



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/>

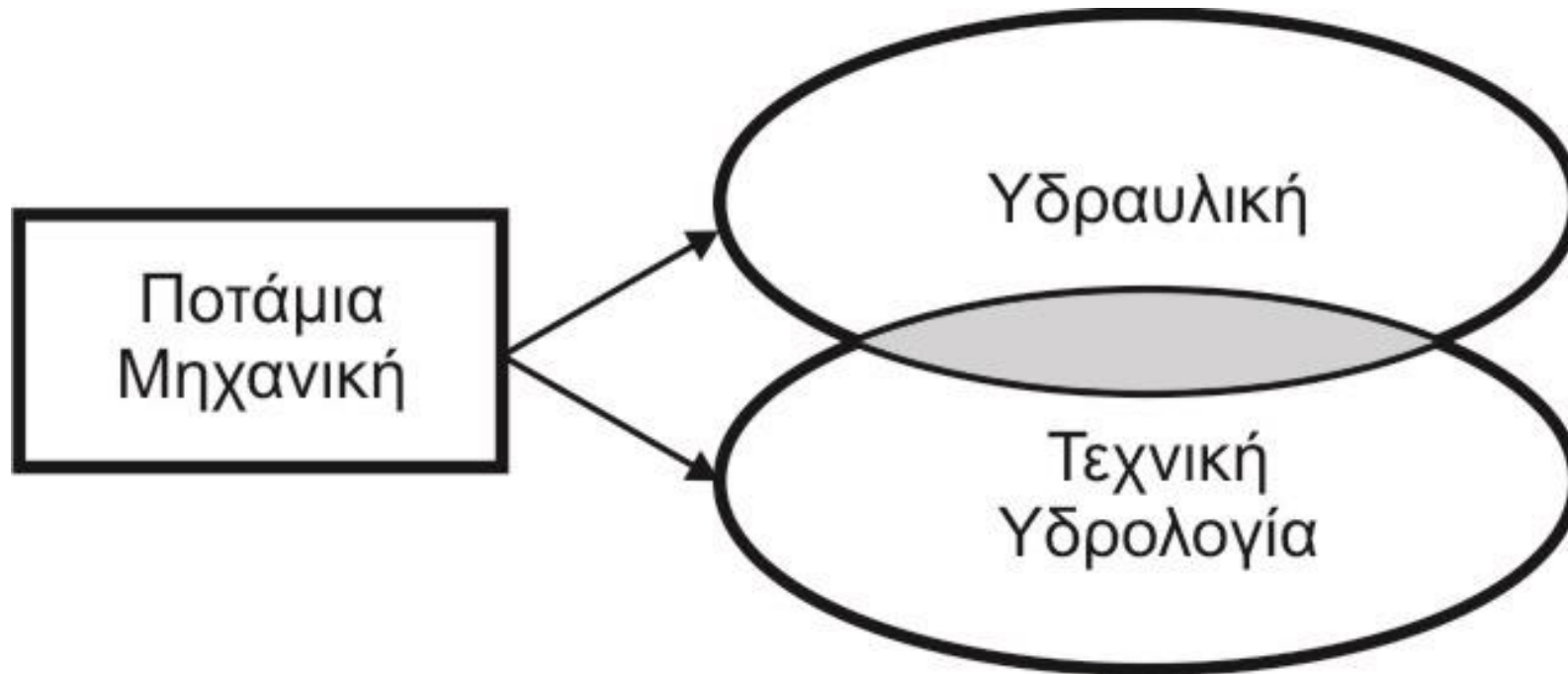
ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ Ι

Υδραυλική ανοιχτών αγωγών Ι

Δρ. Βασίλης Μπέλλος

Εισαγωγή

Εισαγωγή



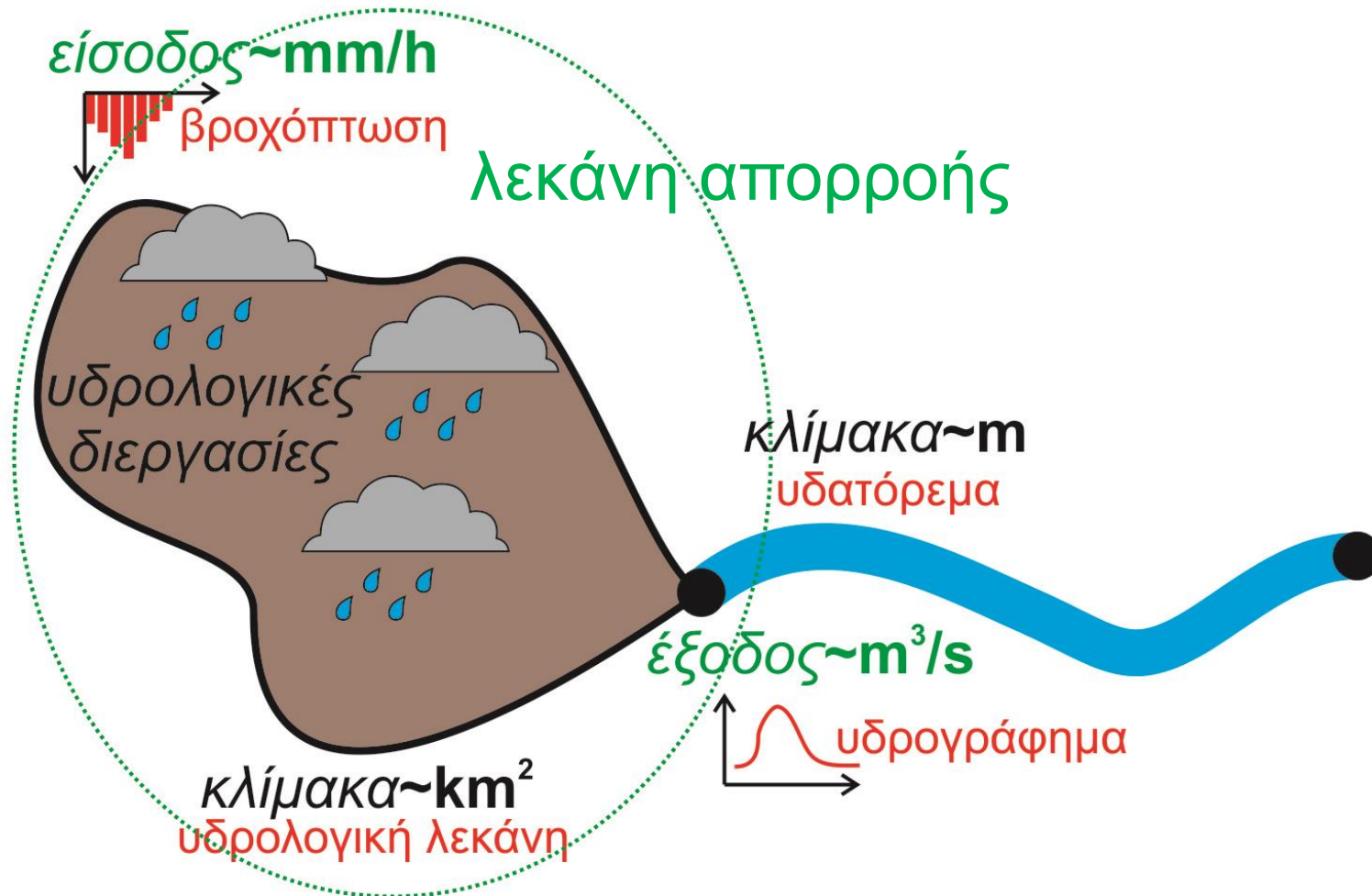
Υδραυλική

- Ανοιχτών αγωγών
- Κλειστών αγωγών
- Υπόγεια
- Περιβαλλοντική
- Θαλάσσια

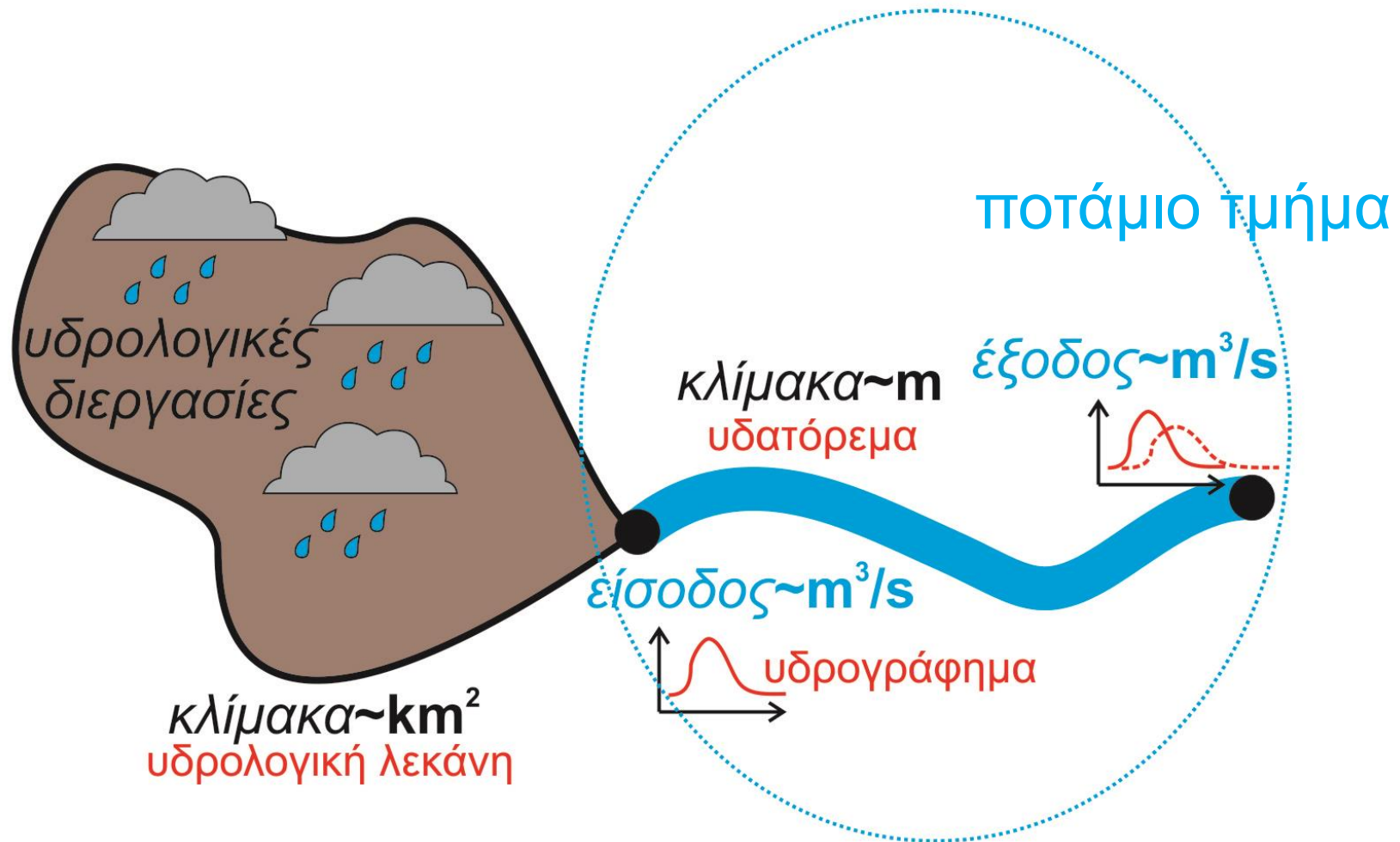
Υδραυλική ανοιχτών αγωγών

- **Ροή νερού με ελεύθερη επιφάνεια**
- **Σχεδιασμός έργων**
 - Διευθέτηση ρέματος
 - Αντιπλημμυρικά έργα
 - Εγγειοβελτιωτικά έργα
 - Φράγματα
 - Αποχετευτικά δίκτυα
 - ...
- **Μη κατασκευαστικά μέτρα**
 - Σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης πλημμυρών

Κλίμακες



Κλίμακες



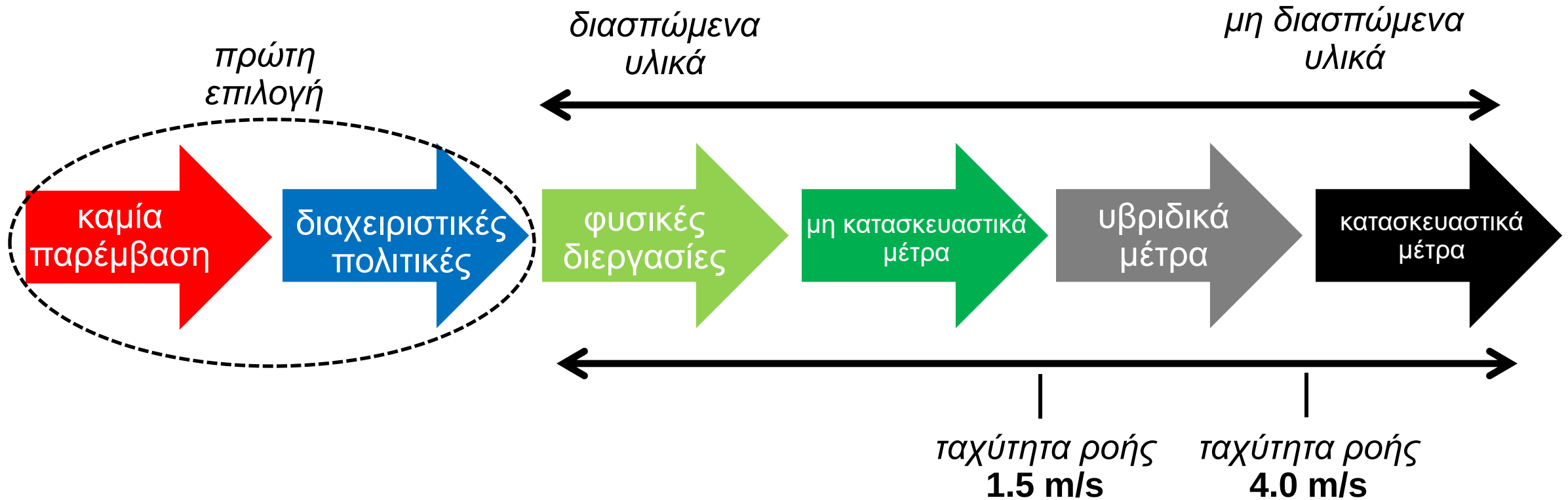
Πεδία εφαρμογής

- **Ποτάμιο σύστημα**
 - Ορεινοί χείμαρροι
 - Ποταμοί
 - Εκβολές
- **Πλημμυρικό πεδίο**
 - Ροή σε περιοχή η οποία συνήθως δεν είναι καλυμμένη με νερό
- **Αποχετευτικό σύστημα**
 - Υδραυλικά έργα μεταφοράς όμβριων νερών → αστικό περιβάλλον

Σύγχρονες τάσεις

- Τεχνικά κριτήρια → **οικολογικά κριτήρια**
- Επαναφορά στη φυσική κατάσταση
 - Καμπυλότητα ρέματος
 - Φυτοκάλυψη
 - ...

