

**ΑΚΑΔΗΜΙΑ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ  
ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**



**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΘΕΜΑ: Σχεδίαση και κατασκευή απλών διατάξεων (μοντέλων) και μετρητικών οργάνων για μετρήσεις πτώσης πίεσης, παροχής, κλπ., στην υδατοτράπεζα.**

**ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ: Νταμάρης Χρήστος ΑΓΜ: 4965**

**Λούκα Στυλιανός ΑΓΜ: 4692**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Τσορμπατζίδης Ανέστης**

**ΝΕΑ ΜΗΧΑΝΙΩΝΑ 2016**

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Περίληψη.....	4
abstract.....	5
Πρόλογος .....	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. Γενικά για τα ρευστά .....	8
1.1 Ορισμός .....	8
1.2 Ιδιότητες των ρευστών .....	8
1.3 Τύποι ροών .....	11
1.3.1 Στρωτή ροή .....	11
1.3.2 Μεταβατική ροή .....	12
1.3.3 Τυρβώδης ροή .....	12
1.3.4 Αγωγός σταθερής διατομής.....	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ.2 Βασικές εξισώσεις ροής σε σωλήνα .....	14
2.1 Εξίσωση της συνέχειας.....	14
2.2 Εξίσωση της ενέργειας.....	15
2.3 Ροή πραγματικών ρευστών .....	16
2.3.1 Ροή σε αγωγό κυκλικής διατομής .....	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Απώλειες Ενέργειας σε Δίκτυο Σωληνώσεων .....	17
3.1 Γραμμικές απώλειες σε αγωγό σταθερής διατομής.....	18
3.2 Τοπικές απώλειες.....	18
3.2.1 Συντελεστές Απωλειών Ενέργειας σε Απότομη Διαστολή-Συστολή .....	19
3.2.2 Συντελεστές Απωλειών Ενέργειας για Βαθμιαία Διεύρυνση Αγωγού (Διαχυτές Ροής)-Βαθμιαία Συστολή Αγωγού (Ακροφύσια) .....	21
3.2.3 Συντελεστές Απωλειών Ενέργειας σε Καμπύλα Τμήματα Αγωγών .....	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Μανόμετρα τύπου U .....	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. Περιγραφή της πειραματικής διάταξης για Μετρήσεις απωλειών λόγω τριβών σε ευθύγραμμο σωλήνα .....	25
5.1 Εισαγωγή.....	25
5.2 Περιγραφή συσκευής πειράματος.....	26
5.3 Συνοπτική θεωρητική ανάλυση.....	26

5.4 Το κλασσικό πείραμα Reynolds που αναφέρεται στους τύπους ροής υγρού μέσα σε σωλήνα.....	28
5.5 Μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για το πείραμα.....	32
5.6 Προετοιμασία πειραματικής συσκευής.....	40
5.7 Πειραματική διαδικασία.....	42
5.8 Πειραματικά δεδομένα και ανάλυση.....	43
5.9 Συζήτηση-σχόλια-συμπεράσματα.....	43
Βιβλιογραφία .....	44

## Περίληψη

Το θέμα της πτυχιακής εργασίας είναι σχεδίαση και κατασκευή απλών διατάξεων (μοντέλων) και μετρητικών οργάνων για μετρήσεις πτώσης, πίεσης, παροχής, κλπ., στην υδατοτράπεζα.

Αναλυτικότερα στο πρώτο κεφάλαιο θα ανεφερθούμε στα ρευστά, τον ορισμό τους, τις ιδιότητες τους καθώς και τους τύπους ροής που έχουμε στα ρευστά. Στην συνέχεια θα αναλύσουμε την εξίσωση της ενέργειας και της συνέχειας αλλά και την πραγματική ροή των ρευστών σε αγωγό κυκλικής διατομής.

Στο δίκτυο των σωληνώσεων έχουμε απώλειες ενέργειας, τις γραμμικές και τις τοπικές, οι οποίες οφείλονται σε διάφορους συντελεστές, όπως είναι τα ακροφύσια, η καμπυλότητα των αγωγών και φυσικά η διαστολή και συστολή των αγωγών.

Στο τέλος περιγράφουμε το πείραμα πτώση πίεσης μέσα σε ευθύγραμους αγωγούς σταθερής κυκλικής διατομής (σωλήνα) , καθώς και τα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά των μοντέλων που θα χρησιμοποιηθούν μελλοντικά για πειράματα.

## Abstract

The subject of the graduation project is design and construction of simple devices (models) and measuring instruments for pressure drop measurements, delivery, etc., in water bank.

Specifically in the first chapter will be mentioned in the fluids, their definition of themselves and their flow types of properties we have in fluids. Then we will analyze the energy equation and continuity but also to the actual fluid flow in a pipeline section circular.

The network of pipes have energy losses Linear and local who due to various factors, as are the nozzles. the curvature of the pipeline and the natural expansion and contraction of the conduits.

Finally we describe the experiment referred to linear energy losses (pressure drop) of fluid flow within a circular tube ,and describe the models that can be used for experimentation in the future from other students.

## Πρόλογος

Στο παρόν εδάφιο αναλύεται ο σκοπός που έχει η μηχανική των ρευστών σε μια σειρά από φυσικά φαινόμενα:

Αναμφίβολα θα έχετε παρατηρήσει την κίνηση που κάνουν τα σύννεφα στην ατμόσφαιρα, το φτερούγισμα των πτηνών στον αέρα, τη ροή του νερού στα ποτάμια και το «σπάσιμο» των κυμάτων στα βράχια των ακτών. Φαινόμενα μηχανικής ρευστών περιλαμβάνονται σε όλες αυτές τις περιπτώσεις. Στα ρευστά κατατάσσονται τα αέρια και τα υγρά, με πιο γνωστά στοιχεία τον αέρα και το νερό. Μερικοί από τους πιο γνωστούς τομείς της ζωής μας όπου εμπλέκεται η μηχανική ρευστών είναι η ροή σε σωλήνες και ανοιχτούς αγωγούς, οι κινήσεις του αέρα και του αίματος στο σώμα μας, η αντίσταση του αέρα γνωστή ως οπισθέλξη, η άσκηση αναποπίεσης στα κτίρια, η κίνηση βλημάτων, βλύσεων, ωστικών κυμάτων, η λίπανση, η καύση, η άρδευση, η διήθηση, καθώς και η μετεωρολογία και η ωκεανογραφία.

Οι κινήσεις της υγρασίας μέσα στα εδάφη και του πετρελαίου σε γεωλογικούς σχηματισμούς αποτελούν επίσης εφαρμογές της ρευστομηχανικής. Γνώση της μηχανικής ρευστών απαιτείται για το σχεδιασμό συστημάτων υδροδότησης, εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων, φραγμάτων δικλείδων, ροόμετρων, απορροφητήρων υδραυλικών πληγμάτων και φρένων, συστημάτων αυτόματης μετάδοσης, αεροσκαφών, πλοίων, υποβρυχίων, κυματοθραυστών, μαρίνων, πυραύλων, οδηγών κίνησης δισκετών σε Η/Υ, ανεμόμυλων, στροβίλων, αντλιών συστημάτων θέρμανσης και κλιματισμού, αδρανών, τεχνητών οργάνων, και τέλος ακόμα και στοιχείων για σπορ όπως είναι μπάλες του γκολφ, τα αγωνιστικά αυτοκίνητα και τα κότερα. Είναι επομένως φανερό ότι η ζωή όλων μας επηρεάζεται από τη μηχανική ρευστών με διάφορους τρόπους. Άρα όλοι οι μηχανικοί θα πρέπει να γνωρίζουν τουλάχιστον τη βασική ρευστομηχανική.

Η μηχανική ρευστών είναι η επίσημη της μηχανικής των υγρών και των αερίων, και βασίζεται στις ίδιες θεμελιώδεις αρχές με αυτές της μηχανικής των στερεών σωμάτων. Η ρευστομηχανική είναι οπωσδήποτε δυσκολότερη, γιατί στα στερεά

σώματα έχει κανείς να κάνει με χωριστά και απτά στοιχεία, ενώ στα υγρά δεν υπάρχουν χωριστά στοιχεία για να διακρίνονται.

Η ρευστομηχανική μπορεί να διαιρεθεί σε τρεις κλάδους: στην υδροστατική η οποία ασχολείται με τη μελέτη της μηχανικής των ρευστών που βρίσκονται σε ηρεμία, στην κινηματική η οποία ασχολείται με ταχύτητες και γραμμές ροής χωρίς να ενδιαφέρεται για δυνάμεις ή ενέργεια και στη δυναμική των ρευστών η οποία ενδιαφέρεται για τις σχέσεις ταχυτήτων, επιταχύνσεων και δυνάμεων που ασκούνται από τα υγρά ή πάνω σε υγρά που κινούνται.

Η κλασική υδροδυναμική είναι κατά μεγάλο μέρος ένα μαθηματικό θέμα, επειδή ασχολείται με φανταστικά ιδανικά ρευστά όπου δεν εμφανίζεται τριβή. Τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής όπου δεν εξετάζονται όλες οι ιδιότητες των πραγματικών ρευστών, έχουν περιορισμένη πρακτική αξία.

Γι' αυτό το λόγο στο παρελθόν οι μηχανικοί είχαν στραφεί στα πειράματα και από αυτά ανέπτυξαν εμπειρικούς τύπους που έδιναν απαντήσεις σε πρακτικά προβλήματα. Όταν αναφερόμαστε σε υγρά το σύνολο αυτών των γνώσεων ονομάζεται υδραυλική.

Η εμπειρική υδραυλική περιορίστηκε κυρίως στο νερό και οριοθετήθηκε σε σκοπούς. Με τις προόδους της αεροναυτικής, της χημικής μηχανικής και της βιομηχανίας πετρελαίου, ανέκυψε η ανάγκη για μια ευρύτερη ανάπτυξη της. Αυτό έχει οδηγήσει στο συνδυασμό της κλασικής υδροδυναμικής με τη μελέτη των πραγματικών ρευστών, τόσο των υγρών όσο και των αερίων και ο συνδυασμός αποτελεί τη μηχανική ρευστών.

Στη σύγχρονη μηχανική ρευστών οι θεμελιώδεις αρχές της υδροδυναμικής συνδυάζονται με τις πειραματικές τεχνικές της υδραυλικής. Τα πειραματικά δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να επικυρώσουν τη θεωρία η για να δώσουν πληροφορίες, συμπληρωματικά στη μαθηματική ανάλυση. Το τελικό προϊόν είναι ένα ενιαίο σώμα βασικών αρχών μηχανικής ρευστών το οποίο εφαρμόζεται για την επίλυση τεχνικών προβλημάτων ροής. Με την πρόοδο των Η/Υ κατά την διάρκεια των περασμένων 25 ετών αναπτύχθηκε ο νέος κλάδος της υπολογιστικής δυναμικής ρευστών.

Σήμερα χρησιμοποιούμε διάφορους μεθόδους όπως των πεπερασμένων στοιχείων ή των συνοριακών στοιχείων για την επίλυση προχωρημένων προβλημάτων μηχανικής ρευστών.

## **Κεφάλαιο 1. Γενικά για τα ρευστά**

### **1.1 Ορισμός**

Με τον όρο ρευστά χαρακτηρίζεται μια οποιαδήποτε ουσία που παρουσιάζει ροή. Τέτοιες ουσίες είναι τα υγρά και τα αέρια ή και στερεά που βρίσκονται (τα τελευταία) σε φάση ροής. Συνεπώς ο όρος ρευστό χαρακτηρίζει συνοπτικά τα υγρά και τα αέρια σώματα των οποίων οι δυνάμεις συνοχής είναι χαλαρές με συνέπεια η μάζα τους να ολισθαίνει ελεύθερα (περίπτωση υγρών) ή να μετατοπίζεται ανεξάρτητα (περίπτωση αερίων) έτσι ώστε να λαμβάνει κάθε φορά το σχήμα του χώρου που καταλαμβάνουν ή του μέσου δια του οποίου κινούνται αυτά. Συνεπώς ρευστά ονομάζονται τα σώματα εκείνα που υφίστανται διατμητική τάση, δεν παραμένουν σε κατάσταση στατικής ισορροπίας (αλλά οι στοιχειώδεις μάζες ολισθαίνουν στα υποκείμενα στρώματα του σώματος).

