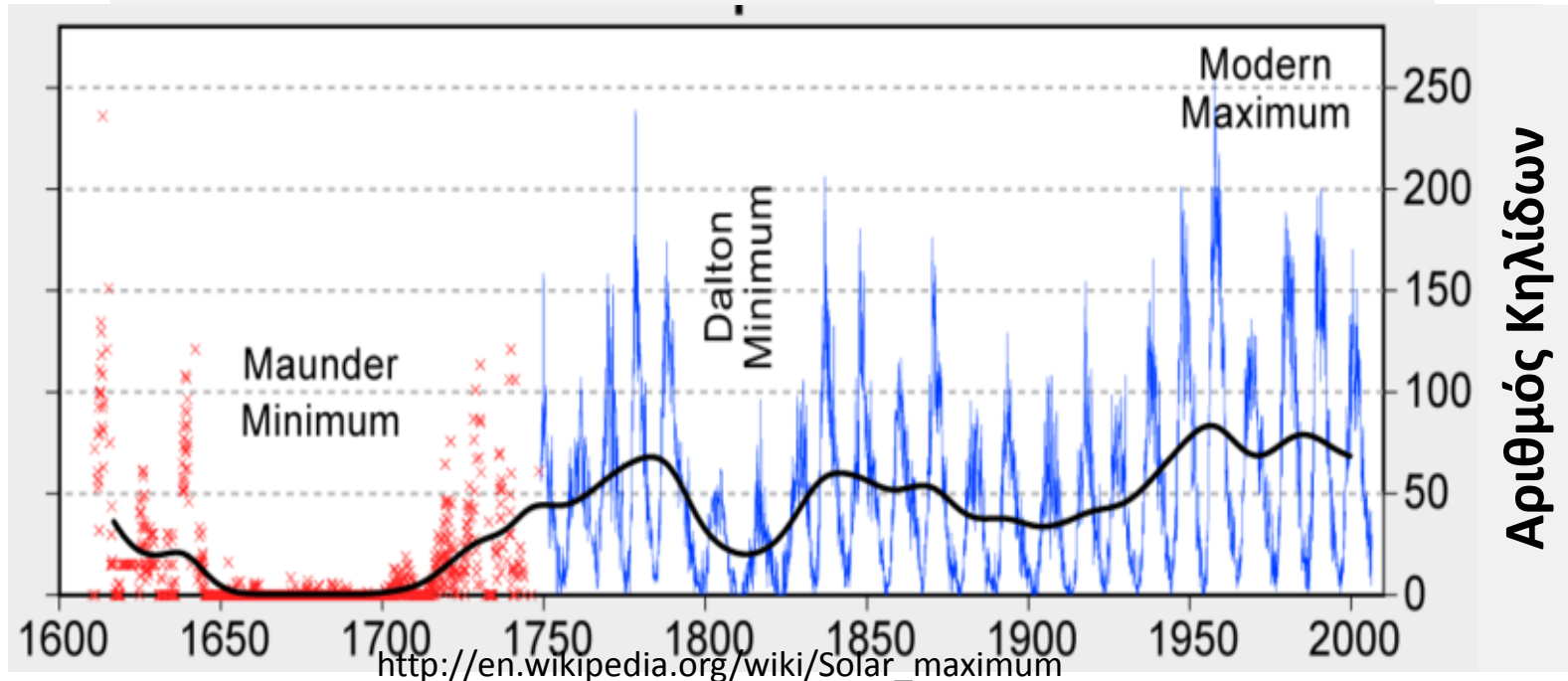
Στοιχεία Υδρολογίας (1)



http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_maximum

Στοιχεία Υδρολογίας (2)

