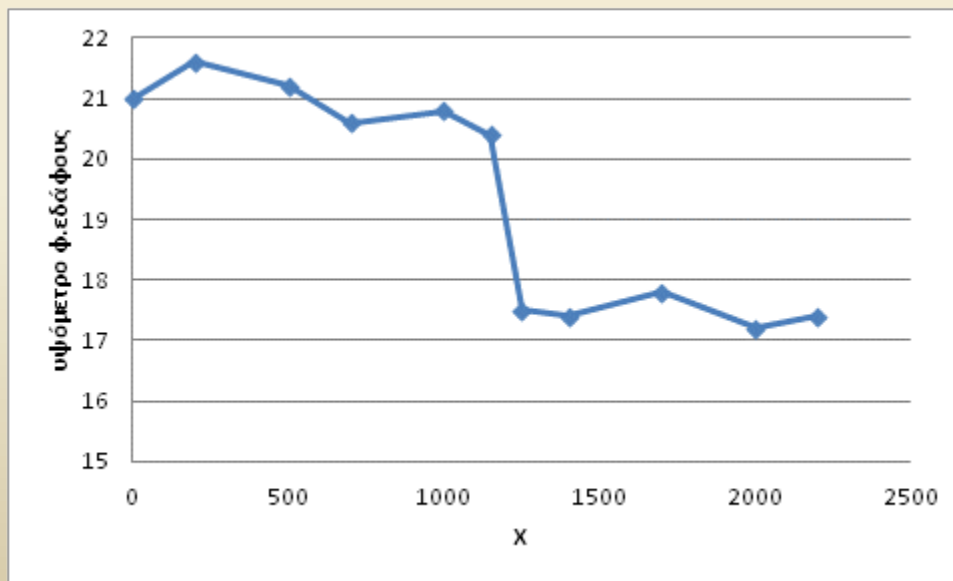


Οιμοιόμορφη ροή σε τεχνικά έργα

Δρ Μ. Σπηλιώτη

Γενική ιδέα

- Σκαρίφημα
- Σκελετοποίηση
- Διάταξη έργων: 3 περιοχές + υδροληψεία



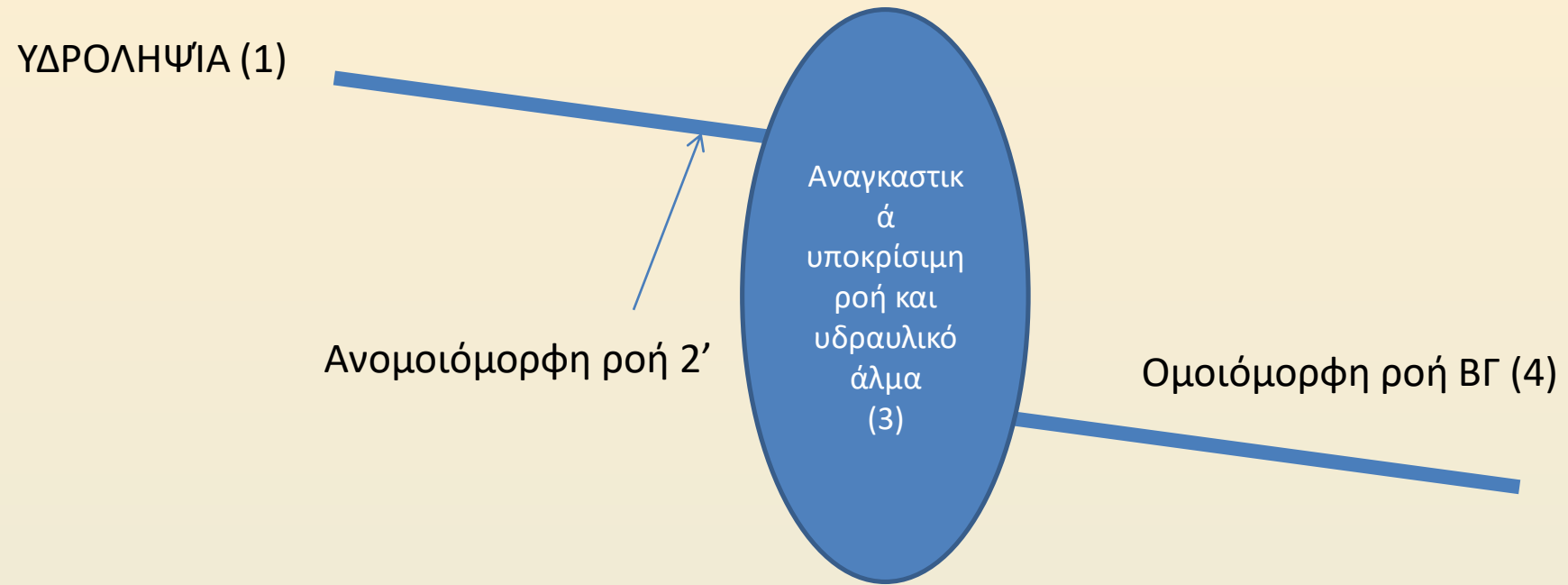
Ομοιόμορφη ροή AB (2)

ΥΔΡΟΛΗΨΙΑ (1)

Ανομοιόμορφη ροή 2'

Αναγκαστικ
ή
υποκρίσιμη
ροή και
υδραυλικό
άλμα
(3)

Ομοιόμορφη ροή ΒΓ (4)



Π1. ΥΠΟΔΕΙΓΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΔΙΩΡΥΓΑΣ ΠΡΟΣΑΓΩΓΗΣ ΑΡΔΕΥΤΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ

Δεδομένα:

Μία προσαγωγός αρδευτική διώρυγα ξεκινάει από μία δεξαμενή ύδατος (σημείο A , Χ.Θ. 0+000) και μετά από σχετικώς ευθύγραμμη διαδρομή καταλήγει στο σημείο Δ (Χ.Θ. 2+200), κεφαλή του Αρδευτικού δικτύου, όπου διακλαδίζεται σε διώρυγες κατωτέρας τάξεως.

Η διατομή της Διώρυγας θα είναι τραπεζοειδής με κλίση πρανών $m = 1.5$ και επενδυμένη με σκυρόδεμα. Το πλάτος στέψεως των αναχωμάτων της Διώρυγας θα είναι 3.0 m.

Η παροχή υπολογισμού της Διώρυγας είναι $Q = 30.5 \text{ m}^3/\text{sec}$.

Η κατά μήκος τομή του εδάφους στην οριζοντιογραφία που έχει επιλεγεί δίνεται στον Πίνακα Π1.1 που ακολουθεί.

Άλλα απαιτούμενα στοιχεία να επιλεγθούν από τη βιβλιογραφία.

Ζητούμενα

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα ζητείται:

- α) Να γίνει ο υδραυλικός υπολογισμός της διώρυγας σε συνθήκες ομοιόμορφης ροής.
- β) Να προσδιοριστεί η ελάχιστη απαιτούμενη στάθμη του ύδατος στη δεξαμενή τροφοδοσίας της Διώρυγας υπό συνθήκες ανομοιόμορφης ροής.
- γ) Να σχεδιαστούν η πλήρης κατά μήκος τομή της Διώρυγας και όσες τυπικές κατά πλάτος τομές αυτής θεωρούνται απαραίτητες.
- δ) Να υπολογισθούν υδραυλικά και να σχεδιασθούν με λεπτομέρεια τυχόν απαιτούμενα ειδικά υδραυλικά έργα στη Διώρυγα (υδροληψία, αναβαθμός, κ.τ.λ.).
- ε) Να συνταχθούν πίνακες προμέτρησης των απαιτούμενων εργασιών και υλικών για την κατασκευή της Διώρυγας.

Προϋποθέσεις:

Η ροή γενικώς πρέπει να είναι υποκρίσιμη με ταχύτητα $V \leq 3 \text{ m/s}$, εκτός της περιοχής των ειδικών έργων, όπου μπορούμε να έχουμε αριθμό Froude $F_r \geq 1$. Η κατά πλάτος τομή του εδάφους θεωρείται ότι είναι οριζόντια. Η καθ' ύψος τοποθέτηση του πυθμένα της διώρυγας θα γίνει με κριτήριο είτε την απαιτούμενη στάθμη ύδατος ή το ισοζύγιο εκσκαφών και επιχωμάτων κατά σημαντικά τμήματα της διώρυγας.

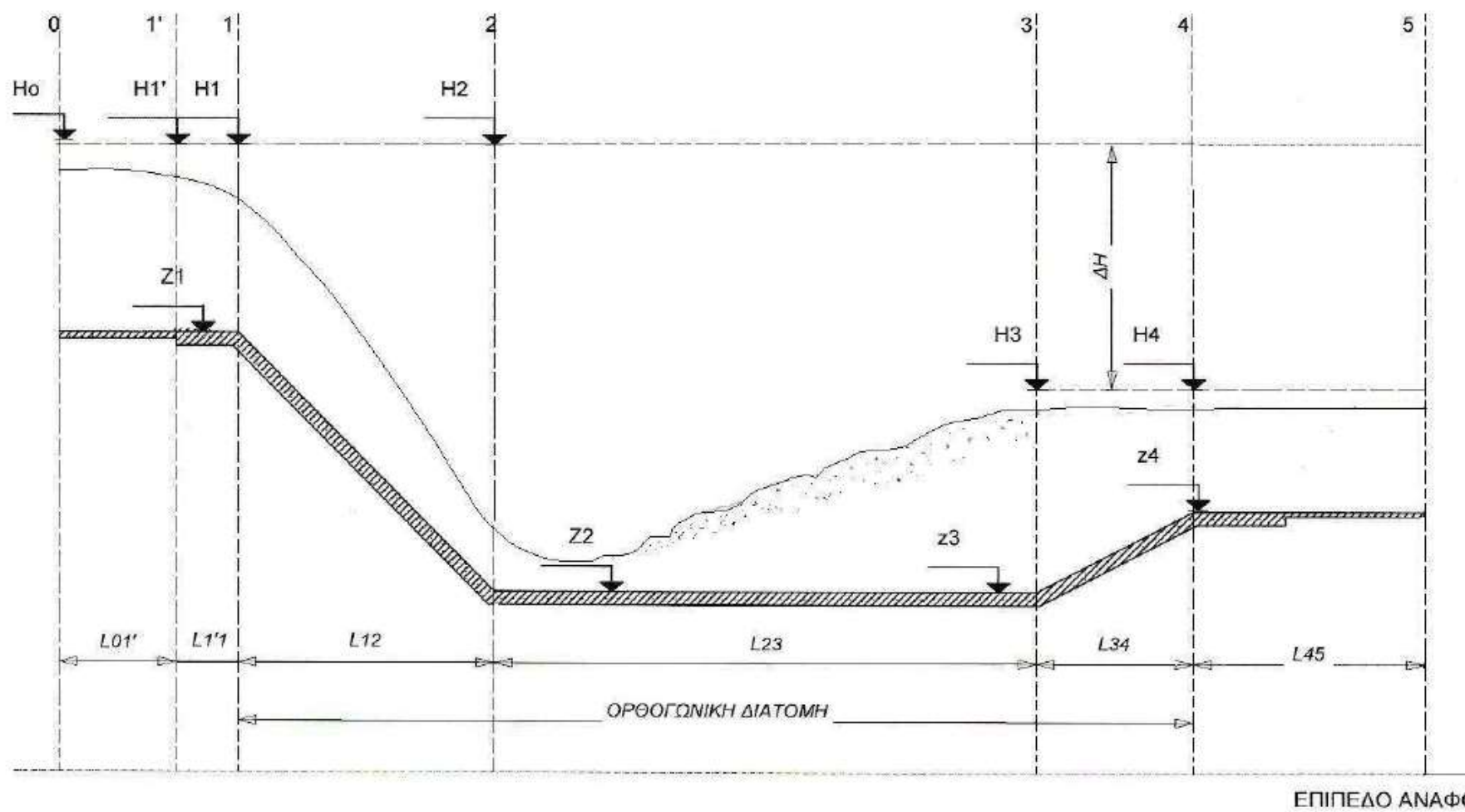
Η εισροή του ύδατος στη Διώρυγα ρυθμίζεται με επίπεδα θυροφράγματα στην θέση Α. Ανάλογα θυροφράγματα υφίστανται και στη θέση Δ για τον έλεγχο της ροής προς τις τροφοδοτούμενες Διώρυγες και τον χωρισμό της παροχής σε δύο ίσα μέρη. Ακόμη θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η ελάχιστη απαιτούμενη στάθμη ύδατος στη θέση Δ είναι ίση με το υψόμετρο εδάφους +0.50 m.

Τέλος τα ειδικά έργα (υδροληψίες, αναβαθμοί, υδατογέφυρες κ.λ.π.) διαμορφώνονται σε ορθογωνική διατομή μέσω μεταβατικών τμημάτων με αναλογία προσαρμογής 1:5.

