



UNIVERSITY OF  
**PATRAS**  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

# Σημειώσεις διαλέξεων «Εφαρμοσμένη Υδραυλική»

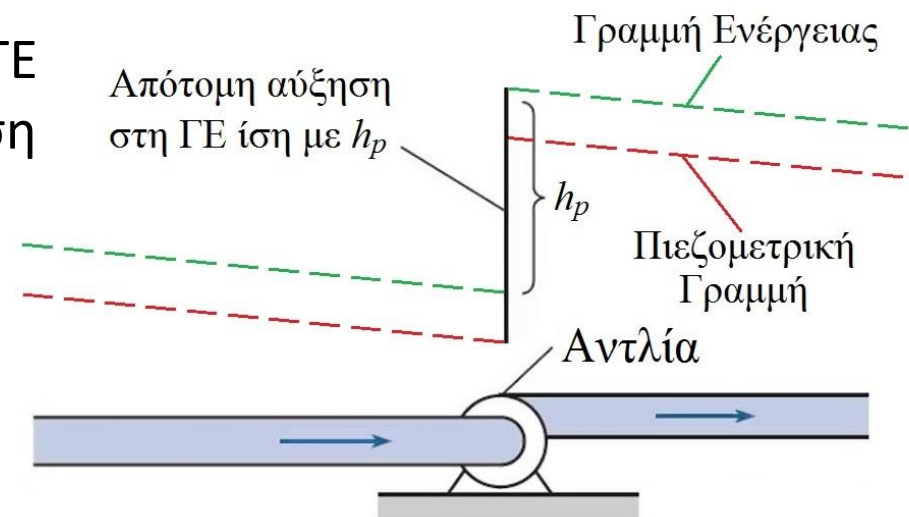
Διάλεξη 4  
03/11/2022

Λευθεριώτης Γεώργιος  
Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος  
Πανεπιστήμιο Πατρών

## Γραμμή Ενέργειας (ΓΕ) και Πιεζομετρική Γραμμή (ΠΓ)

### Γραμμή Ενέργειας (Energy Grade Line, EGL)

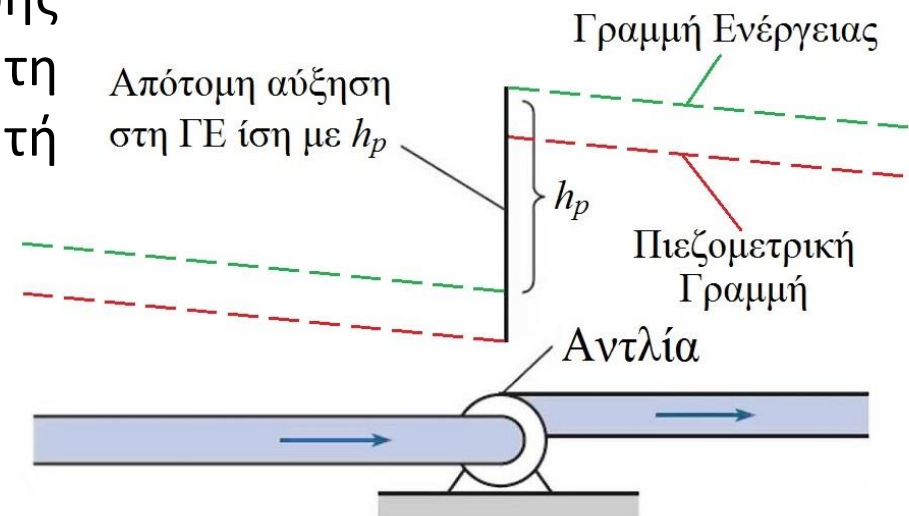
- Είναι η γραφική απεικόνιση του ολικού φορτίου  $H = \frac{p}{\gamma} + z + \frac{V^2}{2g}$  κατά μήκος του αγωγού.
- Σε τμήματα αγωγού σταθερής διαμέτρου, έχει σταθερή, πτωτική κλίση.
- Σε θέσεις τοπικών απωλειών, η ΓΕ παρουσιάζει τοπική πτώση ίση με το φορτίο τοπικών απωλειών,  $h_t$
- Σε θέση που υπάρχει αντλία, η ΓΕ παρουσιάζει τοπική ανύψωση ίση με το φορτίο της αντλίας,  $h_p$



