

Πόλη υδροδοτείται από παλαιό χαλύβδινο αγωγό, μήκους 5000 m και διαμέτρου 250 mm, που μεταφέρει νερό από πηγή σε υψόμετρο +180 m σε δεξαμενή ανώτατης στάθμης +140 m. Την τελευταία θερινή περίοδο παρατηρήθηκαν προβλήματα υδροδότησης σε τμήματα της πόλης. Με βάση εκτιμήσεις της εταιρείας ύδρευσης, η ζήτηση νερού τις ημέρες αιχμής φτάνει στα 6500 m³ και η παροχή την ώρα αιχμής είναι 140 L/s. Σε ελέγχους που έγιναν στο δίκτυο διανομής τις ώρες αιχμής με στάθμη νερού στη δεξαμενή ίση με την ελάχιστη, μετρήθηκε η στάθμη της πιεζομετρικής γραμμής σε τρεις χαρακτηριστικές δυσμενείς θέσεις (Α, Β, Γ), γύρω από τις οποίες αναπτύσσονται κτήρια 4, 3 και 4 ορόφων, αντίστοιχα, και βρέθηκε ίση με +129.5, +117.5 και +108.4 m, αντίστοιχα. Τα αντίστοιχα υψόμετρα εδάφους στα σημεία Α, Β και Γ είναι +103.3, +97.8 και +85.4 m.

α) Να υπολογιστούν ο συντελεστής ωριαίας αιχμής της αστικής κατανάλωσης και να εκτιμηθούν, με βάση εύλογες παραδοχές, ο πληθυσμός που εξυπηρετείται από το δίκτυο και οι ετήσιες υδατικές ανάγκες του.

β) Με βάση τα στοιχεία που δίνονται, ναδειχθεί ότι τα προβλήματα στην υδροδότηση τις ώρες αιχμής οφείλονται σε ανεπάρκεια του εξωτερικού υδραγωγείου και όχι του δικτύου διανομής.

γ) Για την ενίσχυση του εξωτερικού υδραγωγείου εξετάζονται δύο εναλλακτικές λύσεις: (1) η κατασκευή παράλληλου αγωγού βαρύτητας από HDPE 12.5 atm, κατάλληλης διαμέτρου, ή (2) η αύξηση της παροχетеυτικότητας του υφιστάμενου αγωγού, με την κατασκευή αντλιοστασίου 24ωρης λειτουργίας και κατάλληλου μανομετρικού ύψους. Να υπολογιστούν τα χαρακτηριστικά μεγέθη των δύο έργων (διάμετρος παράλληλου αγωγού, μανομετρικό ύψος και ισχύς αντλιοστασίου) και να σχεδιαστούν οι αντίστοιχες πιεζομετρικές γραμμές, για παροχή σχεδιασμού 10% μεγαλύτερη από τη σημερινή παροχή αιχμής.

δ) Να περιγραφεί, συνοπτικά, η διαδικασία οικονομικής σύγκρισης των δύο παραπάνω εναλλακτικών λύσεων.

Ερώτημα (α)

Η εκτιμώμενη ζήτηση νερού τις ημέρες αιχμής αντιστοιχεί σε παροχή $Q_H = 6500 / 86.4 = 75.2$ L/s. Συνεπώς, ο συντελεστής ωριαίας αιχμής υπολογίζεται σε $\lambda_\Omega = Q_\Omega / Q_H = 140.0 / 75.2 = 1.86$, τιμή εύλογη για αστική περιοχή.

Αν θεωρηθεί ο τυπικός συντελεστής ημερήσιας αιχμής για οικιακές χρήσεις ($\lambda_H = 1.50$), τότε η μέση ημερήσια ζήτηση υπολογίζεται σε $6500 / 1.50 = 4333$ m³, οπότε σε ετήσια κλίμακα οι υδατικές ανάγκες της πόλης εκτιμώνται σε $V_a = 4333 \times 365 = 1\,581\,667$ m³ (περίπου 1.5 hm³).

Για μέση ημερήσια ζήτηση 4333 m³, θεωρώντας μέση κατά κεφαλή κατανάλωση 180 L/d, εκτιμάται ότι ο πληθυσμός που εξυπηρετείται από το δίκτυο ανέρχεται σε $4333 / 0.180 \approx 24\,000$ άτομα.

