

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΜΑΘΗΜΑ: ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΚΑΙ ΥΔΡΑΥΛΙΚΑ ΕΡΓΑ
ΕΞΕΤΑΣΗ ΠΡΟΟΔΟΥ ΝΟΕΜΒΡΙΟΥ 2017

Άσκηση 1

1. Οι δεξαμενές A και B, του Σχήματος 1, συνδέονται με σωλήνα διαμέτρου D , μήκους L και τραχύτητας f , για τον οποίο ισχύει $fL/D=100$. Λαμβάνοντας υπόψη τις τοπικές απώλειες, η μέση ταχύτητα της ροής είναι ίση με:

- (α) 1.2 m/s
 (β) 1.5 m/s
 (γ) 1.7 m/s
 (δ) 2.0 m/s
 (ε) Δεν ισχύει κανένα από τα παραπάνω.



Σχήμα 1

Αιτιολόγηση: Η εξίσωση ενέργειας μεταξύ των δεξαμενών A και B γράφεται

$$H_A = H_B + \Delta H_{(A-B)} \Rightarrow z_A + \frac{p_A}{\gamma} + \frac{V_A^2}{2g} = z_B + \frac{p_B}{\gamma} + \frac{V_B^2}{2g} + \Delta H_{(A-B)} \xRightarrow[V_A=V_B=0]{p_A=p_B=0} \Delta H_{(A-B)} = z_A - z_B \Rightarrow$$

$h_{f,A-B} + h_{m,A} + h_{m,B} = z_A - z_B$. Οι γραμμικές και τοπικές απώλειες στον αγωγό υπολογίζονται από την εξ. (3.3-16) (Darcy-Weisbach, βλ. βιβλίο) και την εξίσωση (3.9-1), αντίστοιχα, και η εξίσωση ενέργειας γράφεται

$$f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} + k_A \frac{V^2}{2g} + k_B \frac{V^2}{2g} = z_A - z_B \Rightarrow \left(f \frac{L}{D} + k_A + k_B \right) \frac{V^2}{2g} = z_A - z_B \Rightarrow V = \sqrt{\frac{2g(z_A - z_B)}{f \frac{L}{D} + k_A + k_B}} \Rightarrow$$

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot 9.81 \cdot (32.1 - 16.5)}{100 + 0.5 + 1.0}} \Rightarrow V = 1.7 \text{ m/s}, \text{ όπου } k_A = 0.5 \text{ και } k_B = 1.0 \text{ (βλ. Σχόλια βιβλίου, σελ. 84 και 82,}$$

αντίστοιχα). Συνεπώς, η σωστή απάντηση είναι η (γ).

2. Σε σύστημα τριών σωλήνων σε σειρά με τα ίδια χαρακτηριστικά L , k_s και f , όπου $D_1 > D_2 > D_3$:

- (α) Ισχύει $V_1 < V_2 < V_3$.
 (β) Ισχύει $V_1 > V_2 > V_3$.
 (γ) Ισχύει $Q_1 = Q_2 = Q_3$.
 (δ) Ισχύει $Q_1 > Q_2 > Q_3$.
 (ε) Ισχύουν τα (α) και (γ).

Αιτιολόγηση: Σε ένα σύστημα σωλήνων σε σειρά ισχύει $Q_1 = Q_2 = Q_3$ (βλ. βιβλίο, παρ. 4.4.2) άρα, αφού

$$Q = V \cdot A = V \cdot \frac{\pi D^2}{4}, \text{ ισχύει } V_1 \cdot \frac{\pi D_1^2}{4} = V_2 \cdot \frac{\pi D_2^2}{4} = V_3 \cdot \frac{\pi D_3^2}{4} \Rightarrow V_1 \cdot D_1^2 = V_2 \cdot D_2^2 = V_3 \cdot D_3^2. \text{ Επομένως, για}$$

$D_1 > D_2 > D_3$ θα ισχύει $V_1 < V_2 < V_3$. Συνεπώς, η σωστή απάντηση είναι η (ε).