## Γραμμή Ενέργειας (ΓΕ) και Πιεζομετρική Γραμμή (ΠΓ)

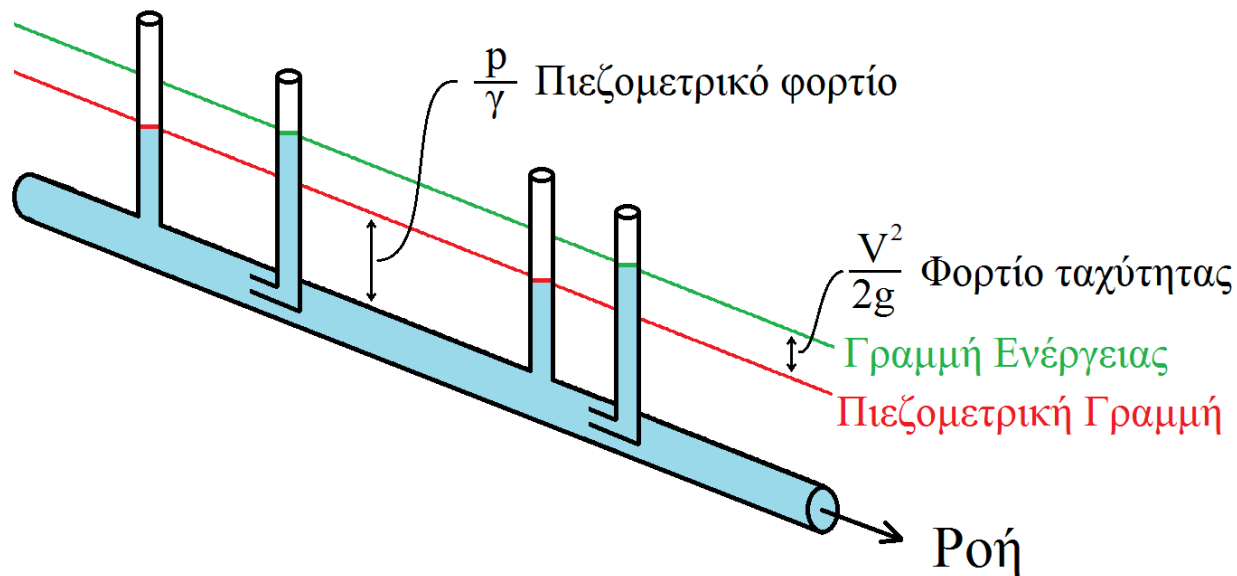
### Πιεζομετρική Γραμμή (Hydraulic Grade Line, HGL)

- Είναι η γραφική απεικόνιση του πιεζομετρικού φορτίου  $h = \frac{p}{\gamma} + z$  κατά μήκος του αγωγού.
- Ονομάζεται και **Γραμμή Υδραυλικής Κλίσης**.
- Σε τμήματα αγωγού σταθερής διαμέτρου, έχει σταθερή, πτωτική κλίση.
- Σε τμήματα αγωγού σταθερής διαμέτρου, είναι παράλληλη με τη ΓΕ και βρίσκεται κάτω από αυτή κατά  $V^2/2g$



## Γραμμή Ενέργειας (ΓΕ) και Πιεζομετρική Γραμμή (ΠΓ)

- **Πιεζομετρική Γραμμή** είναι ο γεωμετρικός τόπος των υψών στα οποία θα έφτανε το ρευστό σε μανομετρικούς σωλήνες (πάνω στον αγωγό).
- Οι σωλήνες στο κέντρο του αγωγού περιλαμβάνουν και το φορτίο ταχύτητας και οι κορυφές τους αποτυπώνουν τη **Γραμμή Ενέργειας**.

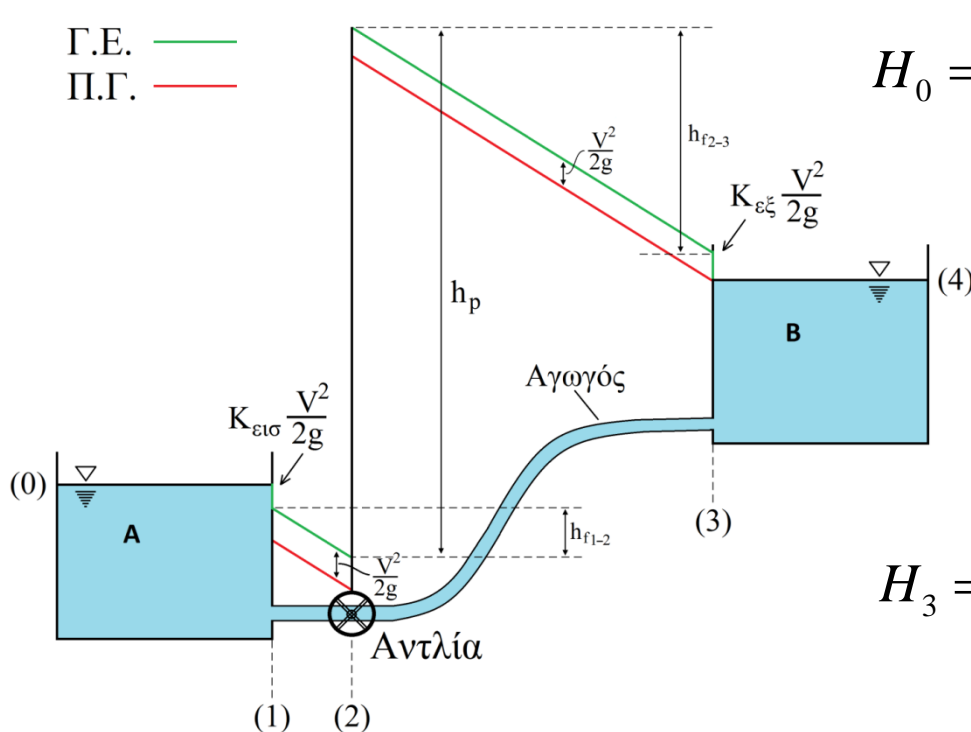


# Ροή υπό πίεση ή ροή σε κλειστούς αγωγούς

5/20

## Γραμμή Ενέργειας (ΓΕ) και Πιεζομετρική Γραμμή (ΠΓ)

### Από Εξίσωση Ενέργειας



$$H_0 = z_0 = H_1 + K_{\epsilon\iota\sigma} \frac{V^2}{2g} \Rightarrow H_1 = z_0 - K_{\epsilon\iota\sigma} \frac{V^2}{2g}$$

