

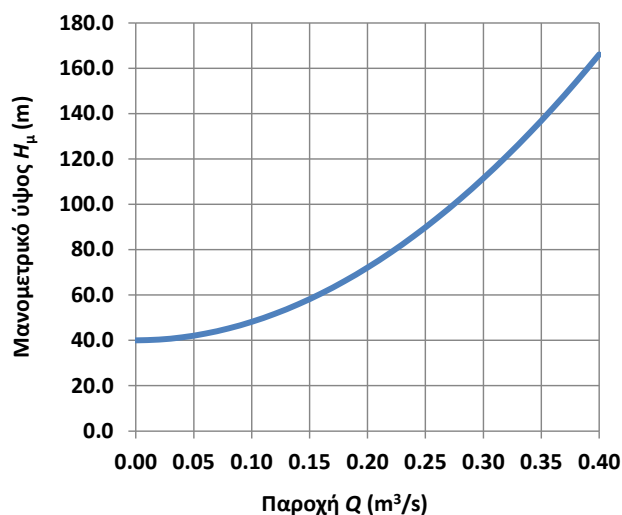
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ - ΤΟΜΕΑΣ ΥΔ. ΠΟΡΩΝ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΜΑΘΗΜΑ: ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΚΑΙ ΥΔΡΑΥΛΙΚΑ ΕΡΓΑ
ΕΞΕΤΑΣΗ ΠΡΟΟΔΟΥ ΝΟΕΜΒΡΙΟΥ 2017

Σύνταξη ασκήσεων: Α. Ευστρατιάδης, Π. Κοσσιέρης, Χ. Μακρόπουλος, Δ. Κουτσογιάννης

Επίλυση ασκήσεων: Α. Ευστρατιάδης

Άσκηση 3

Η υδροδότηση μιας μικρής πόλης γίνεται μέσω χαλύβδινου καταθλιπτικού αγωγού, μήκους 2000 m, που μεταφέρει νερό από τα έργα υδροληψίας στη δεξαμενή. Το αντλιοστάσιο αποτελείται από τρεις όμοιες παράλληλες αντλίες, ισχύος 60 kW η καθεμία, η μία απ' τις οποίες είναι εφεδρική. Τη χειμερινή περίοδο λειτουργεί μία μόνο αντλία, ενώ την ημέρα αιχμής λειτουργούν δύο αντλίες, για διάστημα 18 ωρών. Στο σχήμα δίνεται η καμπύλη μανομετρικού ύψους-παροχής του καταθλιπτικού αγωγού, ενώ η χαρακτηριστική καμπύλη της αντλίας προσεγγίζεται από την εξίσωση $H_{\mu} = a - b Q$, όπου H_{μ} το μανομετρικό ύψος (m), Q η παροχή (m^3/s), $a = 100$ m και $b = 500$ s/m². Με βάση τα παραπάνω στοιχεία εκτιμήστε:



(α) την παροχή, το μανομετρικό ύψος και τον βαθμό απόδοσης της μίας αντλίας και του συστήματος των δύο αντλιών, εντοπίζοντας γραφικά το αντίστοιχο σημείο λειτουργίας τους.

(β) την υψομετρική διαφορά αντλιοστασίου-δεξαμενής και τη διάμετρο του καταθλιπτικού αγωγού, εφόσον η σχέση μανομετρικού ύψους-παροχής έχει υπολογιστεί για ισοδύναμη τραχύτητα 1 mm.

(γ) την ζήτηση νερού την ημέρα αιχμής και την απαιτούμενη ωφέλιμη χωρητικότητα της δεξαμενής, κάνοντας εύλογες παραδοχές, όπου απαιτείται.

Ερώτημα (α)

Για την (γραφική) εκτίμηση της παροχής και του μανομετρικού ύψους, αρκεί να εντοπιστούν τα σημεία τομής των χαρακτηριστικών καμπυλών της μίας αντλίας και του συστήματος των δύο παράλληλων αντλιών, με την καμπύλη του καταθλιπτικού αγωγού, που απεικονίζεται στο γράφημα της Εικόνας 1.

