

Αστική περιοχή υδροδοτείται από χαλύβδινο αγωγό, μήκους 6000 m και διαμέτρου 250 mm, που μεταφέρει νερό από πηγή σε υψόμετρο +175 m, σε δεξαμενή ανώτατης στάθμης +165 m. Ο αγωγός είχε σχεδιαστεί ώστε να εξυπηρετεί 7500 κατοίκους, με ειδική κατανάλωση (μέση ημερήσια) 190 L/d/k. Επειδή η περιοχή παρουσιάζει ραγδαία ανάπτυξη, αποφασίστηκε η ενίσχυση του συστήματος, ώστε να εξυπηρετεί 50% περισσότερο πληθυσμό σε σχέση με τον αρχικό σχεδιασμό, χωρίς διαφοροποίηση της ειδικής κατανάλωσης και των μεγεθών χρονικής διακύμανσης της ζήτησης. Για το σκοπό αυτό εξετάζονται δύο εναλλακτικές διατάξεις: (1) η κατασκευή αντλιοστασίου αμέσως κατάντη της πηγής, με χρήση του υφιστάμενου αγωγού ως καταθλιπτικού, ή (2) η κατασκευή ανακουφιστικού αγωγού βαρύτητας από HDPE 16 atm, παράλληλα στον υφιστάμενο.

(α) Να εκτιμηθεί ο συντελεστής ημερήσιας αιχμής ( $\lambda_H$ ) με βάση τον οποίο διαστασιολογήθηκε ο αγωγός.

(β) Να εκτιμηθούν οι παροχές σχεδιασμού και τα χαρακτηριστικά μεγέθη των δύο διατάξεων, ήτοι: (1) για την πρώτη διάταξη το μανομετρικό ύψος, η εγκατεστημένη ισχύς και η ετήσια κατανάλωση ενέργειας του αντλιοστασίου (θεωρήστε παράλληλη λειτουργία δύο αντλιών επί 18 ώρες ημερησίως, με βαθμό απόδοσης 80%), και (2) για τη δεύτερη διάταξη η διάμετρος του παράλληλου ανακουφιστικού αγωγού.

(γ) Να υπολογιστούν τα κόστη των δύο διατάξεων, ώστε να επιλεγεί η πιο οικονομική από τις δύο. Θεωρήστε ωφέλιμη διάρκεια ζωής έργων Π/Μ 40 έτη και έργων Η/Μ 20 έτη, επιτόκιο αναγωγής 4.0%, κόστος προμήθειας και εγκατάστασης αγωγών  $60 \times 10^D$  (€/m, όπου D η διάμετρος εμπορίου σε m), κόστος προμήθειας και εγκατάστασης αντλιών 800 €/kW, κόστος ενέργειας με τις επιβαρύνσεις 0.08 €/kWh.

### Ερώτημα (α)

Το υδροδοτικό σύστημα έχει σχεδιαστεί για μέση ημερήσια παροχή  $Q_E = 7500 \times 0.190 / 86400 = 0.0165 \text{ m}^3/\text{s}$ . Η μέγιστη ημερήσια παροχή θεωρείται ότι ταυτίζεται με την παροχεταιτικότητα του εξωτερικού υδραγωγείου (αφού πρόκειται για αγωγό βαρύτητας), η οποία εκτιμάται με βάση τα χαρακτηριστικά του αγωγού. Για κλίση ενέργειας  $J = (175 - 165) / 6000 = 0.0017$ , υπολογιστική διάμετρο ίση με την εξωτερική ( $D = 0.250 \text{ m}$ ) και συντελεστή τραχύτητας  $\epsilon = 1.0 \text{ mm}$  (τυπική τιμή σχεδιασμού), επιλύεται η γενικευμένη εξίσωση Manning ως προς την παροχή και προκύπτει  $Q_H = 0.0260 \text{ m}^3/\text{s}$ . Συνεπώς, ο συντελεστής ημερήσιας αιχμής ανέρχεται σε  $\lambda_H = 0.0260 / 0.0165 = 1.58$ , τιμή που κρίνεται εύλογη για περιοχή όπου αναπτύσσονται οικιακές χρήσεις<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Στην πραγματικότητα, στο σχεδιασμό θα πρέπει να είχε ληφθεί λίγο πιο μικρός συντελεστής, προφανώς  $\lambda_H = 1.50$ , και συνακόλουθα εκτιμήθηκε αντίστοιχα μικρότερη ημερήσια παροχή αιχμής. Η τελική αυξημένη παροχή προέκυψε επειδή η θεωρητική διάμετρος που υπολογίστηκε στρογγυλεύτηκε στην αμέσως μεγαλύτερη τιμή εμπορίου ( $D = 250 \text{ mm}$ ).