$$H_1 = H_{2^-} + h_{f1-2^-} \Rightarrow H_{2^-} = H_1 - h_{f1-2^-}$$

$$H_{2^-} + h_p = H_{2^+} \Rightarrow H_{2^+} = H_{2^-} + h_p$$

$$H_{2^+} = H_3 + h_{f2^+-3} \Rightarrow H_3 = H_{2^+} - h_{f2^+-3}$$

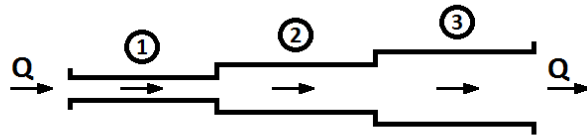
$$H_3 = H_4 + K_{\epsilon\xi} \frac{V^2}{2g} \Rightarrow H_4 = z_4 = H_3 - K_{\epsilon\xi} \frac{V^2}{2g}$$

Οι παραπάνω εξισώσεις δίνουν τα υψόμετρα της Γ.Ε. στις διατομές.  
 Στα διαστήματα (1) – (2<sup>-</sup>) και (2<sup>+</sup>) – (3) η Γ.Ε. παρουσιάζει σταθερή κλίση.

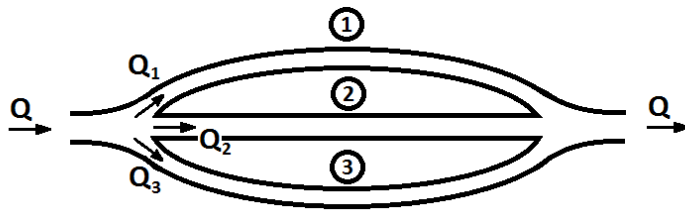
$$H = \frac{p}{\gamma} + z + \frac{V^2}{2g}$$

## Συστήματα Πολλαπλών Αγωγών

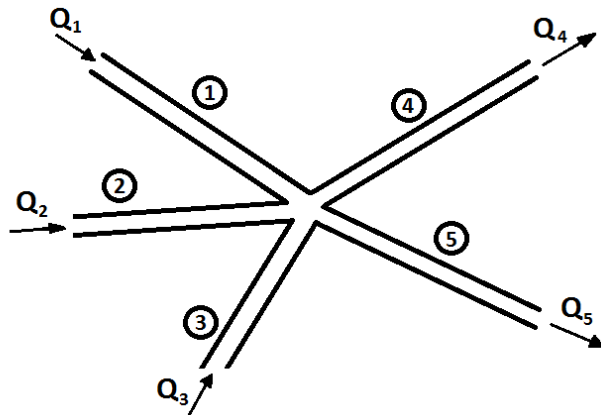
Οι 3 βασικές περιπτώσεις συστημάτων πολλαπλών αγωγών είναι οι εξής:



Αγωγοί σε σειρά



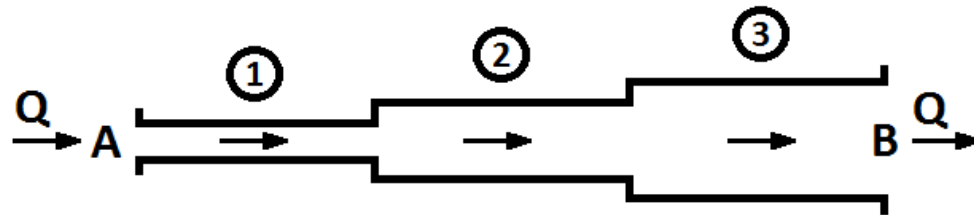
Αγωγοί παράλληλα



Αγωγοί διερχόμενοι από κόμβο

## Συστήματα Πολλαπλών Αγωγών

### Αγωγοί σε σειρά



### Κανόνες

- Ίση παροχή σε κάθε αγωγό

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = \text{const} \Rightarrow$$