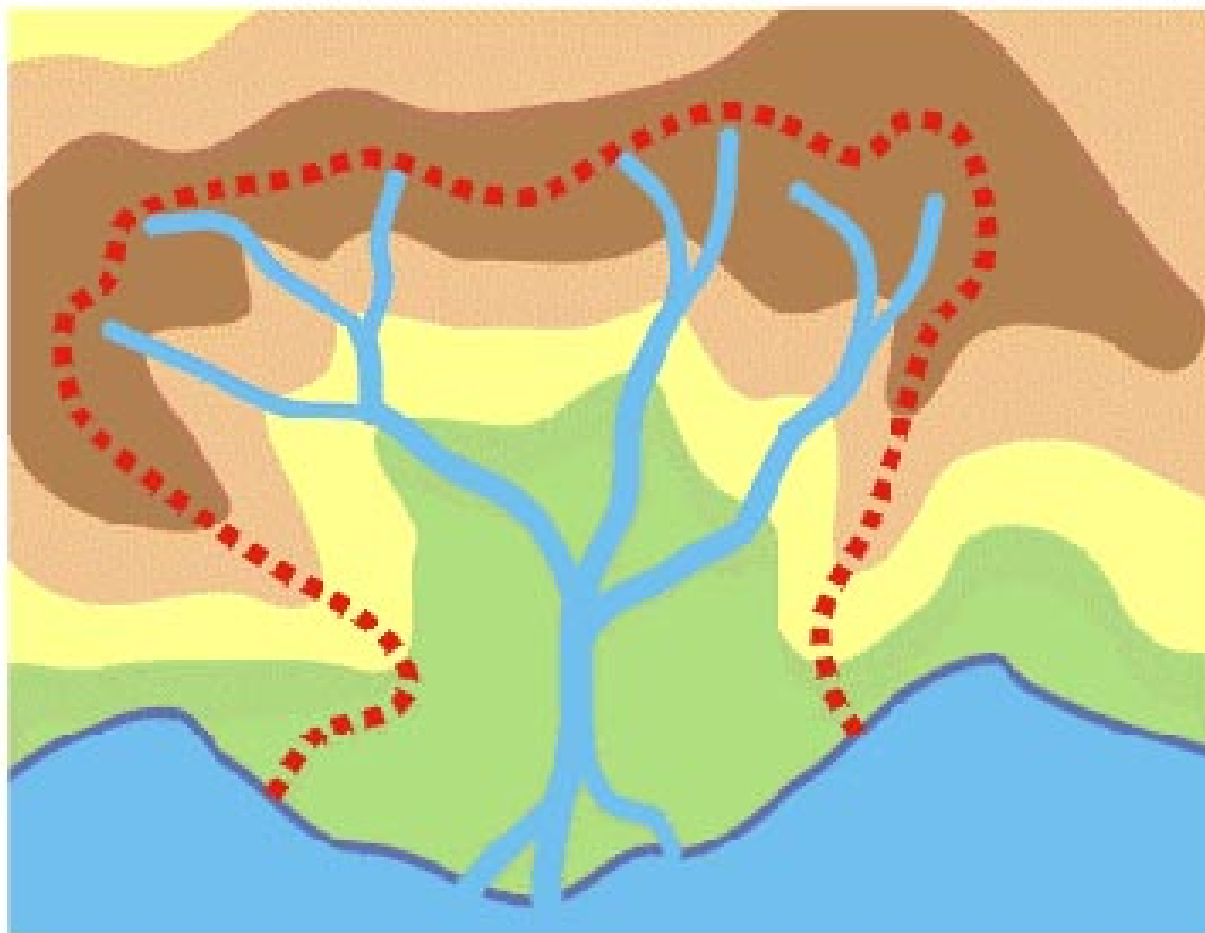
400 Χρόνια Παρατήρησης Ηλιακών Κηλίδων



Ο υδρολογικός Κύκλος

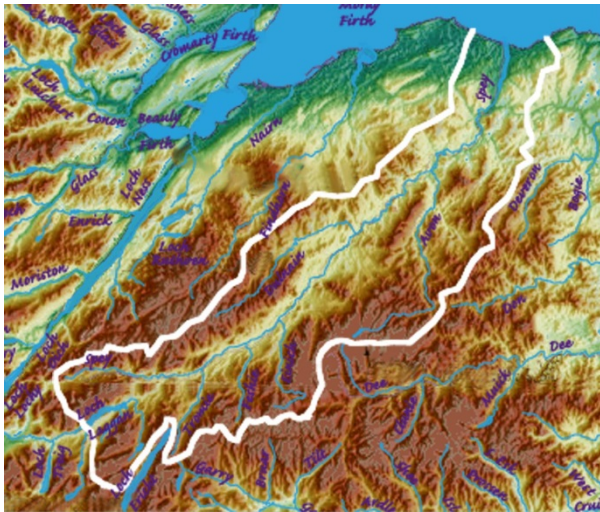


Λεκάνη απορροής - Υδροκρίτης



http://www.oocities.org/zorbopoulou/a_enot.html

Είδη λεκανών απορροής



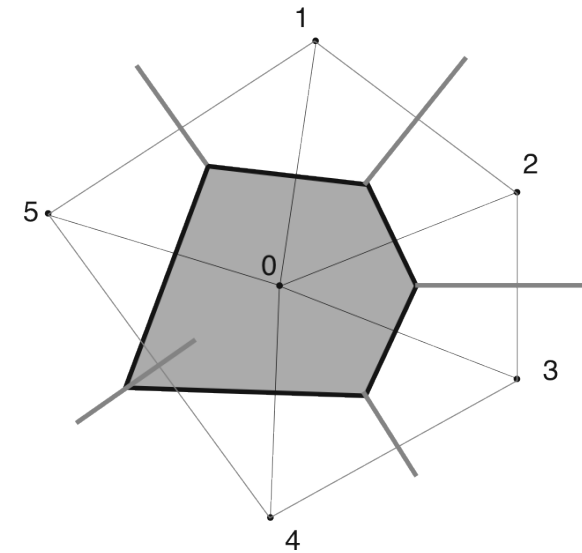
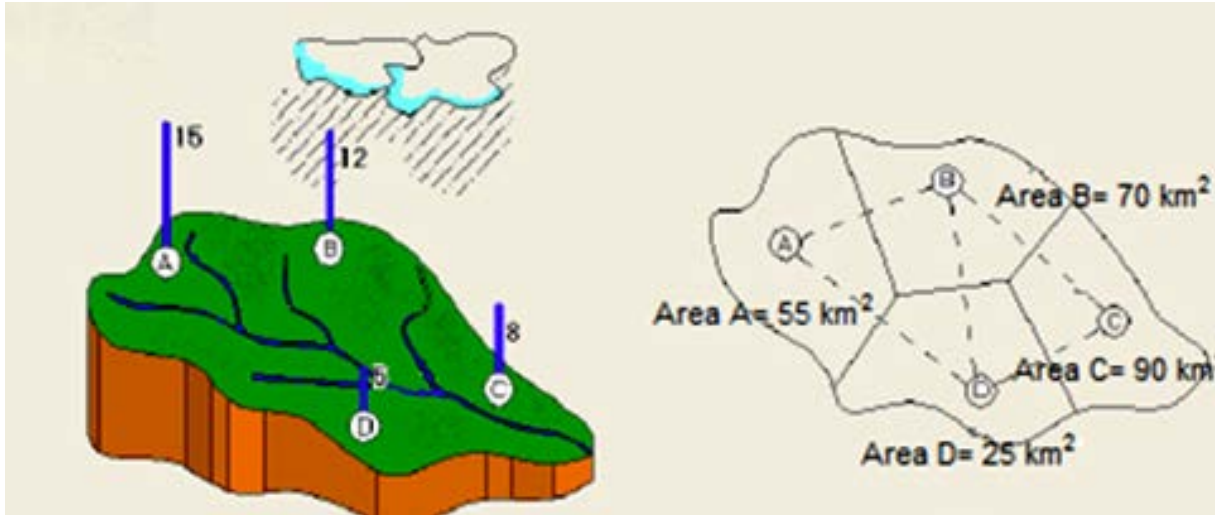
<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tweed.catchment.jpg>

