

# Υπενθύμιση εννοιών από την υδραυλική δικτύων υπό πίεση

Σημειώσεις στα πλαίσια του μαθήματος:

**Τυπικά υδραυλικά έργα**

Ακαδημαϊκό έτος 2005-06

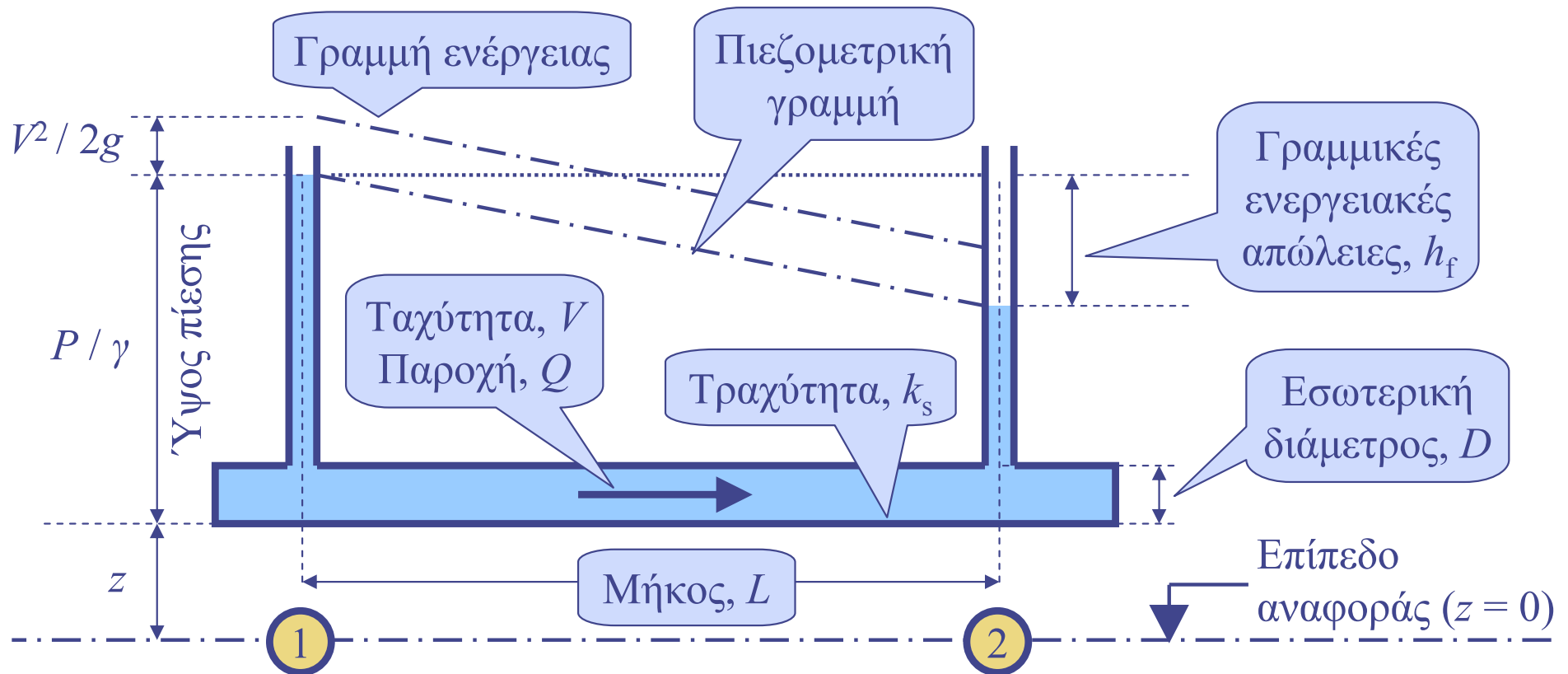
Ανδρέας Ευστρατιάδης & Δημήτρης Κουτσογιάννης

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Τομέας Υδατικών Πόρων

# Χαρακτηριστικά αγωγών υπό πίεση

- ◆ Γεωμετρικά μεγέθη: μήκος, διάμετρος, τραχύτητα
- ◆ Υδραυλικά μεγέθη ροής: παροχή, ταχύτητα
- ◆ Θεμελιώδεις εξισώσεις:
  1. Αρχή διατήρησης μάζας (= εξίσωση συνέχειας)
  2. Αρχή διατήρησης ενέργειας ( $h_{f1-2} = z_1 + P_1 / \gamma - z_2 - P_2 / \gamma$ )



## Υπολογισμός γραμμικών ενεργειακών απωλειών

Εστω αγωγός με γνωστά  $D$  (εσωτερική διάμετρος, σε m),  $L$  (μήκος, σε m),  $k_s$  (ισοδύναμη τραχύτητα, σε m) και  $Q$  (παροχή, σε  $\text{m}^3/\text{s}$ ). Οι γραμμικές ενεργειακές απώλειες  $h_f$  (σε m) δίνονται από τη σχέση Darcy-Weisbach:

