

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο – Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος

Μάθημα: Υδραυλική και Υδραυλικά Έργα

Ακαδημαϊκό έτος: 2022-2023

Κανονική εξέταση Ιανουαρίου 2023 – Διάρκεια εξέτασης 2:20'

Ονοματεπώνυμο:

Άσκηση 1 (2.0 μονάδες)

Μελετάται το υδροδοτικό και αποχετευτικό σύστημα νέου παραθεριστικού οικισμού, που θα αναπτυχθεί σε έκταση 500 στρεμμάτων, με εκτιμώμενη πυκνότητα πληθυσμού 80 κάτοικοι/ha. Η υδροδότηση του οικισμού θα γίνεται μέσω καταθλιπτικού αγωγού, που θα λειτουργεί 20 ώρες την ημέρα αιχμής. Κάνοντας εύλογες παραδοχές, όπου χρειάζεται, εκτιμήστε: (α) την παροχή σχεδιασμού του εξωτερικού υδραγωγείου και του κύριου τροφοδοτικού αγωγού, και (β) την παροχή σχεδιασμού του κεντρικού συλλεκτήρα ακαθάρτων.

Πληθυσμός σχεδιασμού: $80 \times 50 = 4000$ κάτοικοι (500 στρέμματα = 50 ha)

Κατά κεφαλή υδρευτική κατανάλωση: 200 L/κ/d (τυπική τιμή για παραθεριστική χρήση)

Μέση ημερήσια παροχή: $4000 \times 200 / 86400 = 9.26$ L/s

Μέγιστη ημερήσια παροχή: $1.20 \times 9.26 = 11.11$ L/s ($\lambda_H = 1.20$, τυπική τιμή για παραθεριστική χρήση)

Παροχή σχεδιασμού εξωτερικού υδραγωγείου: $11.11 \times 24/20 = 13.33$ L/s

Μέγιστη ωριαία παροχή: $1.50 \times 11.11 = 13.89$ L/s ($\lambda_\Omega = 1.50$, τυπική τιμή για παραθεριστική χρήση)

Παροχή δύο πυροσβεστικών κρουνών σε λειτουργία: $2 \times 5.00 = 10.00$ L/s

Παροχή σχεδιασμού κύριου τροφοδοτικού αγωγού: $13.89 + 10.00 = 23.89$ L/s

Μέγιστη ημερήσια παροχή ακαθάρτων: $0.80 \times 11.11 = 8.89$ L/s (λαμβάνεται το 80% της παροχής ύδρευσης)

Συντελεστής αιχμής: $P = 2.34$ (εμπειρική σχέση, Ελληνικές προδιαγραφές)

Παροχή αιχμής ακαθάρτων: $2.34 \times 8.89 = 20.79$ L/s

Ειδική παροχή λόγω διηθήσεων: $q_i = 0.155$ L/s/ha (εμπειρική σχέση για νέο δίκτυο)

Παρασιτικές εισροές λόγω διηθήσεων: $0.155 \times 400 = 7.73$ L/s

Παρασιτικές εισροές, με προσαύξηση 50% για παράνομες συνδέσεις (παραδοχή): $1.50 \times 7.73 = 11.60$ L/s

Παροχή σχεδιασμού κεντρικού συλλεκτήρα ακαθάρτων: $20.79 + 11.60 = 32.38$ L/s

Άσκηση 2 (1.5 μονάδα)

Το δίκτυο διανομής οικισμού, στο οποίο αναπτύσσονται κτήρια έως 4 ορόφων, τροφοδοτείται από δεξαμενή, κατώτατης στάθμης +100 m, μέσω χαλύβδινου αγωγού, μήκους 800 m και διαμέτρου 300 mm. Εκτιμήστε την παροχή που θα μπορεί να μεταφέρει ο αγωγός στην αρχή της περιόδου λειτουργίας του, ώστε να ικανοποιεί οριακά την απαίτηση ελάχιστων πιέσεων στην είσοδο του δικτύου, με υψόμετρο εδάφους +75 m.

