

# Υδραυλική & Υδραυλικά Έργα

## 5<sup>ο</sup> εξάμηνο Σχολής Πολιτικών Μηχανικών

---

### Διαμόρφωση μοντέλου υδραυλικής ανάλυσης δικτύου διανομής και έλεγχοι πιέσεων

---

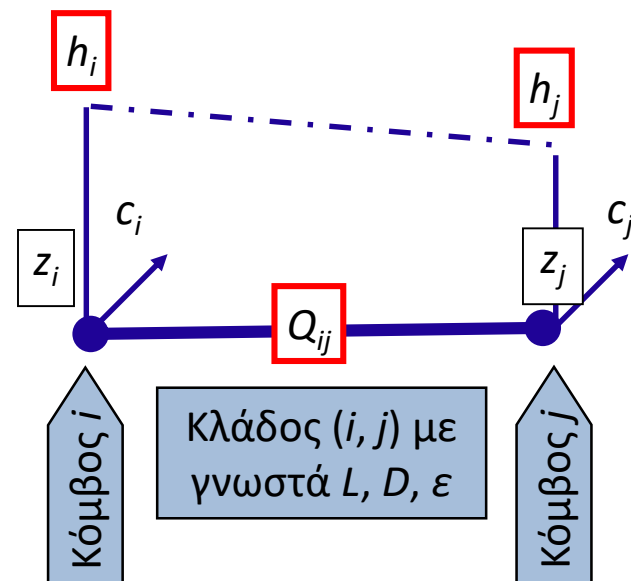
Ανδρέας Ευστρατιάδης, Χρήστος Μακρόπουλος &  
Παναγιώτης Κοτσιέρης

Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Αθήνα, 2019

# Συνιστώσες μοντέλου υδραυλικής ανάλυσης

- ❑ **Κόμβος**: Σημείο εισροής ή εκροής νερού ή αλλαγής της γεωμετρίας του δικτύου ή μεταβολής των χαρακτηριστικών των αγωγών, με γνωστό απόλυτο υψόμετρο  $z$  και γνωστή παροχή εξόδου  $c$ , και άγνωστο ενεργειακό υψόμετρο  $h$ .
- ❑ **Κλάδος** (αγωγός): Στοιχείο μεταφοράς νερού μήκους  $L$ , που αποτελείται από σύστημα σωλήνων σε σειρά, με κοινή διάμετρο  $D$  και τραχύτητας  $\epsilon$ , κατά μήκος του οποίου θεωρείται ενιαία (άγνωστη) παροχή  $Q$ .
- ❑ **Δεξαμενή**: Διάταξη αποθήκευσης νερού, ωφέλιμου όγκου  $V$ , με γνωστή αρχική στάθμη  $z_0$ , και άγνωστη εκροή νερού  $y$ .
- ❑ **Φρεάτιο**: Διάταξη μηδενισμού της πίεσης, αμελητέας αποθηκευτικής ικανότητας, στην οποία διατηρείται σταθερή στάθμη  $z_0$ .
- ❑ **Βαλβίδα**: Διάταξη ρύθμισης της πίεσης ή της παροχής (π.χ. δικλείδα, μειωτής πίεσης), η λειτουργία της οποίας περιγράφεται από μια γνωστή σχέση παροχής-ενεργειακών απωλειών.
- ❑ **Αντλία**: Διάταξη ανύψωσης της πιεζομετρικής γραμμής, με γνωστή χαρακτηριστική καμπύλη.



Οι βασικές εργασίες για τη διαμόρφωση του μοντέλου υδραυλικής ανάλυσης είναι η **τοποθέτηση των κόμβων** (σχηματοποίηση) και η εκτίμηση των **παροχών εξόδου**.