Κατακρημνίσματα-βροχόμετρα



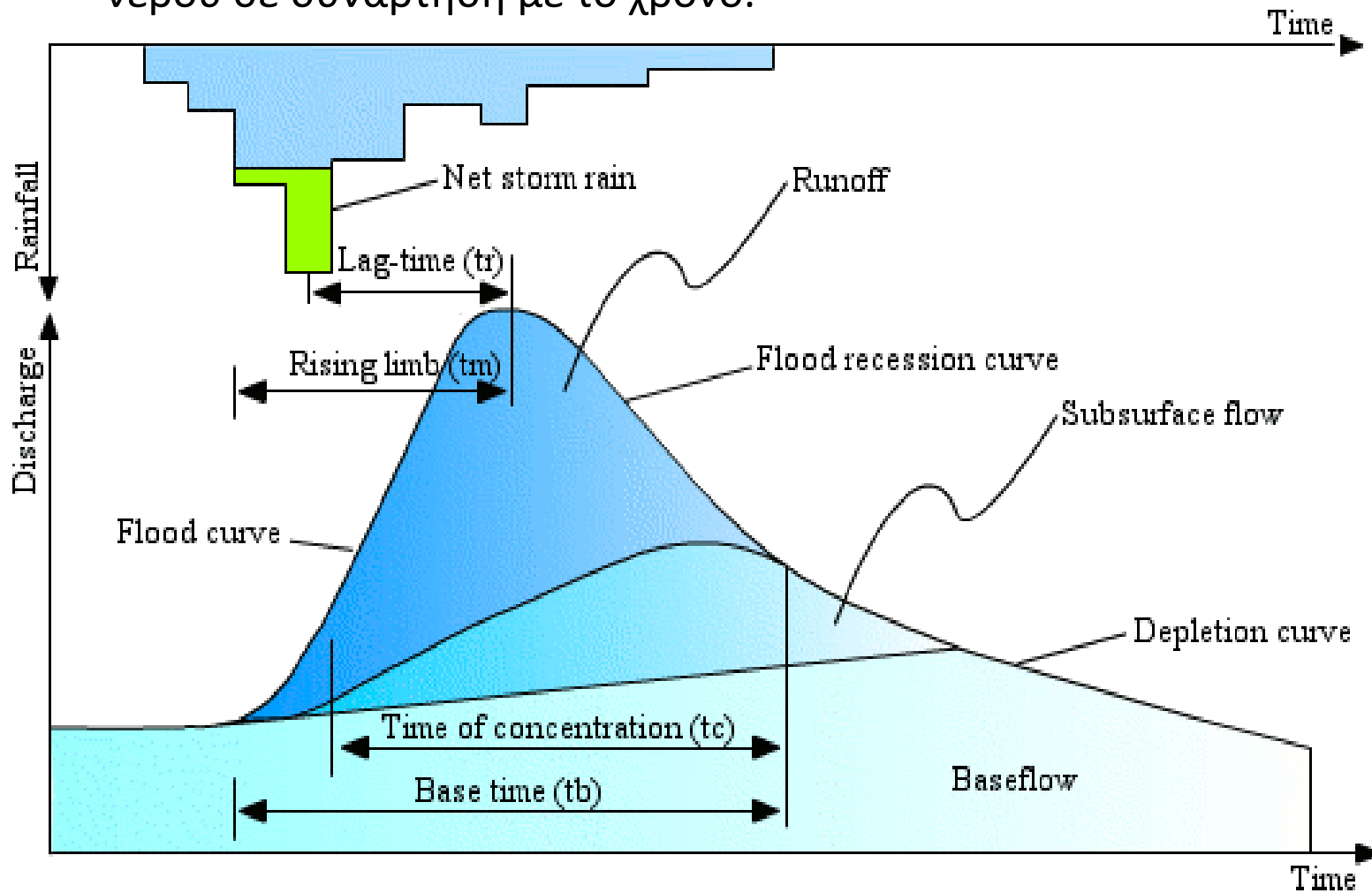
<http://commons.wikimedia.org>

Εκτίμηση όγκου - Πολύγωνα Thiessen

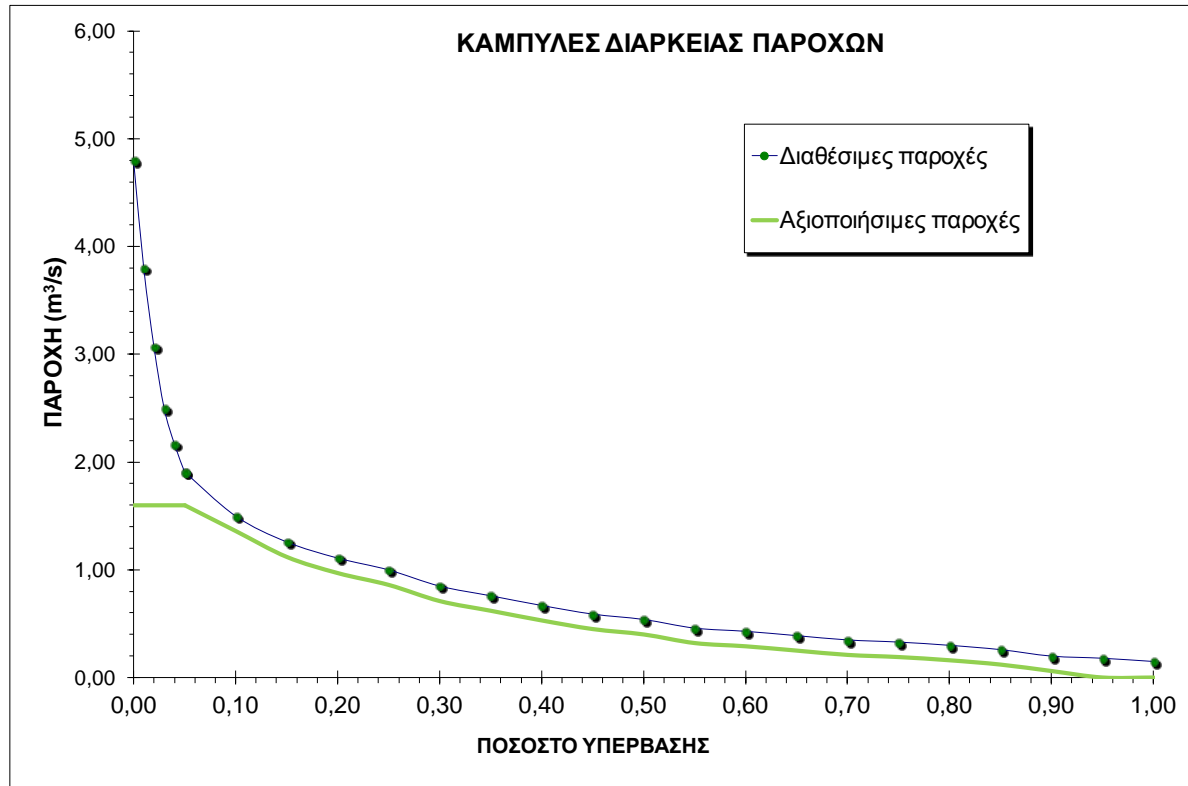


Υδρογράφημα

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:

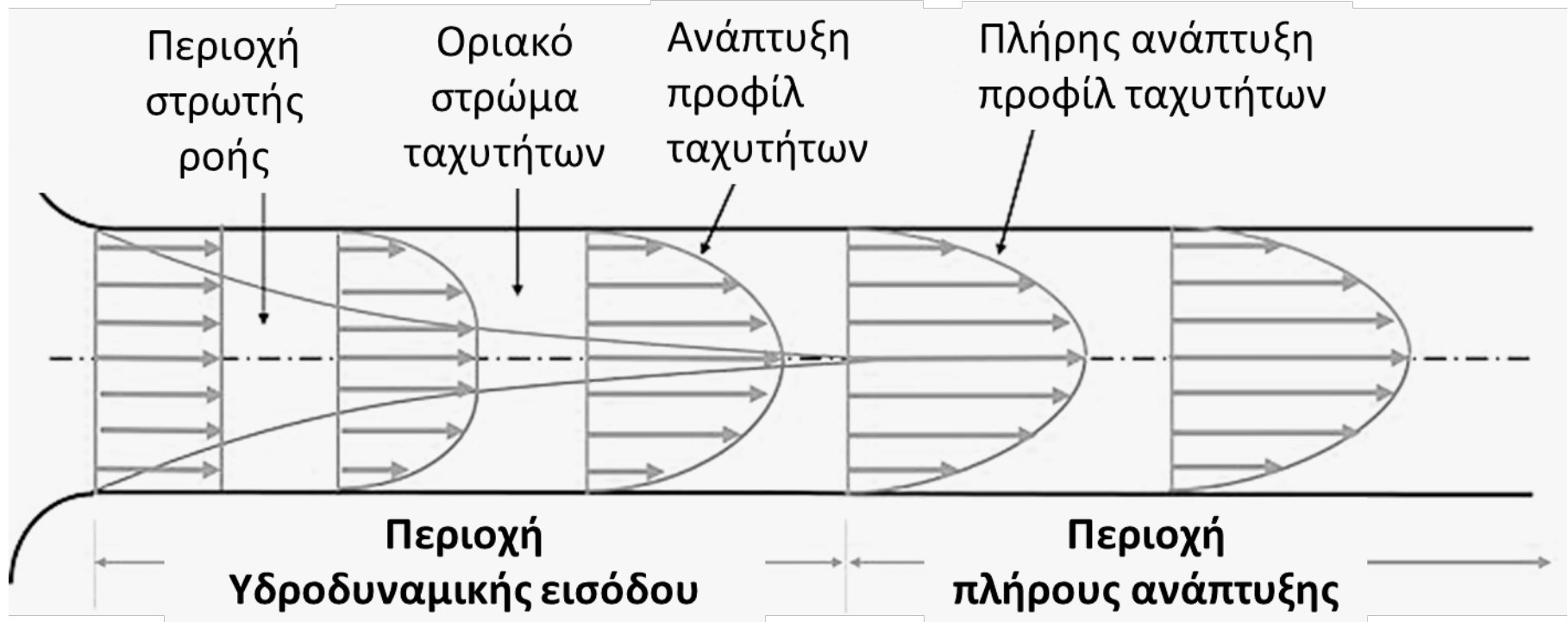
$$\frac{dQ_{av}}{dQ_m} = 0 \Rightarrow \frac{1}{A} - \frac{K}{A} - \frac{1}{A} \ln\left(\frac{Q_m}{Q_0}\right) - \frac{Q_m}{A} \frac{1}{\frac{Q_m}{Q_0}} \frac{Q_m}{Q_0} = 0 \Rightarrow$$