Απαιτούμενο ύψος πίεσης για κτήρια 4 ορόφων: 20.0 m

Απαιτούμενο ενεργειακό υψόμετρο στην κεφαλή του δικτύου διανομής: $75.0 + 20.0 = 95.0$ m

Διαθέσιμες απώλειες ενέργειας μεταξύ δεξαμενής και κόμβου εισόδου: $100.0 - 95.0 = 5.0$ m

Ισοδύναμη τραχύτητα: 0.1 mm (υπόθεση, με βάση την κατάσταση του αγωγού στην αρχή της λειτουργίας του)

Κινηματική συνεκτικότητα νερού: 1.1×10^{-6} m²/s (φυσική ιδιότητα)

Η παροχή εκτιμάται από το 2^ο τυπικό πρόβλημα των αγωγών υπό πίεση, το οποίο έχει αναλυτική λύση.

Αρχικά, για $h_f = 5.0$ m, $L = 800$ m, και $D = 0.30$ m, υπολογίζεται ο όρος:

$$Re\sqrt{f} = \left(\frac{2 g h_f}{L} \right)^{1/2} \frac{D^{3/2}}{\nu} = 66\,167$$

Αντικαθιστώντας τον όρο $Re\sqrt{f}$ στη σχέση Colebrook-White προκύπτει $f = 0.0165$, οπότε από τη σχέση Darcy-Weisbach λαμβάνεται ταχύτητα 1.89 m/s , που αντιστοιχεί σε παροχή $0.134 \text{ m}^3/\text{s}$.

Άσκηση 3 (1.5 μονάδα)

Οικισμός υδροδοτείται μέσω συστήματος καταθλιπτικού αγωγού και αντλιοστασίου, που αποτελείται από δύο όμοιες παράλληλες αντλίες, ισχύος 45 kW η κάθε μία. Στο σχήμα απεικονίζεται η σχέση παροχής – μανομετρικού ύψους του αγωγού, ενώ η χαρακτηριστική καμπύλη της αντλίας περιγράφεται, προσεγγιστικά, από μια γραμμική σχέση. Δίνεται ότι όταν λειτουργεί η μία αντλία, οι υδραυλικές απώλειες στον καταθλιπτικό αγωγό ανέρχονται σε 20 m , ενώ για έναν ιδεατό αγωγό χωρίς απώλειες, το σύστημα των δύο αντλιών μπορεί να μεταφέρει 150 L/s . Με βάση τα παραπάνω στοιχεία:

(α) Εκτιμήστε την παροχή που μεταφέρεται όταν λειτουργεί η μία μόνο αντλία.

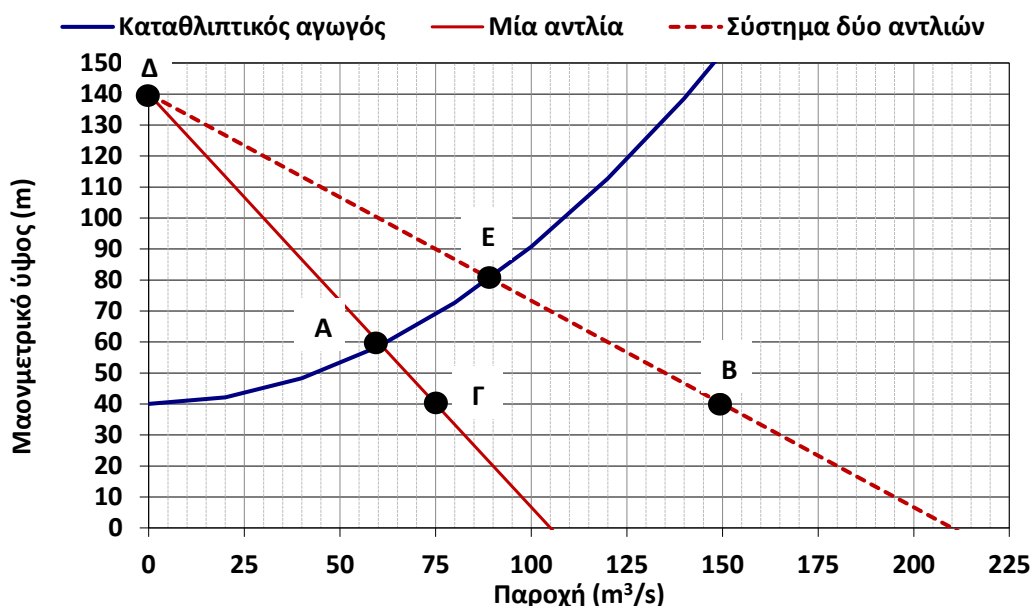
Η σχέση μανομετρικού ύψους – παροχής του καταθλιπτικού αγωγού, της οποίας δίνεται η γραφική παράσταση, είναι $H_\mu = \Delta z + h_f(Q)$. Από το σχήμα προκύπτει ότι $\Delta z = 40 \text{ m}$, άρα το μανομετρικό ύψος όταν λειτουργεί η μία αντλία είναι 60 m . Το σημείο αυτό αντιστοιχεί σε παροχή 60 L/s .

