Στοιχεία εφαρμοσμένης υδραυλικής για αστικά υδραυλικά έργα

Κοσσιέρης Παναγιώτης (pkossieris@uniwa.gr)

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Αθήνα, 2022

Ιδιότητες ρευστών

- **Ρευστό:** είναι κάθε υλικό το οποίο παραμορφώνεται συνεχώς (ρέει) υπό την επίδραση οποιασδήποτε διατμητικής τάσης, όσο μικρή και αν είναι αυτή.
- **Διατμητική τάση:** εφαπτομενική δύναμη που ασκείται στην επιφάνεια ενός υλικού

Ιδιότητες ρευστών

- **Πυκνότητα, *ρ* -** Ορίζεται η μάζα ρευστού ανά μονάδα όγκου:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \left[\frac{\mathrm{Kg}}{\mathrm{m}^3}\right]$$

νερό: $\rho \approx 1000\ \mathrm{Kg/m^3}$ (T = 20 °C, P = 1 atm)

- **Ειδικό βάρος, *γ*:** Ορίζεται το βάρος του ρευστού ανά μονάδα όγκου

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{mg}{V} = \rho \cdot g \qquad \left[\frac{\mathrm{Kg}}{\mathrm{m}^2\mathrm{s}^2} \rightarrow \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}^3}\right]$$

όπου $g = 9.81\, m/s^2$ (επιτάχυνση της βαρύτητας)

νερό: $\gamma = 9.81\ \mathrm{kN/m^3}$

Ιδιότητες ρευστών

Ιδιότητες ρευστών

- **Βάρος, W:**

$$W = m \cdot g = V \cdot \gamma \quad [\mathrm{N}]$$

- **Ειδικός όγκος, v_{sp}:** Ορίζεται ως ο όγκος μιας μονάδας μάζας

$$v_{sp} = 1/\rho \; [\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{Kg}}]$$

- **Πίεση, p:** Η ορθή (κάθετη) θλιπτική δύναμη σε οποιοδήποτε σημείο του ρευστού

$$p = \frac{F}{A} \; [\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}^2}]$$

Η πίεση είναι **βαθμωτό μέγεθος**. Ωστόσο, λόγω της πίεσης σε τυχόν σημείο του ρευστού αναπτύσσεται μια δύναμη κάθετη προς οποιαδήποτε επιφάνεια

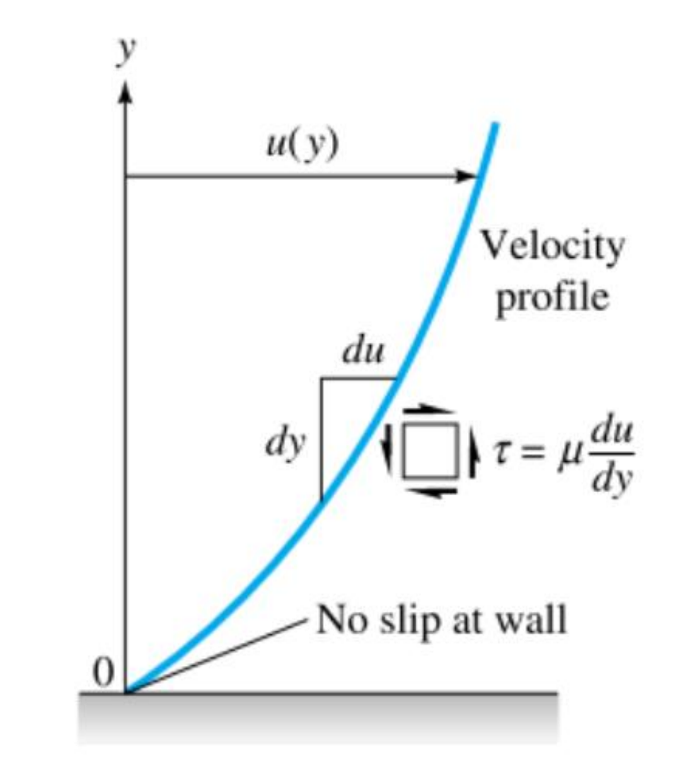
$$\mathbf{1\,\frac{N}{m^2} = 1\;Pa = 1\,\frac{Kg}{ms^2} = 1\,\frac{J}{m^3}\,,\;\; 1\;bar = 10^5\;Pa = 1000\;kPa}$$

Ιδιότητες ρευστών

Ιδιότητες ρευστών

- **Δυναμική συνεκτικότητα, $\boldsymbol{\mu}$:** είναι η ιδιότητα του ρευστού που εκφράζει την αντίστασή του σε παραμόρφωση

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad [\mathrm{Pa} \cdot \mathrm{s}]$$



Αν μ είναι σταθερό, ανεξάρτητη των τ, du, dy -> Νευτώνειο ρευστό

- **Κινηματική συνεκτικότητα, $\boldsymbol{\nu}$:** $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ $[\mathrm{m^2/s}]$

νερό: $\nu = 1.007 \times 10^{-6}\, \mathrm{m^2/s}$ (T = 20 °C, P = 1 atm)

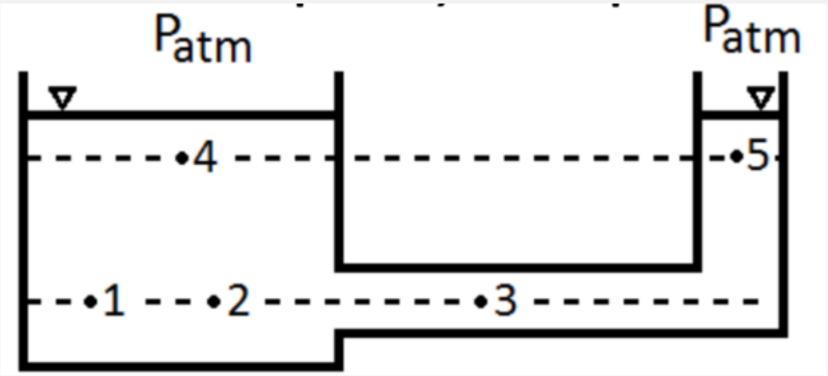
- **Θερμοκρασία, $\boldsymbol{T}$:** Μεταβολή της πυκνότητας και συνεκτικότητας, και άρα των παράγωγων μεγεθών, με τη θερμοκρασία (και την πίεση).

Υδροστατική πίεση

- **Υδροστατική πίεση** ονομάζεται η πίεση που ασκεί ένα ρευστό το οποίο βρίσκεται σε ισορροπία με αντικείμενο ή επιφάνεια που βρίσκεται μέσα σ' αυτό. Η πίεση αυτή οφείλεται στην δύναμη της βαρύτητας και μόνο, δηλαδή στο βάρος του ρευστού που βρίσκεται υπεράνω του αντικειμένου ή της επιφάνειας. Η πίεση αυξάνει γραμμικά με το βάθος h:

$$p = \rho \cdot g \cdot h = \gamma \cdot h$$

- Η πίεση αυξάνει γραμμικά με το βάθος, ενώ έχει την ίδια ένταση στα σημεία που βρίσκονται στο ίδιο οριζόντιο επίπεδο



