

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΛΕΤΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΣΕ ΣΩΛΗΝΑ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΩΝ



ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ: ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΣΩΤΗΡΟΠΟΥΛΟΣ
ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΧΡΙΣΤΑΚΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΚΑΛΑΡΑΚΗΣ

ΠΑΤΡΑ 2013

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το συγκεκριμένο τεύχος αποτελεί την πτυχιακή εργασία που πραγματοποιήθηκε στο τμήμα μηχανολογίας του τεχνολογικού εκπαιδευτικού ιδρύματος Πάτρας και αναφέρεται στη δημιουργία πειραματικής συσκευής για τον υπολογισμό απωλειών σε έναν μεταλλικό σωλήνα που ανήκει στην κατηγορία της μηχανικής ρευστών. Η συγκεκριμένη συσκευή που κατασκευάστηκε πρόκειται στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί για τα επόμενα έτσι ώστε να εκτελέσουν πειράματα στο εργαστήριο της μηχανικής ρευστών.

Κατ' αρχάς δίνεται ο ορισμός του ρευστού και διάφοροι ορισμοί σημαντικών μεγεθών όπως η πυκνότητα και το ιξώδες. Στη συνέχεια αναφερόμαστε στα ειδή των ροών, και σε κάποιες σημαντικές εξισώσεις όπως της συνέχειας. Τέλος γίνεται μια αναφορά στο πειραματικό μέρος όπου εκεί υπολογίζουμε την ταχύτητα του ρευστού, και τον κρίσιμο αριθμό Reynolds.

Ευχαριστούμε πολύ τον επιβλέποντα καθηγητή μας κ. Αλέξανδρο Καλαράκη Επιστημονικό Συνεργάτη του τμήματος Μηχανολογίας, για την πολύτιμη βοήθεια και την καθοδήγηση που μας προσέφερε για την εκπόνηση της πτυχιακής εργασίας. Επίσης θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον κ. Ευγένιο Σκούρα Επιστημονικό Συνεργάτη του τμήματος Μηχανολογίας, για την συνεισφορά του, καθώς και τον κ. Αχιλλέα Παπαθανασόπουλο, ΤΕ του τμήματος Μηχανολογίας, για την βοήθεια του στην ένταξη της συσκευής στις πειραματικές διατάξεις του εργαστηρίου της Μηχανικής των Ρευστών.

Βασίλειος Σωτηρόπουλος

Νικόλαος Χριστάκης

Πάτρα 2013

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η συγκεκριμένη Πτυχιακή Εργασία αναφέρεται στην κατασκευή μιας πειραματικής διάταξης για τον υπολογισμό των απωλειών σε ένα μεταλλικό σωλήνα. Σκοπός της συγκεκριμένης Πτυχιακής εργασίας είναι να παρατηρήσουμε την ροή τόσο για την στρωτή, όσο και την τυρβώδη ροή κατά μήκος ενός μεταλλικού σωλήνα, υπολογίζοντας τον αδιάστατο αριθμό Reynolds. Επίσης αξίζει να αναφέρουμε ότι μπορούμε από τον νόμο των ενεργειακών απωλειών να υπολογίσουμε τον συντελεστή τριβής για τυρβώδη ροή, και πως αυτό μεταβάλλεται σε σχέση με τον αριθμό Reynolds. Ακόμη είναι πολύ σημαντικό να αναφέρουμε ότι μπορούμε να προσδιορίσουμε το ιξώδες του ρευστού από το νόμο των ενεργειακών απωλειών λόγω τριβών για στρωτή ροή.

Η ανάπτυξη του θέματος θα γίνει σε τέσσερα κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο θα αναφερθούμε στον ορισμό του ρευστού καθώς και σε κάποιες πολύ σημαντικές παραμέτρους που σχετίζονται με την μηχανική ρευστών. Οι κυριότερες παράμετροι που σχετίζονται με ένα ρευστό είναι η πυκνότητα, το ειδικό βάρος, το ιξώδες, το δυναμικό ιξώδες και η επιφανειακή τάση, έννοιες οι οποίες είναι πολύ σημαντικές για τον προσδιορισμό ενός ρευστού. Επιπλέον αξίζει να αναφέρουμε την εξίσωση ενέργειας υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις ροής, εκπεφρασμένη με την εξίσωση Bernoulli.