### **1.2 Ιδιότητες των ρευστών**

**Πίεση ή Τάση:** Πίεση χαρακτηρίζεται η δύναμη που ασκείται στη μονάδα της επιφάνειας ενός υλικού και ορίζεται ως το πηλίκο της ασκούμενης δύναμης που δρα σε μία επιφάνεια δια του εμβαδού της επιφάνειας αυτής. Γενικά η πίεση σε πεδία βαρύτητας, εξαρτάται από το ύψος, το ειδικό βάρος και την ενεργειακή κατάσταση του ρευστού. Η Πίεση εξαρτάται από το μέγεθος της ασκούμενης δύναμης και από το εμβαδό της επιφάνειας στην οποία και ασκείται. Όσο μεγαλύτερη είναι η επιφάνεια τόσο μικρότερη γίνεται η πίεση. Η Πίεση συμβολίζεται δια του λατινικού γράμματος P και είναι  $P=F/S$  (όπου F= δύναμης και S= επιφάνεια) (π.χ. Πίεση P 15 BAR = 15kg/cm<sup>2</sup>).



**Θερμοκρασία:** 9 Σε συνδυασμό με την πίεση καθορίζει την φυσική κατάσταση του ρευστού. Η θερμοκρασία επηρεάζει και πολλές άλλες ιδιότητες των ρευστών (πυκνότητα, ιξώδες, τάση ατμών κλπ).

**Διατμητική τάση:** Διατμητική τάση είναι η δύναμη που συνηθέστερα παραμορφώνει τα ρευστά, στη ροή τους, ανεξάρτητα το πόσο μικρή μπορεί να είναι. Ως διατμητική τάση χαρακτηρίζεται το πηλίκο της παράλληλης ή εφαπτομενικής δύναμης που εφαρμόζεται σε μια επιφάνεια ρευστού, προς το εμβαδόν της επιφάνειας αυτής. Συμβολίζεται δε με το ελληνικό μικρόγραμμα  $\tau$  (ταυ). Συνέπεια του παραπάνω ορισμού είναι ότι κάθε ρευστό (υγρό ή αέριο) που βρίσκεται σε ισορροπία δε δέχεται διατμητική τάση. Η Διατμητική τάση εφαρμόζεται εφαπτομενικά σε αντίθεση με την πίεση που εφαρμόζεται κάθετα στην επιφάνεια του ρευστού. Τύπος:  $\tau = F / A$ , όπου  $F$  η παράλληλη συνιστώσα της δύναμης εφαρμογής και  $A$  η επιφάνεια εφαρμογής του ρευστού.

**Ιξώδες:** Με τον όρο ιξώδες στη Χημεία και στη Φυσική χαρακτηρίζεται μία από τις ιδιότητες της ύλης, ιδίως των υγρών αλλά και των αερίων, και συγκεκριμένα η αντίσταση που παρουσιάζουν κατά τη ροή τους. Για παράδειγμα, διαφορετικά ρέουν το μέλι, το λάδι και το νερό. Η αντίσταση αυτή που παρουσιάζουν τα ρευστά οφείλεται στις εσωτερικές τριβές των μορίων τους από δυνάμεις συνοχής, σε βαθμό που το ίδιο το ιξώδες  $\nu$  αποτελεί μέτρο αντίστασης του υγρού στη ροή και που εξετάζεται ιδιαίτερα από την Υδροδυναμική.

**Επιφανειακή τάση:** Επιφανειακή τάση χαρακτηρίζεται μία από τις ιδιότητες της ύλης η οποία και είναι δύναμη που παρατηρείται ως φυσικό φαινόμενο στην επιφάνεια των υγρών. Τα μόρια στην επιφάνεια των υγρών φέρονται ως μη δεκτικά εξωτερικών δυνάμεων, από υπερκείμενα μόρια, με συνέπεια να έλκονται μεταξύ τους και προς το εσωτερικό της υγρής μάζας, από δυνάμεις συνοχής. Συνέπεια αυτού είναι να δημιουργείται μια συνισταμένη δύναμη, τάση, που και ονομάζεται επιφανειακή τάση. Συνεπώς επιφανειακή τάση καλείται η δύναμη ανά μονάδα μήκους που ασκεί η επιφανειακή μεμβράνη όπου  $\sigma = F/L$  (N/m).

**Συνοχή:** Οι δυνάμεις συνοχής είναι εκείνες που συγκρατούν συνδεδεμένα τα μόρια των ουσιών όπου στα στερεά είναι ισχυρότερες, στα ρευστά ασθενέστερες και

ειδικότερα στα αέρια ακόμη πιο ασθενέστερες, όπου και τελικά χάριν αυτών διακρίνονται οι παραπάνω μορφές της ύλης ή η κατάσταση της ύλης.

**Συνάφεια:** Οι ελκτικές δυνάμεις συνάφειας αναπτύσσονται σε μικρή ακτίνα δράσης, ενώ η έντασή τους μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με τη φύση των υλικών.

**Συμπιεστότητα:** Απόλυτα ασυμπίεστο ρευστό (πλήρης έλλειψη ελαστικότητας) δεν υπάρχει συμπιεστότητα καλείται ο λόγος της σχετικής μείωσης του όγκου του ρευστού προς την αύξηση της πίεσης που προκάλεσε την μείωση του όγκου.

**Τάση ατμών:** Τάση ατμών ενός υγρού (ή στερεού), σώματος σε μία ορισμένη θερμοκρασία, ονομάζεται η πίεση των ατμών του σώματος όταν ατμοί και υγρό (ή ατμοί και στερεό) βρίσκονται σε ισορροπία στη θερμοκρασία αυτή.

#### **Πυκνότητα, ειδικό βάρος, ειδικός όγκος και σχετική πυκνότητα**

**Πυκνότητα  $\rho$**  ενός ρευστού είναι η μάζα του ανά μονάδα όγκου, ενώ ειδικό βάρος είναι το βάρος ανά μονάδα όγκου. Η πυκνότητα  $\rho$  μετριέται σε:  $\text{gr/cm}^3$

**Το ειδικό βάρος  $\gamma$**  παριστάνει τη δύναμη που ασκείται από τη μαζική έλξη σε ένα μοναδιαίο όγκο ρευστού και μετριέται σε:  $\text{gr/cm}^3$  ή  $\text{ton/m}^3$

Η πυκνότητα και το ειδικό βάρος ενός ρευστού σχετίζονται ως εξής:

$$\rho = \gamma/g \text{ ή } \gamma = \rho g$$

επειδή οι εξισώσεις αυτές της φυσικής είναι διαστασιολογικά ομοιογενείς, οι διαστάσεις της πυκνότητας είναι:

$$\rho = \gamma/g = (\text{lb/ft}^3) / \text{ft/sec}^2 = (\text{lb} \cdot \text{sec}^2) / \text{ft}^4 = \text{μάζα} / \text{όγκος} = \text{slugs/ft}^3$$

σε μονάδες SI:

$$\rho = (\text{N/m}^3) / \text{m/sec}^2 = (\text{N} \cdot \text{sec}^2) / \text{m}^4 = \text{μάζα} / \text{όγκος} = \text{kg/m}^3$$

Να σημειώσουμε εδώ ότι η πυκνότητα  $\rho$  είναι απόλυτη επειδή εξαρτάται από τη μάζα που είναι ανεξάρτητη από τη θέση στο χώρο. Εξάλλου το ειδικό βάρος  $\gamma$  δεν είναι απόλυτο μέγεθος γιατί εξαρτάται από την τιμή της έντασης του ελκτικού πεδίου, δηλαδή την επιτάχυνση  $g$  η οποία μεταβάλλεται μαζί με την θέση, πρωταρχικά με το γεωγραφικό πλάτος και το υψόμετρο υπεράνω της θάλασσας.

**Ειδικός όγκος  $u$**  είναι ο όγκος που καταλαμβάνει η μονάδα μάζας του ρευστού. Χρησιμοποιείται συνήθως για τα αέρια και συνήθως εκφράζεται σε: ft<sup>3</sup> /slug (m<sup>3</sup> /kg σε SI)

Ο ειδικός όγκος είναι το αντίστροφο της πυκνότητας. Έτσι:  $u = 1/\rho$

Σχετική πυκνότητα  $s$  ενός υγρού είναι ο αδιάστατος λόγος

**Συγρού = υγρού / νερού στην τυπ. θερμοκρασία**

της πυκνότητας του ως προς την πυκνότητα του καθαρού νερού, σε μια σταθερή δεδομένη θερμοκρασία. Οι φυσικοί χρησιμοποιούν τους 40 C (39,2 O F) σαν τη σταθερά αυτή, αλλά οι μηχανικοί συχνά χρησιμοποιούν τους 15,50 C (60 O F). Η πυκνότητα του νερού στους 40 C είναι 1,00 g/cm<sup>3</sup> , (1.00g/ml)<sup>2</sup> ισοδύναμη με 1000Kg/m<sup>3</sup> . επομένως η σχετική πυκνότητα έχει την ίδια αριθμητική τιμή για ένα υγρό με την πυκνότητα του εκφρασμένη σε g/mL ή Mg/m<sup>3</sup> . Η σχετική πυκνότητα ενός αερίου είναι ο λόγος της πυκνότητας του προς την πυκνότητα είτε του υδρογόνου, είτε του αέρα, σε κάποια συγκεκριμένη θερμοκρασία και πίεση, αλλά δεν υπάρχει γενική συμφωνία για αυτές, και έτσι πρέπει να δηλώνονται επεξηγηματικά σε κάθε περίπτωση. Επειδή η πυκνότητα των ρευστών μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία, οι σχετικές πυκνότητες πρέπει να καθορίζονται και να αναφέρονται σε χωριστές θερμοκρασίες.

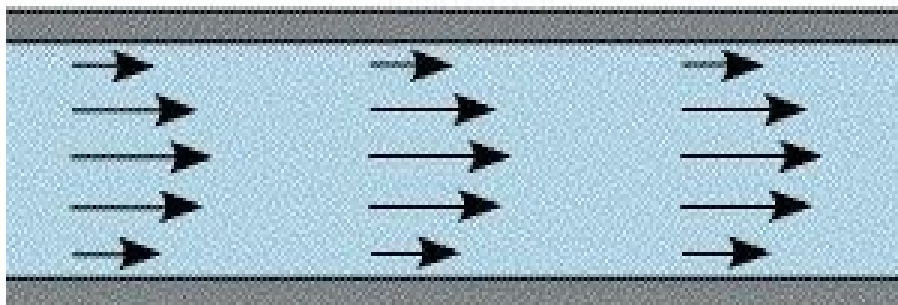
### **1.3 Τύποι των ροών**

Ροή (flow) ενός ρευστού ονομάζεται η κίνηση των σωματιδίων του ρευστού. Προκαλείται από διατμητικές τάσεις καθώς και από κάθετες τάσεις (πιέσεις) που

ασκούνται στο ρευστό. Υπάρχουν 3 μορφές ροής, η στρωτή ροή, η ενδιάμεση ή μεταβατική ροή και η τυρβώδης ροή.

### **1.3.1 Στρωτή ροή**

Κατά την ομαλή ροή ή στρωτή ροή ή παράλληλη ροή το ρευστό ρέει σε παράλληλες προς τον άξονα του αγωγού γραμμές δίνοντας έτσι την εικόνα της ομαλής ή στρωτής ροής. Συνήθης εικόνα00 παράλληλης ροής είναι εκείνη του νερού από τις βρύσες.