Πίνακας ΠΙ.1

Στοιχεία κατά μήκος τομής του εδάφους από τη διατομή Α μέχρι Δ

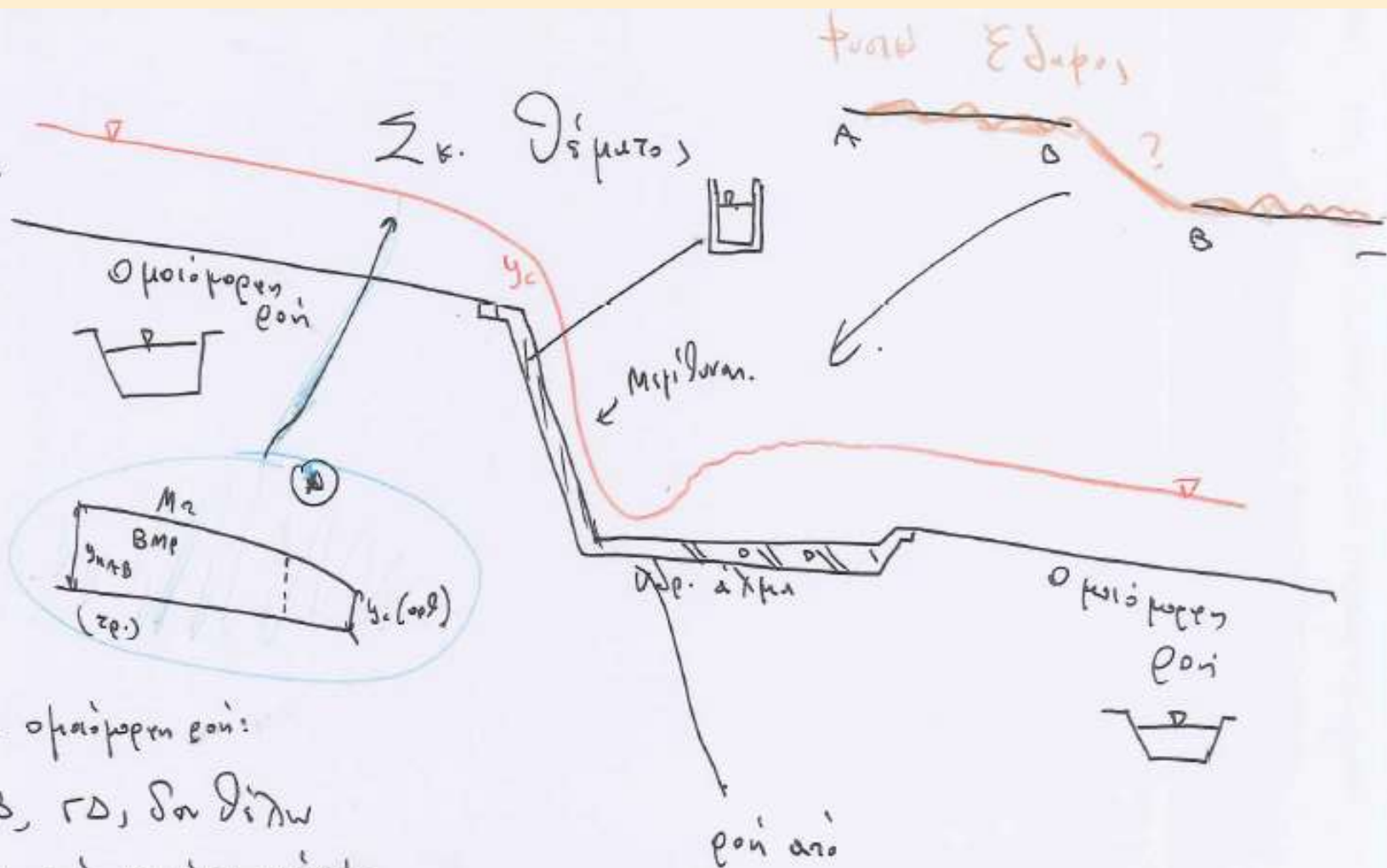
α/α	Διατομή	Χ.Θ.	Υψόμ. εδάφους
1	A	0+00	21.00
2		0+200	21.60
3		0+500	21.20
4		0+700	20.60
5		1+00	20.80
6	B	1+150	20.40
7	Γ	1+250	17.50
8		1+400	17.40
9		1+700	17.80
10		2+00	17.20
11	Δ	2+200	17.40



Μεταβατικό τμήμα , ΒΓ

Σκαρίφημα

Udsk. (15)
B. 1. 1. 1. 1. 1.
1. 1. 1. 1. 1.
1. 1. 1. 1. 1.
1. 1. 1. 1. 1.



Σ ομοίωσεν γὰρ:

AB, ΓΔ, Σα βιγδω

Η ροή να είναι μέγιστη

Θέλω να είναι "αποφασιστικό"

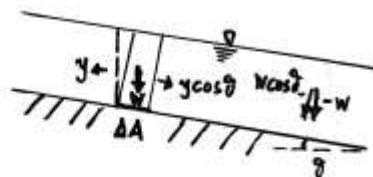
Υποκρίση.

Υπερκρίστη σε

Unkriation -

—Υδρευτική έλξη, προσχώρηση, καταπονή, ενέργεια

Παράλληλη ροή σε κεκλιμένο αγωγό



w: κατακόρυφη δύναμη βάρους

- Όγκος νερού: $\Delta A \cdot y \cos \theta$
- Βάρος νερού: $w = \rho g \cdot \Delta A \cdot y \cos \theta$
- Συνιστώσα του βάρους κάθετη προς τον πυθμένα:
 $w \cos \theta = (\rho g \cdot \Delta A \cdot y \cos \theta) \cos \theta$
- Πίεση στον πυθμένα (επιφάνεια ΔA) λόγω του υπερκείμενου βάρους νερού:

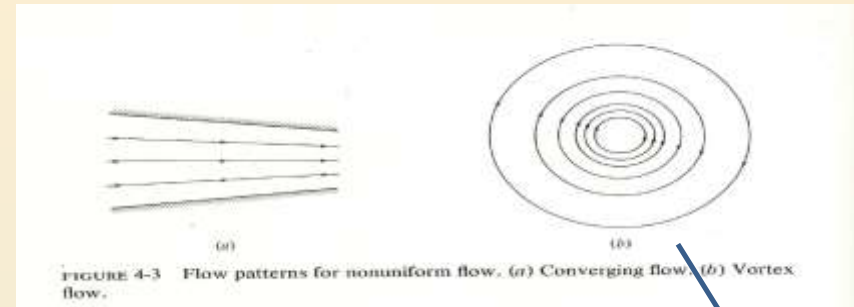
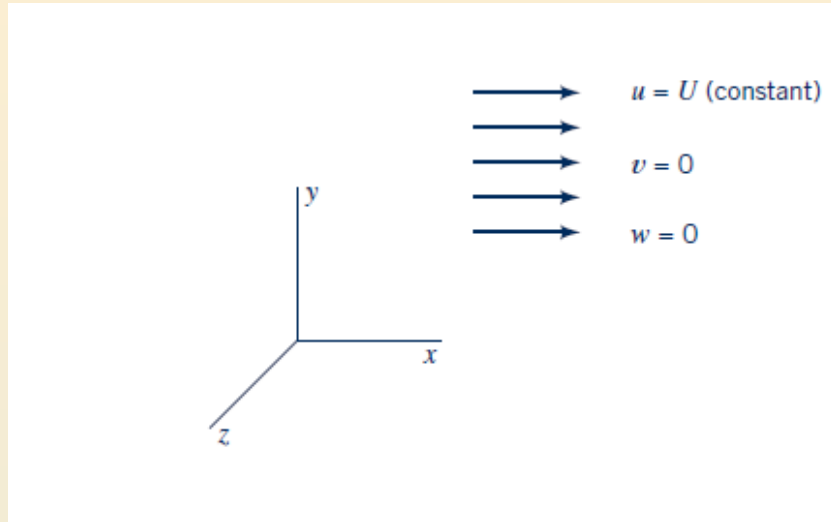
$$p = \frac{(\rho g \cdot \Delta A \cdot y \cos \theta) \cos \theta}{\Delta A} = \rho g y \cos^2 \theta$$

$$p = \rho g y \cos^2 \theta$$

- Όταν θ μικρή $\Rightarrow \cos \theta \approx 1.0 \Rightarrow$ $p = \rho g y$

Βασικές έννοιες

Ομοιόμορφη ροή

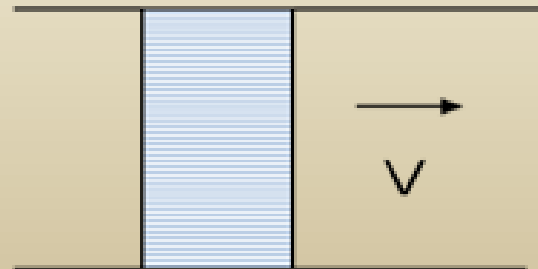


Μη ομοιόμορφη ροή

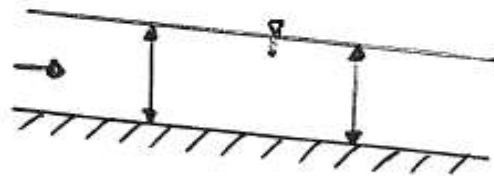
Ομοιόμορφη ροή: όταν η μεταβολή της ταχύτητας ίδια σε οποιαδήποτε επιλεγθείσα διεύθυνση, s

$$\frac{\partial U}{\partial s} = 0$$

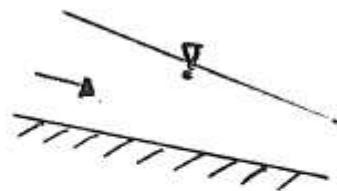
Στους αγωγούς (επαφή με στερεά τοιχώματα) μπορεί να επεκταθεί θεωρώντας μόνο αν η **μέση ταχύτητα** για ίδιες διατομές παραμένει η ίδια .
(Streeter et al., 2010)



Ομοιόμορφη : Ταχύτητα του νερού σταθερή,
 Βάθος νερού σταθερό
 από διατομή σε διατομή $\Rightarrow$
 Επιφάνεια νερού παράλληλη προς τον
 πυθμένα



Ανομοιόμορφη : Μεταβαλλόμενο βάθος από διατομή
 σε διατομή $\Rightarrow$
 Επιφάνεια νερού μη παράλληλη προς
 τον πυθμένα



Βαθμιαία μεταβολή

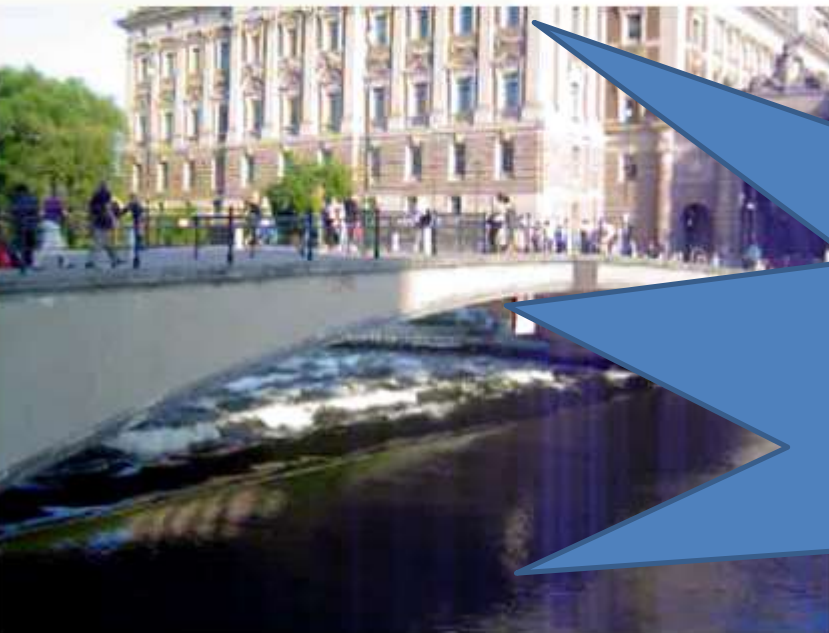
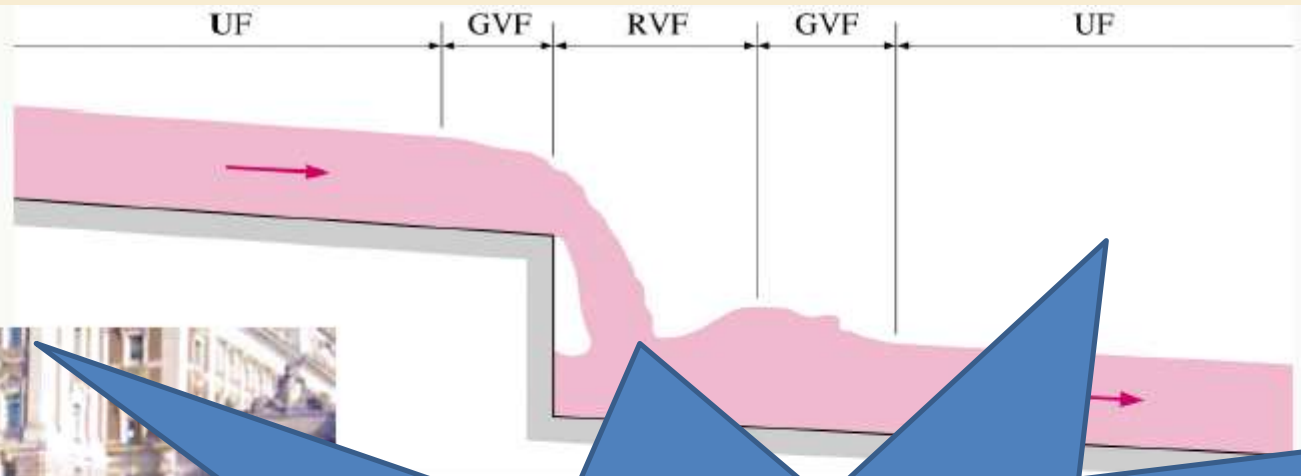