3. Θεωρήστε τις ακόλουθες περιπτώσεις ροής: (1) από δεξαμενή σε σωλήνα 0.50 m, και (2) από σωλήνα διαμέτρου 0.50 m σε δεξαμενή. Τότε:

- (α) Οι τοπικές απώλειες είναι μεγαλύτερες στο (1).
 (β) Οι τοπικές απώλειες είναι μεγαλύτερες στο (2).
 (γ) Οι τοπικές απώλειες είναι ίσες επειδή η σχετική μεταβολή της γεωμετρίας είναι η ίδια.
 (δ) Ο συντελεστής τοπικών απωλειών στην (1) είναι ίσος με 1.0.
 (ε) Ισχύουν τα (β) και (δ).

Αιτιολόγηση: Στην περίπτωση απότομης διαστολής της ροής οι απώλειες είναι μεγαλύτερες. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση (1), δηλ. σε απότομη συστολή, ο συντελεστής τοπικών απωλειών κυμαίνεται μεταξύ 0.04 και 0.8 (τυπική τιμή $k_m=0.5$, βλ. βιβλίο, Σχόλια σελ. 84), ενώ στην περίπτωση (2) ο συντελεστής τοπικών απωλειών είναι ίσος με $k_m=1.0$ (βλ. βιβλίο, Σχόλια σελ. 82). Συνεπώς, η σωστή απάντηση είναι η (β).

4. Σε σύστημα 3 παράλληλων σωλήνων με τα ίδια χαρακτηριστικά L , k_s και f ισχύει $D_1 > D_2 > D_3$. Τότε:

- (α) Ισχύει $Q_1=Q_2=Q_3$.
- (β) Ισχύει $Q_1 > Q_2 > Q_3$.
- (γ) Ισχύει $Q_1 < Q_2 < Q_3$.
- (δ) Ισχύει $Q_1+Q_2+Q_3=0$.
- (ε) Ισχύουν τα (β) και (δ).

Αιτιολόγηση: Για τους 3 παράλληλους σωλήνες ισχύει $\Delta H_1 = \Delta H_2 = \Delta H_3$ (βλ. βιβλίο, παρ. 4.4.3), άρα για $L_1=L_2=L_3$ και $f_1=f_2=f_3$ προκύπτει

$$f \frac{L}{D_1} \frac{V_1^2}{2g} = f \frac{L}{D_2} \frac{V_2^2}{2g} = f \frac{L}{D_3} \frac{V_3^2}{2g} \Rightarrow \frac{V_1^2}{D_1} = \frac{V_2^2}{D_2} = \frac{V_3^2}{D_3}$$

Επιπλέον $Q = V \cdot A = V \cdot \frac{\pi D^2}{4} \Rightarrow V = \frac{4Q}{\pi D^2}$, άρα $\frac{Q_1^2}{D_1^5} = \frac{Q_2^2}{D_2^5} = \frac{Q_3^2}{D_3^5}$ και για $D_1 > D_2 > D_3$ θα πρέπει να ισχύει $Q_1 > Q_2 > Q_3$. Συνεπώς, η σωστή απάντηση είναι η (β).

5. Στις διατομές A και B ενός σωλήνα σταθερής διαμέτρου D , στον οποίο ρέει νερό, μετρήθηκαν οι πιέσεις και τα υψόμετρα στο ύψος του άξονα. Προέκυψε ότι $p_A=210700$ Pa, $z_A=12$ m, $p_B=200900$ Pa, $z_B=18$ m. Ισχύει ότι:

- (α) Η ροή είναι από το A στο B και οι απώλειες ενέργειας είναι ίσες με 5 m.
- (β) Η ροή είναι από το A στο B και οι απώλειες ενέργειας είναι ίσες με 3 m.
- (γ) Η ροή είναι από το B στο A και οι απώλειες ενέργειας είναι ίσες με 5 m.
- (δ) Η ροή είναι από το B στο A και οι απώλειες ενέργειας είναι ίσες με 3 m.
- (ε) Δεν ισχύει κανένα από τα παραπάνω.