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} = 0.0826 f L \frac{Q^2}{D^5}$$

όπου  $V$  η μέση ταχύτητα ροής (σε m/s), δηλαδή:

$$V = \frac{4Q}{\pi D^2}$$

Για συνήθεις ταχύτητες ροής (= υδραυλικώς τραχείς αγωγοί), η εκτίμηση του συντελεστή απωλειών  $f$  γίνεται κατά Colebrook-White:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left[ \frac{k_s}{3.7 D} + \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right]$$

όπου  $\text{Re}$  ο αριθμός Reynolds της ροής (=  $V D / \nu$ ) και  $\nu$  η κινηματική συνεκτικότητα του νερού, ίση με  $1.14 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ , για θερμοκρασία  $15^\circ\text{C}$ .

Εναλλακτικά, χρησιμοποιείται η προσεγγιστική σχέση Hazen-Williams:

$$h_f = \frac{10.675 L Q^{1.852}}{c^{1.852} D^{4.87}}$$

όπου  $c$  αδιάστατος συντελεστής απωλειών.

# Συντελεστές γραμμικών απωλειών

- ◆ Δεδομένου ότι τα δίκτυα διανομής σχεδιάζονται με ορίζοντα 40 ετών, οι τιμές εφαρμογής των συντελεστών τραχύτητας πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τη γήρανση των αγωγών.
- ◆ Η ελάχιστη αποδεκτή ισοδύναμη τραχύτητα, με την προϋπόθεση νερού που δεν προκαλεί διάβρωση ή επικαθήσεις, λαμβάνεται  $k_s = 0.1$  mm.
- ◆ Στη συνήθη περίπτωση πλαστικών αγωγών, με την υπόθεση ότι αναμένονται φαινόμενα διάβρωσης ή επικαθήσεων, συστήνεται  $k_s = 1.0$  έως  $2.0$  mm.
- ◆ Οι τιμές του συντελεστή  $c$  κατά Hazen-Williams κυμαίνονται από 140 για λείους, καλά ευθυγραμμισμένους αγωγούς έως 90 ή 80 για παλιούς, φθαρμένους αγωγούς. Η τυπική τιμή για πλαστικούς αγωγούς είναι  $c = 100-105$ .

## Ενδεικτικός πίνακας εργαστηριακών τιμών ισοδύναμης τραχύτητας τυπικών υλικών

(Δεν συστήνεται η χρήση τους σε μελέτες δικτύων)

Υλικό	$k_s$ (mm)
Ορείχαλκος, χαλκός	0.0015
Χάλυβας εμπορίου ή σφυρήλατος σίδηρος	0.045
Χυτοσίδηρος με επάλειψη ασφάλτου	0.12
Γαλβανισμένος σίδηρος	0.15
Χυτοσίδηρος χωρίς επάλειψη	0.26
Σκυρόδεμα	0.3 – 3.0
Πλαστικό (λείοι σωλήνες εργοστασίου)	< 0.01
Πλαστικό, μετά από χρήση	> 0.10

## Τοπικές απώλειες

- ◆ Πέραν των γραμμικών απωλειών, στα δίκτυα διανομής δημιουργούνται και τοπικές απώλειες, στις συνδέσεις των αγωγών και τις στροφές (**τυπικές τοπικές απώλειες**), και στις θέσεις των ειδικών συσκευών και διατάξεων (**ειδικές τοπικές απώλειες**).
- ◆ Οι τοπικές απώλειες οφείλονται κυρίως στην ανάπτυξη στροβίλων αποκόλλησης της ροής και εκφράζονται με όρους **ύψους κινητικής ενέργειας**, ήτοι:

$$h_L = K_\tau V^2 / 2g$$

όπου  $K_\tau$  συντελεστής που εξαρτάται από τη γεωμετρία της τοπικής μεταβολής διατομών και κατεύθυνσης και τα χαρακτηριστικά της ροής (αριθμός Reynolds).