$$V_1 A_1 = V_2 A_2 = V_3 A_3$$

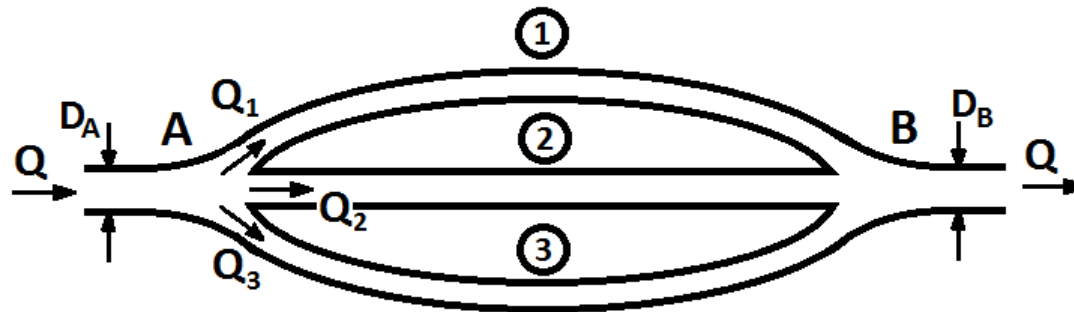
- Ολικές απώλειες ίσες με το άθροισμα των απωλειών σε κάθε αγωγό

$$h_{L_{A-B}} = h_{L_1} + h_{L_2} + h_{L_3}$$

$$h_{L_{A-B}} = h_{f_1} + h_{\tau_1} + h_{f_2} + h_{\tau_2} + h_{f_3} + h_{\tau_3}$$

## Συστήματα Πολλαπλών Αγωγών

### Αγωγοί παράλληλα



### Κανόνες

- Το άθροισμα παροχών ίσο με τη συνολική παροχή του συστήματος
- Ολικές απώλειες ίσες σε κάθε αγωγό

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = \sum_{i=1}^N Q_i$$

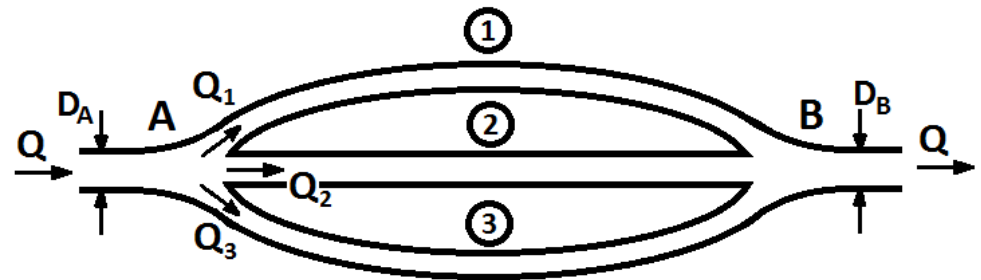
$$h_{L_{A-B}} = h_{L_1} = h_{L_2} = h_{L_3} = \dots = h_{L_N}$$

$$\text{Για } D_A = D_B \longrightarrow h_{L_{A-B}} = \left( \frac{p_A}{\gamma} + z_A \right) - \left( \frac{p_B}{\gamma} + z_B \right)$$



## Αγωγοί παράλληλα

### Είδη προβλημάτων



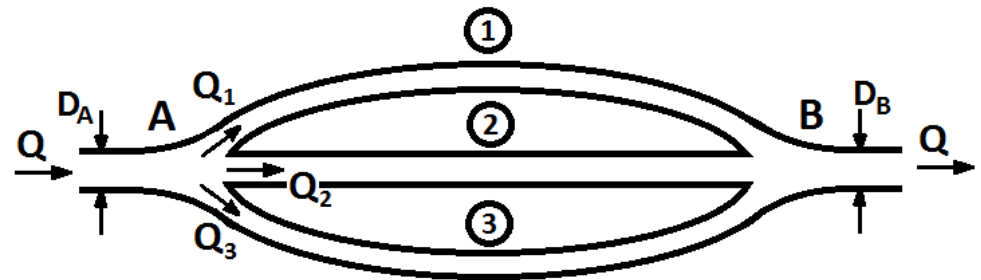
1. Δεδομένα: Πιεζομετρικό φορτίο στα A και B  
Ζητούμενα:  $Q_i$  και  $Q$  ολικό

### Επίλυση:

- Κάθε αγωγός επιλύεται ξεχωριστά σαν πρόβλημα τύπου II για τον υπολογισμό των παροχών.
- Μετά τον υπολογισμό των παροχών, τις αθροίζουμε για να υπολογίσουμε την ολική παροχή του συστήματος.

$$Q = \sum Q_i$$

## Αγωγοί παράλληλα



## Είδη προβλημάτων

2. Δεδομένα:  $Q$  (ολικό)  
Ζητούμενα:  $Q_i$  και  $h_{L(A-B)}$

### Επίλυση:

- Υποθέτουμε  $Q_1$  και υπολογίζουμε  $h_{L_1}$  (πρόβλημα τύπου I)
- Υπολογίζουμε τα  $Q_2, Q_3, \dots, Q_N$  (πρόβλημα τύπου II) αφού  $h_{L_1} = h_{L_2} = h_{L_3} = h_{L_N}$
- Αν  $Q \neq \sum Q_i$  διορθώνουμε τις παροχές:  $Q_{i,new} = (Q_i / \sum Q_i) Q^*$
- Από τα νέα  $Q_i$  υπολογίζουμε νέα  $h_{L_i}$
- Ελέγχουμε αν  $h_{L_1} = h_{L_2} = h_{L_3} = h_{L_N}$
- Εάν ναι, τότε δεχόμαστε τις παροχές  $Q_1, Q_2, Q_3$
- Εάν όχι υποθέτουμε νέο  $Q_1$  και επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία

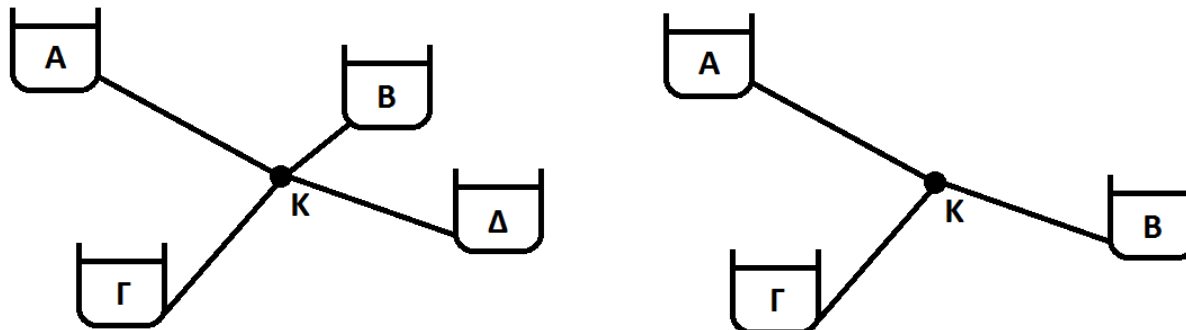
\* Αν π.χ.  $Q_1 + Q_2 + Q_3 = 1,22Q$   
τότε  $Q_{1,new} = Q_{1,old} / 1,22$

## Συστήματα Πολλαπλών Αγωγών

### Σύστημα αγωγών που διέρχονται από κόμβο

Είναι ένα σύστημα αγωγών που διέρχονται από έναν κόμβο. Σε τέτοια συστήματα ισχύουν οι εξής 2 κανόνες:

- Ισοζύγιο παροχών: Το άθροισμα των παροχών που εισέρχονται στον κόμβο ισούται με το άθροισμα των παροχών που εξέρχονται από τον κόμβο.
- Στην περιοχή πλησίον του κόμβου κάθε αγωγός υφίσταται μεταβολή πίεσης. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται ίδιο υψόμετρο της Πιεζομετρικής Γραμμής στο σημείο του κόμβου.

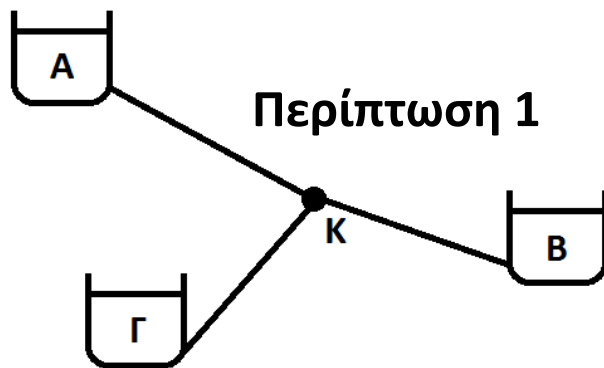


Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το **πρόβλημα των 3 δεξαμενών**.