Σχεδιασμός κοίτης

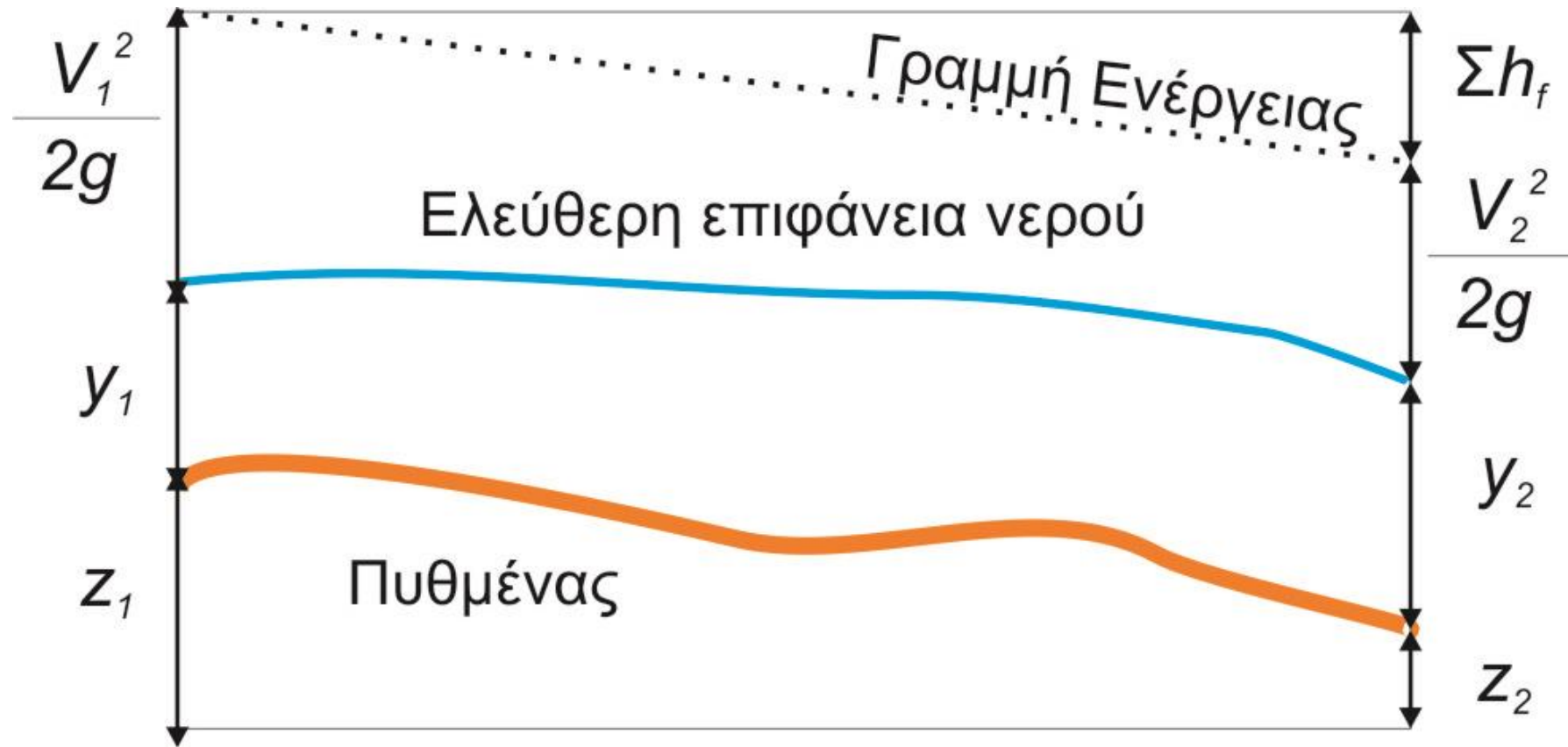


Θεωρία

Ταξινόμηση ροών

- Μεταβολή υδραυλικών χαρακτηριστικών (βάθος + παροχή)
- Στο χώρο
 - Ομοιόμορφη ροή
 - Ανομοιόμορφη ροή
- Στο χρόνο
 - Μόνιμη ή σταθερή ροή
 - Μη μόνιμη ή ασταθής ροή

Εξίσωση ενέργειας



Μεγέθη

$$H = z + y + \frac{V^2}{2g}$$

ολική ενέργεια

$$E = y + \frac{V^2}{2g}$$

ειδική ενέργεια

$$\frac{dE}{dx} = S_0 - S_f$$

εξίσωση ενέργειας

Μόνιμη - ομοιόμορφη ροή

εμπειρικό μοντέλο

- Μηδενική μεταβολή ενέργειας

$$\frac{dE}{dx} = 0 \Rightarrow S_0 = S_f$$

- Εξίσωση Manning για κανονικό βάθος ροής

$$Q = \frac{1}{n} A R^{2/3} S_0^{1/2} \quad \text{οποιαδήποτε διατομή}$$

$$q = \frac{1}{n} y^{5/3} S_0^{1/2} \quad \text{αγωγός απείρου πλάτους}$$

Συντελεστές τραχύτητας

Manning

Material	n
<i>Metals</i>	
Steel	0.012
Cast iron	0.013
Corrugated metal	0.025
<i>Non-metals</i>	
Lucite	0.009
Glass	0.010
Cement	0.011
Concrete	0.013
Wood	0.012
Clay	0.013
Brickwork	0.013
Gunit	0.019
Masonry	0.025
Rock cuts	0.035
<i>Natural streams</i>	
Clean and straight	0.030
Bottom: gravel, cobbles and boulders	0.040
Bottom: cobbles with large boulders	0.050

Channel	Type	n		
		Depth Range		
		(0-150 mm)	(150-600 mm)	(>600 mm)
Rigid	Concrete	0.015	0.013	0.013
	Grouted Riprap	0.040	0.030	0.028
	Stone Masonry	0.042	0.032	0.030
	Soil Cement	0.025	0.022	0.020
	Asphalt	0.018	0.016	0.016
Unlined	Bare Soil	0.023	0.020	0.020
	Rock Cut	0.045	0.035	0.025
Temporary	Woven Paper Net	0.016	0.015	0.015
	Jute Net	0.028	0.022	0.019
	Fiberglass Roving	0.028	0.021	0.019
	Straw with Net	0.065	0.033	0.025
	Curled Wood Mat	0.066	0.035	0.028
Gravel Riprap	Synthetic Mat	0.036	0.025	0.021
	25mm D50	0.044	0.033	0.030
	50 mm D50	0.066	0.041	0.034
Rock Riprap	150 mm D50	0.104	0.069	0.035
	300 mm D50	—	0.078	0.040

Πηγή: Chaudhry, M.H. (2008). Open channel flow, 2nd edition. Springer Editions, New York, USA.

Υπερκρίσιμη / υποκρίσιμη ροή

- Αριθμός Froude

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gy}}$$

- Βάθος ροής < Κρίσιμο βάθος → (Fr>1)
 - Υπερκρίσιμη ροή
- Βάθος ροής > Κρίσιμο βάθος → (Fr<1)
 - Υποκρίσιμη ροή