Στο δεύτερο κεφάλαιο θα αναπτύξουμε την έννοια των ροών. Αρχικά θα αναφερθούμε την μορφή που παίρνει μια ροή δηλαδή το αν είναι σταθερή ή μεταβαλλόμενη, για το αν είναι ομοιόμορφη ή ανομοιόμορφη και αν είναι μονοδιάστατη, δισδιάστατη ή τρισδιάστατη. Μια πολύ σημαντική παράμετρος για να καταβάλλουμε τότε μια ροή είναι στρωτή ή τυρβώδης εξαρτάται από τον αδιάστατο αριθμό Reynolds. Επιπρόσθετα θα αναπτύξουμε το είδος ροής που υπάρχει κατά μήκος του σωλήνα. Πιο συγκεκριμένα όπως προαναφέραμε ο αριθμός Reynolds είναι αυτός που καθορίζει αν η ροή είναι στρωτή ή τυρβώδης και μια ροή είναι στρωτή όταν ο αριθμός Reynolds είναι μικρότερος του 2000 και όταν ο αριθμός Reynolds είναι μεγαλύτερος του 2000 τότε θα έχουμε τυρβώδη ροή. Επιπλέον θα αναπτύξουμε και την έννοια της τραχύτητας των αγωγών όπου θα αναφερθούμε στο υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένοι ορισμένοι αγωγοί δείχνοντας ταυτόχρονα μερικές φωτογραφίες, καθώς και μια αναφορά στον συντελεστή τραχύτητας του κάθε αγωγού. Τέλος στο τρίτο κεφάλαιο θα μελετήσουμε και το διάγραμμα Moody το οποίο είναι πολύ σημαντικό για την εύρεση του συντελεστή τριβής γνωρίζοντας όμως παράλληλα τον αριθμό Reynolds και τον λόγο τραχύτητας ϵ/D .

Στο τρίτο κεφάλαιο θα μελετήσουμε την πειραματική διάταξη. Συγκεκριμένα θα αναφερθούμε στα είδη των εξαρτημάτων που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή της δίνοντας πληροφορίες για το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένα, καθώς και την χρησιμότητα του καθενός. Επίσης για το κάθε υλικό θα υποβάλλουμε και κάποιες εικόνες για να γίνει καλύτερα η κατανόηση του κάθε εξαρτήματος. Επιπλέον

θα παρουσιαστούν και κάποιες φωτογραφίες ενδεικτικές της πορείας εξέλιξης της εργασίας.

Στο τέταρτο και τελευταίο κεφάλαιο θα αναφερθούμε αποκλειστικά στην εκτέλεση του πειράματος. Πιο συγκεκριμένα θα περιγράψουμε την πειραματική διαδικασία πως δηλαδή πραγματοποιείται το πείραμα. Στη συνέχεια θα έχουμε έναν πίνακα όπου θα αναφέρονται οι μετρήσεις που πήραμε κατά την εκτέλεση του πειράματος, και στο τέλος του τέταρτου κεφαλαίου θα αναρτήσουμε κάποιες γραφικές παραστάσεις οι οποίες ταυτόχρονα θα περιέχουν και κάποια σχόλια για να κατανοήσουμε καλύτερα κάποια σημαντικά μεγέθη.

Επίσης θα παραθέσουμε και κάποια παραρτήματα που θα χωρίζονται σε τέσσερα μέρη όπου το πρώτο θα περιλαμβάνει αποκλειστικά τη θεωρία, το δεύτερο το πειραματικό μέρος, το τρίτο θα παρατίθεται ένας πίνακας για την εξάσκηση των φοιτητών και στο τέταρτο μέρος θα υπάρχει ένα δεύτερο σετ μετρήσεων το οποίο θα πιστοποιεί ότι η πειραματική μας διάταξη λειτουργεί ορθά.

