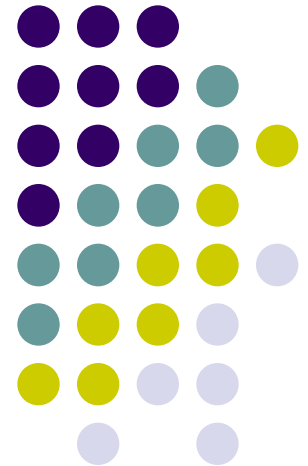


Ρευστομηχανική

Μετρήσεις στη Μηχανική Ρευστών

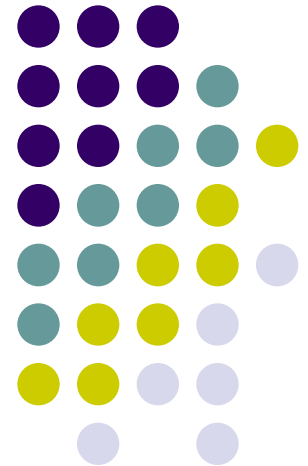
Μεταφορά ρευστών – αντλίες

Μη Νευτώνεια ρευστά



Ρευστομηχανική

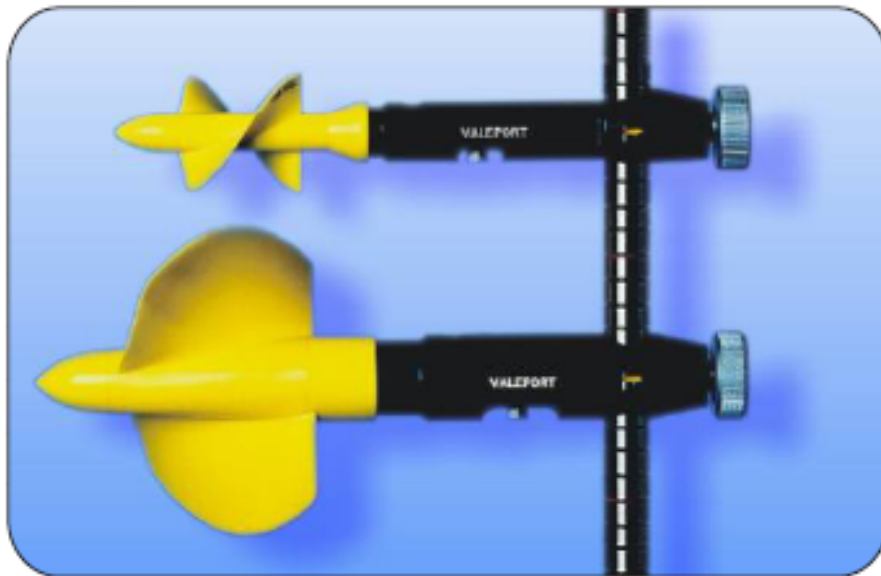
Μετρήσεις στη Μηχανική Ρευστών



Μετρήσεις στη Μηχανική Ρευστών



- Όργανα και τρόπος μέτρησης των χαρακτηριστικών μεγεθών των ρευστών (πίεση, ταχύτητα, παροχή, ιξώδες)
- Εισαγωγή στις βασικές πειραματικές μεθόδους μετρήσεων στη Μηχανική Ρευστών
- **Άμεση** μέτρηση παροχής : μέτρηση όγκου / μάζας ρευστού σε ορισμένο χρόνο (π.χ. κουβάς)
- **Έμμεση** μέτρηση παροχής : μέτρηση κατανομής ταχύτητας
→ υπολογισμός παροχής (π.χ. ρέματα)



The Model 001 & Model 002 Flow Meters represent a standard in open channel flow measurement. First introduced under the “Braystoke” brand over 30 years ago, both meters use the simple premise of converting speed of rotation of the helical impeller into speed of water. Available as a wading set for hand held use in shallow water, or as a hand-suspension system for use from bridges or boats, the Models 001 & 002 offer a quick, cost-effective method of measuring flow in a variety of open channel applications.

Specifications

Model 001

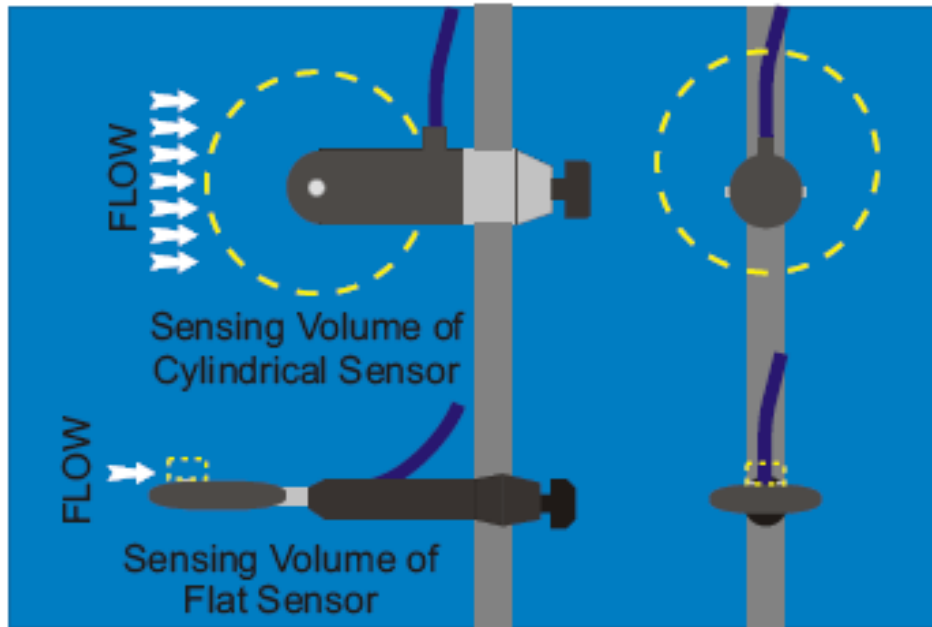
Type: 8011 series High Impact Styrene Impeller
Size: 125mm diameter by 270mm pitch
Range: 0.03 to 10m/s
Accuracy: $\pm 1.5\%$ of reading above 0.15m/s
 $\pm 0.004\text{m/s}$ below 0.15m/s

Model 002

Type: 1178 series High Impact Styrene Impeller
Size: 50mm diameter by 100mm pitch
Range: 0.046 to 5m/s
Accuracy: $\pm 2.5\%$ of reading above 0.5m/s
 $\pm 0.01\text{m/s}$ below 0.5m/s



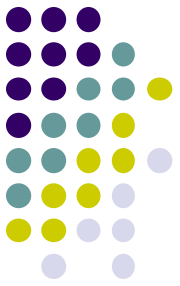
The Model 801 Electromagnetic Flow Meters measure the speed of water in Open Channel environments with exceptional accuracy. Two sensor types are available, to suit different application requirements, but both offer excellent durability, reliable accurate data, and are suitable for use in clean water and dirty or difficult environments.



What's the Difference?

The smaller sampling volume of the flat sensor makes it very much more suitable for shallow flows, or measurements in confined spaces. However, it is also very much more sensitive to turbulent flows, which may manifest as apparently noisy real time readings. This effect can be minimised by using a long (>30secs) average period. The larger sampling volume of the cylindrical sensor effectively eliminates the turbulence noise, but also means that a greater depth of water is required for measurements.

Μετρητές στατικής πίεσης

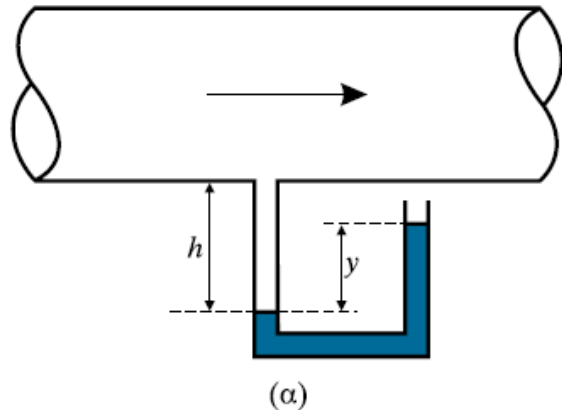


3 είδη πίεσης:

1. στατική

2. δυναμική ή κρουστική

3. πίεση ταχύτητας (η διαφορά τους)

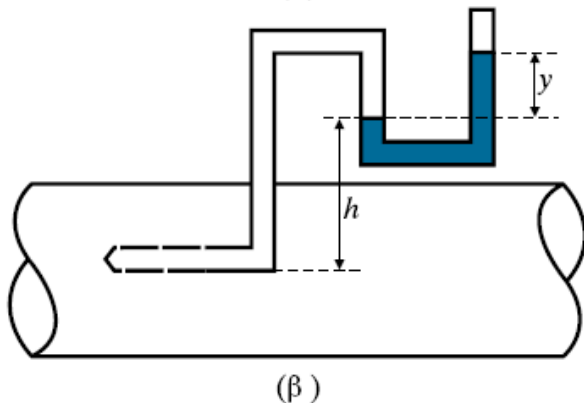


(α)

Κρουστική Πίεση: ασκείται σε επίπεδο κάθετο στη διεύθυνση ροής

Στατική Πίεση:

ασκείται σε επίπεδο παράλληλο στη ροή



(β)

Μετρητές στατικής πίεσης

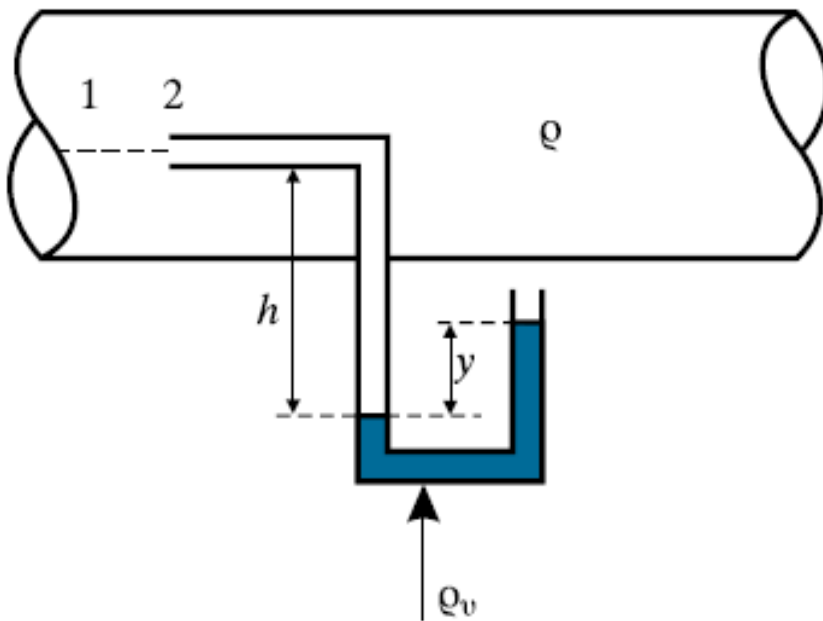
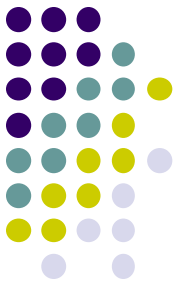
(α), πάνω:

Για λείο αγωγό

(β), κάτω:

Για μεγάλης τραχύτητας αγωγό

Μετρητές κρουστικής πίεσης



Μετρητές κρουστικής πίεσης

Σωλήνας Pitot

P_1 : στατική πίεση

P_2 : κρουστική πίεση

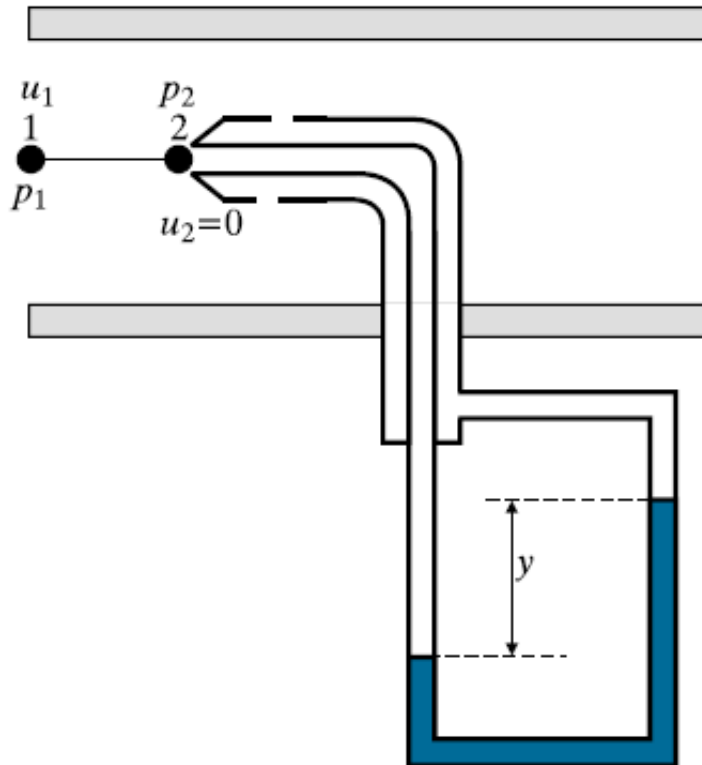
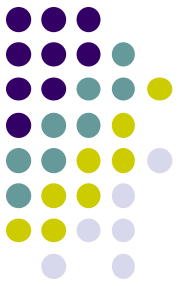
$$P_1/\rho + v_1^2/2 + z = P_2/\rho + v_2^2/2 + z \rightarrow$$

$$P_2 = P_1 + \rho v_1^2/2 \quad (\text{Bernoulli})$$

$$P_2 + \rho gh = P_{\text{atm}} + \rho_v gy \rightarrow$$

$$P_2 - P_{\text{atm}} = (\rho_v y - \rho h)g \quad (\text{εξίσωση πιέσεων})$$

Μέτρηση πίεσης ταχύτητας



Χρήση Σωλήνα Prandtl

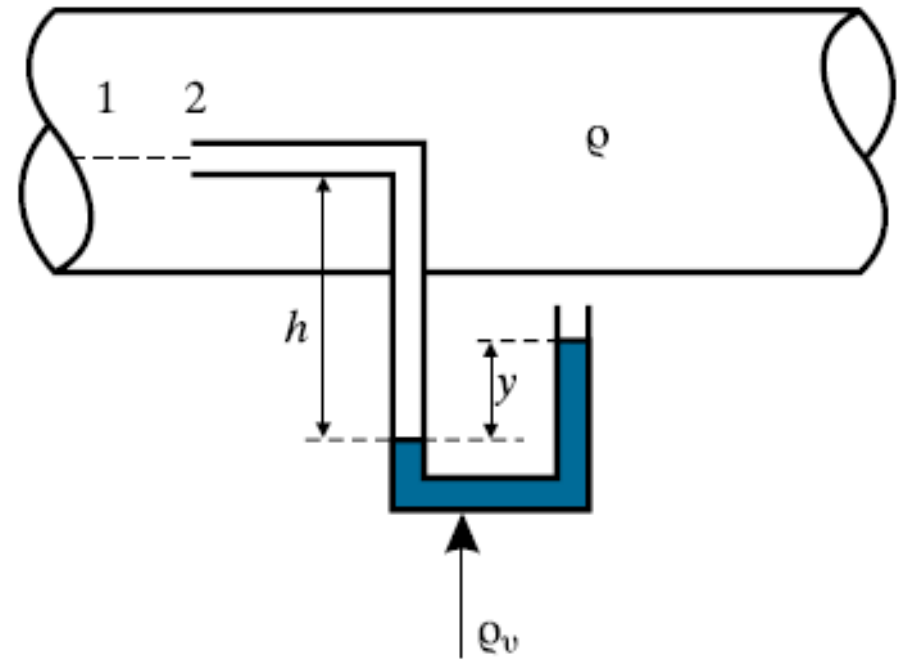
(2 συγκεντρικοί σωλήνες παράλληλοι στη διεύθυνση ροής)

Ο εξωτερικός φέρει οπές → στατική πίεση

Ο εσωτερικός → κρουστική πίεση

η διαφορά: $\Delta p = \text{πίεση ταχύτητας}$

Μετρητές ταχύτητας σωλήνας Pitot



Σωλήνας Pitot

- Δεν πρέπει να τροποποιεί η είσοδος του σωλήνα τις συνθήκες ροής
- Πρέπει να είναι παράλληλος ($\pm 5^\circ$) στη ροή
- Δεν πρέπει να είναι κοντά στα τοιχώματα

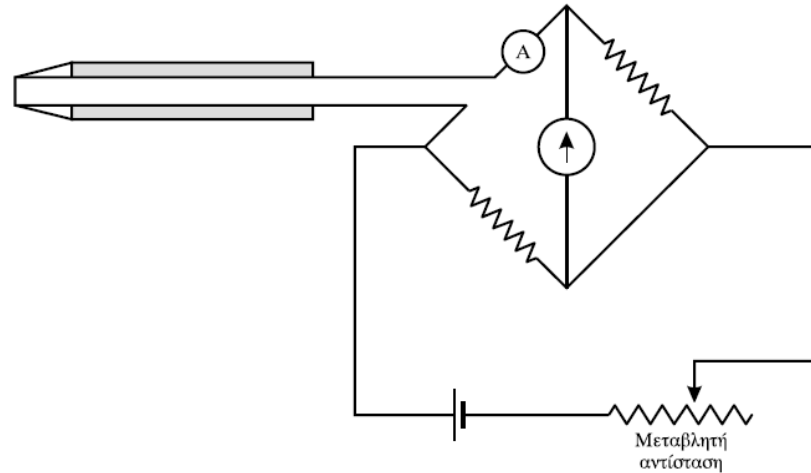
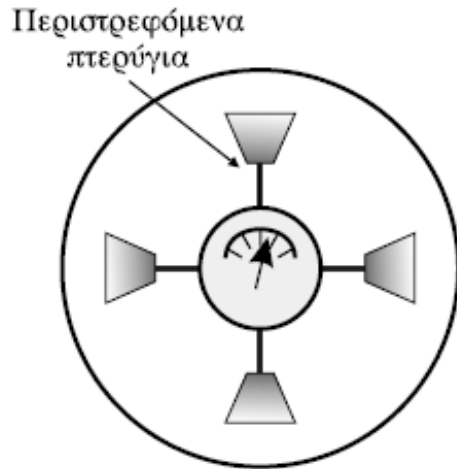
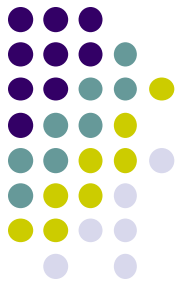
Για ασυμπίεστα αέρια

$$P_1/\rho + v_1^2/2 + z = P_2/\rho + v_2^2/2 + z \rightarrow v_1 = \dots\dots$$

Για συμπιεστά αέρια

Επειδή από v_1 σε v_2 πολύ γρήγορα \rightarrow όχι μεταφορά θερμότητας \rightarrow ροή ισοεντροπική

Μετρητές ταχύτητας – ανεμόμετρα θερμικής αντιστάσεως



Μέτρηση ταχύτητας σε αέρια με ανεμόμετρο (αριστερά) και ανεμόμετρο θερμικής αντίστασης (δεξιά).