Ταχεία (απότομη) μεταβολή

Στο παρακάτω σχήμα λαμβάνει χώρα:

1. Ομοιόμορφη ροή
2. Βαθμιαία μεταβαλλόμενη ροή
3. Ταχέως μεταβαλλόμενη ροή
4. Βαθμιαία μεταβαλλόμενη ροή
5. Ομοιόμορφη ροή

Η ροή είναι μόνιμη



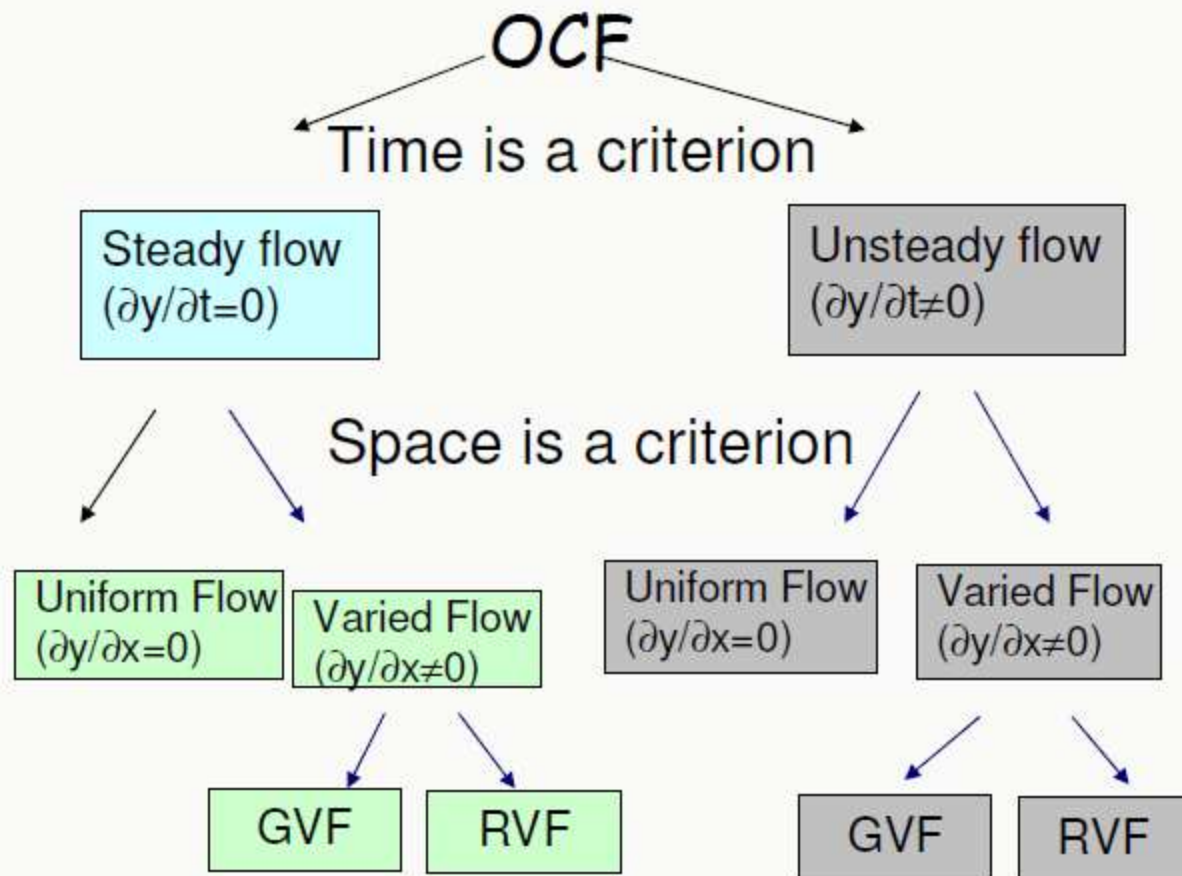
Ομοιόμορφη ροή: σταθερό βάθος ροής
(άρα και ταχύτητα)

Βραδέως μεταβαλλόμενη ροή:
χαρακτηρίζεται από αργή μεταβολή προφίλ
(«ημί-ομοιόμορφη ροή»)

Ταχέως μεταβαλλόμενο προφίλ της
ελεύθερης επιφανείας στη ταχέως
μεταβαλλόμενη ροή

Types of Flow

- Criterion: Change in flow depth with respect to time and space



Σχηματικά, η διάκριση των ειδών ροής φαίνεται στο παρακάτω Διάγραμμα:

ΣΤΑΘΕΡΗ		ΑΣΤΑΘΗΣ	
ΣΤΑΘΕΡΗ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ		ΑΣΤΑΘΗΣ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ (σπάνια)	
ΣΤΑΘΕΡΗ ΑΝΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ		ΑΣΤΑΘΗΣ ΑΝΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ	
ΒΑΘΜΙΑΙΑ ΜΕΤΑΒΑΛΛΟ- ΜΕΝΗ	ΑΠΟΤΟΜΑ ΜΕΤΑΒΑΛΛΟ- ΜΕΝΗ	ΒΑΘΜΙΑΙΑ ΜΕΤΑΒΑΛΛΟ- ΜΕΝΗ	ΑΠΟΤΟΜΑ ΜΕΤΑΒΑΛΛΟ- ΜΕΝΗ

Επίλυση ομοιόμορφης ροής

- Με βάση την κλίση $S_0 = 0.0007$.
- Ομοιόμορφη ροή: Σταθερό βάθος ροής
- Ισορροπία οριζόντιας συνιστώσας του βάρους με τη δύναμη τριβής: Manning
- Εφαρμοσμένο μάθημα: Επίλυση με πίνακες
- Έλεγχος: ροή υποκρίσιμη

Προσέγγιση (Μόνιμη) Ομοιόμορφης ροής

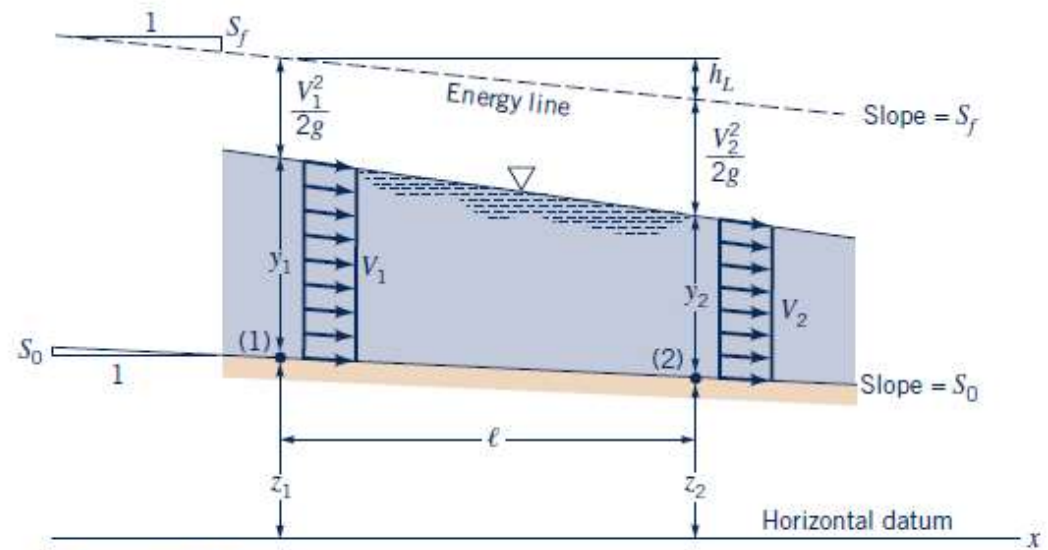
Προϋποθέσεις

- Ισορροπία δυνάμεων
- Μη μεταβολή της διατομής
- Μη μεταβολή της τραχύτητας των στερεών ορίων



Uniform flow

Ομοιόμορφη



■ **Figure 10.6** Typical open-channel geometry.

ανομοιόμορφη ροή

Ομοιόμορφη ροή, ανοικτοί αγωγοί

Σύμφωνα με τον ορισμό η ροή είναι ομοιόμορφη όταν το διάνυσμα της ταχύτητας είναι σταθερό κατά μέγεθος και διεύθυνση σε όλο το μήκος του αγωγού. Κατά συνέπεια ισχύει : $dV/dx = 0$. Η ομοιόμορφη ροή



$$\left. \begin{aligned} \frac{dQ}{dx} &= 0 \\ \text{Αλλά : } \frac{dQ}{dx} &= \frac{d(VA)}{dx} = V \frac{dA}{dx} + A \frac{dV}{dx} = V \frac{dA}{dx} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{dA}{dx} = 0$$

Για σταθερή διατομή αυτό ισχύει όταν:

$$\frac{dA}{dx} = \frac{dA}{dy} \frac{dy}{dx} = 0$$

και η εξίσωση συνέχειας εκφυλίζεται σε :


$$\frac{dy}{dx} = 0 \Rightarrow \boxed{y = y_0} = \text{σταθερό}$$

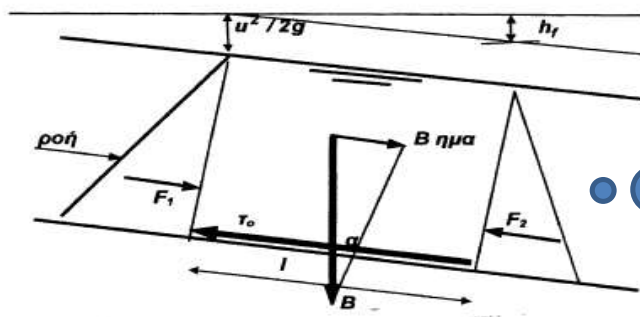
Το y_0 ονομάζεται ομοιόμορφο ή κανονικό βάθος ροής.

Προσέγγιση (Μόνιμη) Ομοιόμορφης ροής

Προϋποθέσεις

- Ισορροπία δυνάμεων
- Μη μεταβολή της διατομής
- Μη μεταβολή της τραχύτητας των στερεών ορίων

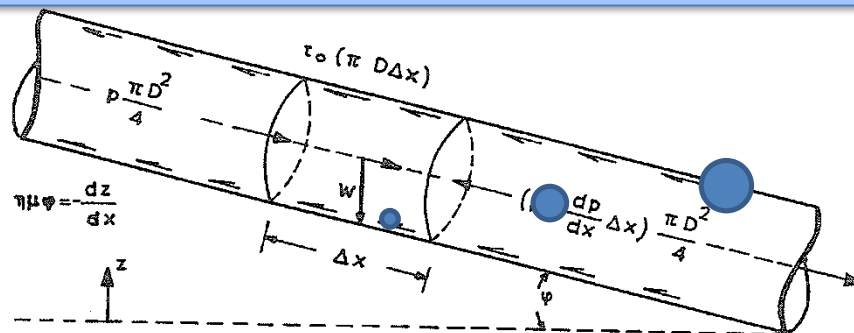
Μόνιμη Ομοιόμορφη ροή, ανοικτοί αγωγοί: Ομοιόμορφη ροή όταν το ύψος ροής παραμένει σταθερό που είναι ταυτόσημο με τη θεώρηση σταθερής ταχύτητας $\rightarrow$ β' νόμος του Νεύτωνα $\rightarrow$ άθροισμα δυνάμεων μηδέν, ισορροπία μεταξύ της οριζόντιας συνιστώσας του βάρους με τη δύναμη αντίστασης στη ροή λόγω τριβής



Σχήμα 4.1 Όγκος ελέγχου διά την απόδειξη της εξισώσεως της ομοιόμορφου ροής

Εφόσον το ύψος ροής παραμένει το ίδιο (κανονικό βάθος ροής) και για υδροστατική κατανομή της πίεσης, οι δυνάμεις πίεσης στον όγκο ελέγχου αλληλοεξουδετερώνονται

Μόνιμη Ομοιόμορφη ροή, κλειστοί αγωγοί: Διατήρηση της ορμής σε κυκλικό αγωγό υπό πίεση με μόνιμη ροή, σταθερή διατομή $\rightarrow$ **σταθερή ταχύτητα (άρα για σταθερή διατομή έχω ομοιόμορφη ροή)**, β' νόμος του Νεύτωνα $\rightarrow$ άθροισμα δυνάμεων μηδέν, ισορροπία μεταξύ των δυνάμεων πίεσεως και βάρους με τη δύναμη αντίστασης λόγω τριβής (για οριζόντιο αγωγό ισορροπία μεταξύ δυνάμεων τριβής και πίεσεως)