Ειδική ενέργεια

$$Q = VA$$

παροχή

Ειδική ενέργεια

$$Q = VA$$

παροχή

$$q = \frac{Q}{B}$$

ειδική παροχή

Ειδική ενέργεια

$$Q = VA$$

παροχή

$$q = \frac{Q}{B}$$

ειδική παροχή

$$E = y + \frac{q^2}{2gy^2}$$

ειδική ενέργεια

Ειδική ενέργεια

$$Q = VA$$

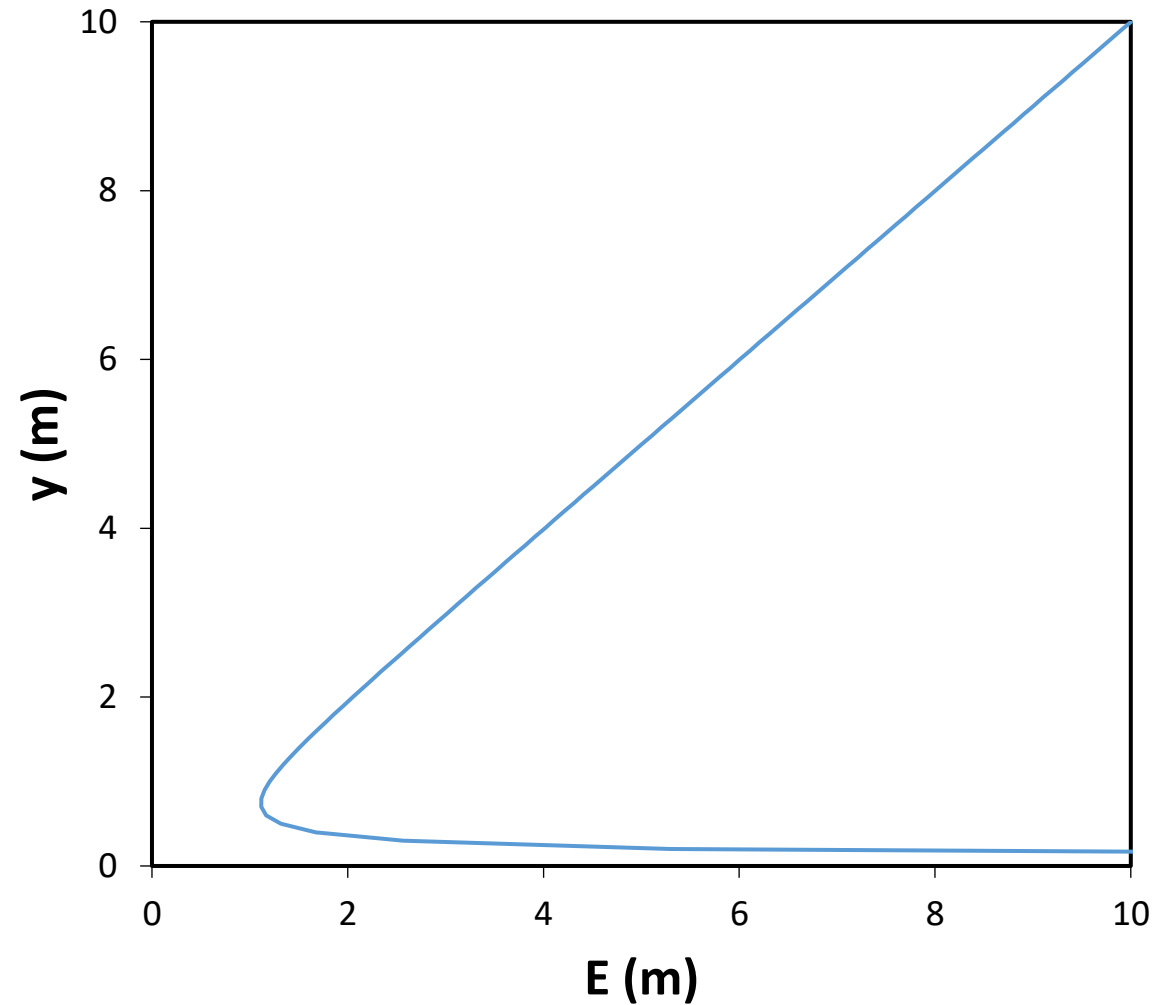
παροχή

$$q = \frac{Q}{B}$$

ειδική παροχή

$$E = y + \frac{q^2}{2gy^2}$$

ειδική ενέργεια



Ειδική ενέργεια

$$Q = VA$$

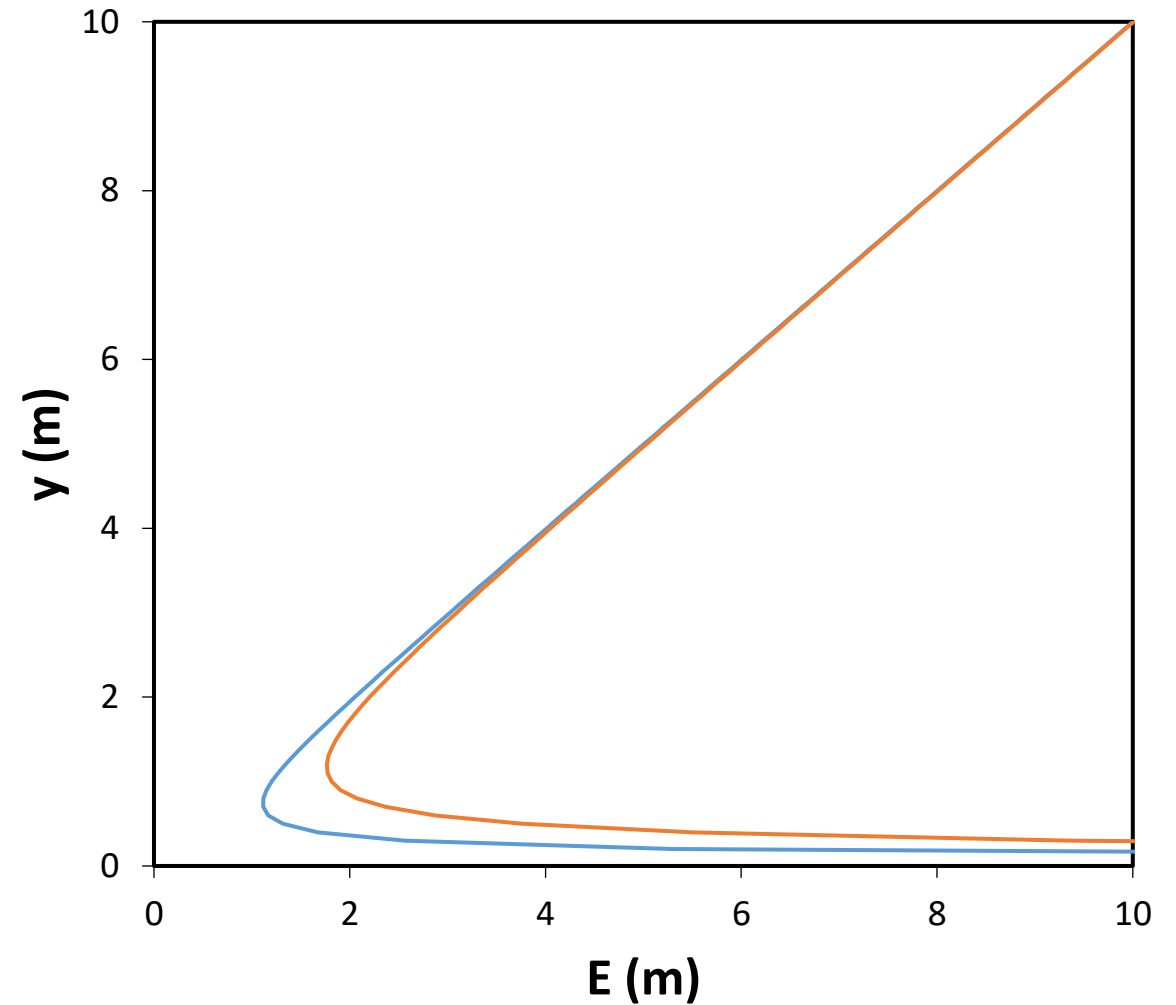
παροχή

$$q = \frac{Q}{B}$$

ειδική παροχή

$$E = y + \frac{q^2}{2gy^2}$$

ειδική ενέργεια



Ειδική ενέργεια

$$Q = VA$$

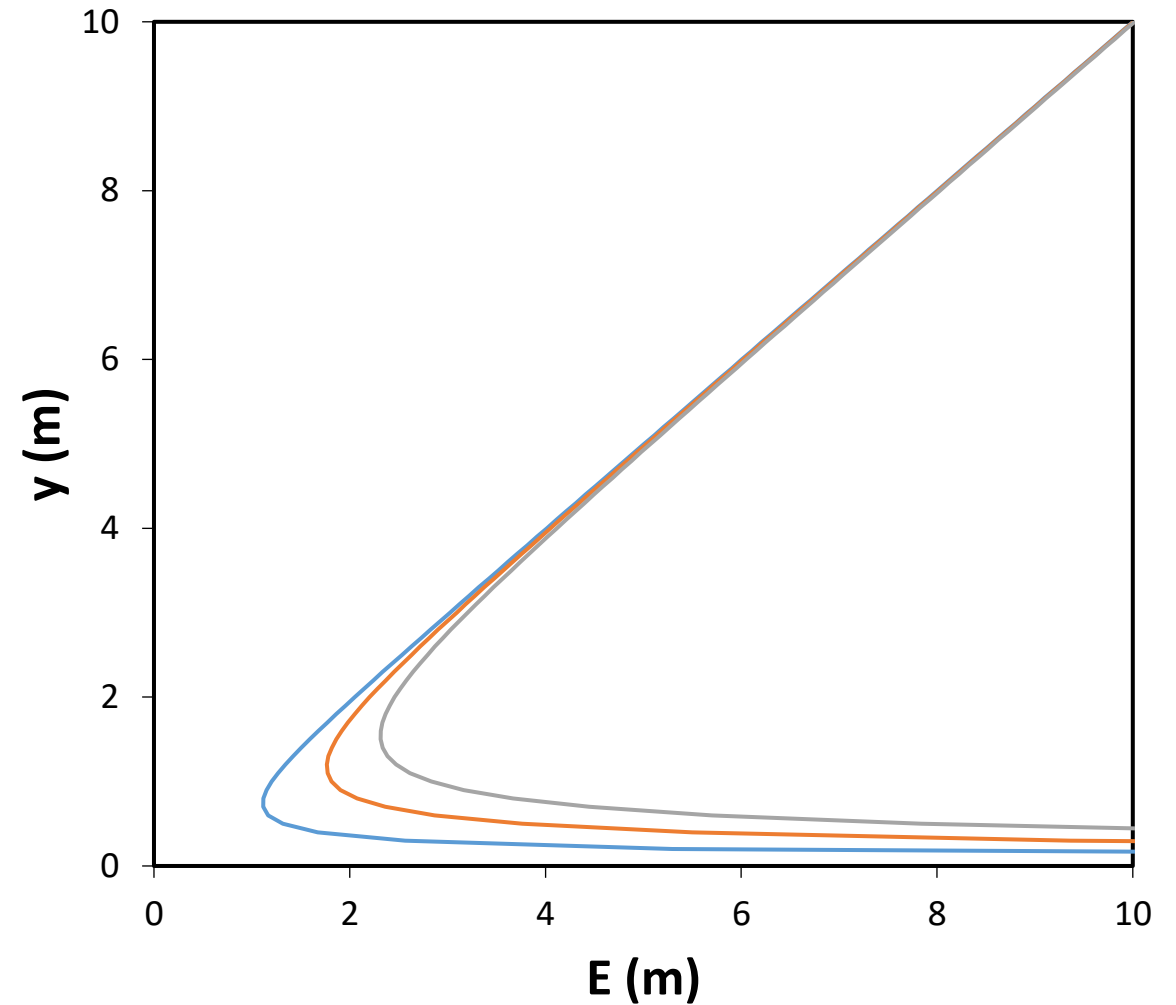
παροχή

$$q = \frac{Q}{B}$$

ειδική παροχή

$$E = y + \frac{q^2}{2gy^2}$$

ειδική ενέργεια



Ειδική ενέργεια

$$Q = VA$$

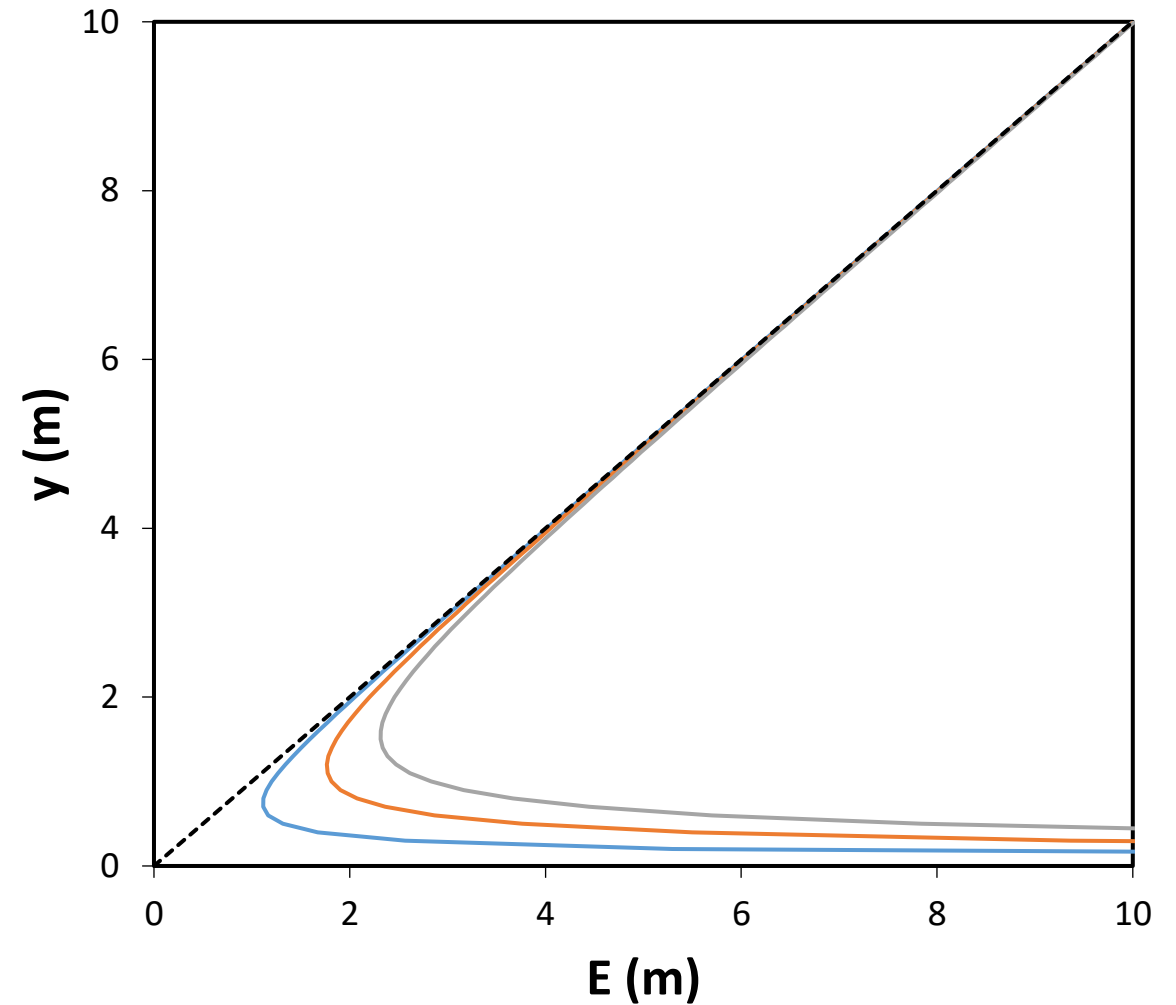
παροχή

$$q = \frac{Q}{B}$$

ειδική παροχή

$$E = y + \frac{q^2}{2gy^2}$$

ειδική ενέργεια



Ειδική ενέργεια

$$Q = VA$$

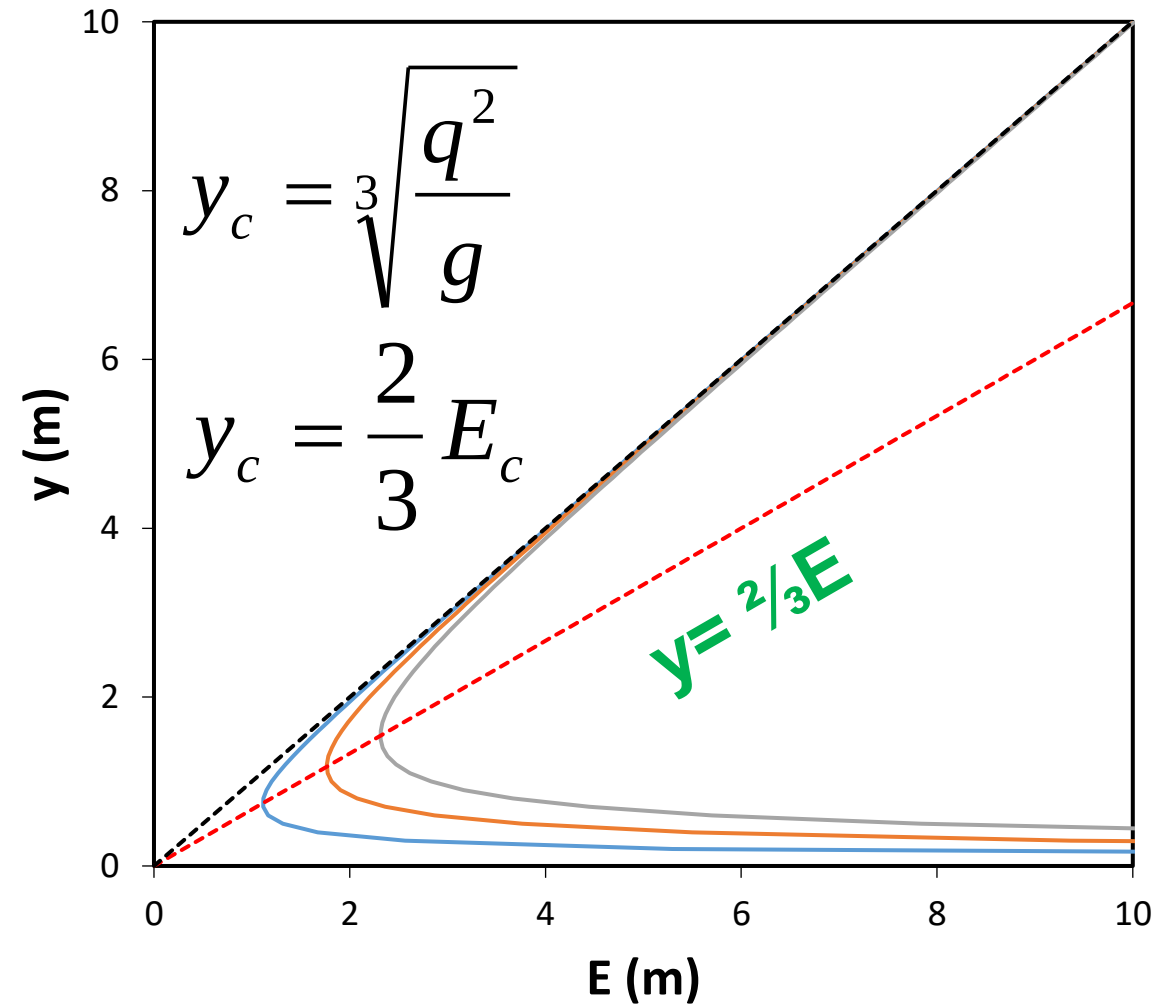
παροχή

$$q = \frac{Q}{B}$$

ειδική παροχή

$$E = y + \frac{q^2}{2gy^2}$$

ειδική ενέργεια



Σχεδιασμός διατομής

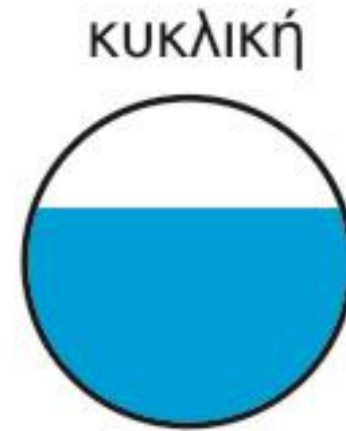
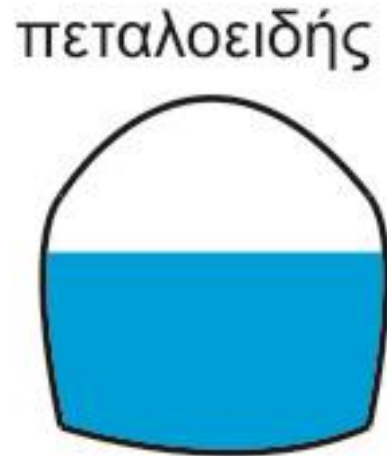
Τύποι διατομής

- **Άκαμπτες διατομές**
 - Σκυρόδεμα
- **Διατομές που διαβρώνονται**
 - Ελαχιστοποίηση της διάβρωσης
- **Αλουβιακές διατομές**
 - Φερτές ύλες είναι ίδιες με το υλικό κατασκευής → σταθερές διατομές

Άκαμπτες διατομές

- Σύντομες διαδρομές και μικρές καμπυλότητες
- Προσβασιμότητα
- Ισοζύγιο εκσκαφών/αποθέσεων
- Κλίση πυθμένα → με βάση την τοπογραφία
- Διαστασιολόγηση διατομής
 - Παροχή
 - Οικονομία κατασκευής
 - Υδραυλική αποδοτικότητα

Τύποι διατομών



Τύποι διατομών

- Ορθογωνικές διατομές → συνηθέστερες
- Τραπεζοειδείς διατομές → μεγάλες παροχές
- Τριγωνικές διατομές → μικρές παροχές
- Πεταλοειδείς/κυκλικές διατομές → σήραγγες

Τραπεζοειδής διατομή



Γενικές αρχές σχεδιασμού

- Σχεδιασμός με μόνιμη, ομοιόμορφη ροή
- Μέγιστο όριο σε ταχύτητα ροής για αποφυγή διάβρωσης → $Fr \approx 0.3$
- Ελάχιστο όριο σε ταχύτητα ροής για την αποφυγή καθίζησης φερτών υλών → $V \approx 0.5 \text{ m/s}$
- Κλίση πρανών → ανάλογα το υλικό (από 1:1 Κ:Ο σε σκληρό υλικό έως 1:3 Κ:Ο)