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

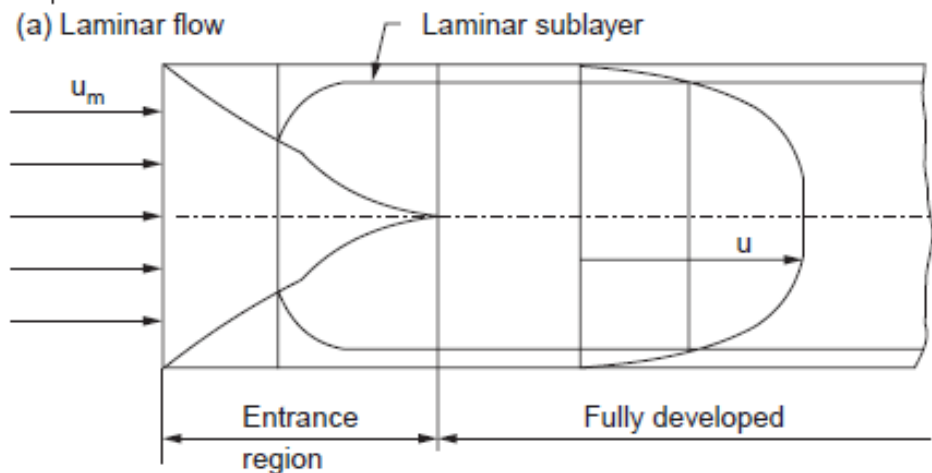
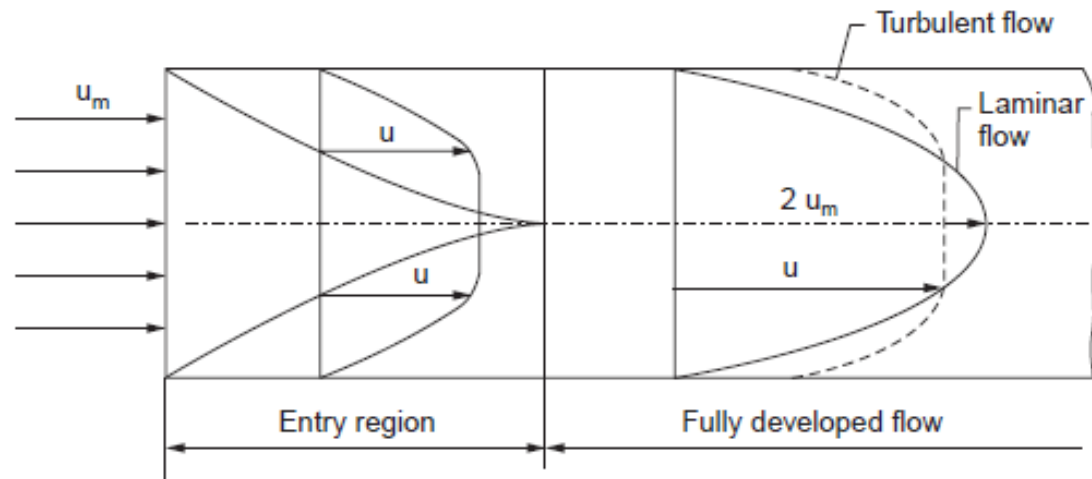
$$-K - \ln\left(\frac{Q_m}{Q_0}\right) = 0 \Rightarrow K + \ln\left(\frac{Q_m}{Q_0}\right) = 0 \Rightarrow \ln\left(\frac{Q_m}{Q_0}\right) = -K \Rightarrow Q_m = Q_0 e^{-K}$$

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

Ροή σε σωλήνες πιέσεως (1)



Ροή σε σωλήνες πίεσεως (3)

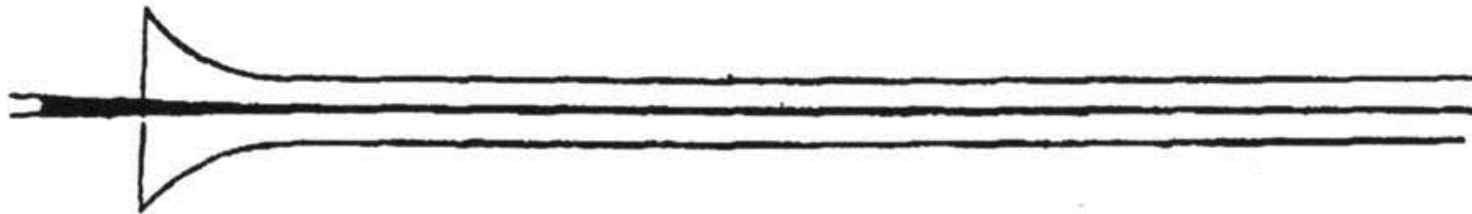


(b) Turbulent flow

Ροή σε σωλήνες πίεσεως (4)

Στρωτή Ροή (Laminar flow)

$Re < 2000$

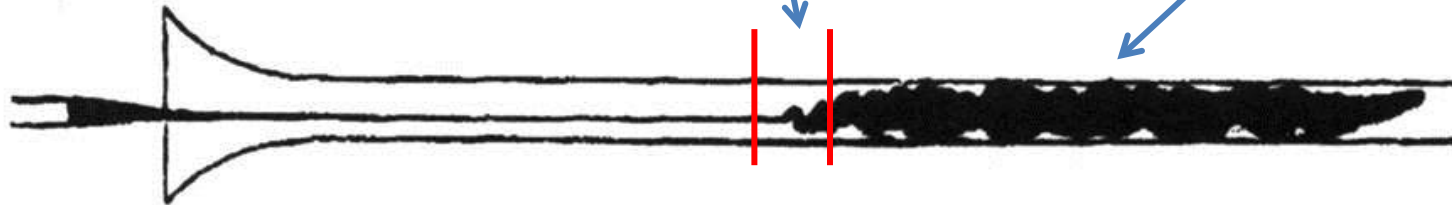


Τυρβώδης Ροή (Turbulent flow)

$Re > 4000$

Μεταβατικό Στάδιο (Transition)

$2000 < Re < 4000$



Ροή σε σωλήνες πιέσεως (5)

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

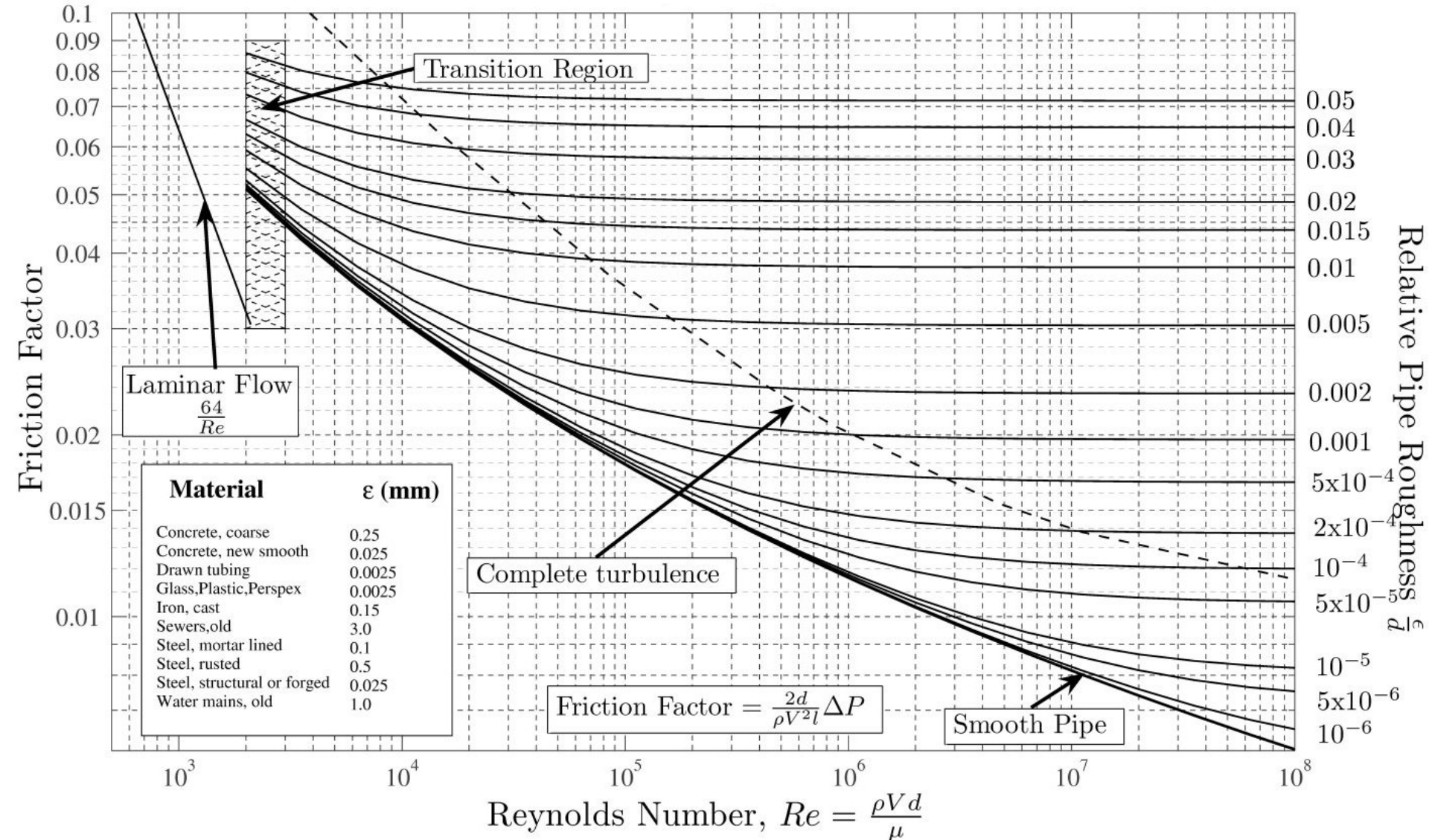
Μέση ταχύτητα: $V = \frac{Q}{S} = \frac{4Q}{\pi d^2}$ Παροχή: $Q = SV = \frac{\pi d^2}{4} V$