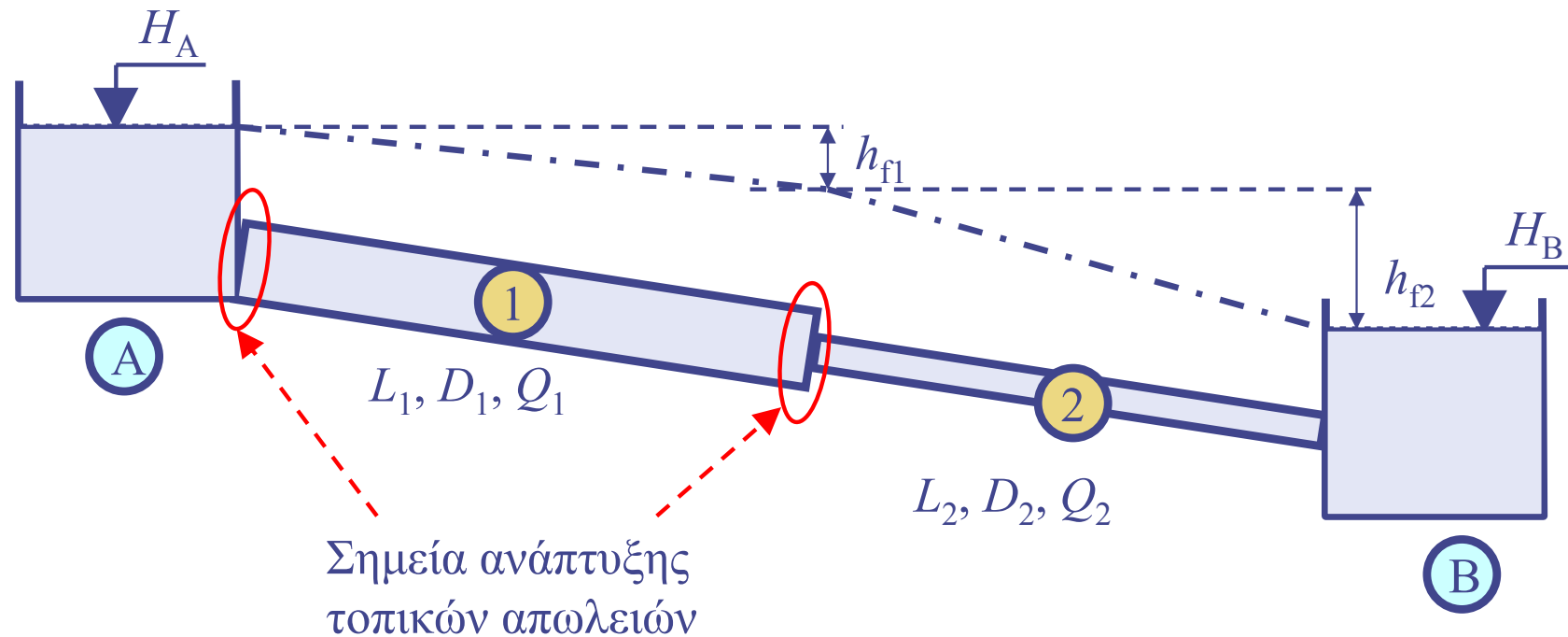
- ◆ Για να ληφθούν υπόψη οι τυπικές τοπικές απώλειες χωρίς αναλυτικό υπολογισμό, προτείνεται η χρήση των υψηλότερων τιμών της τραχύτητας  $k_s$  (**προσαυξημένη ισοδύναμη τραχύτητα**).
- ◆ Ειδικά για τις **δικλείδες**, οι τοπικές απώλειες πρέπει να λαμβάνονται υπόψη, ιδίως όταν αυτές περιορίζουν σημαντικά τη ροή. Στην περίπτωση αυτή, ανάλογα και με το άνοιγμα της δικλείδας, ο συντελεστής  $K_\tau$  μπορεί να αποκτήσει πολύ υψηλές τιμές (π.χ. 100-1000).

Η εκτίμηση της ισοδύναμης τραχύτητας αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες αβεβαιότητας κατά την προσομοίωση ενός δικτύου διανομής.