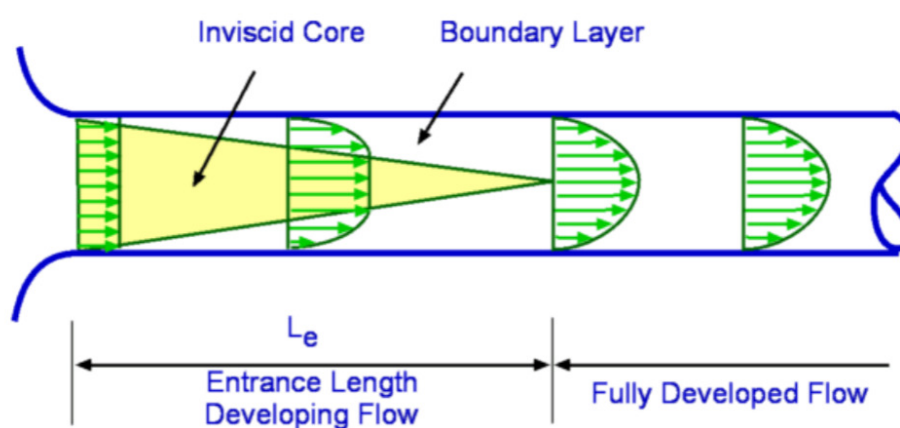
### **1.3.2 Μεταβατική ροή**

Η μεταβατική ροή (transitional flow) είναι το στάδιο ανάμεσα στην στρωτή και την τυρβώδη ροή.

### **1.3.3 Τυρβώδης ροή**

Κατά τη στροβιλώδη ροή, ή στροβιλοειδή ροή, ή τυρβώδη ροή οι γραμμές ροής του ρευστού λαμβάνουν μορφή ακανόνιστων καμπυλών οι οποίες τέμνουν συνεχώς αλλήλους, δίνοντας έτσι την εικόνα ροής με στροβιλισμούς. Εικόνες τυρβώδους ροής μας παρέχουν οι ποταμοί όταν παρουσιάζουν στροβίλους που μπορεί να οφείλονται σε υποκείμενα ρεύματα, σε τριβές σε βραχώδεις όχθες ή σε πετρώματα του βυθού ή σε απότομη στένωση του πλάτους τους. 11 Βασικό χαρακτηριστικό που διαχωρίζει τα δύο αυτά είδη, είναι η ύπαρξη ή μη στροβιλισμών. Στη στρωτή ροή δεν υπάρχουν, ενώ αποτελούν το

χαρακτηριστικό γνώρισμα της τυρβώδους. Το αν η ροή ενός υγρού σε κλειστό κυλινδρικό αγωγό είναι στρωτή ή τυρβώδης, καθορίζεται, από τον αδιάστατο αριθμό Reynolds:  $Re = V d / \nu$  όπου:  $\nu$  η ταχύτητα του υγρού,  $d$  η διάμετρος του σωλήνα και  $\nu$  το κινηματικό ιξώδες. Για τιμές του αριθμού Reynolds μικρότερες του 2100 ( $Re < 2100$ ), η ροή είναι στρωτή. Ακολουθεί μια κρίσιμη περιοχή στην οποία η ροή μετατρέπεται σταδιακά σε τυρβώδη ( $2100 < Re < 4000$  περίπου). Για μεγαλύτερες τιμές του  $Re$  ( $Re > 4000$ ) η ροή είναι τυρβώδης.



### 1.3.4 Αγωγός σταθερής διατομής

Σε κάθε κλειστό αγωγό που έχει σταθερή εσωτερική διατομή, παρουσιάζονται πτώσεις πίεσης λόγω των τριβών. Αυτές οι πτώσεις πίεσης εξαρτώνται από τη φύση του ρευστού, την ταχύτητά του και από τα κατασκευαστικά στοιχεία του αγωγού (μήκος, διάμετρος, τραχύτητα, κλπ) και δίνονται από τον τύπο:

$$\text{όπου: } hf = f \times L/D \times V^2/2g$$

- $f$  : ο συντελεστής τριβής
- $l$  : το μήκος του αγωγού

- $d$  : η εσωτερική διάμετρος του αγωγού
- $\rho\nu$  : η πυκνότητα του ρευστού
- $u$  : η ταχύτητα του ρευστού

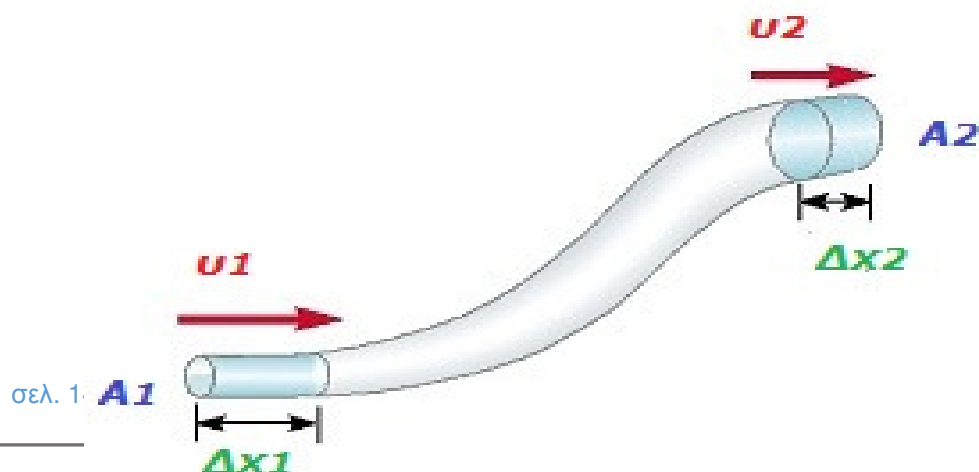
Η τραχύτητα (roughness) ενός αγωγού είναι ένα μέτρο παρέκκλισης του πραγματικού τοιχώματος από το ιδεατό. Μετριέται είτε ως απόλυτη σε mm είτε ως σχετική τραχύτητα (relative roughness) ως προς τη διάμετρο

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Βασικές εξισώσεις ροής σε σωλήνα

Η μελέτη της σταθερής ροής ασυμπίεστων ρευστών σε αγωγούς, βασίζεται στους δύο νόμους διατηρήσεως: Το νόμο διατηρήσεως της μάζας που εκφράζεται με την (εξίσωση συνέχειας) και το νόμο διατηρήσεως της ενέργειας που εκφράζεται με την (εξίσωση Bernoulli).

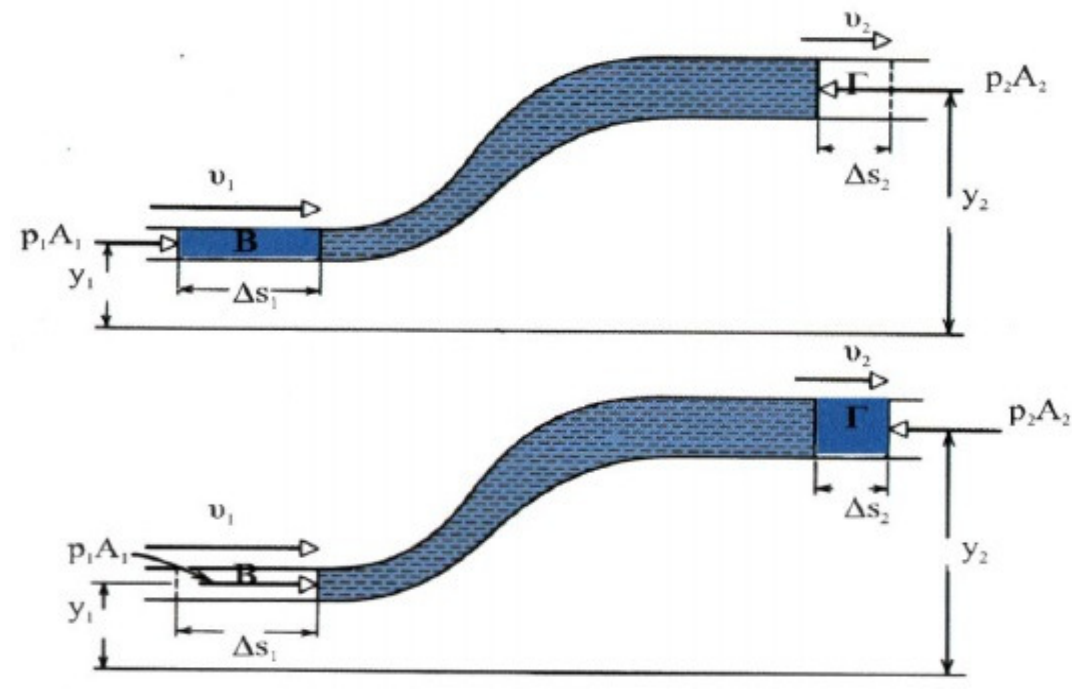
### 2.1 Εξίσωση της συνέχειας

Σε μόνιμη ροή ασυμπίεστου ρευστού σε αγωγό, η παροχή όγκου  $Q$  είναι σταθερή σε οποιαδήποτε διατομή του αγωγού:  $Q = A_i \cdot v_i = \text{σταθ}$ . Επομένως η σχέση καθορίζει ότι : όταν η διατομή αυξάνεται τότε η ταχύτητα του υγρού ελαττώνεται και αντίστροφα, έτσι ώστε το γινόμενο διατομής επί ταχύτητα να παραμένει πάντοτε το ίδιο και ίσο προς τη σταθερή παροχή του αγωγού. Ο νόμος αυτός έχει εφαρμογή στην κατασκευή δικτύων και διακλαδώσεων τους όπου παρεμβάλλονται συστολές ή διαστολές στις σωληνώσεις.



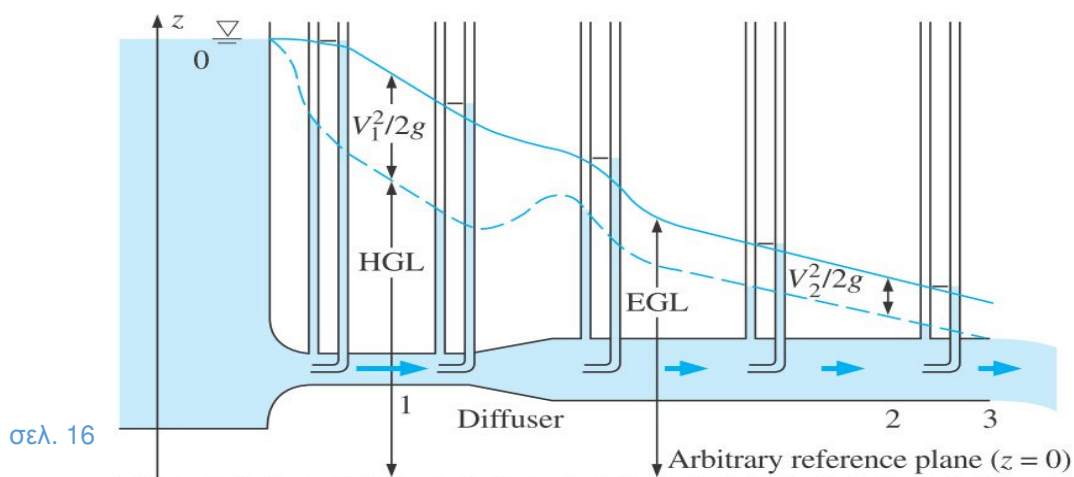
## 2.2 Εξίσωση της ενέργειας

Η σχέση αυτή ισχύει για οποιοδήποτε ζεύγος σημείων άρα μπορεί να γραφτεί και με τη μορφή  $\{\rho + 1/2\rho v^2 + \rho gy = \text{σταθερό}\}$  Η παραπάνω σχέση είναι η εξίσωση του Bernoulli για ιδανικό ρευστό. Από την εξίσωση του Bernoulli προκύπτει ότι το άθροισμα της πίεσης ( $p$ ), της κινητικής ενέργειας ανά μονάδα όγκου ( $1/2 \rho v^2$ ) και της δυναμικής ενέργειας ανά μονάδα όγκου ( $\rho gy$ ) έχει την ίδια σταθερή τιμή σε οποιοδήποτε σημείο της ρευματικής γραμμής. Η εξίσωση του Bernoulli αποτελεί έκφραση της αρχής διατήρησης της ενέργειας στη ροή των ρευστών.