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



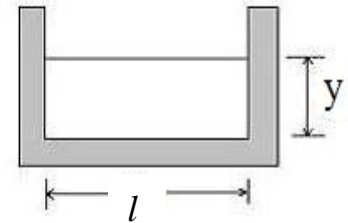
Ροή νερού σε ανοιχτά κανάλια: Ειδική ενέργεια

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^{ου} 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

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

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

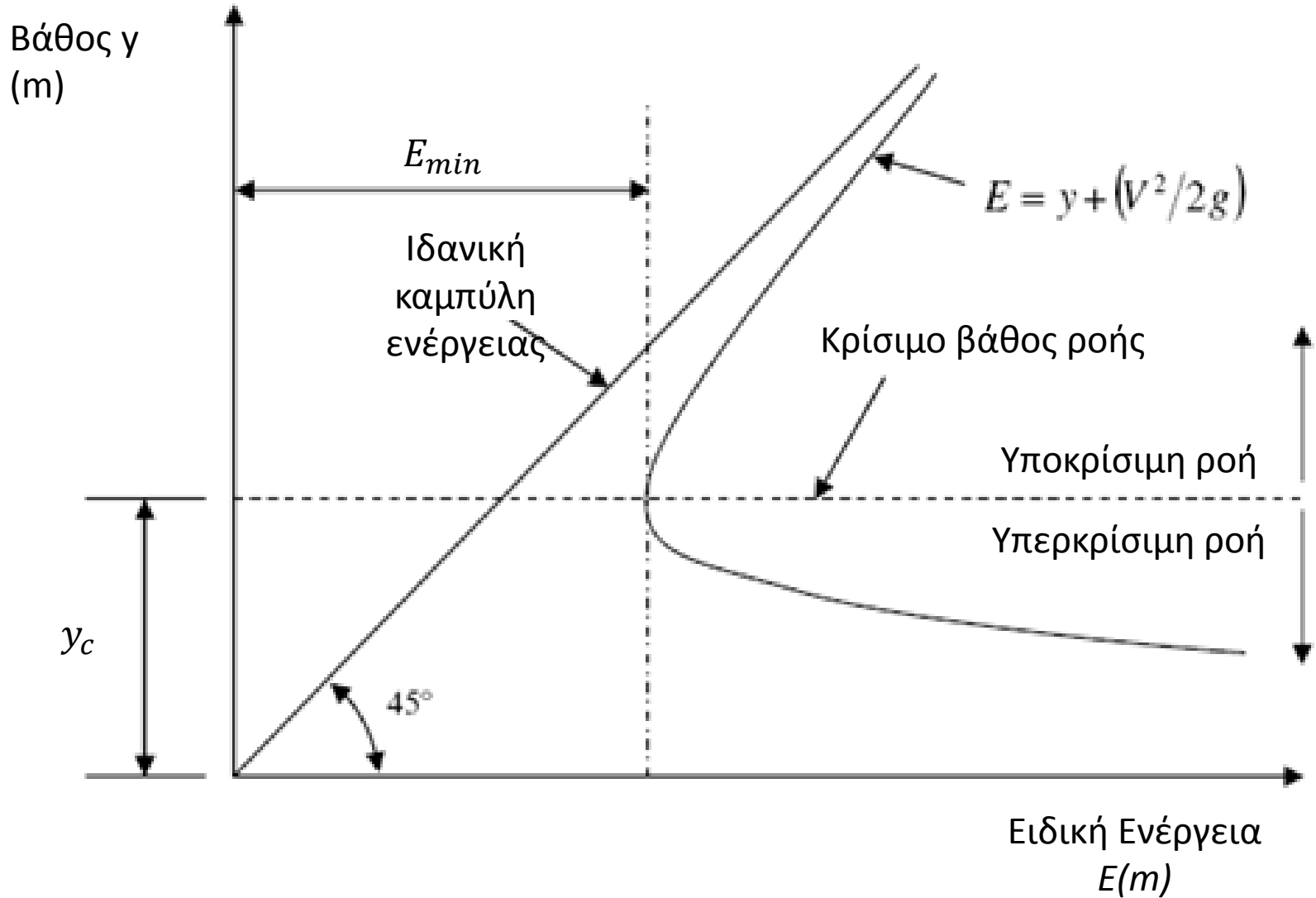
$$E = y \left(1 + \frac{Fr^2}{2} \right), \quad \underline{Fr = 1} \Rightarrow E = \frac{3}{2} y \text{ " κρίσιμη ροή"}$$