- Ελεύθερο περιθώριο → $k[0.8-1.4]$ $F_b = \sqrt{kh}$

Βέλτιστες διατομές

εξίσωση Manning για παροχή

$$Q = \frac{1}{n} A R^{2/3} S_0^{1/2}$$

Βέλτιστες διατομές

εξίσωση Manning για παροχή

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} S_0^{1/2}$$

Βέλτιστες διατομές

εξίσωση Manning για παροχή

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} S_0^{1/2} \longrightarrow Q \propto AR^{2/3}$$

Βέλτιστες διατομές

εξίσωση Manning για παροχή

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} S_0^{1/2} \longrightarrow Q \propto AR^{2/3} = \frac{A^{5/3}}{P^{2/3}}$$

Βέλτιστες διατομές

εξίσωση Manning για παροχή

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} S_0^{1/2} \longrightarrow Q \propto AR^{2/3} = \frac{A^{5/3}}{P^{2/3}}$$

βέλτιστη διατομή με οικονομικά κριτήρια $\rightarrow$ μέγιστο **A** με ελάχιστο **P**

Πολλαπλασιαστές Lagrange

ελαχιστοποίηση $f(x,y)$ υπό $g(x,y)$



$$L(x, y, \lambda) = f(x, y) - \lambda g(x, y)$$

Πολλαπλασιαστές Lagrange

ελαχιστοποίηση $f(x,y)$ υπό $g(x,y)$

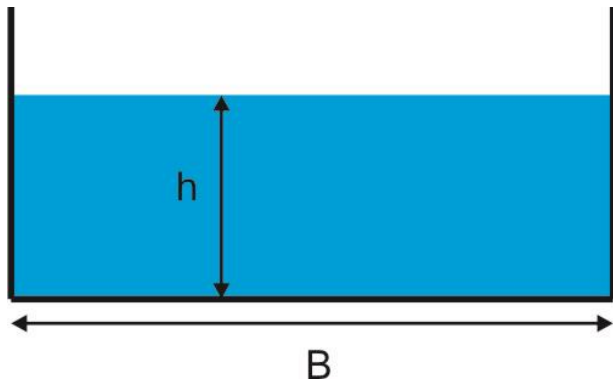


$$L(x, y, \lambda) = f(x, y) - \lambda g(x, y)$$

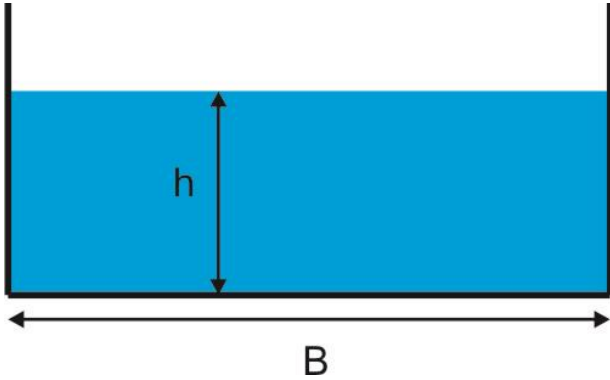


$$\frac{\partial L}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial L}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial L}{\partial \lambda} = 0$$

Ορθογωνική διατομή

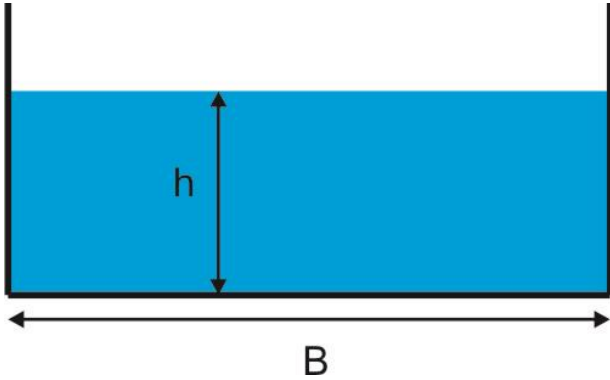


Ορθογωνική διατομή



ελαχιστοποίηση $P(B,h)$ υπό $A(B,h)$

Ορθογωνική διατομή

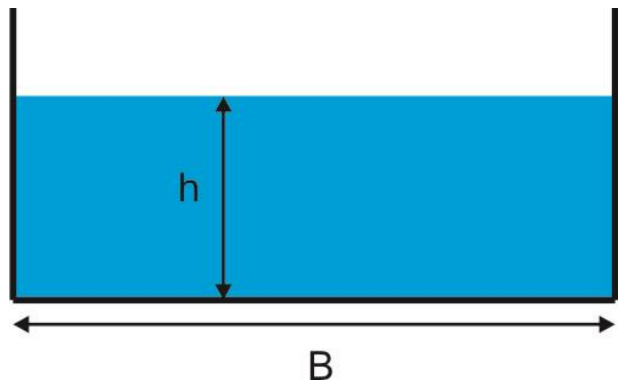


ελαχιστοποίηση $P(B,h)$ υπό $A(B,h)$

$$P(B, h) = B + 2h$$

$$A(B, h) = Bh$$

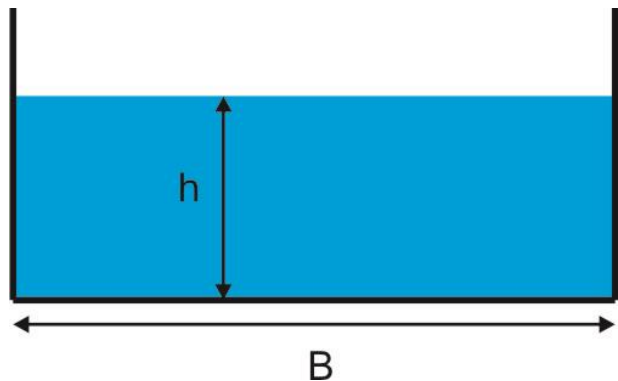
Ορθογωνική διατομή



ελαχιστοποίηση $P(B,h)$ υπό $A(B,h)$

$$\left. \begin{array}{l} P(B,h) = B + 2h \\ A(B,h) = Bh \end{array} \right\} L(B,h,\lambda) = P(B,h) - \lambda A(B,h)$$

Ορθογωνική διατομή

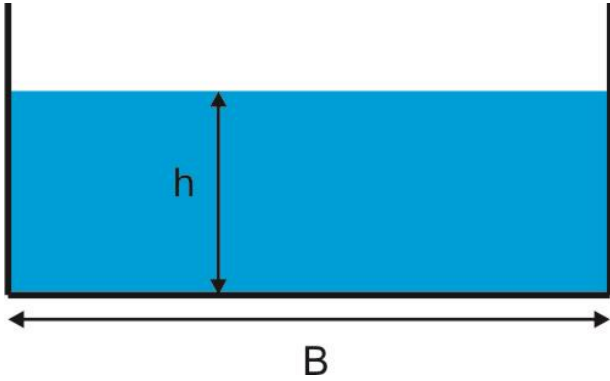


ελαχιστοποίηση $P(B,h)$ υπό $A(B,h)$

$$\left. \begin{aligned} P(B,h) &= B + 2h \\ A(B,h) &= Bh \end{aligned} \right\} L(B,h,\lambda) = P(B,h) - \lambda A(B,h)$$

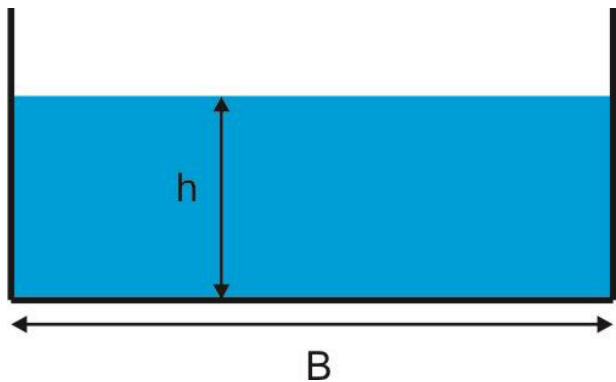
$$L(B,h,\lambda) = B + 2h - \lambda Bh$$