# Τυπικά δεδομένα εισόδου υδραυλικής ανάλυσης

- **Τοπολογία δικτύου**
  - Διασύνδεση των επιμέρους συνιστωσών του δικτύου (κατά κανόνα η τοπολογία διαμορφώνεται με τη βοήθεια γραφικών εργαλείων που διαθέτουν τα μοντέλα)
- **Χαρακτηριστικά μεγέθη κόμβων:**
  - **Υψόμετρο εδάφους** (μέτρηση στον χάρτη, καθώς για τις ανάγκες του μοντέλου και τον έλεγχο των πιέσεων δεν απαιτείται πολύ μεγάλη ακρίβεια στα υψόμετρα)
  - **Παροχή εξόδου** (αθροιστική από όλες τις χρήσεις νερού, σημειακές και κατανεμημένες)
    - Σε προβλήματα προσομοίωσης (= βήμα προς βήμα επίλυση) η παροχή εξόδου κάθε κόμβου δίνεται με τη μορφή χρονοσειράς.
- **Χαρακτηριστικά μεγέθη κλάδων (αγωγών):**
  - **Μήκος** (μέτρηση στον χάρτη, καθώς ούτε εδώ απαιτείται ιδιαίτερη ακρίβεια)
  - **Εσωτερική διάμετρος** (εξαρτάται από το υλικό και την κλάση του αγωγού)
  - **Ισοδύναμη τραχύτητα** (γενικά λαμβάνεται  $\varepsilon = 1.0 \text{ mm}$ , εφόσον αναφερόμαστε σε πρόβλημα σχεδιασμού, οπότε λαμβάνονται υπόψη η γήρανση των αγωγών καθώς και οι τοπικές απώλειες)
- **Χαρακτηριστικά μεγέθη δεξαμενών:**
  - **Στάθμη νερού** (γενικά λαμβάνεται η ΚΣΥ, εφόσον αναφερόμαστε σε πρόβλημα ελέγχου πιέσεων)

# Σχηματοποίηση κόμβων δικτύου

---

- Οι **κόμβοι** του δικτύου τοποθετούνται:
  - στα σημεία τροφοδοσίας (δεξαμενές, υδατόπυργοι)·
  - στα σημεία διακλαδώσεων (όχι όμως απαραίτητα σε στροφές αγωγών)·
  - στα σημεία αλλαγής υλικού, τραχύτητας ή διαμέτρου αγωγού ·
  - στα σημεία αλλαγής των χρήσεων νερού (αστική, ημιαστική, τουριστική)·
  - στα σημεία αλλαγής της πυκνότητας του πληθυσμού και της δόμησης·
  - στις θέσεις των ειδικών καταναλωτών (π.χ. βιομηχανίες, ξενοδοχεία)·
  - στις θέσεις των πυροσβεστικών κρουνών·
  - στις θέσεις των ειδικών διατάξεων (φρεάτια, βαλβίδες, αντλίες).
- Σε ορισμένες περιπτώσεις, συστήνεται η τοποθέτηση κόμβων σε σημεία όπου είναι επιθυμητός, κατά την κρίση του μηχανικού, **ο έλεγχος πιέσεων** κατά την υδραυλική ανάλυση του δικτύου (σε πολύ υψηλά, πολύ χαμηλά ή πολύ απομακρυσμένα σημεία του).
- **Ειδικό καταναλωτές και κρουνοί** που βρίσκονται σχετικά κοντά σε κόμβους άλλης αιτιολογίας είναι δυνατόν να αναχθούν σε αυτούς (μείωση υπολογιστικού φόρτου).
- Για λόγους ευστάθειας του αριθμητικού σχήματος επίλυσης, ο σχετικός λόγος των μηκών των κλάδων του ίδιου βρόχου δεν πρέπει να ξεπερνά το 10.

