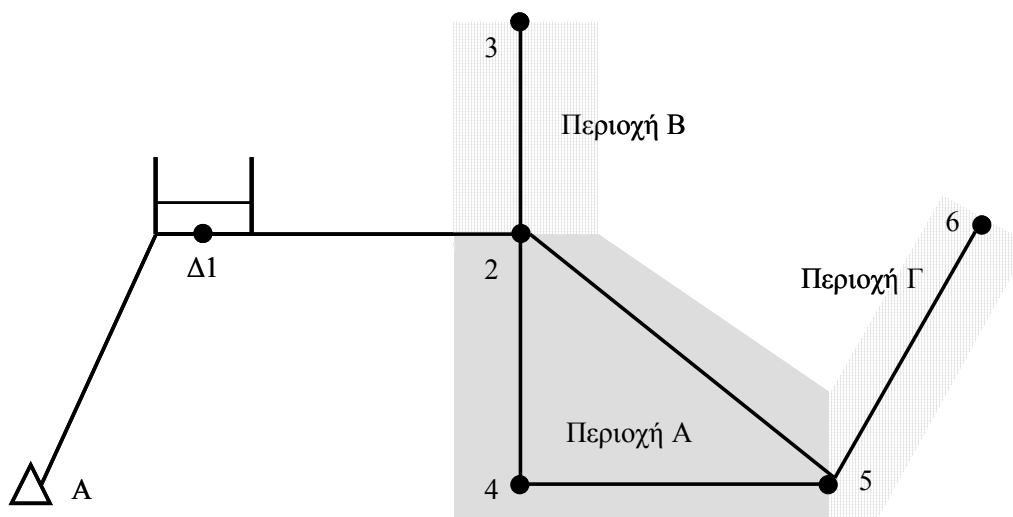


Άσκηση ΔΕ9: Εκτίμηση παροχών εξόδου κόμβων, υπολογισμός ελάχιστης κατώτατης στάθμης και διαστασιολόγηση δεξαμενής δικτύου διανομής (εξέταση προόδου Ιουνίου 2004)

Σύνταξη και επίλυση άσκησης: Α. Ευστρατιάδης και Δ. Παναγούλια (2004)

Αναθεώρηση άσκησης: Α. Ευστρατιάδης (2011)

Μελετάται το εσωτερικό δίκτυο του Σχήματος, που τροφοδοτείται από τη δεξαμενή Δ1 και εξυπηρετεί οικισμό 5000 μόνιμων κατοίκων, με μέση ημερήσια κατανάλωση σχεδιασμού 150 L ανά άτομο. Ειδικότερα, στην περιοχή Α εξυπηρετούνται τετραώροφα κτήρια, ενώ στις περιοχές Β και Γ εξυπηρετούνται διώροφα κτήρια (ο συντελεστής κάλυψης είναι ενιαίος σε όλο τον οικισμό). Στον Πίνακα δίνονται τα υψόμετρα εδάφους στους κόμβους και τα χαρακτηριστικά μεγέθη των κλάδων (μήκη, διάμετροι εμπορίου). Όλοι οι αγωγοί είναι από υλικό PVC, ονομαστικής αντοχής 12.5 atm.



Κόμβος	Υψόμετρο εδάφους (m)
Δ1	
2	32.0
3	36.0
4	27.0
5	25.0
6	34.0

Κλάδος	Μήκος (m)	Διάμετρος εμπορίου (mm)
Δ1-2	600	200
2-3	320	90
2-4	360	125
4-5	400	125
2-5	540	125
5-6	480	90

Ζητούμενα:

α) Να εκτιμηθούν οι παροχές εξόδου των κόμβων σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας, θεωρώντας τις τυπικές τιμές των συντελεστών λ_H και λ_Ω .

β) Από αρχικές αναλύσεις, προέκυψε ότι ο κόμβος 6 είναι ο δυσμενέστερος ως προς τον έλεγχο ελάχιστων πιέσεων. Ποια πρέπει να είναι η ελάχιστη κατώτατη στάθμη ώστε να ικανοποιείται οριακά ο έλεγχος πιέσεων στον εν λόγω κόμβο; Δίνεται ότι οι ενεργειακές απώλειες κατά μήκος της διαδρομής 2-4 είναι ίσες με 5.15 m.