Σύρμα ($L=2\text{mm}$, $d=4\text{mm}$) από υλικό με υψηλό θερμικό συντελεστή αντίστασης, π.χ. Pt (αντίσταση μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία) λειτουργεί ως μία από τις αντιστάσεις μιας γέφυρας Wheatstone.

Ρυθμός μεταβολής της αντίστασης του σύρματος \approx

Ρυθμό απώλειας θερμότητας του σύρματος \approx

Ρυθμό ροής μάζας του ρευστού

$$u = \frac{I^4 R^2}{\rho a^2} - \frac{b}{\rho}$$

a,b: σταθερές ανεμομομέτρου

Επειδή $u \approx I^4$, ακριβής μέτρηση του I οδηγεί σε πολύ μεγάλη ακρίβεια στη μέτρηση του u (μικρές ταχύτητες)

Gooseneck Digital Anemometer DT-318

(75 €)



This CEM Digital anemometer features a 16" gooseneck detector allowing you to take measurements at hard to reach areas.

- 16" gooseneck detector for easy to measure hard-to-reach areas.
- High sensitive and accurate
- Easy-to-use design
- 3 1/2 digits LCD display
- Low power consumption
- Data Hold and MAX Hold function
- Low battery indication
- Complete with gift box with carry case, battery
- Dimensions/Wt.: 163X 45 X 34mm/210g



Hot Wire Anemometer - Tecpel AVM714

(330 €)

Ideally suited for environmental testing, air conveyors, flow hoods, clean rooms, air velocity, air balancing, fans/motors/blowers/furnace velocity and refrigerated cases.

The combination of hot wire and standard thermistor, deliver rapid and precise measurements even at low air velocity value, whilst the microprocessor circuit assures maximum possible accuracy and provides special functions and features.

Specifications:

Measurement : m/s (meter per second), km/h (kilometers per hour), ft/min (feet/per minute), knots(nautical miles per hour), mile/h (miles per hour), Temp. deg C and deg F.

Sampling Time : Approx. 0.8 sec.

Power off: Auto power off to save battery life or manual off by push button.

Operating Temperature: 0 to to 50 deg C (32 deg F to 122 deg F)

Operating Humidity: Less than 80% RH

Power Supply : 1.5V AAA (UM-4) battery x 6 (Alkaline or heavy duty type)

Weight: 355 g/0.78 lbs

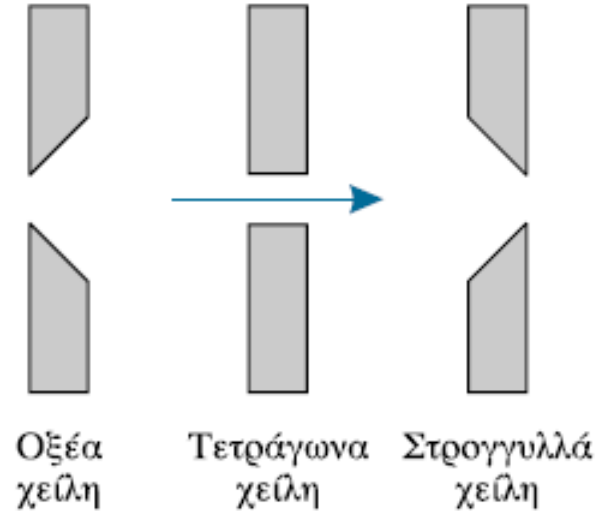
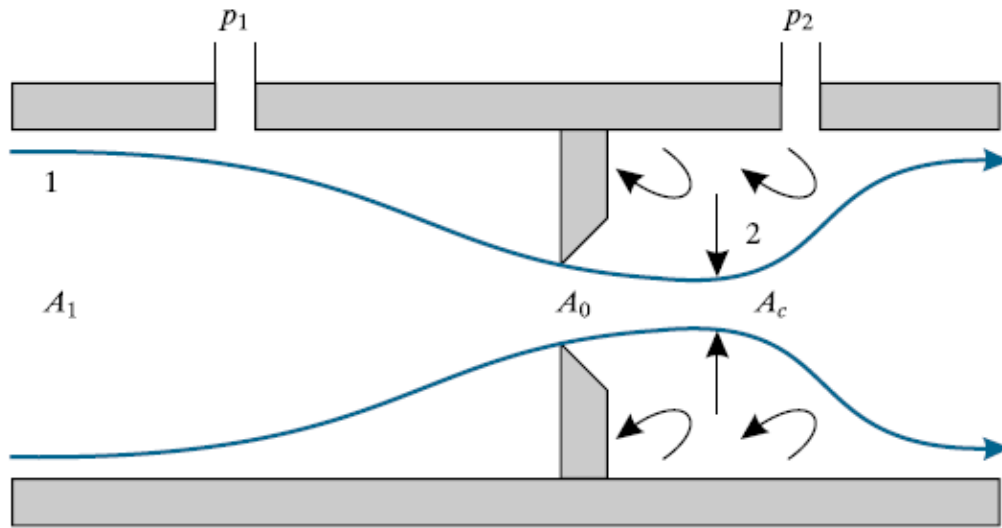
Dimension Main Instrument: 180 x 72 x 32 mm (7.1 x 2.8 x 1.3 inch)

Telescope Probe: Round 12 mm Diameter x 280 mm (min Length) x 940 mm (Max length)



Μετρητές παροχής με μέτρηση διαφοράς πίεσης

1. μετρητές στομίου

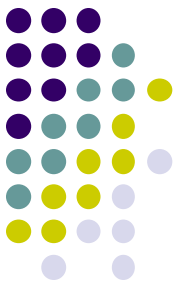


Σχήμα. Μετρητές στομίου (αριστερά) και γεωμετρία οπών (δεξιά).

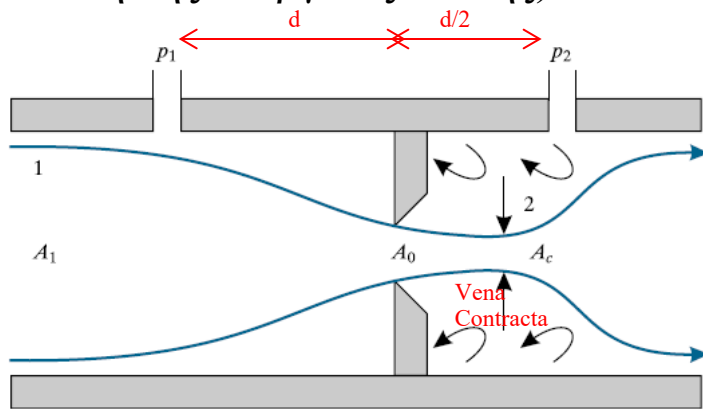
Λόγω παρεμβολής στένωσης → αύξηση κινητικής ενέργειας και μείωση της ενέργειας ροής (πίεσης) → εμφάνιση διαφοράς πίεσης (μετρήσιμη)

Μετρητές παροχής με μέτρηση διαφοράς πίεσης

1. Μετρητές στομίου



- Συστήματα παρεμβολής κατάλληλης στένωσης στη ροή του ρευστού με αποτέλεσμα την εμφάνιση διαφοράς πίεσης
- Η λειτουργία τους στηρίζεται στην αρχή διατήρησης της ενέργειας (αύξηση κιν. ενέργειας, μείωση της ενέργειας πίεσης)

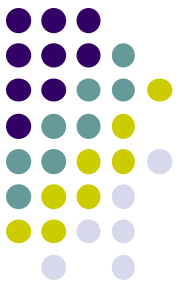


- Κυκλικός αγωγός
- Ροή ασυμπίεστου ρευστού
- Συνθήκες μόνιμης ροής
- Χωρίς απώλειες λόγω τριβών

- Τοποθέτηση μετρητή
 - >50 διαμέτρους αγωγού από το πλησιέστερο εξάρτημα
 - Μέτρηση πίεσης πριν = 2 · (Μέτρηση πίεσης μετά)
 - Συνήθως στο σημείο σύνδεσης 2 αγωγών
- Απώλειες ενέργειας σε θερμότητα λόγω σχηματισμού στροβίλων στο μετρητή

Μετρητές παροχής με μέτρηση διαφοράς πίεσης

1. Μετρητές στομίου



- Αρχή διατήρησης της ενέργειας στις θέσεις 1 και 2 (Vena Contracta)

$$\left. \begin{aligned} \frac{u_1^2}{2} + \frac{P_1}{\rho} + Z_1 &= \frac{u_2^2}{2} + \frac{P_2}{\rho} + Z_2 \\ u_1 A_1 &= u_c A_c \end{aligned} \right\} \Rightarrow u_c = \sqrt{\frac{2(\rho_1 - \rho_c)}{\left(1 - \frac{A_c^2}{A_1^2}\right) \rho}}$$

Ταχύτητα στη Vena Contracta

$$Q = A_c u_c$$

Παροχή στη Vena Contracta

Επειδή είναι δύσκολος ο υπολογισμός της διατομής της Vena Contracta, αυτή εκφράζεται σαν συνάρτηση της διατομής A_0 : $A_c = C_c A_0 \Rightarrow$

$\Rightarrow Q = C_c A_0 u_c$ **Upper Limit της Παροχής γιατί:** 1) υπάρχουν απώλειες λόγω στροβίλου
2) αντικατάσταση της P_c με P_2

\Rightarrow εισαγωγή τη σταθεράς C_l (συντελεστής εκροής) \Rightarrow

$$Q = C_l C_c A_0 u_c = C_l C_c A_0 \sqrt{\frac{2g(h_1 - h_2)}{1 - C_c^2 \frac{A_0^2}{A_1^2}}} \Rightarrow Q = C_D A_0 \sqrt{2g(h_1 - h_2)}, \text{ όπου}$$

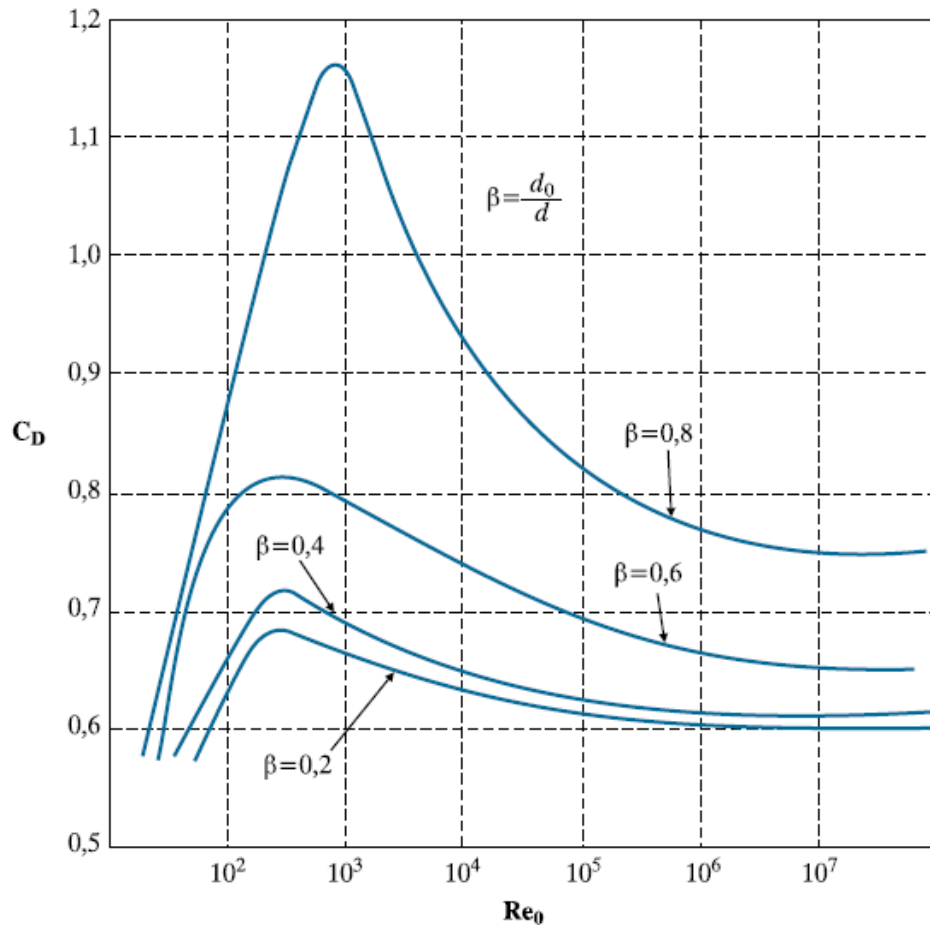
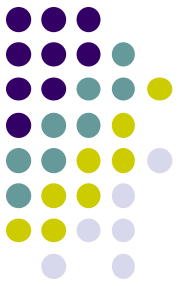
$$C_D = \frac{C_l C_c}{\sqrt{1 - C_c^2 \frac{A_0^2}{A_1^2}}}$$

Σχέση ογκομετρικής παροχής και διαφορικής πίεσης

Παρέχεται ως συνάρτηση του αριθμού Reynolds

Μετρητές παροχής με μέτρηση διαφοράς πίεσης

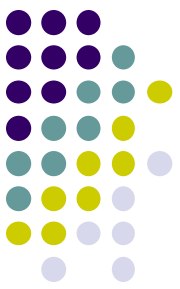
1. Μετρητές στομίου



Συντελεστής μετρητού στομίου

(β : λόγος των διαμέτρων στο στόμιο και στην είσοδο του μετρητή)

Παράδειγμα 9.1



Νερό ρέει από μετρητή στομίου διαμέτρου $d_o = 25$ mm σε αγωγό διαμέτρου $d = 75$ mm με ρυθμό όγκου $\dot{V} = 300$ cm³/s. Να βρεθεί η διαφορά ύψους σε μανόμετρο νερού $\mu = 10^{-3}$ Ns/m².