# Θεμελιώδη προβλήματα αγωγών υπό πίεση

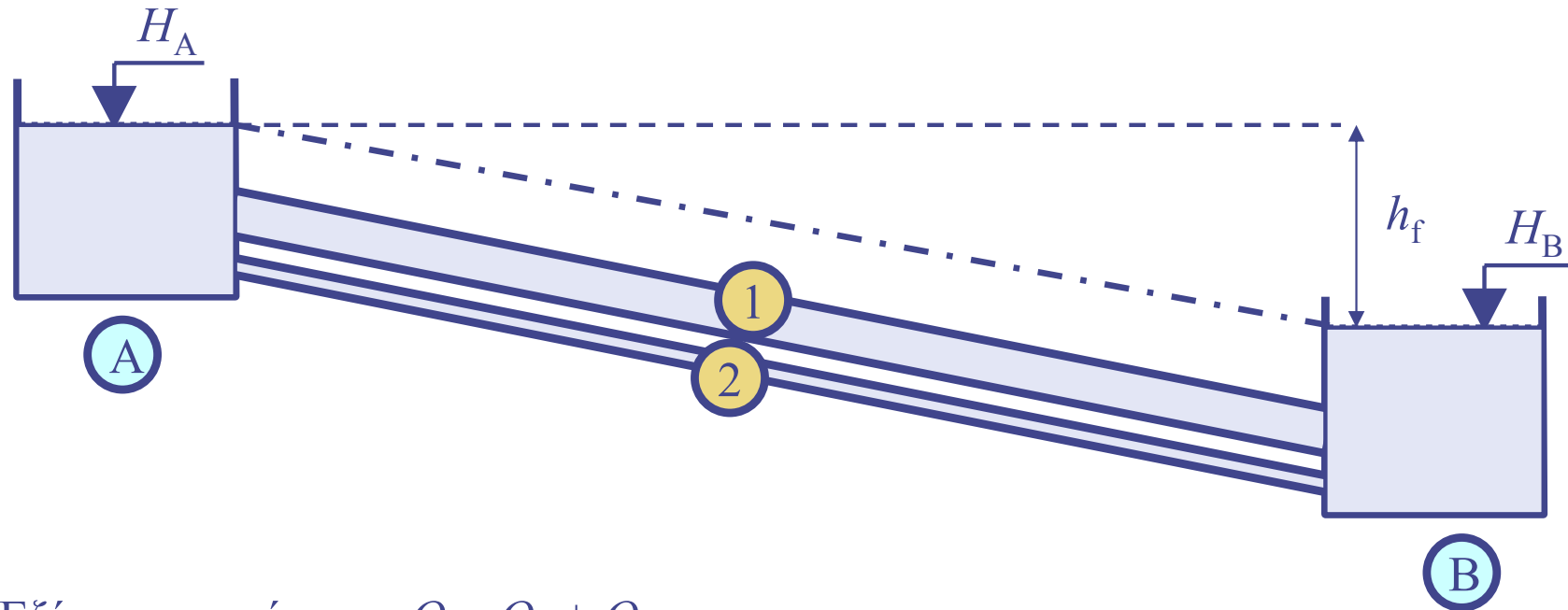
- 1. Γνωστή η παροχή και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά (διάμετρος, μήκος, συντελεστής τραχύτητας), άγνωστες οι ενεργειακές απώλειες**  
Επιλύεται η πεπλεγμένη σχέση Colebrook-White ως προς τον άγνωστο συντελεστή απωλειών  $f$ , και ο τελευταίος εισάγεται στη σχέση Darcy-Weisbach για τον άμεσο υπολογισμό των γραμμικών ενεργειακών απωλειών  $h_f$ . (Υπόδειξη: θέτοντας αρχική τιμή  $f = 0.02$  στο δεξιό μέλος της σχέσης, η εξίσωση Colebrook-White συγκλίνει πάντα μετά από μικρό αριθμό επαναλήψεων).
- 2. Γνωστές οι ενεργειακές απώλειες και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αγωγού, άγνωστη η παροχή**  
Συνδυάζοντας τη σχέση υπολογισμού του αριθμού Reynolds και την εξίσωση Darcy-Weisbach, υπολογίζεται ο όρος  $Re f^{1/2}$  της σχέσης Colebrook-White, και μέσω της τελευταίας ο συντελεστής απωλειών  $f$ . Στη συνέχεια, επιλύεται η εξίσωση Darcy-Weisbach ως προς την άγνωστη παροχή.
- 3. Γνωστές οι ενεργειακές απώλειες και η παροχή, άγνωστη η διάμετρος**  
Δεν υπάρχει αναλυτικός τρόπος επίλυσης. Ο υπολογισμός της διαμέτρου γίνεται είτε με δοκιμές είτε μέσω εμπειρικών σχέσεων. (Προσοχή: Στα πραγματικά προβλήματα, η θεωρητική διάμετρος που εκτιμάται πρέπει να στρογγυλεύεται στην αμέσως μεγαλύτερη διάμετρο εμπορίου).

# Τυπικές υδραυλικές διατάξεις: Αγωγοί σε σειρά



- ◆ Εξίσωση συνέχειας:  $Q_1 = Q_2 = Q$
- ◆ Αρχή διατήρησης ενέργειας:  $h_{f1} + h_{f2} = H_A - H_B$
- ◆ Επειδή  $D_1 > D_2$ , η κλίση της πιεζομετρικής γραμμής του αγωγού 1 είναι μικρότερη από την κλίση του αγωγού 2 ( $h_{f1} / L_1 < h_{f2} / L_2$ )