(β) Απεικονίστε την σχέση παροχής-μανομετρικού ύψους της μίας και των δύο αντλιών, και βρείτε γραφικά το σημείο λειτουργίας των δύο αντλιών.

Από το προηγούμενο ερώτημα είναι γνωστό το σημείο λειτουργίας της μίας αντλίας (σημείο Α, μανομετρικό ύψος 60 m , παροχή 60 L/s). Επειδή η χαρακτηριστική καμπύλη της αντλίας προσεγγίζεται από μια γραμμική σχέση, αρκεί να προσδιοριστεί ένα ακόμη σημείο της. Δίνεται ότι για έναν ιδεατό αγωγό χωρίς απώλειες, άρα για μανομετρικό ύψος ίσο με την υψομετρική διαφορά των 40 m , το σύστημα των δύο αντλιών μεταφέρει 150 L/s (σημείο Β). Συνεπώς, η μία αντλία, για μανομετρικό ύψος 40 m μεταφέρει τη μισή παροχή, ήτοι 75 L/s (σημείο Γ). Ενώνοντας τα Α και Γ διαμορφώνεται η καμπύλη της μίας αντλίας και προσδιορίζεται το σημείο Δ (για μηδενική παροχή, το μανομετρικό ύψος είναι 140 m), οπότε σχεδιάζεται και η καμπύλη των δύο αντλιών, ενώνοντας τα σημεία Δ και Β. Η τομή της με την καμπύλη του καταθλιπτικού αγωγού είναι το σημείο λειτουργίας των δύο αντλιών (σημείο Ε), με μανομετρικό ύψος 80 m και παροχή 90 L/s .

(γ) Εκτιμήστε τον βαθμό απόδοσης του συστήματος των δύο αντλιών.

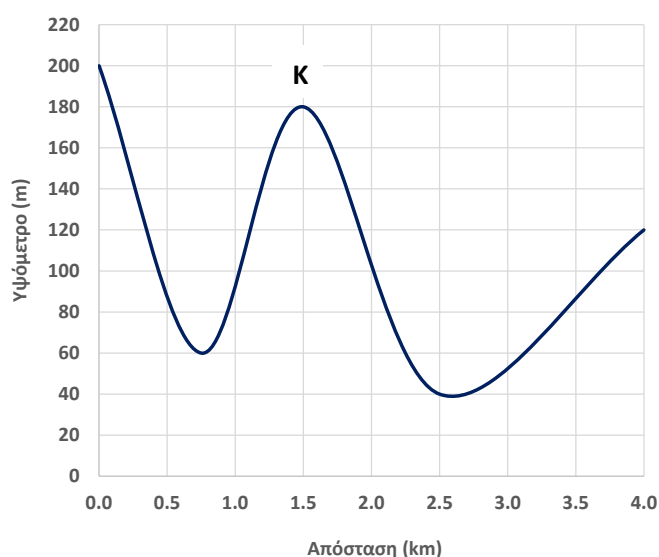
Επιλύεται η σχέση της ισχύος ως προς τον βαθμό απόδοσης, οπότε για συνολική ισχύ 90 kW , παροχή $0.09 \text{ m}^3/\text{s}$ και μανομετρικό ύψος 80 m , προκύπτει $\eta = 0.785$.



Άσκηση 4 (2.0 μονάδες)

Στο σχήμα δίνεται η μηκοτομή υδραγωγείου υπό πίεση, που σχεδιάζεται για να μεταφέρει παροχή 100 L/s από ταμιευτήρα σε δεξαμενή. Η στάθμη του ταμιευτήρα κυμαίνεται από +200 έως +220 m, ενώ η στάθμη της δεξαμενής κυμαίνεται από +115 έως 120 m. Με βάση τα στοιχεία της μηκοτομής, αρχικά επιλέξτε κατάλληλη αντοχή του αγωγού, από τις διαθέσιμες κλάσεις για αγωγούς από HDPE, και στη συνέχεια προσδιορίστε την απαιτούμενη διάμετρο εμπορίου, ώστε σε κανένα σημείο της μηκοτομής να μην αναπτύσσονται υποπίεσεις.