Εν κατακλείδι τα σπουδαιότερα συμπεράσματα που προκύπτουν από την υλοποίηση της συγκεκριμένης Πτυχιακής Εργασίας είναι στο να παρατηρήσουμε και να κατανοήσουμε τον τρόπο με τον οποίον μεταβάλλεται μια ροή κατά μήκος ενός σωλήνα δηλαδή το αν είναι στρωτή ή τυρβώδης συνάρτηση του αριθμού Reynolds. Τέλος η συγκεκριμένη πειραματική διάταξη θα παραμείνει στην αίθουσα της υδραυλικής του ΤΕΙ Πάτρας και εφαρμοστεί ως άσκηση στο εργαστήριο Μηχανικής Ρευστών και θα χρησιμοποιηθεί για τα επόμενα έτη από διάφορους καθηγητές για να εκτελέσουν το πείραμα και να καταγράψουν κάποιες μετρήσεις οι οποίες θα είναι πολύ χρήσιμες για τους φοιτητές ώστε να τις χρησιμοποιήσουν για να υπολογίσουν κάποια πολύ σημαντικά μεγέθη.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1. ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΤΡΙΒΩΝ	1
2. ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΤΡΙΒΩΝ ΣΕ ΣΩΛΗΝΑ.....	1
3. ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΤΡΙΒΩΝ ΣΕ ΣΩΛΗΝΟΓΡΑΜΜΗ	2
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΡΕΥΣΤΩΝ - ΟΡΙΣΜΟΙ	4
1.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	4
1.2 ΣΥΝΤΟΜΟ ΙΣΤΟΡΙΚΟ ΤΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΩΝ	4
1.3 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΩΝ.....	5
1.4 ΔΙΑΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΥΓΡΟΥ ΚΑΙ ΣΤΕΡΕΟΥ	6
1.5 ΔΙΑΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΥΓΡΟΥ ΚΑΙ ΑΕΡΙΟΥ	7
1.6 ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ.....	7
1.6.1 πυκνότητα	7
1.6.2 ειδικό βάρος	8
1.6.3 ιξώδες.....	8
1.6.3.1 πειραματικός προσδιορισμός του ιξώδους.....	8
1.7 ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΤΑΣΗ	9
1.8 ΕΙΔΙΚΟΣ ΟΓΚΟΣ	10
1.9 ΣΧΕΤΙΚΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ	10
1.10 ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	11
1.11 ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ.....	12
1.12 ΚΙΝΗΤΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	12
1.13 ΣΥΜΠΙΕΣΤΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΥΓΡΩΝ.....	12
1.14 ΑΤΜΙΤΙΚΗ ΠΙΕΣΗ ΤΩΝ ΥΓΡΩΝ	13
1.15 ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ	13
1.16 ΜΕΤΡΗΣΗ ΠΙΕΣΕΩΣ.....	14
1.15.1 Βαρόμετρα	14
1.15.2 Μανόμετρα Bourdon.....	17

1.15.3 Μανόμετρα με υγρό.....	19
2.ΕΙΔΗ ΚΑΙ ΜΟΡΦΕΣ ΡΟΩΝ.....	22
2.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	22
2.2 ΜΟΡΦΕΣ ΡΟΩΝ	22
2.2.1 Σταθερή ή μόνιμη και ασταθής ή μη μόνιμη	22
2.2.2 Ομοιόμορφη και ανομοιόμορφη ροή	22
2.2.3 Μονοδιάστατη, δισδιάστατη και τρισδιάστατη ροή	23
2.3 ΕΙΔΗ ΡΟΩΝ.....	24
2.3.1 Στρωτή και τυρβώδης ροή.....	24
2.3.1.1 Αριθμός Reynolds	25
2.4 ΕΞΙΣΩΣΗ BERNOLLI.....	26
2.5 ΕΞΙΣΩΣΗ ΣΥΝΕΧΕΙΑΣ	27
2.6 ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ ΑΓΩΓΟΥ	28
2.7 ΤΡΟΧΙΕΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΡΕΥΣΤΟΥ-ΡΟΙΚΕΣ ΓΡΑΜΜΕΣ.....	31
2.8 ΣΥΝΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΡΕΥΣΤΟΥ.....	32
2.9 ΤΡΟΠΟΙ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΣ ΕΝΟΣ ΡΕΥΣΤΟΥ	33
3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ	35
3.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	35
3.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΩΝ	35
3.2.1 Μανόμετρο πίεσης	35
3.2.2 Σιδηροσωλήνας.....	36
3.2.3 Βασικά εμπλεκόμενα μικροεξαρτήματα	37
3.2.3.1 Ρακόρ.....	37
3.2.3.2 Υδρομέτρο	39
3.2.3.3 Κολεκτέρ εξαέρωσης- Κύρια κολεκτέρ.....	39
3.2.3.4 Μεταλλική βάση- Ορειχάλκινος σταυρός.....	41
3.2.3.5 Ρυθμιστής παροχής- Μετρητική ταινία- Πιεζομετρικοί σωλήνες	42
3.3 ΕΙΚΟΝΕΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΟΡΕΙΑ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	44
4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΡΟΣ.....	46
4.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	46
4.2 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΑΣΚΗΣΗΣ.....	46
4.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ.....	46