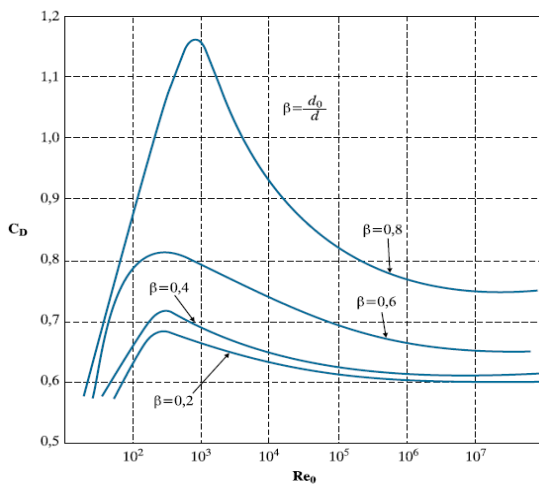
Λύση

Το εμβαδόν της διατομής του στομίου είναι:

$$A_o = \frac{\pi d_o^2}{4} \Rightarrow A_o = \frac{\pi}{4} \times 0,025^2 = 0,00049 \text{ m}^2$$

Επίσης έχουμε:

$$\frac{d_o}{d_1} = \frac{25}{75} = 0,33 \quad \text{και} \quad \text{Re}_o = \frac{d_o u \rho}{\mu} = \frac{d_o \frac{\dot{V}}{A_o} \rho}{\mu} = 1,53 \times 10^4$$

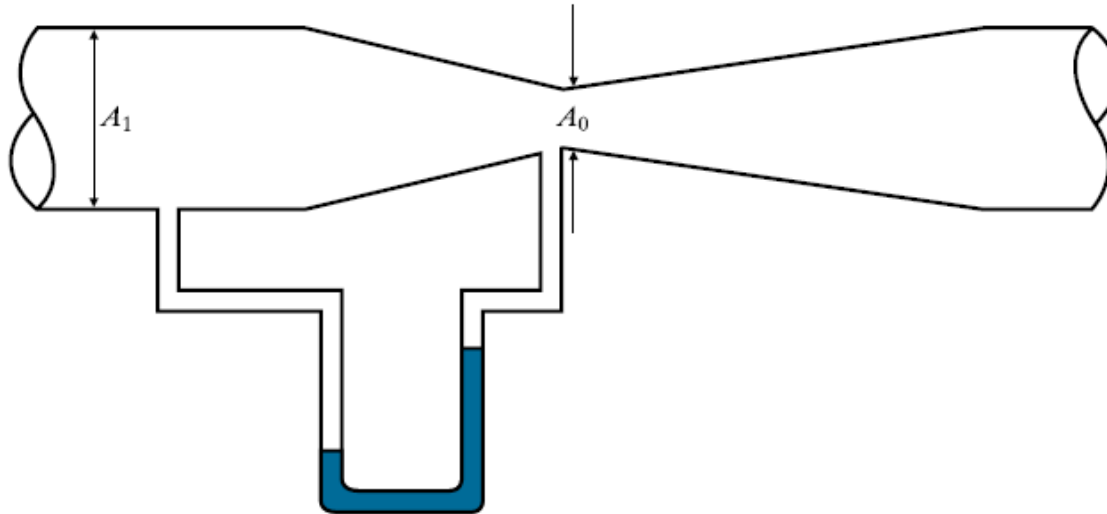
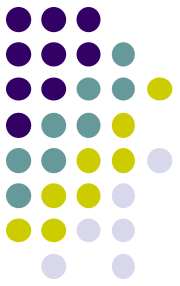


$$\longrightarrow C_D = 0,61$$

$$\dot{V} = C_D A_o \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \longrightarrow h_1 - h_2 = \frac{\dot{V}^2}{C_D^2 A_o^2 2g} = 0,051 \text{ m}$$

Μετρητές παροχής με μέτρηση διαφοράς πίεσης

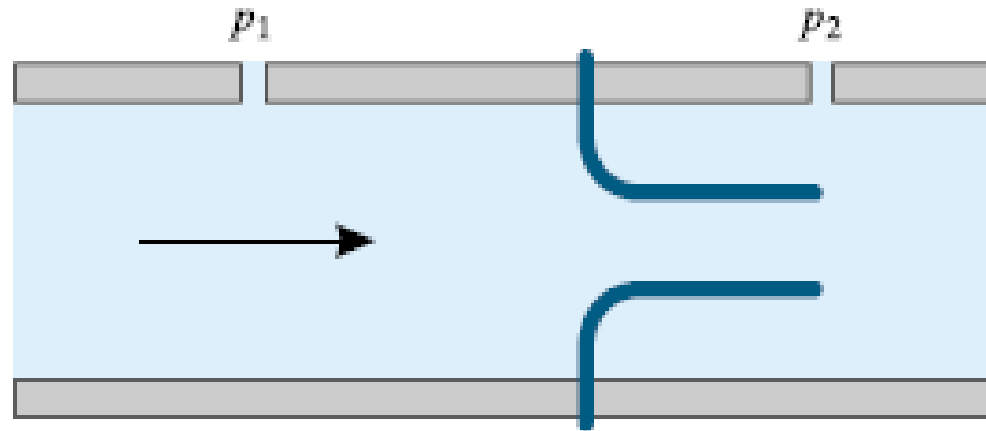
2. Μετρητές Venturi



- Αρχή λειτουργίας ίδια με τους μετρητές στομίου (ίδια εξίσωση λειτουργίας)
- Ελαχιστοποίηση απωλειών λόγω σχηματισμού στροβίλων
- Κώνος προσέγγισης $15^{\circ} - 20^{\circ}$, κώνος απομάκρυνσης $< 7^{\circ}$

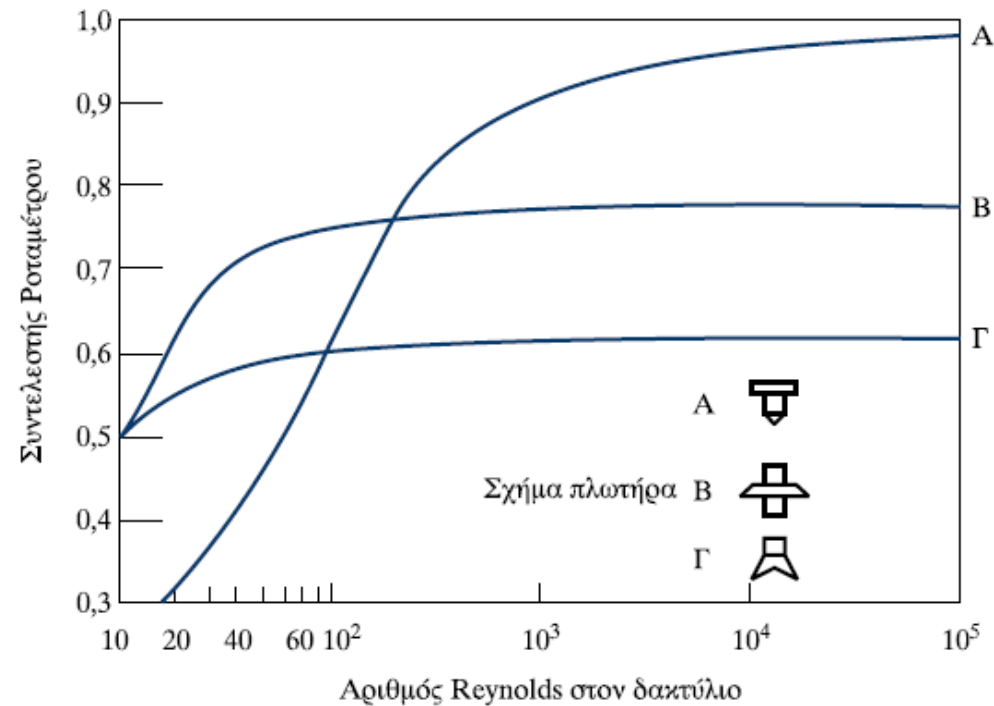
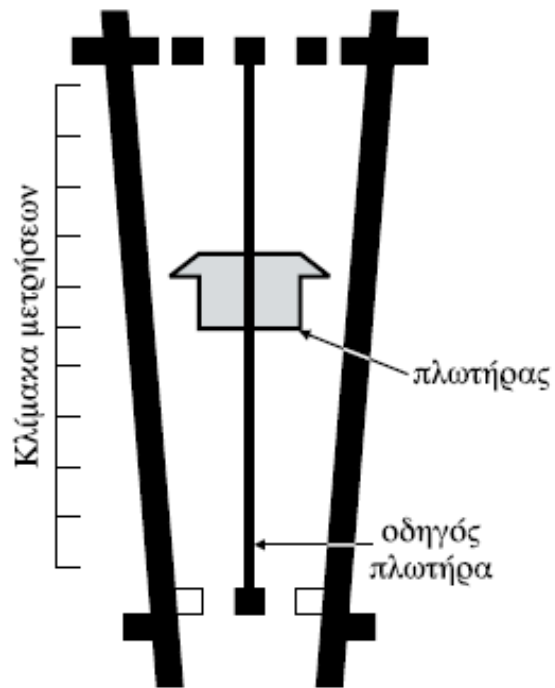
Μετρητές παροχής με μέτρηση διαφοράς πίεσης

3. Ακροφύσια ροής



- Ίδια με τους μετρητές στομίου μόνο που για στένωση έχουν συγκλίνοντα αγωγό
- Πρακτικά μηδενίζεται η vena contracta, άρα συντελεστής εκροής $c_1 \approx 1$
- Χρήση για τη μέτρηση ροής ατμού

Μετρητές μεταβλητής διατομής - ροτάμετρα -



Σχήμα. Ροτάμετρο και Συντελεστής ροταμέτρου

Παράδειγμα 9.2



Ροτάμετρο αποτελείται από αγωγό μήκους $H=0.3$ m σε μήκος και εσωτερική διάμετρο $d_k=25$ mm στην κορυφή και $d_\pi=20$ mm στον πυθμένα. Η διάμετρος του πλωτήρα είναι $d_f=20$ mm η πυκνότητά του $\rho_f=4,9$ gr/cm³ και ο όγκος του $V_f=6,6$ cm³. Αν ο συντελεστής του ροταμέτρου είναι $C_d=0,72$ να βρεθεί το ύψος που θα βρίσκεται ο πλωτήρας όταν η παροχή είναι $\dot{V}=100$ cm³/s.

Λύση

$$\dot{V} = C_1 A_2 \sqrt{\frac{2g V_f (\rho_f - \rho)}{\rho \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right] A_f}}$$

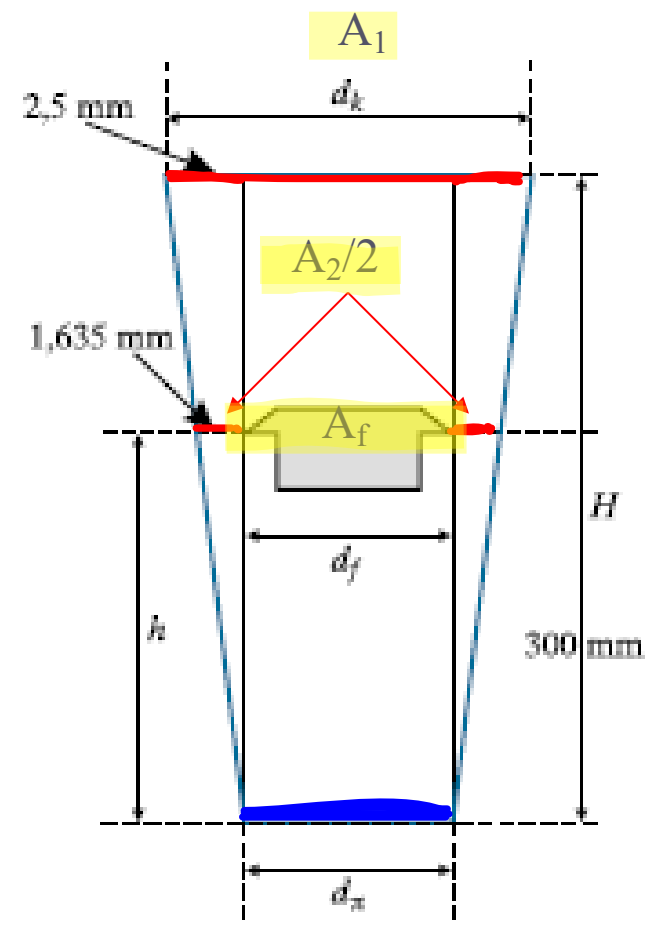
$$A_2 + A_f = A_1$$

$$A_2 = \dots$$

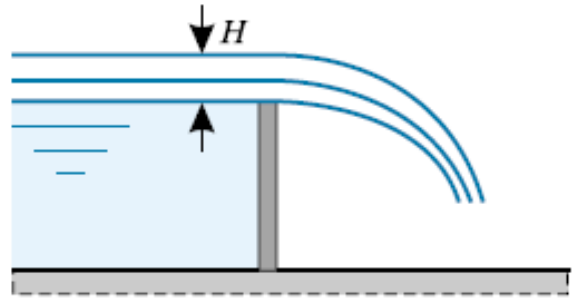
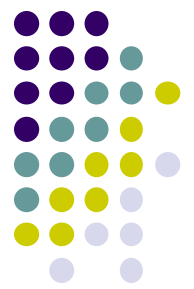
$$d_2 = \dots$$

$d_2 - d_f =$ απόσταση πλωτήρα από τοιχώματα

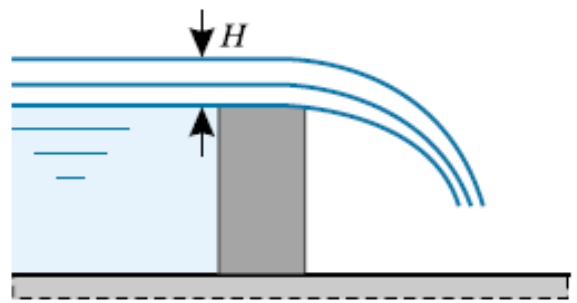
$$\frac{h}{H} = \frac{\frac{d_2 - d_f}{2}}{\frac{d_k - d_f}{2}} \Rightarrow h = \dots$$



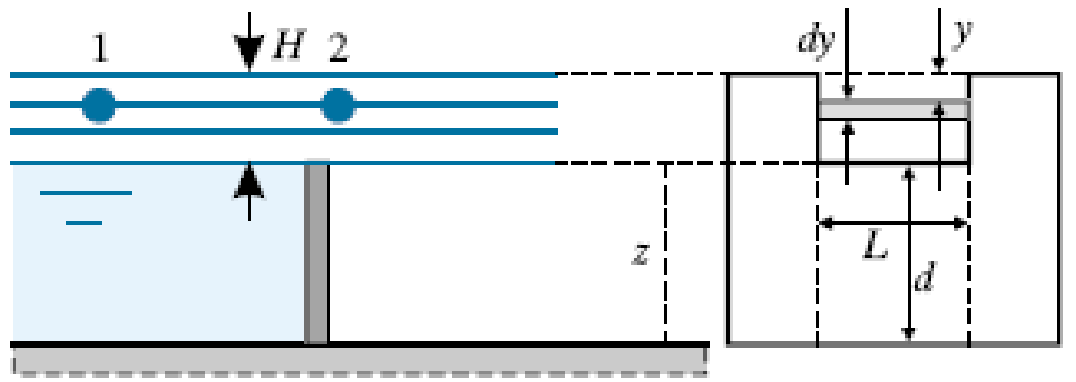
Μετρητές παροχής σε ανοικτούς αγωγούς - υπερχειλιστές



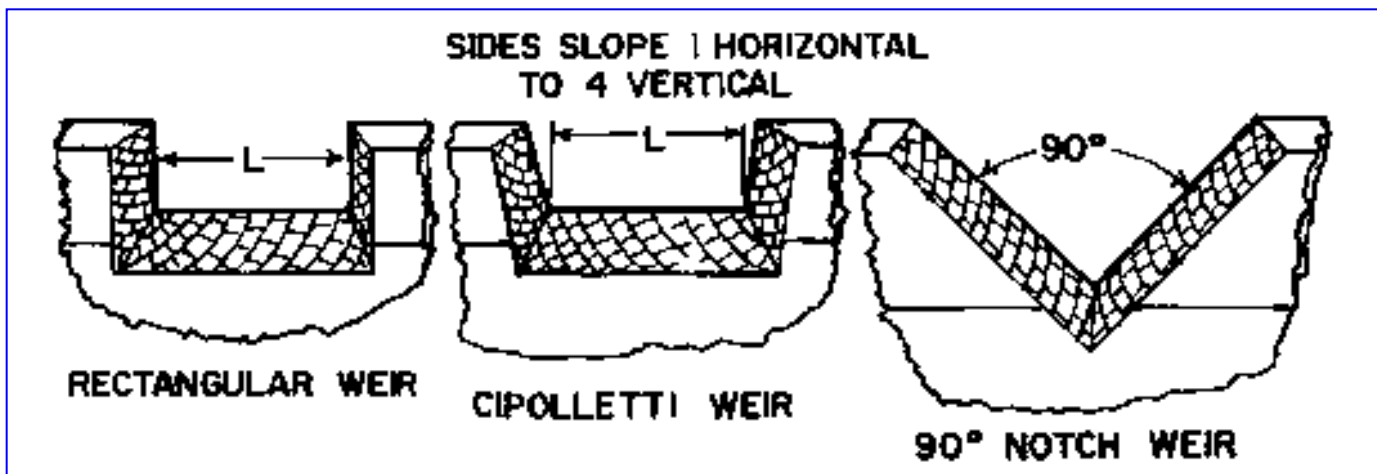
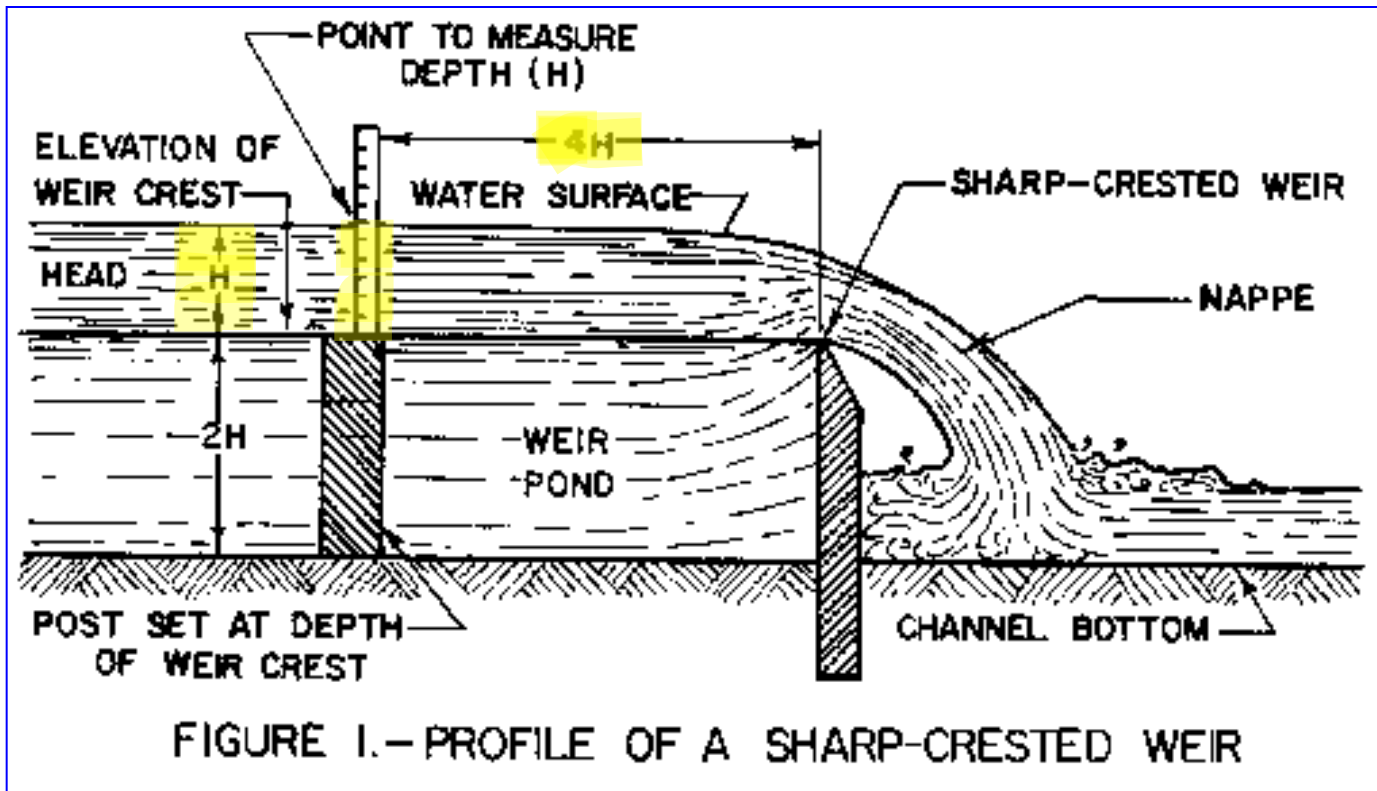
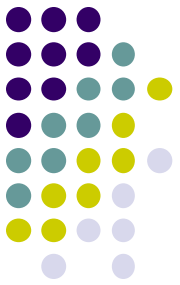
Υπερχειλιστής με αιχμηρά χείλη