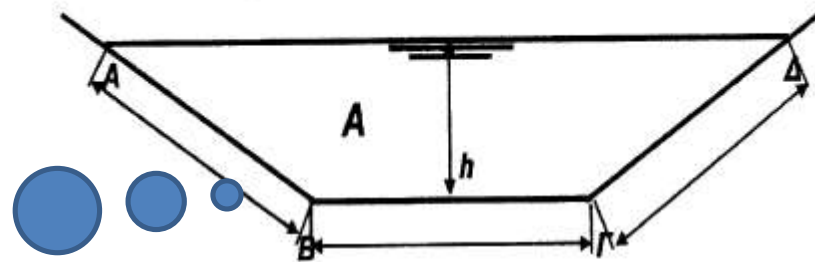
Απειροστός όγκος ελέγχου, η πίεση σταθερή σε όλο το ύψος της διατομής, διαφέρει κατά τον άξονα της ροής από θέση σε θέση

Διατμητική τάση, ανοικτή αγωγοί, ομοιόμορφη ροή

Εάν η μέση διατμητική τάσις η επενεργούσα εις τα τοιχώματα είναι $\tau_o (N/m^2)$, τότε η ολική δύναμις $F_o (N)$ δίδεται υπό του γινομένου τ_o επί του εμβαδού της επιφανείας επί της οποίας ενεργεί, δηλαδή,

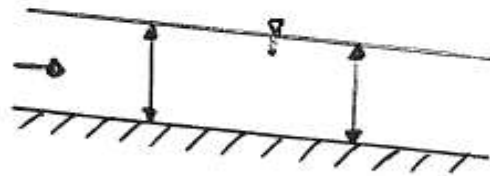
$$F_o = \tau_o P l \quad (4.1)$$

Σχόλιο:
Όλη η
βρεχόμενη
περίμετρος
συνυπολογίζε-
ται κατά τον
προσδιορισμό
της δύναμης
λόγο τριβών

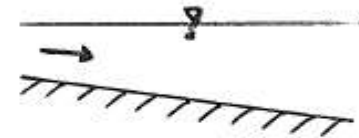
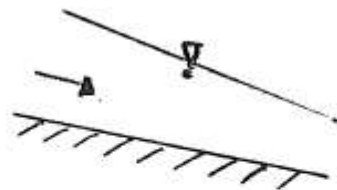


Σχήμα 4.2 Υγρά διατομή A , βρεχόμενη περίμετρος P και υδραυλική ακτίς R

Ομοιόμορφη : Ταχύτητα του νερού σταθερή,
 Βάθος νερού σταθερό
 από διατομή σε διατομή $\Rightarrow$
 Επιφάνεια νερού παράλληλη προς τον
 πυθμένα



Ανομοιόμορφη : Μεταβαλλόμενο βάθος από διατομή
 σε διατομή $\Rightarrow$
 Επιφάνεια νερού μη παράλληλη προς
 τον πυθμένα



Βαθμιαία μεταβολή



Ταχεία (απότομη) μεταβολή

Ακόμη και αν η
 ροή είναι
 μόνιμη υπάρχει
 συνισταμένη
 δύναμη που
 προκαλεί
 χωρική
 διαφοροποίηση
 της ροής

3. ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ ΡΟΗ

- Κινούσα δύναμη: συνιστώσα της βαρύτητας κατά τη διεύθυνση του άξονα του αγωγού
- Αντίθετες δυνάμεις: τριβές στον πυθμένα και στην ελεύθερη επιφάνεια του νερού με τον αέρα
- Όταν ο αγωγός είναι πρισματικός και αρκούντως μεγάλου μήκους και η παροχή είναι σταθερή, τότε η κινούσα δύναμη εξισορροπείται από τις αντιτάξεις και δεν υπάρχει επιτάχυνση σε καμία διατομή του αγωγού.
- Τα υδραυλικά στοιχεία της ροής (βάθος και μέση ταχύτητα) παραμένουν σταθερά κατά μήκος του αγωγού $\Rightarrow$ ομοιόμορφη ροή, κανονικό βάθος ροής

Μεταβολή της γραμμής ενέργειας σε ομοιόμορφη ροή σε ανοικτούς αγωγούς

Ομοιόμορφη ροή:

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

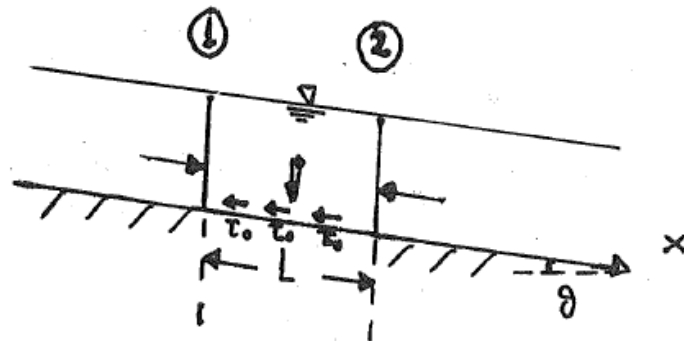
Παραγωγή όρων ενέργειας κατά τη διεύθυνση της ροής, x

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{V^2}{2g} + z + y \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{V^2}{2g} \right) + \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial x} = \frac{\partial z}{\partial x} = -S_0 < 0$$

Ομοιόμορφη ροή $\rightarrow$ κλίση γραμμής ενέργειας = κλίση πυθμένα = κλίση
ελεύθερης επιφάνειας

Εξίσωση Manning: από ισορροπία δυνάμεων και...

Εξισώσεις για την ταχύτητα



- Ισορροπία δυνάμεων κατά τον άξονα x
- Οι υδροστατικές δυνάμεις αλληλοαναιρούνται

$$mg \sin \theta = \tau_o L P \Rightarrow \tau_o = mg \sin \theta \frac{1}{LP} = mg S_o \frac{R}{LA} = \frac{m}{LA} g R S_o$$

$$\tau_o = \rho g R S_o$$

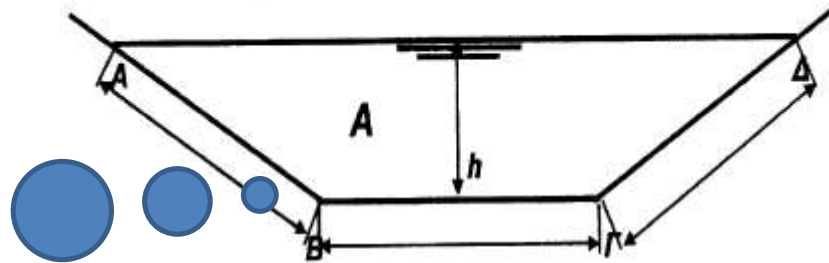
$$\sin \theta \approx \tan \theta = S_o$$

Διατμητική τάση, ανοικτή αγωγοί, ομοιόμορφη ροή

Εάν η μέση διατμητική τάσις η επενεργούσα εις τα τοιχώματα είναι $\tau_o (N/m^2)$, τότε η ολική δύναμις $F_o (N)$ δίδεται υπό του γινομένου τ_o επί του εμβαδού της επιφανείας επί της οποίας ενεργεί, δηλαδή,

$$F_o = \tau_o P l \quad (4.1)$$

Σχόλιο:
Όλη η βρεχόμενη
περίμετρος
συνυπολογίζεται
κατά τον
προσδιορισμό
της δύναμης
λόγο τριβών



Σχήμα 4.2 Υγρά διατομή A , βρεχόμενη περίμετρος P και υδραυλική ακτίς R

Διατμητική τάση πυθμένα τ_0

Συνθήκη ισορροπίας δυνάμεων :

$$W_{\eta\mu\alpha} = \tau_0 P \ell$$

$$A \ell \rho g \eta\mu\alpha = \tau_0 P \ell$$

$$\tau_0 = \frac{A}{P} \rho g \eta\mu\alpha$$

$$\eta\mu\alpha = \frac{h_f}{\ell} = S_0$$

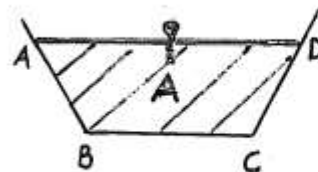
$$\tau_0 = \frac{A}{P} \rho g S_0$$

$$\tau_0 = \rho g R S_0$$

P : βρεχομένη περίμετρος

A : υγρή διατομή (επιφάνεια)

$$R = \frac{A}{P} \Rightarrow \text{υδραυλική ακτίνα}$$



$$P = (AB) + (BC) + (CD)$$

Συνδυασμός σχέσεων για τον προσδιορισμό της ταχύτητας

- Ισχύει:

$$\tau_0 = \frac{1}{2} \left(\frac{f}{4} \right) \rho V^2$$

Διατμητική τάση στο πυθμένα ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητας

- Επομένως

$$\rho g R S_0 = \frac{1}{2} \left(\frac{f}{4} \right) \rho V^2 \Leftrightarrow$$

$$V = \sqrt{\frac{8}{f} g R S_0} = \left(\sqrt{\frac{8}{f} g} \cdot \right) R^{1/2} S_0^{1/2}$$

Darcy Weisbach ομοιόμορφη ροή ανοικτοί αγωγοί

Ως προς την ταχύτητα

$$V = \sqrt{\frac{8}{f} g R S_0} = \left(\sqrt{\frac{8}{f} g} \cdot \right) R^{1/2} S_0^{1/2}$$

Απώλειες ενέργειας $S_0 = S_f = h_f / L$

$$\rho g R S_0 = \frac{1}{2} \left(\frac{f}{4} \right) \rho V^2 \Leftrightarrow$$

$$S_0 = f \frac{1}{4R} \frac{V^2}{2g} \rightarrow S_0 \cdot L = f \frac{1}{4R} \frac{V^2}{2g} \cdot L \rightarrow$$

$$h_f = f \frac{L}{4R} \frac{V^2}{2g}$$

***συντελεστής τριβής f σε ανοικτούς
αγωγούς***

συντελεστής τριβής f σε ανοικτούς αγωγούς

Σχήμα κοντά σε κυκλικούς αγωγούς

- $D=4R$
- Χρήση εξίσωσης Coolebrook =-White:
- $Re=4R V/\nu, \quad k/(4R)$
- $S_0=S_f$

Πιο γενικά για τεχνικά έργα

- Χρήση της εξίσωσης Coolebrook =-White με διορθωτικούς συντελεστές
- (βλπ. Task force ASCE)

Χρήση της εξίσωσης Coolebrook =- White με διορθωτικούς συντελεστές

Table 1. Values of Constants for Colebrook–White-Type Formula for Steady Uniform Flow in Open Channels with Rigid Impervious Boundaries (from Yen 1991)

Channel geometry	Reference	K_1	K_2	K_3	Remarks
Full circular pipe	Colebrook (1939)	2.0	14.83	2.52	
Wide channel	Keulegan (1938)	2.03	11.09	3.41	
Wide channel	Rouse (1946, p. 214)	2.03	10.95	1.70	
Wide channel	Thijssse (1949)	2.03	12.2	3.033	
Wide channel	Sayre and Albertson (1961)	2.14	8.888	7.17	
Wide channel	Henderson (1966)	2.0	12.0	2.5	
Wide channel	Graf (1971, p. 305)	2.0	12.9	2.77	
Wide channel	Reinius (1961)	2.0	12.4	3.4	
Rectangular	Reinius (1961)	2.0	14.4	2.9	Width/depth = 4
Rectangular	Reinius (1961)	2.0	14.8	2.8	Width/depth = 2
Rectangular	Zegzhda (1938)	2.0	11.55	0	Dense sand

Yen (2001)

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -K_1 \log \left(\frac{k_s}{K_2 R} + \frac{K_3}{4R\sqrt{f}} \right)$$

συντελεστής τριβής f σε ανοικτούς αγωγούς

Κανάλια με μεγάλες διαστάσεις

- $Re = 4R V/\nu$, $k/(4R)$
- Έχουν μεγάλες τιμές -> υδραυλικά τραχεία ροή -> δεν εξαρτάται ο f από τον αριθμό Reynolds αλλά στην πραγματικότητα ο συντελεστής τριβής δεν είναι σταθερός, εξαρτάται από την υδραυλική ακτίνα, πειραματικές σχέσεις

Σύνθετες διατομές

- Μεταβλητή τραχύτητα-----
-> χρήση εξίσωσης Manning προς απλούστευση

Π.χ. (ASCE, 1963) $\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log \frac{12R}{k_s}$