Αιτιολόγηση: Έστω ότι η ροή πραγματοποιείται από το A στο B, δηλ. $\Delta H_{(A-B)} > 0$. Τότε, η εξίσωση ενέργειας

$$\text{μεταξύ των A και B γράφεται: } \frac{p_A}{\gamma} + z_A + \frac{V_A^2}{2g} = \frac{p_B}{\gamma} + z_B + \frac{V_B^2}{2g} + \Delta H_{(A-B)}$$

$$\text{όπου } \gamma = \rho \cdot g = 1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 9.81 \text{ m/s}^2 = 9810 \text{ N/m}^3$$

Επίσης, αφού η διάμετρος (άρα και η διατομή) του σωλήνα είναι σταθερή, από την εξίσωση συνέχειας λαμβάνουμε $Q_A = Q_B \Rightarrow V_A \cdot A_A = V_B \cdot A_B \Rightarrow V_A = V_B$. Επομένως, η εξίσωση ενέργειας γράφεται

$$\frac{p_A}{\gamma} + z_A = \frac{p_B}{\gamma} + z_B + \Delta H_{(A-B)} \Rightarrow \Delta H_{(A-B)} = \left(\frac{p_A}{\gamma} + z_A \right) - \left(\frac{p_B}{\gamma} + z_B \right) \Rightarrow$$

$$\Delta H_{(A-B)} = \left(\frac{210700}{9810} + 12 \right) \text{ m} - \left(\frac{200900}{9810} + 18 \right) \text{ m} = 33.48 \text{ m} - 38.48 \text{ m} = -5.00 \text{ m} < 0$$

Συνεπώς, η ροή τελικά πραγματοποιείται από το B στο A ($\Delta H < 0$) και οι απώλειες ενέργειας είναι ίσες με $\Delta H_{(B-A)} = 38.48 \text{ m} - 33.48 \text{ m} = 5.00 \text{ m}$, δηλ. η σωστή απάντηση είναι η (γ).

6. Παροχή $Q=120 \text{ L/s}$ νερού διέρχεται από αγωγό διαμέτρου $D=250 \text{ mm}$ και τραχύτητας $f=0.0124$. Η ταχύτητα τριβής u_* είναι ίση με:

- (α) 0.10 m/s
- (β) 0.50 m/s
- (γ) 0.80 m/s
- (δ) 1.00 m/s
- (ε) Δεν ισχύει κανένα από τα παραπάνω.

Αιτιολόγηση:

Η ταχύτητα τριβής u_* υπολογίζεται από την εξίσωση $u_* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$ (2.3-1), όπου

ρ είναι η πυκνότητα του νερού,

τ_w είναι η διατμητική τάση, η οποία υπολογίζεται από την εξίσωση $\tau_w = \frac{1}{8} f \rho V^2$ (3.3-14), και

V είναι η ταχύτητα της ροής είναι ίση με $V = \frac{Q}{A} = \frac{4Q}{\pi D^2} = \frac{4 \cdot 0.120 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi (0.250 \text{ m})^2} = 2.44 \text{ m/s}$.

Επομένως, $u_* = \sqrt{\frac{\frac{1}{8} f \rho V^2}{\rho}} = \sqrt{\frac{0.0124}{8}} \cdot 2.44 \text{ m/s} = 0.10 \text{ m/s}$ και η σωστή απάντηση είναι η (α).

7. Σε σύστημα 2 παράλληλων σωλήνων με την ίδια τραχύτητα f ισχύουν: $V_1=2V_2$ και $D_1=2D_2$. Τότε:

- (α) Ισχύει $L_1=L_2$
- (β) Ισχύει $L_1<L_2$
- (γ) Ισχύει $L_1=2 L_2$
- (δ) Ισχύει $L_1=4 L_2$
- (ε) Δεν ισχύει κανένα από τα παραπάνω.