# Τυπικές υδραυλικές διατάξεις: Παράλληλοι αγωγοί

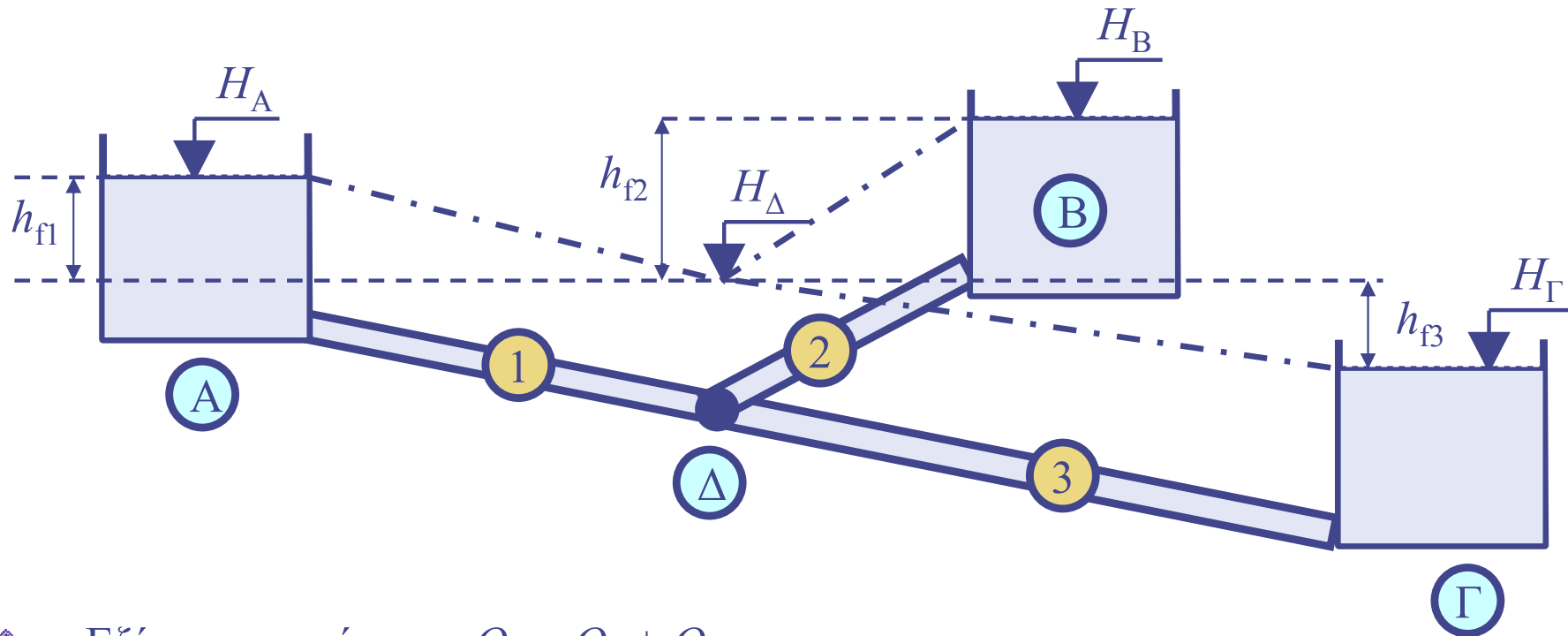


- ◆ Εξίσωση συνέχειας:  $Q = Q_1 + Q_2$
- ◆ Αρχή διατήρησης ενέργειας:  $h_{f1} = h_{f2} = h_f = H_A - H_B$
- ◆ Επειδή  $D_1 > D_2$ , η διερχόμενη παροχή του αγωγού 1 είναι μεγαλύτερη από την παροχή του αγωγού 2 ( $Q_1 > Q_2$ )

**Πρακτικό συμπέρασμα:** Η μείωση της κλίσης της πιεζομετρικής γραμμής, με σκοπό την εξασφάλιση του αναγκαίου ύψους πίεσης στα κατάντη, επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση παράλληλου ανακουφιστικού αγωγού, κατάλληλης διαμέτρου.