4.4 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ	47
4.5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	48
4.6 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	50
4.6.1 Μετρήσεις μανομέτρου νερού	50
4.6.2 Μετρήσεις μανομέτρου υδραργύρου	53
4.7 ΣΧΟΛΙΑ	55
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	58
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι.....	59
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ	63
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ.....	75
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙV.....	77

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1. ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΤΡΙΒΩΝ

Όπως γνωρίζουμε από την μηχανική ρευστών κατά την κίνηση ενός ρευστού κατά μήκος ενός σωλήνα, αναπτύσσονται δυνάμεις τριβών μεταξύ των εσωτερικών τοιχωμάτων και του ρευστού. Οι δυνάμεις αυτές σε συνδυασμό με τις δυνάμεις εσωτερικής τριβής εξαιτίας του ιξώδους του ρευστού έχει ως αποτέλεσμα το ρευστό να έχει απώλειες ενέργειας όταν κινείται μέσα στον σωλήνα.

Οι απώλειες χωρίζονται σε δυο μεγάλες κατηγορίες τις τοπικές απώλειες και τις απώλειες λόγω τριβών. Στη συνέχεια θα αναφερθούμε αναλυτικά και στα δυο είδη απωλειών ξεκινώντας αρχικά με τις απώλειες λόγω τριβών σε σωλήνα, που είναι και η περίπτωση που μας ενδιαφέρει.

2. ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΤΡΙΒΩΝ ΣΕ ΣΩΛΗΝΑ

Οι δυνάμεις τριβών για ένα σωλήνα συγκριμένης διαμέτρου θα εξαρτώνται από τις ιδιότητες του ρευστού όπως (η πυκνότητα, το ιξώδες) και την ταχύτητα την οποία αναπτύσσει το ρευστό. Επομένως οι ενεργειακές απώλειες κατά μήκος ενός σωλήνα θα έχει άμεση συσχέτιση με τις προαναφερθείσες ποσότητες καθώς ακόμη πολύ σημαντικό ρόλο παίζουν και τα κατασκευαστικά στοιχεία του σωλήνα (δηλαδή το μήκος, η διάμετρος, και η τραχύτητα του). Ο σωλήνας της πειραματικής συσκευής θεωρείται ότι έχει σταθερή εσωτερική διατομή.

Ο υπολογισμός των απωλειών σε σωλήνα δίνεται από την σχέση των Darcy-Weisbach και ο τύπος είναι ο παρακάτω:

$$\Delta H = \frac{f L u^2}{D 2g} \quad (1)$$

όπου f είναι αδιάστατος συντελεστής τριβής, που εξαρτάται από τον αριθμό Reynolds που υπολογίζεται από την σχέση (2), L είναι το μήκος του σωλήνα σε m, u είναι η ταχύτητα του ρευστού που περνάει μέσα από τον σωλήνα σε m/s, D είναι η διάμετρος του σωλήνα που είναι σταθερή σε m και g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας που είναι ένα σταθερό μέγεθος και το λαμβάνουμε συνήθως $9,81 \text{ m/s}^2$.

$$Re = \frac{\rho u D}{\mu} \quad (2)$$

Όπου ρ είναι η πυκνότητα σε Kg/m^3 , u είναι η ταχύτητα του ρευστού που περνάει μέσα από τον σωλήνα σε m/s , D είναι η διάμετρος του σωλήνα που είναι σταθερή σε m , μ είναι το ιξώδες του ρευστού σε $\text{N}\cdot\text{sec} / \text{m}^2$.

Ακόμη όπως είναι γνωστό η θεωρία και το πείραμα απέδειξαν ότι αλλιώς εκφράζεται ο νόμος των ενεργειακών απωλειών όταν έχουμε μικρές ταχύτητες στην περίπτωση δηλαδή της στρωτής ροής και αλλιώς εκφράζεται ο νόμος των ενεργειακών απωλειών όταν έχουμε μεγάλες ταχύτητες στην περίπτωση της τυρβώδους ροής. Για να προσδιορίσουμε το είδος της ροής, αν είναι στρωτή ή τυρβώδης αυτό το γνωρίζουμε υπολογίζοντας τον αριθμό Reynolds ο οποίος είναι ένα αδιάστατο μέγεθος, και ακόμη πρέπει να ξέρουμε και ένα άλλο αδιάστατο μέγεθος τον συντελεστή τριβής που έχει πολύ μεγάλη σημασία για την μελέτη των σωληνώσεων.