Δυσκολίες

- Δεν υπάρχει η απλότητα των κυκλικών αγωγών, δύσκολη η γενίκευση των συμπερασμάτων στα φυσικά ποτάμια
- Δεν υπάρχει μελετητική εμπειρία (χρησιμοποιείτε η εξίσωση του Manning)
- Μπορεί η ισοδύναμη τραχύτητα να είναι πολύ μεγάλη π.χ. για λιθορριπή με χορτάρι $k_s=300 \text{ mm}$
- Σε φυσικά ποτάμια η ισοδύναμη τραχύτητα μπορεί να υπολογιστεί με βάση τη κοκκομετρία
- Συντελεστής τριβής στον κόκκο αλλά και στο σχηματισμό του πυθμένα (θέμα ποτάμιας υδραυλικής)

Εξίσωση Chezy

- Ταχύτητα ροής:

$$V = C \cdot R^{1/2} \cdot S_0^{1/2}, \quad \text{όπου} \left(\sqrt{\frac{8}{f}} g \right)^{\text{op}} = C \quad \left(\sqrt{\frac{8}{f}} g \cdot \right)$$

C : συντελεστής του Chezy

f = συνάρτ. $(Re, \frac{\kappa}{R})$

C = συνάρτ. $(Re, \frac{\kappa}{R})$

κ : τραχύτητα των τοιχωμάτων

$\frac{\kappa}{R}$: σχετική τραχύτητα

Chezy → Manning (εφαρμογή σε ασκήσεις)

- Ο Manning, 1891 πρότεινε για την σταθερά του Chezy:

$$\frac{R^{1/6}}{n} = C$$

- Οπότε η εξίσωση του Chezy θα γίνει τότε:

Εξίσωση Manning

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

$$C = \frac{R^{1/6}}{n}$$

n : συντελεστής Manning $\left[\frac{T}{L^{1/3}} \right]$

(από πίνακες ανάλογα με την τραχύτητα)

$K_{ST} = \frac{1}{n}$ (γερμανική βιβλιογραφία)

Λόγω της συσσωρευμένης εμπειρίας όμως, περισσότερο δημοφιλής είναι η απλοποιημένη σχέση, η οποία αποδίδεται στον R. Manning και γι' αυτό ονομάζεται και τύπος του Manning:

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S_0^{1/2} \quad (3.9)$$

όπου: n = ο συντελεστής τραχύτητας γνωστός ως συντελεστής Manning, με διαστάσεις $(s/m^{1/3})$, η οποίος αποτελεί έκφραση της τραχύτητας του στερεού ορίου και συνδέεται με το συντελεστή f των Darcy - Weisbach με τη σχέση:

$$f = (8gn^2)/R^{1/3} \quad (3.10)$$

Οι τιμές του συντελεστή n λαμβάνονται από πίνακες που έχουν δημοσιευθεί σε πληθώρα βιβλίων. Ο Πίνακας 3.2 παρουσιάζει τις τιμές του συντελεστή n για μια σειρά υλικά από τα οποία αποτελείται ο ανοικτός αγωγός. Σημειώνεται ότι επειδή ο συντελεστής n δεν είναι αδιάστατος αριθμός, κατά τη χρήση του τύπου Manning η ταχύτητα πρέπει να εκφράζεται σε m/s, η υδραυλική ακτίνα σε m και η παροχή σε m³/s.

Το γεγονός ότι εδώ η ροή πραγματοποιείται με ελεύθερη επιφάνεια έχει ως αποτέλεσμα η υγρή διατομή, A , να εξαρτάται εκτός από τη γεωμετρία της διατομής και από τη θέση της ελεύθερης επιφάνειας, δηλαδή σε σχέση με τη ροή σε κλειστούς αγωγούς υπό πίεση υπάρχει ένα επιπλέον άγνωστο μέγεθος που πρέπει να υπολογιστεί.

Ο υπολογισμός του ομοιομόρφου βάθους, y_0 , γίνεται με χρήση της εξίσωσης Manning και της εξίσωσης συνέχειας, άρα:

$$Q = (1/n) AR^{2/3} S_0^{1/2} \quad (3.11)$$

Αν είναι γνωστά: η παροχή Q (m³/s), η γεωμετρία του αγωγού, ο συντελεστής n και η κατά μήκος κλίση S_0 , τότε:

$$AR^{2/3} = (nQ)/S_0^{1/2} = \text{γνωστό} \quad (3.12)$$

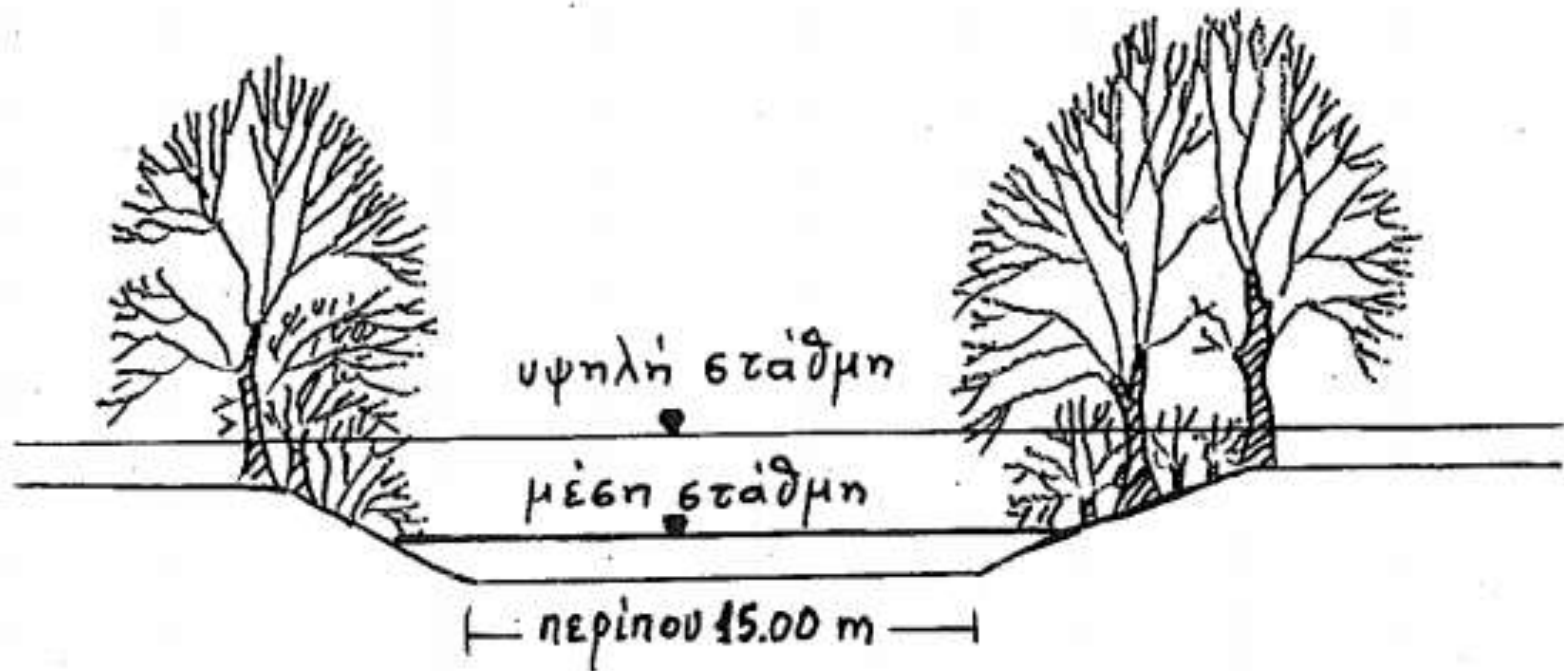
Πίν. 3.2: Συντελεστές Manning n για διάφορα υλικά

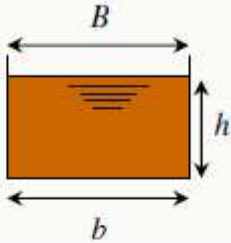
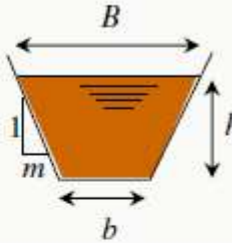
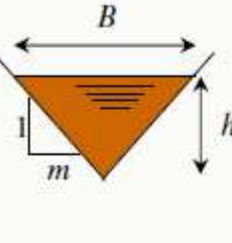
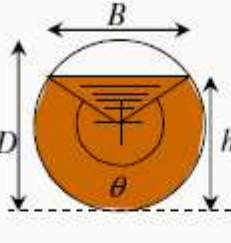
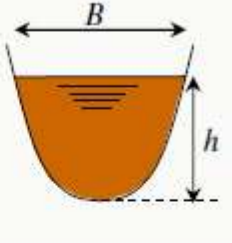
Μέταλλο λείο	0.011 - 0.015
Μέταλλο, αυλακωτό	0.023 - 0.025
Ξύλο, κατεργασμένο	0.010 - 0.015
Ξύλο, ακατέργαστο	0.011 - 0.015
Τσιμέντο λείο	0.010 - 0.013
Σκυρόδεμα	0.014 - 0.016
Τσιμεντοχάλικο	0.017 - 0.030
Γρασίδι	$0 > 0.020$

- Η διπλή τραπεζοειδής διατομή διαιρείται σε κατακόρυφες λωρίδες. Η παροχή υπολογίζεται χωριστά σε κάθε λωρίδα.
- Για επενδεδυμένες διώρυγες κατασκευασμένες στο πεδίο:
 $n = 0.014 - 0.016$
- Για προκατασκευασμένες διώρυγες με σχετικά λείες επιφάνειες:
 $n = 0.012$
- Για διώρυγες επενδεδυμένες με ευματοκιβώτια:
 $n = 0.025 - 0.030 \quad (R < 1.5 \text{ m})$
 $n = 0.025 \quad (R > 1.5 \text{ m})$

Μεταβλητό n

Φυτοκάλυψη πρανών και οχθών ενός ποταμού



	<i>rectangular</i>	<i>trapezoidal</i>	<i>triangular</i>	<i>circular</i>	<i>parabolic</i>
					
<i>flow area</i> A	bh	$(b + mh)h$	mh^2	$\frac{1}{8}(\theta - \sin \theta)D^2$	$\frac{2}{3}Bh$
<i>wetted perimeter</i> P	$b + 2h$	$b + 2h\sqrt{1 + m^2}$	$2h\sqrt{1 + m^2}$	$\frac{1}{2}\theta D$	$B + \frac{8}{3}\frac{h^2}{B}$ *
<i>hydraulic radius</i> R_h	$\frac{bh}{b + 2h}$	$\frac{(b + mh)h}{b + 2h\sqrt{1 + m^2}}$	$\frac{mh}{2\sqrt{1 + m^2}}$	$\frac{1}{4}\left[1 - \frac{\sin \theta}{\theta}\right]D$	$\frac{2B^2h}{3B^2 + 8h^2}$ *
<i>top width</i> B	b	$b + 2mh$	$2mh$	$(\sin \theta / 2)D$ or $2\sqrt{h(D - h)}$	$\frac{3}{2}Ah$
<i>hydraulic depth</i> D_h	h	$\frac{(b + mh)h}{b + 2mh}$	$\frac{1}{2}h$	$\left[\frac{\theta - \sin \theta}{\sin \theta / 2}\right]\frac{D}{8}$	$\frac{2}{3}h$

Σύνοψη: Από εξισώσεις απώλειών ενέργειας-> εξισώσεις ταχύτητας

- Ομοιόμορφη ροή-> $S_0=S_f$
- Λύνω ως προς την ταχύτητα:

$$V = \frac{K_n}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad (\text{Manning}) \quad (2)$$

$$V = \sqrt{\frac{8g}{f}} \sqrt{RS} \quad (\text{Darcy-Weisbach}) \quad (3)$$

$$V = C \sqrt{RS} \quad (\text{Chezy}) \quad (4)$$

Αδιαστατοποίηση των παραμέτρων ροής

- Σκοποί της αδιαστατοποίησης:

(α) Μείωση των μεταβλητών ενός προβλήματος

(β) Πινακοποίηση του προβλήματος

- Σχεδιασμός ομοιόμορφης ροής:

Δίδεται η παροχή Q , η κλίση του πυθμένα S_0 και ο συντελεστής τραχύτητας n .