γ) Έστω ότι η δεξαμενή Δ1 τροφοδοτείται μέσω του καταθλιπτικού αγωγού Α-Δ1, από αντλιοστάσιο 16ωρης συνεχούς λειτουργίας, με έναρξη στις 4:00 π.μ. Η τυπική ημερήσια διακύμανση της κατανάλωσης του οικισμού είναι:

Ωρα	0-4	4-8	8-12	12-16	16-20	20-24
% ημερήσιου όγκου	4	14	20	18	30	14

Να υπολογιστεί ο απαιτούμενος όγκος της δεξαμενής ρύθμισης, θεωρώντας τρίωρη διάρκεια πυρκαγιάς, με ταυτόχρονη λειτουργία δύο πυροσβεστικών κρουνών ονομαστικής παροχής 5 L/s, και τετράωρη βλάβη του καταθλιπτικού αγωγού. Δώστε σε σκαρίφημα τις χαρακτηριστικές διαστάσεις της δεξαμενής, για ορθογωνική κάτοψη εμβαδού 200 m².

Ερώτημα (α)

Η μέση ημερήσια παροχή του οικισμού, για πληθυσμό 5000 μόνιμων κατοίκων, με μέση ημερήσια κατανάλωση σχεδιασμού 150 L ανά άτομο, είναι ίση με:

$$Q_E = 5000 \times 150 / 86400 = 8.68 \text{ L/s}$$

Η μέγιστη ημερήσια παροχή, θεωρώντας τυπική τιμή $\lambda_H = 1.5$ (δηλαδή προσαυξάνοντας τη μέση ημερήσια παροχή κατά 50%), είναι:

$$Q_H = 1.5 \times 26.04 = 13.02 \text{ L/s}$$

Η μέγιστη ωριαία παροχή, ήτοι η παροχή κατά την ώρα αιχμής της κατανάλωσης, η οποία αντιστοιχεί στην παροχή σχεδιασμού του δικτύου διανομής για συνθήκες κανονικής λειτουργίας, θεωρώντας τυπική τιμή $\lambda_\Omega = 2.0$ (δηλαδή προσαυξάνοντας τη μέγιστη ημερήσια παροχή κατά 100%), είναι:

$$Q_\Omega = 2.0 \times 13.02 = 26.04 \text{ L/s}$$

Ζητούμενο της άσκησης είναι η κατανομή της εν λόγω παροχής στους κόμβους του δικτύου, με βάση τη σχέση:

$$c_i = w_i \times Q_{\max, \omega p}$$

όπου c_i η παροχή εξόδου κάθε κόμβου i και w_i συντελεστής κατανομής (προφανώς ισχύει $\sum w_i = 1$, έτσι ώστε $\sum c_i = Q_{\max, \omega p}$). Συνεπώς, για την εκτίμηση των παροχών εξόδου των κόμβων, απαιτείται η εκτίμηση των συντελεστών κατανομής w_i .

Γίνεται η υπόθεση (= παραδοχή) ότι η κατανομή των παροχών εξόδου γίνεται με βάση τα μήκη των αγωγών που συμβάλλουν σε κάθε κόμβο. Εφόσον ο πληθυσμός κατανεμόταν ομοιόμορφα σε όλη την έκταση του οικισμού, τότε θα ίσχυε $w_i = 0.5 L_i / L$, όπου το άθροισμα των μηκών των κλάδων που συμβάλλουν στον κόμβο i και L το συνολικό μήκος των αγωγών του δικτύου (ο συντελεστής 0.5 υποδηλώνει ότι η παροχή κάθε κλάδου ισομοιράζεται μεταξύ του ανάντη και του κατόντη κόμβου).

Στην περίπτωση της άσκησης, η κατανομή του πληθυσμού είναι ανομοιόμορφη. Αυτό συμβαίνει επειδή στην περιοχή Α εξυπηρετούνται τετραώροφα κτήρια, ενώ στις περιοχές Β και Γ εξυπηρετούνται διώροφα κτήρια, με ενιαίο συντελεστή κάλυψης (αυτό σημαίνει ότι κάθε κτήριο διαφοροποιείται μόνο ως προς το ύψος και όχι ως προς το εμβαδόν που καταλαμβάνει στο αντίστοιχο οικόπεδο). Συνεπώς, η πυκνότητα της περιοχής Α είναι διπλάσια της πυκνότητας πληθυσμού των περιοχών Β και Γ, ήτοι $\pi_B / \pi_A = \pi_\Gamma / \pi_A = 0.5$. Με βάση το παραπάνω συμπέρασμα, μπορούμε να θεωρήσουμε ως ισοδύναμο μήκος επιρροής κάθε κλάδου (i, j) την ποσότητα:

$$L_{ij}^* = 0.5 \theta_{ij} L_{ij}$$

όπου $\theta_{ij} = 1$ στην περιοχή υψηλής πυκνότητας και $\theta_{ij} = 0.5$ στις περιοχές χαμηλής πυκνότητας (επισημαίνεται ότι οι απόλυτες τιμές των θ_{ij} δεν έχουν σημασία, καθώς το ισοδύναμο μήκος επιρροής