### 2.3. Ροή πραγματικών ρευστών

Αντίθετα απ' ότι δέχεται κανείς για τα ιδανικά ρευστά, στα πραγματικά ρευστά κυριαρχούν δυνάμεις συνοχής ανάμεσα στα επιμέρους στρώματα του ρευστού και δυνάμεις συνάφειας ανάμεσα στο ρευστό και στα τοιχώματα του δοχείου, με αποτέλεσμα αυτές να καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την ροή του ρευστού. Είναι το δοχείο μέσα στο οποίο κινείται το ρευστό ένας σωλήνας κυκλικής διατομής, τότε η ταχύτητα του ρευστού έχει μέγιστη τιμή στον άξονα του σωλήνα και μηδενική τιμή στα στρώματα του ρευστού που εφάπτονται με τα τοιχώματά του. Για σχετικά μικρές ταχύτητες μπορεί κανείς να θεωρήσει, ότι νοητοί κυλινδρικοί όγκοι του ρευστού, αυξανόμενης ακτίνας από τον άξονα προς την περιφέρεια, γλιστρούν ο ένας μέσα 13 στον άλλον χωρίς να δημιουργούνται δίνες, ενώ ανάμεσα στις επιφάνειές τους αναπτύσσονται δυνάμεις τριβής. Η ροή αυτή ονομάζεται στρωτή ή νηματοειδής, στον βαθμό που οι ρευματοειδείς γραμμές που την περιγράφουν είναι μεταξύ τους παράλληλες. Στην περίπτωση της τυρβώδους ροής, δηλαδή όταν η ταχύτητα ροής είναι μεγάλη η απώλεια φορτίου εξαρτάται τόσο από τον αριθμό  $Re$  όσο και από την τραχύτητα των εσωτερικών τοιχωμάτων του σωλήνα.





### **2.3.1. Ροή σε αγωγό κυκλικής διατομής**

#### **Αντικείμενο και σκοπός του πειράματος**

Η πειραματική εργασία περιλαμβάνει τρία διαφορετικά πειράματα που έχουν σκοπό:

1. Μέτρηση απωλειών πίεσης σε αγωγό κυκλικής διατομής.
2. Εύρεση της κατανομής της ταχύτητας σε διάφορες διατομές.
3. Εύρεση του συντελεστή τριβής.

Ο σκοπός των πειραμάτων είναι να υπολογιστούν τα παραπάνω μεγέθη με μετρήσεις στο Εργαστήριο Ρευστομηχανικής και να συγκριθούν οι τιμές με τις αντίστοιχες θεωρητικές για επαλήθευση. Η γνώση των απωλειών πίεσης σε μια εγκατάσταση είναι αναγκαία για τη σωστή λειτουργία του συστήματος, (ειδικά σε εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούνται αγωγοί μεγάλου μήκους, με διακλαδώσεις και καμπύλα τμήματα ή άλλα εξαρτήματα). Σε μια τέτοια εγκατάσταση, ρευστό ευρισκόμενο υπό συγκεκριμένες συνθήκες (πίεση – ταχύτητα), πρέπει να μεταφερθεί σε κάποιους άλλους χώρους σε κάποιες άλλες συνθήκες.

Σκοπός είναι μελετώντας τη ροή του ρευστού να υπολογιστεί το αναγκαίο ποσό ενέργειας που θα πρέπει να έχει το ρευστό ώστε να υπερνικήσει τις απώλειες ενέργειας κατά τη ροή του και τέλος να έχει και τις προκαθορισμένες συνθήκες πίεσης και ταχύτητας

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Απώλειες Ενέργειας σε Δίκτυο Σωληνώσεων**

Ένα δίκτυο σωληνώσεων μεταφοράς ρευστών περιέχει εκτός των αγωγών και εξαρτήματα όπως:

- Εξαρτήματα αλλαγής διεύθυνσης (γωνίες-elbows)
- Εξαρτήματα σύνδεσης αγωγών (joints)
- Βαλβίδες (valves)

- Εξαρτήματα Διαστολής-Συστολής αγωγών
- Στόμια Εισόδου-Εξόδου Ροής

Η κυριότερη μέθοδος υπολογισμού των δευτερευουσών απωλειών στα διάφορα εξαρτήματα του δικτύου είναι η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ

$$h_{f, \text{εξάρτημα}} = K \frac{V^2}{2g}$$

$K$  = Συντελεστής απωλειών εξαρτήματος

### 3.1 Γραμμικές απώλειες σε αγωγό σταθερής διατομής.

Οι γραμμικές απώλειες είναι ανάλογες του τετραγώνου της ταχύτητας της ροής. Η παροχή  $Q$ , είτε μετράται με την μέθοδο όγκου-χρόνου, είτε αναγνώνεται απευθείας. Καί στις δύο περιπτώσεις, από την παροχή εξάγεται η ταχύτητα

$$U=Q/A$$

Οι απώλειες μετρώνται είτε σε cm στήλης νερού (mmH<sub>2</sub>O), είτε σε cm στήλης Υδραργύρου (mmHg). Στη δεύτερη περίπτωση, μετατρέπονται σε mmH<sub>2</sub>O, πολλαπλασιαζόμενα με το ειδικό βάρος του Υδραργύρου.

Στη συνέχεια, η εξίσωση Darcy-Weisbach που περιγράφει τις γραμμικές απώλειες:

$$\text{ΤΥΠΟΣ: } \Delta h = f \times L/D \times U^2/2g$$

### 3.2 Τοπικές απώλειες

Οι τοπικές απώλειες οφείλονται σε μεταβολές της γεωμετρίας της ροής. Στις αλλαγές αυτές η ροή παύει τοπικά να είναι ομοιόμορφη και δημιουργούνται συχνά στρόβιλοι

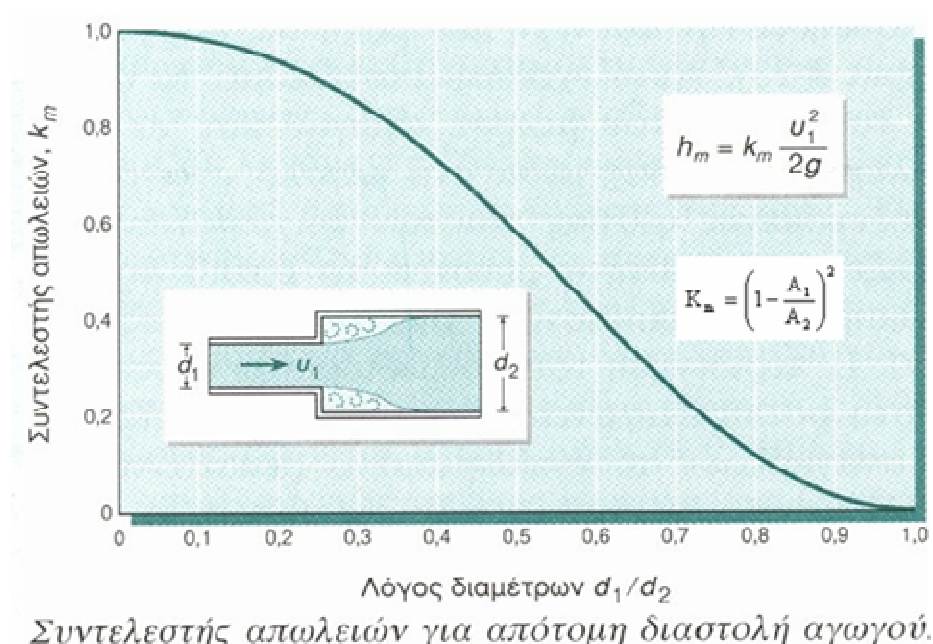
απορρόφησης ενέργεια. Οι τοπικές απώλειες αυξάνονται με το μέγεθος των δημιουργούμενων στροβίλων (περιοχών ανακυκλοφορίας της ροής).

Οι τοπικές απώλειες υπολογίζονται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\text{ΤΥΠΟΣ: } h_m = K \times V^2 / 2g$$

όπου  $k$  είναι ο συντελεστής τοπικών απωλειών, ο οποίος εξαρτάται από το είδος της ροής (κυρίως τον  $Re$ ) και τη γεωμετρία μεταβολής της ροής. Στις πρακτικές περιπτώσεις της πλήρως τυρβώδους ροής ο συντελεστής  $k$  εξαρτάται μόνο από τη γεωμετρία.

### 3.2.1 Συντελεστές Απώλειες Ενέργειας σε Απότομη Διαστολή-Συστολή

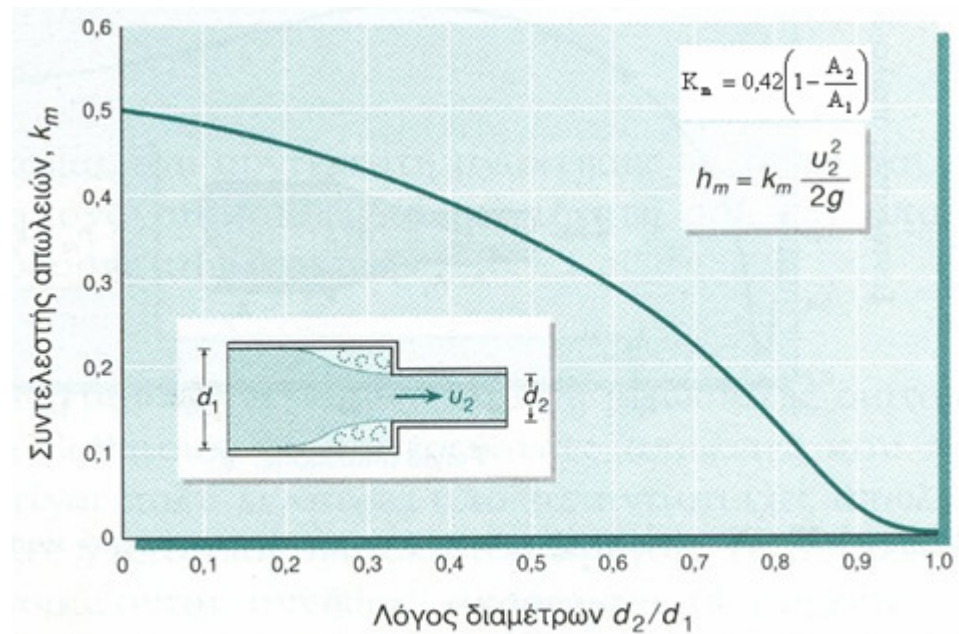


#### Απότομη Διαστολή

$$h_{f, \text{εξάρτημα}} = K \frac{V_{\mu,1}^2}{2g}$$

σελ. 19

$$K = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2$$



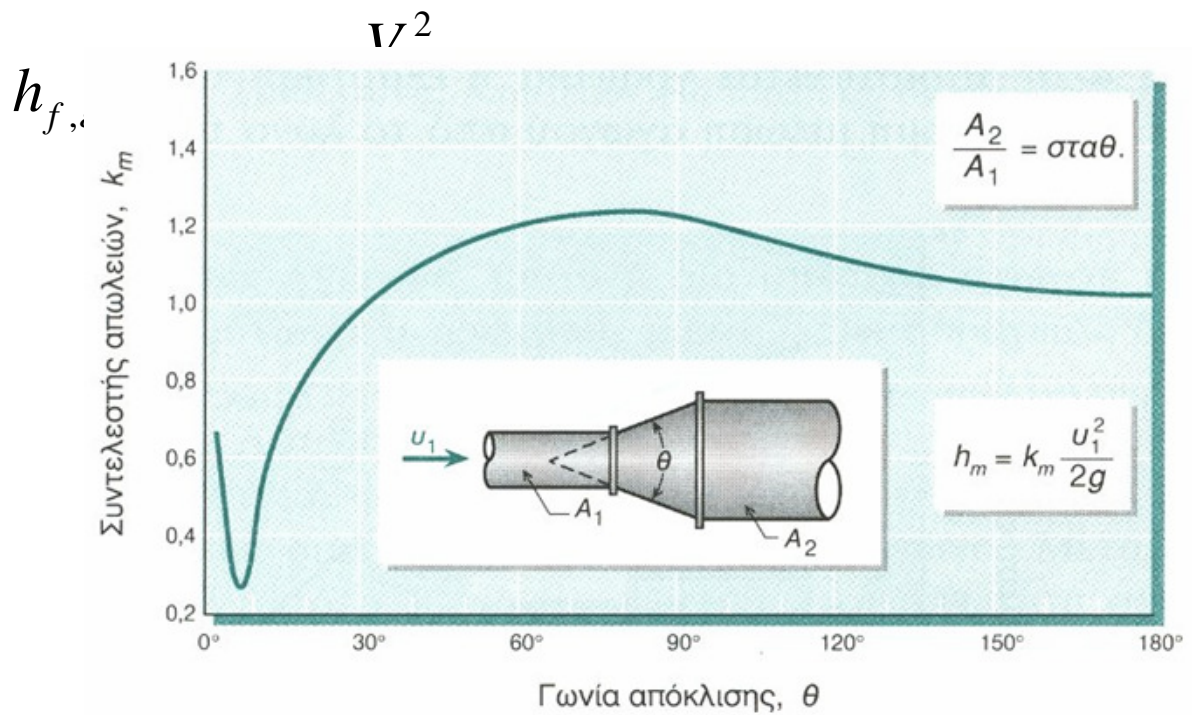
Συντελεστής απωλειών για απότομη συστολή αγωγού