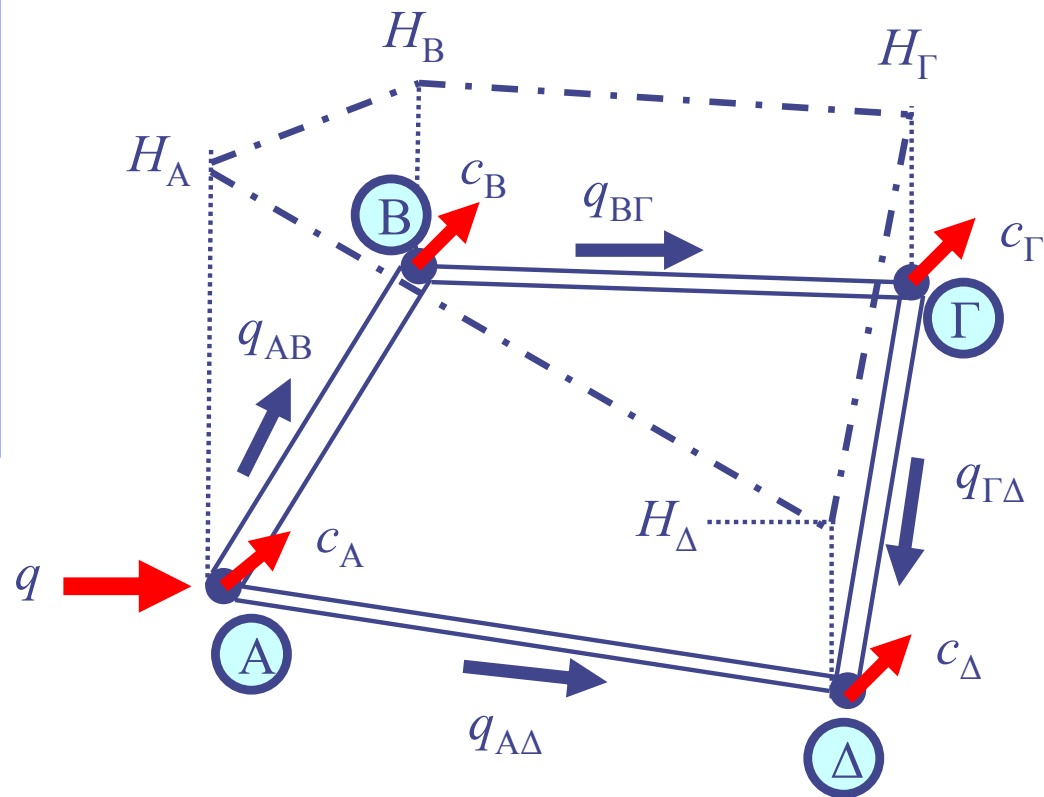


## Τυπικές υδραυλικές διατάξεις: Συμβάλλοντες αγωγοί



- ◆ Εξίσωση συνέχειας:  $Q_3 = Q_1 + Q_2$
- ◆ Αρχή διατήρησης ενέργειας – προκύπτει το ακόλουθο σύστημα εξισώσεων:
  - $h_{f1} = H_A - H_\Delta$
  - $h_{f2} = H_B - H_\Delta$
  - $h_{f3} = H_\Delta - H_\Gamma$
- ◆ Το ενεργειακό υψόμετρο  $H_\Delta$  του κόμβου συμβολής δεν είναι γνωστό.
- ◆ Η φορά της παροχής στη διαδρομή Α-Δ δεν είναι εκ των προτέρων καθορισμένη.

# Τυπικές υδραυλικές διατάξεις: Βρόχοι



- ◆ Στον κόμβο Α όπου οι παροχές αποκλίνουν υπάρχει εισροή, ενώ η στάθμη της Γ.Ε. είναι **μέγιστη**.
- ◆ Στον κόμβο Δ όπου οι παροχές αποκλίνουν υπάρχει εκροή, ενώ η στάθμη της Γ.Ε. είναι **ελάχιστη**.
- ◆ Σε κάθε κόμβο ισχύει η **εξίσωση συνέχειας**:

- $q - q_{AB} - q_{A\Delta} - c_A = 0$
- $q_{AB} - q_{B\Gamma} - c_B = 0$
- $q_{B\Gamma} - q_{\Gamma\Delta} - c_\Gamma = 0$
- $q_{\Gamma\Delta} + q_{A\Delta} - c_\Delta = 0$

◆ **Καθολική εξίσωση συνέχειας:**  $q = c_A + c_B + c_\Gamma + c_\Delta$

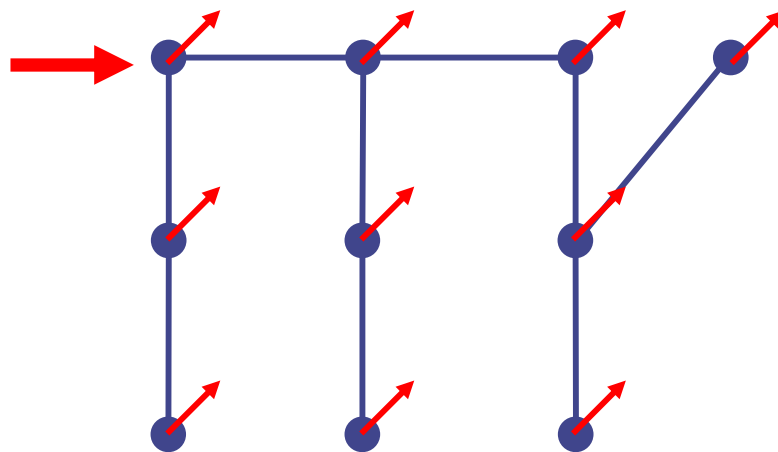
◆ **Αρχή διατήρησης ενέργειας:**  $(H_A - H_B) + (H_B - H_\Gamma) + (H_\Gamma - H_\Delta) + (H_\Delta - H_A) = 0$