# Σημειακές και μη σημειακές φορτίσεις

- Η εκτίμηση της κατανάλωσης του δικτύου γίνεται **ξεχωριστά για κάθε χρήση νερού**, για την οποία εκτιμάται η αντίστοιχη **μέγιστη ωριαία παροχή**.
- Ως **σημειακοί χρήστες** (ή ειδικοί καταναλωτές) νοούνται βιομηχανίες, ξενοδοχεία, νοσοκομεία, πάρκα, πυροσβεστικοί κρουνοί κτλ., και γενικά κάθε μεγάλος καταναλωτής που υδροδοτείται από συγκεκριμένη θέση του δικτύου.
- Ως **μη σημειακοί (κατανεμημένοι) χρήστες** νοούνται οι οικιακοί καταναλωτές, οι κάτοικοι παραθεριστικών περιοχών, και οι τουρίστες που καταλύουν σε εκτεταμένες περιοχές όπου αναπτύσσονται μικρής κλίμακας τουριστικές μονάδες, π.χ. ενοικιαζόμενα δωμάτια (μεμονωμένα ξενοδοχειακά συγκροτήματα μεγάλης κλίμακας αναπαρίστανται ως σημειακοί καταναλωτές νερού).
- **Οι μέγιστες ωριαίες παροχές των ειδικών καταναλωτών μεταφέρονται απευθείας ως σημειακές φορτίσεις στον εγγύτερο κόμβο.**
- Για τους κατανεμημένους καταναλωτές, η αθροιστική **μέγιστη ωριαία παροχή  $q_k$**  ανά χρήση νερού  $k$  επιμερίζεται στους κόμβους του δικτύου, με χρήση κατάλληλων συντελεστών κατανομής:

$$c_{jk} = w_{jk} q_k$$

- Ο συντελεστής  $w_{jk}$  εκφράζει το ποσοστό της συνολικής ζήτησης κάθε μη σημειακής (κατανεμημένης) χρήσης  $k$  που εξυπηρετείται από τον κόμβο  $j$ .
- Η παροχή εξόδου κάθε κόμβου προκύπτει **ως άθροισμα όλων των καταναλώσεων  $c_{jk}$  από τις σημειακές και μη σημειακές χρήσεις νερού.**

# Αναγωγή κατανεμημένης ζήτησης στους κόμβους

## □ Μέθοδος επιφανειών επιρροής:

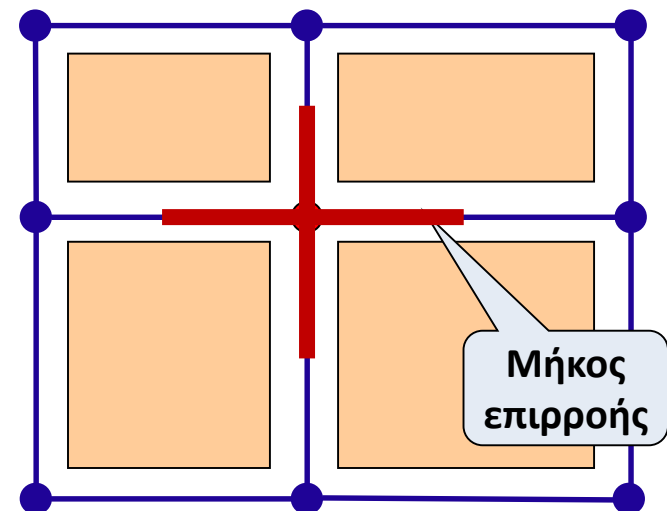
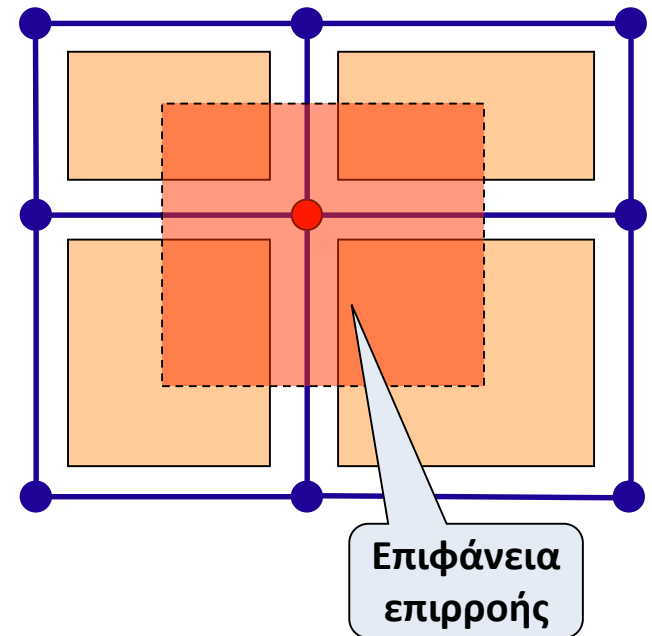
- Κάθε κόμβος  $j$  εξυπηρετεί συγκεκριμένη επιφάνεια  $\alpha_j$ , οπότε το ποσοστό συμμετοχής του κόμβου στη συνολική κατανάλωση εκτιμάται από τη σχέση:

$$w_j = \alpha_j / \sum \alpha_j$$

- Η χάραξη των επιφανειών γίνεται με τεχνικές χωρικής ολοκλήρωσης, (π.χ. πολύγωνα Voronoi, γνωστά και ως πολύγωνα Thiessen).