Η χαρακτηριστική καμπύλη της μίας αντλίας δίνεται από τη σχέση:

$$H_{\mu} = a - b Q = 100 - 500 Q$$

ενώ η χαρακτηριστική καμπύλη του συστήματος των δύο παράλληλων αντλιών είναι:

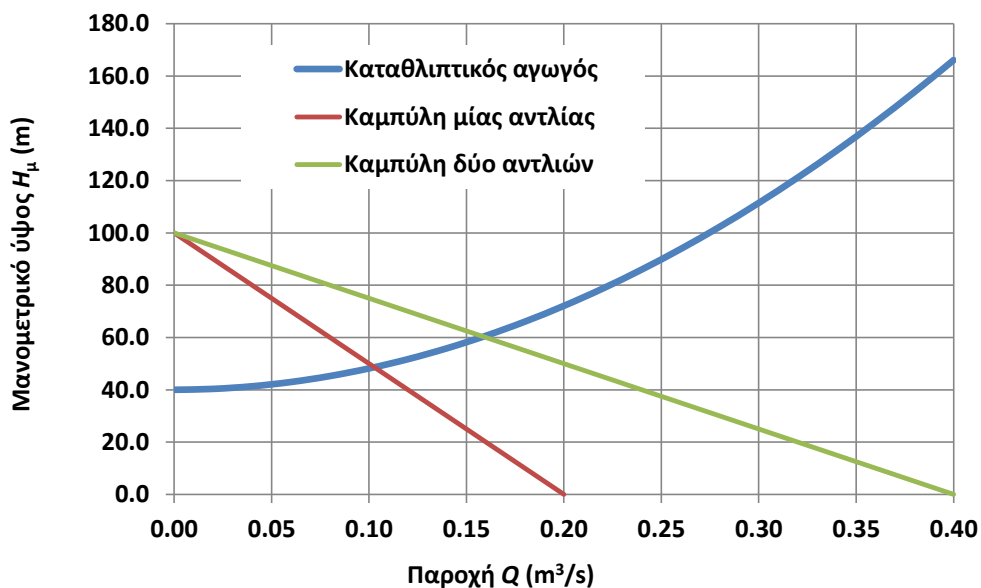
$$H_{\mu} = a - b Q/2 = 100 - 250 Q$$

Οι δύο σχέσεις έχουν απεικονιστεί στο γράφημα. Τα αντίστοιχα σημεία τομής, ήτοι τα σημεία λειτουργίας της μίας αντλίας και του συστήματος των δύο αντλιών είναι ($Q_1 = 0.103 \text{ m}^3/\text{s}$, $H_{\mu 1} = 48.5 \text{ m}$) και ($Q_2 = 0.159 \text{ m}^3/\text{s}$, $H_{\mu 2} = 60.3 \text{ m}$), αντίστοιχα.

Ο αντίστοιχος βαθμός απόδοσης, η , εκτιμάται από τη σχέση:

$$P = \gamma Q H_{\mu} / \eta$$

όπου P η ισχύς της αντλίας (ή συστήματος αντλιών) και $\gamma = 9.81 \text{ kN/m}^3$. Συγκεκριμένα, για την περίπτωση της μίας αντλίας, με $P_1 = 60 \text{ kW}$, $Q_1 = 0.103 \text{ m}^3/\text{s}$ και $H_{\mu 1} = 48.5 \text{ m}$, προκύπτει $\eta_1 = 0.817$, ενώ για τις δύο αντλίες, με $P_2 = 2 P_1 = 120 \text{ kW}$, $Q_2 = 0.159 \text{ m}^3/\text{s}$ και $H_{\mu 2} = 60.3 \text{ m}$ προκύπτει $\eta_2 = 0.783$.



Εικόνα 1: Γραφική απεικόνιση σχέσεων παροχής – μανομετρικού ύψους καταθλιπτικού αγωγού και συστημάτων μίας και δύο αντλιών.

Σημείωση: Ως γνωστό, η τοποθέτηση μιας ίδιας παράλληλης αντλίας, ήτοι ο διπλασιασμός της ισχύος, δεν συνεπάγεται διπλασιασμό ούτε του μανομετρικού ύψους ούτε της παροχής. Επιπρόσθετα, ο βαθμός απόδοσης του συστήματος είναι ελαφρά μικρότερος από τον βαθμό απόδοσης της μεμονωμένης αντλίας, καθώς η παροχή που διέρχεται από κάθε παράλληλη αντλία, ήτοι $Q_2/2 = 0.079 \text{ m}^3/\text{s}$, είναι μικρότερη της παροχής που διέρχεται από τη μεμονωμένη αντλία, ήτοι $Q_1 = 0.103 \text{ m}^3/\text{s}$.