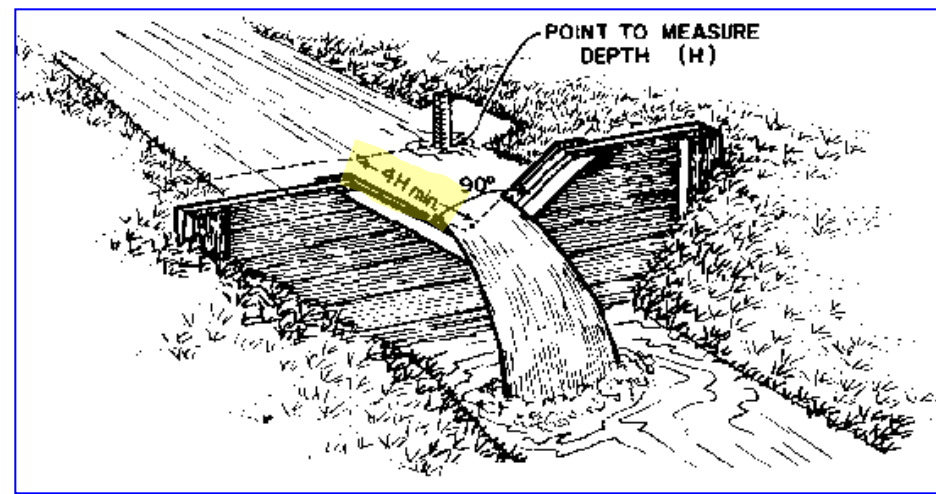
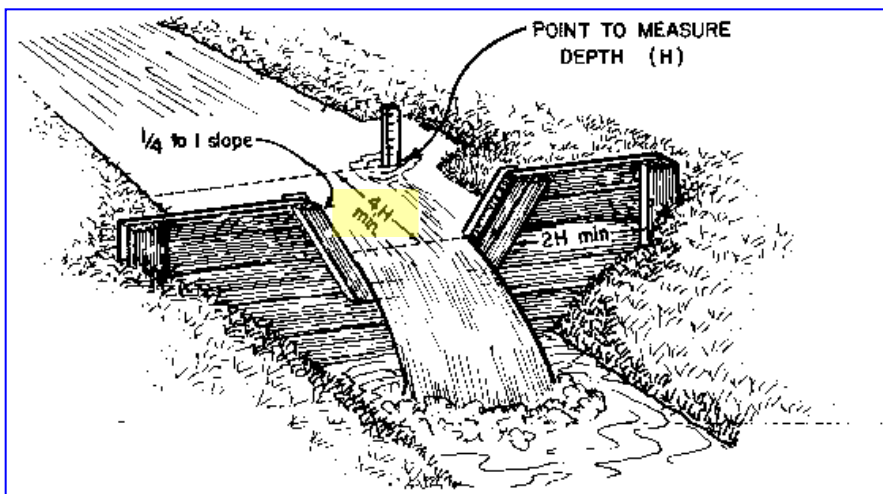
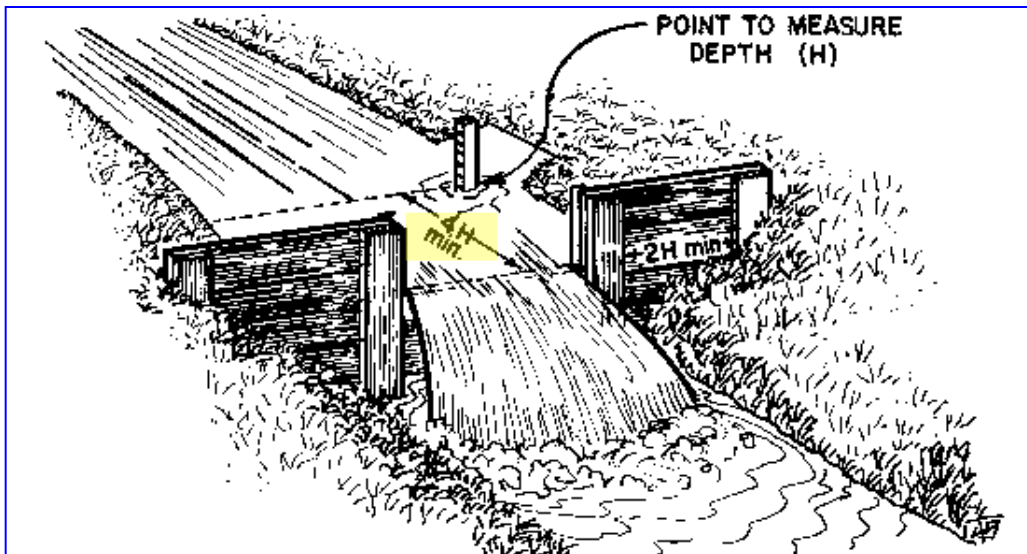


Υπερχειλιστής με πεπλατυσμένα χείλη



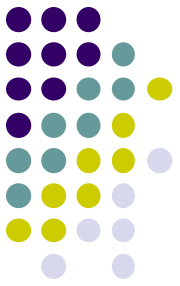
Σχήμα. Υπερχειλιστής με αιχμηρά και πεπλατυσμένα χείλη (αριστερά) και ορθογώνιος υπερχειλιστής (δεξιά)



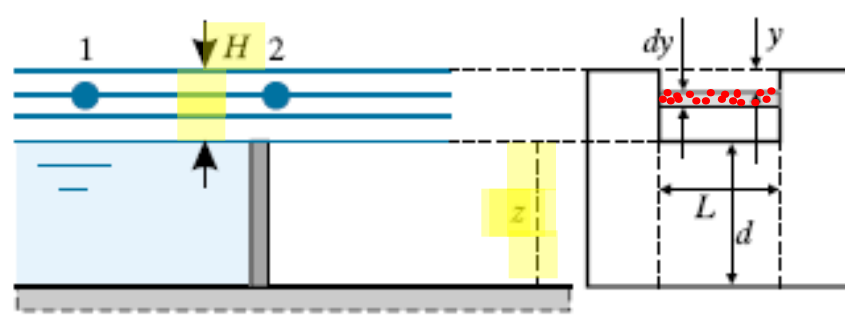
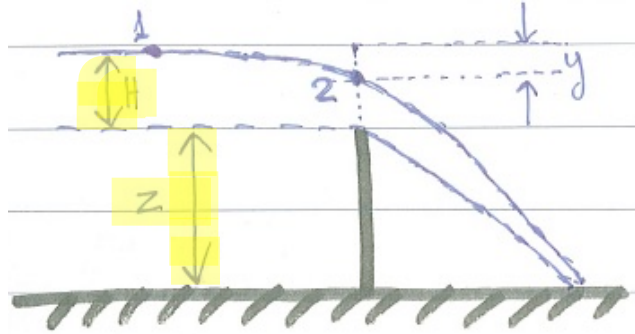




Υπερχειλιστής φράγματος Λούρου



Υπερχειλιστής φράγματος Jordao, Βραζιλία



$$\frac{p_{atm}}{\rho} + \frac{u_1^2}{2} + g(z + H) = \frac{p_{atm}}{\rho} + \frac{u_2^2}{2} + \rho g(z + H - y)$$

Αν υποθέσουμε ότι η ταχύτητα u_1 είναι αμελητέα θα έχουμε:

$$u_2 = \sqrt{2gy}$$

Εάν υποθέτοντας ότι όλα τα σημεία της επιφάνειας πάχους dy έχουν ταχύτητα u_2 , τότε η παροχή από την επιφάνεια Ldy θα είναι:

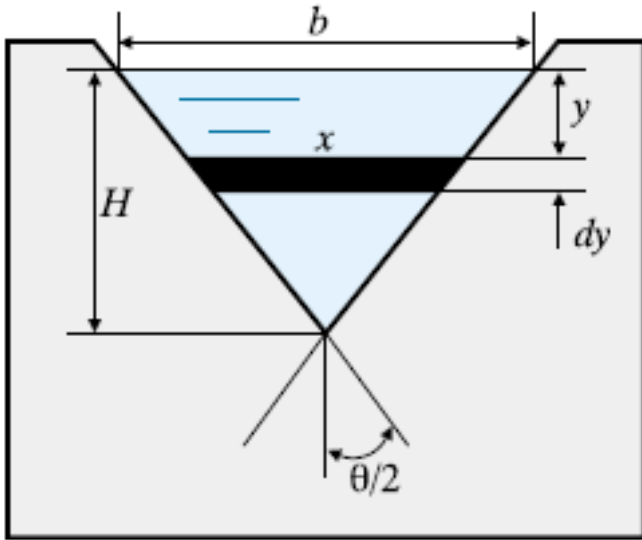
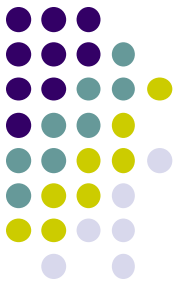
$$d\dot{V} = u_2 L dy = L \sqrt{2gy} dy \longrightarrow \dot{V} = \int_0^H L \sqrt{2gy} dy = \frac{2}{3} \sqrt{2g} LH^{3/2} \longrightarrow \dot{V} = 1,84 LH^{3/2}$$

Λόγω συστολής της φλέβας ροής και απωλειών ενέργειας, η πραγματική ροή είναι το 63% περίπου της θεωρητικής

Όταν το ύψος z του υπερχειλιστή είναι μικρό, τότε δεν μπορεί να αγνοηθεί το ύψος κινητικής ενέργειας (δηλ. το U_1) στο 1. Τότε:

$$Q = 1,84L \left(H + a \frac{v_1^2}{2g} \right)^{3/2} \quad a = 1,4$$

Να υπολογιστεί ο θεωρητικός τύπος της παροχής για τριγωνικό υπερχειλιστή



• Η ταχύτητα σε βάθος y είναι: $u = \sqrt{2gy}$

• Η θεωρητική εκροή είναι:

$$Q_t = \int u dA = \int_0^H u x dy$$

• Όμοια τρίγωνα $\frac{x}{H-y} = \frac{b}{H} \Rightarrow x = \frac{b}{H}(H-y)$

$$Q_t = \int_0^H \sqrt{2gy} \frac{b}{H} (H-y) dy \Rightarrow Q_t = \sqrt{2g} \frac{b}{H} \int_0^H y^{1/2} (H-y) dy \Rightarrow$$

$$\Rightarrow Q_t = \frac{4}{15} \frac{b}{H} \sqrt{2g} H^{5/2}$$

$$Q_t = \frac{4}{15} \frac{2H \tan \frac{\theta}{2}}{H} \sqrt{2g} H^{5/2} \Rightarrow$$

$$Q_t = \frac{8}{15} \sqrt{2g} H^{5/2} \tan \frac{\theta}{2}$$

$$\frac{b/2}{H} = \tan \frac{\theta}{2}$$

Για $\theta = 90^\circ \Rightarrow \frac{\theta}{2} = 45^\circ$

$$Q_t = 2,36 H^{5/2}$$

Παράδειγμα 9.3

Να υπολογισθεί ο θεωρητικός τύπος της παροχής για τριγωνικό υπερχειλιστή.

Λύση

Αν εφαρμόσουμε την εξίσωση (9.18) έχουμε: $u_2 = \sqrt{2gy}$,
όπου: u_2 είναι η ταχύτητα σε απόσταση y και y τυχαία απόσταση.

Άρα η ογκομετρική παροχή \dot{V} για το στοιχειώδες τμήμα $x dy$ θα είναι:

$$d\dot{V} = x \sqrt{2gy} dy,$$

όπου x η οριζόντια απόσταση της επιφάνειας πάχους dy .

Από τα όμοια τρίγωνα έχουμε: $\frac{x}{b} = \frac{H-y}{H}$,

όπου b το μήκος της επιφάνειας νερού στον υπερχειλιστή.

Συνδυασμός των δύο τελευταίων εξισώσεων δίνει:

$$d\dot{V} = \frac{H-y}{H} b \sqrt{2gy} dy$$

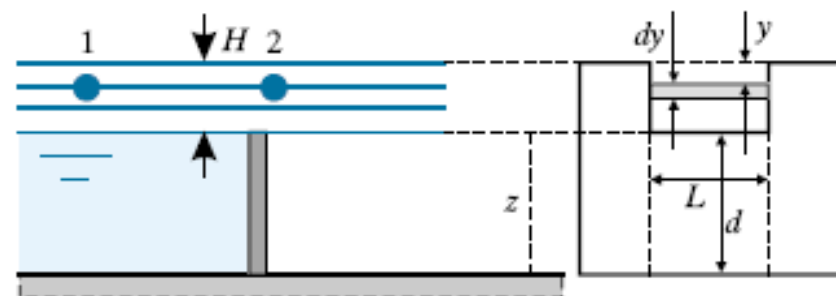
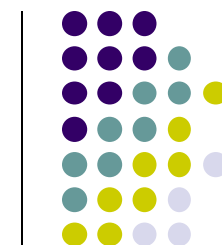
Με ολοκλήρωση της τελευταίας προκύπτει:

$$\dot{V} = \frac{b}{H} \int_0^H (H-y) \sqrt{2gy} dy \Rightarrow \dot{V} = \frac{b}{H} \frac{4}{15} \sqrt{2g} H^{5/2}$$

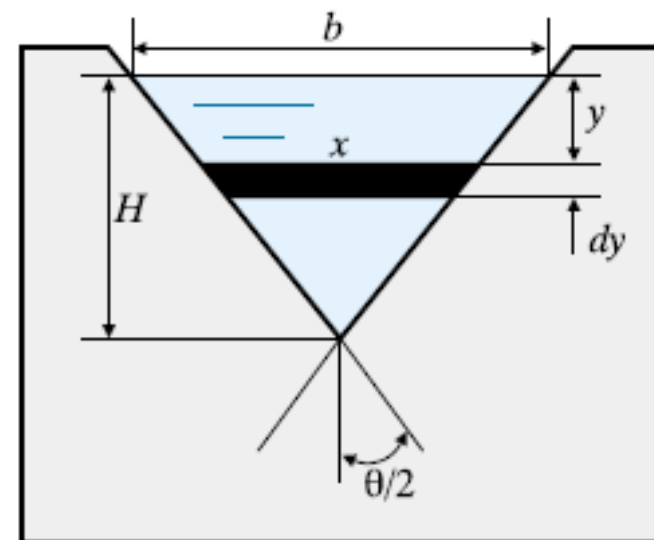
Αλλά $b = 2H \tan(\theta/2)$ και τελικά έχουμε: $\dot{V} = \frac{8}{15} \sqrt{2g} H^{5/2} \tan \frac{\theta}{2}$

Αν $\theta = 90^\circ$ και υποθέσουμε ότι η πραγματική ροή είναι το 60% της θεωρητικής, θα έχουμε για την πραγματική ογκομετρική παροχή

$$\dot{V} = 1,42 H^{5/2}$$

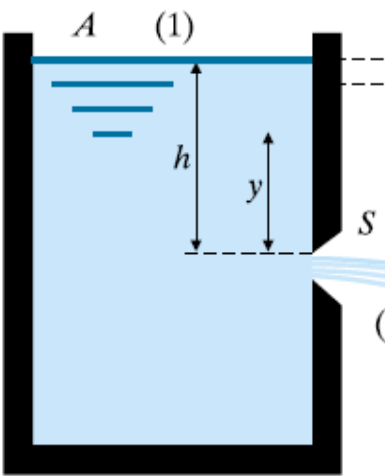


$$\frac{P_{atm}}{\rho} + \frac{u_1^2}{2} + g(z+H) = \frac{P_{atm}}{\rho} + \frac{u_2^2}{2} + \rho g(z+H-y)$$