Ερώτημα (β)

Αρχικά, υπολογίζουμε την παροχетеυτικότητα του εξωτερικού υδραγωγείου, λαμβάνοντας υπόψη τη διάταξη και τα χαρακτηριστικά του αγωγού βαρύτητας. Θεωρώντας τη δεξαμενή στην ανώτατη στάθμη της, οι ενεργειακές απώλειες κατά μήκος του αγωγού ανέρχονται σε $h_f = 180 - 140 = 40$ m,

που αντιστοιχεί σε κλίση της πιεζομετρικής γραμμής ίση με $J = 40 / 5000 = 0.008$. Επειδή ο αγωγός είναι χαλύβδινος, η εσωτερική του διάμετρος ταυτίζεται με την ονομαστική, δηλαδή $D = 0.250$ m. Επιπλέον, επειδή το υδραγωγείο είναι παλιό, θεωρούμε ισοδύναμη τραχύτητα $\varepsilon = 1.0$ mm, που αντιστοιχεί σε αδιαστατοποιημένη τραχύτητα $\varepsilon^* = \varepsilon / \varepsilon_0 = 1/0.05 = 20$. Θεωρώντας το σύνηθες εύρος διαμέτρων και ταχυτήτων, οι συντελεστές της γενικευμένης εξίσωσης Manning είναι:

$$\beta = 0.3 + 0.0005 \varepsilon^* + 0.02 / (1 + 6.8 \varepsilon^*) = 0.310$$

$$\gamma = 0.096 / (1 + 0.31 \varepsilon^*) = 0.0133$$

$$N = 0.00687 (1 + 1.6 \varepsilon^*)^{0.16} = 0.0120$$

Η γενικευμένη εξίσωση Manning επιλύεται ως προς την παροχή:

$$Q = \frac{\pi}{2^{3+\beta} N} D^{(5+\beta)/2} J^{(1+\gamma)/2} = 0.0576 \text{ m}^3/\text{s}$$

Συνεπώς, η παροχή που μπορεί να μεταφέρει με ασφάλεια ο αγωγός ανέρχεται σε 57.6 L/s, που είναι αρκετά μικρότερη από τη ζητούμενη τις ημέρες αιχμής, ήτοι 75.2 L/s.

Στη συνέχεια, αποδεικνύουμε ότι το δίκτυο διανομής είναι επαρκές, εξετάζοντας τις πιέσεις που αναπτύσσονται στους τρεις χαρακτηριστικούς κόμβους. Ειδικότερα, σε κάθε κόμβο υπολογίζονται το διαθέσιμο ύψος πίεσης, ως διαφορά του ενεργειακού από το τοπογραφικό υψόμετρο και το ελάχιστο ζητούμενο ύψος πίεσης, με βάση τον αριθμό των ορόφων που αναπτύσσονται γύρω από κάθε κόμβο, χρησιμοποιώντας την εμπειρική σχέση $p_{\min} = 4(N + 1)$. Τα αποτελέσματα από τον έλεγχο πιέσεων συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Κόμβος	Στάθμη πιεζομετρικής γραμμής (m)	Υψόμετρο εδάφους (m)	Ύψος πίεσης (m)	Πλήθος ορόφων	Απαιτούμενο ύψος πίεσης (m)	Επάρκεια πίεσης
A	129.5	103.3	26.2	4	20.0	Ναι
B	117.5	97.8	19.7	3	16.0	Ναι
Γ	108.4	85.4	23.0	4	20.0	Ναι

Ερώτημα (γ)

Η παροχή σχεδιασμού του εξωτερικού υδραγωγείου ισούται με τη σημερινή μέγιστη ημερήσια, αυξημένη κατά 10%, δηλαδή $Q = 1.10 \times 75.2 = 82.8$ L/s.

Η πρώτη λύση που εξετάζεται αφορά στην κατασκευή ενός παράλληλου στον υφιστάμενο αγωγού, που θα σχεδιαστεί με παροχή ίση με τη διαφορά της ζητούμενης από αυτή που μπορεί να μεταφέρει ο υφιστάμενος χαλύβδινος αγωγός, ήτοι $82.8 - 57.6 = 25.1$ L/s. Η κλίση της πιεζομετρικής γραμμής λαμβάνεται ίση με $J = 0.008$ (κοινή για τους δύο αγωγούς), ενώ θεωρείται η προσαυξημένη τιμή της ισοδύναμης τραχύτητας ($\varepsilon = 1.0$ mm), καθώς το έργο σχεδιάζεται για μεγάλο χρονικό ορίζοντα. Επιλύοντας τη γενικευμένη εξίσωση Manning ως προς τη διάμετρο προκύπτει:

$$D = \left(\frac{4^{3+\beta} N^2 Q^2}{\pi^2 J^{1+\gamma}} \right)^{\frac{1}{5+\beta}} = 0.183 \text{ m}$$

Για αγωγό HDPE 12.5 atm, η παραπάνω διάμετρος αντιστοιχεί σε τιμή εμπορίου 225 mm.