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

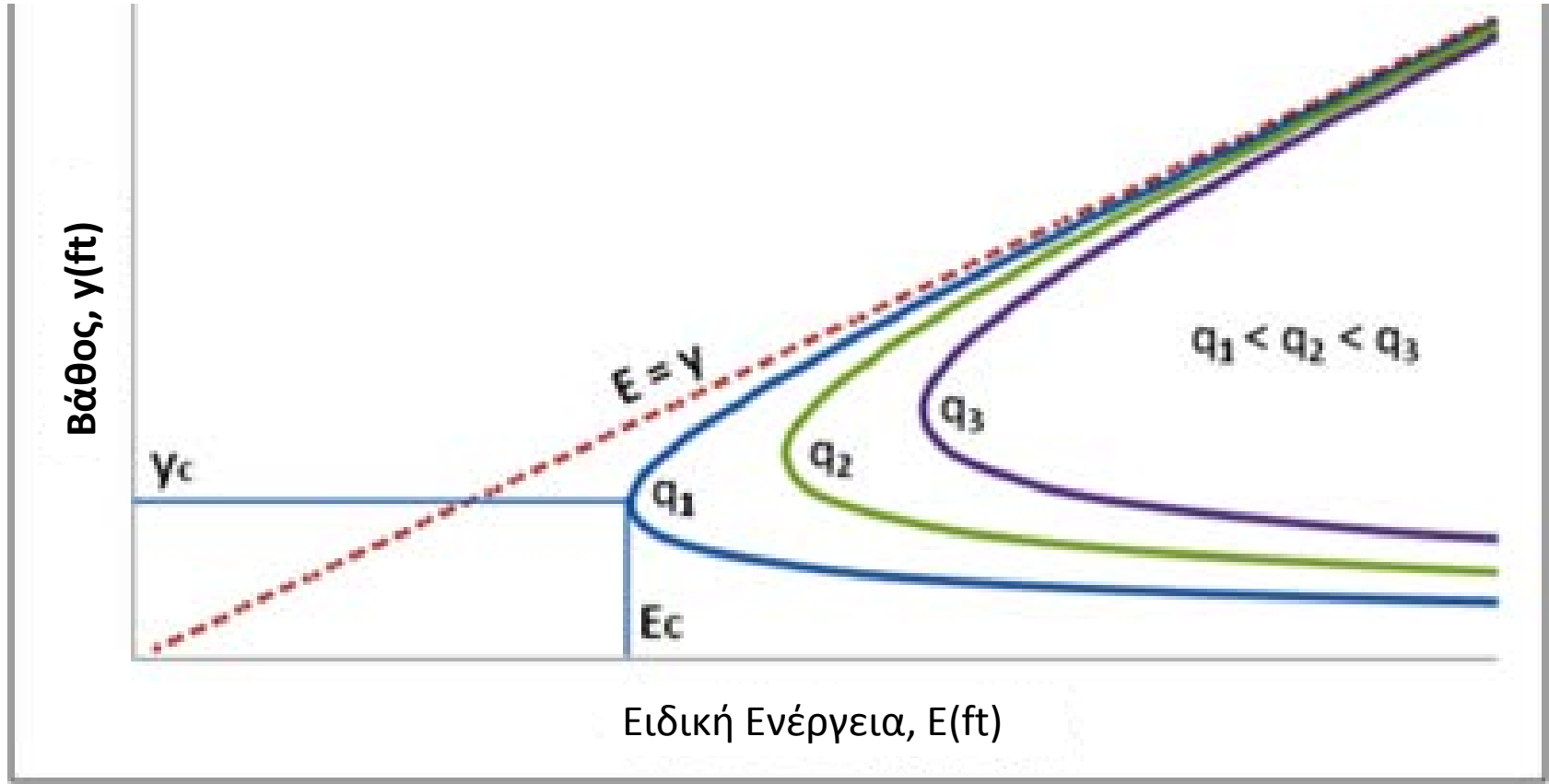
$$E = y + \frac{Q^2}{2l^2 g y^2} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} Q = 0, E = y \\ Q > 0 \text{ και } y \rightarrow \infty, E \rightarrow \infty \\ Q > 0 \text{ και } y \rightarrow 0, E \rightarrow \infty \end{array} \right.$$

Διάγραμμα ειδικής ενέργειας →

Διάγραμμα ειδικής ενέργειας (1)



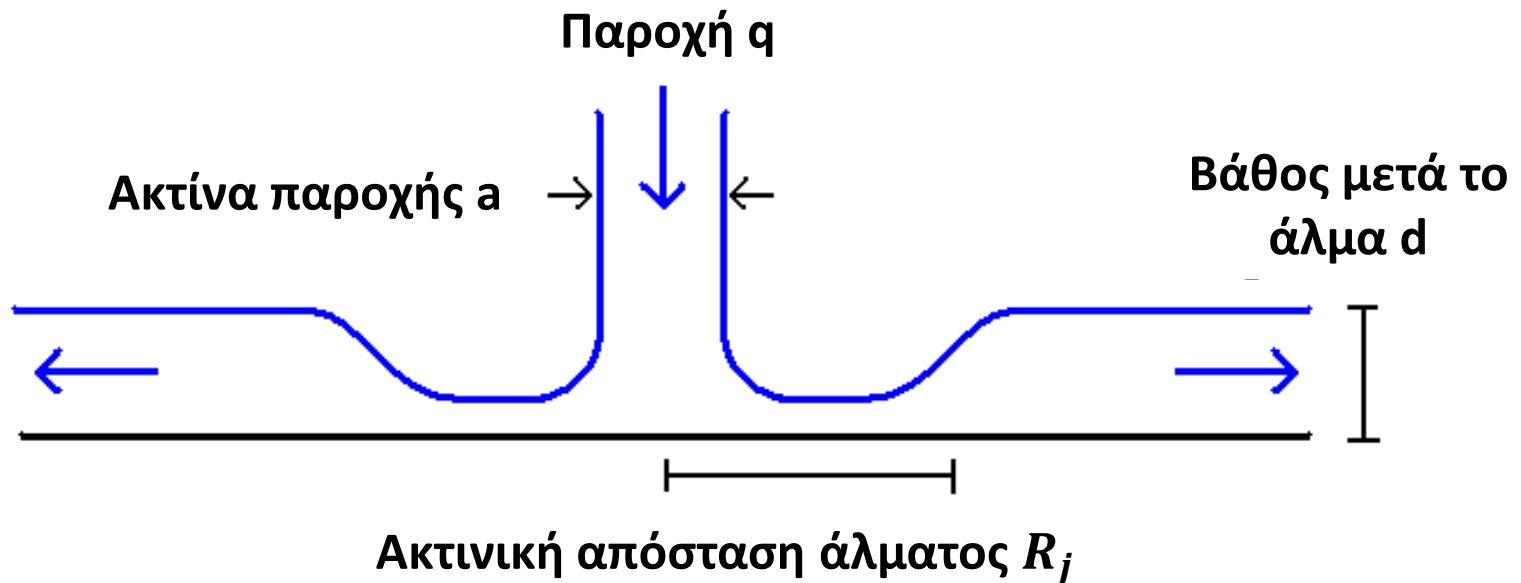
Διάγραμμα ειδικής ενέργειας (2)



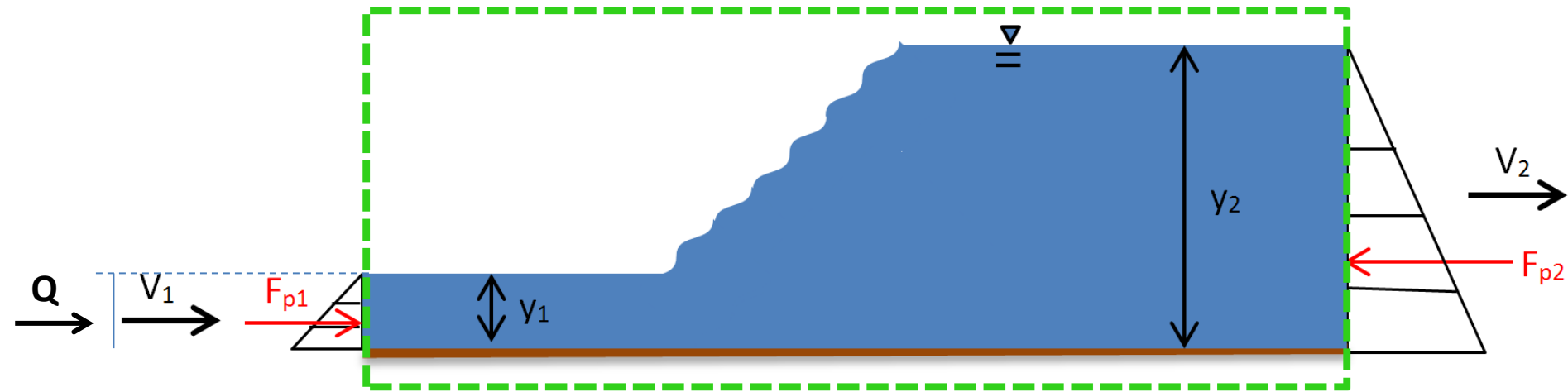
Εφαρμογή: Υδραυλικό άλμα (1)