Αιτιολόγηση: Για 2 παράλληλους σωλήνες ισχύει $\Delta H_1 = \Delta H_2$ (βλ. βιβλίο, παρ. 4.4.3) άρα

$f \frac{L_1}{D_1} \frac{V_1^2}{2g} = f \frac{L_2}{D_2} \frac{V_2^2}{2g} \xrightarrow{V_1=2V_2} f \frac{L_1}{2D_2} \frac{(2V_2)^2}{2g} = f \frac{L_2}{D_2} \frac{V_2^2}{2g} \Rightarrow L_1 = \frac{L_2}{2} \Rightarrow L_1 < L_2$. Συνεπώς, η σωστή απάντηση είναι η (β).

8. Η κατανομή ταχυτήτων ροής u (σε m/s) σε σωλήνα υπολογίζεται από την εξίσωση $u = 1.0 - r^2$, όπου r (cm) είναι η απόσταση από τον άξονα του σωλήνα. Τότε:

- (α) Η διάμετρος του σωλήνα είναι ίση με 1.0 cm .
- (β) Η διάμετρος του σωλήνα είναι ίση με 2.0 cm .
- (γ) Η μέση ταχύτητα της ροής είναι ίση με 1.0 m/s .
- (δ) Ισχύουν τα (β) και (γ).
- (ε) Δεν ισχύει κανένα από τα παραπάνω.

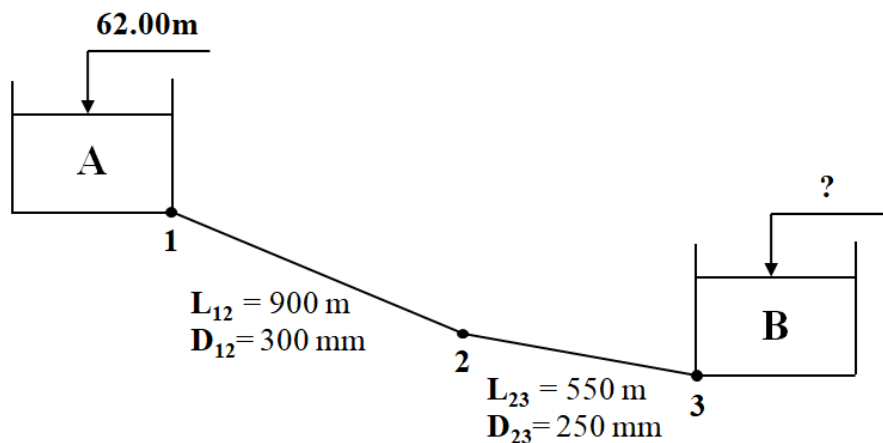
Αιτιολόγηση: Στα στερεά όρια, δηλ. για $r=D/2$, ισχύει $u=0 \text{ m/s}$ άρα από την εξίσωση $u = 1.0 - r^2$

$$0 = 1.0 - \left(\frac{D}{2}\right)^2 \Rightarrow D^2 = 4.0 \text{ cm}^2 \Rightarrow D = 2.0 \text{ cm}$$

Για $r=0 \text{ m}$ έχουμε μέγιστη ταχύτητα $u=u_{\max}$, δηλ. $u_{\max}=1.0 \text{ m/s}$ και από την εξ. (3.5-9) (βλ. βιβλίο, σελ. 55) η μέση ταχύτητα της ροής υπολογίζεται ίση με $V = u_{\max}/2 = 0.5 \text{ m/s}$. Συνεπώς, η σωστή απάντηση είναι η (β).

Άσκηση 2

Στο υδραγωγείο του Σχήματος 2, η παροχή νερού $Q=150 \text{ L/s}$ μεταφέρεται με λείους σωλήνες από τη δεξαμενή A στη δεξαμενή B με το σύστημα των αγωγών (1-2) και (2-3) σε σειρά (βλ. Σχήμα 2).



Σχήμα 2. Σκαρίφημα της μηκοτομής του υδραγωγείου

(α) Υπολογίστε τη στάθμη της δεξαμενής B, λαμβάνοντας υπόψη τις τοπικές απώλειες. Θεωρήστε ότι στους κόμβους 1 και 2 η συστολή είναι απότομη.

(β) Σχεδιάστε σε σκαρίφημα τη ΓΕ και την ΠΓ.