### Απότομη Συστολή

$$h_{f, \text{εξάρτημα}} = K \frac{V_{\mu, 2}^2}{2g}$$

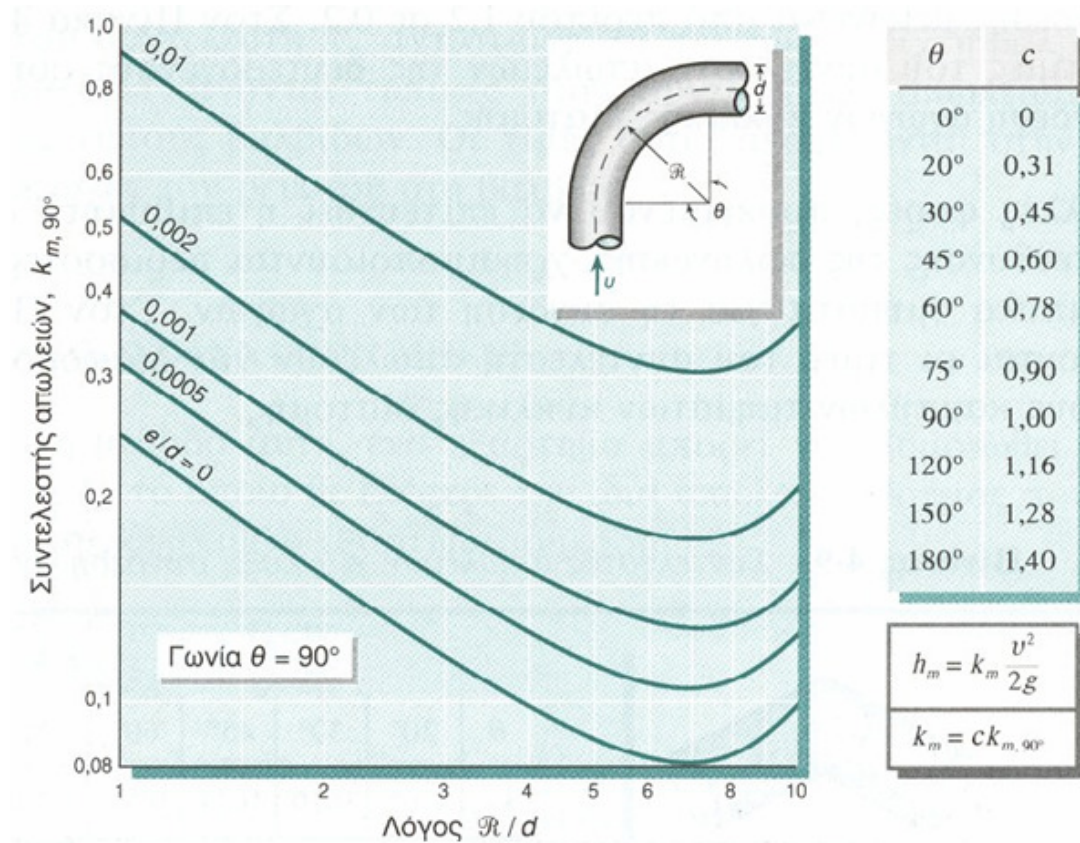
$$K = 0.42 \left( 1 - \frac{A_2}{A_1} \right)$$

3.2.2 Συντελεστές Απωλειών Ενέργειας για Βαθμιαία Διεύρυνση Αγωγού  
(Διαχυτές Ροής)-Βαθμιαία Συστολή Αγωγού (Ακροφύσια)



Συντελεστής απωλειών για έναν τυπικό κωνικό διαχύτη

### 3.2.3 Συντελεστές Απωλειών Ενέργειας σε Καμπύλα Τμήματα Αγωγών



Συντελεστές απωλειών για καμπύλα τμήματα αγωγών

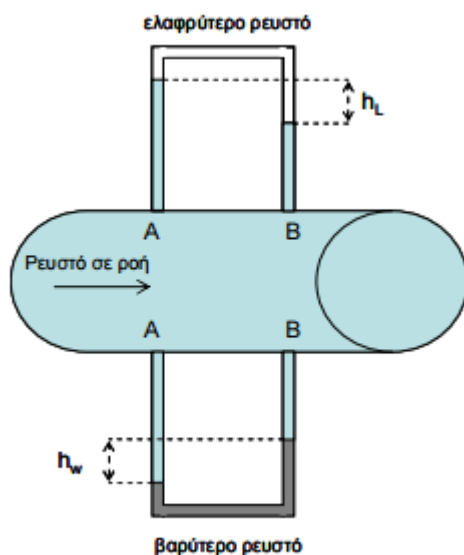
$$h_{f, \text{εξάρτημα}} = \left( f \frac{l}{d} + K \right) \frac{V_\mu^2}{2g} \qquad l = \frac{\pi R}{180} \theta$$

$l$  = μήκος καμπύλου τμήματος

$\theta$  = γωνία αλλαγής διεύθυνσης



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Μανόμετρα τύπου U



Σχήμα 1

Η διαφορά της πίεσης ανάμεσα σε δύο σημεία του αγωγού μπορεί να ληφθεί με την χρήση μανόμετρου τύπου U. Η λειτουργία αυτών των μανομέτρων βασίζεται στη μέτρηση της διαφοράς της στάθμης ενός ρευστού με διαφορετική πυκνότητα από το ρευστό του αγωγού, στα δύο σκέλη του μανομέτρου. Στην περίπτωση που το ρευστό του μανομέτρου είναι ελαφρύτερο από το ρευστό του αγωγού το μανόμετρο θα πρέπει να συνδέεται με τον αγωγό στη βάση του ενώ στην αντίθετη περίπτωση στην κορυφή του όπως δείχνει και το Σχήμα 1. Στο παραπάνω σχήμα η πίεση στο σημείο A είναι μεγαλύτερη από την πίεση στο σημείο B έτσι στο υγρό του αγωγού εκτοπίζει το υγρό των μανομέτρων από το σκέλος του μανομέτρου που βρίσκεται στο A προς το σκέλος που βρίσκεται στο B. Αν  $\rho_L$  και  $\rho_w$  είναι οι πυκνότητες του ελαφρύτερου και του βαρύτερου ρευστού αντίστοιχα τότε θα ισχύει:

$$P_A - P_B = (\rho - \rho_L)gh_L = (\rho_w - \rho)gh_w$$

Από αυτή την εξίσωση προκύπτει ότι οι ενδείξεις των δύο μανομέτρων συνδέονται ως εξής:

$$\frac{h_L}{h_w} = \frac{(\rho_w - \rho)}{(\rho - \rho_L)}$$

Αν για παράδειγμα το ρευστό του αγωγού είναι νερό, το ελαφρύτερο ρευστό είναι αέρας (του οποίου η πυκνότητα είναι αμελητέα και μπορεί να αγνοηθεί στις παραπάνω εξισώσεις) και το βαρύτερο ρευστό είναι υδράργυρος τότε με απλή αντικατάσταση των πυκνοτήτων βρίσκεται ότι  $h_L/h_w = 12.6$ , δηλαδή για την ίδια διαφορά πίεσης η διαφορά στάθμης στο μανόμετρο αέρα-νερού θα είναι 12.6 φορές μεγαλύτερη από τη διαφορά στάθμης στο μανόμετρο υδραργύρου-νερού. Αυτό σημαίνει ότι το μανόμετρο υδραργύρου-νερού μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση πολύ μεγαλύτερης πτώσης πίεσης από το μανόμετρο αέρα-νερού. -

Στην περίπτωση τώρα που η μέτρηση της πίεσης σε σημεία του ίδιου υψομέτρου δεν είναι δυνατή (π.χ. μέτρηση πτώσης πίεσης γωνίας) και το σημείο A είναι ψηλότερα κατά  $h_{AB}$  από το B τότε η πτώση πίεσης λόγω τριβών από το A στο B θα δίνεται ως:

$$\Delta P_{f,AB} = (\rho - \rho_L)gh_L - \rho gh_{AB} = (\rho_w - \rho)gh_w - \rho gh_{AB}$$



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. Περιγραφή της πειραματικής διάταξης για μετρήσεις απωλειών λόγω τριβών σε ευθύγραμμο σωλήνα.**

### **5.1 Εισαγωγή**

Όταν ένα ρευστό κινείται μέσα σ'ένα σωλήνα, τότε δυνάμεις τριβής αναπτύσσονται μεταξύ των εσωτερικών τοιχωμάτων του και του ρευστού του. Οι δυνάμεις αυτές μαζί με τις δυνάμεις εσωτερικής τριβής (λόγω του ιξώδους του ρευστού) έχουν σαν συνέπεια την απώλεια ενέργεια κατά μήκους του σωλήνα.

Οι δυνάμεις τριβών για ένα δεδομένο σωλήνα θα εξαρτώνται από τη φύση του ρευστού (δηλ. την πυκνότητα, το ιξώδες και τη θερμοκρασία) και την ταχύτητα του ρευστού. Έτσι, οι ενεργειακές απώλειες κατά μήκους του σωλήνα θα είναι συνάρτηση των παραπάνω ποσοτήτων καθώς και των κατασκευαστικών στοιχείων του σωλήνα (δηλ. του μήκους της διαμέτρου και της τραχύτητάς του). Ο σωλήνας αυτός θεωρείται ότι έχει σταθερή εσωτερική διατομή.

Η θεωρία και το πείραμα απέδειξαν ότι η έκφραση του νόμου των ενεργειακών αυτών απωλειών είναι άλλη για μικρές ταχύτητες (στρωτή ροή) και άλλη για μεγάλες ταχύτητες (τυρβώδης ροή). Ο προσδιορισμός της φύσεως της ροής (στρωτής ή τυρβώδους), που γίνεται ως γνωστό με τον αριθμό Reynolds, και ο υπολογισμός του συντελεστού τριβής, που υπεισέρχεται στην έκφραση του νόμου των ενεργειακών απωλειών λόγω τριβών, έχουν μεγάλη σημασία για τη μελέτη και εγκατάσταση σωληνώσεων.

Το αντικείμενο λοιπόν αυτής της εργαστηριακής ασκήσεως είναι :

- α) Η πειραματική απόδειξη του νόμου των ενεργειακών απωλειών κατά μήκος ενός σωλήνα και ειδικότερα, η αλλαγή της εκφράσεώς του για την στρωτή και τυρβώδη ροή με τον υπολογισμό της κρίσιμης τιμής του αριθμού Reynolds.
- β) Ο προσδιορισμός του ιξώδους του ρευστού από τον νόμο των ενεργειακών απωλειών λόγω τριβών για στρωτή ροή.
- γ) Ο προσδιορισμός του συντελεστή τριβής από το νόμο των ενεργειακών απωλειών για τυρβώδη ροή και η μεταβολή του σαν συνάρτηση του αριθμού Reynolds.

## 5.2 Περιγραφή Συσκευής Πειράματος

Η συσκευή του πειράματός μας βασικά είναι ένας ευθύγραμμος οριζόντιος σωλήνας, κατά μήκος του οποίου θα μετρήσουμε τις ενεργειακές απώλειες, όταν κυκλοφορεί νερό.