## Συστήματα Πολλαπλών Αγωγών

### Το πρόβλημα των 3 δεξαμενών

Ορίζουμε θετικές παροχές προς τον κόμβο  $\longrightarrow Q_1 + Q_2 + Q_3 = 0$

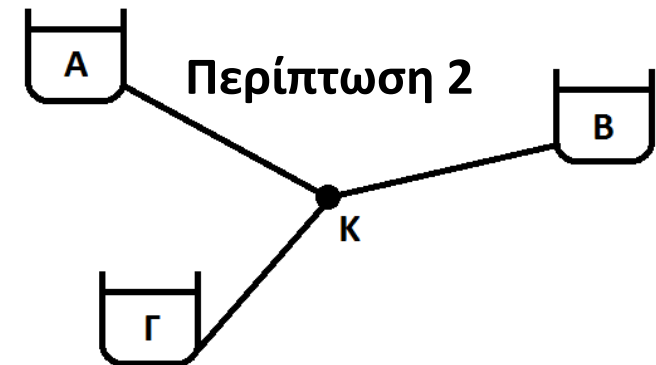


$$h_A > h_K > h_B > h_\Gamma$$

Η δεξαμενή A τροφοδοτεί τις B και Γ

$$Q_1 = Q_2 + Q_3$$

$$h_K = \frac{p_K}{\gamma} + z_K$$



$$h_A > h_B > h_K > h_\Gamma$$

Η δεξαμενές A και B τροφοδοτούν τη Γ

$$Q_1 + Q_2 = Q_3$$

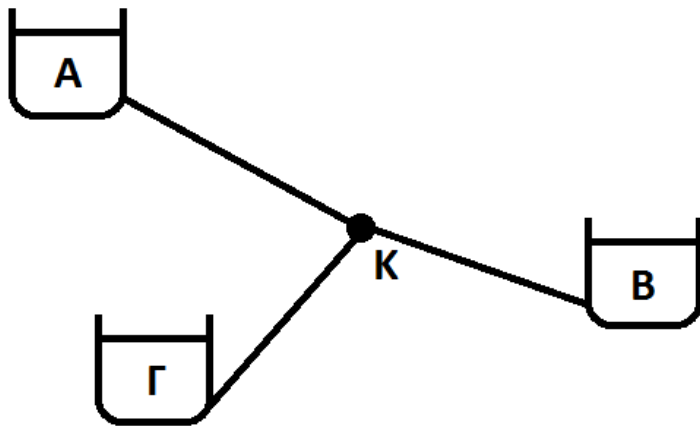
## Συστήματα Πολλαπλών Αγωγών

### Το πρόβλημα των 3 δεξαμενών

Δεδομένα: Στάθμες δεξαμενών και Χαρακτηριστικά αγωγών

Ζητούμενο: Παροχές

#### Διαδικασία επίλυσης



- Πρέπει να προσδιοριστεί το πιεζομετρικό φορτίο  $h_K$  στον κόμβο K
- Υποθέτουμε διάφορες τιμές του  $h_K$  και υπολογίζουμε τις παροχές μέχρι να ικανοποιείται το ισοζύγιο των παροχών, δηλαδή πρέπει  $Q_{\text{εισορής}} = Q_{\text{εκροής}}$
- Αν  $Q_{\text{εισορής}} > Q_{\text{εκροής}}$  πρέπει να υποθέσουμε νέα τιμή του  $h_K$  μεγαλύτερη από την προηγούμενη.

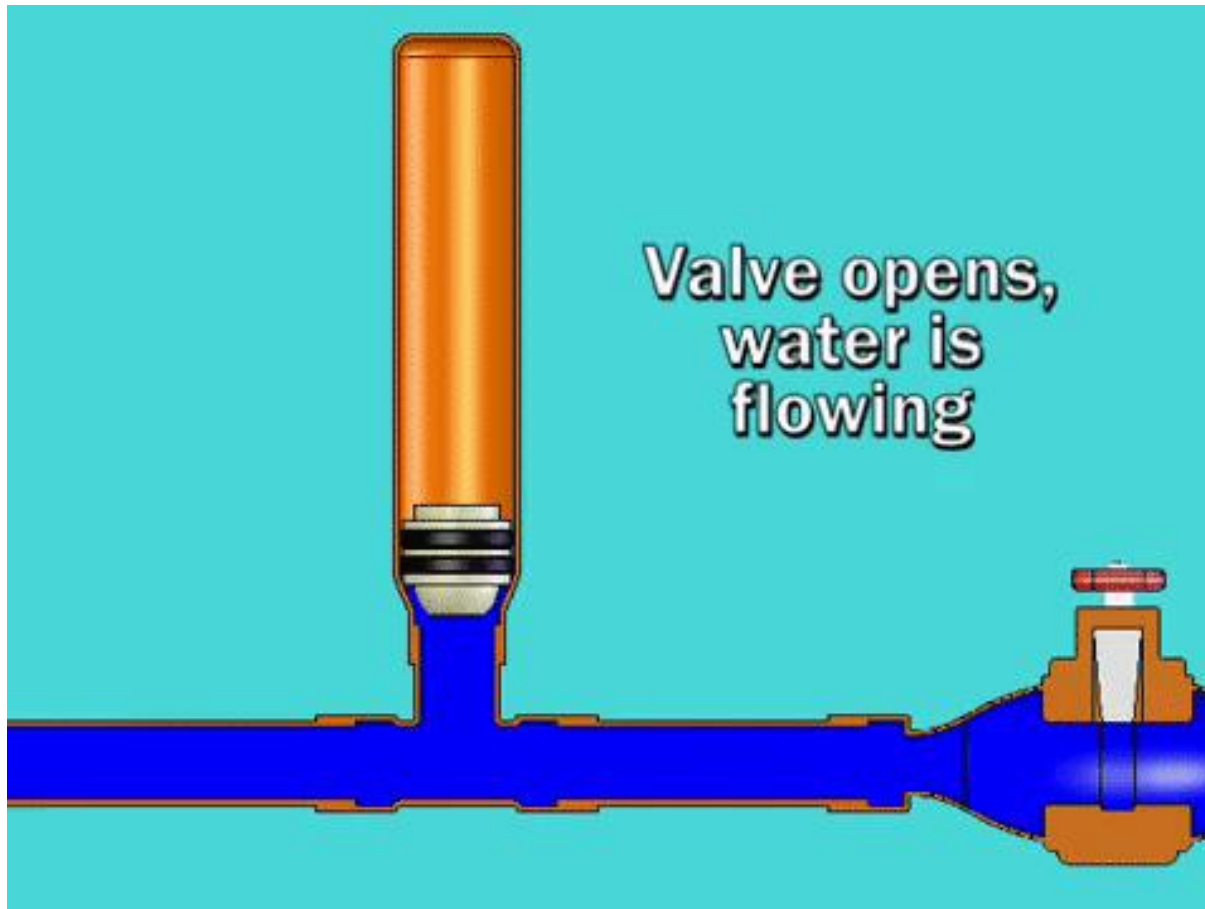
## Υδραυλικό Πλήγμα (Water Hammer)