(γ) Υπολογίστε την παροχή του συστήματος, στην περίπτωση που αντικαθιστούσαμε τους αγωγούς (1-2) και (2-3) με έναν αγωγό (1-2-3) ενιαίας διαμέτρου $D=300 \text{ mm}$ και μήκους $L=1450 \text{ m}$, αμελώντας τις τοπικές απώλειες και θεωρώντας δεδομένη τη στάθμη της δεξαμενής B, που υπολογίσατε στο ερώτημα (α).

Ερώτημα (α)

Διατυπώνουμε αρχικά την εξίσωση ενέργειας μεταξύ των δύο δεξαμενών, προκειμένου να υπολογίσουμε τη στάθμη στη δεξαμενή B, με γνωστή τη στάθμη $z_A=62.00 \text{ m}$ στη δεξαμενή A, δηλ.

$$H_A = H_B + \Delta H_{(A-B)} \Rightarrow z_A + \frac{p_A}{\gamma} + \frac{V_A^2}{2g} = z_B + \frac{p_B}{\gamma} + \frac{V_B^2}{2g} + \Delta H_{(A-B)} \quad \begin{matrix} V_A=V_B=0 \\ p_A=p_B=0 \end{matrix} \Rightarrow z_B = z_A - \Delta H_{(A-B)} \Rightarrow$$

$$z_B = z_A - \Sigma h_{f(1-3)} - \Sigma h_{m(1-3)}$$

όπου με h_f συμβολίζονται οι γραμμικές και με h_m οι τοπικές απώλειες, αντίστοιχα.

Υπολογισμός γραμμικών απωλειών: Δίνεται η παροχή $Q=150 \text{ L/s}=0.150 \text{ m}^3/\text{s}$ του υδραγωγείου και οι διάμετροι $D_{12}=300 \text{ mm}=0.300 \text{ m}$ και $D_{23}=250 \text{ mm}=0.250 \text{ m}$ και συνεπώς μπορούμε να υπολογίσουμε τις γραμμικές απώλειες, h_{f12} και h_{f23} στους αγωγούς (1-2) και (2-3), αντίστοιχα. Πρόκειται δηλ. για Τυπικό Πρόβλημα Τύπου 1 (βλ. βιβλίο, παράγραφος 4.4-2, σελ. 93).

Οι γραμμικές απώλειες υπολογίζονται από την εξίσωση Darcy-Weisbach

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (3.3-16)$$

και ο συντελεστής τριβών υπολογίζεται από την εξίσωση Colebrook-White, με δοκιμές

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left[\frac{k_s / D}{3.7} + \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right] \quad (3.6-16)$$

$$\text{Αγωγός (1-2): } k_s/D \approx 0, V = \frac{Q}{A} = \frac{4Q}{\pi D^2} = \frac{4 \cdot 0.150 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi (0.300 \text{ m})^2} = 2.12 \text{ m/s}, \frac{V^2}{2g} = 0.23 \text{ m και}$$

$$\text{Re} = \frac{VD}{\nu} = \frac{2.12 \text{ m/s} \cdot 0.300 \text{ m}}{1.1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 578745$$

Υποθέτουμε μια αρχική τιμή για το συντελεστή f , έστω $f_0=0.010$. Με δοκιμές προκύπτει **$f=0.0128$** και οι γραμμικές απώλειες είναι ίσες με $h_{f,1-2} = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} = 0.0128 \frac{900 \text{ m}}{0.300 \text{ m}} 0.23 = 8.83 \text{ m}$.

$$\text{Αγωγός (2-3): } k_s/D \approx 0, V = \frac{Q}{A} = \frac{4Q}{\pi D^2} = \frac{4 \cdot 0.150 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi (0.250 \text{ m})^2} = 3.06 \text{ m/s}, \frac{V^2}{2g} = 0.48 \text{ m και}$$

$$\text{Re} = \frac{VD}{\nu} = \frac{2.12 \text{ m/s} \cdot 0.300 \text{ m}}{1.1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 694494$$

Υποθέτουμε μια αρχική τιμή για το συντελεστή f , έστω $f_0=0.010$. Με δοκιμές προκύπτει **$f=0.0124$** και οι γραμμικές απώλειες είναι ίσες με $h_{f,2-3} = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} = 0.0124 \frac{550 \text{ m}}{0.250 \text{ m}} 0.48 = 12.99 \text{ m}$.