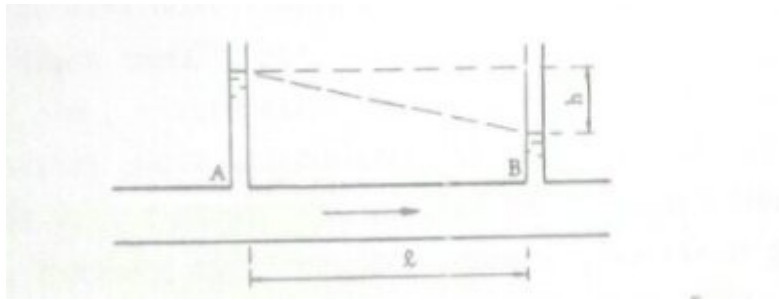
Το νερό εισέρχεται στο σωλήνα αυτό με εύκαμπτο σωλήνα από τη δεξαμενή υπερχυλίσεως νερού ή απ' ευθείας από τη δεξαμενή νερού του υδραυλικού τραπεζιού και εξέρχεται απ' αυτόν με παρόμοιο σωλήνα προς ογκομετρική συσκευή για την ογκομέτρησή του. Ένας πιεζομετρικός σωλήνας υπάρχει από την πλευρά της εισόδου του νερού και ένας από την πλευρά εξόδου του. Οι πιεζομετρικοί αυτοί σωλήνες συνδέονται σε σημεία, που δεν είναι κοντά στην είσοδο και έξοδο για να μην επηρεάζονται τα αποτελέσματα του πειράματος από τις διαταραχές του νερού στην είσοδο και έξοδο. Στα σημεία συνδέσεως των πιεζομετρικών σωλήνων υπάρχουν μηχανισμοί για να απομονώσουν το νερό απ' αυτούς και να το οδηγούν σε μανόμετρο σχήματος U που λειτουργεί με υδράργυρο. Οι ενδείξεις στους πιεζομετρικούς σωλήνες και στο μανόμετρο είναι σε χιλιοστόμετρα.

Η παροχή κατά μήκος του σωλήνα ρυθμίζεται με μια βελονοειδή βαλβίδα και υπολογίζεται με τη βοήθεια της συλλογής του νερού σε ογκομετρικό σωλήνα (καθότι η ποσότητά του είναι σχετικά μικρή).

## 5.3 Συνοπτική Θεωρητική Ανάλυση

Θεωρούμε το κλασσικό πρόβλημα της ροής ρευστού σε γεμάτο σωλήνα που ωθείται είτε από πίεση είτε από τη βαρύτητα ή και από τα δυο μαζί. Θα εξετάσουμε την περίπτωση του οριζόντιου ευθύγραμμου σωλήνα. Το σχήμα πιο κάτω δείχνει την απλή αυτή περίπτωση.

Οι δυνάμεις αντιστάσεως λόγω τριβών, που ανθίστανται (όπως είδαμε στην εισαγωγή) στην κίνηση του ρευστού, που κινείται κατά μήκος του σωλήνα, έχουν σαν συνέπεια μια συνεχή απώλεια ενέργειας, δηλαδή απώλεια του ολικού ύψους του ρευστού. Έτσι στο σχήμα μας η διαφορά των υψών μεταξύ των πιεζομετρικών σωλήνων A και B δείχνει την ολική υψομετρική απώλεια  $h$  σε μήκος του σωλήνα  $l$ .



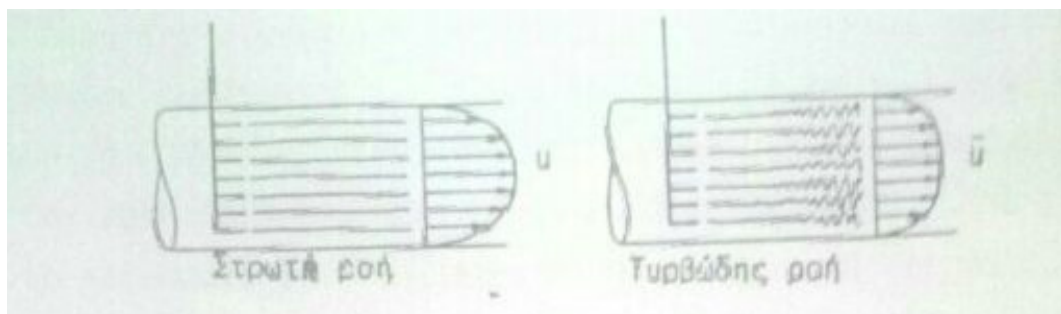
Διάγραμμα επεξηγήσεως της υδραυλικής βαθμίδας

Συνήθως τη μεταβολή της απώλειας του ολικού ύψους κατά μήκους του σωλήνα εκφράζουμε με τον όρο υδραυλική βαθμίδα ( $i$ ), δηλαδή

$$\frac{dh}{dl} = i$$

Η έκφραση όμως του νόμου της μεταβολής των απωλειών λόγω τριβών κατά μήκους σωλήνα γίνεται με θεωρητικές και πειραματικές μεθόδους. Πριν από ένα αιώνα ο Reynolds έκανε διάφορα πειράματα και εισηγήθηκε την πρώτη έκφραση του νόμου αυτού.

Αν στηριχθούμε στις εισηγήσεις του Reynolds, οι ροές των ρευστών διαχωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες με το εξής απλό πείραμα. Διοχετεύουμε από μικρά σωληνάκια έγχρωμο υγρό της ίδιας περιόδου πυκνότητας με το νερό μέσα σ' ένα γυάλινο σωλήνα, όπου κινείται νερό. Παρατηρούμε ότι όταν η ταχύτητα του νερού είναι μικρή οι έγχρωμες γραμμές δημιουργούνται και παραμένουν ευθείες παράλληλες μεταξύ των, ενώ όταν η ταχύτητα του νερού είναι μεγάλη οι έγχρωμες γραμμές διαταράσσονται γρήγορα και αναμιγνύονται. Στην πρώτη περίπτωση λέμε ότι έχουμε στρωτή ροή και στη δεύτερη περίπτωση τυρβώδη ροή.



#### 5.4 Το κλασσικό πείραμα Reynolds που αναφέρεται στους τύπους ροής υγρού μέσα σε σωλήνα.

Στρωτή ροή, γενικά είναι η ροή εκείνη, που γειτονικά στρώματα του ρευστού κινούνται χωρίς μακροσκοπική ανάμειξη μεταξύ τους. Η ροή αυτή απεικονίζεται με τις ρευματικές γραμμές (στο πείραμα του Reynolds είδαμε ότι είναι οι έγχρωμες ευθείες). Δεν υπάρχει μετακίνηση ρευστών σωματιδίων κάθετα στις γραμμές αυτές. Η στρωτή ροή παρατηρείται όταν οι δυνάμεις συνοχής (ή οι δυνάμεις εσωτερική τριβής) είναι σημαντικές έναντι των λοιπών δυνάμεων που εξασκούνται στο ρευστό.

Τυρβώδης ροή είναι εκείνη που τα ρευστά σωματίδια κινούνται ακανόνιστα, σχεδόν τυχαία, με εγκάρσιες διακυμάνσεις ως προς την κύρια διεύθυνση της ροής. Η κίνηση κατά καταστρώματα της στρωτής ροής εδώ δεν υπάρχει γιατί γίνεται μείξη μεταξύ των διαφόρων στρωμάτων και ρευστά σωματίδια μετακινούνται από το ένα στρώμα στο άλλο. Αυτό συμβαίνει γιατί στην τυρβώδη ροή οι δυνάμεις συνοχής είναι πολύ μικρότερες από τις υπόλοιπες δυνάμεις που εξασκούνται στο κινούμενο ρευστό και έτσι οδηγούν το ρευστό σε ακανόνιστες κινήσεις.

Πότε μια ροή είναι στρωτή ή τυρβώδης εξαρτάται λοιπόν, από τις ιδιότητες της ροής. Πειραματιζόμενοι, όπως προηγουμένως με το βασικό πείραμα Reynolds, με σωλήνες διαφορετικής διαμέτρου και διαφορετικά υγρά σε διαφορετικές θερμοκρασίες συμπεραίνουμε ότι η παράμετρος που καθορίζει πότε μια ροή είναι στρωτή ή τυρβώδης σε κάθε ειδική περίπτωση είναι

$$Re = \frac{\rho u D}{\mu}$$

μ

όπου Re δηλώνει τον αριθμό Reynolds της κινήσεως, ρ την πυκνότητα του ρευστού, u την ταχύτητα του ρευστού, D τη διάμετρο του σωλήνα και μ το ιξώδες του ρευστού.

Η κίνηση είναι στρωτή ή τυρβώδης όταν η τιμή του Re είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη αντίστοιχα από μια ορισμένη κρίσιμη τιμή του. Αν τα πειράματα γίνονται αυξάνοντας τις τιμές της ροής, η κρίσιμη τιμή του Re εξαρτάται από το βαθμό της φροντίδας που λάβαμε για την απομόνωση των διαταραχών στον εφοδιασμό του σωλήνα και μετά κατά μήκος αυτού. Από την άλλη πλευρά, αν τα

πειράματα γίνονται ελαττώνοντας την τιμή της ροής, η μετάπτωση της ροής από τυρβώδη σε στρωτή συμβαίνει σε τιμή του  $Re$ , που δεν εξαρτάται πολύ από τις αρχικές διαταραχές. Η κρίσιμη αυτή τιμή του  $Re$  είναι περίπου 2000 και κάτω από αυτή η ροή γίνεται οπωσδήποτε στρωτή.

Εξάλλου, ακολουθώντας τις πειραματικές εισηγήσεις του Reynolds, μπορούμε να δείξουμε πειραματικά ότι ο νόμος των απωλειών λόγω τριβών κατά μήκος ενός δεδομένου σωλήνα έχει τη γενική μορφή

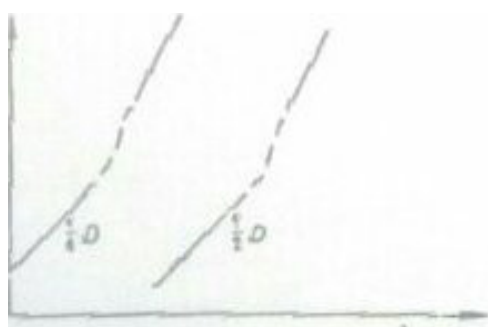
$$i \approx u^n$$

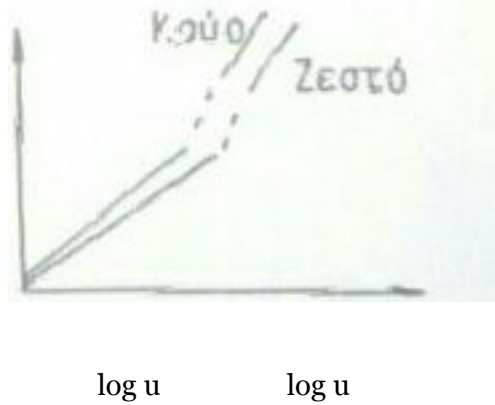
όπου για τη στρωτή ροή είναι  $n=1$  και για την τυρβώδη ροή το  $n$  αυξάνεται από 1,7 μέχρι 2,0.

Στην περίπτωση της τυρβώδους ροής ο δείκτης  $n$  εξαρτάται από την τιμή του αριθμού Reynolds και την τραχύτητα των εσωτερικών τοιχωμάτων του σωλήνα.

Η έκφραση του νόμου δίνεται στα διαγράμματα του πιο κάτω σχήματος, όπου φαίνεται η επίδραση της διαμέτρου του σωλήνα και της θερμοκρασίας του ρευστού.

$\log i \quad \log i$





Αποτέλεσμα της ταχύτητας στην υδραυλική βαθμίδα. Αποτελέσματα της θερμοκρασίας στην υδραυλική βαθμίδα.

(Με μεγάλη θερμοκρασία έχουμε μικρότερο ιξώδες και επομένως μικρότερη αντίσταση στη ροή).

Ο νόμος για την περίπτωση της στρωτής ροής αποδεικνύεται θεωρητικά ότι έχει την έκφραση

$$i = \frac{32\mu u}{\rho g D^2} ,$$

που είναι γνωστή ως εξίσωση του Poiseuille.