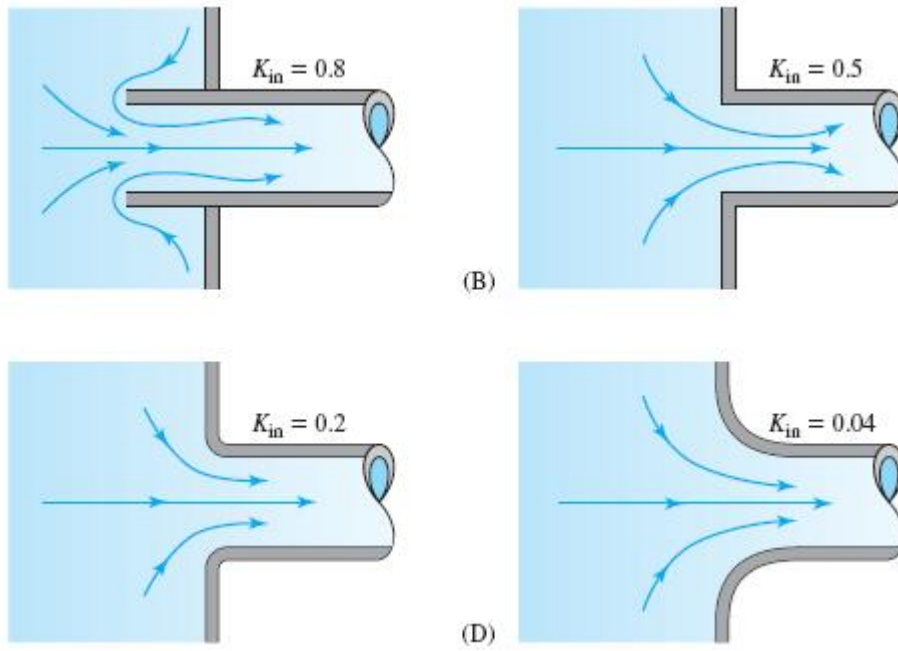
3. ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΤΡΙΒΩΝ ΣΕ ΣΩΛΗΝΟΓΡΑΜΜΗ

Επιπλέον, αξίζει να αναφερθούμε και στις τοπικές απώλειες, όπου οι συγκεκριμένες απώλειες εμφανίζονται όταν κατά τη μεταφορά των ρευστών σε κλειστούς αγωγούς εκτός από τις απώλειες ενέργειας λόγω τριβών, υπάρχουν και οι απώλειες ενέργειας λόγω τοπικών διαταραχών της ροής, οι οποίες καλούνται τοπικές απώλειες. Για σωλήνα μεγάλου μήκους, οι απώλειες αυτές είναι συνήθως ασήμαντες συγκριτικά με τη τριβή του ρευστού στο θεωρούμενο μήκος. Αν όμως το μήκος του σωλήνα είναι πολύ μικρό, οι δευτερεύουσες απώλειες είναι σημαντικές και πολλές φορές μεγαλύτερες από τις απώλειες λόγω τριβών. Οι τοπικές διαταραχές της ροής προκαλούνται από τις γεωμετρικές μεταβολές αγωγών σταθερής διατομής, όταν υπάρχουν οποιοδήποτε είδους εμπόδια στη ροή, όπως είναι τα καμπύλα τμήματα, οι στενώσεις, οι πλατύνσεις, τα διαφράγματα και γενικά ότι είδους εξαρτήματα παρεμβάλλονται στη ροή μας. Έτσι κατά τη διεύθυνση της ροής και σε σχετικά μικρό μήκος, δημιουργείται στροβιλώδης κυκλοφορία στην οποία οφείλονται κυρίως οι τοπικές απώλειες. Αυτές είναι δυνατόν να εκφραστούν με τη σχέση :