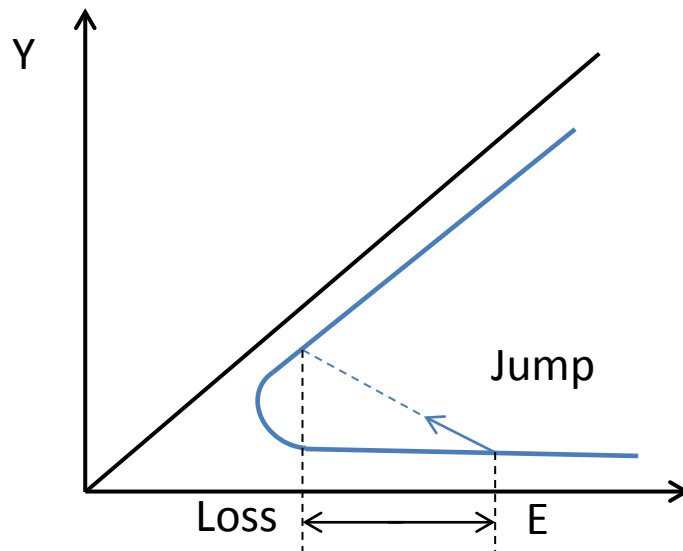
http://en.wikipedia.org/wiki/Hydraulic_jump



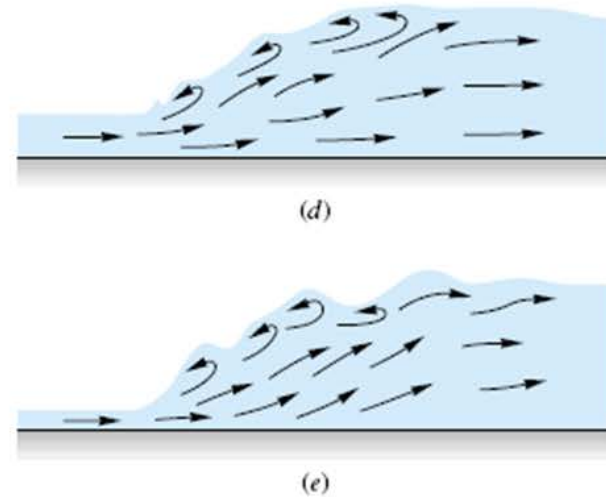
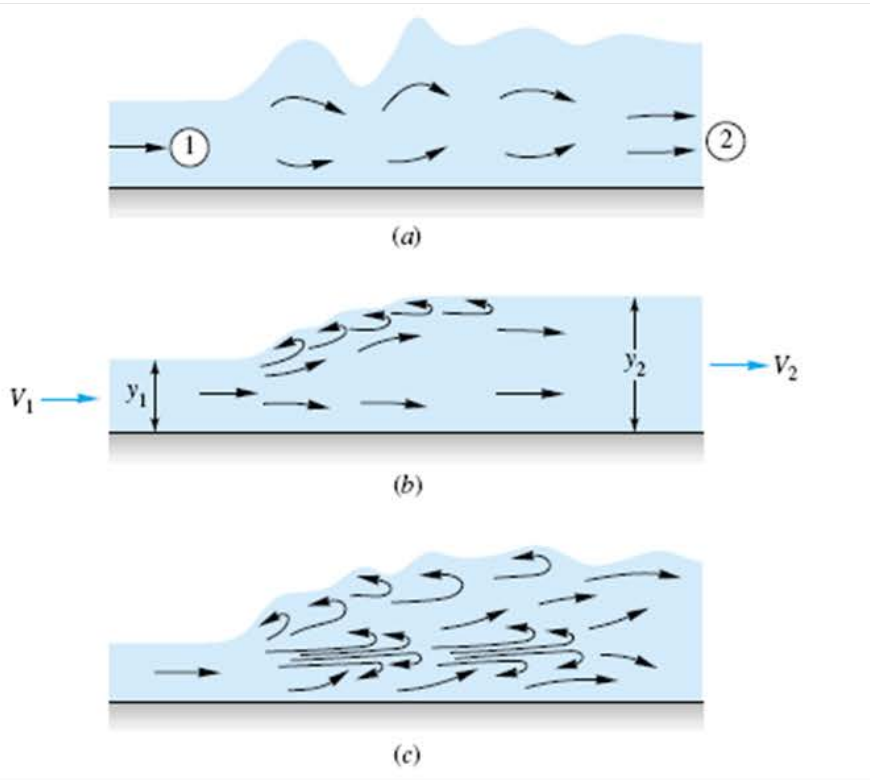
Εφαρμογή: Υδραυλικό άλμα (2)



http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Conservation_of_Momentum_%E2%80%93_Hydraulic_Jump.png



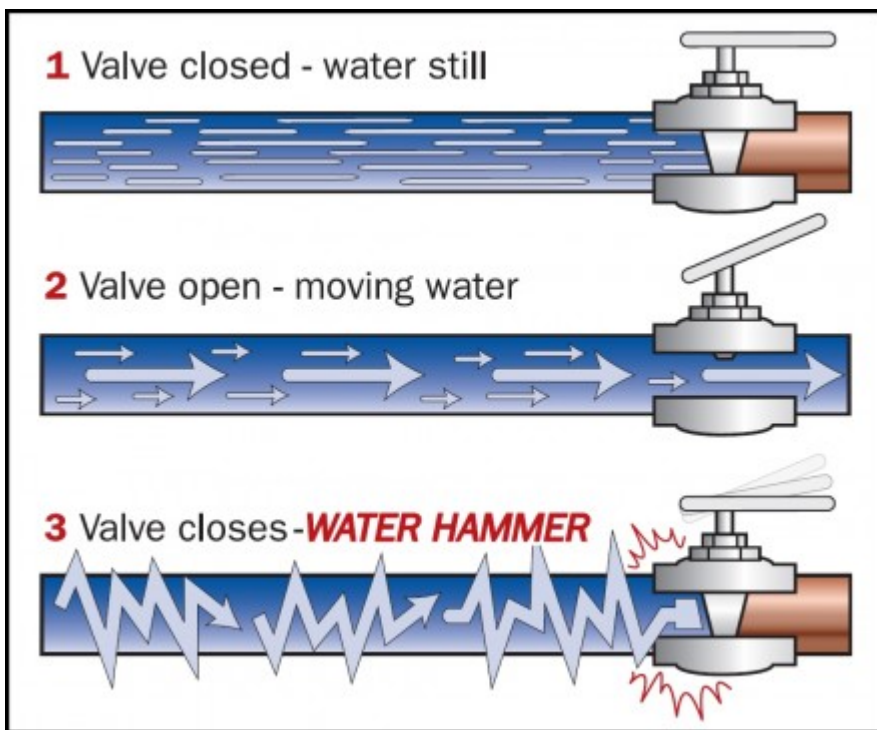
Εφαρμογή: Υδραυλικό άλμα (4)



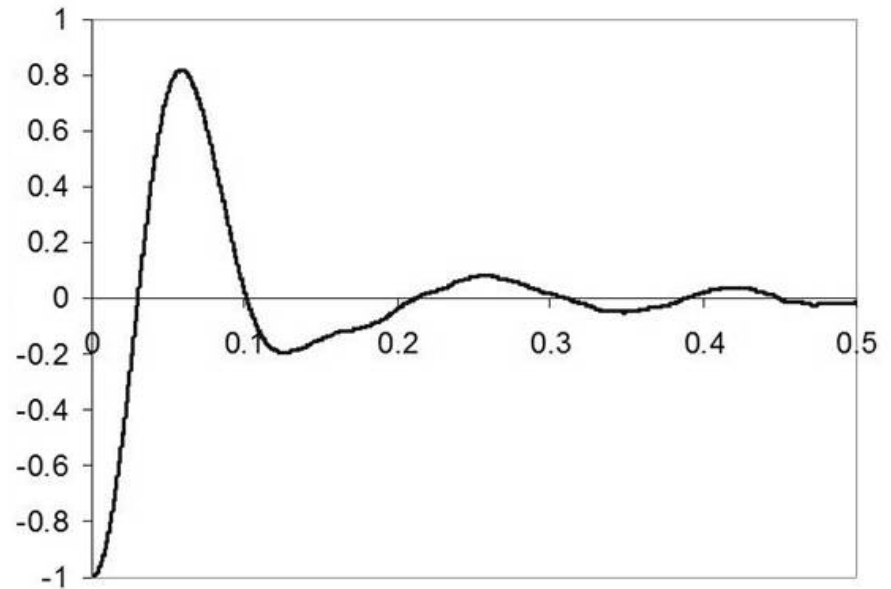
Κατηγοριοποίηση υδραυλικού άλματος

- 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)