Αντίθετα η έκφραση του νόμου για τυρβώδη ροή δεν είναι τόσο απλή στην πράξη χρησιμοποιείται η εξίσωση των Durcy-Weisbach

$$i = \frac{f u^2}{D 2g} ,$$

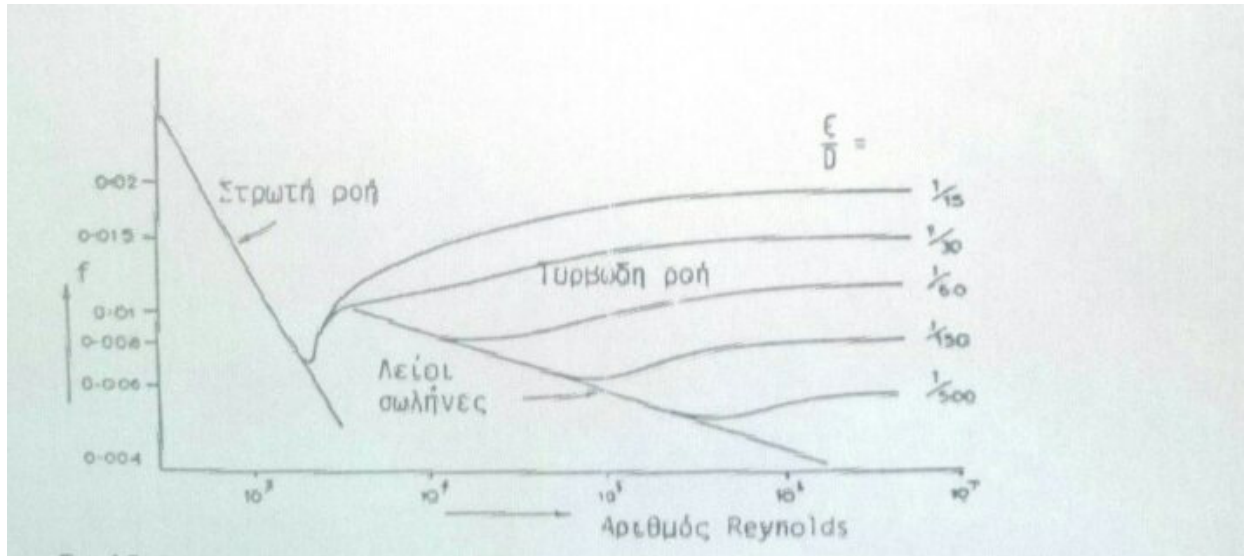
όπου  $f$  είναι ο συντελεστής τριβής, που προσδιορίζεται πειραματικά. Το  $f$  μεταβάλλεται και είναι συνάρτηση του αριθμού  $Re$  και της τραχύτητας του σωλήνα.

Παρατηρούμε ότι η εξίσωση  $i = \frac{32\mu u}{\rho g D^2}$  , είναι μερική περίπτωση της εξίσωσης  $i = \frac{f u^2}{D 2g}$  ,

όταν τεθεί  $f=64$  , που αποδεικνύεται πειραματικά ότι ισχύει μόνο για στρωτή ροή.

$Re$

α) Έτσι, η πειραματική απόδειξη του νόμου  $i \approx u^n$  θα γίνει από τις γραφικές παραστάσεις των πειραματικών αποτελεσμάτων. Ομοίως θα υπολογισθεί η κρίσιμη τιμή του αριθμού Reynolds.



Μεταβολή του συντελεστού τριβής  $f$  σαν συνάρτηση του αριθμού Reynolds (με διαφορετικούς λόγους τραχύτητας προς τη διάμετρο).

(β) Ο προσδιορισμός του ιξώδους του νερού για τη στρωτή ροή θα γίνει από τη σχέση (12.4)

(γ) Ο προσδιορισμός του συντελεστού τριβής από τη σχέση (12.5) και η μεταβολή του συναρτήσει του αριθμού Reynolds ((αφού η ταχύτητα του σωλήνα θεωρείται σταθερή) θα εμφανιστεί σε γραφική παράσταση (βλ, Σχ. 12-6).

## 5.5 ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΑΝ ΓΙΑ ΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ

ΣΩΛΗΝΑΣ ΜΕ ΓΩΝΙΕΣ ΓΙΑ ΜΕΤΡΗΣΗ ΠΙΕΣΗΣ ΠΡΙΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΓΩΝΙΑ ΜΕ ΔΙΑΜΕΤΡΟ ΣΩΛΗΝΑ D=20mm





**ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΟΣ ΣΩΛΗΝΑΣ ΓΙΑ ΜΕΤΡΗΣΗ ΠΙΕΣΗΣ ΜΕ ΔΙΑΜΕΤΡΟ ΣΩΛΗΝΑ D=10mm**



**ΑΓΩΓΟΣ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ D=16mm ΠΟΥ ΕΝΩΝΕΤΑΙ ΜΕ ΑΓΩΓΟ D=11mm ΓΙΑ ΜΕΤΡΗΣΗ ΠΙΕΣΗΣ.**



**ΑΓΩΓΟΣ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ  $D=16\text{mm}$  ΕΝΩΝΕΤΑΙ ΜΕ ΑΓΩΓΟ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ  $D=11\text{mm}$  ΚΑΙ ΣΕ ΑΥΤΟΝ ΕΝΩΝΕΤΑΙ ΑΓΩΓΟΣ ΙΔΙΟΣ ΜΕ ΤΟΝ ΠΡΩΤΟ ( $D=16\text{mm}$ ) ΓΙΑ ΜΕΤΡΗΣΗ ΠΙΕΣΗΣ.**

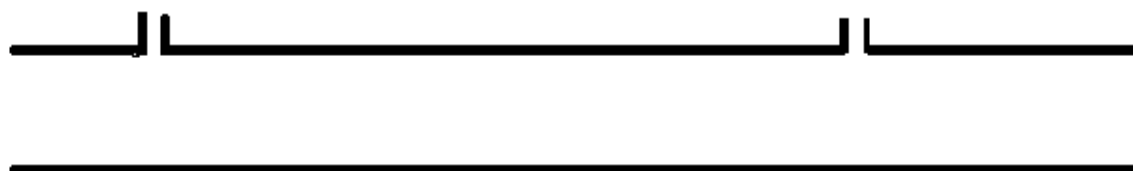


**ΑΓΩΓΟΣ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ  $D=11\text{mm}$  ΕΝΩΝΕΤΑΙ ΜΕ ΑΓΩΓΟ  $D=16\text{mm}$  ΚΑΙ ΣΕ ΑΥΤΟΝ ΕΝΩΝΕΤΑΙ ΑΓΩΓΟΣ ΙΔΙΟΣ ΜΕ ΤΟΝ ΠΡΩΤΟ ( $D=11\text{mm}$ ) ΓΙΑ ΜΕΤΡΗΣΗ ΠΙΕΣΗΣ.**

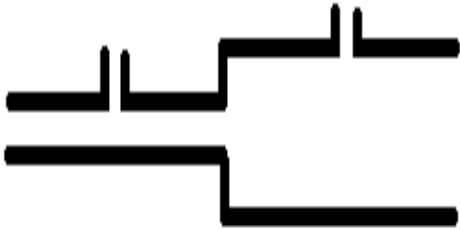




ΣΩΛΗΝΑΣ ΜΕ ΓΩΝΙΕΣ ΓΙΑ ΜΕΤΡΗΣΗ  
ΡΟΗΣ ΠΡΙΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΓΩΝΙΑ.



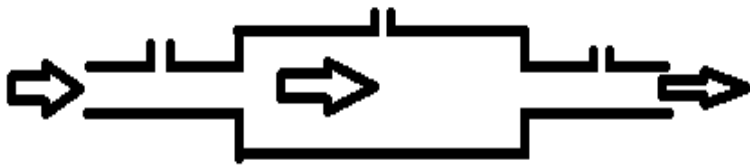
ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΟΣ ΑΓΩΓΟΣ L=650mm ΚΑΙ D=10mm



ΣΩΛΗΝΑΣ D=11mm ΕΝΩΝΕΤΑΙ ΜΕ ΣΩΛΗΝΑ D=16mm



ΑΓΩΓΟΣ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ  $D=16\text{mm}$   
ΕΝΩΝΕΤΑΙ ΜΕ ΑΓΩΓΟ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ  $D=$   
 $11\text{mm}$  Ο ΟΠΟΙΟΣ ΕΝΩΝΕΤΑΙ ΜΕ  
ΑΓΩΓΟ ΙΔΙΟ ΜΕ ΤΟΝ ΠΡΩΤΟ.



ΑΓΩΓΟΣ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ  $D=11\text{mm}$  ΕΝΩΝΕΤΑΙ ΜΕ ΑΓΩΓΟ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ  
 $D=16\text{mm}$  Ο ΟΠΟΙΟΣ ΕΝΩΝΕΤΑΙ ΜΕ ΑΓΩΓΟ ΙΔΙΟ ΜΕ ΤΟΝ ΠΡΩΤΟ

## 5.6 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ

Η συσκευή του πειράματός μας, που περιγράφηκε παραπάνω μεταφέρεται έτοιμη για χρήση. Η προετοιμασία για το πείραμα γίνεται με τις παρακάτω εργασίες σας.

1. Να τοποθετήσετε τη συσκευή πάνω στο υδραυλικό τραπέζι.
2. Να συνδέσετε την αρχή της συσκευής με πλαστικό σωλήνα με τη δεξαμενή υπερχειλίσεως, που συνδέεται στη συνέχεια με τη βαλβίδα εφοδιασμού του υδραυλικού τραπεζιού.

Σημείωση: Για μεγάλες παροχές νερού δεν παρεμβάλλεται η δεξαμενή υπερχειλίσεως, αλλά συνδέεται απ' ευθείας η συσκευή του πειράματός μας με τη βαλβίδα εφοδιασμού του υδραυλικού τραπεζιού (τούτο πρέπει να γίνει μετά από τη σύσταση του διδάσκοντα).

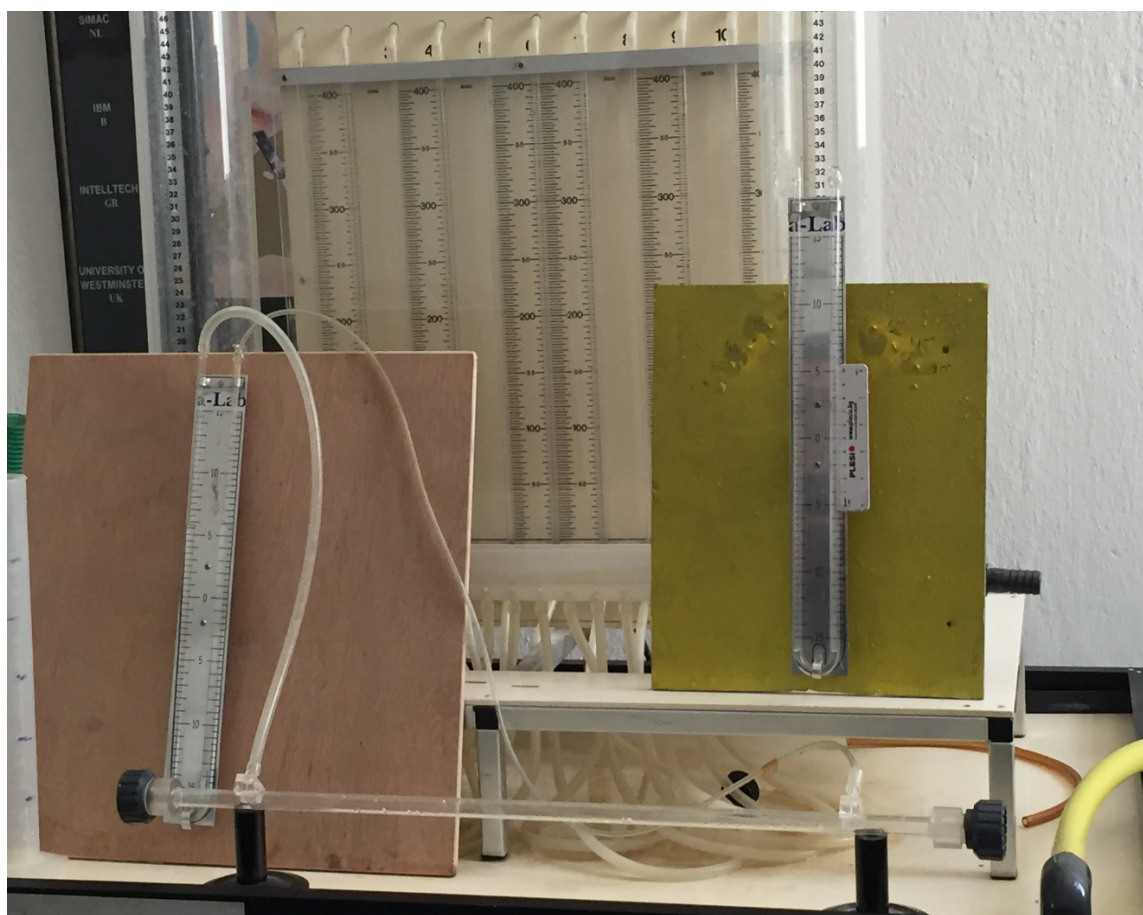
3. Να συνδέσετε το τέλος της συσκευής με ένα πλαστικό σωλήνα, που καταλήγει σε ένα ογκομετρικό γυάλινο δοχείο (των 1000 ml).
4. Να στρίψετε το μοχλό προς το μέρος των πιεζομετρικών σωλήνων για να λειτουργήσει το μανόμετρο νερού.
5. Μετά την εξαφάνιση των αεροφουσαλίδων στο σύστημα κλείνεται προοδευτικά η βαλβίδα ελέγχου έτσι ώστε το νερό να ανεβαίνει προοδευτικά και στους δύο πιεζομετρικούς σωλήνες.
6. Όταν το επίπεδο του νερού στους δύο πιεζομετρικούς σωλήνες σταματήσει σε κάποιο οριζόντιο επίπεδο (περίπου στο μέσο της κλίμακας), τότε ρυθμίζονται οι κοχλίες οριζοντιώσεως της συσκευής έτσι, ώστε το ύψος του νερού να είναι στο ίδιο οριζόντιο επίπεδο στους πιεζομετρικούς σωλήνες. Αν τούτο δεν γίνεται σημαίνει ότι υπάρχουν αεροφουσαλίδες στο σύστημα και πρέπει να επαναλαμβάνουμε τις εργασίες από την περίπτωση 5 και μετά. (Στην περίπτωση μη υπάρξεως υπερχειλίσεως οι αεροφουσαλίδες απομακρύνονται εύκολα όταν αφήσουμε να γεμίσουν με νερό οι πιεζομετρικοί σωλήνες, ανοίγοντας την αεροβαλβίδα, και να κλείσει κύκλωμα ροής νερού σ' αυτούς. Στη συνέχεια εισάγουμε αέρα από την αεροβαλβίδα μέχρι να φέρουμε τη στάθμη του νερού στο ήμισυ της κλίμακας περίπου).
7. Αν θέλουμε να αυξομειώσουμε το ύψος της στάθμης του νερού στους πιεζομετρικούς σωλήνες ανοίγουμε την αεροβαλβίδα, οπότε φεύγει αέρας και η