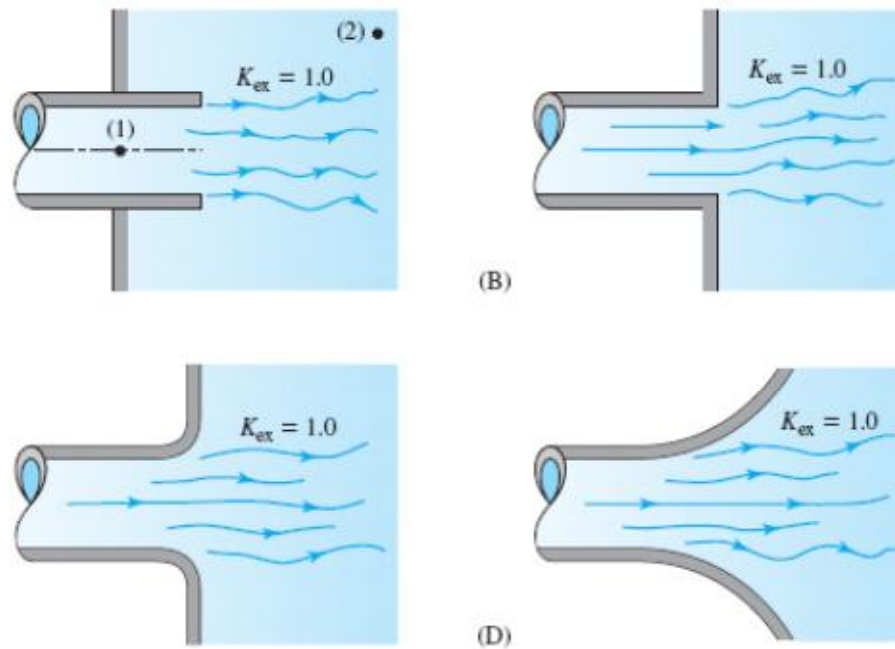
$$\Delta H_T = \frac{K u^2}{2g} \quad (3)$$

όπου u είναι η ταχύτητα του ρευστού σε m/s , K είναι ο συντελεστής απωλειών του εξαρτήματος και g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας σε m/s^2 .

Τέλος για να γίνουν πιο κατανοητές οι τοπικές απώλειες θα αναφερθούμε σε κάποιες εικόνες. Σε γενικές γραμμές, μικρές κατασκευαστικές λεπτομέρειες επιφέρουν σημαντικές αλλαγές στον συντελεστή απωλειών, με αποτέλεσμα να αλλάζουν σημαντικά την μορφή των γραμμών ροής. Στη συνέχεια θα δούμε κάποια σχήματα με μεγάλες αλλαγές στις γραμμές ροής και στο K .



Σχήμα 1: Μεγάλες αλλαγές στο συντελεστή K ανάλογα με τη γεωμετρία του εξαρτήματος



Σχήμα 2: Μικρές αλλαγές στις γραμμές ροής και στο K

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΡΕΥΣΤΩΝ - ΟΡΙΣΜΟΙ

1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Στο παρών κεφάλαιο θα κάνουμε μια αναφορά στο με τι ασχολείται η επιστήμη της μηχανικής ρευστών. Επίσης θα αναφερθούμε σε κάποιους σημαντικούς ορισμούς όπως η πυκνότητα, η κινητική ενέργεια, το ειδικό βάρος κ.α. Στο τέλος αυτού του κεφαλαίου θα αναφέρουμε τα είδη των μανόμετρων και τους τρόπους μέτρησης της πίεσης.

1.2 ΣΥΝΤΟΜΟ ΙΣΤΟΡΙΚΟ ΤΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΩΝ

Από καιρό σε καιρό ανακαλύπτουμε όλο και περισσότερα στοιχεία για τη γνώση των αρχαίων πολιτισμών για ρευστά και ιδιαίτερα στους τομείς των αρδευτικών καναλιών και των ιστιοφόρων. Οι ρωμαίοι γνώριζαν καλά τα υδραγωγεία τους και τα λουτρά πολλά από τα οποία κατασκευάστηκαν τον τέταρτο αιώνα π.Χ. και μερικά από αυτά λειτουργούν ακόμη και σήμερα. Οι έλληνες είχαν κάνει αξιοσημείωτες μετρήσεις από τις οποίες η πιο γνωστή είναι εκείνη του Αρχιμήδη ο οποίος ανακάλυψε και διατύπωσε τις αρχές της άνωσης κατά τον τρίτο αιώνα π.Χ. Δεν γνωρίζουμε προόδους για την κατανόηση της ροής μέχρι την εποχή του Leonardo da Vinci ο οποίος πραγματοποίησε πειράματα, εξέτασε και κατέγραψε συμπεράσματα για κύματα, δίνες και γραμμές ροής, ακόμα και για πτήσεις, συνείσφερε στη μονοδιάστατη εξίσωση διατήρησης της μάζας. Ο Isaac Newton διατυπώνοντας τους νόμους της κίνησης και το νόμο του ιξώδους και αναπτύσσοντας επιπλέον το διαφορικό λογισμό, άνοιξε την πύλη της γνώσης που οδήγησε στα μεγάλα επιτεύγματα της μηχανικής ρευστών.