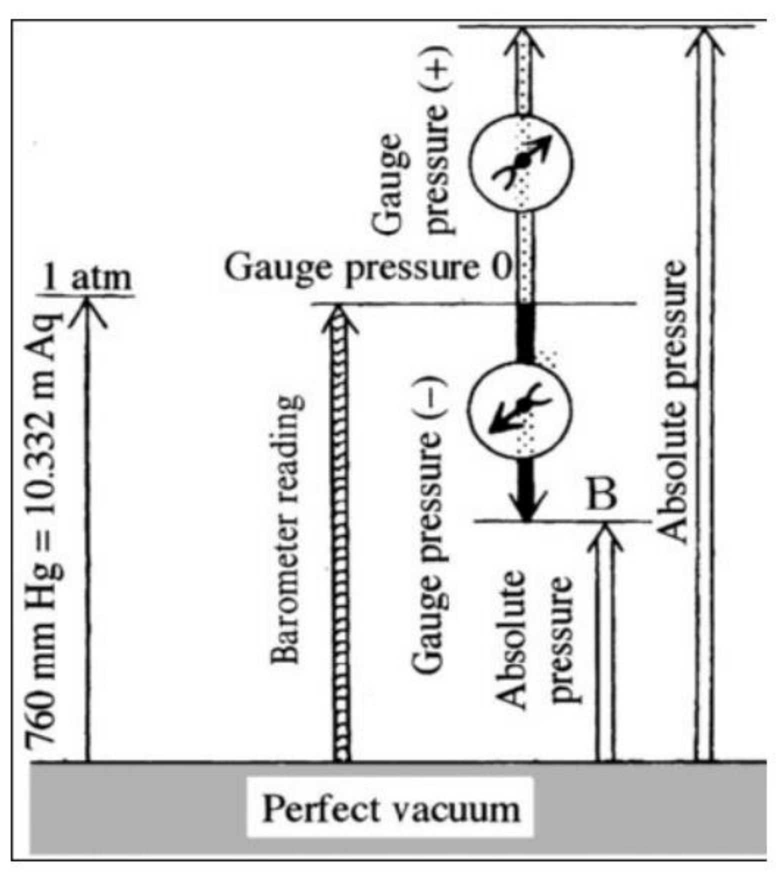
- **Ατμοσφαιρική πίεση** ή **Βαρομετρική πίεση**: πίεση που ασκεί η ατμόσφαιρα με το βάρος της στην επιφάνεια της Γης
- $P_{atm} = 101.3 \text{ kPa} = 1 \text{ atm}$: απόλυτη ατμοσφαιρική πίεση

Απόλυτη και σχετική πίεση

- **Ατμοσφαιρική πίεση** ή **Βαρομετρική πίεση**: πίεση που ασκεί η ατμόσφαιρα με το βάρος της στην επιφάνεια της Γης
- $P_{atm} = 101.3 \text{ kPa} = 1 \text{ atm}$: απόλυτη ατμοσφαιρική πίεση
- $p = p_{abs} - p_{atm}$

απόλυτη πίεση – μέτρηση από το κενό

μανομετρική (σχετική πίεση) – μέτρηση από την πίεση της ατμόσφαιρας (ένδειξη μανομέτρου)



- **Υπερπίεση**: Μετρούμενη πίεση υψηλότερη της ατμοσφαιρικής
- **Υποπίεση:** Μετρούμενη πίεση χαμηλότερη της ατμοσφαιρικής

Ροές σε αγωγούς

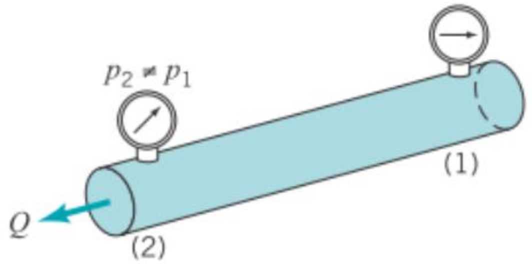
- **<u>Ροή υπό πίεση ή ροή σε κλειστούς αγωγούς:</u>** Εσωτερικές ροές υγρών (ροές που περιορίζονται από στερεά όρια) σε αγωγούς οι οποίοι είναι πλήρως γεμάτοι από το υγρό.
  - **Κυκλικής ή μη κυκλικής διατομής** – στα αστικά υδραυλικά έργα, κατά κανόνα κυκλικής διατομής (σωλήνας), ώστε να εξασφαλίζεται η απλούστερη δυνατή γεωμετρία
  - **Ροή υπό καθεστώς μεταβολής του πιεζομετρικού φορτίου** κατά μήκος του αγωγού (πτώση πίεσης και απώλεια ενέργειας λόγω τριβών)

Αγωγός υπό πίεση

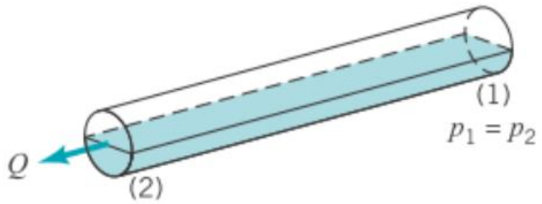
Αγωγός με ελεύθερη επιφάνεια

Ροές σε αγωγούς

- **<u>Ροή σε ανοιχτούς αγωγούς</u>:** ροή υγρού (συνήθως νερού) σε αγωγούς ανοικτούς στην ατμόσφαιρα ή σε κλειστούς αγωγούς που δεν είναι πλήρως γεμάτοι.
  - Οι ροές σε ανοικτούς αγωγούς (ροές με ελεύθερη επιφάνεια) διέπονται από τη βαρύτητα.
  - Η πίεση στην ελεύθερη επιφάνεια είναι ίση με την ατμοσφαιρική.
  - Ορθογωνικής, τραπεζοειδούς, κυκλικής ή μη κυκλικής διατομής
  - Παραδείγματα: υδατορεύματα, **κανάλια**, **αγωγοί ομβρίων** - **ακαθάρτων**, **οχετοί**.



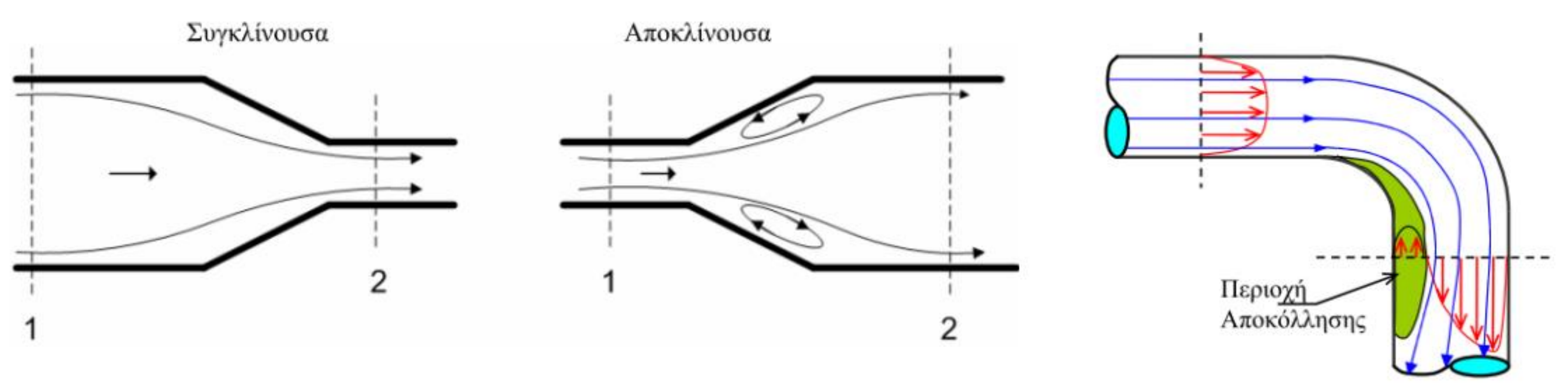
Αγωγός υπό πίεση

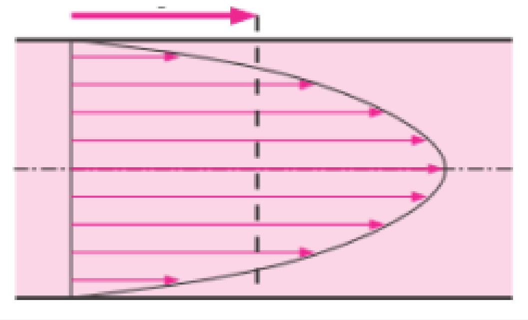


Αγωγός με ελεύθερη επιφάνεια

Βασικές έννοιες ροών

- **Γραμμή Ροής:** Είναι μια συνεχής γραμμή στην οποία το διάνυσμα της ταχύτητας είναι πάντα εφαπτομενικό. Οι γραμμές ροής δεν τέμνονται και δεν εφάπτονται.
- **Μόνιμη Ροή:** Όταν η **ταχύτητα δεν μεταβάλλεται <u>με το χρόνο</u>** σε οποιοδήποτε σημείο του ροϊκού πεδίου.
- **Ομοιόμορφη Ροή:** Όταν **η ταχύτητα δεν μεταβάλλεται <u>στο χώρο</u>** σε οποιοδήποτε σημείο του ροϊκού πεδίου.
- **Μόνιμη ανομοιόμορφη ροή:** το διάνυσμα της ταχύτητας μεταβάλλεται κατά μήκος μια γραμμής ροής: (1) Συγκλίνουσα, (2) Αποκλίνουσα, (3) Ροή σε καμπύλη