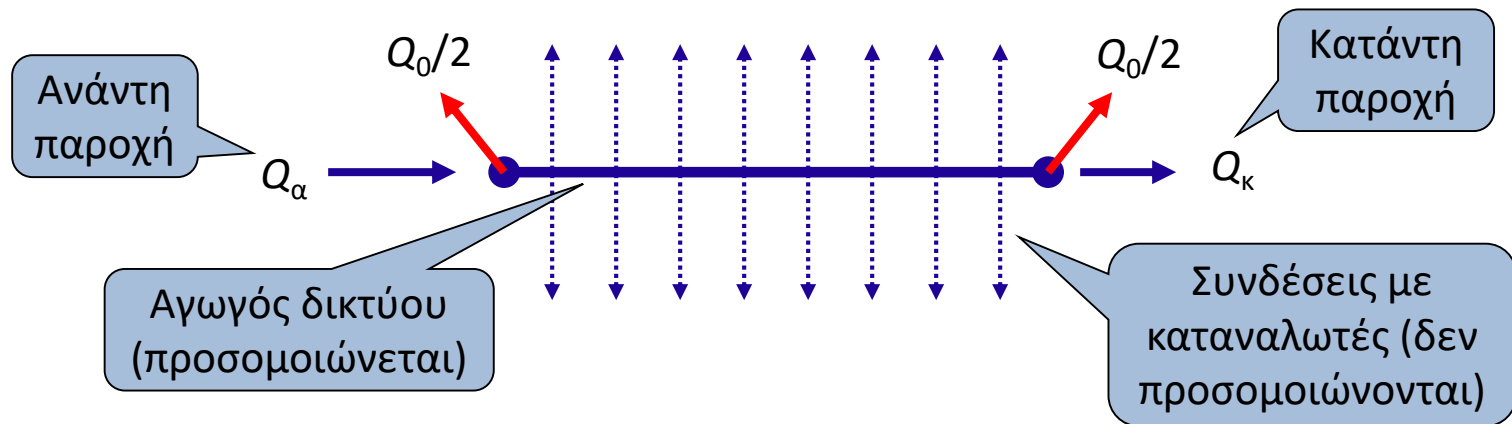
## □ Μέθοδος ισοδύναμων μηκών επιρροής:

- Θεωρείται ότι η διανεμόμενη ζήτηση κατά μήκος κάθε κλάδου **ισομοιράζεται** στον ανάντη και τον κατάντη κόμβο, οπότε **κάθε κλάδος που συμβάλλει σε έναν κόμβο συμμετέχει στην κατανομή της κατανάλωσης με το ήμισυ του μήκους του**.
- Η μέθοδος των μηκών είναι λιγότερο ακριβής σε σχέση με αυτή των επιφανειών, αλλά πιο απλή στην εφαρμογή της (δεν απαιτεί χωρικές επεξεργασίες)