### Ερώτημα (β1)

Δεδομένου ότι τόσο η ειδική κατανάλωση όσο και ο συντελεστής χρονικής διακύμανσης της ζήτησης διατηρούνται σταθερά, η μέγιστη ημερήσια παροχή για το νέο σχεδιασμό προκύπτει αυξάνοντας την υφιστάμενη κατά 50%, ήτοι  $Q_H' = 1.50 \times 0.0260 = 0.0390 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Η πρώτη διάταξη αφορά στην κατασκευή αντλιοστασίου αμέσως κατάντη της πηγής, με σκοπό την αύξηση των ενεργειακού διαθέσιμου και, συνακόλουθα, της παροχетеυτικότητας του υφιστάμενου αγωγού, με χρήση του ως καταθλιπτικού. Αφού το αντλιοστάσιο λειτουργεί 18 ώρες ημερησίως, η παροχή σχεδιασμού του αγωγού προσαυξάνεται κατά 24/18 σε σχέση με τη μέγιστη ημερήσια, οπότε λαμβάνεται ίση με  $Q_A = 24/18 \times 0.0390 = 0.0520 \text{ m}^3/\text{s}$ . Η εν λόγω παροχή θα ισομοιράζεται μεταξύ των δύο αντλιών του συγκροτήματος (εφόσον προφανώς αυτές αποδίδουν την ίδια ισχύ<sup>1</sup>).

Για την παραπάνω παροχή, από τη γενικευμένη εξίσωση Manning υπολογίζεται η απαιτούμενη κλίση της πιεζομετρικής γραμμής σε  $J = 0.0065$ , οπότε οι ενεργειακές απώλειες μεταξύ του αντλιοστασίου (σε ενεργειακό υψόμετρο πρακτικά ίσο με αυτό της πηγής, ήτοι +175 m) και της ανώτατης στάθμης της δεξαμενής (+165 m) ανέρχονται σε  $h_f = 0.0065 \times 6000 = 39.3 \text{ m}$ . Συνεπώς, το μανομετρικό ύψος του αντλιοστασίου (κοινό για τις δύο αντλίες) εκτιμάται σε  $H_\mu = h_f - (z_\Pi - z_\Delta) = 39.3 - 10.0 = 29.3 \text{ m}$ .

Για βαθμό απόδοσης 80%, η συνολική ισχύς του αντλιοστασίου εκτιμάται σε  $P = \gamma Q H_\mu / \eta = 18.7 \text{ KW}$  (όπου  $\gamma = 9.81 \text{ kN/m}^3$ ). Η ισχύς αυτή ισομοιράζεται στις δύο αντλίες<sup>2</sup>, ενώ ακόμη θεωρείται μια τρίτη εφεδρική, για λόγους ασφαλείας. Συνεπώς, η εγκατεστημένη ισχύς του αντλιοστασίου ανέρχεται σε  $P_{\text{εγκ}} = 1.5 \times 18.7 = 28.0 \text{ kW}$ .

Τέλος, η κατανάλωση ενέργειας προκύπτει με βάση την ετήσια ζήτηση νερού στο πέρας της περιόδου σχεδιασμού, η οποία εκτιμάται σε  $V_E = 1.50 \times 7000 \times 0.190 \times 365 = 780\,188 \text{ m}^3$  (ο συντελεστής 1.50 αναφέρεται στην αύξηση του πληθυσμού σχεδιασμού της αρχικής μελέτης κατά 50%). Η ετήσια ενέργεια δίνεται από τη σχέση  $E = \gamma V_E H_\mu / \eta = 280\,094\,362 \text{ kJ}$  ή  $77\,804 \text{ kWh}$  ( $1 \text{ kWh} = 3600 \text{ kJ}$ ).