Προφίλ ταχύτητας ροής σε διατομή ελέγχου

- **Βασική (απλουστευτική) υπόθεση κατά το σχεδιασμό:** Ομοιόμορφη και μόνιμη ροή (έστω κατά τμήματα) -> μονοδιάστατη ανάλυση, θεωρώντας ασυμπίεστο ρευστό ($\rho = \sigma\tau\alpha\theta\varepsilon\rho\acute{o}$)

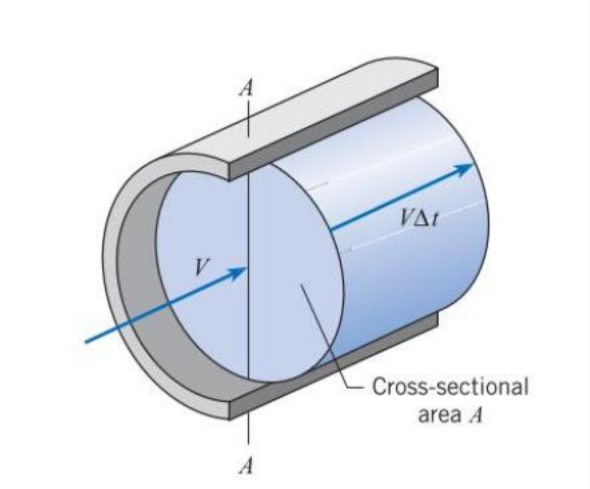
Παροχή και αρχή διατήρησης της μάζας

- **Παροχή**: όγκος ρευστού που διέρχεται από επιφάνεια ανά μονάδα χρόνου

Αν η ταχύτητα V είναι ομοιόμορφη επί της επιφάνειας
A και κάθετη σε αυτήν, τότε η παροχή Q προκύπτει ως:

$$Q = VA\ [\mathrm{m^3/s}]$$

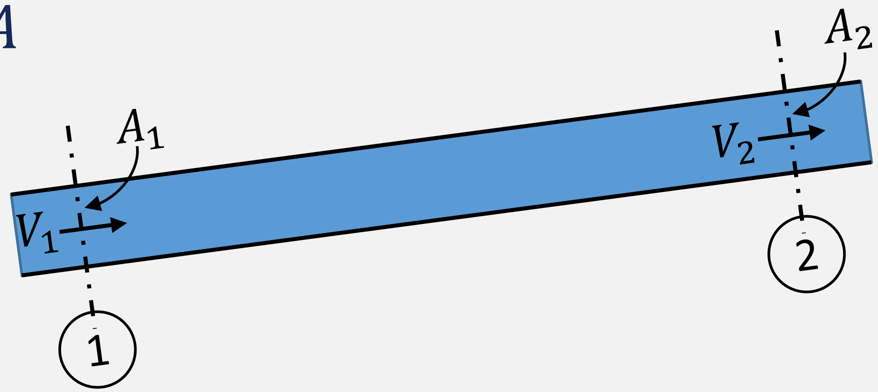
Για αγωγό κυκλικής διατομής: $Q = V\dfrac{\pi D^2}{4}$



- **Αρχή διατήρησης της μάζας**: Η μάζα δεν μπορεί να δημιουργηθεί, ούτε να καταστραφεί!

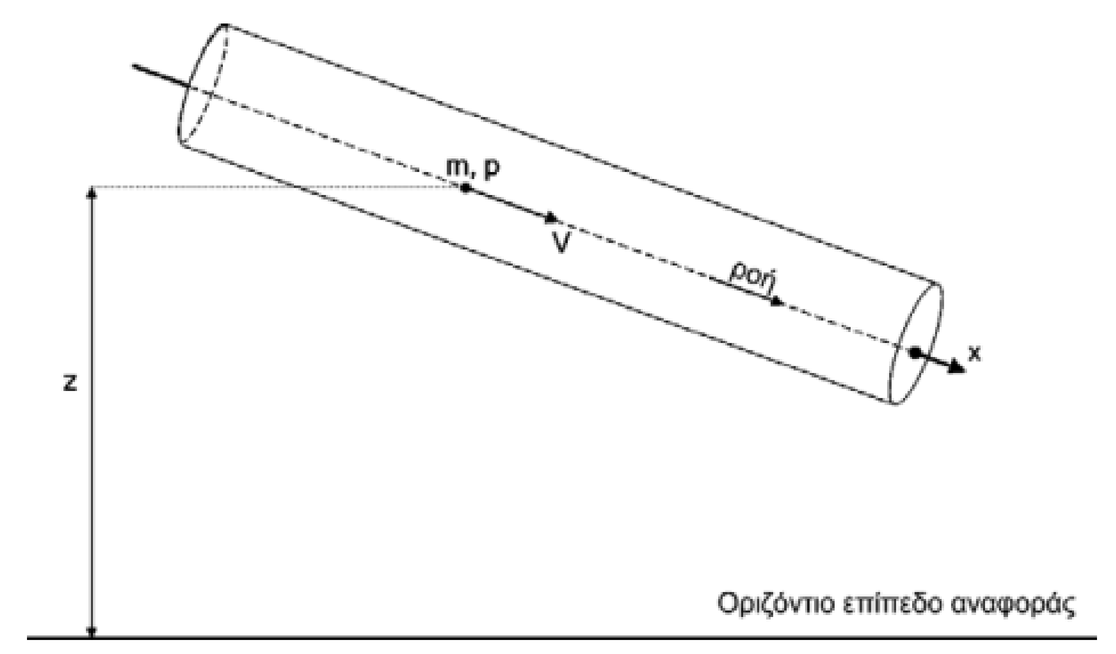
Εξίσωση συνέχειας ($\boldsymbol{\rho = \sigma\tau\alpha\theta.}$): $Q = V_1A_1 = V_2A_2 = VA$

$$\boxed{\sum Q_{\varepsilon\iota\sigma\rho o\acute{\omega}\nu} = \sum Q_{\varepsilon\kappa\rho o\acute{\omega}\nu}}$$



Ενέργεια ρευστού σε ροή

- **Ενέργεια** είναι η ικανότητα παραγωγής έργου: **Έργο = δύναμη × απόσταση**
- Οι συνιστώσες της συνολικής **υδραυλικής ενέργειας** των κινούμενων ρευστών είναι:
  - Δυναμική ενέργεια: mgz
  - Ενέργεια πίεση: $\frac{p}{\gamma}mg$
  - Κινητική ενέργεια: $\frac{1}{2}mV^2$