Μετρητές Στομίου σε Δεξαμενές



θεωρητική

$$\frac{u_1^2}{g} + z_1 + \frac{P_1}{\gamma} = \frac{u_2^2}{2g} + z_2 + \frac{P_2}{\gamma} \Rightarrow z + h = z + \frac{u_2^2}{2} \Rightarrow u = \sqrt{2gh}$$

$$Q_{th} = A_0 \sqrt{2gh}$$

$$Q_{real} = C_6 A_0 \sqrt{2gh}$$

↑
συντελεστής στομίου

Υπολογισμός του χρόνου εκροής από ύψος h —————> σε ύψος y

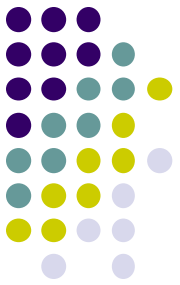
$$\left. \begin{aligned} Q &= C_6 A_0 \sqrt{2gh} \\ Q &= -A \frac{dy}{dt} \end{aligned} \right\} \Rightarrow C_6 A_0 \sqrt{2gh} = -A \frac{dy}{dt} \Rightarrow -y^{-1/2} dy = C_6 \frac{A_0}{A} \sqrt{2g} dt \Rightarrow$$

$$-\int_h^y y^{-1/2} dy = C_6 \frac{A_0}{A} \sqrt{2g} \int_0^t dt \Rightarrow t = \frac{2A}{C_6 A_0 \sqrt{2g}} (\sqrt{h} - \sqrt{y})$$

ταχύτητα
κατάπτωσης
της στάθμης

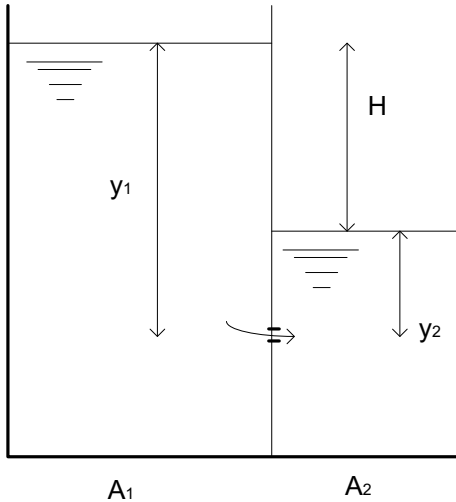
Χρόνος εκκένωσης για y = 0

$$t_{ολ} = \frac{A}{C_6 A_0} \sqrt{\frac{2h}{g}}$$



Συγκοινωνούντα δοχεία/ δεξαμενές

Σε πόσο χρόνο το Η θα γίνει Η₁, Η₂, 0 κλπ.



$$A_1 dy_1 + A_2 dy_2 = 0 \Rightarrow dy_1 = -\frac{A_2}{A_1} dy_2$$

$$H = y_1 - y_2 \Rightarrow dH = dy_1 - dy_2 = -\frac{A_2}{A_1} dy_2 - dy_2$$

$$\Rightarrow dH = -\left(1 + \frac{A_2}{A_1}\right) dy_2 \Rightarrow dy_2 = -\frac{dH}{\left(1 + \frac{A_2}{A_1}\right)}$$

$$Qdt = C_6 A_0 \sqrt{2gH} dt$$

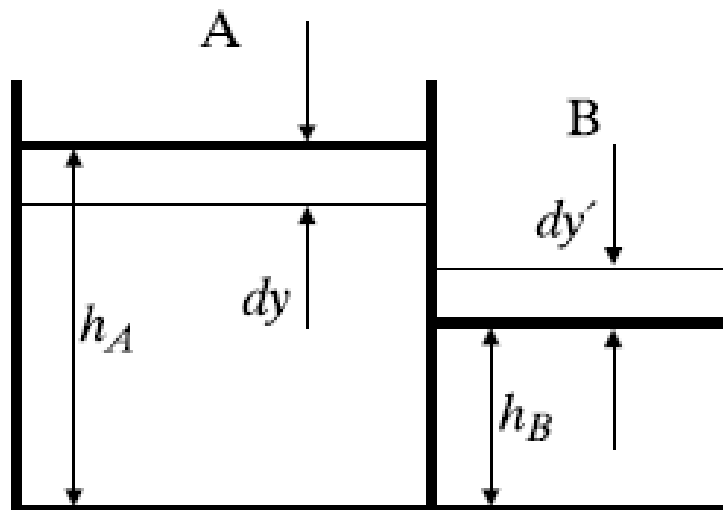
$$Qdt = A_2 dy_2 = A_2 \left(-\frac{dH}{\left(1 + \frac{A_2}{A_1}\right)} \right) \Rightarrow$$

$$C_6 A_0 \sqrt{2g} \sqrt{H} dt = -\frac{dH}{1 + \frac{A_2}{A_1}} A_2 \Rightarrow \int_0^t dt = -\frac{A_2}{C_6 A_0 \sqrt{2g} \left(1 + \frac{A_2}{A_1}\right)} \int_{H_1}^{H_2} H^{-1/2} dH$$

$$\Rightarrow t = \frac{2A_2}{C_6 A_0 \sqrt{2g} \left(1 + \frac{A_2}{A_1}\right)} (\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2})$$

Παράδειγμα 9.4

Δύο δεξαμενές A και B, τετραγωνικής διατομής ακμών $a_1 = 3,66 \text{ m}$ και $a_2 = 1,22 \text{ m}$ αντίστοιχα, βρίσκονται σε επαφή. Στην κοινή πλευρά τους υπάρχει οπή εμβαδού $A_o = 0,023 \text{ m}^2$ και συντελεστού $C_s = 0,9$. Η στάθμη του νερού στην A είναι σε ύψος $h_A = 3 \text{ m}$ και στην B σε ύψος $h_B = 1 \text{ m}$ από την οπή. Να βρεθεί ο χρόνος που απαιτείται έτσι ώστε οι επιφάνειες του νερού στις δύο δεξαμενές να βρεθούν στο ίδιο επίπεδο.



Λύση

Σε κάθε χρονική στιγμή η παροχή μέσω της οπής θα οφείλεται στην διαφορά στάθμης του νερού των δύο δεξαμενών h . Έτσι θα ισχύει:

$$\dot{V} = C_s A_o \sqrt{2gh} = 0,8 \times 0,023 \sqrt{2gh} = 0,0815 \sqrt{h}$$

Σε χρόνο dt ο όγκος νερού που διέρχεται από την οπή είναι,

$$dV = \dot{V} dt = 0,0815 \sqrt{h} dt$$

Στον ίδιο χρόνο η μεταβολή διαφοράς στάθμης είναι dh , και θα πρέπει ο εισερχόμενος όγκος στη δεξαμενή B να είναι ίσος με τον εξερχόμενο όγκο από τη δεξαμενή A. Επομένως αν η στάθμη στη δεξαμενή A μειωθεί κατά dy σε απόλυτη τιμή, στην B θα ανέβει κατά dy' που υπολογίζεται από την ισότητα των δύο όγκων ως:

$$\alpha_1^2 dy = \alpha_2^2 dy' \Rightarrow dy' = \frac{\alpha_1^2}{\alpha_2^2} dy \Rightarrow dy' = \left(\frac{3,66}{1,22}\right)^2 dy = 9 dy$$

Θεωρώντας θετική φορά προς τα κάτω θα ισχύει:

$$-dh = dy - dy' = dy - (-9 dy) \Rightarrow dy = -\frac{dh}{10}$$

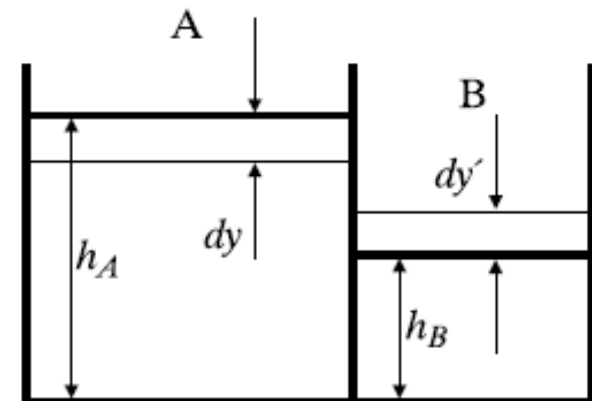
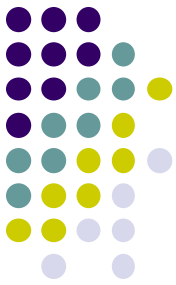
Ο στοιχειώδης όγκος που διέρχεται από την οπή είναι:

$$dV = \alpha_1^2 dy = 3,66^2 \times \left(-\frac{dh}{10}\right) = -1,339 dh$$

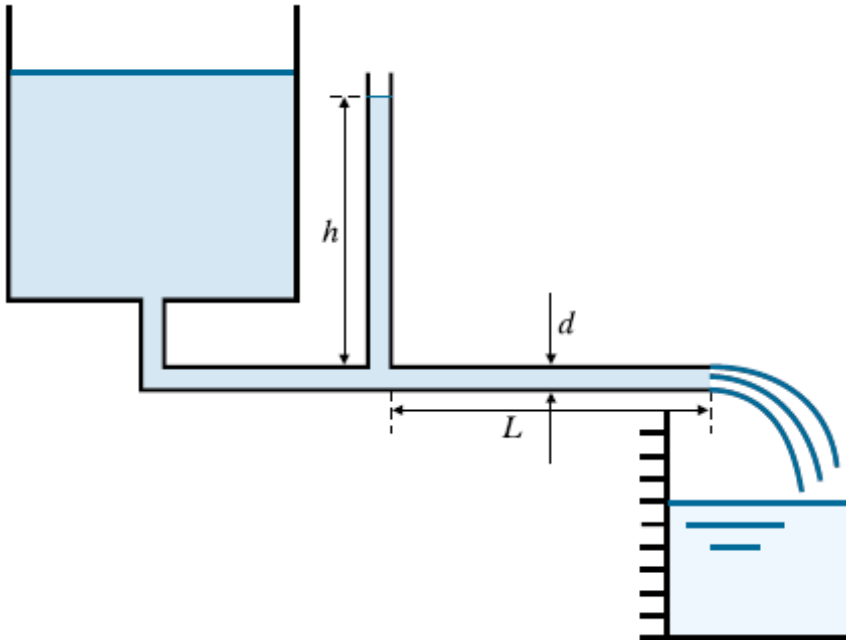
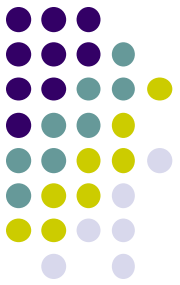
Εξίσωση των δύο σχέσεων που δίνουν τους στοιχειώδεις όγκους παρέχει:

$$0,0815 \sqrt{h} dt = -1,339 dh \Rightarrow dt = -16,43 h^{-1/2} dh \Rightarrow$$

$$\int_0^t dt = -\int_2^0 16,43 h^{-1/2} dh \Rightarrow t = 46,47 \text{ s}$$



Μετρητές ιξώδους (viscometers) - ιξωδόμετρα ροής μέσω αγωγού

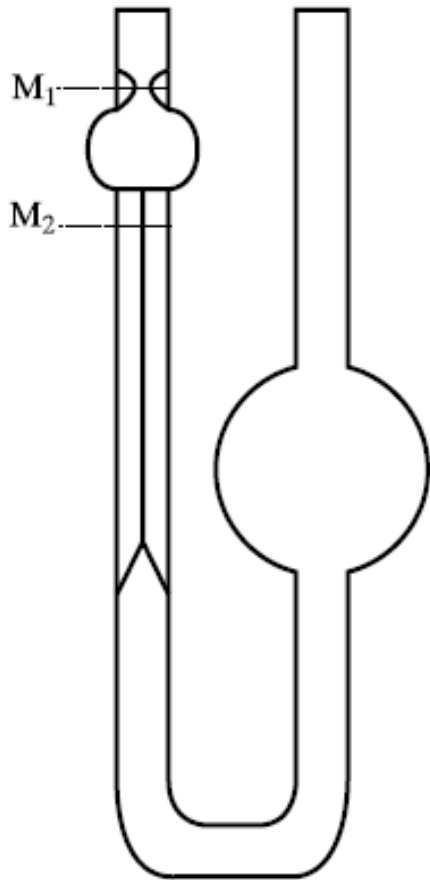


Εξίσωση Hagen-Poiseuille

$$\Delta p = \frac{128 \mu L Q}{\pi d^4} \Rightarrow \mu = \frac{\pi \Delta p d^4}{128 Q L} \Rightarrow \mu = \frac{\pi \rho g h d^4}{128 L} \frac{t}{V}$$

$$Q = \frac{V(\text{volume})}{t}$$

Μετρητές ιξώδους (viscometers) - ιξωδόμετρα Ostwald



$$\mu = \frac{\rho g h d^4}{128 \frac{V}{L} t} = \frac{\rho g h d^4 t}{128 L V}$$

$$v = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\rho g h d^4}{128 L V} \times t = k_v t$$

Δηλαδή το κινηματικό ιξώδες είναι ανάλογο του χρόνου εκροής. Επειδή η σταθερά k_v είναι δύσκολο να υπολογισθεί, βρίσκουμε το χρόνο εκροής με ένα υγρό γνωστού κινηματικού ιξώδους ν_0 . Κατόπιν μετρώντας το χρόνο εκροής του άγνωστου υγρού και χρησιμοποιώντας τη σχέση (9.36) υπολογίζουμε το άγνωστο κινηματικό ιξώδες.

$$\frac{\nu}{\nu_0} = \frac{t}{t_0} \quad (9.36)$$

Μετρητές ιξώδους (viscometers) - ιξωδόμετρα βυθιζόμενης σφαίρας

Gilmont ® Falling Ball Viscometer 0.2 to 10 centipoise

EW-08701-00, \$192.00 / each (USD)

Ideal for routine plant quality control checks and research laboratory applications

This viscometer is extremely easy to use;

First fill tube with sample, then invert tube, allowing the ball to enter the PTFE screw.

Next, restore tube to normal position. Finally, turn the knob to release the ball, and measure the time of descent. Reading the viscometer is easy—the ball moves against white background with red reference lines.

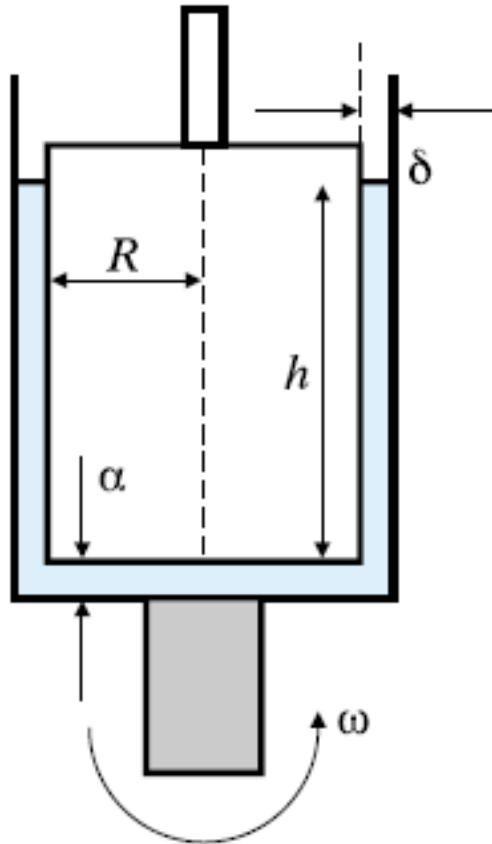
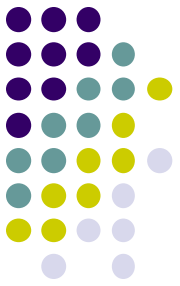
Repeatability with good technique varies from ± 0.2 to $\pm 1.0\%$, depending upon time of descent.

Viscometers require a **7 mL sample volume**. Each viscometer is supplied with one **glass** and one **316 stainless steel** high-precision ball. For higher viscosity ranges, use the optional **tantalum ball** (order separately below table).

Viscometers are made of precision-bore glass tubing with stabilizing beads.

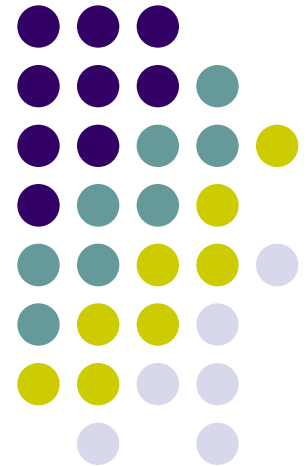


Μετρητές ιξώδους (viscometers) - περιστρεφόμενο ιξωδόμετρο

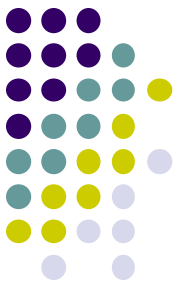


Ρευστομηχανική

Μεταφορά ρευστών – αντλίες

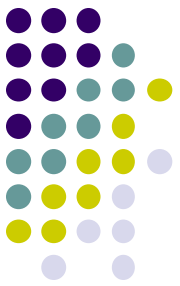


Μεταφορά ρευστών - αντλίες



Η μεταφορά ρευστών από μία δεξαμενή σε μία άλλη υψηλότερης στάθμης πραγματοποιείται με τη χρήση μηχανικής αντλίας. Η αντλία μετατρέπει την ενέργεια που προσφέρεται σε αυτήν, ηλεκτρική, μηχανική ή θερμική, σε ενέργεια του ρευστού. Το ποσό της ενέργειας που καταναλώνει μία αντλία για την μετακίνηση του ρευστού εξαρτάται από τους εξής παράγοντες:

- ◆ Το ύψος, που πρέπει να ανυψωθεί το ρευστό.
- ◆ Το μήκος και τη διάμετρο του αγωγού.
- ◆ Την επιθυμητή παροχή.
- ◆ Την πίεση με την οποία απαιτείται να παραδοθεί το ρευστό.
- ◆ Τις φυσικές ιδιότητες του ρευστού, κυρίως την πυκνότητα και το ιξώδες.