Συνεπώς, οι συνολικές γραμμικές απώλειες είναι ίσες με $\Sigma h_{f(1-3)} = 21.82 \text{ m}$.

Υπολογισμός τοπικών απωλειών: Τοπικές απώλειες έχουμε στους κόμβους

- 1: έξοδος από δεξαμενή - είσοδος στον αγωγό (1-2) - απότομη συστολή,
- 2: απότομη συστολή διαμέτρου και
- 3: έξοδος από τον αγωγό (2-3) - είσοδος σε δεξαμενή.

Κόμβος 1: Ο συντελεστής τοπικών απωλειών είναι ίσος με $k_1=0.50$ (απότομη συστολή, βλ. βιβλίο, Σχόλια σελ. 84), άρα οι τοπικές απώλειες είναι ίσες με $h_{m,1} = k_1 \frac{V^2}{2g} = 0.50 \cdot 0.23 \text{ m} = 0.11 \text{ m}$.

Κόμβος 2: Είναι $D_2/D_1=250\text{mm}/300\text{mm}=0.83>0.76$ (βλ. βιβλίο, παρ. 3.9.3), άρα από την εξ. (3.9-14) έχουμε $k_2 = \left(1 - \frac{D_2^2}{D_1^2}\right)^2 = \left(1 - \frac{250^2}{300^2}\right)^2 = 0.09$ και οι τοπικές απώλειες $h_{m,2} = k_2 \frac{V^2}{2g} = 0.09 \cdot 0.48 \text{ m} = 0.04 \text{ m}$.

Κόμβος 3: Ο συντελεστής τοπικών απωλειών είναι ίσος με $k_3=1.00$ (βλ. βιβλίο, Σχόλια σελ. 82)

Συντελεστής τοπικών απωλειών (απότομη διαστολή) $k_1=1.00$, άρα οι τοπικές απώλειες είναι ίσες με $h_{m,3} = k_3 \frac{V^2}{2g} = 1.00 \cdot 0.48 \text{ m} = 0.48 \text{ m}$.

Συνεπώς, οι συνολικές τοπικές απώλειες είναι ίσες με $\Sigma h_{m(1-3)} = 0.64 \text{ m}$.

Υπολογισμός της στάθμης στη δεξαμενή Β: Επομένως η στάθμη στη δεξαμενή Β είναι ίση με $z_B = z_A - \Sigma h_{f(1-3)} - \Sigma h_{m(1-3)} \Rightarrow z_B = 62.00 \text{ m} - 21.82 \text{ m} - 0.64 \text{ m} = \mathbf{39.54 \text{ m}}$

Ερώτημα (β)

Αρχικά υπολογίζουμε τη στάθμη της ΓΕ σε κάθε κόμβο.

$$H_{1,ap} = 62.00 \text{ m}$$

$$H_{1,δεξ} = H_{1,ap} - h_{m1} = 62.00 \text{ m} - 0.11 \text{ m} = 61.89 \text{ m}$$

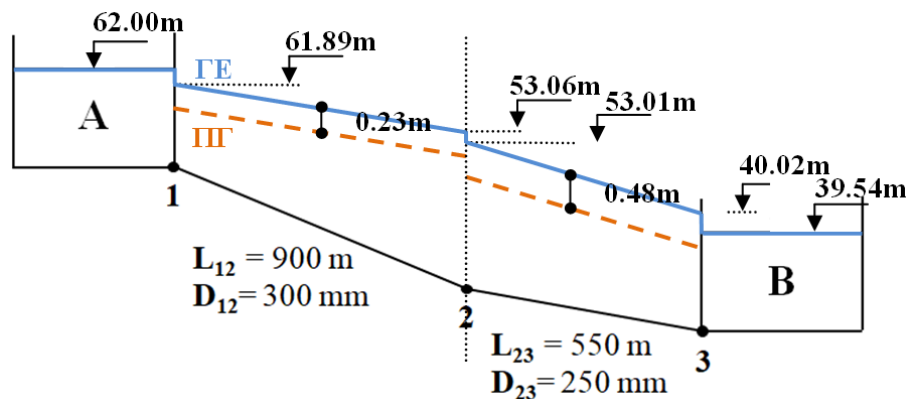
$$H_{2,ap} = H_{1,δεξ} - h_{f,1-2} = 61.89 \text{ m} - 8.83 \text{ m} = 53.06 \text{ m}$$