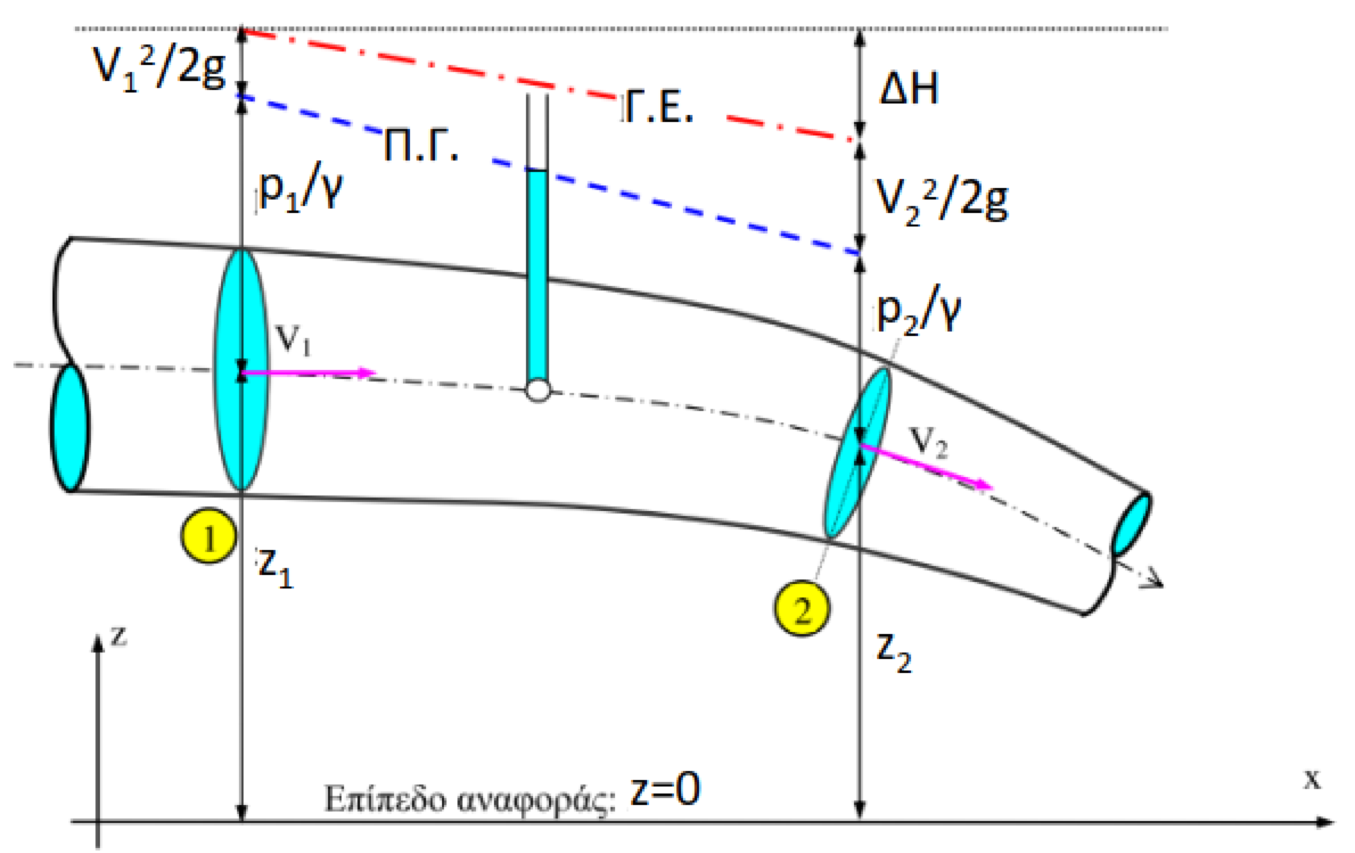
- $p = p_{abs} - p_{atm}$: σχετική πίεση

$$\mathrm{E} = mg\left(z + \frac{p}{\gamma} + \frac{V^2}{2g}\right), [\mathrm{ML^2T^{-2}}, J] \Rightarrow$$

$$\boxed{H = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{V^2}{2g}, \ [\mathrm{L}]}$$

Ύψος υδραυλικής ενέργειας ή υδραυλικό φορτίο: Η **ενέργεια** μπορεί να εκφραστεί **ανά μονάδα βάρους ρέοντος ρευστού**, και να λάβει **διαστάσεις μήκους**

Εξίσωση ενέργειας (μόνιμη ροή)



$$H = \left(z + \frac{p}{\gamma} + \frac{V^2}{2g}\right),\ [\mathrm{L}]$$

- $\boldsymbol{z}$**:** υψόμετρο άξονα από επίπεδο αναφοράς
- $\boldsymbol{\frac{p}{\gamma}}$**:** ύψος (φορτίο) πίεσης
- $\boldsymbol{\frac{V^2}{2g}}$**:** ύψος κινητικής ενέργειας
- $\boldsymbol{h = z + \frac{p}{\gamma}}$: πιεζομετρικό φορτίο

Πιεζομετρική γραμμή (Π.Γ.): $h = z + \frac{p}{\gamma}$

Γραμμή Ενέργειας (Γ.Ε.): $H = \left(z + \frac{V^2}{2g} + \frac{p}{\gamma}\right)$

Ροή προς μικρότερο υδραυλικό φορτίο H: $H_1 > H_2$

$$H_1 = H_2 + \Delta\mathrm{H} \Rightarrow H_1 = H_2 + h_f^{(1\to 2)}$$

$h_f^{(1\to 2)}$: γραμμικές απώλειες κατά μήκος $1 \to 2$ λόγω τριβών

Γραμμικές απώλειες σε κλειστούς αγωγούς

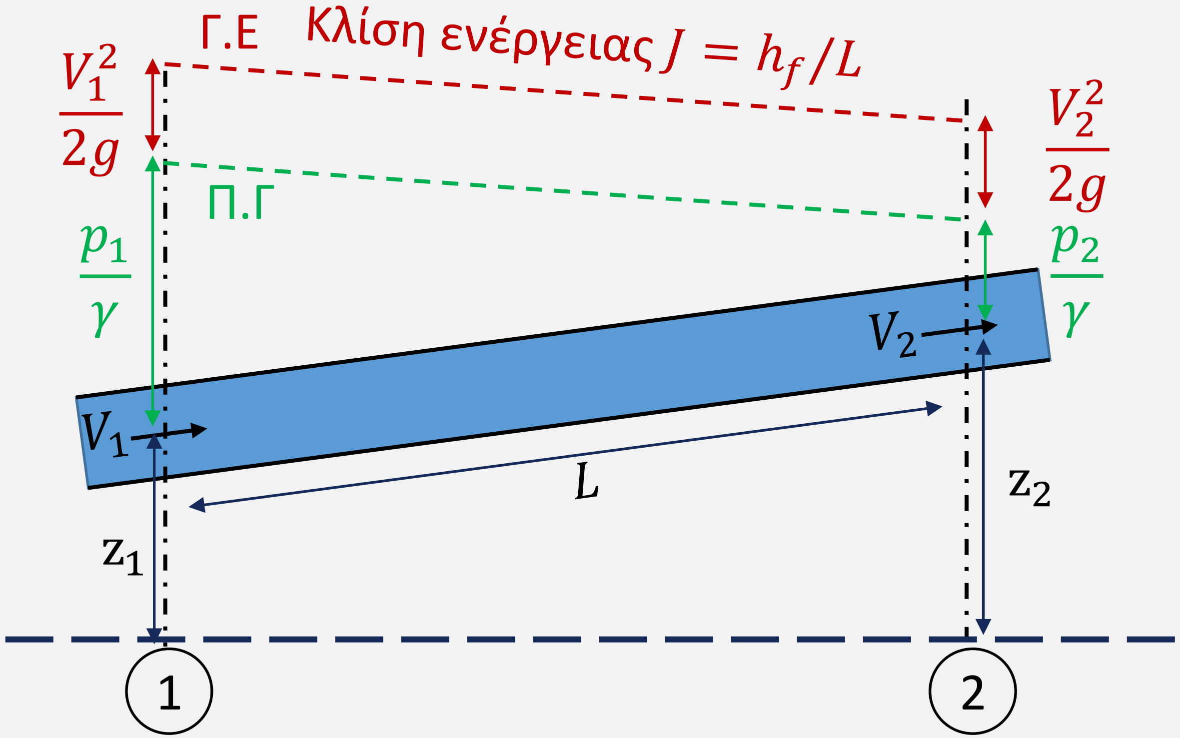
$$H_1 = H_2 + h_f^{(1\to2)} \Rightarrow \left(z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g}\right) = \left(z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g}\right) + h_f^{(1\to2)}$$

Γραμμικές απώλειες (απώλειες λόγω τριβών), σύμφωνα με τη σχέση Darcy - Weisbach:

$$h_f = f\frac{L}{D}\frac{V^2}{2g} \quad [m]$$

f: συντελεστής Darcy ή τριβής -> $f(Re, k_s/D)$
L: μήκος του αγωγού [m]
D: διάμετρος του αγωγού [mm]
V: ταχύτητα ροής [m/s]
Re: αριθμός Reynolds [αδιάστατο]
k_s: ισοδύναμη τραχύτητα του αγωγού [mm]
k_s/D: σχετική τραχύτητα [αδιάστατο]
$g = 9.81\ \mathrm{m/s^2}$: επιτάχυνση της βαρύτητας

$J = h_f/L$: Κλίση γραμμής ενέργειας



Μεγέθη Εξίσωσης Ενέργειας

Γραμμή ενέργειας (Γ.Ε.): Ο γεωμετρικός τόπος του **ολικού φορτίου** $\boldsymbol{H}$ κατά μήκος ενός αγωγού.