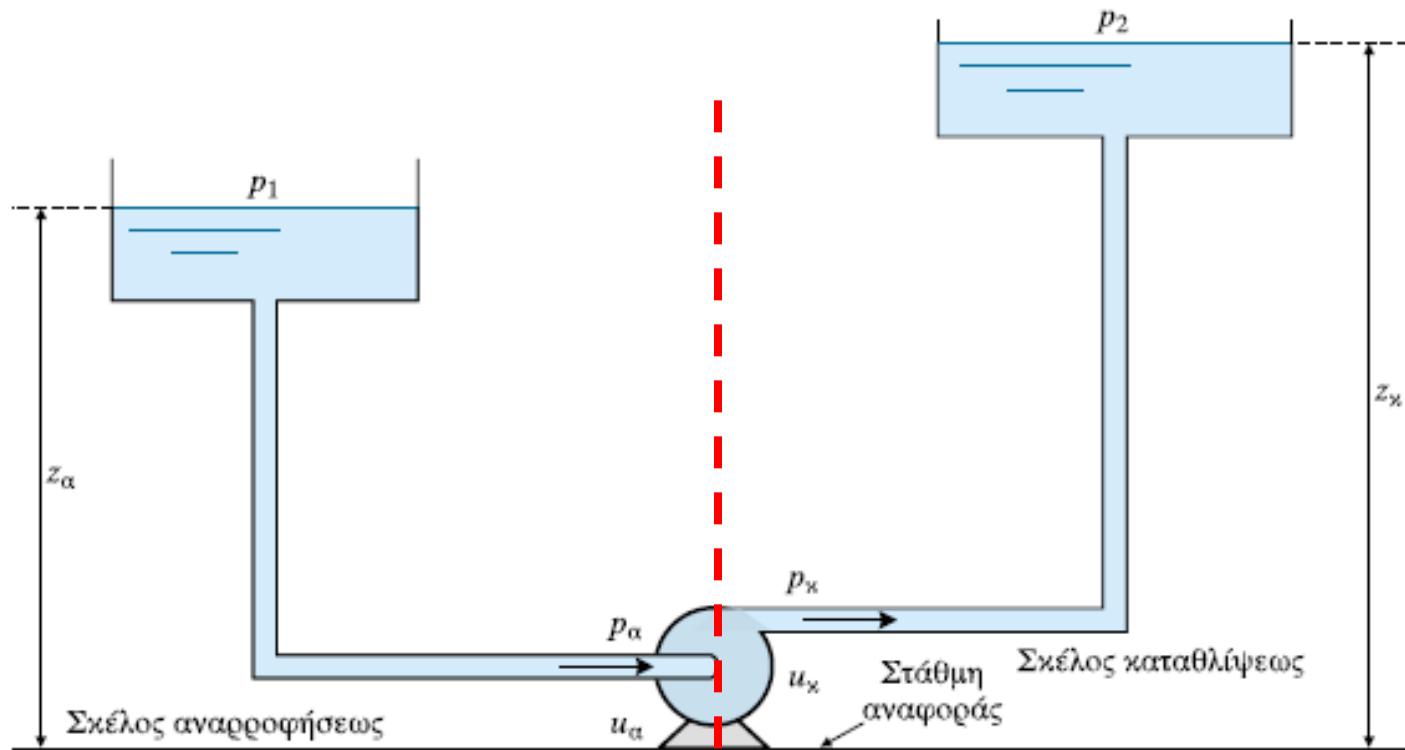
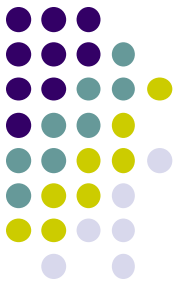


Επιλογή κατάλληλης αντλίας

Παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη :

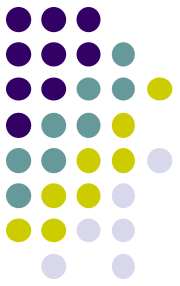
- ◆ Την απαιτούμενη παροχή της αντλίας. Αυτή καθορίζει το μέγεθος της αντλίας ή ακόμη την πιθανή χρήση περισσότερων αντλιών σε παράλληλη σύνδεση.
- ◆ Τη διαφορά ύψους, που θέλουμε να μεταφέρουμε το υγρό και τις απώλειες, που υπάρχουν στις σωληνώσεις και στα εξαρτήματα του δικτύου μεταφοράς.
- ◆ Το είδος του υγρού, που θα μεταφερθεί. Αυτό σημαίνει εξέταση του ιξώδους, πυκνότητας, είδος ρευστού (Newtonian, non-Newtonian). Ακόμη αν το υγρό περιέχει αιωρούμενα στερεά και αν τα συστατικά του υγρού παρουσιάζουν διασταλτικές ιδιότητες.
- ◆ Το είδος της ενέργειας, που διατίθεται για την λειτουργία της αντλίας.
- ◆ Αν η λειτουργία της είναι συνεχής ή διακοπτόμενη.
- ◆ Το κόστος αγοράς και συντήρησης της αντλίας.

Άντληση υγρών

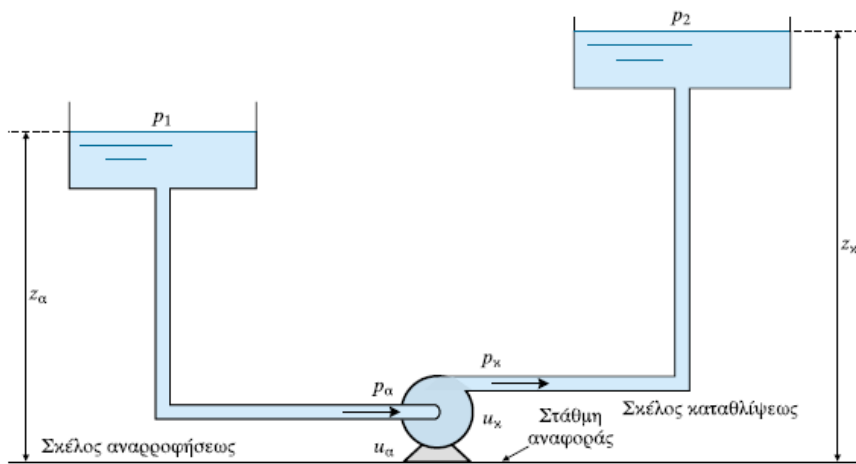


Σχήμα. Σύστημα άντλησης.

Χαρακτηριστικά μεγέθη συστήματος άντλησης



- ◆ Μανομετρικό ύψος αναρρόφησης, h_α .
- ◆ Μανομετρικό ύψος κατάθλιψης, h_κ .
- ◆ Καθαρό διαθέσιμο θετικό μανομετρικό ύψος αναρρόφησης NPSH (net positive suction head).
- ◆ Το συνολικό απαιτούμενο ύψος του συστήματος, Δh_s .
- ◆ Το συνολικό ύψος της αντλίας, Δh .



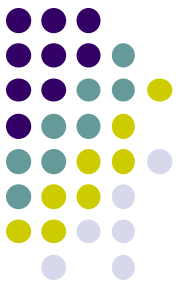
$$h_\alpha = z_\alpha + \frac{p_1}{\rho g} - h_{f\alpha} - \frac{u_\alpha^2}{2g},$$

$$h_\kappa = z_\kappa + \frac{p_2}{\rho g} + h_{f\kappa} - \frac{u_\kappa^2}{2g},$$

$$\text{NPSH} = z_\alpha + \frac{(p_1 - p_v)}{\rho g} - h_{f\alpha} = h_\alpha + \frac{u_\alpha^2}{2g} - \frac{p_v}{\rho g},$$

$$\Delta h_s = h_\kappa - h_\alpha = (z_\kappa - z_\alpha) + \frac{p_2 - p_1}{\rho g} + (h_{f\kappa} + h_{f\alpha}) - \frac{u_\kappa^2 - u_\alpha^2}{2g},$$

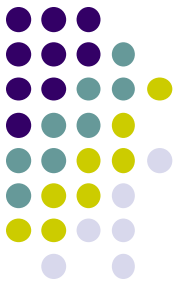
$$\Delta h = \frac{p_\kappa - p_\alpha}{\rho g} + \frac{u_\kappa^2 - u_\alpha^2}{2g},$$



Χαρακτηριστικά μεγέθη συστήματος άντλησης

- Το συνολικό ύψος της αντλίας Δh είναι η ολική προσφερόμενη ενέργεια από την αντλία στη μονάδα βάρους του ρευστού
- Το NPSH πρέπει > 0 , δηλαδή το μανομετρικό ύψος αναρροφήσεως ($h_\alpha + v_\alpha^2/2g$) πρέπει να υπερνικά το ύψος που αντιστοιχεί στην τάση ατμών του ρευστού ($P_v/\rho g$)
 - Στο σημείο ζέσεως ισχύει $P_\alpha = P_v \rightarrow \text{NPSH} = z_\alpha - h_{fa}$
 - Για $z_\alpha < 0$, δηλαδή για αναρρόφηση από στάθμη χαμηλότερη της στάθμης της αντλίας, δεν είναι δυνατή η άντληση υγρού
 - Αν το NPSH του συστήματος $< \text{NPSH}$ που απαιτεί η αντλία τότε ΣΠΗΛΑΙΩΣΗ (cavitation)

Σπηλαιώση



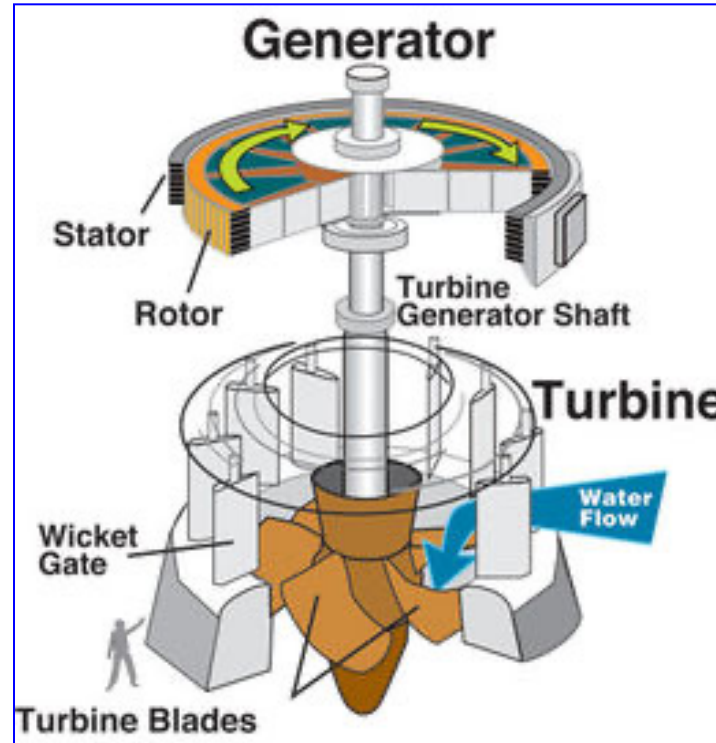
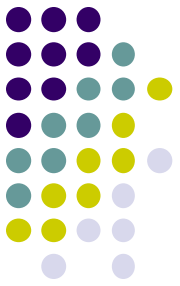
Ροή ρευστού – μείωση πίεσης μέχρι την τάση ατμών του – βρασμός – εμφάνιση φυσαλίδων – μεταφορά φυσαλίδων με το ρευστό σε περιοχές μεγαλύτερης πίεσης – σύνθλιψη φυσαλίδων – θόρυβος ή/και κραδασμοί - **ΣΠΗΛΑΙΩΣΗ**

Αν (οι φυσαλίδες) κοντά στα τοιχώματα – δημιουργία μεγάλων, τοπικών πιέσεων με αποτέλεσμα – **ΔΙΑΒΡΩΣΗ**

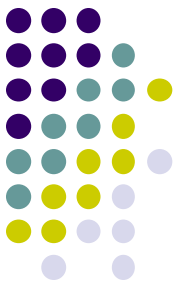
Λιγότερο συχνά εμφανίζεται στο σκέλος της κατάθλιψης (λόγω αυξημένης πίεσης) και συχνότερα στο σκέλος της αναρρόφησης, όπου (ιδιαίτερα αν η αντλία εργάζεται αντλώντας ρευστό από χαμηλότερη στάθμη η πίεση μπορεί να πέσει κάτω από την τιμή της πίεσης ατμών του ρευστού στη συγκεκριμένη θερμοκρασία.

Απώλεια μάζας έως 100 mg/2 hrs λειτουργίας (αναλόγως το υλικό, π.χ. μαλακός χάλυβας)

Σπηλαιώση



Σχήμα. Καταστροφή τουρμπίνας Francis εξαιτίας σπηλαιώσης.



Χαρακτηριστικά μεγέθη συστήματος άντλησης

- Αν $-w_s$ είναι το έργο ανά μονάδα μάζας που προσφέρεται στο ρευστό από την αντλία για μόνιμη ροή, τότε η εξίσωση ενέργειας είναι :

$$\alpha \frac{\Delta v^2}{2g} + \Delta z + \frac{\Delta P}{\gamma} + w_f + w_s = 0$$

- και ο συντελεστής μηχανικής απόδοσης:

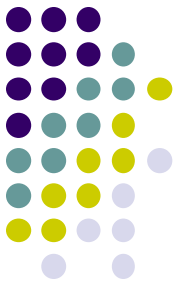
$$n = \frac{P_I = \gamma Q \Delta h}{P_P}$$

α : συντελεστής διόρθωσης κινητικής ενέργειας,

Q : ογκομετρική παροχή,

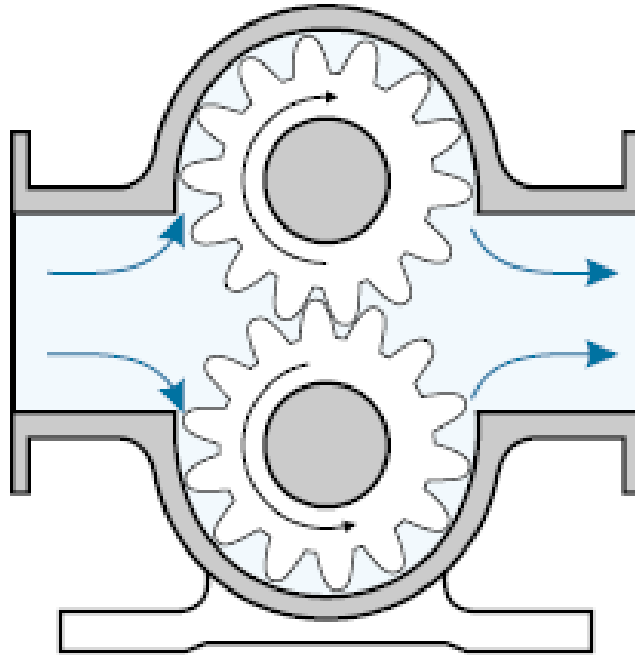
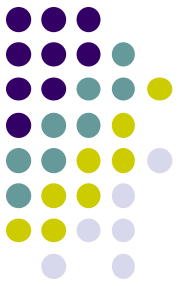
Δh : μανομετρικό ύψος αντλίας

Αντλίες - ταξινόμηση



- **Αντλίες θετικής εκτοπίσεως (positive displacement pumps)**
 - Παλινδρομικές αντλίες
 - Περιστροφικές αντλίες με οδοντωτούς τροχούς
- **Φυγοκεντρικές αντλίες (centrifugal pumps)**
- **Αντλίες αερίων**
 - Παλινδρομικού τύπου
 - Ανεμιστήρες
 - Περιστροφικοί συμπιεστές
 - Αντλίες κενού