# Μέθοδος ισοδύναμων μηκών επιρροής: Η έννοια της ανηγμένης κατανάλωσης

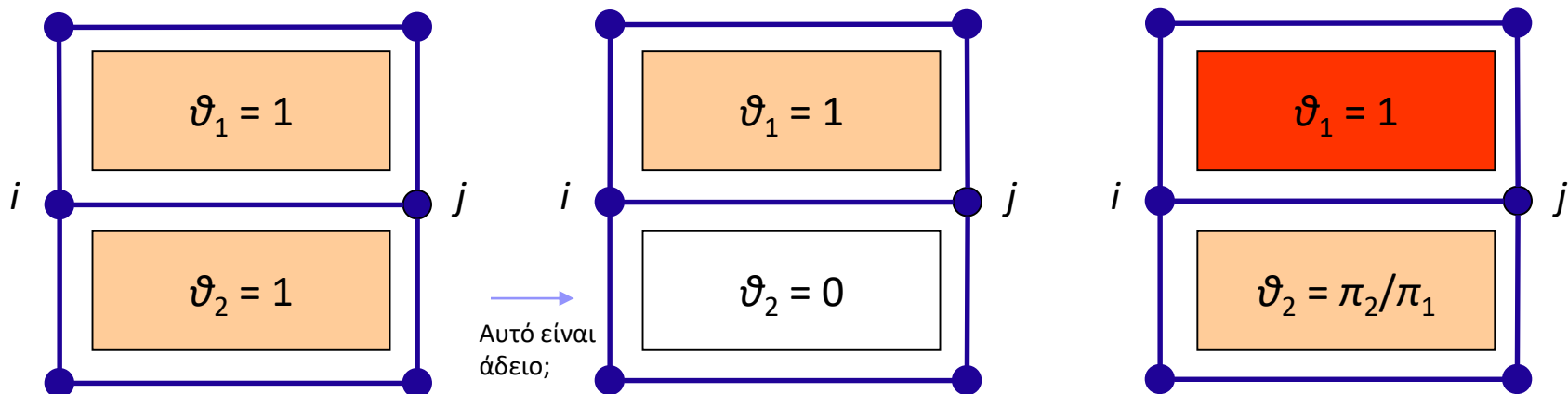
- Στην πιο απλή περίπτωση (του ενός κλάδου – δύο κόμβων)
- Αν η διανεμόμενη κατανάλωση ανά μέτρο μήκους του αγωγού είναι **ομοιόμορφη**, υπολογίζουμε τη **συνολική κατανάλωση**  $Q_0$  και την πολλαπλασιάζουμε με  $(L/2)/L = 0.5$  (δηλαδή την ισο-μοιράζουμε στον ανάντη και κατάντη κόμβο), ανάγοντάς την σε **σημειακή κατανάλωση/ζήτηση σε κάθε κόμβο**.



Αν δεν είναι ομοιόμορφη;

# Μέθοδος ισοδύναμων μηκών επιρροής: Εκτίμηση συντελεστών ανομοιομορφίας

- Αν η κατανομή της κατανάλωσης για κάποια χρήση νερού **δεν είναι ομοιόμορφη**, τότε η περιοχή μελέτης χωρίζεται σε ζώνες διαφορετικής πυκνότητας  $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_N$ .
- Ως **μέτρο πυκνότητας** μπορεί να χρησιμοποιηθεί η πραγματική πυκνότητα του πληθυσμού (κάτοικοι/μέτρο επιφάνειας) ή πολεοδομικά μεγέθη όπως συντελεστές δόμησης και κάλυψης, ύψη κτηρίων, εμβαδά οικοπέδων, κτλ.
- Αν  $\pi_1$  είναι η περιοχή με την υψηλότερη πυκνότητα, τότε τίθεται (συμβατικά)  $\vartheta_1 = 1$ ,  $\vartheta_2 = \pi_2/\pi_1$ ,  $\vartheta_3 = \pi_3/\pi_1$  κτλ.
- Ο **συντελεστής ανομοιομορφίας για τον κλάδο** θα είναι ο μέσος όρος των δυο.



Αμφίπλευρη κατανάλωση,  
ομοιόμορφα κατανομημένη:  
 $\pi_1 = \pi_2 \rightarrow \vartheta_{ij} = 1$

Μονόπλευρη  
κατανάλωση:  
 $\pi_2 = 0 \rightarrow \vartheta_{ij} = 0.5$

Αμφίπλευρη κατανάλωση,  
ανομοιόμορφα κατανομημένη:  
 $\pi_1 > \pi_2 \rightarrow \vartheta_{ij} = 0.5 (1 + \pi_2/\pi_1)$