- Η Γ.Ε. θα φθίνει στην κατεύθυνση της ροής, με εξαίρεση:
  - τα σημεία όπου προστίθεται ενέργεια από μηχανές (π.χ. αντλίες), όπου παρουσιάζει **τοπική ανύψωση** ίση με το φορτίο της αντλίας
  - τα σημεία όπου υπάρχουν **τοπικές απώλειες**, όπου παρουσιάζει **τοπική πτώση** ίση με το φορτίο των τοπικών απωλειών
- **Αγωγοί υπό πίεση:** η κλίση της Γ.Ε. είναι υδραυλικό μέγεθος (μεταβάλλεται με την παροχή)
- **Ανοιχτοί αγωγοί:** Η κλίση της Γ.Ε. αποτελεί καθαρά γεωμετρικό μέγεθος (δεν εξαρτάται από τα υδραυλικά μεγέθη (παροχή, ταχύτητα)), ίση με την κλίση του πυθμένα για ομοιόμορφη ροή

Πιεζομετρική Γραμμή (Π.Γ.): Ο γεωμετρικός τόπος του πιεζομετρικού φορτίου κατά μήκος ενός αγωγού.

- Για αγωγούς σταθερής διαμέτρου η Π.Γ. είναι εξ ορισμού παράλληλη με την Γ.Ε. και βρίσκεται κάτω από αυτήν, κατά $V^2/2g$
- Σε ανοιχτούς αγωγούς ταυτίζεται με την επιφάνεια του νερού

Εκτίμηση συντελεστή τριβής

$$h_f = f\frac{L}{D}\frac{V^2}{2g}$$ Εξ. Darcy - Weisbach

f: συντελεστής Darcy ή τριβής -> $f(Re, k_s/D)$

Για την εκτίμηση του συντελεστή τριβής f λαμβάνεται υπόψη η κατάσταση ροής στον αγωγό f, όπως προκύπτει από τον αριθμό Reynolds:

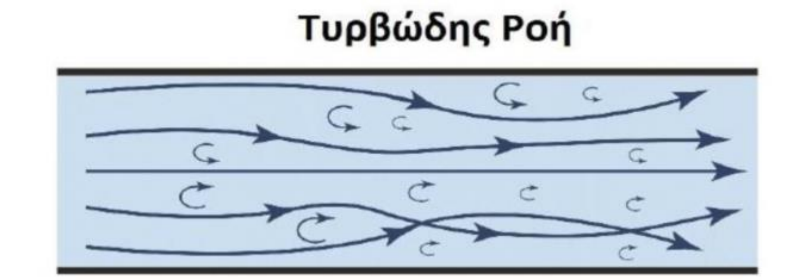
$$Re = \frac{\delta\upsilon\nu\acute{\alpha}\mu\varepsilon\iota\varsigma\ \alpha\delta\rho\acute{\alpha}\nu\varepsilon\iota\alpha\varsigma}{\delta\upsilon\nu\acute{\alpha}\mu\varepsilon\iota\varsigma\ \sigma\upsilon\nu\varepsilon\kappa\tau\iota\kappa\acute{o}\tau\eta\tau\alpha} = \frac{VD}{\nu} \quad [\alpha\delta\iota\acute{\alpha}\sigma\tau\alpha\tau o\ \mu\acute{\varepsilon}\gamma\varepsilon\theta o\varsigma]$$

V: η μέση ταχύτητα ροής, D: η διάμετρος του αγωγού και ν η κινηματική συνεκτικότητα

(καθαρό **νερό:** $\nu \approx 10^{-6}$ m^2/s)

- $Re \leq 2300$: στρωτή ροή
- $2300 < Re < 4000$: μεταβατική ροή
- $Re \geq 4000$: τυρβώδης ροή

Παράλληλα στρώματα ρευστού ολισθαίνουν παράλληλα χωρίς ανάμιξη των υγρών σωματιδίων



Μάζες ρευστού κινούνται προς όλες τις κατευθύνσεις και υπάρχει έντονη ανάμιξη των υγρών σωματιδίων

Εκτίμηση συντελεστή τριβής

$$h_f = f\frac{L}{D}\frac{V^2}{2g}$$ *Εξ. Darcy - Weisbach*

$$Re = \frac{VD}{v}$$ *Αρ. Reynolds*

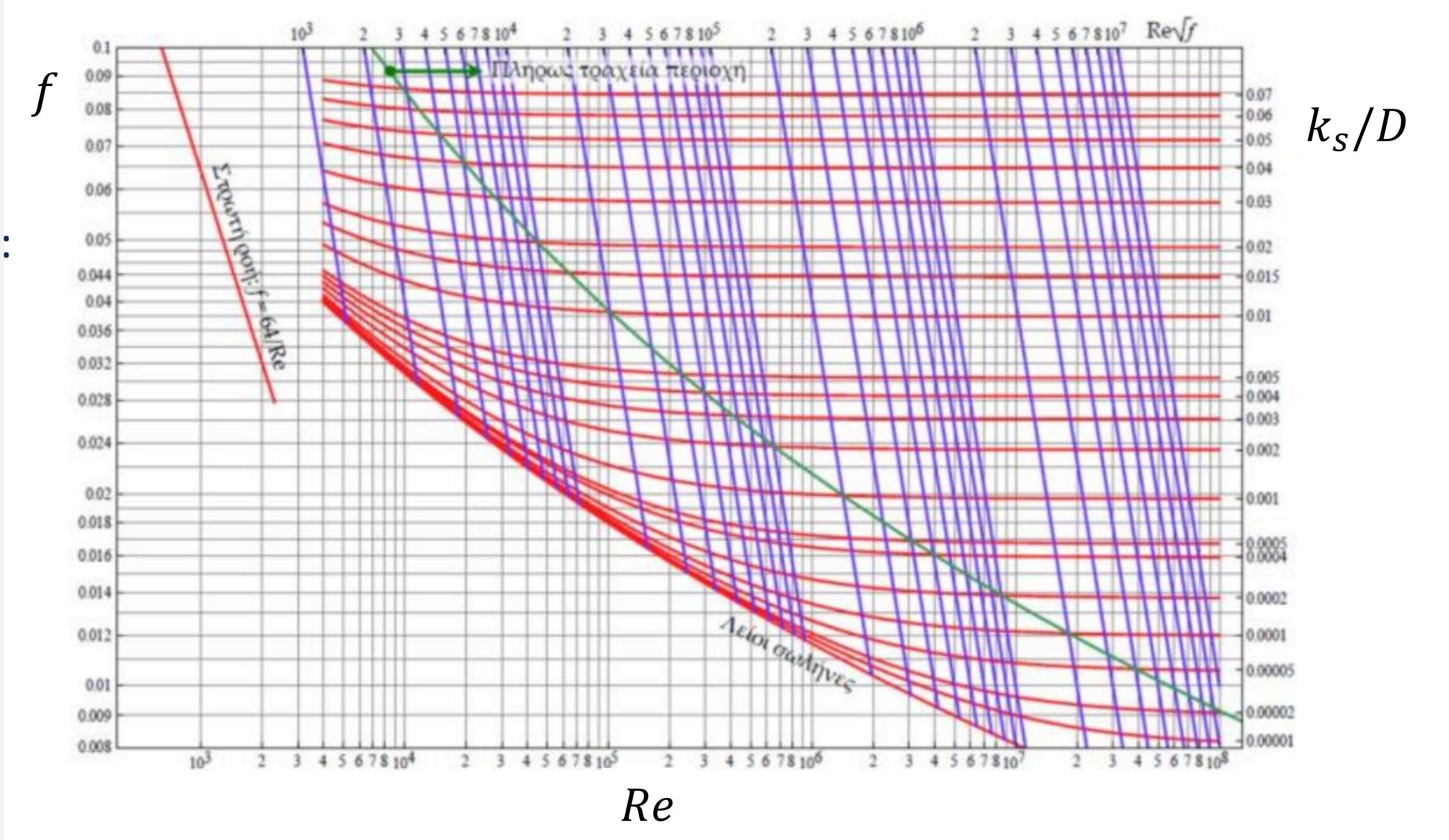
f: συντελεστής Darcy ή τριβής -> $f(Re, k_s/D)$

- Στρωτή ροή ($Re \leq 2300$): $f = \dfrac{64}{Re}$
- Τυρβώδης ροή ($Re \geq 4000$): $\dfrac{1}{\sqrt{f}} = -2log\left(\underbrace{\dfrac{k_s/D}{3.71}}_{\text{Επίδραση της τραχύτητας}} + \underbrace{\dfrac{2.51}{Ref^{1/2}}}_{\text{Επίδραση της κινηματικής συνεκτικότητας}}\right)$ Εξ. Colebrook - White

- Ο συντελεστής τριβής f προκύπτει από την παραπάνω σχέση, με δοκιμές.
- Επίσης, για εκτίμηση του συντελεστή τριβής f μπορεί να χρησιμοποιηθεί το διάγραμμα Moody.