- Θεωρητικός σχεδιασμός συστημάτων μεταφοράς ύδατος —→ Μόνιμη Ροή
- Μη μόνιμη ροή για μικρά χρονικά διαστήματα με βλαπτικές συνέπειες για αγωγούς
- Απότομες μεταβολές στις συνθήκες λειτουργίας (αστοχία αντλίας, απότομο κλείσιμο δικλίδας ροής)
- Δημιουργία υπό-υπερπίεσης λόγω μεταβολής των αδρανειακών δυνάμεων.
- Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **Υδραυλικό Πλήγμα (Water Hammer)**

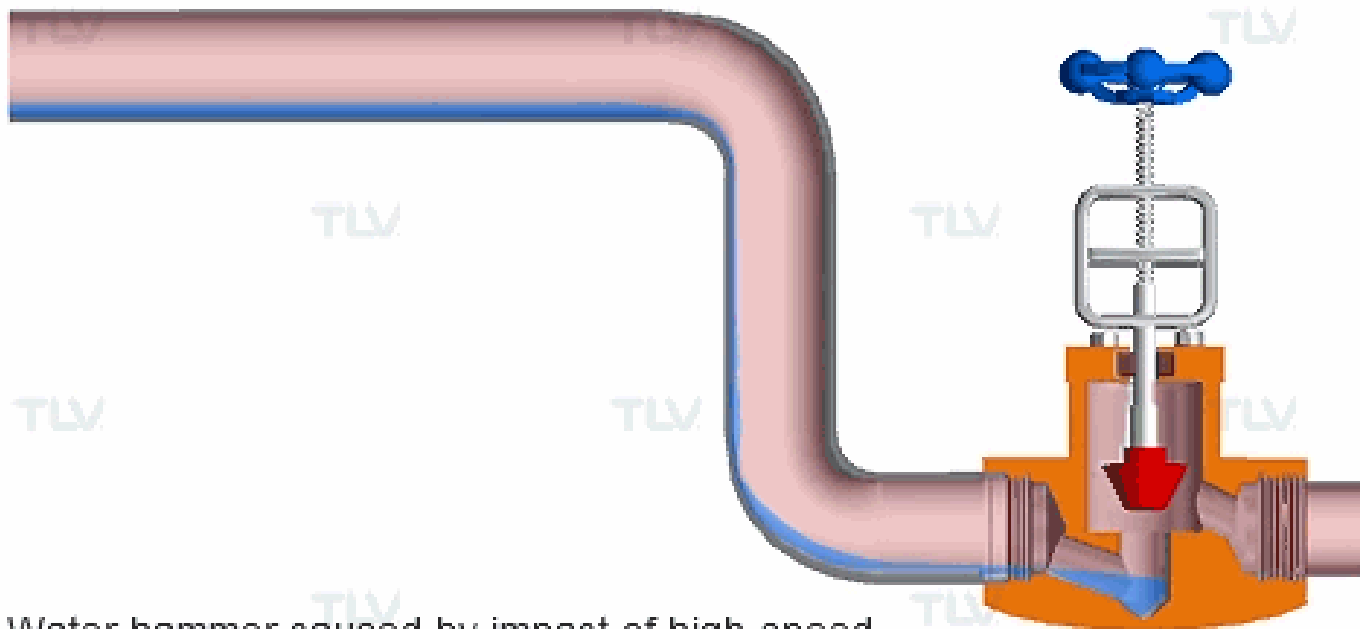
## Αντιμετώπιση

- Αντιπληγματική προστασία με μηχανικά μέσα (μείωση ρυθμού κλεισίματος δικλίδων, ειδικές δικλίδες ανακούφισης, κλπ.)
- Αντιπληγματική προστασία με υδραυλικά μέσα (πύργος ανακούφισης)

## Υδραυλικό Πλήγμα (Water Hammer)



## Υδραυλικό Πλήγμα (Water Hammer)



Water hammer caused by impact of high-speed condensate inside piping

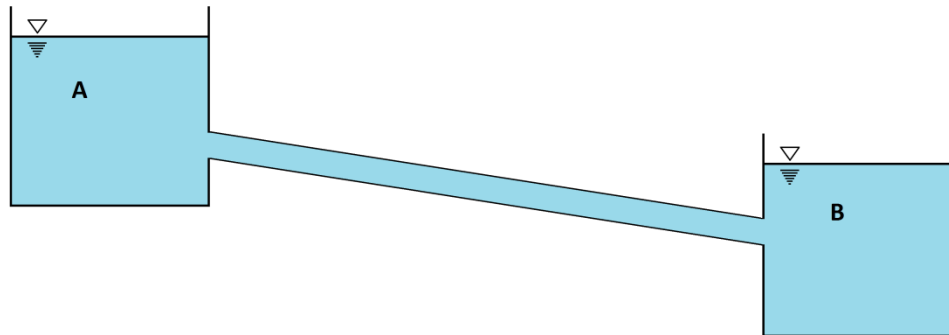
Copyright TLV CO.,LTD.