$\underbrace{\hspace{1.5cm}}_{h_{fA-B}} \quad \underbrace{\hspace{1.5cm}}_{h_{fB-\Gamma}} \quad \underbrace{\hspace{1.5cm}}_{h_{f\Gamma-\Delta}} \quad \underbrace{\hspace{1.5cm}}_{-h_{fA-\Delta}}$

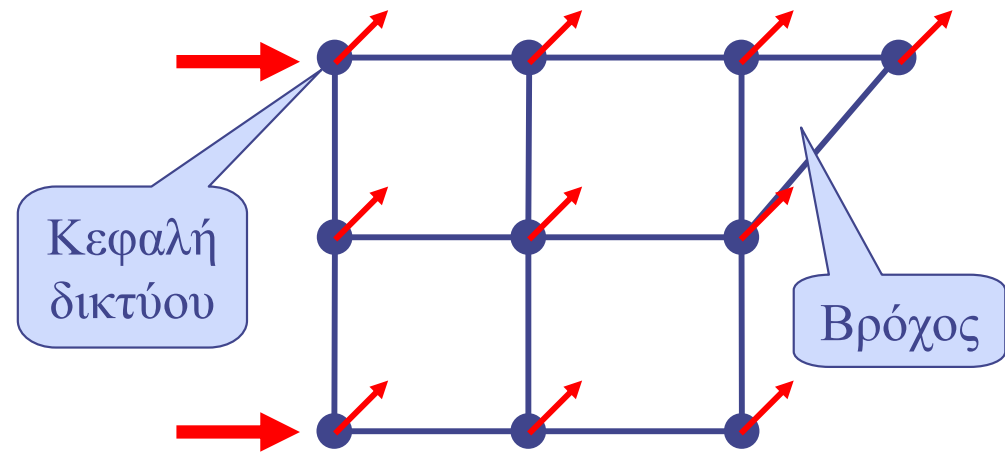
Μη γραμμική συνάρτηση της διερχόμενης παροχής

# Η έννοια του δικτύου

- ◆ **Δίκτυο (network):** Από άποψη υδραυλικής, σύστημα αγωγών που μεταφέρει νερό.
- ◆ **Δίκτυο διανομής (distribution network):** Σύστημα αγωγών που παραλαμβάνει νερό από ολιγάριθμες πηγές (σημεία εισόδου) και το οδηγεί προς πολλαπλά σημεία προορισμού (σημεία εξόδου ή καταναλωτές).
- ◆ **Ακτινωτό δίκτυο (branched network):** Δίκτυο τροφοδοτούμενο από ένα μοναδικό σημείο (κεφαλή), στο οποίο δεν σχηματίζονται κλειστές διαδρομές αγωγών (βρόχοι). Κάθε σημείο εξόδου τροφοδοτείται μέσω μιας μοναδικής διαδρομής.
- ◆ **Βροχωτό δίκτυο (looped network):** Δίκτυο τροφοδοτούμενο από ένα ή περισσότερα σημεία, στο οποίο σχηματίζονται κλειστές διαδρομές αγωγών. Σε κάθε σημείο οδηγούν άνω της μίας διαδρομές, με αφετηρία μία από τις κεφαλές του δικτύου.