Ερώτημα (β)

Η σχέση που συνδέει την παροχή του καταθλιπτικού αγωγού με το μανομετρικό ύψος είναι:

$$H_\mu = \Delta z + J L$$

όπου Δz η υψομετρική διαφορά μεταξύ του αντλιοστασίου και του κατάντη ενεργειακού υψομέτρου (στην προκειμένη περίπτωση, της δεξαμενής), L το μήκος του αγωγού (2000 m) και J η κλίση της πιεζομετρικής γραμμής, που είναι συνάρτηση της παροχής και της διαμέτρου.

Για μηδενική παροχή, ισχύει $H_\mu = \Delta z$, οπότε από το διάγραμμα προκύπτει άμεσα ότι $\Delta z = 40.0 \text{ m}$. Συνεπώς, η κλίση της πιεζομετρικής γραμμής είναι $J_1 = (48.5 - 40.0) / 2000 = 0.0043$, όταν λειτουργεί η μία αντλία, με παροχή $Q_1 = 0.103 \text{ m}^3/\text{s}$, ενώ η κλίση γίνεται $J_2 = (60.3 - 40.0) / 2000 = 0.0101$, όταν λειτουργούν δύο αντλίες, οπότε μεταφέρεται παροχή $Q_2 = 0.159 \text{ m}^3/\text{s}$.

Για ισοδύναμη τραχύτητα $\varepsilon = 1.0 \text{ mm}$, και για οποιοδήποτε ζεύγος παροχής και κλίσης, επιλύεται η σχέση υδραυλικών απωλειών (π.χ. Darcy-Weisbach, γενικευμένη Manning) ως προς τη διάμετρο, από την οποία προκύπτει $D = 0.350 \text{ m}$. Συνεπώς, η ονομαστική διάμετρος του αγωγού από χάλυβα είναι Ø350.

Σημείωση: Λόγω των προσεγγίσεων που γίνονται στην άσκηση (γραφικός εντοπισμός σημείου λειτουργίας, εφαρμογή οποιασδήποτε σχέσης υδραυλικών απωλειών), η διάμετρος που προκύπτει από τους υπολογισμούς ενδέχεται να είναι ελαφρά διαφορετική από την τιμή $D = 0.350 \text{ m}$. Ωστόσο, αφού πρόκειται για τυποποιημένο αγωγό, το αποτέλεσμα πρέπει να στρογγυλευτεί στην πιο κοντινή διάμετρο εμπορίου.

Ερώτημα (γ)

Η ζήτηση νερού την ημέρα αιχμής εκτιμάται πολλαπλασιάζοντας την παροχή του συστήματος των δύο αντλιών επί τον αντίστοιχο χρόνο λειτουργίας τους (18 h), ήτοι:

$$V_H = 0.159 \times 18 \times 3600 = 10\,303 \text{ m}^3$$

Η απαιτούμενη ωφέλιμη χωρητικότητα της δεξαμενής είναι άθροισμα του ρυθμιστικού όγκου, που εκτιμάται ως ποσοστό της ζήτησης νερού της ημέρας αιχμής, και του όγκου ασφαλείας, που εκτιμάται ως το μέγιστο μεταξύ του όγκου βλάβης του καταθλιπτικού αγωγού και του όγκου πυρκαγιάς. Δεδομένου ότι οι αντίστοιχες παροχές είναι 0.159 και 0.010 m³/s, είναι προφανές ότι η περίπτωση βλάβης είναι πολύ δυσμενέστερη της πυρκαγιάς, άρα ο όγκος ασφαλείας θα εκτιμηθεί για το σενάριο βλάβης του καταθλιπτικού αγωγού.

Θεωρώντας, ενδεικτικά, ρυθμιστικό όγκο ίσο με το 30% του μέγιστου ημερήσιου και χρόνο βλάβης πέντε ώρες, προκύπτει ότι ο ωφέλιμος όγκος της δεξαμενής είναι:

$$V_A = 0.30 \times 10\,303 + 0.159 \times 5 \times 3600 = 5\,953 \text{ m}^3$$

Στρογγυλεύοντας, λαμβάνεται τελικά ωφέλιμος όγκος ίσος με 6 000 m³.

Σημείωση: Στις πλείστες των περιπτώσεων, ο όγκος βλάβης είναι δυσμενέστερος του όγκου πυρκαγιάς, εκτός και αν αναφερόμαστε σε πολύ μικρό οικισμό, με αντίστοιχα μικρή παροχή σχεδιασμού του εξωτερικού υδραγωγείου, ή υπάρχει κάποια ειδική πρόβλεψη για την πυρόσβεση (π.χ. σε περιοχές με σημαντικές βιομηχανικές χρήσεις).