Υπόδειξη: Στους υπολογισμούς για την εκτίμηση της θεωρητικής διαμέτρου, εφαρμόστε τη σχέση Darcy-Weisbach, κάνοντας το πολύ δύο επαναλήψεις για την εκτίμηση του συντελεστή τριβών f .



Η επιλογή της αντοχής του αγωγού γίνεται θεωρώντας ελέγχοντας τις υδροστατικές πιέσεις στο χαμηλότερο υψόμετρο της μηκοτομής (40 m) για τις δυσμενέστερες ενεργειακές συνθήκες, θεωρώντας δηλαδή τον ταμιευτήρα στην ανώτατη στάθμη (220 m). Στο σημείο αυτό αναπτύσσεται μέγιστο ύψος υδροστατικής πίεσης 180 m, ενώ με προσαύξηση της τάξης του 30% για υδραυλικό πλήγμα, προκύπτει απαιτούμενο ύψος πίεσης της τάξης των 240 m. Με βάση τα παραπάνω, επιλέγεται κλάση αγωγού 25 atm.

Η επιλογή της διαμέτρου γίνεται θεωρώντας ότι στο τμήμα του αγωγού μεταξύ του ταμιευτήρα και του υψηλότερου ενδιαμέσου σημείου της μηκοτομής (σημείο Κ) διατίθενται ενεργειακές απώλειες 20 m (θεωρείται η κατώτατη στάθμη ταμιευτήρα, ήτοι 200 m, και ότι η γραμμή ενέργειας διέρχεται από το Κ, εξασφαλίζοντας ότι σε κανένα σημείο της μηκοτομής δεν αναπτύσσονται υποπίεσεις).

Για μήκος 1500 m, απώλειες 20 m, παροχή σχεδιασμού 0.100 m³/s και ισοδύναμη τραχύτητα 1.0 mm (τυπική παραδοχή για σχεδιασμό υδραγωγείων), από την επίλυση του 3ου τυπικού προβλήματος προκύπτει θεωρητική διάμετρος 0.280 m, οπότε λαμβάνεται διάμετρος εμπορίου 400 mm (αγωγός HDPE 25 atm, εσωτερική διάμετρος 290.6 mm).

Άσκηση 5 (3.0 μονάδες)

Εξετάζεται ο σχεδιασμός του πέρατος του κεντρικού συλλεκτήρα ακαθάρτων οικισμού, που αποτελείται από τα τμήματα ΑΒ, ΒΓ, ΓΔ (κυκλικής διατομής), και εν συνεχεία το ανοικτό κανάλι ΔΕ, ορθογωνικής διατομής από σκυρόδεμα, μέσω του οποίου τα λύματα θα οδηγούνται στη μονάδα επεξεργασίας. Η κλίση του εδάφους κατά μήκος των τεσσάρων τμημάτων είναι 2.5%, 0.8%, -0.1%, και 1.0%, αντίστοιχα. Δίνεται ότι:

- οι αγωγοί έχουν ενιαία παροχή σχεδιασμού.
- όπου είναι εφικτό, οι αγωγοί θα τοποθετηθούν παράλληλα στο έδαφος.
- για το τμήμα ΑΒ θα εφαρμοστεί διάμετρος 70 cm, με την οποία ικανοποιείται οριακά ο έλεγχος των μέγιστων ταχυτήτων για αγωγούς ακαθάρτων.

Με βάση τα παραπάνω:

(α) Εκτιμήστε την (ενιαία) παροχή σχεδιασμού των υπό μελέτη τμημάτων.

Η παροχή εκτιμάται με βάση τα χαρακτηριστικά του αγωγού ΑΒ, για τον οποίο είναι γνωστά η διάμετρος ($D = 0.70$ m), η κλίση ($J = 0.025$) και η ταχύτητα ροής ($V = 3.0 =$ m/s, μέγιστη επιτρεπόμενη από τους κανονισμούς). Θεωρώντας $n_0 = 0.015$, από τη σχέση του Manning προκύπτει ταχύτητα πλήρωσης $V_0 = 3.30$ m/s. Συνεπώς, $V/V_0 = 0.91$, που αντιστοιχεί σε ποσοστό πλήρωσης $y/D = 0.65$ και $Q/Q_0 = 0.62$. Η παροχή πλήρωσης υπολογίζεται σε $Q_0 = 1.269$ m³/s, οπότε η παροχή σχεδιασμού είναι $Q = 0.787$ m³/s.