Εκτίμηση συντελεστή τριβής μέσω διαγράμματος Moody

Μεταβατική ροή
$(2300 < Re < 4000)$:
δεν υπάρχουν τιμές f



Ισοδύναμες τραχύτητες αγωγών ύδρευσης (k_s)

- Οι τυπικές τιμές τραχύτητας k_s (ε) αντιστοιχούν σε ιδανικές (εργαστηριακές) συνθήκες
- Κατά τους υπολογισμούς **οι τιμές** πρέπει να **προσαυξάνονται** καταλλήλως, λόγω:
  - **γήρανση** (οξείδωση, διάβρωση) – περίοδος σχεδιασμού 40 χρόνια
  - **μείωσης διαμέτρου** (εναπόθεση αλάτων)
  - **συμπερίληψη τοπικών απωλειών** (π.χ. μούφες, διακλαδώσεις, αλλαγές διεύθυνσης ροής)
- **Για πρακτικές εφαρμογές συστήνεται η χρήση ισοδύναμης τραχύτητας $k_s = 0.5 - 2.0$ mm (τυπική τιμή για πλαστικούς αγωγούς 1.0 mm)**

Τυπικές τιμές τραχύτητας k_s σύμφωνα με τους Ελληνικούς κανονισμούς, για αγωγούς:

Υλικό	k_s (mm)
Πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC)	0.1
Αμιαντοσωλήνες	0.5
Χαλυβδοσωλήνες	0.4
Υψηλής Πυκνότητας Πολυαιθυλένιο (HDPE)	0.01

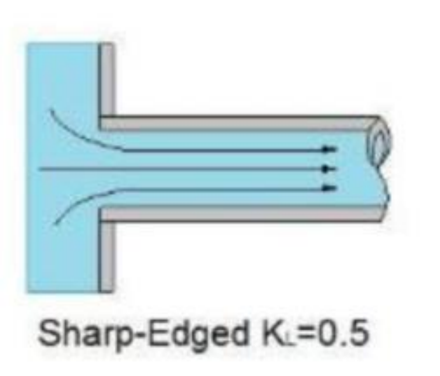
Τοπικές απώλειες

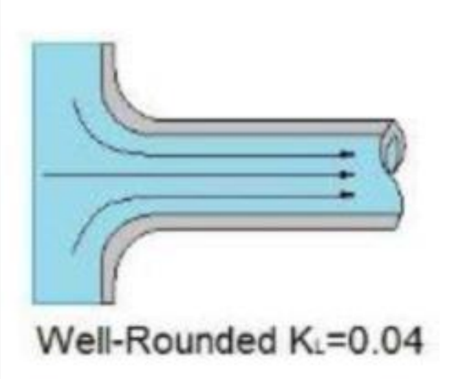
- Εκτός από τις γραμμικές απώλειες (λόγω τριβής – κατά μήκος του σωλήνα), στα συστήματα σωλήνων (συνήθως δίκτυα διανομής) εμφανίζονται και **τοπικές απώλειες**, στις συνδέσεις και στροφές των αγωγών (**τυπικές τοπικές απώλειες**), και στις θέσεις ειδικών συσκευών και διατάξεων (**ειδικές τοπικές απώλειες**), όπως είναι οι δικλείδες (βάνες ελέγχου ροής) και οι μειωτές πίεσης (PRVs)
- Οι τοπικές απώλειες h_τ οφείλονται κυρίως στην ανάπτυξη στροβίλων (αποκόλληση της ροής) και άρα παραγωγή τύρβης, και εκφράζονται με όρους ύψους κινητικής ενέργειας:

$$h_\tau = K_\tau \frac{V^2}{2g} \quad [\mathrm{m}]$$

όπου, K_τ ο συντελεστής τοπικών απωλειών [αδιάστατος] και V η ταχύτητα ροής [m/s]

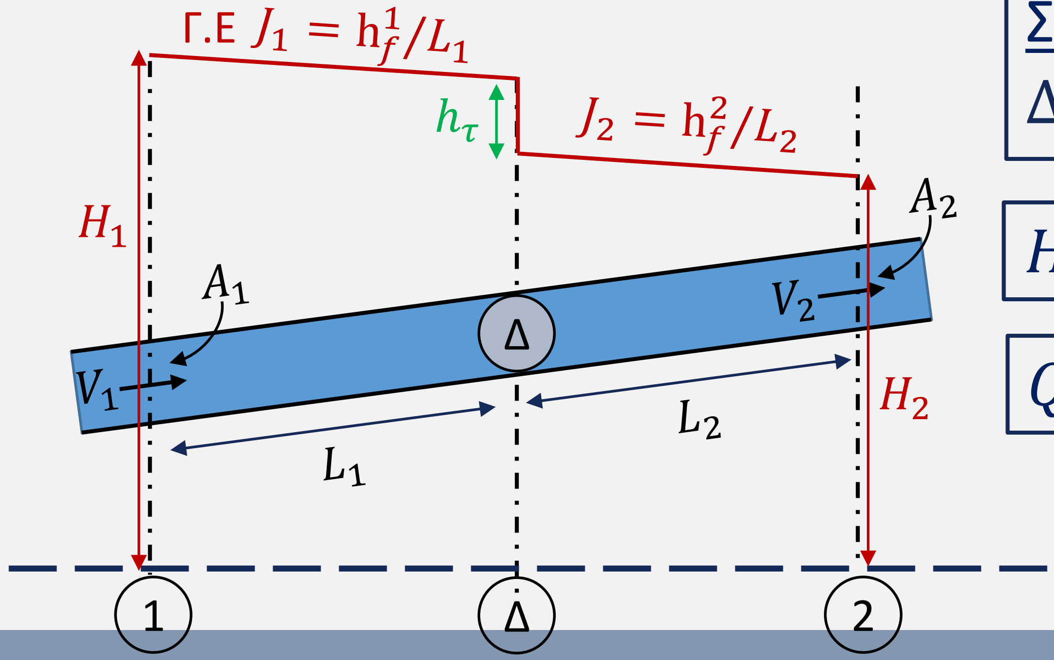
- Οι τυπικές τοπικές απώλειες, συνήθως, λαμβάνονται υπόψη χωρίς αναλυτικό υπολογισμό, προσαυξάνοντας τις τιμές της ισοδύναμης τραχύτητας $\boldsymbol{k_s}$.





Τοπικές απώλειες - Δικλείδα

- **Δικλείδα (βάνα ελέγχου ροής)**: Ειδικές συσκευές που τοποθετούνται για τον έλεγχο/ρύθμιση της παροχής προσαρμόζοντας τις απώλειες μέχρι να επιτευχθεί η επιθυμητή παροχή.
- Απώλεια ενέργειας λόγω καταστροφής κινητικής ενέργειας
- Για κλειστή δικλείδα $K_\tau \rightarrow \infty$ και δεν υπάρχει ροή, ενώ ανοίγοντας τη δικλείδα μειώνεται ο συντελεστής K_τ και παράγεται η επιθυμητή παροχή
- Επιθυμητό: μικρός συντελεστής απωλειών όταν η δικλείδα είναι πλήρως ανοικτή