# Μέθοδος ισοδύναμων μηκών επιρροής: Εκτίμηση συντελεστών κατανομής

- Μετρώνται τα πραγματικά μήκη των κλάδων του δικτύου,  $L_{ij}$  (που σε κάθε περίπτωση αποτελούν δεδομένο εισόδου του μοντέλου υδραυλικής ανάλυσης).
- Για κάθε κλάδο  $(i, j)$  υπολογίζεται ο **συντελεστής ανομοιομορφίας**  $\vartheta_{ij}$  ως ημιάθροισμα των συντελεστών των δύο περιοχών εκατέρωθεν του κλάδου.
- Εκτιμάται το **ισοδύναμο μήκος επιρροής του κόμβου  $j$**  προς τον κλάδο  $(i, j)$  ως:

$$L_{ij}^* = \vartheta_{ij} (L_{ij}/2)$$

- Το **ολικό ισοδύναμο μήκος επιρροής του κόμβου  $j$**  προκύπτει ως άθροισμα των επιμέρους μηκών όλων των κλάδων που συμβάλλουν στον κόμβο, δηλαδή:

$$L_j^* = \sum L_{ij}^*$$

- Το **ολικό ισοδύναμο μήκος της συγκεκριμένης χρήσης** προκύπτει ως:

$$L^* = \sum L_j^*$$

- Ο **συντελεστής κατανομής της ολικής παροχής της συγκεκριμένης χρήσης στον κόμβο  $j$**  υπολογίζεται ως το κλάσμα:

$$w_j = L_j^* / L^*$$

- Η **σημειακή παροχή εξόδου στον κόμβο  $j$**  για συνολική μέγιστη ωριαία παροχή  $q_\Omega$  της συγκεκριμένης χρήσης θα είναι:

$$c_j = w_j * q_\Omega$$

- Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλες τις κατανεμημένες χρήσεις νερού (οικιακή, τουριστική κτλ.)

# Διαμόρφωση σεναρίων φόρτισης

- Επειδή, γενικά, δεν μπορεί εκ των προτέρων να καθοριστεί ο πλέον δυσμενής κόμβος για κάθε συνδυασμό καταναλώσεων στους κόμβους, ούτε, αντίστροφα, ο πλέον δυσμενής συνδυασμός για κάθε κόμβο, **σε κάθε δοκιμή διαμέτρων εξετάζονται πολλαπλά σενάρια καταναλώσεων, που αφορούν σε δυσμενείς συνθήκες ζήτησης.**
- Με εξαίρεση ορισμένες πολύ μεγάλες πόλεις, **η τυπική δυσμενέστερη κατάσταση λειτουργίας είναι η περίπτωση πυρκαγιάς**, οπότε προκύπτουν εξαιρετικά υψηλές σημειακές φορτίσεις εξαιτίας της ενεργοποίησης κρουνών.
- Σε αστικές περιοχές, συνήθως **θεωρούνται συνθήκες μέγιστης ωριαίας κατανάλωσης, και ταυτόχρονης ενεργοποίησης (τουλάχιστον) δύο πυροσβεστικών κρουνών** (αν ωστόσο υπάρχουν βιομηχανικές ζώνες ή περιαστικά δάση, ελέγχεται μεγαλύτερος αριθμός κρουνών).
- Τα σενάρια πυρκαγιάς διαμορφώνονται κατά την κρίση του μηχανικού, για την κάλυψη δυσμενών περιπτώσεων, και οφείλουν να είναι **ρεαλιστικά**, ώστε να μην οδηγούν σε υπερβολικά δαπανηρό σχεδιασμό.
- Επειδή δεν είναι εφικτή η διερεύνηση όλων των δυνατών συνδυασμών κρουνών, **εξετάζονται επιλεγμένα μόνο σενάρια πυρκαγιάς**, όπως:
  - **σενάρια με κρουνοί σε ακτινωτές απολήξεις·**
  - **σενάρια με κρουνοί στα υψηλά σημεία του δικτύου·**
  - **σενάρια που επιβαρύνουν διαφορετικές ομάδες κλάδων·**
  - **σενάρια με ενεργοποίηση γειτονικών κρουνών.**