(β) Επιλέξτε κατάλληλη διάμετρο για το τμήμα ΒΓ (για απλούστευση, μετά την επιλογή της διαμέτρου μην υλοποιήσετε τους υδραυλικούς ελέγχους).

Για παροχή $Q = 0.787 \text{ m}^3/\text{s}$ και κλίση ίση με του εδάφους ($J = 0.008$), η διάμετρος επιλέγεται εξαντλώντας το επιτρεπόμενο όριο πλήρωσης, ήτοι $y/D = 0.70$ (εξαρχής λαμβάνεται το μέγιστο επιτρεπόμενο ποσοστό για αγωγούς μεγαλύτερους των 60 cm, καθώς ο ανάντη αγωγός έχει διάμετρο 70 cm). Για $y/D = 0.70$, ισχύει $Q/Q_0 = 0.905$, οπότε $Q_0 = 1.116 \text{ m}^3/\text{s}$. Επιλύοντας τη σχέση του Manning προκύπτει θεωρητική διάμετρος $D = 0.826 \text{ m}$, που στρογγυλεύεται στην αμέσως επόμενη διάμετρο εμπορίου, ήτοι 90 cm.

(γ) Επιλέξτε κατάλληλη διάμετρο και κλίση για το τμήμα ΓΔ.

Το τμήμα αυτό έχει αρνητική κλίση (είναι ανηφορικό), οπότε θεωρείται η ελάχιστη επιτρεπόμενη διάμετρος και αντίστοιχη κλίση για την παροχή σχεδιασμού των $0.787 \text{ m}^3/\text{s}$. Από τον σχετικό πίνακα λαμβάνεται διάμετρος 130 cm και κλίση 0.001 (1.0 m/km).

(δ) Υπολογίστε το θεωρητικό πλάτος του καναλιού ΔΕ, ώστε η διατομή να είναι υδραυλικά βέλτιστη.

Αν η διατομή είναι βέλτιστη, για ορθογωνική διατομή ισχύει η σχέση αναλογίας $b = 2y$. Στην περίπτωση αυτή, η υγρή διατομή είναι $A = by = 2y^2$, η βρεχόμενη περίμετρος είναι $P = b + 2y = 4y$, και η υδραυλική ακτίνα είναι $R = P/A = y/2$. Για κλίση $J = 0.01$, συντελεστή τραχύτητας $n = 0.015$ και παροχή $Q = 0.787 \text{ m}^3/\text{s}$, επιλύεται η σχέση του Manning ως προς το ομοιόμορφο βάθος ροής, ήτοι:

$$y = \left(\frac{n Q}{2^{1/3} J^{1/2}} \right)^{3/8} = 0.412 \text{ m}$$

Σημειώνεται ότι μόνο στην περίπτωση της βέλτιστης διατομής, η σχέση του Manning έχει αναλυτική λύση ως προς το βάθος ροής. Συνεπώς, το βέλτιστο πλάτος της διατομής είναι 0.823 m.

(ε) Ελέγξτε αν η ροή στο κανάλι ΔΕ είναι υποκρίσιμη ή υπερκρίσιμη (για απλούστευση, υποθέστε ότι μπορεί να υλοποιηθεί το πλάτος πυθμένα που υπολογίστηκε στο προηγούμενο ερώτημα).

Εκτιμάται ο αριθμός Froude από τη σχέση:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g y_h}}$$

Στην ορθογωνική διατομή, η ταχύτητα είναι $V = Q/(b y) = 2.32 \text{ m/s}$, ενώ το υδραυλικό βάθος ταυτίζεται με το ομοιόμορφο. Αντικαθιστώντας προκύπτει $Fr = 1.156$, συνεπώς η ροή είναι υπερκρίσιμη.

Στο ίδιο συμπέρασμα καταλήγουμε αν υπολογίσουμε το κρίσιμο βάθος και συγκρίνουμε με το ομοιόμορφο. Η σχέση για ορθογωνικό αγωγό είναι:

$$y_c = \left(\frac{Q^2}{g b^2} \right)^{1/3} = 0.453 > 0.412$$