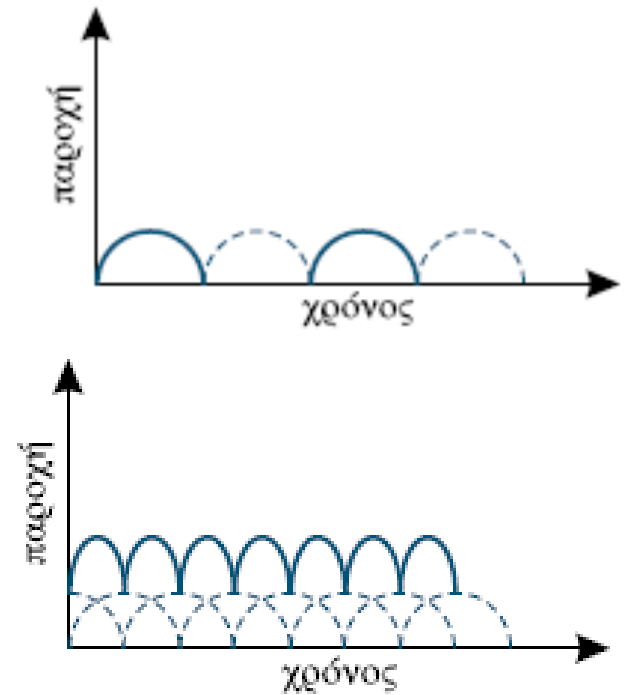
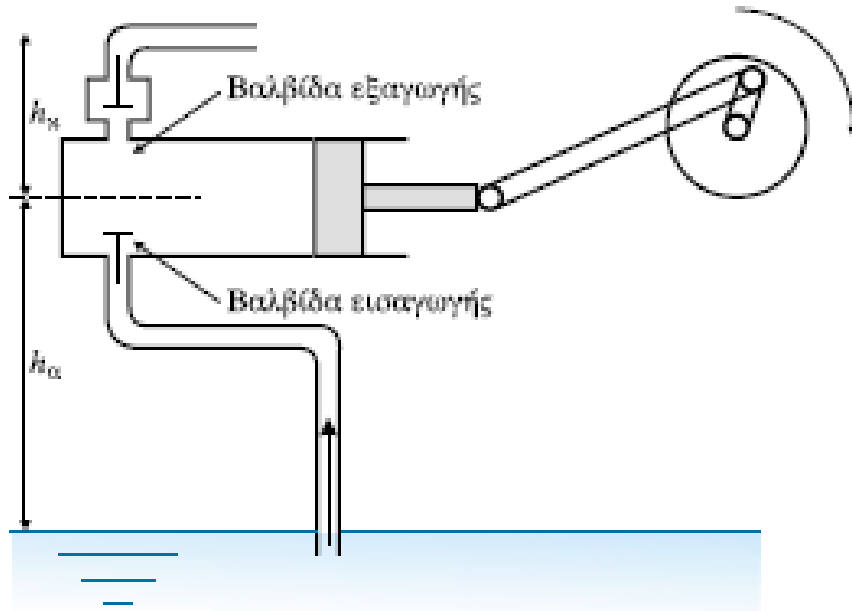
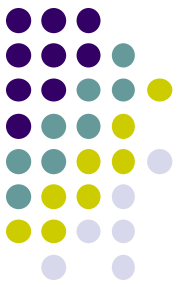
Περιστροφικές αντλίες



- Για ρευστά με υψηλό ιξώδες
- Ακατάλληλη για ρευστά με αιωρούμενα στερεά
- Αυτολίπανση

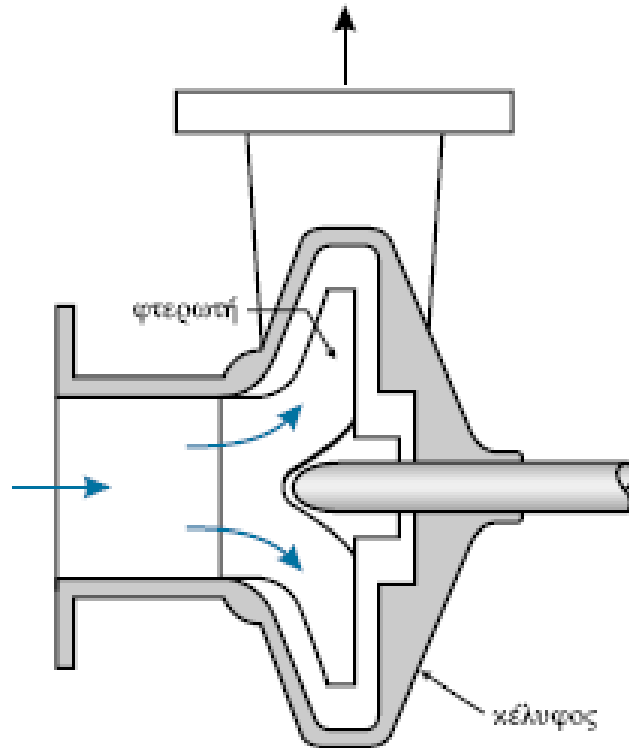
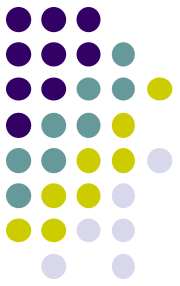
Σχήμα. Οδοντωτή αντλία

Παλινδρομικές αντλίες



Σχήμα. Παλινδρομική αντλία με έμβολο, απλής και διπλής δράσης (μηδενικός νεκρός χρόνος στην παροχή ρευστού).

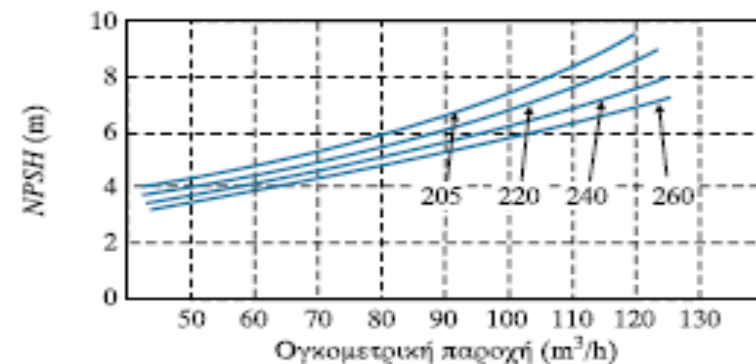
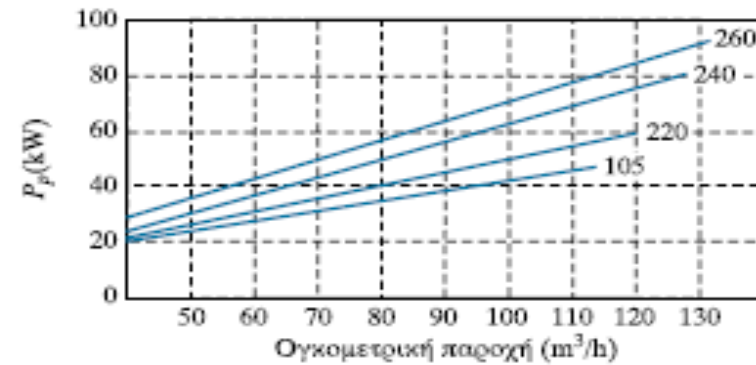
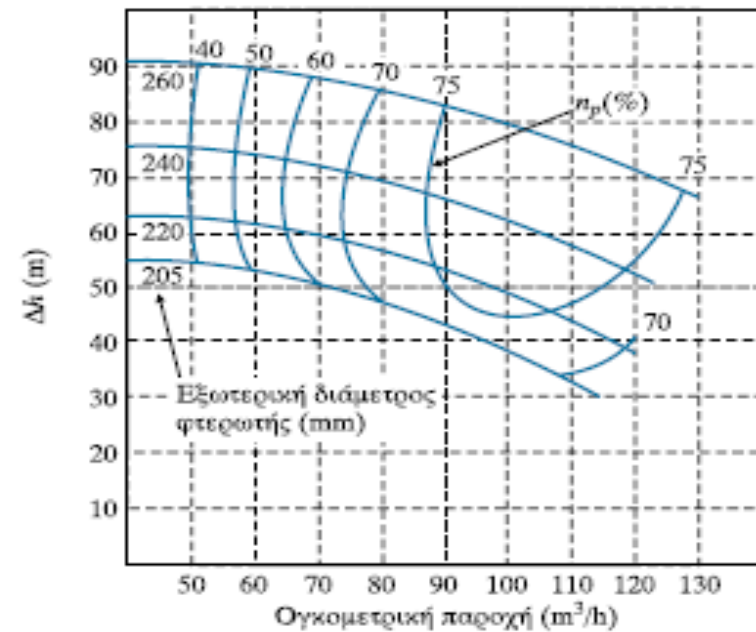
Φυγοκεντρικές αντλίες



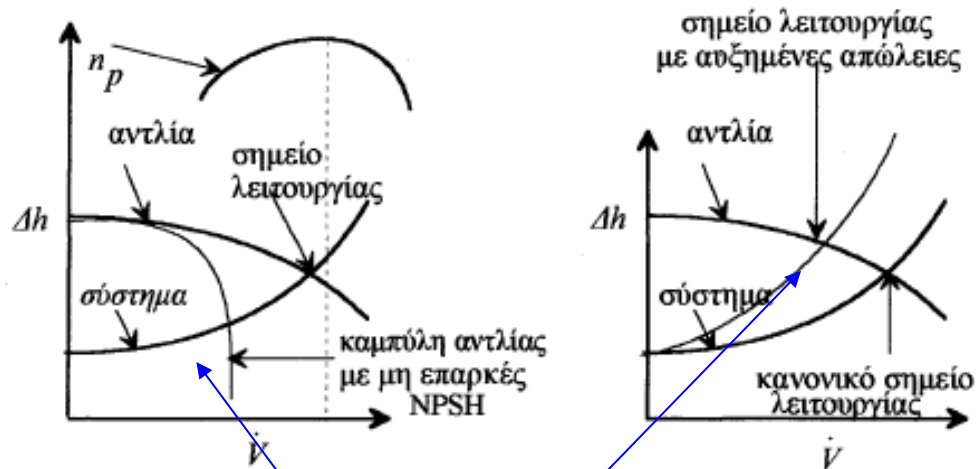
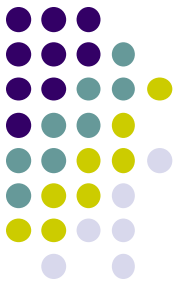
- Για μεγάλη ποικιλία ρευστών και αιωρημάτων στερεών σε υγρά
- Φτερωτές από διάφορα υλικά με ανθεκτικότητα στη διάβρωση
- Μετάδοση κινητικής ενέργειας από τη φτερωτή στο ρευστό

Φυγοκεντρικές αντλίες

Σχήμα. Καμπύλες λειτουργίας φυγοκεντρικής αντλίας με διαφορετικές φτερωτές, $N=2900\text{rpm}$



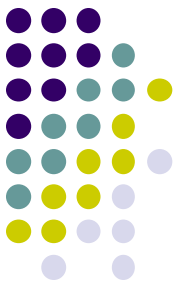
Λειτουργία φυγοκεντρικών αντλιών



Σχήμα. Καμπύλες λειτουργίας αντλίας (αριστερά), λειτουργία αντλίας με στραγγαλισμό (δεξιά)

- Οι συνολικές υδραυλικές απώλειες του **συστήματος** (σωληνώσεις, αντλίες, εξαρτήματα) $\approx Q^2$
- Με στραγγαλισμό αυξάνεται το Q και άρα και οι απώλειες και άρα η αντλία πρέπει να παρέχει μεγαλύτερο μανομετρικό ύψος

Φυγοκεντρικές αντλίες



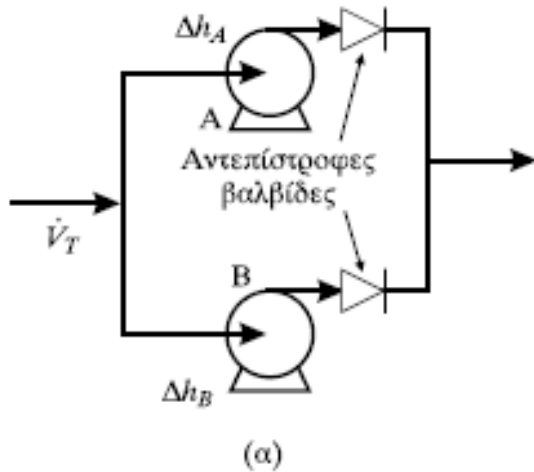
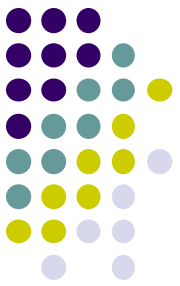
Πλεονεκτήματα

1. Είναι απλές στην κατασκευή.
2. Δεν χρησιμοποιούν βαλβίδες.
3. Λειτουργούν σε υψηλές ταχύτητες και έτσι συνδέονται άμεσα με ηλεκτρικό κινητήρα.
4. Χειρίζονται μεγάλη ποικιλία υγρών.
5. Έχουν μικρό κόστος συντήρησης.
6. Δεν καταστρέφονται αν για μικρό χρόνο παρεμποδισθεί η ροή στο σκέλος καταθλίψεως.

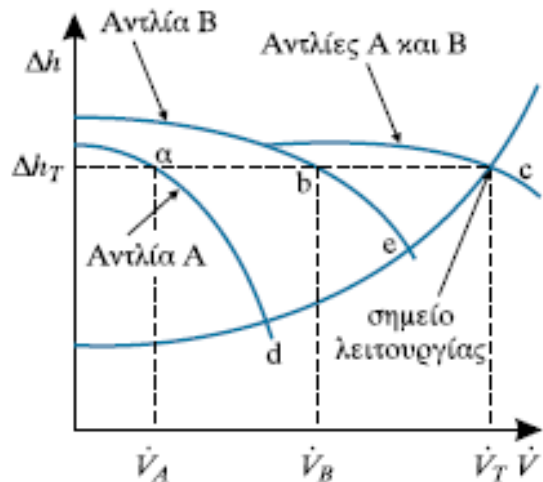
Μειονεκτήματα.

1. Δεν παρέχουν σε ένα στάδιο πολύ υψηλές πιέσεις.
2. Δεν είναι συνήθως αυτοτροφοδοτούμενες.
3. Λειτουργούν με υψηλή απόδοση μόνο σε περιορισμένο εύρος συνθηκών λειτουργίας.
4. Δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ρευστά μεγάλου ιξώδους.

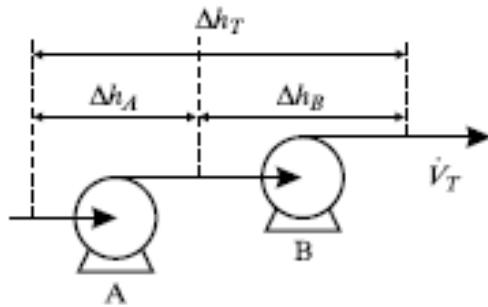
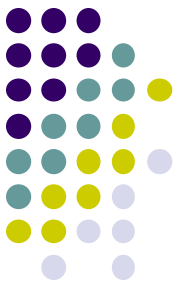
Παράλληλη σύνδεση φυγοκεντρικών αντλιών



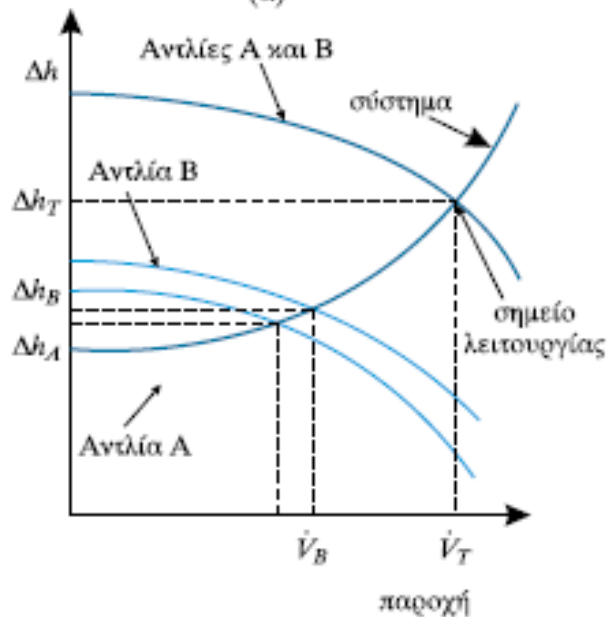
- $Q_{\text{total}} = Q_A + Q_B$
- $\Delta h_{\text{total}} = \Delta h_A = \Delta h_B$



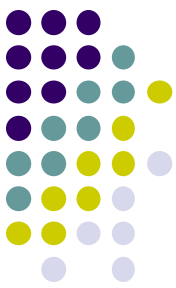
Σε σειρά σύνδεση φυγοκεντρικών αντλιών



(α)



- $Q_{\text{total}} = Q_A = Q_B$
- $\Delta h_{\text{total}} = \Delta h_A + \Delta h_B$



Νερό μεταφέρεται μεταξύ δύο δεξαμενών που έχουν διαφορά στάθμης 15 m. Οι αγωγοί μεταφοράς έχουν μήκος συνολικό $L=70$ m και διάμετρο $d=300$ mm. Ο συντελεστής τριβής είναι $f=0,025$ και ο συντελεστής δευτερευουσών απωλειών $\Sigma K=2,5$. Η εξίσωση που περιγράφει την καμπύλη της αντλίας είναι $\Delta h_p=22,9+10,7\dot{V}-111\dot{V}^2$ να βρεθεί η παροχή της αντλίας και το μανομετρικό ύψος που παρέχει εάν α) λειτουργεί μόνη της, β) συνδέεται παράλληλα με όμοιά της. Δίδονται $\rho=1000$ kg/m³.

$$\Delta h_s = (z_\kappa - z_\alpha) + \frac{p_2 - p_1}{\rho g} - \frac{u_\kappa^2 - u_\alpha^2}{2g} + \frac{8}{\pi^2 g} \left(f \frac{L_\alpha + L_\kappa}{d^5} + \frac{\Sigma K}{d^4} \right) \dot{V}^2$$

α) Από την εξίσωση (10.20) και θεωρώντας ότι στις δύο δεξαμενές η πίεση είναι ατμοσφαιρική έχουμε:

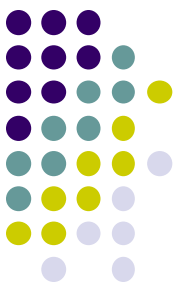
$$\Delta h_s = 15 + \frac{8}{3,14^2 \times 9,81} \left(0,025 \frac{70}{0,3^5} + \frac{2,5}{0,3^4} \right) \dot{V}^2 \Rightarrow \Delta h_s = 15 + 85\dot{V}^2$$