Ορθογωνική διατομή



$$L(B, h, \lambda) = B + 2h - \lambda Bh$$

Ορθογωνική διατομή

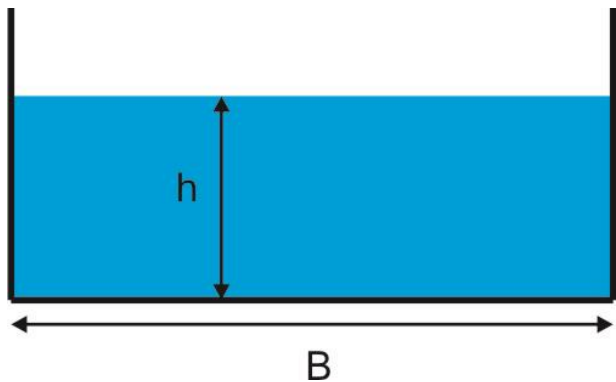


$$L(B, h, \lambda) = B + 2h - \lambda Bh$$

$$\frac{\partial L}{\partial B} = 1 - \lambda h = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial h} = 2 - \lambda B = 0$$

Ορθογωνική διατομή



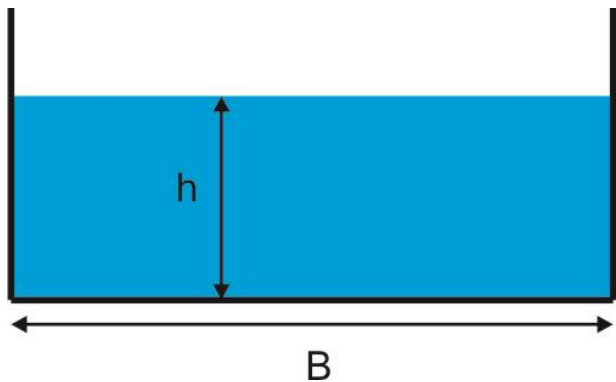
$$L(B, h, \lambda) = B + 2h - \lambda Bh$$

$$\frac{\partial L}{\partial B} = 1 - \lambda h = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial h} = 2 - \lambda B = 0$$

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\partial L}{\partial B} = 1 - \lambda h = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial h} = 2 - \lambda B = 0 \end{array} \right\} \frac{1}{h} = \frac{2}{B}$$

Ορθογωνική διατομή



$$L(B, h, \lambda) = B + 2h - \lambda Bh$$

$$\frac{\partial L}{\partial B} = 1 - \lambda h = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial h} = 2 - \lambda B = 0$$

$$\frac{1}{h} = \frac{2}{B}$$

$$h = \frac{B}{2}$$

Βέλτιστες διατομές

- Ορθογωνικές $\rightarrow h=B/2$
- Τριγωνικές $\rightarrow$ γωνία 45°
- Τραπεζοειδείς $\rightarrow h \approx 0.87B$ και κλίση πρανών 60°
- ...

Υπολογισμός παροχής

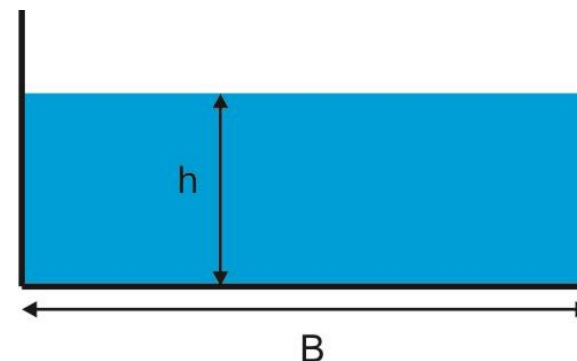
απλές διατομές

εξίσωση Manning για παροχή

$$Q = \frac{1}{n} A R^{2/3} S_0^{1/2}$$

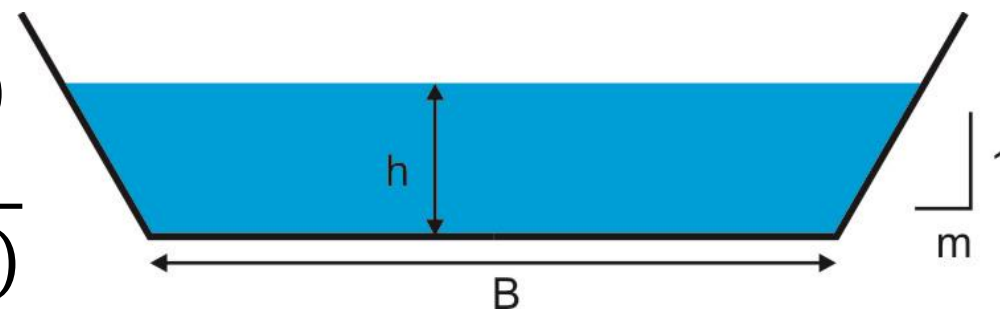
$$A = Bh$$

$$P = B + 2h$$



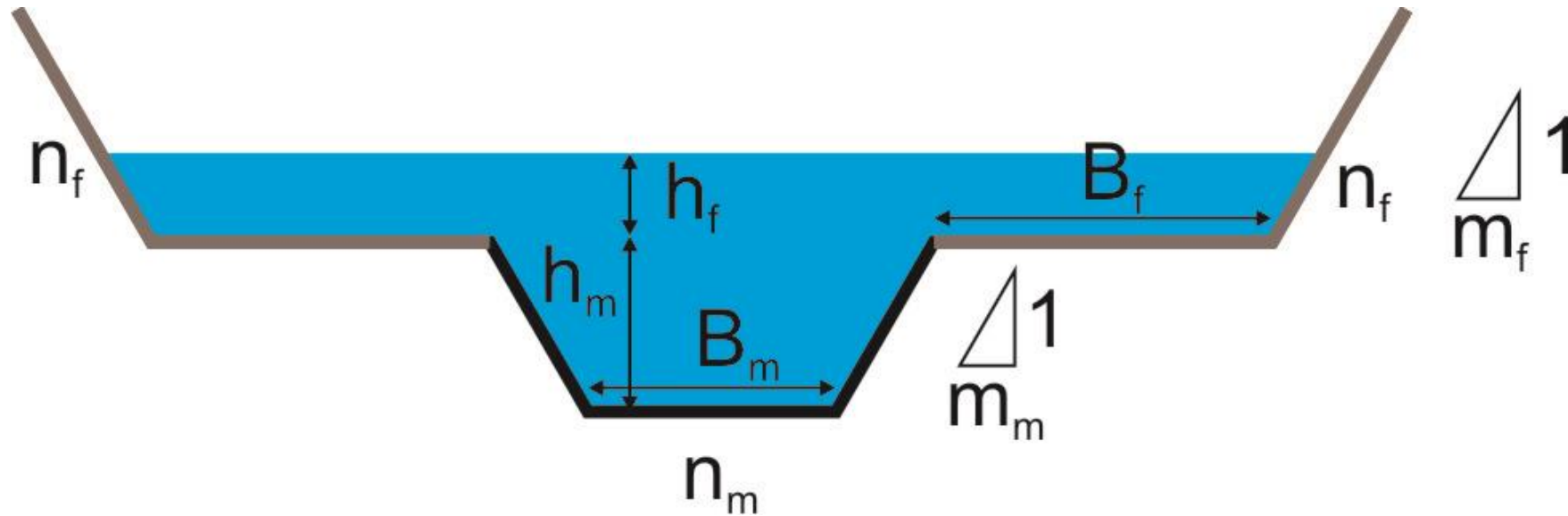
$$A = h(B + mh)$$

$$P = B + 2h\sqrt{1 + m^2}$$



Σύνθετες διατομές

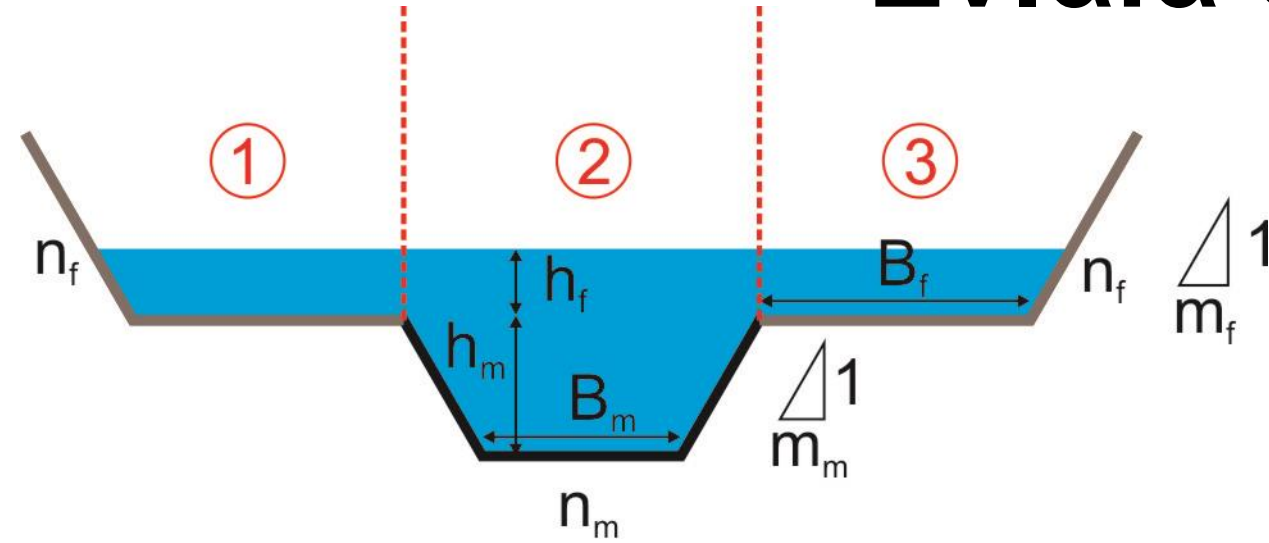
Μεταβλητός συντελεστής τραχύτητας



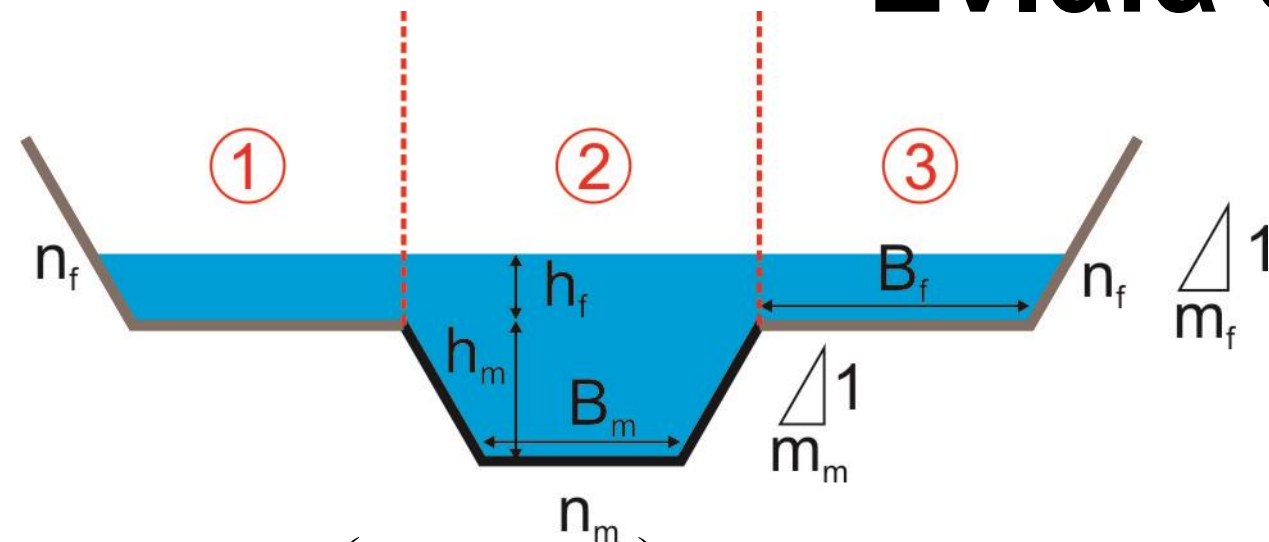
Μέθοδοι

- **Αντιμετώπιση ως ενιαία διατομή**
 - Χωρισμός σύνθετης διατομής σε επιμέρους τμήματα
 - Εκτίμηση ισοδύναμου συντελεστή τραχύτητας σε όλη τη διατομή
 - Υπολογισμός παροχής με βάση την εξίσωση Manning
- **Αντιμετώπιση κάθε τμήματος ξεχωριστά**
 - Χωρισμός σύνθετης διατομής σε επιμέρους τμήματα
 - Υπολογισμός παροχής με βάση την εξίσωση Manning σε κάθε επιμέρους τμήμα
 - Άθροιση παροχών επί μέρους τμημάτων