είναι εννοιολογικό μέγεθος). Κατά συνέπεια, δεδομένου ότι κατά μήκος της διαδρομής 1-2 δεν εκδηλώνεται κατανάλωση νερού ($\theta_{12} = 0$), ο υπολογισμός των ισοδύναμων μηκών επιρροής κάθε κόμβου γίνεται ως εξής:

$$\begin{aligned} \text{Κόμβος 2: } L_2^* &= L_{12}^* + L_{23}^* + L_{24}^* + L_{25}^* = \\ &= 0.5 \times \theta_{12} \times L_{12} + 0.5 \times \theta_{23} \times L_{23} + 0.5 \times \theta_{24} \times L_{24} + 0.5 \times \theta_{25} \times L_{25} = \\ &= 0.5 \times 0 \times 600 + 0.5 \times 0.5 \times 320 + 0.5 \times 1 \times 360 + 0.5 \times 1 \times 540 = \\ &= 0 + 80 + 180 + 270 = 530 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\text{Κόμβος 3: } L_3^* = L_{23}^* = 0.5 \times \theta_{23} \times L_{23} = 0.5 \times 0.5 \times 320 = 80 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} \text{Κόμβος 4: } L_4^* &= L_{24}^* + L_{45}^* = 0.5 \times \theta_{24} \times L_{24} + 0.5 \times \theta_{45} \times L_{45} = \\ &= 0.5 \times 1 \times 360 + 0.5 \times 1 \times 400 = 180 + 200 = 380 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Κόμβος 5: } L_5^* &= L_{25}^* + L_{45}^* + L_{56}^* = 0.5 \times \theta_{25} \times L_{25} + 0.5 \times \theta_{45} \times L_{45} + 0.5 \times \theta_{56} \times L_{56} = \\ &= 0.5 \times 1 \times 540 + 0.5 \times 1 \times 400 + 0.5 \times 0.5 \times 480 = 270 + 200 + 120 = 590 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\text{Κόμβος 6: } L_6^* = L_{56}^* = 0.5 \times \theta_{56} \times L_{56} = 0.5 \times 0.5 \times 480 = 120 \text{ m}$$

Το ολικό ισοδύναμο μήκος επιρροής των κόμβων του δικτύου προκύπτει ίσο με $L^* = 1700 \text{ m}$. Κατά συνέπεια, οι συντελεστές κατανομής κάθε κόμβου είναι $w_i = L_i^* / L^*$. Μετά από υπολογισμούς προκύπτει $w_2 = 0.312$, $w_3 = 0.047$, $w_4 = 0.224$, $w_5 = 0.347$, και $w_6 = 0.071$. Συνεπώς, η συνολική παροχή σχεδιασμού των 26.04 L/s κατανέμεται στους κόμβους ως εξής: $c_2 = 8.12 \text{ L/s}$, $c_3 = 1.23 \text{ L/s}$, $c_4 = 5.82 \text{ L/s}$, $c_5 = 9.04 \text{ L/s}$, και $c_6 = 1.84 \text{ L/s}$.

Ερώτημα (β)

Δίνεται ότι ο κόμβος 6 είναι ο δυσμενέστερος του δικτύου, από άποψη ελάχιστων πιέσεων. Αυτό σημαίνει ότι αν στην οριακή κατάσταση μέγιστης κατανάλωσης ο εν λόγω κόμβος ικανοποιεί τον σχετικό έλεγχο ελαχίστων πιέσεων, τότε και οι υπόλοιποι κόμβοι θα ικανοποιούν τον εν λόγω έλεγχο.