Στο σημείο λειτουργίας θα πρέπει το ύψος της αντλίας να είναι ίσο με το ύψος του συστήματος. Έτσι θα έχουμε:

$$15 + 85\dot{V}^2 = 22,9 + 10,7\dot{V} - 111\dot{V}^2 \Rightarrow \dot{V} = 0,23 \text{ m}^3/\text{s}$$

Συνεπώς το συνολικό μανομετρικό ύψος στο σημείο λειτουργίας είναι:

$$\Delta h = 15 + 85 \times 0,23^2 = 19,5 \text{ m}$$



Νερό μεταφέρεται μεταξύ δύο δεξαμενών που έχουν διαφορά στάθμης 15 m. Οι αγωγοί μεταφοράς έχουν μήκος συνολικό $L=70$ m και διάμετρο $d=300$ mm. Ο συντελεστής τριβής είναι $f=0,025$ και ο συντελεστής δευτερευουσών απωλειών $\Sigma K=2,5$. Η εξίσωση που περιγράφει την καμπύλη της αντλίας είναι $\Delta h_p=22,9+10,7\dot{V}-111\dot{V}^2$ να βρεθεί η παροχή της αντλίας και το μανομετρικό ύψος που παρέχει εάν α) λειτουργεί μόνη της, β) συνδέεται παράλληλα με όμοιά της. Δίδονται $\rho=1000$ kg/m³.

$$\Delta h_s = (z_k - z_a) + \frac{p_2 - p_1}{\rho g} - \frac{u_k^2 - u_a^2}{2g} + \frac{8}{\pi^2 g} \left(f \frac{L_a + L_k}{d^5} + \frac{\Sigma K}{d^4} \right) \dot{V}^2$$

β) Αν η παροχή των δύο παραλλήλων αντλιών είναι \dot{V} , τότε η κάθε μία θα έχει παροχή $\dot{V}/2$, η τιμή της οποίας θα πρέπει να ικανοποιεί την εξίσωση λειτουργίας της αντλίας. Δηλαδή:

$$\Delta h_p = 22,9 + 10,7 \frac{\dot{V}}{2} - 111 \left(\frac{\dot{V}}{2} \right)^2 \Rightarrow \Delta h_p = 22,9 + 5,35 \dot{V} - 27,75 \dot{V}^2$$

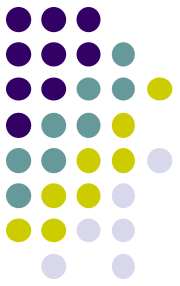
Σύμφωνα με τα προηγούμενα θα έχουμε:

$$15 + 85 \dot{V}^2 = 22,9 + 5,35 \dot{V} - 27,75 \dot{V}^2 \Rightarrow \dot{V} = 0,29 \text{ m}^3/\text{s}$$

Το μανομετρικό ύψος σε αυτή τη περίπτωση είναι:

$$\Delta h = 15 + 85 \times 0,29^2 = 22,2 \text{ m}$$

Άντληση αερίων



Μικρότερη πυκνότητα μεταφερόμενου ρευστού (αέριο)

Μεγαλύτερη πιθανότητα διαφυγής (όχι διάκενα)

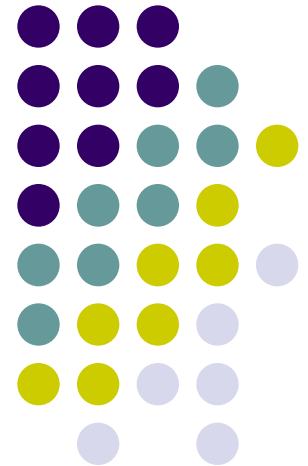
Μετατροπή ενέργειας σε θερμότητα, χρήση συστημάτων ψύξης

- **Αντλίες αερίων**

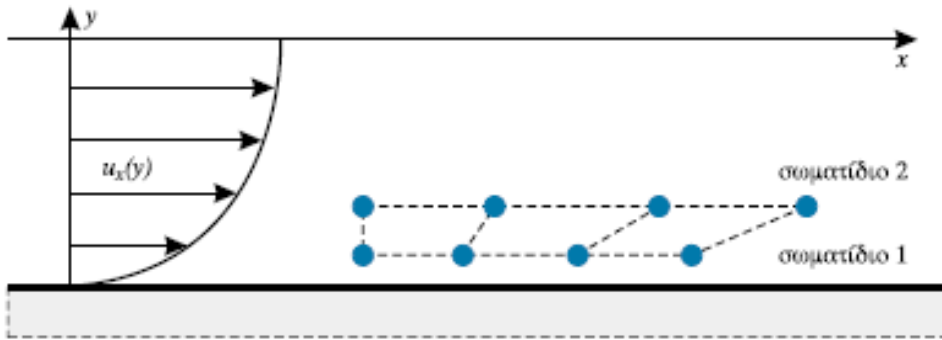
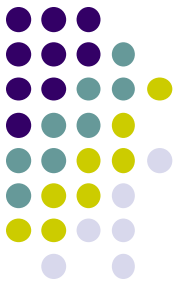
- Παλινδρομικού τύπου (ίδιες με τις αντίστοιχες των υγρών)
- Ανεμιστήρες (αξονικοί, ακτινωτοί)
- Περιστροφικοί συμπιεστές
- Αντλίες κενού (για τη δημιουργία και τη διατήρηση υποπίεσης)

Ρευστομηχανική

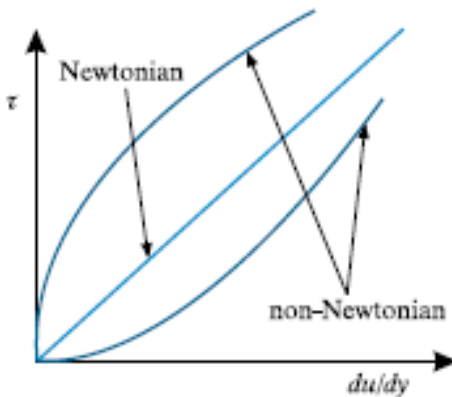
Μη Νευτώνεια ρευστά



Εισαγωγή



$$\tau = \mu \frac{du_x(y)}{dy}$$



Newtonian ρευστά: Ιξώδες **ανεξάρτητο** από το ρυθμό διάτμησης και από το χρόνο επενέργειας της διάτμησης

Μη-Newtonian ρευστά: Ιξώδες **εξαρτημένο** από το ρυθμό διάτμησης και από το χρόνο επενέργειας της διάτμησης

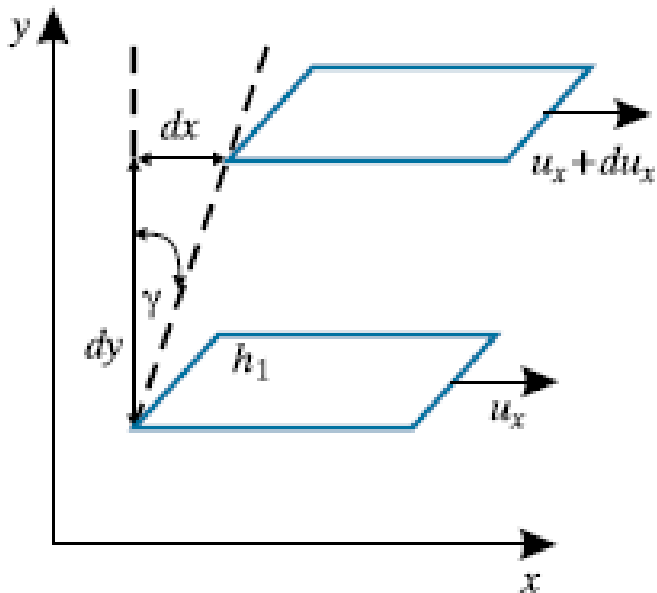


Εισαγωγή

Όπως είναι λογικό το ιξώδες έχει χάσει την φυσική του σημασία επειδή συνδέεται πάντα με έναν συγκεκριμένο ρυθμό διάτμησης. Για το λόγο αυτό εισάγεται η έννοια του φαινομένου ιξώδους μ_ϕ , το οποίο ορίζεται ως ο λόγος της δια-

τμητικής τάσης τ προς το ρυθμό διάτμησης $\frac{du_x}{dy}$.

$$\mu_\phi = \frac{\tau}{\frac{du_x}{dy}}$$



$$\frac{du_x}{dy} = \frac{d}{dy} \left(\frac{dx}{dt} \right) = \frac{d}{dt} \left(\frac{dx}{dy} \right) = \frac{d}{dt} (\tan \gamma) \cong \frac{d\gamma}{dt} = \dot{\gamma}$$

$$\Rightarrow \mu_\phi = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$$

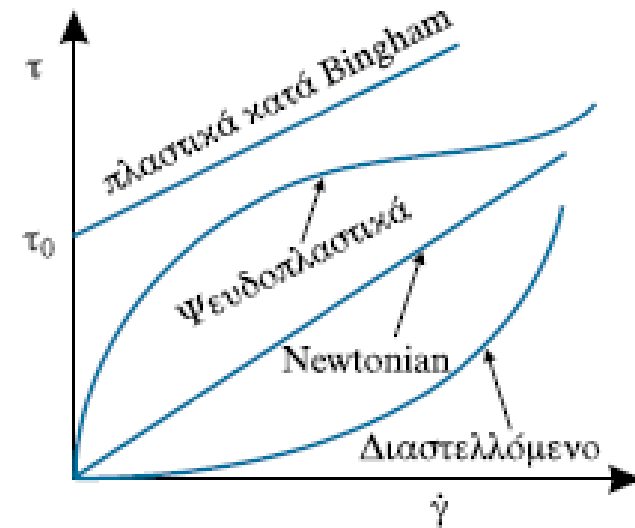
γ : γωνία ολίσθησης

Κατηγορίες Non-Newtonian ρευστών

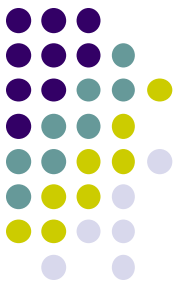


- Το ιξώδες μεταβάλλεται με το ρυθμό διάτμησης ή τη διατμητική τάση, αλλά είναι ανεξάρτητο του χρόνου $\tau = f(\dot{\gamma})$ (αν 1^ο βαθμού το ρευστό είναι Νευτώνειο)

- Ψευδοπλαστικά (*pseudoplastic*) ($\tau = k\dot{\gamma}^n$, $0 < n < 1$)
 - Για πολύ μεγάλους και πολύ μικρούς ρυθμούς διάτμησης έχουν Νευτώνεια συμπεριφορά
 - Δείκτης συνοχής, πόσο ιξώδες είναι το ρευστό, n : ποσό απόκλισης από Νευτώνεια συμπεριφορά (π.χ. λιπαντικά μηχανών, μελάνι εκτύπωσης)
- Διαστελλόμενα ή Διογκούμενα (*dilatant*) ($\tau = k\dot{\gamma}^n$, $n > 1$) (π.χ. υγρό τσιμεντοσκυρόδεμα, αιωρήματα στερεών σε υγρά)
- Πλαστικά κατά Bingham (*Bingham plastics*) ($\tau - \tau_0 = \mu_p \dot{\gamma}$)
 - Παραμόρφωση του ρευστού για $\tau < \tau_0$
 - Ροή Νευτώνεια για $\tau > \tau_0$,



Κατηγορίες Non-Newtonian ρευστών



- Το ιξώδες μεταβάλλεται (και) με το χρόνο εφαρμογής της διατμητικής τάσης, $\tau = f(\dot{\gamma}, t)$

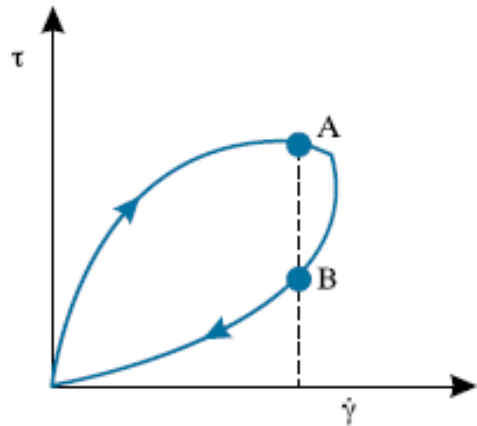
- Θιξοτροπικά (*Thixotropic*)

- Μείωση του φαινομένου ιξώδους με το χρόνο επενέργειας της διατμητικής τάσης (π.χ. χρώματα βαφής, στο κουτί μεγάλο ιξώδες για να μην αποχωρίζονται οι χρωστικές από το διαλύτη, στο ανακάτεμα-επάλειψη μείωση ιξώδους, στο στέγνωμα, αύξηση ιξώδους)

- Τα σημεία A και B αντιστοιχούν σε 2 διαφορετικές τιμές διατμητικής τάσης για τον ίδιο ρυθμό διάτμησης, αλλά και για διαφορετική διάρκεια επενέργειας της διατμητικής τάσης

- Ρεοπηκτικά (*reoplectic*)

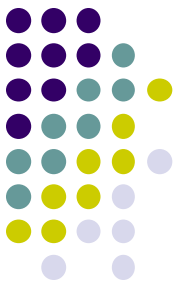
- Αντίθετη συμπεριφορά, αύξηση του φαινομένου ιξώδους με το χρόνο επενέργειας της διατμητικής τάσης (π.χ. μπετονίτης)

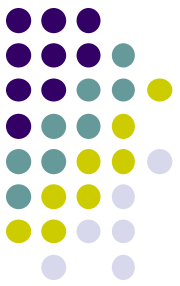


Type of fluid	Behaviour	Characteristics	Examples
Plastic solids	Perfectly plastic	Strain (παραμόρφωση) does not result in opposing stress	Ductile metals (ελατά) past the yield point (σημείο παραμόρφωσης)
	Bingham plastic	Linear relationship between shear stress (διατμητική τάση) and rate of strain once threshold shear stress exceeded	Οδοντόπαστα
	Yield pseudo-plastic	Pseudo-plastic above some threshold shear stress	Mud , some colloids , λάσπη γεωτρήσεων
	Yield dilatant	Dilatant above some threshold shear stress	
Power-law fluids (generalized Newtonian fluids)	Pseudoplastic or "shear thinning"	Apparent viscosity reduces with increasing rate of shear	Some colloids , clay , milk , gelatin , blood and liquid cement , λιπαντικά, μελάνι εκτύπωσης, κόλλα ταπετσαρίας
	Dilatant (διαστελλόμενα) or "shear thickening"	Apparent viscosity increases with increasing rate of shear	Concentrated solution of sugar in water , suspensions of rice starch or corn starch , υγρό τσιμεντοσκυρόδεμα
Viscoelastic - having both viscous and elastic properties	Maxwell material	"Series" linear combination of elastic and viscous effects	metals , composite materials
	Kelvin material	"Parallel" linear combination of elastic and viscous effects	Bitumen (άσφαλτος), dough (ζύμη), nylon , and Silly Putty (στόκος)
	Anelastic	Material returns to a well-defined "rest shape"	
Time-dependent viscosity	Rheopectic	Apparent viscosity increases with duration of stress	Some lubricants , μπετονίτης
	Thixotropic	Apparent viscosity decreases with duration of stress	Non-drip paints (χρώματα βαφής), tomato ketchup and most honey varieties.
Generalized Newtonian fluids (idealized fluid)		Stress depends on normal and shear strain rates and also the pressure applied on it	Blood , Custard (γαλακτόπιτα)

Τραγωδία του Aberfan, 1966

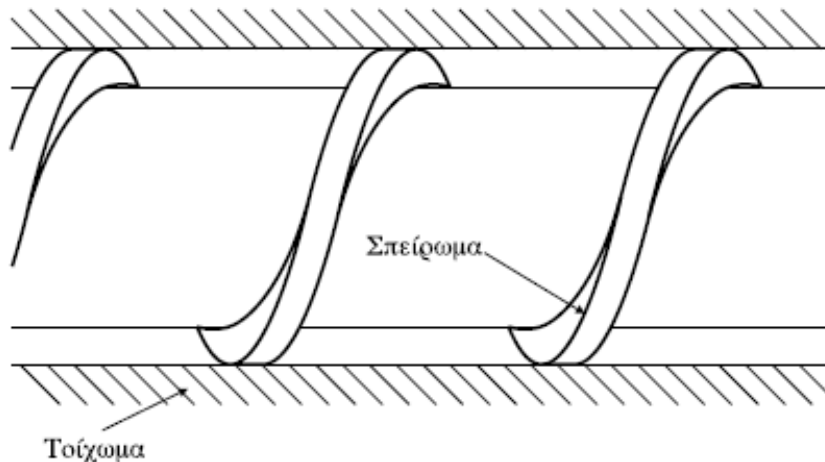
(Κατάρρευση θιξοτροπικών τελμάτων, 144 νεκροί, 114 παιδιά)





Άντληση Non-Newtonian ρευστών

Η μεταβολή του ιξώδους με την μεταβολή της διατμητικής τάσης ή και του χρόνου διάτμησης μπορεί να παίζει σημαντικό ρόλο κατά τη μεταφορά ενός non-Newtonian ρευστού. Η πτώση πίεσης κατά τη μεταφορά ενός τέτοιου ρευστού αλλά και ο τρόπος ανάμιξής του απαιτούν εγκαταστάσεις και εξαρτήματα που δεν είναι όμοια με εκείνα των Newtonian ρευστών.



Χρήση αντλιών σπειρώματος για την περίπτωση υγρών υψηλού ιξώδους (η ροή οφείλεται ακριβώς στις ιξώδεις δυνάμεις, π.χ. πολυμερή).