Ενιαία διατομή



Ενιαία διατομή

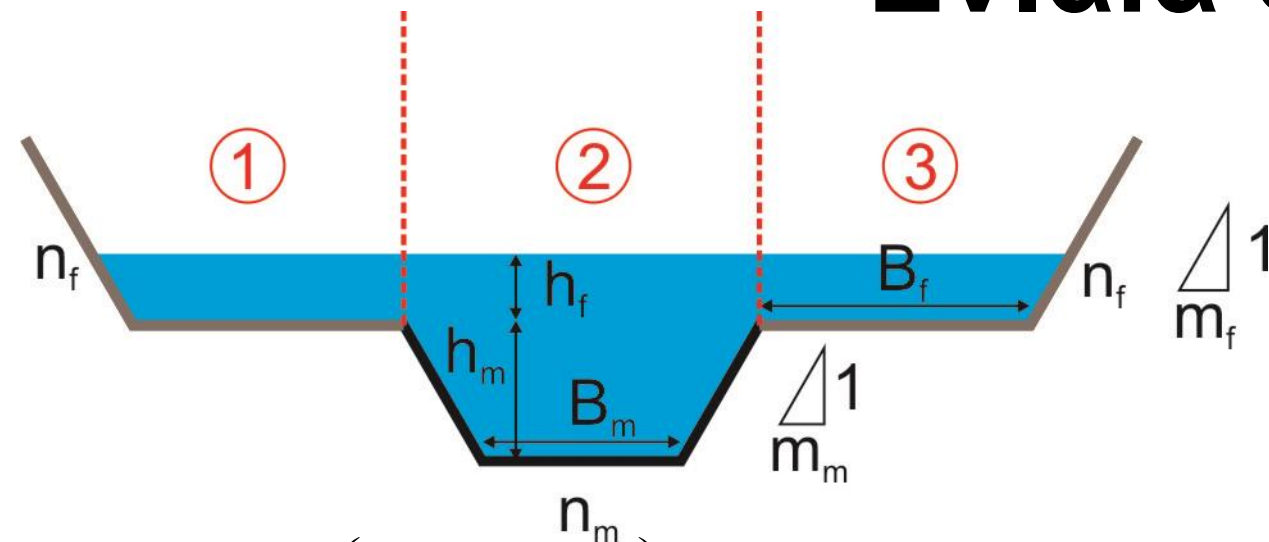


$$A_1 = A_3 = h_f \left(B_f + \frac{1}{2} m_f h_f \right)$$

$$P_1 = P_3 = B_f + h_f \sqrt{1 + m_f^2}$$

$$R_1 = R_3 = \frac{A_1}{P_1}$$

Ενιαία διατομή



$$A_1 = A_3 = h_f \left(B_f + \frac{1}{2} m_f h_f \right)$$

$$P_1 = P_3 = B_f + h_f \sqrt{1 + m_f^2}$$

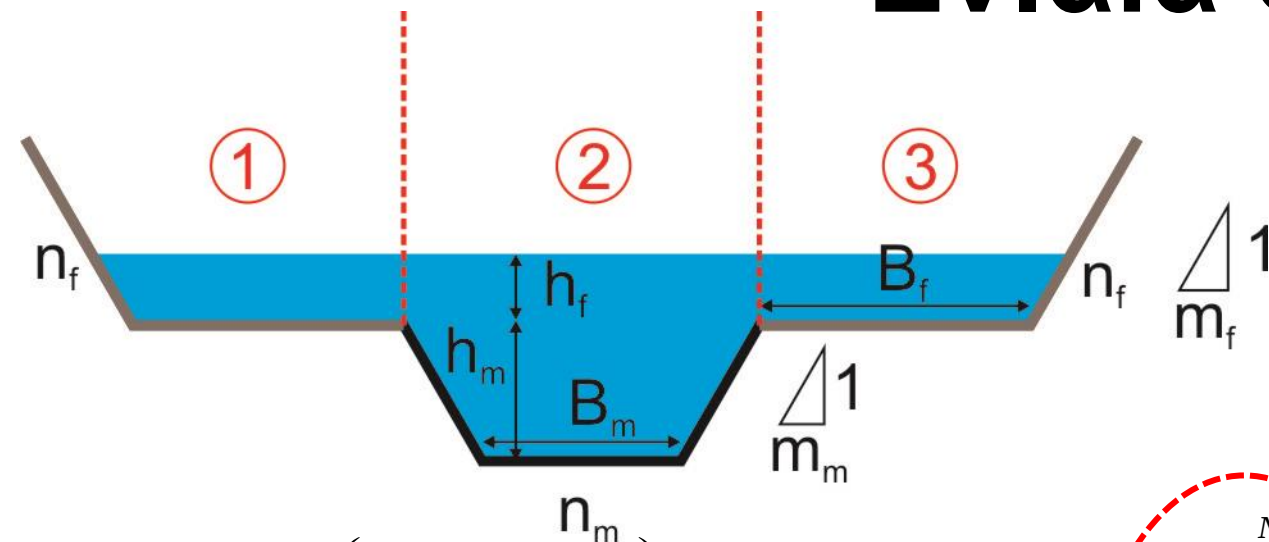
$$R_1 = R_3 = \frac{A_1}{P_1}$$

$$A_2 = h_m (B_m + m_m h_m) + h_f (B_m + 2m_m h_m)$$

$$P_2 = B_m + 2h_m \sqrt{1 + m_m^2}$$

$$R_2 = \frac{A_2}{P_2}$$

Ενιαία διατομή



$$A_1 = A_3 = h_f \left(B_f + \frac{1}{2} m_f h_f \right)$$

$$P_1 = P_3 = B_f + h_f \sqrt{1 + m_f^2}$$

$$R_1 = R_3 = \frac{A_1}{P_1}$$

$$A_2 = h_m (B_m + m_m h_m) + h_f (B_m + 2m_m h_m)$$

$$P_2 = B_m + 2h_m \sqrt{1 + m_m^2}$$

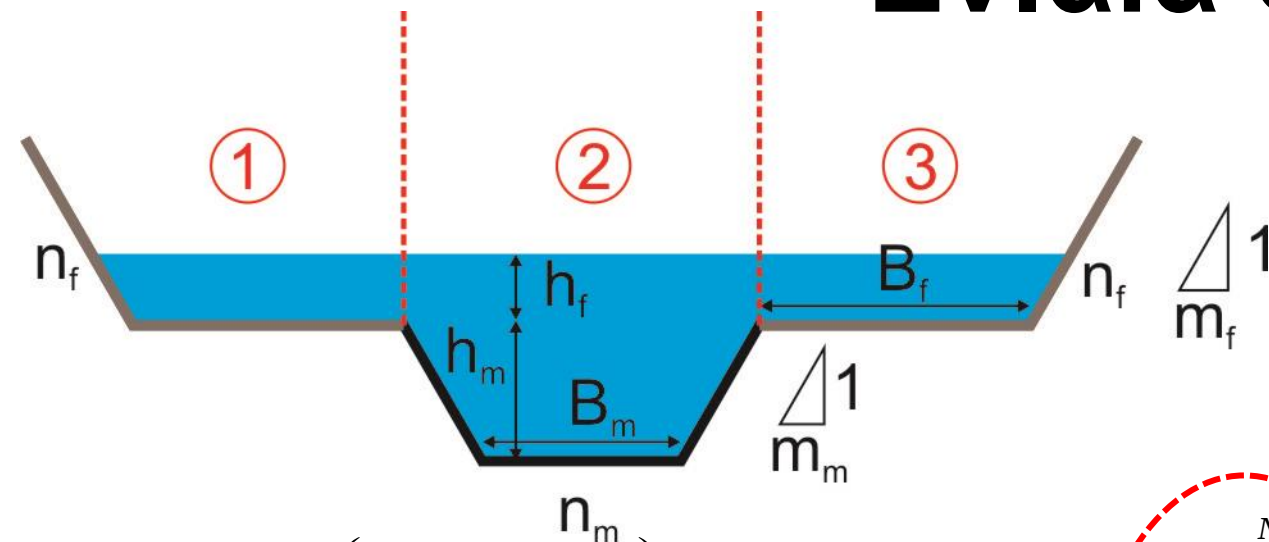
$$R_2 = \frac{A_2}{P_2}$$

$$A = \sum_{i=1}^N A_i$$

$$P = \sum_{i=1}^N P_i$$

$$R = \frac{A}{P}$$

Ενιαία διατομή



$$A_1 = A_3 = h_f \left(B_f + \frac{1}{2} m_f h_f \right)$$

$$P_1 = P_3 = B_f + h_f \sqrt{1 + m_f^2}$$

$$R_1 = R_3 = \frac{A_1}{P_1}$$

$$A_2 = h_m(B_m + m_m h_m) + h_f(B_m + 2m_m h_m)$$

$$P_2 = B_m + 2h_m \sqrt{1 + m_m^2}$$

~~$$R_2 = \frac{A_2}{P_2}$$~~

$$A = \sum_{i=1}^N A_i$$

$$P = \sum_{i=1}^N P_i$$

$$R = \frac{A}{P}$$

$$n_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_i n_i^2)}{P}}$$

Pavloskii

$$n_e = \frac{PR^{5/3}}{\sum_{i=1}^N \left(\frac{P_i R_i^{5/3}}{n_i} \right)}$$

Lotter

$$n_e = \left(\frac{\sum_{i=1}^N (P_i n_i^{1.5})}{P} \right)^{2/3}$$

Horton

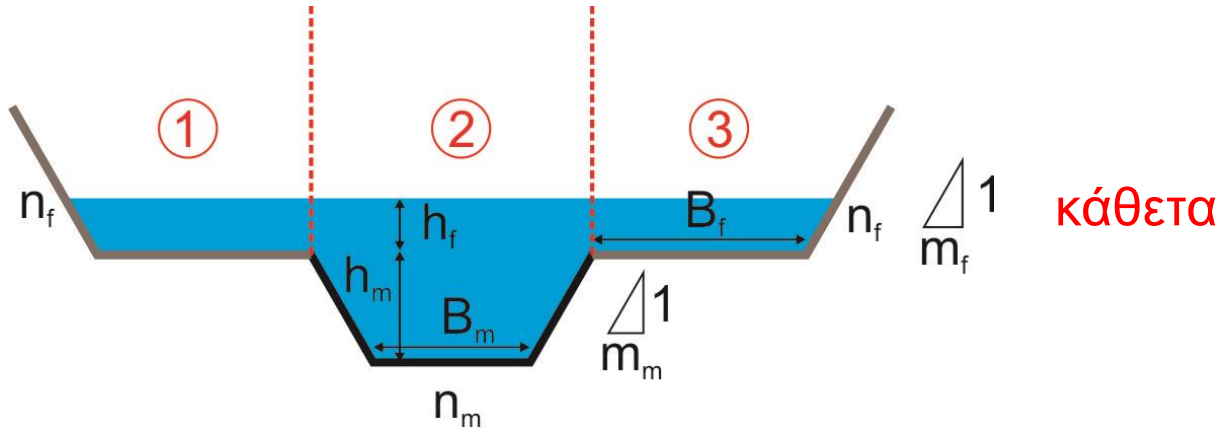
$$n_e = \left(\frac{\sum_{i=1}^N (A_i n_i^{1.5})}{A} \right)^{2/3}$$

Colebatch

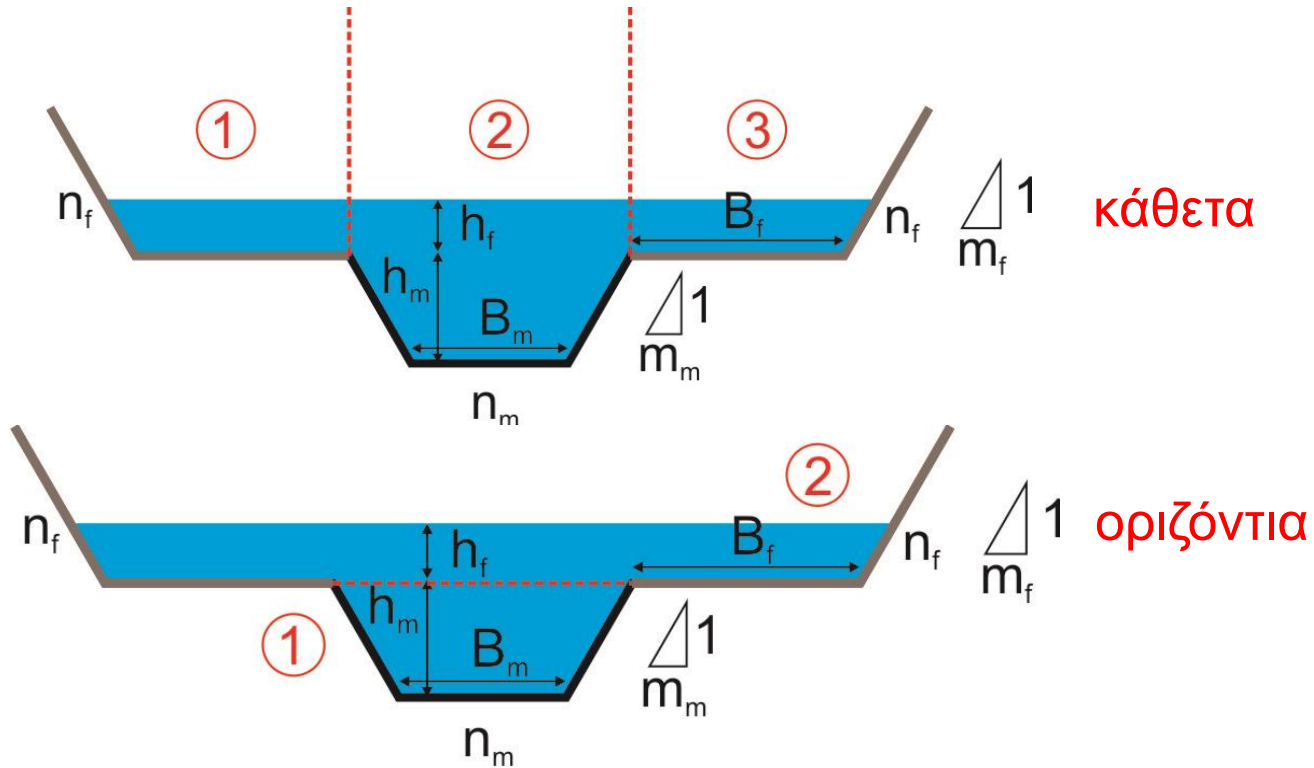
$$n_e = \frac{\sum_{i=1}^N (A_i n_i)}{A}$$