$$H_{2,\delta\epsilon\xi} = H_{2,\alpha\rho} - h_{m2} = 53.06\text{m} - 0.04\text{m} = 53.01\text{m}$$

$$H_{3,\alpha\rho} = H_{2,\delta\epsilon\xi} - h_{f,2-3} = 53.01\text{m} - 12.99\text{m} = 40.02\text{m}$$

$$H_{3,\delta\epsilon\xi} = H_{3,\alpha\rho} - h_{m3} = z_B = 40.02\text{m} - 0.48\text{m} = 39.54\text{m}$$

Στη συνέχεια, υπολογίζουμε τη στάθμη της ΠΓ, η οποία απέχει από την ΓΕ $\frac{V_1^2}{2g} = 0.23\text{m}$ και $\frac{V_2^2}{2g} = 0.48\text{m}$ στα τμήματα (1-2) και (2-3), αντίστοιχα. Η ΓΕ και η ΠΓ παρουσιάζονται σε σκαρίφημα στο Σχήμα 2β.



Σχήμα 2β. Σκαρίφημα της ΓΕ και της ΠΓ

Ερώτημα (γ)

Με δεδομένη τη στάθμη στη δεξαμενή Β και θεωρώντας ότι οι τοπικές απώλειες είναι μηδενικές υπολογίζουμε τις γραμμικές απώλειες στο υδραγωγείο, δηλ. $\Sigma h_{f(1-3)} = 62.00\text{m} - 39.54\text{m} = 22.46\text{m}$.

Υπολογίζουμε την Q εφαρμόζοντας την άμεση μέθοδο που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 4.2.3 (βλ. βιβλίο, σελ. 95). Ακολουθούμε τα εξής βήματα:

(i) Υπολογίζουμε την ποσότητα $\text{Re}\sqrt{f}$ από την εξίσωση (4.2-2)

$$\text{Re}\sqrt{f} = \sqrt{\frac{2gh_f}{L} \frac{D^{1.5}}{v}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 9.81\text{m/s}^2 \cdot 22.46\text{m}}{1450\text{m}} \frac{(0.300\text{m})^{1.5}}{1.1 \cdot 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}}} = 82340$$

(ii) Υπολογίζουμε την ποσότητα $1/\sqrt{f}$ από την εξίσωση (3.6-16)

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left[\frac{k_s/D}{3.7} + \frac{2.51}{\text{Re}\sqrt{f}} \right] = -2.0 \log \left[\frac{0}{3.7} + \frac{2.51}{82340} \right] = 9.032$$

(iii) Υπολογίζουμε την ταχύτητα V από την εξίσωση (4.2-3), όπου γίνεται επίλυση της εξίσωσης (3.3-16) ως προς V, δηλ.

$$V = \frac{1}{\sqrt{f}} \sqrt{\frac{2gDh_f}{L}} = 9.032 \sqrt{\frac{2 \cdot 9.81\text{m/s}^2 \cdot 0.300\text{m} \cdot 22.46\text{m}}{1450\text{m}}} = 2.727\text{m/s}$$

και, τέλος,

(iv) Υπολογίζουμε την παροχή Q από την εξίσωση (3.3-1)

$$Q = V \cdot \frac{\pi D^2}{4} = 2.727\text{m/s} \cdot \frac{\pi (0.300\text{m})^2}{4} = 0.193\text{m}^3/\text{s}$$