Ζητούνται οι διαστάσεις του αγωγού

που εμπεριέχονται στη συνάρτηση αγωγιμότητας $f_n(y) = AR^{2/3}$

Τραπεζοειδής διατομή

- Για τραπεζοειδή διατομή:

$$A = y(b + my) \quad P = b + 2y\sqrt{1+m^2} \quad R = A/P$$

y : βάθος ροής

b : πλάτος πυθμένα

m : κλίση πρανών

- Η συνάρτηση αγωγιμότητας f_h είναι συνάρτηση των y, b και m ,
καθόσον $f_h = AR^{2/3}$

- Αδιαστατοποίηση με το πλάτος πυθμένα b_0

- Αντί των τριών μεταβλητών b, y και m , έχουμε δύο,
τις $\bar{y} = y/b_0$ και m

Επίλυση με πίνακες τραπεζοειδής διατομή (1)

- Αδιάστατη συνάρτηση αγωγιμότητας $\bar{f}_n(\bar{y})$

$$\bar{f}_n(\bar{y}) = \bar{A} \bar{R}^{2/3} = \frac{A}{b_o^2} \frac{R^{2/3}}{b_o^{2/3}} = \frac{f_n}{b_o^{8/3}}$$

$$\bar{f}_n = \frac{f_n}{b_o^{8/3}}$$

Συνάρτηση μόνο των γεωμετρικών στοιχείων

$$Q = \frac{A}{n} R^{2/3} S_o^{1/2} = A R^{2/3} \frac{S_o^{1/2}}{n} = f_n \frac{\sqrt{S_o}}{n} = b_o^{8/3} \bar{f}_n \frac{\sqrt{S_o}}{n}$$

$$Q = b_o^{8/3} \bar{f}_n \frac{\sqrt{S_o}}{n}$$

$$\rightarrow \bar{f}_n = \frac{Q \cdot n}{S_o^{1/2} b_o^{8/3}}$$

Επίλυση με πίνακες τραπεζοειδής διατομή (2)

$$\bar{f}_n = \frac{Q \cdot n}{S_0^{1/2} b_0^{8/3}}$$

- Επίλυση με πίνακες, **βάθος ομοιόμορφης ροής**, δοκιμή για διάφορα πλάτη

Υπολογισμός των διαστάσεων του τμήματος $A - B$

b [m]	$\bar{f}_n$	$\bar{y}_n$	y_n [m]	A [m ²]	B [m]	P [m]	V [m/s]	b/y_n
2.0	2.5417	1.2154	2.431	13.725	9.29	10.76	2.222	0.823
2.5	1.4019	0.9229	2.307	13.753	9.42	10.82	2.218	1.084
3.0	0.8621	0.7312	2.194	13.799	9.58	10.91	2.210	1.368
3.5	0.5715	0.5970	2.090	13.862	9.77	11.03	2.200	1.675
4.0	0.4003	0.4985	1.994	13.940	9.98	11.19	2.188	2.006
4.5	0.2924	0.4236	1.906	14.028	10.22	11.37	2.174	2.361
5.0	0.2208	0.3652	1.826	14.131	10.48	11.58	2.158	2.738
5.5	0.1712	0.3187	1.753	14.249	10.76	11.82	2.140	3.138
6.0	0.1358	0.2809	1.685	14.373	11.06	12.08	2.122	3,560

Επειδή η παροχή είναι σχετικά μεγάλη (βλ. § 3.2.2), $b/y_n > 3$, άρα:

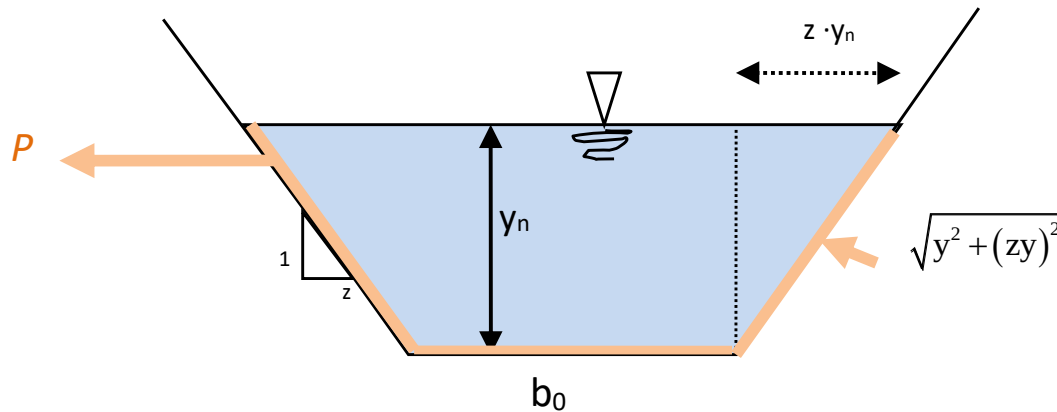
$$b = 5.5 \text{ m} \quad \text{και} \quad y_n = 1.75 \text{ m}$$

Η αδιαστατοποίηση της συνάρτησης αγωγιμότητας με σταθερά αδιαστατοποίησης το πλάτος πυθμένα μειώνει τον αριθμό των μεταβλητών παραμέτρων από τρεις σε δύο ήτοι αντί των b, y, m τις $\bar{y} = y/b$ και m .

Η Εξ. (3.9) γίνεται

$$\bar{f}_n(\bar{y}) = \bar{A}\bar{R}^{2/3} = \frac{A}{b^2} \frac{R^{2/3}}{b^{2/3}} = \frac{f_n}{b^{8/3}} \quad (3.11)$$

ΓΙΑΤΙ ΜΕ ΠΙΝΑΚΕΣ?



'Ανεξάρτητα" από το πρόβλημα, καταστρώνω τις τιμές της συνάρτησης αγωγιμότητας ως συνάρτηση του αδιάστατου βάθους $\bar{y} = y_n/b_0$:

-Αδιάστατη βρεχόμενη περίμετρος:

$$\bar{P} = \frac{\left(b_0 + \sqrt{y^2 + (yz)^2} + \sqrt{y^2 + (yz)^2}\right)}{b_0} = \frac{\left(b_0 + 2y\sqrt{1+z^2}\right)}{b_0} = 1 + 2\bar{y}\sqrt{1+z^2},$$

-Αδιάστατο εμβαδόν υγρής διατομής:

ΓΙΑΤΙ ΜΕ ΠΙΝΑΚΕΣ? (2)

$$\bar{A} = \frac{A}{b_0^2} = \frac{y(b_0 + (b_0 + 2zy))}{b_0^2} \cdot \frac{1}{2} = \frac{y(b_0 + zy)}{b_0^2} = \bar{y} \frac{(b_0 + zy)}{b_0} = \bar{y}(1 + z\bar{y})$$

Οπότε:

$$\bar{A}\bar{R}^{2/3} = \bar{A} \cdot \bar{A}^{2/3} \bar{P}^{-2/3} = \frac{A}{b_0^2} \left(\frac{A}{b_0^2} \right)^{2/3} \left(\frac{P}{b_0} \right)^{-2/3} = \bar{y}(1 + z\bar{y}) \cdot [\bar{y}(1 + z\bar{y})]^{2/3} \cdot (1 + 2\bar{y}\sqrt{1 + z^2})^{-2/3}$$

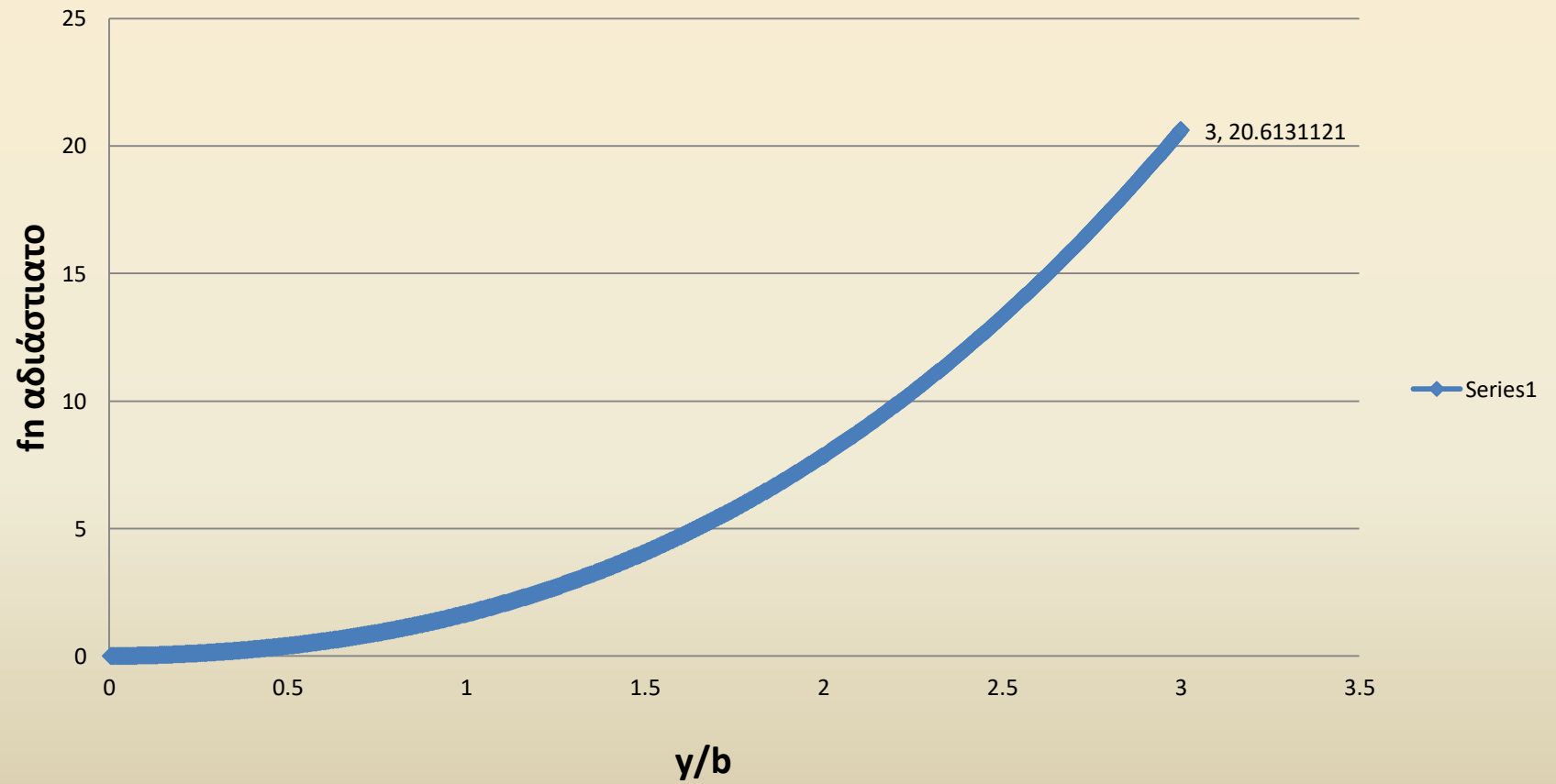
$$\bar{A}\bar{R}^{2/3} = (1 + 2\bar{y}\sqrt{1 + z^2})^{-2/3} (\bar{y}(1 + z\bar{y}))^{5/3} = g(\bar{y})$$

Επομένως για διάφορα $\bar{y}$ (δίδω αυθαίρετες τιμές) προσδιορίζω τον όρο: $\bar{A}\bar{R}^{2/3}$

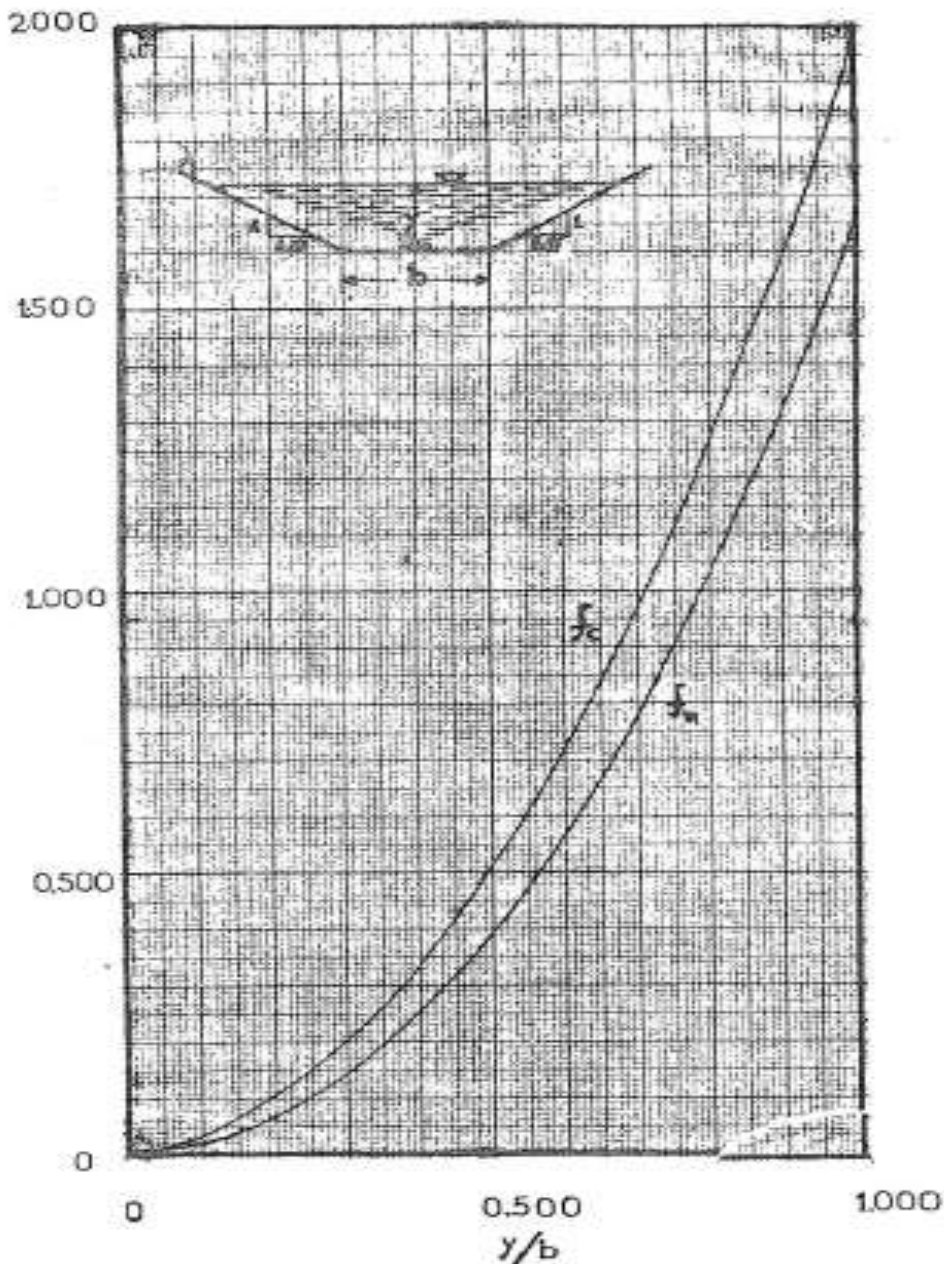
(βλπ. αρχείο εξέλ):

m	
1,5	
γ/b	fn αδιαστο
0,005	0,000146
0,01	0,000465
0,015	0,000914
0,02	0,001478
0,025	0,002146
0,03	0,002911
0,035	0,003768
0,04	0,004713
0,045	0,005743
0,05	0,006854
0,055	0,008046
0,06	0,009317
0,065	0,010664
0,07	0,012086

m=1.5



$$f_n = A \sqrt{\frac{Q}{P}} = \frac{Q}{b^{3/2} \sqrt{50}}$$



Σκ. 8. Συναρτήσεις άγωγιμότητας και κρίσιμης ροής τρα-
πεζοειδούς διατομής $m = 1.5:1$