# Σχόλια σχετικά με τους ελέγχους πιέσεων

- Η ανεπαρκής πίεση σε μια περιοχή του δικτύου αντιμετωπίζεται με:
  - αύξηση του υψομέτρου τοποθέτησης της δεξαμενής (όχι πάντα εφικτό)·
  - αντικατάσταση των κρίσιμων κλάδων ανάντη από αγωγούς μεγαλύτερης διαμέτρου (εναλλακτικά, τοποθέτηση παράλληλων αγωγών)·
  - τοποθέτηση αντλιών (αν έχουν εξαντληθεί άλλες εναλλακτικές λύσεις).
- Εξαιτίας της τοπογραφίας, στα υψηλά σημεία του δικτύου που βρίσκονται κοντά στις δεξαμενές, είναι ορισμένες φορές **αναπόφευκτο η τιμή της πίεσης να είναι μικρότερη της επιθυμητής**. Στην περίπτωση αυτή, και εφόσον οι πιέσεις των υπόλοιπων κόμβων κυμαίνονται στα επιτρεπόμενα όρια, δεν θεωρείται γενική αστοχία του δικτύου.
- Στην πράξη, ζητούμενο του σχεδιασμού είναι **η λειτουργία του δικτύου σε ένα μικρό, σχετικά, εύρος πιέσεων, της τάξης των 20-40 m**.
- Εκτός των πιέσεων, πρέπει να ελέγχονται και **οι ταχύτητες ροής των αγωγών**, που, εμπειρικά, **δεν πρέπει να υπερβαίνουν τα 1.5-2.0 m/s**. Διαφορετικά, προκύπτουν μεγάλες απώλειες ενέργειας, ή ισοδύναμα ιδιαίτερα μεγάλες κλίσεις της πιεζομετρικής γραμμής (**μη οικονομικός σχεδιασμός**).
- Κατά τη διαδικασία δοκιμών, στο πλαίσιο της μελέτης διαστασιολόγησης, **ο έλεγχος ταχυτήτων** βοηθά στον εντοπισμό των αγωγών του δικτύου που παρουσιάζουν **υψηλές απώλειες ενέργειας** και πρέπει να **αντικατασταθούν κατά προτεραιότητα (από;)**.
- Από την άλλη, **αγωγοί με πολύ μικρές ταχύτητες** πρέπει να αντικατασταθούν από αγωγούς **μικρότερης διαμέτρου, μέχρι την επιτρεπόμενη ελάχιστη τιμή των 90 mm**.

# Διαστασιολόγηση αγωγών μέσω βελτιστοποίησης

- Έστω δίκτυο γνωστής τοπολογίας, αποτελούμενο από  $m$  αγωγούς άγνωστης διαμέτρου, με τιμές από ένα διακριτό σύνολο τιμών εμπορίου  $[\emptyset_1, \emptyset_2, \dots, \emptyset_N]$ , και αντίστοιχα μοναδιαία κόστη  $[c_1, c_2, \dots, c_N]$ . Το πρόβλημα διαστασιολόγησης μπορεί να αυτοματοποιηθεί, με διατύπωσή του σε όρους βελτιστοποίησης του συνολικού κόστους των αγωγών, ως εξής:

$$\min f = \sum_{j=1}^m c_j(d_j) L_j$$

$$\text{s.t. } d_j \in (\emptyset_1, \emptyset_2, \dots, \emptyset_N) \text{ για κάθε κλάδο } j$$

$$h_i - z_i \geq p_{i, \min} \text{ για κάθε κόμβο } i$$

- Η δυσκολία του προβλήματος οφείλεται στα ακόλουθα χαρακτηριστικά του:
  - το διακριτό πεδίο ορισμού των μεταβλητών ελέγχου (διάμετροι εμπορίου).
  - τη μη γραμμικότητα των περιορισμών ελάχιστης πίεσης.
  - το πολύ μεγάλο πλήθος των μεταβλητών ελέγχου και περιορισμών.
  - τον υπολογιστικό φόρτο που απαιτεί η αποτίμηση της συνάρτησης κόστους (προϋποθέτει υδραυλική επίλυση του δικτύου, για πολλαπλά σενάρια φόρτισης).
- Εφαρμόζονται εξειδικευμένες τεχνικές, κατάλληλες για μη κυρτούς χώρους, με πολλούς περιορισμούς και πολλά τοπικά ακρότατα (ευρετικοί γενετικοί αλγόριθμοι).
- Μαθηματικά βέλτιστες λύσεις μπορεί να παρουσιάζουν κατασκευαστικές δυσκολίες (π.χ. ακανόνιστες εναλλαγές διαμέτρων).