Χρησιμοποιώντας τους νόμους του Νεύτωνα, διάφοροι μαθηματικοί του 18ου αιώνα επέλυσαν πολλά προβλήματα ροών χωρίς τριβή (με μηδενικό ιξώδες). Ωστόσο οι περισσότερες ροές διέπονται από ιξώδεις επενέργειες και οι μηχανικοί του 17ου και του 18ου αιώνα κατέδειξαν ότι οι επιλύσεις ροών χωρίς ιξώδες ήταν κατάλληλες και με εκτέλεση πειραμάτων βρήκαν εξισώσεις, θεμελιώνοντας έτσι την επιστήμη της υδραυλικής. Προς το τέλος του 19ου αιώνα αναγνωρίστηκε η σημαία των αδιάστατων αριθμών και η συσχέτιση τους με τον τυρβασμό και γεννήθηκε η διαστατική ανάλυση. Το 1904 ο Ludwig Prandtl παρουσίασε μια σημαντική εργασία όπου τα ροϊκά πεδία

ρευστών με μικρά ιξώδη είναι δυνατό να διακριθούν σε δυο ζώνες, μια λεπτή, όπου κοντά στις στερεές επιφάνειες αναπτύσσεται ένα οριακό στρώμα που εξαρτάται από το ιξώδες και μια ουσιαστικά χωρίς ιξώδες εξωτερική ζώνη μακριά από τα σύνορα. Έτσι επεξηγήθηκαν πολλά ως τότε παράδοξα και δόθηκε η δυνατότητα στους μετέπειτα μηχανικούς να αναλύσουν πιο σύνθετες ροές. Πάντως ακόμα και σήμερα δεν διαθέτουμε πλήρη θεωρία για τη φύση της τυρβώδους ροής και η σύγχρονη ρευστομηχανική εξακολουθεί να αποτελεί συνδυασμό πειραματικών αποτελεσμάτων και της θεωρίας.

1.3 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΩΝ

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 αναπνοής 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 ή για να δώσουν πληροφορίες, συμπληρωματικά στη μαθηματική ανάλυση. Το τελικό αποτέλεσμα 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.

1.4 ΔΙΑΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΥΓΡΟΥ ΚΑΙ ΣΤΕΡΕΟΥ

Τα μόρια ενός **στερεού σώματος** βρίσκονται πιο κοντά μεταξύ τους από του υγρού. Οι ελκτικές δυνάμεις μεταξύ των μορίων ενός στερεού σώματος είναι τόσο μεγάλες που το στερεό τείνει να διατηρήσει τη μορφή του. Αυτό δεν συμβαίνει και στα υγρά, όπου οι ελκτικές δυνάμεις μεταξύ των μορίων είναι μικρότερες. Κάθε ιδεώδες ελαστικό σώμα θα παραμορφωθεί αν σ'αυτό ασκηθεί φορτίο και μόλις αφαιρεθεί το φορτίο θα επανέλθει στην αρχική του κατάσταση. Ορισμένα στερεά είναι πλαστικά. Αυτά παραμορφώνονται εξαιτίας της δράσης σημαντικού φορτίου και η παραμόρφωση συνεχίζεται όσο ασκείται το φορτίο, με την παραδοχή ότι το υλικό δεν θα σπάσει. Η παραμόρφωση όταν αφαιρεθεί το φορτίο, αλλά το πλαστικό στερεό δεν επιστρέφει στην αρχική του κατάσταση. Οι διαμοριακές δυνάμεις συνοχής σε ένα ρευστό δεν είναι αρκετά μεγάλες για να συγκρατήσουν τα διάφορα σωματίδια του ρευστού μαζί. Επομένως κάθε ρευστό θα ρέει εξαιτίας της δράσης και της πιο μικρής τάσης και η ροή θα συνεχίζεται όσο θα είναι παρούσα η τάση.