Διάγραμμα

$$f_c = A \sqrt{\frac{Q}{B}} = \frac{Q}{b^{3/2} \sqrt{g}}$$

Εναλλακτικά, προσεγγιστικές σχέσεις από διεθνή βιβλιογραφία

6.8.2 Τραπεζοειδής Διατομή

(α) Η σχέση αυτή έχει προταθεί από τους Swamee και Rathie (2004).

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση Manning με $A = h_n(B + zh_n)$ και $P = B + 2h_n\sqrt{1+z^2}$ προέκυψε η σχέση

$$\frac{z^{5/3} Q_n}{B^{8/3} \sqrt{S}} = \frac{[z\beta_n(1+z\beta_n)]^{5/3}}{(1+2\beta_n\sqrt{1+z^2})^{2/3}},$$

όπου β_n το αδιάστατο ομοιόμορφο βάθος.

Στη συνέχεια, ακολουθώντας παρόμοια διαδικασία όπως και για την σχέση (6.40) κατέληξαν στην παρακάτω σχέση:

$$\begin{aligned} \frac{B}{h_n} = & \frac{0.84090z^{5/4}}{(1+z^2)^{1/8} P_b^{3/8}} - \frac{0.08839z^{3/2}(z-5\sqrt{1+z^2})}{(1+z^2)^{3/4} P_b^{3/4}} + \\ & + \frac{0.00465z^{7/4}(35+42z^2-30z\sqrt{1+z^2})}{(1+z^2)^{11/8} P_b^{9/8}} + \\ & + \frac{0.00781z^{1/2}[5+20z^2+15z^4-z(15+17z^2)\sqrt{1+z^2}]}{(1+z^2)^{5/2} P_b^{3/2}} + \dots \end{aligned} \quad (6.43)$$

$$\text{όπου: } P_b = \frac{z^{5/3} Q_n}{B^{8/3} \sqrt{S}}.$$

Επιλογή διατομής

Για οικονομοτεχνικά κριτήρια είναι η μέγιστη αγωγιμότητα για ένα συγκεκριμένο εμβαδόν διατομής. Η οικονομικότερη θεωρητικά διατομή προκύπτει ότι είναι η διατομή σχήματος κανονικού ημιεξαγώνου, ωστόσο για λόγους τεχνικούς στην πράξη προτιμούνται διατομές με μεγαλύτερες τιμές του λόγου b/y_n .

Για μικρούς αγωγούς $b/y_n \sim 1$

Για αγωγού μεσαίου μεγέθους $b/y_n \sim 1-3$

Για μεγάλους αγωγούς $b/y_n > 3$

Στοιχεία για το σχεδιασμό

Υπολογισμός των γεωμετρικών στοιχείων κατασκευής του αγωγού

Κλίση του αγωγού

- Η κλίση του πυθμένα του αγωγού πρέπει να ακολουθεί κατά το δυνατόν την κλίση του φυσικού εδάφους.
- Ο πυθμένας πρέπει να τοποθετείται μέσα στο έδαφος και σε ανάλογο βάθος ώστε να επιτυγχάνεται ισοζύγιο εκκαθών και επιχωματώσεων σε κάθε τμήμα του αγωγού.

Πλάτος πυθμένα, βάθος ροής

- Η οικονομικότερη θεωρητικά διατομή είναι η διατομή εχήματος κανονικού ημιεξαγώνου.
- Στην πράξη προτιμώνται διατομές με μεγαλύτερες τιμές του λόγου b/y_n :
 - Για μικρούς αγωγούς, $b/y_n \approx 1$
 - Για αγωγούς μεσαίου μεγέθους, $b/y_n \approx 1-3$
 - Για μεγάλους αγωγούς, $b/y_n > 3$

Κλίση ηρατών

- Πίνακας 3.1

Όρια ταχυτήτων ροής

- Κατά τον προσδιορισμό του λόγου b/y_n πρέπει να προσδιορίζονται τα όρια των ταχυτήτων ροής
- Πίνακας 3.3

Πίνακας 3.3

Επιτρεπόμενα όρια μεγίστων και ελαχίστων ταχυτήτων και κλίσεις πρανών
σε διάφορες περιπτώσεις ανοιχτών αγωγών

ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΕΠΙΤΡΕΠΟΜΕΝΕΣ ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ			
α/α	Σύσταση αρχικού υλικού κοίτης	Καθαρό νερό [m/s]	Νερό που μεταφέρει άμμο ή χαλίκια [m/s]
1	Λεπτή άμμος	0.45	0.45
2	Πλώδες έδαφος	0.60	0.60
3	Συμπαγής άργιλλος	0.75	0.70
4	Πολύ σκληρή άργιλλος	1.80	1.50
5	Λεπτά χαλίκια	0.75	1.15
6	Λίθοι	1.50	2.00
ΕΛΑΧΙΣΤΕΣ ΕΠΙΤΡΕΠΟΜΕΝΕΣ ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ			
α/α	Σύσταση νερού	Ταχύτητα ροής [m/s]	
1	Νερά βορβορώδη	0.35-0.40	
2	Νερά που μεταφέρουν λεπτή άμμο	0.60-0.65	
3	Νερά πόσιμα	0.50-0.65	
4	Νερά στάσιμα που αποχετεύονται	0.65-0.80	

Πίνακας 3.1

Στοιχεία σχεδιασμού ανεπένδυτων ανοιχτών αγωγών

α/α	Σύσταση υλικού του πρανούς	Κλίση πρανούς m/1
1	Βράχος	0/1
2	Τυρφώδες έδαφος	0.25/1
3	Σκληρή άργιλλος	0.50/1 - 1/1
4	Γαίες επενδεδυμένες με λίθους για μεγάλους αγωγούς	1/1
5	Συμπαγής άργιλλος	1.50/1
6	Χαλαρό αμμώδες έδαφος	2/1

Περιθώριο ασφαλείας αναχώματος (f)

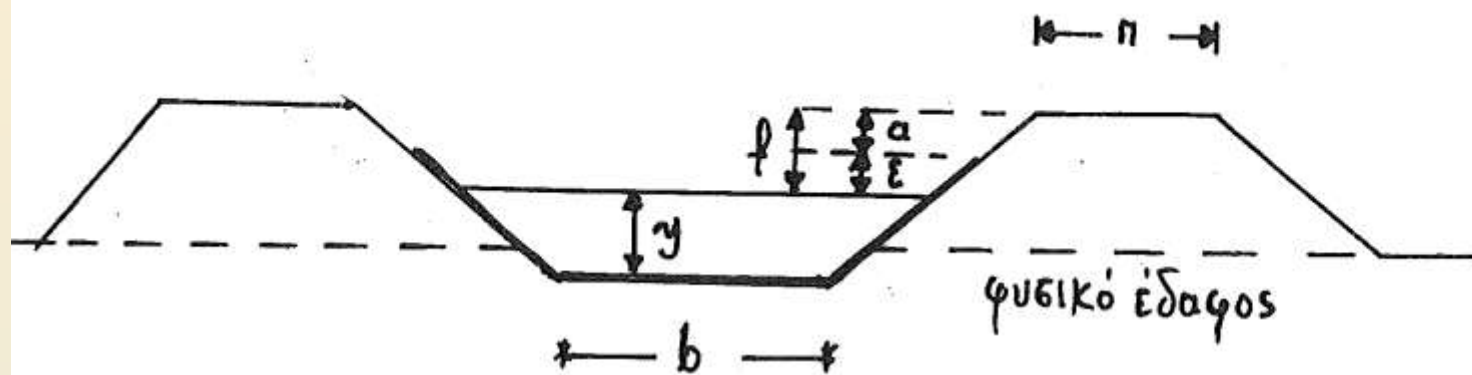
- Κατακόρυφη απόσταση της επιφάνειας του νερού από τη βτέψη του αναχώματος.
- Αποφυγή υπερχείλισης του αγωγού λόγω ανεμογενών κυματισμών ή λόγω λειτουργίας θυροφραγμάτων

- Για ανεπένδυτες διώρυγες: $f = 0.55 \sqrt{C y}$ U.S. Bureau of Reclamation

f : περιθώριο ασφαλείας [m]

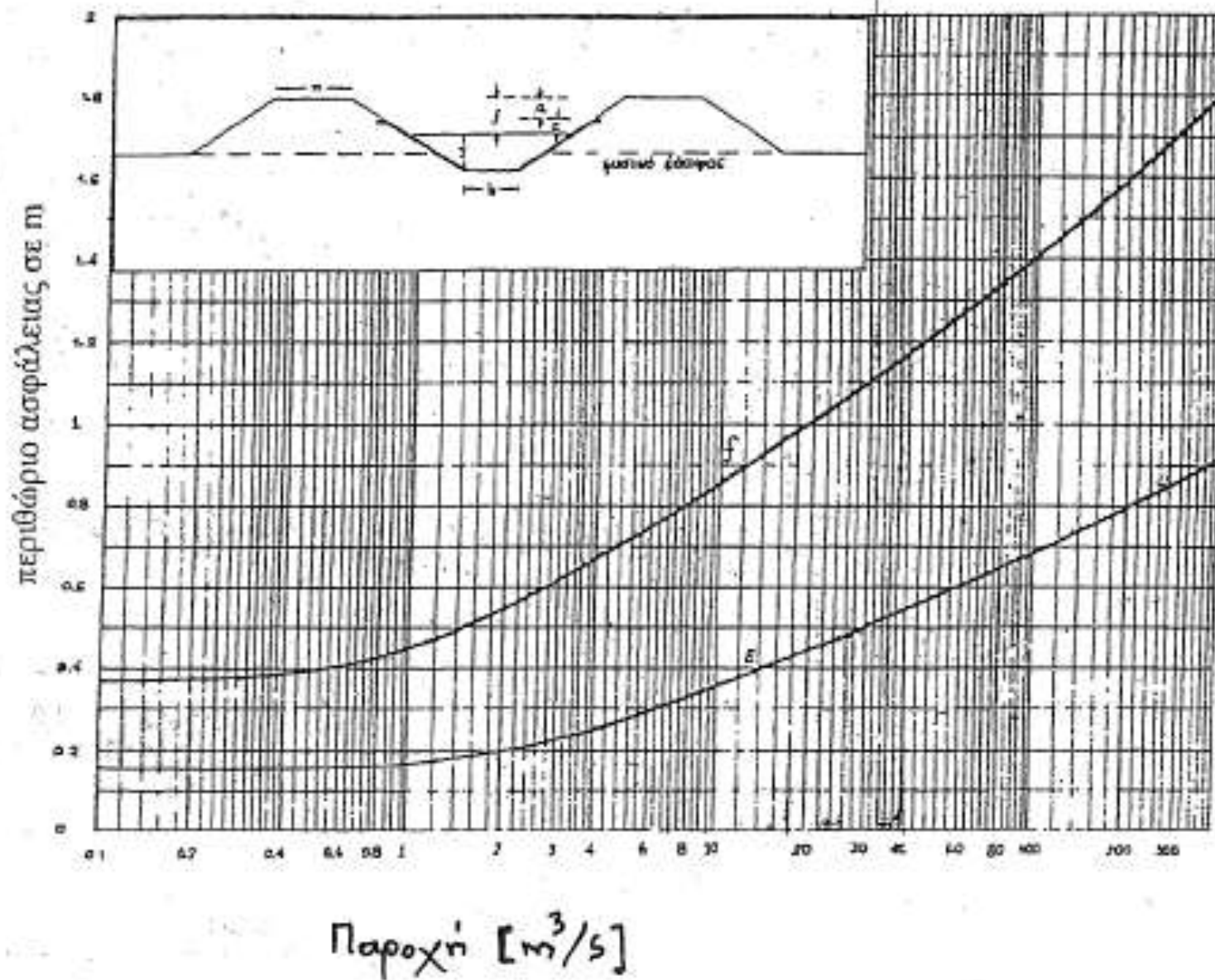
y : βάθος νερού [m]