Άσκηση 4

Εξετάζεται η αντικατάσταση του κύριου τροφοδοτικού αγωγού του δικτύου διανομής παραθαλάσσιου οικισμού με σημαντική τουριστική ανάπτυξη, καθώς ο υφιστάμενος χαλύβδινος αγωγός, μήκους 1800 m και διαμέτρου 250 mm, παρουσιάζει λειτουργικά προβλήματα, ιδιαίτερα τη θερινή περίοδο. Ο αγωγός συνδέει τη δεξαμενή, κατώτατης στάθμης ύδατος +65 m, με τον κόμβο εισόδου του δικτύου, σε υψόμετρο +45 m, στην περιοχή του οποίου αναπτύσσονται έως τριώροφα κτήρια. Λαμβάνοντας ως πληθυσμό σχεδιασμού 5000 μόνιμους κατοίκους και 3000 τουρίστες, και κάνοντας εύλογες παραδοχές, όπου απαιτείται:

(α) Εκτιμήστε την παροχή σχεδιασμού του εξωτερικού υδραγωγείου, δεδομένου ότι η μεταφορά του νερού στη δεξαμενή γίνεται μέσω καταθλιπτικού αγωγού 20ωρης λειτουργίας, και του κύριου τροφοδοτικού αγωγού του δικτύου διανομής, με την υπόθεση ενεργοποίησης δύο πυροσβεστικών κρουνών, ονομαστικής παροχής 5.0 L/s έκαστος.

(β) Ελέγξτε αν για την παροχή σχεδιασμού που εκτιμήσατε θα μπορούν να υδροδοτηθούν ομαλά τα κτήρια στην είσοδο του δικτύου διανομής, με διατήρηση του υφιστάμενου χαλύβδινου αγωγού.

(γ) Επιλέξτε τη διάμετρο εμπορίου του νέου τροφοδοτικού αγωγού από υλικό της επιλογής σας, ώστε να εξασφαλίζεται το αναγκαίο ύψος πίεσης στην είσοδο του δικτύου διανομής.

(δ) Εξετάστε αν υπάρχει ανάγκη δημιουργίας πιεζομετρικών ζωνών στο δίκτυο διανομής.

Ερώτημα (α)

Για τους μόνιμους κατοίκους (οικιακή χρήση) γίνονται οι ακόλουθες παραδοχές, με χρήση των τυπικών τιμών που εφαρμόζονται σε συνθήκη έργα ύδρευσης στην Ελλάδα:

- Ειδική κατανάλωση $q_E = 150 \text{ L}/\kappa/\text{d}$
- Συντελεστής ημερήσιας αιχμής $\lambda_H = 1.50$
- Συντελεστής ωριαίας αιχμής $\lambda_\Omega = 2.00$

Για πληθυσμό σχεδιασμού 5000 άτομα, εκτιμώνται η μέση ημερήσια (Q_E), μέγιστη ημερήσια (Q_H) και μέγιστη ωριαία (Q_Ω) παροχή, ήτοι:

$$Q_E = 150 \times 5000 / 86\,400 = 8.68 \text{ L/s}$$

$$Q_H = 1.50 \times 8.68 = 13.02 \text{ L/s}$$

$$Q_\Omega = 2.00 \times 13.02 = 26.04 \text{ L/s}$$

Κατ' αντιστοιχία, για την τουριστική χρήση γίνονται οι ακόλουθες παραδοχές:

- Ειδική κατανάλωση $q_E = 250 \text{ L/κ/d}$
- Συντελεστής ημερήσιας αιχμής $\lambda_H = 1.20$
- Συντελεστής ωριαίας αιχμής $\lambda_\Omega = 1.50$

Για πληθυσμό σχεδιασμού 3000 άτομα, τα χαρακτηριστικά μεγέθη των καταναλώσεων είναι:

$$Q_E = 250 \times 3000 / 86\,400 = 8.68 \text{ L/s}$$

$$Q_H = 1.20 \times 8.68 = 10.42 \text{ L/s}$$

$$Q_\Omega = 1.50 \times 10.42 = 15.63 \text{ L/s}$$

Ο σχεδιασμός του εξωτερικού υδραγωγείου γίνεται με βάση τη συνολική παροχή της ημέρας αιχμής, προσαυξημένης λόγω της 20ωρης λειτουργίας του καταθλιπτικού αγωγού:

$$Q_{\text{ΚΑΤΑΘΛ}} = (13.02 + 10.42) \times 24/20 = 28.13 \text{ L/s}$$

Ο σχεδιασμός του κύριου τροφοδοτικού αγωγού του δικτύου διανομής γίνεται με βάση τη συνολική παροχή της ώρας αιχμής, στην οποία προστίθεται και η παροχή έκτακτης λειτουργίας λόγω της ενεργοποίησης των δύο πυροσβεστικών κρουνών:

$$Q_{\text{ΚΤΑ}} = 26.04 + 15.63 + 10.00 = 52.67 \text{ L/s}$$

Σημείωση: Ο μελετητής μπορεί να δεχτεί, μετά από τεκμηρίωση, προσαύξηση των παροχών σχεδιασμού λόγω των εκτιμώμενων απωλειών νερού κατά τη μεταφορά και διανομή του.

Ερώτημα (β)

Για να επαρκεί ο αγωγός, θα πρέπει στην είσοδο του δικτύου διανομής να εξασφαλίζεται ύψος πίεσης τέτοιο που να μπορούν να υδροδοτηθούν ομαλά κτήρια τριών ορόφων. Το απαιτούμενο ύψος πίεσης δίνεται από την εμπειρική σχέση:

$$(p/\gamma)_{\min} = 4(n + 1) = 16 \text{ m}$$

Για υψόμετρο εδάφους +45 m, το ελάχιστο απαιτούμενο ενεργειακό υψόμετρο στον κόμβο εισόδου είναι +61 m. Συνεπώς, για κατώτατη στάθμη δεξαμενής +65 m (δυσμενής ανάντη συνθήκη), προκύπτει ότι οι μέγιστες υδραυλικές απώλειες, h_f , στον κύριο τροφοδοτικό αγωγό (ΚΤΑ), μήκους $L = 1800 \text{ m}$, δεν πρέπει να υπερβαίνουν τα $65 - 61 = 4 \text{ m}$, συνεπώς η μέγιστη επιτρεπόμενη κλίση της πιεζομετρικής γραμμής είναι $J_{\max} = h_f / L = 4/1800 = 0.0022$.

Με γνωστή την παροχή σχεδιασμού του ΚΤΑ, ο έλεγχος επάρκειας μπορεί να γίνει με τρεις ισοδύναμους τρόπους:

- Για τη δεδομένη παροχή και διάμετρο, υπολογίζεται η κλίση της πιεζομετρικής γραμμής, η οποία συγκρίνεται με την μέγιστη επιτρεπόμενη.
- Για τη δεδομένη παροχή και υποθέτοντας τη μέγιστη επιτρεπόμενη κλίση της πιεζομετρικής γραμμής, υπολογίζεται η ελάχιστη απαιτούμενη διάμετρος του ΚΤΑ, η οποία συγκρίνεται με την πραγματική.
- Για τη δεδομένη διάμετρο και θεωρώντας τη μέγιστη επιτρεπόμενη κλίση της πιεζομετρικής γραμμής, υπολογίζεται η μέγιστη επιτρεπόμενη παροχή που μπορεί να παραλάβει ο αγωγός, η οποία συγκρίνεται με την παροχή σχεδιασμού.

Ενδεικτικά, ο έλεγχος επάρκειας πιέσεων γίνεται με την πρώτη μέθοδο, που είναι πιο δόκιμη, καθώς επιτρέπει την εκτίμηση της πίεσης που αναπτύσσεται στο σημείο ελέγχου, ώστε να είναι άμεσα συγκρίσιμη με την απαιτούμενη πίεση. Συγκεκριμένα, για $Q = 0.0527 \text{ m}^3/\text{s}$ (παροχή σχεδιασμού), $D = 0.250 \text{ m}$ (εσωτερική διάμετρος, που για σωλήνες από χάλυβα ταυτίζεται με την διάμετρο εμπορίου) και $\varepsilon = 1.0 \text{ mm}$ (τυπική τιμή ισοδύναμης τραχύτητας για κοινά υδρευτικά έργα), επιλύεται η γενικευμένη εξίσωση Manning ως προς την κλίση, θέτοντας $\beta = 0.31$, $\gamma = 0.013$ και $N = 0.0120$, οπότε προκύπτει $J = 0.0065 > J_{\max}$, που σημαίνει ότι ο αγωγός δεν επαρκεί. Πράγματι, για την εν λόγω κλίση οι ενεργειακές απώλειες είναι:

$$h_f = 0.0065 \times 1800 = 11.7 \text{ m}$$

Συνεπώς, το ενεργειακό υψόμετρο στον κόμβο εισόδου είναι $65.0 - 11.7 = 53.3$ m, οπότε το ύψος πίεσης που θα εξασφαλίζεται ανέρχεται σε μόλις $53.3 - 45.0 = 8.3$ m, που είναι επαρκές μόνο για κτήρια ενός ορόφου.