Cox

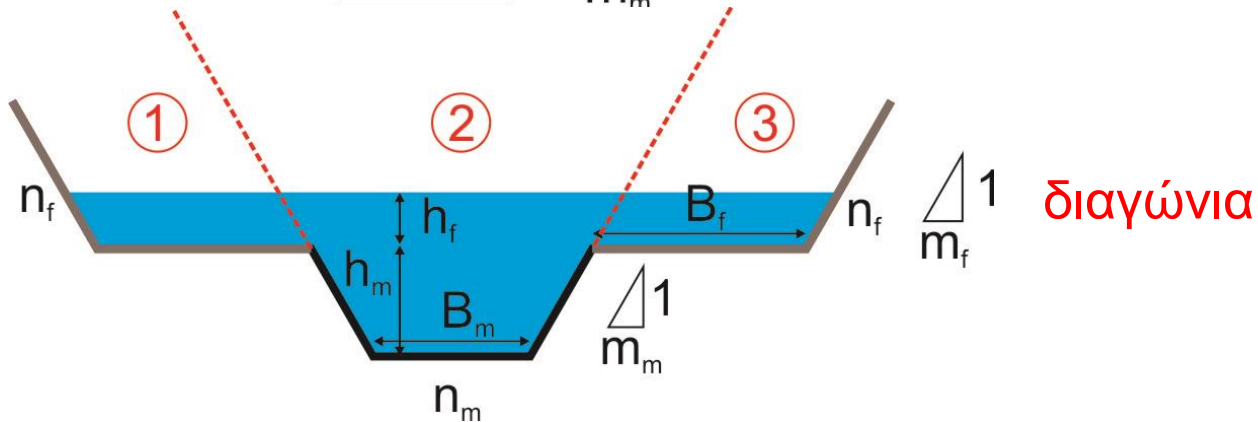
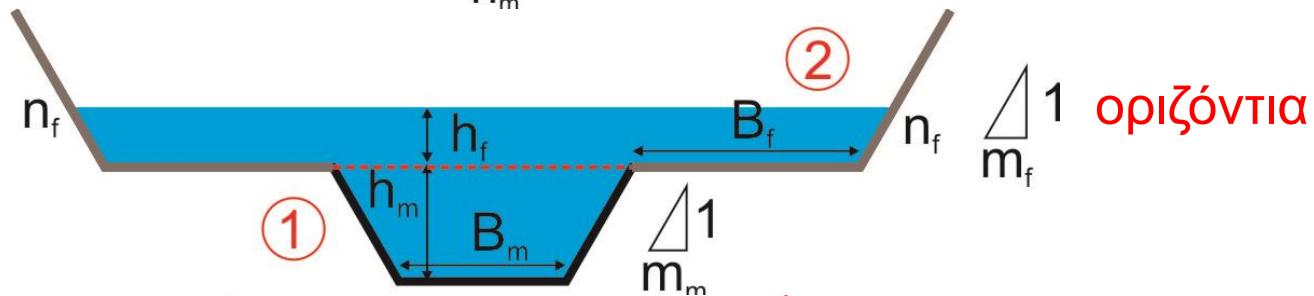
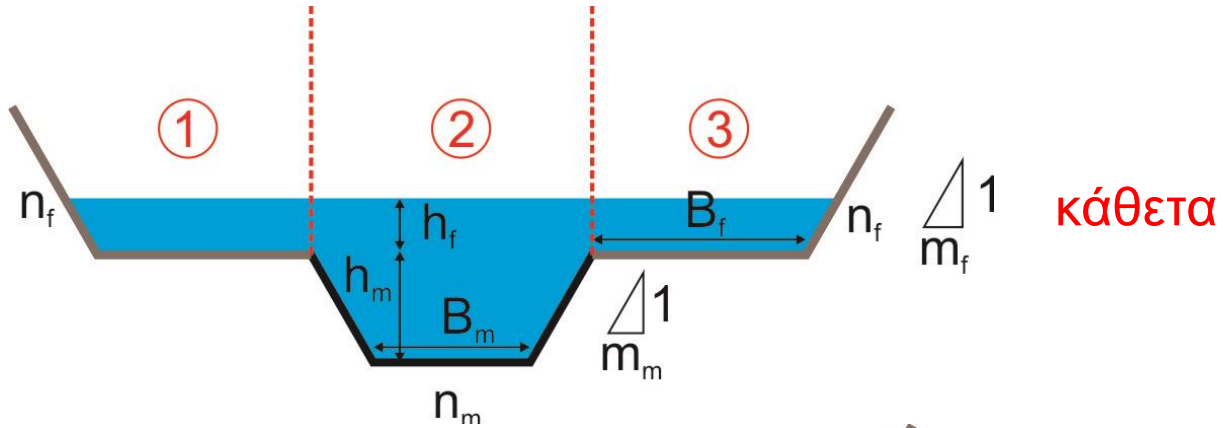
Επιμέρους τμήματα



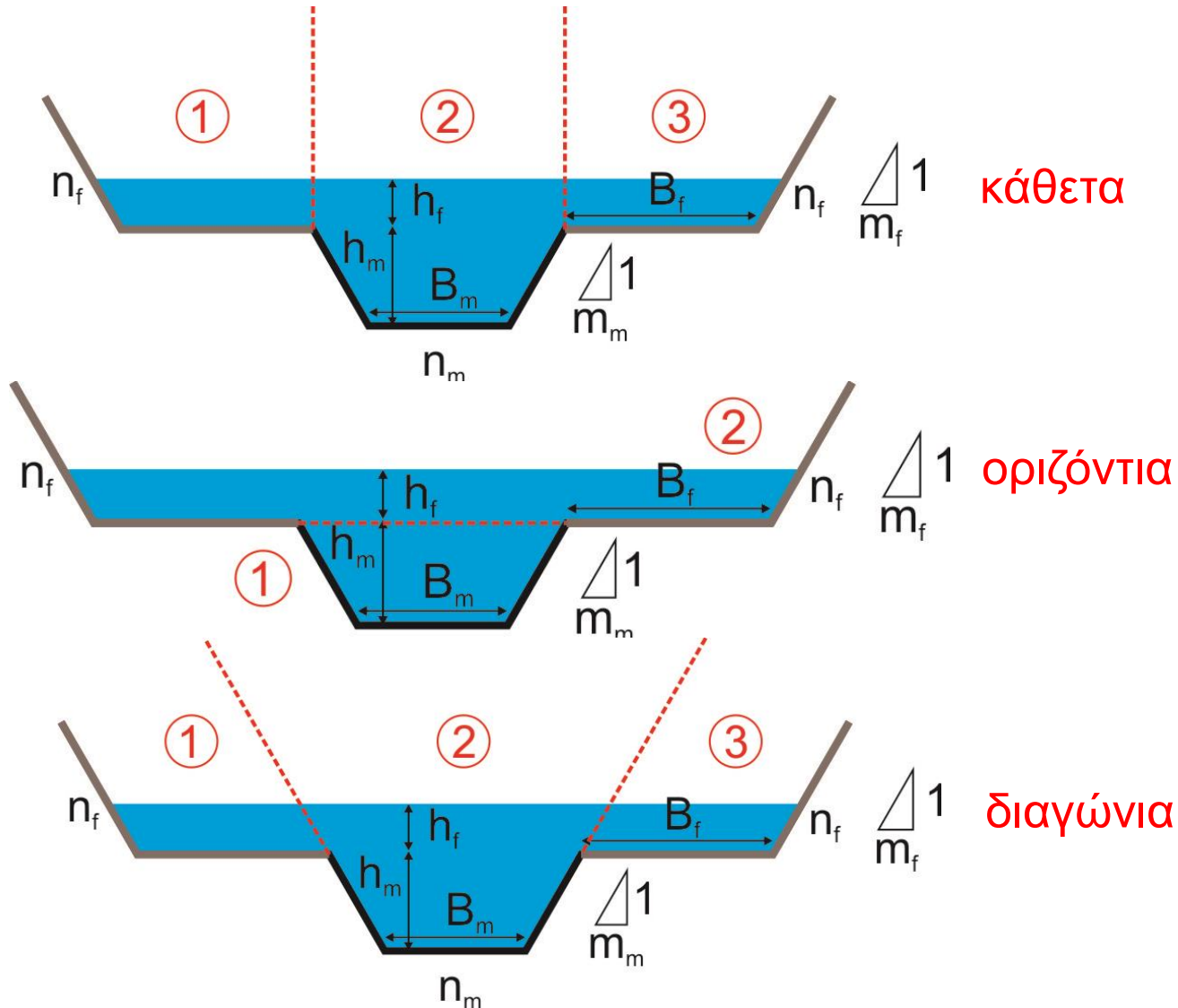
Επιμέρους τμήματα



Επιμέρους τμήματα

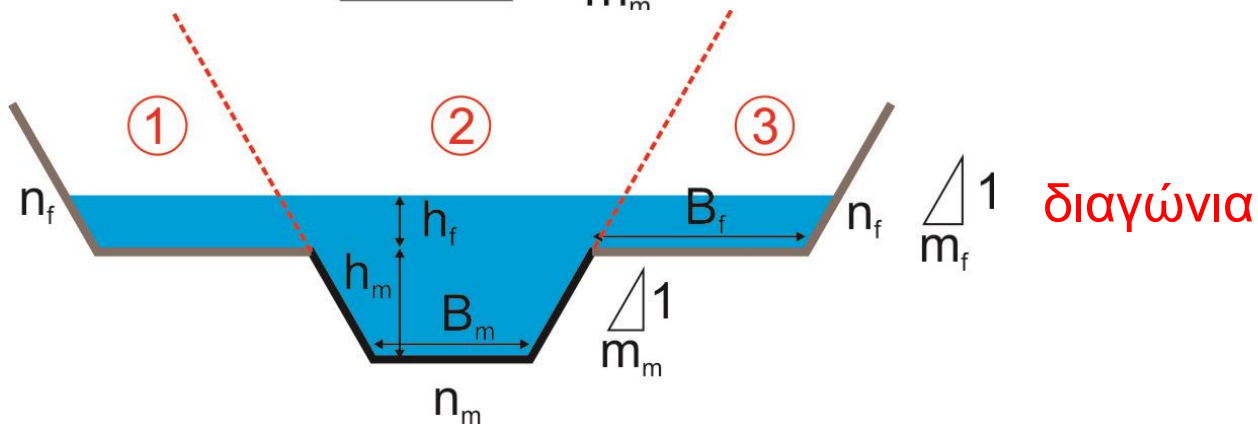
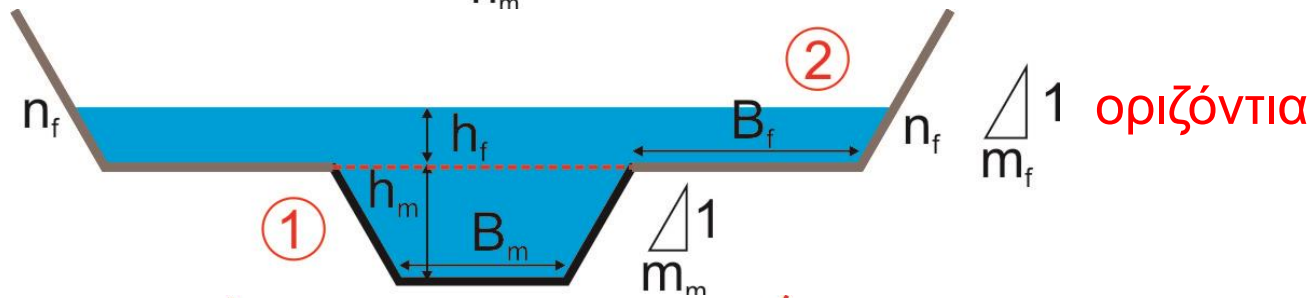
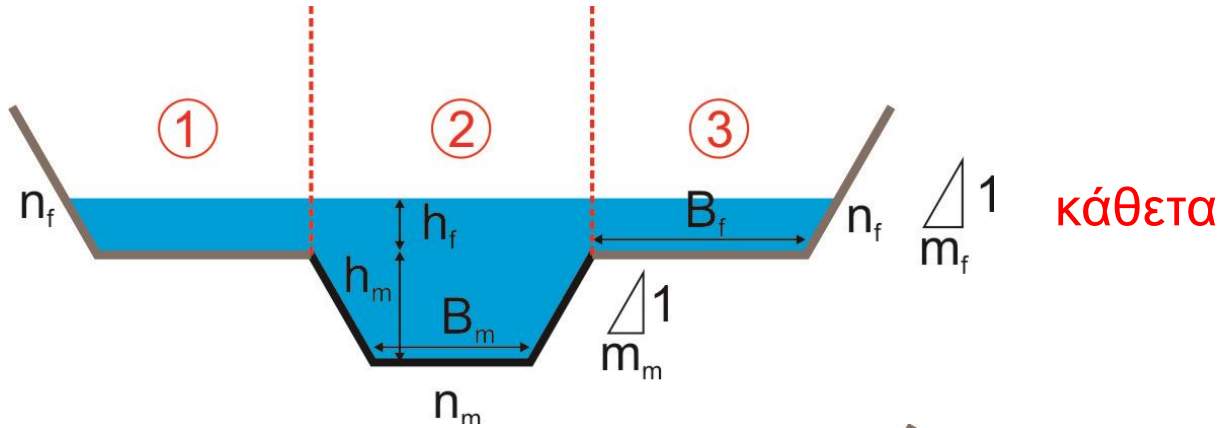