C : συντελεστής $1.5 < C < 2.5$ για $0.50 < Q < 85 \text{ m}^3/\text{s}$



ρ : περιθώριο ασφαλείας αναχώματος

ϵ : περιθώριο ασφαλείας επένδυσης



Κατασκευαστικό: περιθώριο ασφαλείας σε αγωγούς τραπεζοειδούς διατομής

Κατασκευαστικό, Μπέλλος, 2009. Υδραυλική επίλυση: Πάντα η εσωτερική διατομή

Πίνακας 3.2

Πάχος επένδυσεως και πλάτος στέψης αναχωμάτων σε αρδευτικές διώρυγες

ΕΠΕΝΔΥΣΗ ΔΙΩΡΥΓΑΣ				ΑΝΑΧΩΜΑΤΑ ΔΙΩΡΥΓΑΣ	
Απλό σκυρόδεμα		Οπλισμένο σκυρόδεμα			
Παροχή [m ³ /s]	πάχος επένδυσης [cm]	Παροχή [m ³ /s]	πάχος επένδυσης [cm]	Παροχή [m ³ /s]	πλάτος στέψης αναχώματος [cm]
<5	5	<50	10	≤200	50
5 - 15	7	50 - 120	12	200-650	70
15 - 40	8		-	650 - 1150	80
40 - 100	9			1150-1650	90
				1650-2150	100
				2150-2800	120
				>2800	180-240

Προσοχή!!!

- Δεν τελείωσα πρέπει να ελέγξω αν η ροή είναι υποκρίσιμη $\rightarrow \gamma_n > \gamma_c$

- **Ομοιόμορφη ροή (σταθερό βάθος ροής)**

Εξ. Manning

$$\bar{f}_n = \frac{Q \cdot n}{S_0^{1/2} b_0^{8/3}} \quad (\text{από Εξ. Manning}) =$$

$$= \left(\bar{A} \bar{R}^{2/3} = \frac{A}{b^2} \left(\frac{A}{b^2} \right)^{2/3} \left(\frac{P}{b} \right)^{-2/3} = \bar{y} (1 + z\bar{y}) \cdot [\bar{y} (1 + z\bar{y})]^{2/3} \cdot (1 + 2\bar{y}\sqrt{1 + z^2})^{-2/3} \right) =$$

$$(1 + 2\bar{y}\sqrt{1 + z^2})^{-2/3} (\bar{y} (1 + z\bar{y}))^{5/3} = \text{πίνακες Μπέλλου, εύρεση } \bar{y}/b \text{ βάθος}$$

ομοιόμορφης ροής

- **Κρίσιμη ροή**

(ελάχιστη ειδική ενέργεια, Fr = 1)

$$\bar{f}_c = \frac{Q}{b_0^{5/2} \sqrt{g}} \quad (\text{μόνο για Fr = 1, κρίσιμη ροή}) =$$

$$= \left(\frac{1}{b_0^{5/2}} A \sqrt{\frac{A}{B}} = \sqrt{\frac{\bar{A}^3}{\bar{B}}} = \sqrt{\frac{[\bar{y} (1 + z\bar{y})]^3}{1 + 2z\bar{y}}} \right) = \text{πίνακες Μπέλλου, εύρεση } \bar{y}/b$$

κρίσιμο βάθος

- **Κρίσιμη και ομοιόμορφη ροή (ομοιόμορφη ροή με κρίσιμο βάθος)**

$$\bar{f}_t = \frac{n^2 \cdot g}{S_0 \cdot b_0^{1/3}}$$

$$= \left(\frac{1}{b_0^{1/3}} \frac{BR^{4/3}}{A} = \frac{((1 + 2z\bar{y}))}{\bar{y} (1 + z\bar{y})} \left(\frac{\bar{y} (1 + z\bar{y})}{1 + 2\bar{y}\sqrt{1 + z^2}} \right)^{4/3} \right) = \text{πίνακες Μπέλλου, εύρεση } \bar{y}/b$$

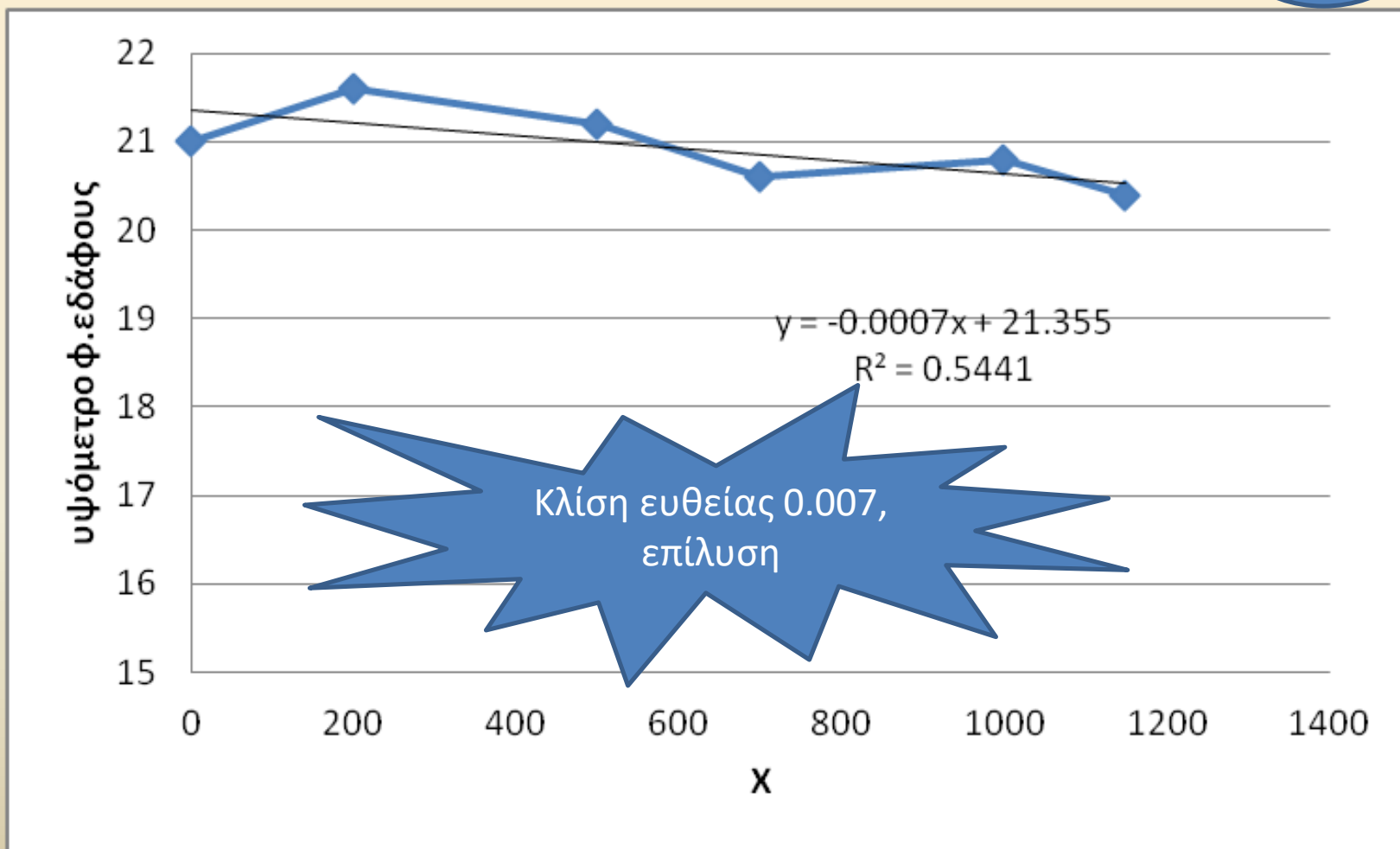
κρίσιμο βάθος και ομοιόμορφη ροή αλλά για άλλη παροχή

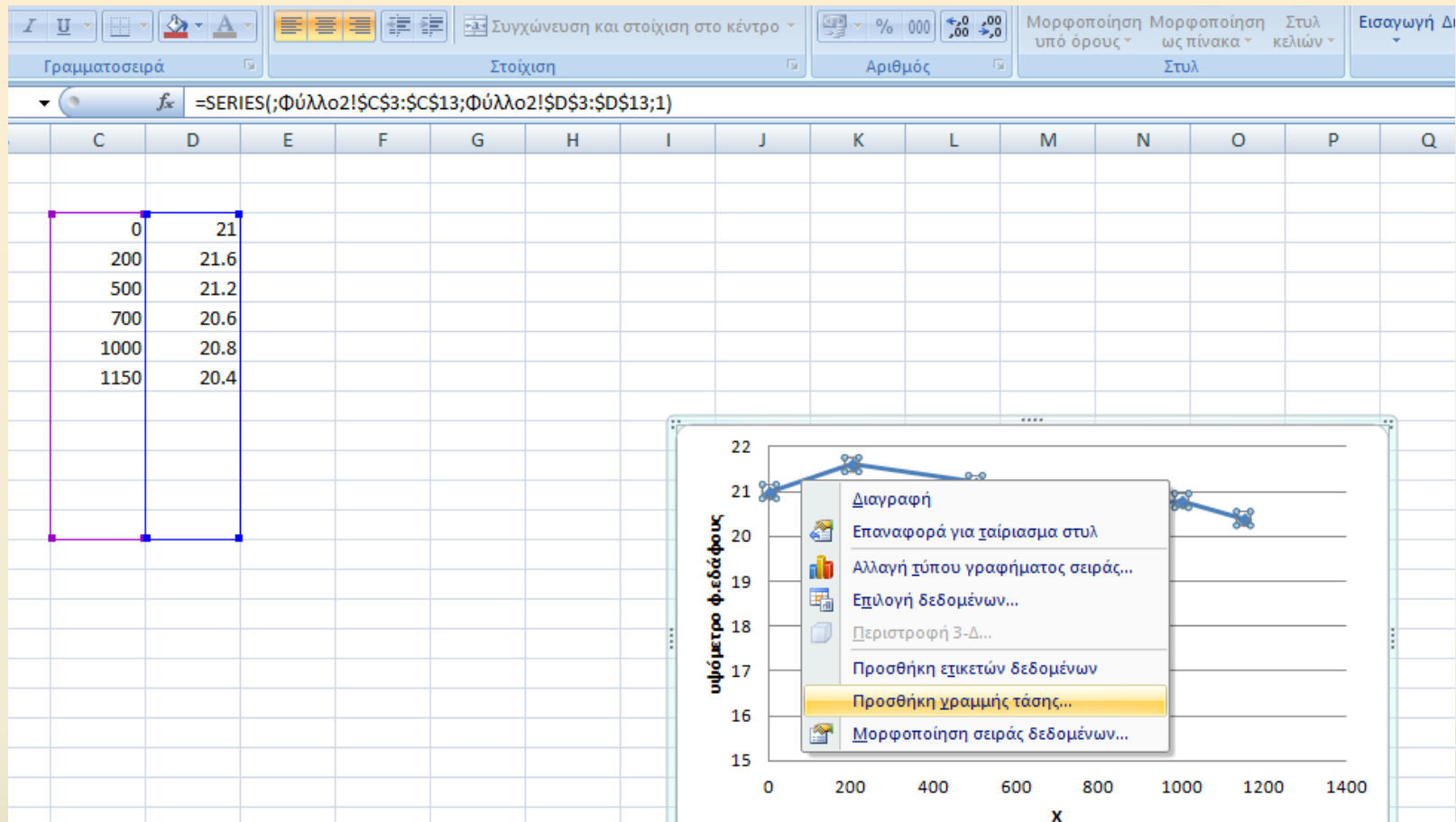
παραρτημα

ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΛΪΣΗΣ ΠΥΘΜΈΝΑ

Εύρεση μέσης κλίσης με γραμμική παλινδρόμηση

θέμα





Γραμμική παλινδρόμηση

- Η ανάλυση της γραμμικής παλινδρόμησης μοντελοποίηση της σχέσης μεταξύ των ανεξάρτητων μεταβλητών με την εξαρτημένη μεταβλητή σε μία γραμμική σχέση.
- Τα λαμβανόμενα δεδομένα είναι ανεξάρτητες μεταβλητές και το εξαγόμενο του μοντέλου της παλινδρόμησης θα πρέπει να προσεγγίζει τα λαμβανόμενα εξαγόμενα σύμφωνα με κριτήρια που ορίζει ο αναλυτής.