Σημείωση: Όπως συνιστάται στις μελέτες σχεδιασμού νέων αγωγών ή ελέγχου επάρκειας παλαιών αγωγών, εφαρμόστηκε ισοδύναμη τραχύτητα $\varepsilon = 1.0$ mm, ώστε να ληφθούν υπόψη η γήρανση του αγωγού, οι επικαθήσεις αλάτων και οι τοπικές απώλειες. Ως γνωστό, η ονομαστική τραχύτητα ενός νέου αγωγού που παραλαμβάνεται από το εργοστάσιο μπορεί να είναι έως και τρεις τάξεις μεγέθους μικρότερη, ωστόσο δεν έχει νόημα η διεξαγωγή ελέγχων για τόσο μικρή τιμή τραχύτητας, καθώς οδηγεί σε σοβαρή υποεκτίμηση των ενεργειακών απωλειών.

Ερώτημα (γ)

Αφού ο αγωγός δεν επαρκεί, θα πρέπει να αντικατασταθεί. Για τον σκοπό αυτό, θεωρούνται γνωστές η παροχή σχεδιασμού και η μέγιστη επιτρεπόμενη κλίση της πιεζομετρικής γραμμής, και επιλύεται η γενικευμένη εξίσωση Manning ως προς τη διάμετρο. Συγκεκριμένα, για $Q = 0.0527$ m³/s, $J_{\max} = 0.0022$ και $\varepsilon = 1.0$ mm, προκύπτει θεωρητική διάμετρος $D = 0.307$ m.

Για το νέο αγωγό, επιλέγεται (ενδεικτικά) υλικό HDPE 10 atm, με ονομαστική διάμετρο Ø355 και εσωτερική διάμετρο 312.8 mm (προφανώς, η αμέσως μεγαλύτερη της θεωρητικής).

Σημείωση: Εναλλακτικά, σε πραγματική μελέτη θα μπορούσε να επιλεγθεί η προσθήκη ενός παράλληλου αγωγού, που θα παραλαμβάνει τη διαφορά μεταξύ της παροχής σχεδιασμού και της μέγιστης επιτρεπόμενης παροχής του υφιστάμενου αγωγού από χάλυβα.

Ερώτημα (δ)

Ο διαχωρισμός ενός δικτύου διανομής σε πιεζομετρικές ζώνες γίνεται όταν οι μέγιστες πιέσεις που αναπτύσσονται στο δίκτυο υπερβαίνουν τα 60-70 m. Για την εκτίμηση των μέγιστων πιέσεων, αρκεί να υπολογιστεί η υψομετρική διαφορά της δεξαμενής από το χαμηλότερο υψομετρικά σημείο του δικτύου. Δεδομένου ότι ο οικισμός είναι παραθαλάσσιος, ενώ η δεξαμενή βρίσκεται στα +65 m, δεν προκύπτει η ανάγκη διαμόρφωσης πιεζομετρικών ζωνών.

Σημείωση: Στους ελέγχους μέγιστων πιέσεων, θεωρείται η ανώτατη στάθμη δεξαμενής, που βρίσκεται 3-6 m ψηλότερα από την κατώτατη. Αυτό σημαίνει ότι, η μέγιστη υψομετρική διαφορά στον συγκεκριμένο οικισμό μπορεί να φτάσει τα 68-71 m, τιμή που εξακολουθεί να είναι βεβαίως αποδεκτή. Υπενθυμίζεται ότι ο έλεγχος που γίνεται αντιστοιχεί σε οριζόντια πιεζομετρική γραμμή και άρα κατανάλωση νερού στο δίκτυο, που αποτελεί τη δυσμενέστερη δυνατή υπόθεση, η οποία δεν μπορεί να συμβεί στην πράξη. Για τον λόγο αυτό, ακόμα και μεγαλύτερες υψομετρικές διαφορές γίνονται αποδεκτές, μετά από έλεγχο, εφόσον υπάρχουν ή αναμένονται αξιόλογες νυκτερινές καταναλώσεις.