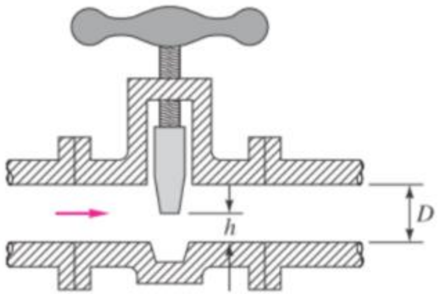


Συνολικές Απώλειες:

$$\Delta h_{o\lambda.} = h_f^1 + h_f^2 + h_\tau$$

$$H_1 = H_2 + \Delta h_{o\lambda.}$$

$$Q_1 = Q_2 = V_1 A_1 = V_2 A_2$$

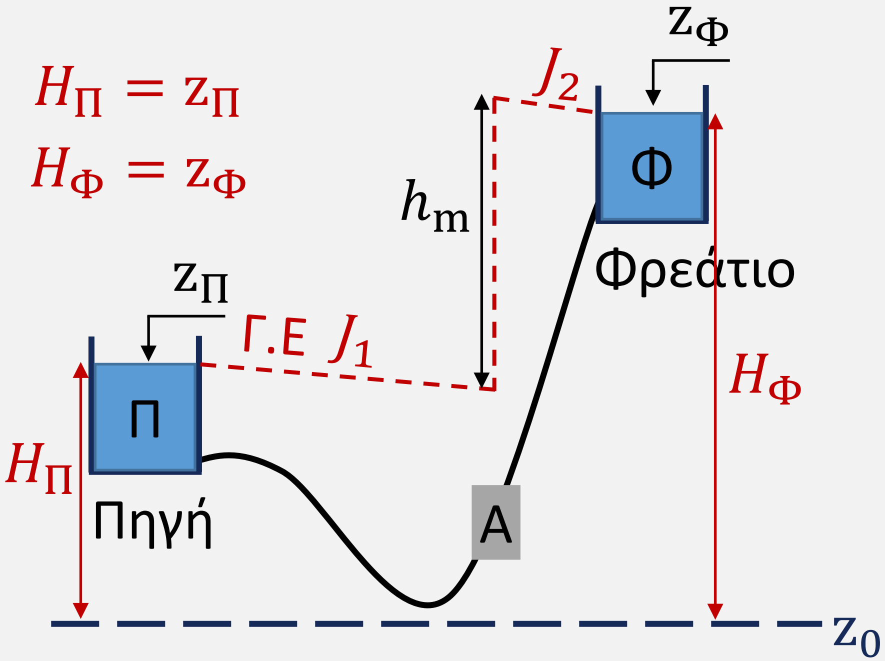


Συρταρωτή (gate)

K=0.2 (πλήρως ανοικτή)
K=0.3 (1/4 κλειστή)
K=2.1 (1/2 κλειστή)
K=17 (3/4 κλειστή)

Αντλίες – Προσθήκη ενέργειας

- **Αντλία**: Προσθήκη ενέργειας για μεταφορά ρευστού από χαμηλότερη σε υψηλότερη στάθμη ύδατος.
- Η ενέργεια αυτή (εκφρασμένη σε όρους ύψους ενέργειας) ονομάζεται **μανομετρικό ύψος**, h_m, και είναι η διαφορά υψομέτρων της γραμμής ενέργειας ανάντη και κατάντη.
- **Ισχύς αντλίας:** $P = \dfrac{\gamma Q h_m}{n}$ $[\mathrm{kW}]$, όπου γ το ειδικό βάρος νερού, Q η παροχή του καταθλιπτικού αγωγού, h_m το μανομετρικό ύψος και n ο συντελεστής απόδοσης της αντλίας.



<u>Κλίση Γ.Ε. Π → Α</u>: $J_1 = \mathrm{h}_f^{(\Pi-\mathrm{A})}/L_{\Pi-\mathrm{A}}$

<u>Κλίση Γ.Ε. Α → Φ</u>: $J_2 = \mathrm{h}_f^{(\mathrm{A}-\Phi)}/L_{\mathrm{A}-\Phi}$

<u>Εξίσωση ενέργειας</u>:

$$H_\Phi = H_\Pi - \mathrm{h}_f^{(\Pi-\mathrm{A})} + h_\mathrm{m} - \mathrm{h}_f^{(\mathrm{A}-\Phi)} \Rightarrow$$

$$\mathrm{z}_\Phi = \mathrm{z}_\Pi - \mathrm{h}_f^{(\Pi-\mathrm{A})} + h_\mathrm{m} - \mathrm{h}_f^{(\mathrm{A}-\Phi)} \Rightarrow$$

$$\boxed{h_\mathrm{m} = \mathrm{z}_\Phi - \mathrm{z}_\Pi + h_f^{(\Pi-\mathrm{A})} + h_f^{(\mathrm{A}-\Phi)}}$$

Προβλήματα Ροής σε Αγωγούς υπό Πίεση

Εξίσωση Διατήρησης Ενέργειας

$$\left(z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma}\right) \pm h_m = \left(z_2 + \frac{V_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma}\right) + h_f^{(1\to 2)}$$

Εξίσωση Darcy - Weisbach

$$h_f = f\frac{L}{D}\frac{V^2}{2g}, f(Re, k_s/D)$$

- **Τυπικό Πρόβλημα 1:** Προσδιορισμός απωλειών, h_f, για δεδομένα γεωμετρικά στοιχεία και χαρακτηριστικά του αγωγού (D, L, Q (ή V), k_s, ν)
- **Τυπικό Πρόβλημα 2:** Προσδιορισμός της παροχής, Q (ή ταχύτητας V), για δεδομένα γεωμετρικά στοιχεία και χαρακτηριστικά του αγωγού (D, L, k_s, ν), και δεδομένα ύψη πιεζομετρικού φορτίου
- **Τυπικό Πρόβλημα 3:** Προσδιορισμός της διαμέτρου, D, αγωγού, για δεδομένη επιδιωκόμενη παροχή Q, υλικό αγωγού (k_s), μήκος αγωγού L, και δεδομένα ύψη πιεζομετρικού φορτίου

Εργαλεία επίλυσης των 3 προβλημάτων: Εξίσωση Ενέργειας, Εξίσωση Συνέχειας, Εξίσωση γραμμικών απωλειών (Darcy – Weisbach), Διάγραμμα Moody για εκτίμηση συντελεστή τριβής, Εξισώσεις τοπικών απωλειών, Μανομετρικά ύψη αντλιών

1ο τυπικό πρόβλημα

- **Τυπικό Πρόβλημα 1:** Προσδιορισμός απωλειών, h_f, για δεδομένα γεωμετρικά στοιχεία του αγωγού και χαρακτηριστικά της ροής (D, L, Q (ή V), k_s, ν) -> <u>έλεγχος πιέσεων (καταστροφή ή παροχή ενέργειας)</u>

  - Υπολογίζουμε την ταχύτητα: $Q = VA \Rightarrow V = 4\mathrm{Q}/\pi D^2$
  - Υπολογίζουμε τον αριθμό Reynolds: $Re = VD/\nu$
  - Υπολογίζουμε τη σχετική τραχύτητα: k_s/D
  - Εκτιμούμε τον συντελεστή τριβών: $f(Re, k_s/D)$ – Εξ. Darcy - Weisbach, διάγραμμα Moody
  - Υπολογίζουμε τις γραμμικές απώλειες:

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

2ο τυπικό πρόβλημα

- **Τυπικό Πρόβλημα 2:** Προσδιορισμός της παροχής, Q (ή ταχύτητας V), για δεδομένα γεωμετρικά στοιχεία και χαρακτηριστικά του αγωγού (D, L, k_s, ν), και ύψη πιεζομετρικού φορτίου -> <u>εύρεση παροχετευτικότητας (μέγιστης παροχής) αγωγού</u>

$$\boxed{h_f = f\frac{L}{D}\frac{V^2}{2g}, f(Re, k_s/D)}$$

- Υπολογίζουμε τη σχετική τραχύτητα: k_s/D
- Επιλύουμε την εξίσωση Darcy – Weisbach ως προς την ταχύτητα:

$$h_f = f\frac{L}{D}\frac{V^2}{2g} \Rightarrow V = \left(\frac{2gh_f D}{L}\right)^{1/2}\frac{1}{f^{1/2}}$$

- Υποθέτω μια αρχική τιμή f_1, υπολογίζω V_1 και εκτιμώ τον αριθμό Reynolds $Re_1 = V_1 D/\nu$
- Από διάγραμμα Moody, για γνωστά k_s/D και Re_1, βρίσκω f_2
- Αν $f_1 \approx f_2$, τότε υπολογίζω παροχή για V_1 και D, $Q = V_1 \pi D^2/4$
- Αν $f_1 \neq f_2$, τότε υποθέτω διαφορετικό f_1 και επανεκτελώ τους υπολογισμούς μέχρι $f_1 \approx f_2$.