στάθμη ανεβαίνει, ενώ όταν προσθέσουμε αέρα με την τρόμπα ποδηλάτου από την αεροβαλβίδα η στάθμη κατεβαίνει.

8. Τέλος, αν υπάρχουν δακτύλιοι νερού στους πιεζομετρικούς σωλήνες προσθαφαιρούμε αέρα από την αεροβαλβίδα μέχρις ότου απαλλάξουμε τους πιεζομετρικούς σωλήνες απ' αυτούς, προσπαθώντας το ύψος του νερού να είναι το ίδιο και στους δύο πιεζομετρικούς σωλήνες.

9. Να παρατηρήσετε για λίγα λεπτά τη στάθμη του νερού στους πιεζομετρικούς σωλήνες. Αν δεν παραμένει σταθερή η στάθμη αυτή πρέπει να αλλαγεί το λάστιχο της αεροβαλβίδας και να επαναληφθεί η ρύθμιση του οργάνου. Αν η στάθμη του νερού παραμένει σταθερή προχωρούμε στην εκτέλεση του πειράματος.



## 5.7 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Μετά την προηγούμενη προετοιμασία της πειραματικής συσκευής εκτελείται το πείραμα.

### α) Πειραματική απόδειξη του νόμου των απωλειών

α(1) Πρέπει να έχετε έτοιμο χαρτί για δυο πρόχειρες γραφικές παραστάσεις. Η κάθε μία απ' αυτές θα έχει στον άξονα των τετμημένων την ταχύτητα (κλίμακα: από 0 μέχρι 2 m/s για τις μετρήσεις με το μανόμετρο νερού και από 0 μέχρι 4 m/s για τις μετρήσεις με το υδραργυρικό μανόμετρο) και στο άξονα των τεταγμένων την υδραυλική βαθμίδα  $i$ . Όταν θα παίρνετε τις πειραματικές μετρήσεις θα σχεδιάζετε ταυτόχρονα και τη γραφική παράσταση. Στην περιοχή του σημείου της γραφικής παραστάσεως που θα δείτε ότι έχετε κάποια απότομη μεταβολή να πάρετε μερικές επιπλέον μετρήσεις και μετά να προχωρήσετε στις άλλες μετρήσεις σας.

α(2) Να ανοίξετε τη (βελονοειδή) βαλβίδα ελέγχου εντελώς και να αυξήσετε την παροχή νερού μέχρις ότου η διαφορά της στάθμης του νερού στους πιεζομετρικούς σωλήνες να γίνει μέγιστη.

α(3) Με τη βαλβίδα ελέγχου μπορείτε να αυξομειώνετε την παροχή νερού, που μετριέται με τη βοήθεια ογκομετρικού δοχείου. Το δοχείο αυτό βρίσκεται κάτω από την πειραματική συσκευή και ο πλαστικός σωλήνας δεν πρέπει να βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια του νερού που συλλέγεται. Έτσι μπορείτε να συλλέξετε διάφορες ποσότητες νερού μετρώντας τον αντίστοιχο χρόνο.

α(4) Για να εργαστούμε στην περιοχή της τυρβώδους ροής, πρέπει να αυξηθεί η παροχή νερού, δια μέσου του σωλήνα της πειραματικής συσκευής. Γι' αυτό κλείνουμε την παροχή του νερού (με το διακόπτη της αντλίας) και μετά από λίγο συνδέουμε τη συσκευή μας οπωσδήποτε απ' ευθείας με την παροχή του υδραυλικού τραπεζιού.

## 5.8 Πειραματικά δεδομένα και ανάλυση

### ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΛΟΓΩ ΤΡΙΒΗΣ ΣΕ ΣΩΛΗΝΑ

1. Αποτελέσματα με το μανόμετρο νερού
2. Δεδομένα: Μήκος σωλήνα  $L=447$  mm, Διάμετρος σωλήνα  $d=10$ mm
3. Μέση θερμοκρασία πειράματος =  $18^{\circ}\text{C}$
4.  $N=1,07 \times 10^{-f}$
5.  $A=7,85$  mm<sup>2</sup>

A/A	Όγκος νερού V (ml)	Χρόνος T (s)	Ύψος Εισόδου h1 (mm)	Ύψος εξόδου h2 (mm)	Ταχύτητα U (m/s)	Διαφορά ύψων h1-h2 (m)	Υδραυλική βαθμίδα (l)	log i	log u	Συντελεστής τριβής (F)	Αριθμός Reynolds (Re)
1.	50	6.35	508	30	1.003	0.478	1.062	0.026	0.001	0.207	9370
2.	100	12.96	528	32	0.982	0.496	1.044	0.018	-0.007	0.212	9170
3.	200	25.83	473	75	0.990	0.398	0.891	-0.050	-0.004	0.178	9250
4.	300	42.2	445	137	0.905	0.308	0.690	-0.161	-0.043	0.165	8450

## 5.9 ΣΥΖΗΤΗΣΗ-ΣΧΟΛΙΑ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία κατασκευάσαμε διάφορους σωλήνες (όπου τους βλέπετε στις παραπάνω ενότητες) για να καταγράψουμε τις πτώσεις πίεσης, την ταχύτητα του ρευστού τον συντελεστή τριβής και τον αριθμό Reynolds που προκύπτει από τις μετρήσεις.

Λόγω του περιορισμένου χρόνου και των αρυθμιών της πειραματικής διάταξης πραγματοποιήθηκε μόνο το πείραμα της πτώσης πίεσης σε ευθύγραμο σωλήνα. Παρατηρήθηκε μια λογική πτώση πίεσης λόγω των τριβών, όπως και πολύ μικρή τιμή του αριθμού Reynolds, λόγω της μικρής διαμέτρου του αγωγού και των χαμηλών ροικών ταχυτήτων, πράγμα που δείχνει ότι σε αυτές τις συνθήκες η ροή είναι τυρβώδης.

## **Βιβλιογραφία**

### **BIBΛΙΑ:**

1. Βοηθητικά μηχανήματα(ΙΔΡΥΜΑ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ Α' ΕΚΔΟΣΗ 1974)
2. Μηχανική ρευστών(ΙΔΡΥΜΑ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ Α' ΕΚΔΟΣΗ 2008)
3. Πτυχιακές εργασίες (σημειώσεις επιβλέπων καθηγητή) : Αντλίες στα πλοία, σωληνώσεις και εξαρτήματα. Ηλεκτρονικής μορφής έγγραφα και εικόνες
4. Σημειώσεις από ανώνυμη πηγή(2Part B Mechanical Size htg)
5. ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΑ ΠΛΟΙΩΝ ΣΤ' ΕΞΑΜΗΝΟ MAREDU (power point) file.

### **INTERNET RESEARCH FOR DOCUMENTS AND PICTURES**

6. [http://www.eugenfound.edu.gr/appdata/documents/books\\_pdf/e\\_i00088.pdf](http://www.eugenfound.edu.gr/appdata/documents/books_pdf/e_i00088.pdf)
7. <http://www.scribd.com/doc/24749036/29/%E2%88%86%CE%B9%CE%B1%CF%84%CE%AE%CF%81%CE%B7%CF%83%CE%B7-%CF%84%CE%B7%CF%82-%CE%B5%CE%BD%CE%AD%CF%81%CE%B3%CE%B5%CE%B9%CE%B1%CF%82-%E2%80%93%CE%95%CE%BE%CE%AF%CF%83%CF%89%CF%83%CE%B7-Bernoulli>
8. [http://physics.teiath.gr/lesson/materials/poiseuille\\_4.pdf](http://physics.teiath.gr/lesson/materials/poiseuille_4.pdf)
9. [http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CE%BD%CF%84%CE%BB%CE%AF%CE%B1#CE.99.CF.83.CF.84.CE.BF.CF.81.CE.B9.CE.BA.CE.AC\\_.CF.83.CF.84.CE.BF.CE.B9.CF.87.CE.B5.CE.AF.CE.B1](http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CE%BD%CF%84%CE%BB%CE%AF%CE%B1#CE.99.CF.83.CF.84.CE.BF.CF.81.CE.B9.CE.BA.CE.AC_.CF.83.CF.84.CE.BF.CE.B9.CF.87.CE.B5.CE.AF.CE.B1)  
<http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CE%BD%CF%84%CE%BB%CE%AF%CE%B1>
10. [http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%92%CE%BF%CE%B7%CE%B8%CE%B7%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AC\\_%CE%BC%CE%B7%CF%87%CE%B1%CE%BD%CE%AE%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B1\\_%CF%80%CE%BB%CE%BF%CE%AF%CF%89%CE%BD#CE.9A.CE.B1.CF.84.CE.B7.CE.B3.CE.BF.CF.81.CE.AF.CE.B5.CF.82\\_.CE.BA.CE.B1.CF.84.CE.AC.CF.84.CE.B1.CE.BE.CE.B7.CF.82\\_.CE.B1.CE.BD.CF.84.CE.BB.CE.B9.CF.8E.CE.BD](http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%92%CE%BF%CE%B7%CE%B8%CE%B7%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AC_%CE%BC%CE%B7%CF%87%CE%B1%CE%BD%CE%AE%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B1_%CF%80%CE%BB%CE%BF%CE%AF%CF%89%CE%BD#CE.9A.CE.B1.CF.84.CE.B7.CE.B3.CE.BF.CF.81.CE.AF.CE.B5.CF.82_.CE.BA.CE.B1.CF.84.CE.AC.CF.84.CE.B1.CE.BE.CE.B7.CF.82_.CE.B1.CE.BD.CF.84.CE.BB.CE.B9.CF.8E.CE.BD)
11. <http://www.metadosi-ischios.gr/article.php?ID=76>
12. <http://www.argyriousa.com.gr/0010000005/index.html>