## Υδραυλικό Πλήγμα (Water Hammer)

Έλεγχος μεταβολής των πιέσεων λόγω απότομης διακοπής της ροής

Θεωρούμε ότι το σύστημα δεξαμενών του παρακάτω σχήματος διαθέτει μία δικλείδα ελέγχου της ροής στο κάτω άκρο του αγωγού, κοντά στη δεξαμενή B.



Έστω  $m$  η μάζα του ρευστού που ρέει μέσα στον αγωγό και  $M$  η ορμή της μάζας.

$$M = \rho \cdot A \cdot L \cdot V$$

όπου  $\rho$  η πυκνότητα του ρευστού,  $A$  η διατομή και  $L$  το μήκος του αγωγού και  $V$  η ταχύτητα του ρευστού.

## Υδραυλικό Πλήγμα (Water Hammer)

Έλεγχος μεταβολής των πιέσεων λόγω απότομης διακοπής της ροής

Αν η παροχή μειωθεί λόγω απότομου κλεισίματος της δικλίδας, τότε θα έχουμε μεταβολή της ορμής με ρυθμό:

$$\frac{dM}{dt} = \rho \cdot A \cdot L \cdot \frac{dV}{dt}$$

Αυτός ο ρυθμός μεταβολής της ορμής ισούται με μία δύναμη  $F$ , που εμφανίζεται κατά την επιβράδυνση του ρευστού και μεταδίδεται από τη δικλίδα ελέγχου στο ρευστό.

Λόγω της δύναμης  $F$  προκαλείται μία στιγμιαία αύξηση της πίεσης στο ρευστό η οποία είναι ίση με:

$$\delta p = \frac{F}{A}$$

## Υδραυλικό Πλήγμα (Water Hammer)

Έλεγχος μεταβολής των πιέσεων λόγω απότομης διακοπής της ροής

Η σχέση αυτή μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\delta p = \frac{F}{A} \Rightarrow \delta p \cdot A = F \Rightarrow \delta p \cdot A = \rho \cdot A \cdot L \cdot \frac{dV}{dt} \Rightarrow \delta p = \rho \cdot L \cdot \frac{dV}{dt}$$

Διαιρώντας και τα δύο μέλη με την επιτάχυνση της βαρύτητας  $g$ , έχουμε:

$$\frac{\delta p}{g} = \frac{\rho \cdot L}{g} \cdot \frac{dV}{dt} \Rightarrow \frac{\delta p}{\rho \cdot g} = \frac{L}{g} \cdot \frac{dV}{dt} \Rightarrow \delta h = \frac{L}{g} \cdot \frac{dV}{dt}$$

όπου  $\delta h = \delta p / \rho g$  ονομάζεται φορτίο υπερπίεσης.

Άρα για ένα δεδομένο σύστημα ( $L =$  σταθερό), το  $\delta h$  είναι συνάρτηση του  $dV/dt$ .

## Παρατηρήσεις στο σχεδιασμό συστήματος αγωγών

- Οι τραχύτητες στο διάγραμμα Moody ισχύουν για καινούριους αγωγούς. Με την πάροδο του χρόνου η τραχύτητα τους αυξάνεται (γήρανση αγωγών).  
**Λύση:** Τεχνητή αύξηση της τραχύτητας κατά τον αρχικό σχεδιασμό.
- Οι τοπικές απώλειες δεν υπολογίζονται αναλυτικά.
  - i) 10% επί των γραμμικών απωλειών
  - ii) αυξημένη τιμή του συντελεστή τριβών  $f$ .
- Μεταφορά ύδατος με βαρύτητα και με άντληση μεταξύ δύο δεξαμενών. Επιλέγουμε για ασφάλεια κατώτατη στάθμη ύδατος στα ανάντη και ανώτατη στάθμη ύδατος στα κατόντη.
- Οι διαθέσιμοι αγωγοί εμπορίου χαρακτηρίζονται από εξωτερική/εσωτερική διάμετρο και μέγιστη πίεση (σε  $atm$ ) που αντέχουν. **1 atm = 100 kN/m<sup>2</sup>**
- Όταν προσδιοριστεί η κατάλληλη κατηγορία αγωγού, η επιλογή διαμέτρου δεν επιλύεται ως πρόβλημα τύπου III αλλά ως σειρά προβλημάτων τύπου I με έλεγχο παραμέτρων (Μέγιστες - ελάχιστες ταχύτητες, Συνολικές απώλειες).

# Ροή υπό πίεση ή ροή σε κλειστούς αγωγούς

---

## Βιβλιογραφία

- Δημητρακόπουλος Α. **Στοιχεία υδραυλικής κλειστών και ανοικτών αγωγών**, Εκδόσεις Gotsis, 2018.
- Λιακόπουλος Α. **Υδραυλική**, 3<sup>η</sup> έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, 2020,
- Στάμου Α. **Εφαρμοσμένη Υδραυλική**, 3<sup>η</sup> έκδοση, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, 2016.