Η δεύτερη λύση που εξετάζεται αφορά στην κατασκευή αντλιοστασίου, με σκοπό την αύξηση των ενεργειακού διαθέσιμου και, συνακόλουθα, την αύξηση της παροχетеυτικότητας του υφιστάμενου αγωγού. Για παροχή σχεδιασμού 82.8 L/s, διάμετρο $D = 0.250$ m και ισοδύναμη τραχύτητα $\varepsilon = 1.0$

mm, επιλύοντας τη γενικευμένη εξίσωση Manning ως προς την κλίση της πιεζομετρικής γραμμής προκύπτει:

$$J = \left(\frac{4^{3+\beta} N^2 Q^2}{\pi^2 D^{5+\beta}} \right)^{\frac{1}{1+\gamma}} = 0.0163$$

Για την παραπάνω κλίση, που είναι προφανώς μεγαλύτερη της υφιστάμενης, οι ενεργειακές απώλειες κατά μήκος του αγωγού ανέρχονται σε $h_f = 0.0163 \times 6500 = 81.7$ m. Συνεπώς, το μανομετρικό ύψος του αντλιοστασίου είναι ίσο με:

$$H_\mu = h_f - (z_{\Pi} - z_{\Delta}) = 81.7 - 40.0 = 41.7 \text{ m}$$

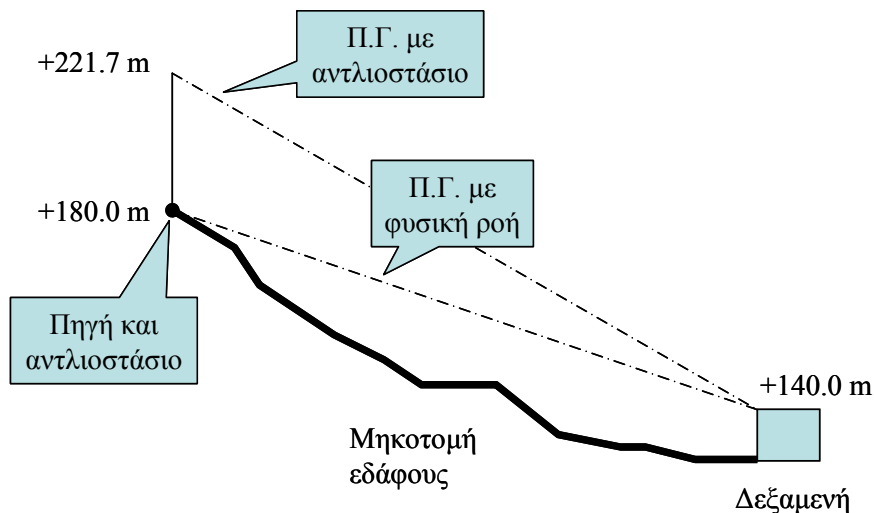
Ο βαθμός απόδοσης του αντλιοστασίου εκτιμάται από την εμπειρική σχέση:

$$n = 0.95 - (1.166 + 7142 Q)^{-1/3} = 0.831 \text{ (Q σε m}^3/\text{s)}$$

Η ισχύς του αντλιοστασίου υπολογίζεται από τη σχέση:

$$P = \gamma Q H_\mu / n = 40.73 \text{ KW (}\gamma = 9.81 \text{ KN/m}^3\text{)}$$

Η πιεζομετρική γραμμή για τις δύο εναλλακτικές λύσεις (με φυσική ροή και με χρήση αντλιοστασίου) απεικονίζεται στο ακόλουθο σκαρίφημα:



Ερώτημα (δ)

Οι δύο εναλλακτικές λύσεις δεν μπορούν να συγκριθούν άμεσα, καθώς για τον παράλληλο αγωγό λαμβάνεται υπόψη μόνο το πάγιο κόστος (κόστος αγοράς και τοποθέτησης), ενώ για το αντλιοστάσιο λαμβάνονται υπόψη πάγια και μεταβλητά κόστη, για όλη την οικονομική ζωή του υδραγωγείου (50 χρόνια). Συγκεκριμένα:

- κόστος αγοράς και τοποθέτησης αντλιοστασίου (περιλαμβάνεται και η αγορά εφεδρικής αντλίας), που εξαρτάται από τη διάταξη των αντλιών και τη ζητούμενη ισχύ
- κόστος αντικατάστασης ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού (μετά από 20-25 έτη)
- ετήσια δαπάνη ενέργειας, που εξαρτάται από το μανομετρικό ύψος και την ετήσια κατανάλωση νερού
- ετήσιο κόστος συντήρησης, που συνήθως εκτιμάται ως ποσοστό του αρχικού κόστους.

Προκειμένου να είναι συγκρίσιμα, όλα τα πάγια οικονομικά μεγέθη (αρχικά κόστη και κόστη αντικατάστασης) ανάγονται σε ετήσια δαπάνη, με βάση τον συντελεστή απόσβεσης κεφαλαίου, που λαμβάνεται ίσος με 6-7%. Στη συνέχεια, αθροίζονται τα μεγέθη κάθε λύσης (για τον αγωγό θεωρείται μόνο το πάγιο κόστος) και συγκρίνονται ως προς την αντίστοιχη ετήσια δαπάνη.