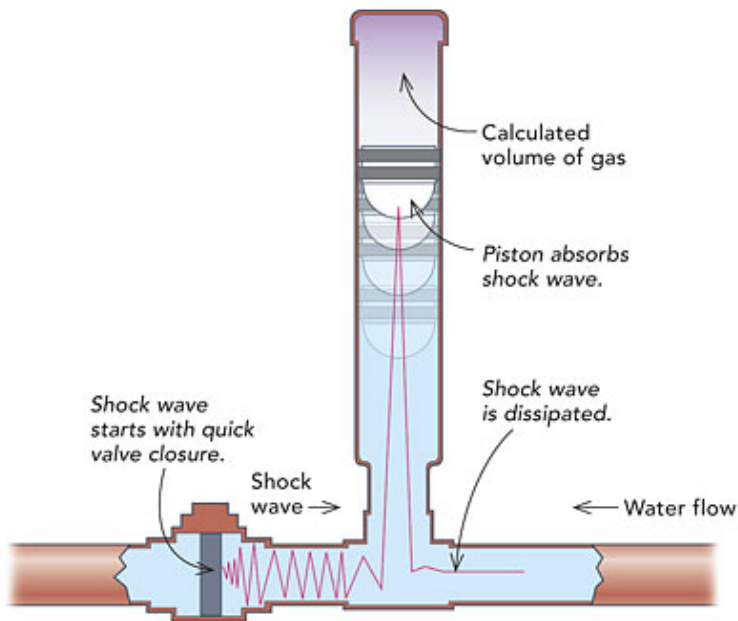


Κανονικοποιημένη μετρούμενη πίεση



Χρόνος μετα το κλείσιμο
της βαλβίδας (s)

Υδραυλικό Πλήγμα (2)

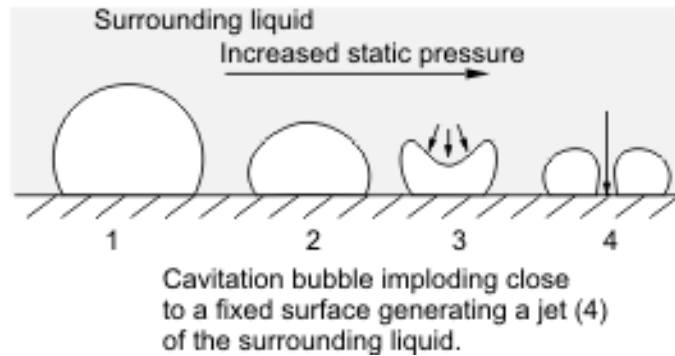


<http://www.finehomebuilding.com/how-to/qa/eliminate-water-hammer-banging-pipes.aspx>

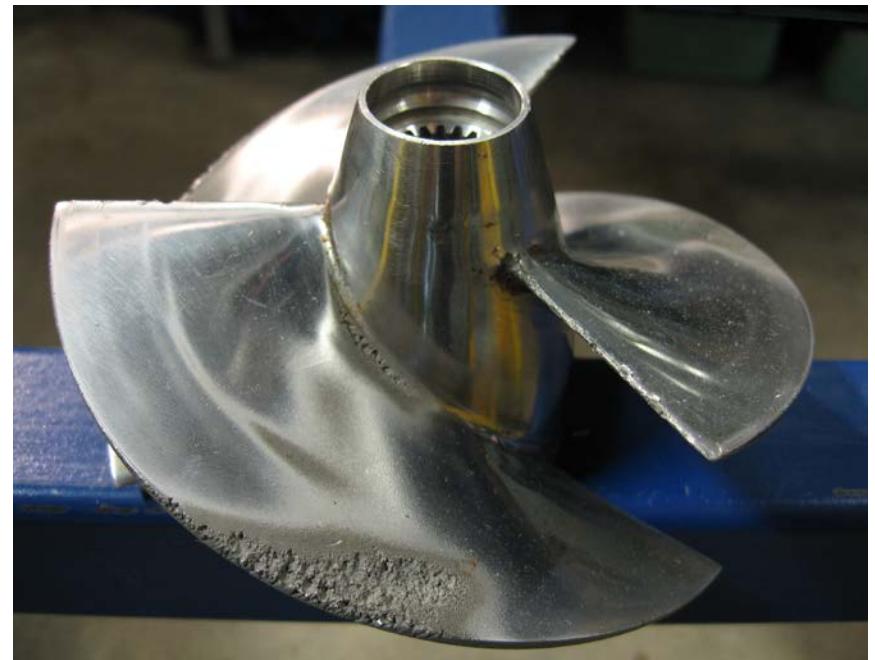
<http://www.bunnings.com.au/our-range/bathroom-plumbing/plumbing/tools/hammer-arrestors>

Σπηλαίωση

http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cavitation_bubble_implosion.png



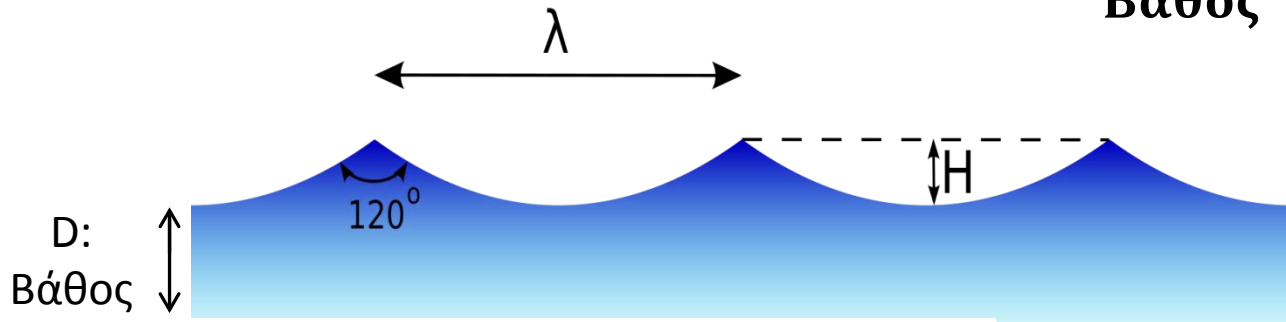
<http://en.wikipedia.org/wiki/Cavitation>



http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cavitation_Propeller_Damage.JPG

Κύματα στο νερο (1)

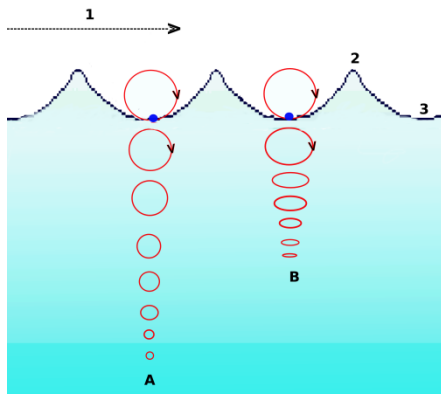
Κύμα ρηχών υδάτων



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

http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stokes_wave_max_height.svg

Κύμα βαθέων υδάτων



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

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 Πατρών**» 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.**
«**Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Ενότητα: Υδραυλικά φαινόμενα -
Υδροηλεκτρικά**» Έκδοση: **1.0.** Πάτρα **2015.** Διαθέσιμο από τη δικτυακή
διεύθυνση:

<https://eclass.upatras.gr/modules/units/?course=PHY1953&id=4354>



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, (2nd 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

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