### Ερώτημα (β2)

Η παροχή σχεδιασμού για τη δεύτερη διάταξη, ήτοι τον παράλληλο αγωγό από HDPE 16 atm, είναι ίση με τη διαφορά της ζητούμενης από την παροχетеυτικότητα του υφιστάμενου χαλύβδινου αγωγού, ήτοι  $0.0390 - 0.0260 = 0.0130 \text{ m}^3/\text{s}$ . Η κλίση της πιεζομετρικής γραμμής λαμβάνεται ίση με  $J = (175 - 165) / 6000 = 0.0017$  (κοινή για τους δύο αγωγούς), ενώ και πάλι θεωρείται ισοδύναμη τραχύτητα  $\epsilon = 1.0 \text{ mm}$ , καθώς το έργο σχεδιάζεται για χρονικό ορίζοντα 40 ετών. Επιλύοντας τη γενικευμένη εξίσωση Manning ως προς τη διάμετρο προκύπτει  $D = 0.193 \text{ m}$ , η οποία στρογγυλεύεται στην αμέσως μεγαλύτερη διάμετρο εμπορίου, ήτοι 250 mm (με εσωτερική διάμετρο 204.6 mm).

### Ερώτημα (γ)

Η ωφέλιμη οικονομική ζωή των έργων Π/Μ (αγωγός HDPE – διάταξη 2) ανέρχεται σε 40 έτη, ενώ των έργων Η/Μ (αντλιοστάσιο – διάταξη 1) σε 20 έτη. Συνεπώς, τα έργα της πρώτης διάταξης πρέπει να αντικατασταθούν στο πέρας των 20 πρώτων ετών.

Το κόστος αγοράς και τοποθέτησης του αντλιοστασίου, για εγκατεστημένη ισχύ 28.0 kW, ανέρχεται σε  $800 \times 28.0 = 22\,400 \text{ €}$ . Στα 20 έτη, ο εξοπλισμός πρέπει να αντικατασταθεί, οπότε η σχετική δαπάνη ανάγεται σε αρχικό κόστος, με βάση τη σχέση  $P = F(1+i)^n$ , όπου  $i$  ο συντελεστής απόσβεσης κεφαλαίου και  $n$  ο χρόνος απόσβεσης σε έτη. Συνεπώς, το κόστος αντικατάστασης σε σημερινές τιμές ισούται με  $22\,400 / (1 + 0.04)^{20} = 10\,223 \text{ €}$ , ενώ το ολικό πάγιο κόστος του αντλιοστασίου ανέρχεται

<sup>1</sup> Για να μειωθεί το κόστος του αντλιοστασίου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικοί συνδυασμοί αντλιών, ενώ τις περιόδους που επαρκεί η παροχетеυτικότητα του αγωγού να μη γίνεται καθόλου χρήση των αντλιών.

<sup>2</sup> Με την προϋπόθεση ότι διατίθενται στο εμπόριο αντλίες των 9.35 KW.

σε  $22\,400 + 10\,223 = 32\,623$  €. Το συνολικό πάγιο κόστος ανάγεται σε ετήσια απόσβεση κεφαλαίου, με βάση την ακόλουθη σχέση:

$$A = P \frac{i(1+i)^n}{[(1+i)^n - 1]} = 32\,623 \frac{0.04(1+0.04)^{20}}{[(1+0.04)^{20} - 1]} = 2\,400 \text{ €}$$

Στο παραπάνω κόστος προστίθεται η ετήσια δαπάνη για την κατανάλωση ενέργειας, η οποία ισούται με  $0.08 \times 77\,804 = 6\,225$  €. Συνεπώς, το συνολικό ανηγμένο κόστος της πρώτης διάταξης εκτιμάται σε  $2\,400 + 6\,224 = 8\,625$  €.

Το ανά μονάδα μήκους κόστος αγοράς και τοποθέτησης του αγωγού, για διάμετρο εμπορίου 250 mm, εκτιμάται σε  $60 \times 10^{0.250} = 106.7$  €/m. Για μήκος αγωγού 6000 m, προκύπτει πάγιο κόστος 640 181 €, το οποίο ανάγεται σε ετήσια απόσβεση κεφαλαίου θεωρώντας χρόνο απόσβεσης 40 έτη, ήτοι:

$$A = 640\,181 \frac{0.04(1+0.04)^{40}}{[(1+0.04)^{40} - 1]} = 32\,344 \text{ €}$$

Συνεπώς, η λύση του αντλιοστασίου είναι εμφανώς πιο οικονομική σε σύγκριση με την κατασκευή παράλληλου αγωγού.