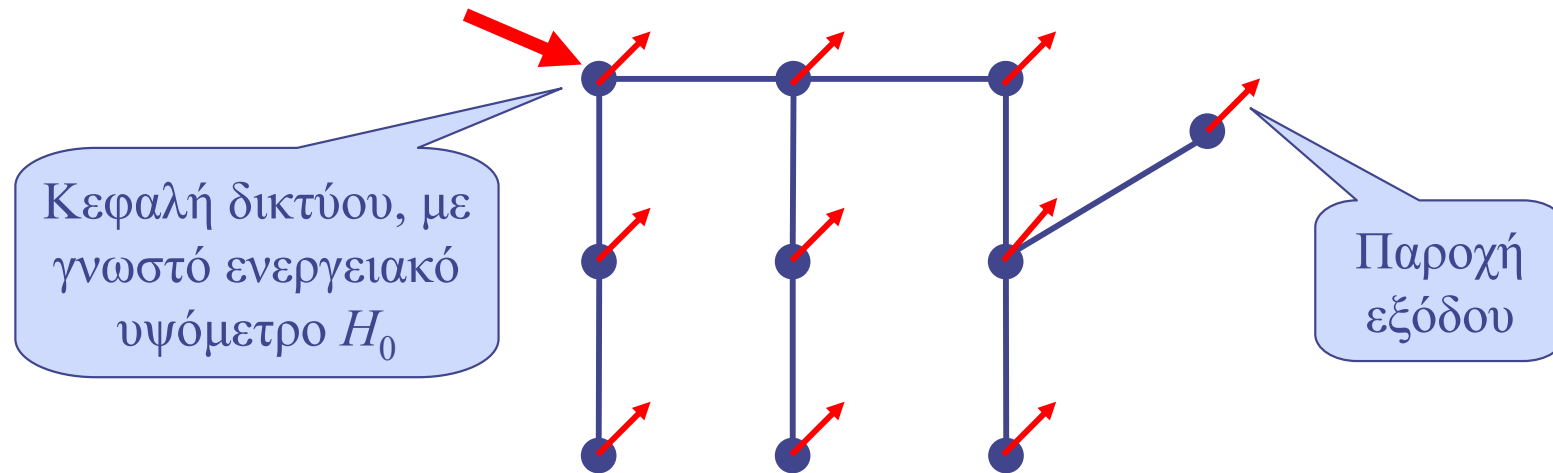


Ακτινωτό δίκτυο



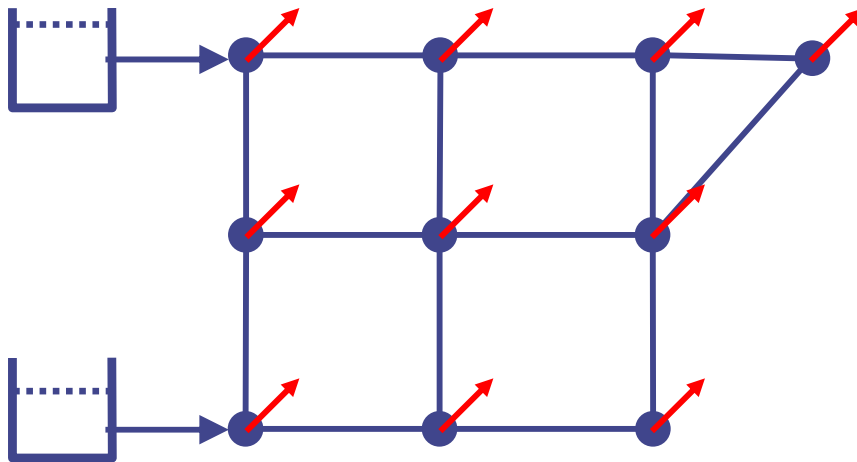
Βροχωτό δίκτυο

# Ακτινωτά δίκτυα



- ◆ **Δεδομένα:** γεωμετρικά χαρακτηριστικά αγωγών, παροχές εξόδου (= καταναλώσεις) κόμβων, ενεργειακό υψόμετρο κεφαλής ( $H_0$ )
- ◆ **Ζητούμενα:** παροχές αγωγών, ενεργειακά υψόμετρα κόμβων
- ◆ **Μεθοδολογία:** ξεκινώντας από κατάντη, από την εξίσωση συνέχειας κάθε κόμβου υπολογίζεται η παροχή του ανάντη αγωγού, και μέσω της σχέσης γραμμικών ενεργειακών απωλειών, η πτώση πίεσης κατά μήκος του αγωγού
- ◆ **Πεδίο εφαρμογής:** κλειστά αρδευτικά δίκτυα (αλλά και οικιακά δίκτυα)
- ◆ **Πλεονεκτήματα:** ελαχιστοποίηση μήκους δικτύου (και συνεπώς κόστους αγωγών)
- ◆ **Μειονεκτήματα:** αυξημένες ενεργειακές απώλειες, απομόνωση κατάντη τμήματος σε περίπτωση βλάβης, απαιτεί έργα προστασίας έναντι υδραυλικού πλήγματος

# Βροχotá δίκτυα



**Πλεονεκτήματα:** μειωμένες ενεργειακές απώλειες, ασφάλεια έναντι βλαβών (αφού εξασφαλίζεται τουλάχιστον μία εναλλακτική διαδρομή τροφοδοσίας για κάθε κόμβο), «παθητική» προστασία έναντι υδραυλικού πλήγματος

**Μειονεκτήματα:** σημαντική αύξηση μήκους δικτύου (αντισταθμίζεται εν μέρει από την χρήση μικρότερων διαμέτρων), δυσκολία στην εποπτεία και διαχείριση

- ◆ **Δεδομένα:** γεωμετρικά χαρακτηριστικά αγωγών, παροχές εξόδου (= καταναλώσεις) κόμβων, ενεργειακό υψόμετρο δεξαμενών (= σημεία προσφοράς, κεφαλές δικτύου)
- ◆ **Ζητούμενα:** παροχές αγωγών, ενεργειακά υψόμετρα κόμβων
- ◆ **Μεθοδολογία:** προκύπτει σύστημα μη γραμμικών εξισώσεων (εξισώσεις συνέχειας κόμβων, εξισώσεις διατήρησης ενέργειας βρόχων), που επιλύεται μόνο με επαναληπτικές αριθμητικές μεθόδους
- ◆ **Πεδίο εφαρμογής:** εσωτερικά δίκτυα ύδρευσης αστικών περιοχών