Επιμέρους τμήματα



$$Q_i = \frac{1}{n_i} A_i R_i^{2/3} S_o^{1/2}$$

Επιμέρους τμήματα



$$Q_i = \frac{1}{n_i} A_i R_i^{2/3} S_o^{1/2}$$

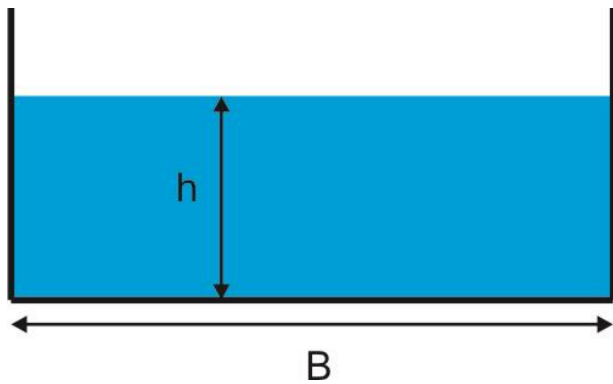
↓

$$Q = \sum_{i=1}^N Q_i$$

Εφαρμογή I

σχεδιασμός άκαμπτης διατομής

Εφαρμογή I

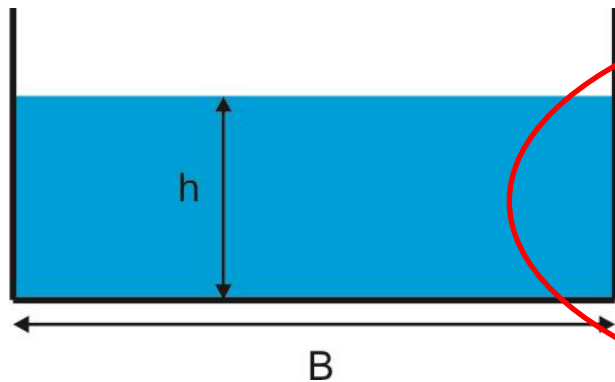


$$Q=100 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$S_0=1\text{‰}$$

Σκυρόδεμα

Εφαρμογή I

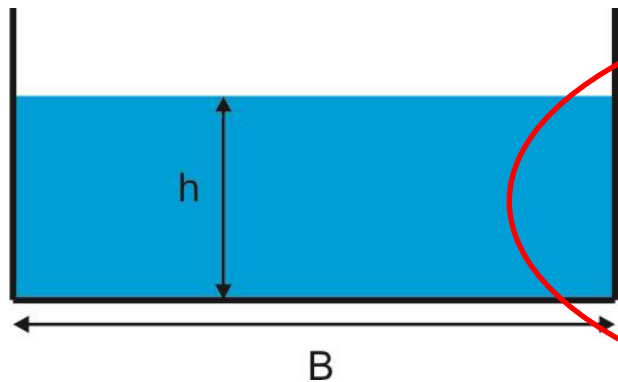


$$Q=100 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$S_0=1\text{‰}$$

$$\text{Σκυρόδεμα} \rightarrow n=0.016 \text{ s/m}^{1/3}$$

Εφαρμογή I



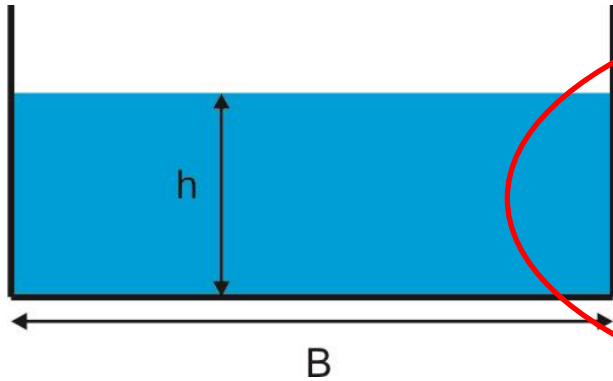
$$Q=100 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$S_0=1\text{‰}$$

$$\text{Σκυρόδεμα} \rightarrow n=0.016 \text{ s/m}^{1/3}$$

$$AR^{2/3} = \frac{nQ}{S_0^{1/2}} = 50.60$$

Εφαρμογή I



$$Q=100 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$S_0=1\text{‰}$$

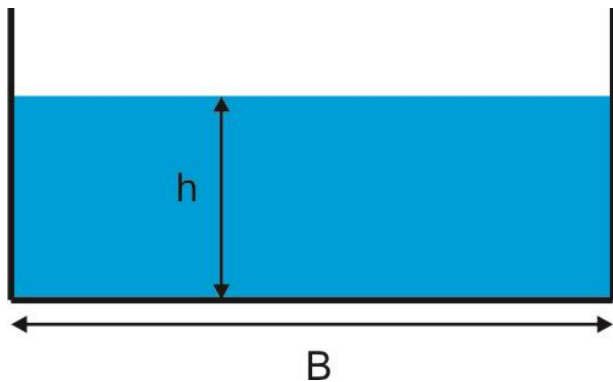
$$\text{Σκυρόδεμα} \rightarrow n=0.016 \text{ s/m}^{1/3}$$

$$AR^{2/3} = \frac{nQ}{S_0^{1/2}} = 50.60$$

$$B = 2h$$

$$AR^{2/3} = Bh \left(\frac{Bh}{B+2h} \right)^{2/3} = 2h^2 \left(\frac{2h^2}{4h} \right)^{2/3} \Rightarrow h = \frac{50.6^{3/8}}{2^{1/8}} = 4\text{m}$$

Εφαρμογή I



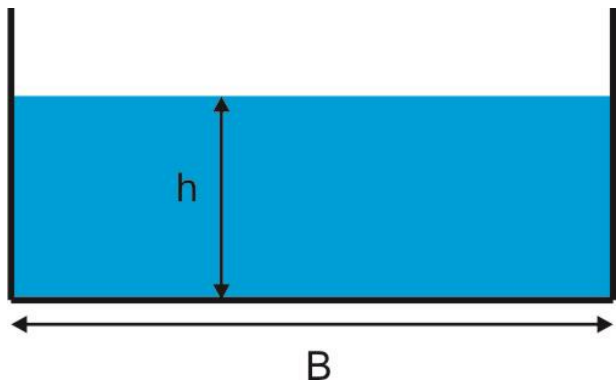
$$Q=100 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$h=4 \text{ m}$$

$$B=8 \text{ m}$$

$$A=32 \text{ m}^2$$

Εφαρμογή I



$$Q=100 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$h=4 \text{ m}$$

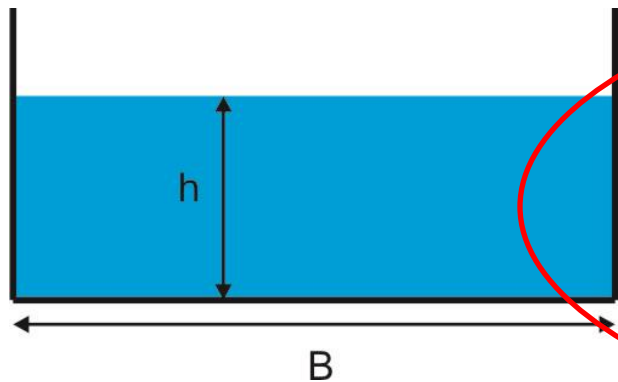
$$B=8 \text{ m}$$

$$A=32 \text{ m}^2$$

$$V = \frac{Q}{A}$$

$$V=3.13 \text{ m/s}$$

Εφαρμογή I



$$Q=100 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$h=4 \text{ m}$$

$$B=8 \text{ m}$$

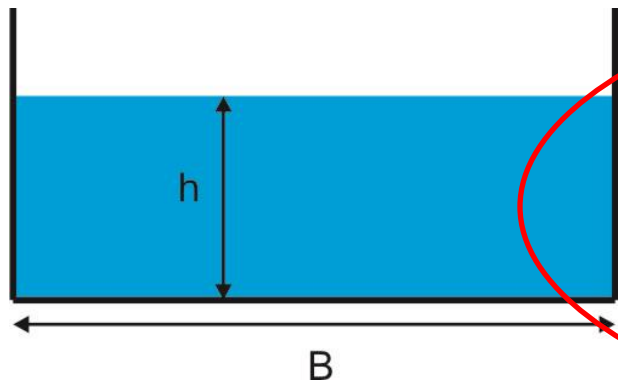
$$A=32 \text{ m}^2$$

$$V = Q / A$$

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}}$$

$$V=3.13 \text{ m/s} \rightarrow Fr=0.5$$

Εφαρμογή I



$$Q=100 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$h=4 \text{ m}$$

$$B=8 \text{ m}$$

$$A=32 \text{ m}^2$$

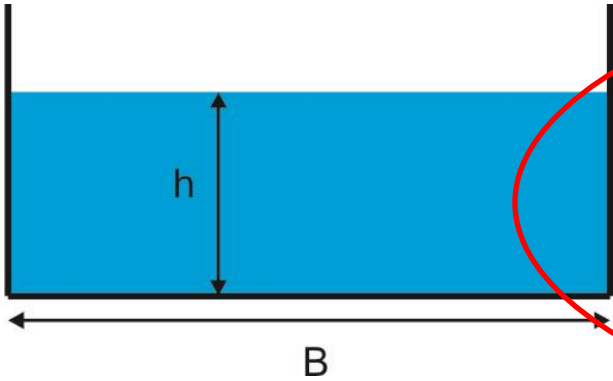
$$V = Q/A$$

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}}$$

$$V=3.13 \text{ m/s} \rightarrow Fr=0.5$$

$$F_b = \sqrt{kh}$$

Εφαρμογή I



$$Q=100 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$h=4 \text{ m}$$

$$B=8 \text{ m}$$

$$A=32 \text{ m}^2$$

$$V = Q/A$$

$$V=3.1 \text{ m/s}$$

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}}$$

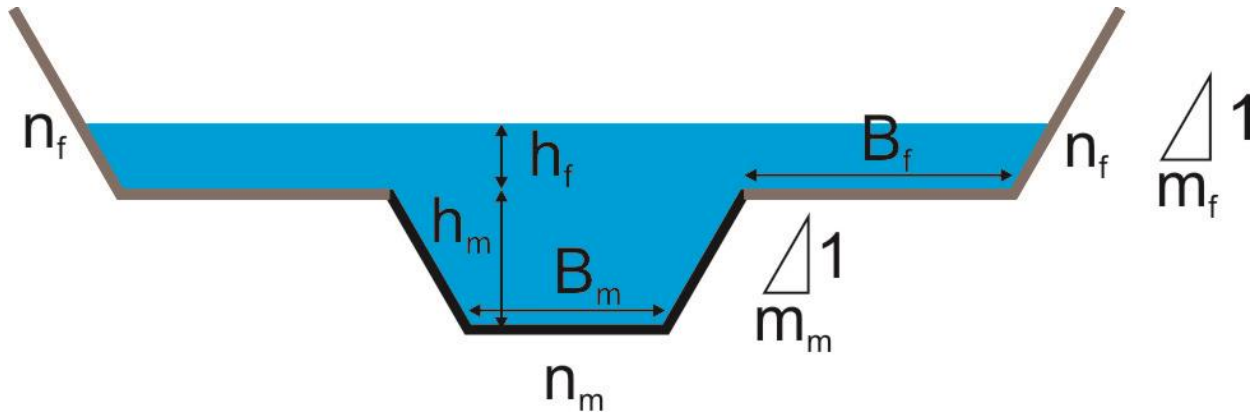
$$Fr=0.5$$

$$F_b = \sqrt{kh} \xrightarrow{k=1} F_b=2 \text{ m}$$

Εφαρμογή II

υπολογισμός παροχής σε σύνθετη διατομή

Εφαρμογή II



- $h_m = 4$ m
- $n_m = 0.02$ s/m^{1/3}
- $B_m = 10$ m
- $m_m = 1$
- $h_f = 2$ m
- $n_f = 0.05$ s/m^{1/3}
- $B_f = 15$ m
- $m_f = 1.5$
- $S = 1\text{‰}$

Σύγκριση μεθόδων