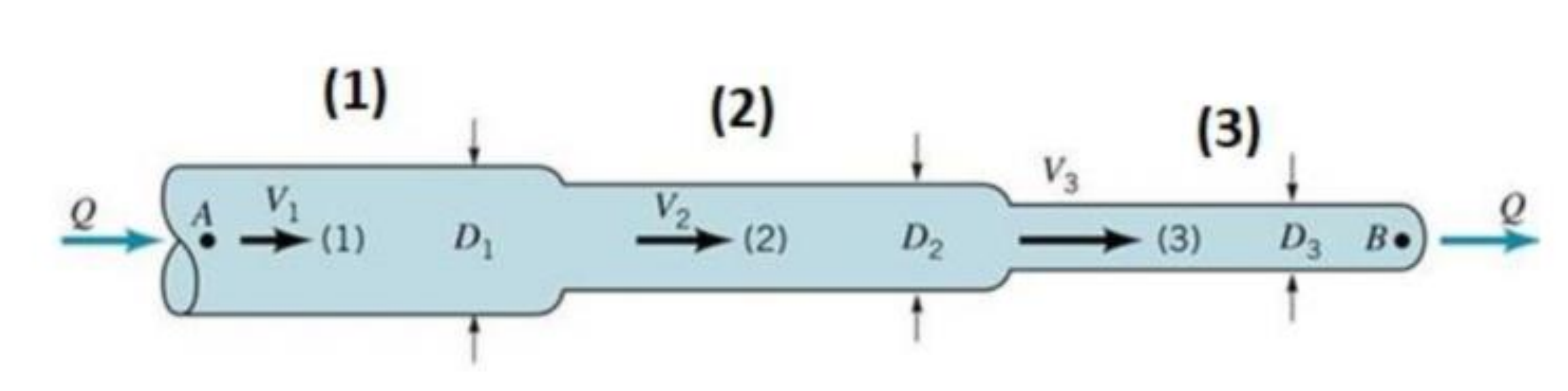
3ο τυπικό πρόβλημα

- **Τυπικό Πρόβλημα 3:** Προσδιορισμός της διαμέτρου, D, αγωγού, για δεδομένη επιδιωκόμενη παροχή Q, υλικό αγωγού (k_s), μήκος αγωγού L, και ύψη πιεζομετρικού φορτίου -> <u>σχεδιασμός αγωγού</u>
- Αντικαθιστούμε $V = Q/A$ στην εξ. Darcy – Weisbach και λύνουμε ως προς διάμετρο D:

$$h_f = f\frac{L}{D}\frac{V^2}{2g} \Rightarrow D = \left(f\frac{1}{h_f}\frac{8LQ^2}{\pi^2 g}\right)^{1/5}$$

- Υποθέτω μια αρχική τιμή f_1, υπολογίζω D_1, $V_1 = 4\text{Q}/\pi {D_1}^2$, $Re_1 = V_1 D_1/\nu$ και k_s/D_1
- Από διάγραμμα Moody, για γνωστά k_s/D_1και Re_1, βρίσκω f_2
- Αν $f_1 \approx f_2$, τότε η διάμετρος είναι η D_1
- Αν $f_1 \neq f_2$, τότε υποθέτω διαφορετικό f_1 και επανεκτελώ τους υπολογισμούς μέχρι $f_1 \approx f_2$.

Σωλήνες σε σειρά



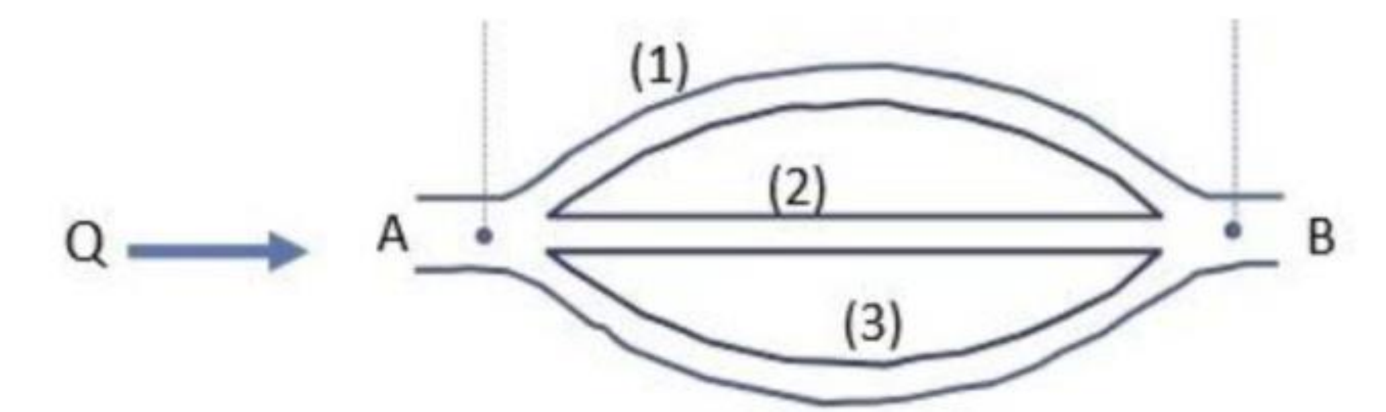
- Ίδια παροχή σε όλους τους σωλήνες

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 \Rightarrow V_1 A_1 = V_2 A_2 = V_3 A_3$$

- Το συνολικό ύψος των απωλειών είναι το άθροισμα των απωλειών σε κάθε σωλήνα:

$$h_f^{(A \to B)} = h_f^1 + h_f^2 + h_f^3$$

Παράλληλοι σωλήνες



- Συνολική παροχή

$Q_{\mathrm{A}} = Q_{\mathrm{B}} = Q_1 + Q_2 + Q_3$

- Απώλειες ενέργειας

$$h_f^{(A\to B)} = h_f^1 = h_f^2 = h_f^3 = h_{\mathrm{A}} - h_{\mathrm{B}} = \left(z_{\mathrm{A}} + \frac{p_{\mathrm{A}}}{\gamma}\right) - \left(z_{\mathrm{B}} + \frac{p_{\mathrm{B}}}{\gamma}\right)$$

- Αν h_{A} και h_{B} γνωστά και ζητούνται οι παροχές, λύνω το 2$^{\mathrm{O}}$ τυπικό πρόβλημα για κάθε σωλήνα
- Αν Q_{A} γνωστό και ζητούνται οι παροχές και το ύψος $h_f^{(A\to B)}$:
    - ➢ Υποθέτω Q_1 και λύνω 1$^{\mathrm{o}}$ τυπικό πρόβλημα για να υπολογίσω h_f^1 και άρα h_{B}
    - ➢ Για δεδομένα, h_{A} και h_{B} υπολογίζω Q_2 και Q_3 από 2$^{\mathrm{O}}$ τυπικό πρόβλημα
    - ➢ Ελέγχω αν $Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q_{\mathrm{A}}$
    - ➢ Αν όχι, διορθώνω παροχές -> π.χ. $Q_1{}' = (Q_1/\Sigma Q_i) * Q_1$ και ελέγχω αν $h_f^1 = h_f^2 = h_f^3$

Βιβλιογραφία & Πηγές

- Δ. Κουτσογιάννης, και Α. Ευστρατιάδης, Σημειώσεις Υδραυλικής και Υδραυλικών Έργων: Υδραγωγεία, 68 pages, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2017, http://www.itia.ntua.gr/el/docinfo/1744/
- Λαγγούσης, Α., Φουρνιώτης, Ν, Στοιχεία Σχεδιασμού Έργων Ύδρευσης και Αποχέτευσης, Εκδόσεις Gotsis. Πάτρα 2020.
- Τσακίρης, Γ., Υδραυλικά Έργα, Σχεδιασμός & Διαχείριση, Τόμος Ι: Αστικά Υδραυλικά Έργα, Εκδόσεις Συμμετρία. Αθήνα 2010.
- White F.M. (2011). Fluid Mechanics. 7th Edition. McGraw Hill.
- Στάμου, Α. (2012). Εφαρμοσμένη Υδραυλική. Ροή υπό πίεση και με ελεύθερη επιφάνεια. 2η Έκδοση. Εκδόσεις Παπασωτηρίου.
- Γαλάνη Κ. (2020). Στοιχεία εφαρμοσμένης υδραυλικής, Εκπαιδευτικές σημειώσεις.
- Παπανικολάου, Π.Ν. (2014). Στοιχεία μόνιμης ροής σε αγωγούς υπό πίεση & αγωγούς με ελεύθερη επιφάνεια. Εκπαιδευτικές Σημειώσεις: 3η Έκδοση.
- Παπακωνσταντής Η. (2020). Ροή σε αγωγούς υπό πίεση, Εκπαιδευτικές σημειώσεις.