Η ελάχιστη απαιτούμενη ελάχιστη πίεση εξαρτάται από το ύψος των κτηρίων που εξυπηρετεί κάθε κόμβος. Δεχόμενοι απώλειες ενέργειας 1.0 m ανά όροφο και τυπικό ύψος ορόφου 3.0 m, τότε η ελάχιστη πίεση είναι συνάρτηση του αριθμού των ορόφων n , και δίνεται από την εμπειρική σχέση:

$$p_{\min} = 4 (n + 1)$$

Αφού ο κόμβος 6 εξυπηρετεί διώροφα κτήρια, η ελάχιστη απαιτούμενη πίεση στον εν λόγω κόμβο είναι 12 m. Συνεπώς, η ελάχιστη τιμή του ενεργειακού υψομέτρου είναι:

$$h_{6,\min} = z_6 + p_{\min} = 34 + 12 = 46 \text{ m}$$

Στην οριακή κατάσταση που η πιεζομετρική γραμμή στον κόμβο 6 είναι στα +46 m, εξασφαλίζεται επαρκής υδραυλική λειτουργία του δικτύου, τουλάχιστον από άποψη ελάχιστων πιέσεων.

Για τον υπολογισμό της ελάχιστης κατώτατης στάθμης ύδατος της δεξαμενής $h_{1,\min}$ αρκεί ο υπολογισμός των ενεργειακών υψομέτρων κατά μήκος μιας οποιασδήποτε διαδρομής που ξεκινά από τον κόμβο 6 και καταλήγει στη δεξαμενή (κόμβος 1), με την υπόθεση $h_6 = h_{6,\min} = 46 \text{ m}$. Η πορεία των υπολογισμών έχει ως εξής:

Κατά μήκος της διαδρομής 5-6 είναι γνωστή η παροχή Q_{56} , η οποία ταυτίζεται με την παροχή εξόδου του κόμβου 6. Επιπλέον είναι γνωστά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κλάδου 5-6, δηλαδή το μήκος, η διάμετρος (εσωτερική διάμετρος για αγωγούς από PVC, ονομαστικής αντοχής 12.5 atm) και ο συντελεστής τραχύτητας (θεωρείται η τυπική τιμή $\varepsilon = 1.0 \text{ mm}$ για όλους τους κλάδους). Από την

επίλυση του υδραυλικού προβλήματος, προκύπτουν ενεργειακές απώλειες $\Delta h_{56} = 1.86$ m, οπότε το ενεργειακό υψόμετρο του κόμβου 5 είναι:

$$h_5 = h_6 + \Delta h_{56} = 46.00 + 1.86 = 47.86 \text{ m}$$

Αφού το υψόμετρο εδάφους του κόμβου 5 είναι στα +25 m, το ύψος πίεσης ισούται με 22.86 m, και συνεπώς επαρκεί για τετραώροφα κτήρια, για τα οποία ζητείται ελάχιστο ύψος πίεσης 20 m (ο παραπάνω έλεγχος γίνεται για λόγους επάρκειας, δεν ζητείται από την άσκηση).

Ο άμεσος υπολογισμός των ενεργειακών απωλειών κατά μήκος της διαδρομής 4-5 δεν είναι δυνατός, γιατί δεν είναι γνωστή η παροχή του κλάδου 4-5. Δίνονται ωστόσο οι ενεργειακές απώλειες κατά μήκος της διαδρομής 2-4, που είναι ίσες με $\Delta h_{24} = 5.15$ m (επισημαίνεται ότι η τιμή αυτή είναι ανεξάρτητη της στάθμης νερού στη δεξαμενή, εξαρτάται μόνο από τις παροχές εξόδου και τα χαρακτηριστικά των αγωγών). Επιλύοντας το υδραυλικό πρόβλημα προκύπτει ότι η παροχή του κλάδου 2-4 είναι ίση με $0.00893 \text{ m}^3/\text{s}$ ή 8.93 L/s .

Από την εξίσωση συνέχειας του κόμβου 4 προκύπτει:

$$Q_{45} = Q_{24} - c_4 = 8.93 - 5.82 = 3.11 \text{ L/s}$$

Οι ενεργειακές απώλειες κατά μήκος της διαδρομής 4-5 υπολογίζονται για τη συγκεκριμένη διάμετρο και παροχή και ανέρχονται σε $\Delta h_{45} = 0.81$ m. Το ενεργειακό υψόμετρο του κόμβου 4 είναι:

$$h_4 = h_5 + \Delta h_{45} = 47.86 + 0.81 = 48.67 \text{ m}$$

Το ενεργειακό υψόμετρο του κόμβου 2 είναι:

$$h_2 = h_4 + \Delta h_{24} = 48.67 + 5.15 = 53.82 \text{ m}$$

Οι ενεργειακές απώλειες κατά μήκος της διαδρομής 1-2 μπορούν να υπολογιστούν άμεσα, καθώς είναι γνωστή η παροχή του αντίστοιχου κλάδου, που ταυτίζεται με την παροχή σχεδιασμού του δικτύου. Από την υδραυλική επίλυση προκύπτει $\Delta h_{12} = 6.30$ m, και συνεπώς το ελάχιστο απαιτούμενο ενεργειακό υψόμετρο του κόμβου 1, ήτοι η στάθμη νερού της δεξαμενής, είναι:

$$h_1 = h_2 + \Delta h_{12} = 53.82 + 6.30 = 60.12 \text{ m}$$

Συνεπώς, για κατώτατη στάθμη λειτουργίας της δεξαμενής στα +60.12 m εξασφαλίζεται, έστω και οριακά, επαρκής υδραυλική λειτουργία του δικτύου.

Ερώτημα (γ)

Ο ημερήσιος όγκος νερού που απαιτείται κατά τη διάρκεια της ημέρας αιχμής είναι:

$$V_H = 13.02 \times 86400 / 1000 = 1125 \text{ m}^3$$

Εφόσον ο οικισμός τροφοδοτείται από καταθλιπτικό αγωγό 16ωρης λειτουργίας, και δεδομένου ότι η χρονική διακριτότητα της τυπικής ημερήσιας κατανάλωσης ισούται με 4 ώρες, κάθε 4ωρο εισέρχεται ποσοστό $4/16 = 0.25$ του ημερήσιου όγκου. Στον πίνακα που ακολουθεί δίνονται τα αθροιστικά διαγράμματα εισροής και εκροής, καθώς και τα αντίστοιχα πλεονάσματα ή ελλείμματα.

Ωρα	Εισροή	Άθροισμα εισροών	Εκροή	Άθροισμα εκροών	Διαφορά
0-4	0.00	0.00	0.04	0.04	-0.04
4-8	0.25	0.25	0.14	0.18	0.07
8-12	0.25	0.50	0.20	0.38	0.12
12-16	0.25	0.75	0.18	0.56	0.19
16-20	0.25	1.00	0.30	0.86	0.14
20-24	0.00	1.00	0.14	1.00	0.00

Το άθροισμα μέγιστου ελλείμματος και μέγιστης περίσσειας ισούται, κατ' απόλυτη τιμή, με $0.04 + 0.19 = 0.23$. Συνεπώς, ο απαιτούμενος ρυθμιστικός όγκος της δεξαμενής είναι:

$$V_P = 0.23 \times 1125 = 259 \text{ m}^3$$

Ο όγκος πυρκαγιάς λαμβάνεται για ταυτόχρονη λειτουργία δύο κρουνών, ονομαστικής παροχής 5 L/s, και για διάρκεια πυρκαγιάς τρεις ώρες, συνεπώς:

$$V_{\Pi} = 2 \times 5 \times 3 \times 3600 / 1000 = 108 \text{ m}^3$$

Θεωρείται τετράωρη βλάβη του καταθλιπτικού αγωγού, η παροχή του οποίου ισούται με (ο αγωγός λειτουργεί 16 ώρες το 24ωρο):

$$Q_K = 24 / 16 Q_H = 19.53 \text{ L/s}$$

Συνεπώς, ο όγκος βλάβης του αγωγού ισούται με:

$$V_B = 19.53 \times 4 \times 3600 / 1000 = 281 \text{ m}^3$$

Μεταξύ των δύο τιμών ασφαλείας, η πλέον δυσμενής αντιστοιχεί στην περίπτωση βλάβης του καταθλιπτικού αγωγού. Συνεπώς, ο συνολικός ωφέλιμος όγκος της δεξαμενής είναι:

$$V_{\Omega} = V_P + V_B = 259 + 281 = 540 \text{ m}^3$$

Παρατηρείται ότι ο όγκος βλάβης της δεξαμενής είναι μεγαλύτερος του όγκου ρύθμισης. Συνεπώς, για εμβαδόν κάτοψης 200 m^2 , προκύπτει ωφέλιμο ύψος $H = 540 / 200 = 2.7 \text{ m}$. Η κατώτατη στάθμη λειτουργίας της δεξαμενής τοποθετείται +60.2 m (γίνεται στρογγύλευση προς τα πάνω, για λόγους ασφαλείας), ενώ η ανώτατη στάθμη τοποθετείται στα +62.9 m.