1.5 ΔΙΑΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΥΓΡΟΥ ΚΑΙ ΑΕΡΙΟΥ

Κάθε **ρευστό** μπορεί να είναι είτε **αέριο** είτε **υγρό**. Τα μόρια ενός υγρού είναι πολύ περισσότερο απομακρυσμένα μεταξύ τους από ότι τα μόρια ενός αερίου. Εξαιτίας αυτού τα αέρια είναι πολύ συμπιεστά και όταν κάθε εξωτερική πίεση εκλείπει τείνουν να εξαπλωθούν απεριόριστα. Άρα ένα αέριο βρίσκεται σε ισορροπία μόνο όταν είναι πλήρως εγκλωβισμένο σε ένα χώρο. Ένα υγρό είναι σχετικά ασυμπίεστο και αν όλη η πίεση, εκτός από την πίεση υδροποίησης εκλείψει, η συνοχή μεταξύ των μορίων τα συγκρατεί κοντά μεταξύ τους, έτσι ώστε το υγρό δεν εξαπλώνεται απεριόριστα. Επομένως, τα υγρά είναι δυνατό να έχουν ελεύθερη επιφάνεια, δηλαδή μια επιφάνεια στην οποία δεν ασκείται άλλη πίεση εκτός από την πίεση υδροποίησης. **Ατμός** είναι ένα αέριο του οποίου η θερμοκρασία και η πίεση είναι τέτοιες ώστε να βρίσκεται κοντά στην υγρή φάση. Έτσι, ο υδρατμός π.χ. δεν απέχει και πολύ από την κατάσταση του νερού. Τα αέρια μπορούν να οριστούν σαν υπέρθερμοι ατμοί, το οποίο σημαίνει, ότι η κατάσταση τους απέχει πολύ από την υγρή φάση. Έτσι ο αέρας θεωρείται αέριο γιατί η κατάσταση του κανονικά απέχει πολύ από εκείνη του υγρού αέρα. Ο όγκος ενός αερίου ή ατμού επηρεάζεται πολύ από αλλαγές της πίεσης ή της θερμοκρασίας ή και των δυο. Επομένως είναι συνήθως αναγκαίο να λαμβάνουμε υπόψη τις μεταβολές του όγκου και της θερμοκρασίας όταν ασχολούμαστε με αέρια και ατμούς. Όταν περιλαμβάνονται σημαντικές αλλαγές θερμοκρασίας ή φάσης στη μελέτη ατμών και αερίων, το πράγμα εξαρτάται πολύ από θερμικά φαινόμενα (θερμοδυναμική). Έτσι, ρευστομηχανική και θερμοδυναμική αλληλοσχετίζονται.

1.6 ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ

Τα μόρια του ρευστού χωρίζονται μεταξύ τους από κενά που είναι μεγαλύτερα από τα ίδια τα μόρια. Τα μόρια αυτά βρίσκονται σε συνεχή τυχαία κίνηση ακόμα και αν φαινομενικά (μακροσκοπικά) το ρευστό είναι ακίνητο. Ακόμα και αν τα μόρια βρίσκονται κοντά το ένα με το άλλο, οι ταχύτητες τους είναι διαφορετικές, ιδιότητες συνεχών ρευστών θα παρουσιάσουμε σύντομα παρακάτω ορισμένες εκ των οποίων είναι: η πυκνότητα, το ειδικό βάρος, το ιξώδες, η επιφανειακή τάση κ.α..

1.6.1 πυκνότητα

Η πυκνότητα ρ ορίζεται σαν μάζα ανά μονάδα όγκου. Μονάδα μέτρησης είναι kg/m^3 . Η πυκνότητα εξαρτάται από την περιεκτικότητα σε διάφορα διαλυμένα σε αυτό άλατα και στερεά σωματίδια την θερμοκρασία και ενδεχομένως την πίεση.

1.6.2 ειδικό βάρος

Το ειδικό βάρος γ ορίζεται σαν βάρος ανά μονάδα όγκου. Μονάδα μέτρησης είναι το N/m^3 . Τα δύο παραπάνω μεγέθη συνδέονται με την σχέση

$$\gamma = \rho \cdot g \quad (1.1)$$

Όπου: g = επιτάχυνση της βαρύτητας σε m/s^2

ρ = πυκνότητα του ρευστού σε kg/m^3

1.6.3 ιξώδες

Το ιξώδες από εμπειρική παρατήρηση ορίζεται σαν την αντίσταση στην παραμόρφωση ενός ρευστού και εξαρτάται από το είδος του ρευστού. Για την ποσοτική περιγραφή της παραμόρφωσης αυτής εισάγουμε την φυσική ιδιότητα που λέγεται ιξώδες και συμβολίζεται διεθνώς με το ελληνικό γράμμα μ .

1.6.3.1 πειραματικός προσδιορισμός του ιξώδους

Έχουμε μία λεκάνη με υγρό βάθους h . Στην επιφάνεια του ρευστού κινείται μία πλάκα με ταχύτητα U_0 . Με βάση την πειραματική αυτή διάταξη μπορούμε να προσδιορίσουμε το ιξώδες συναρτήσει των υπολοίπων μεγεθών της κίνησης του ρευστού. Αν η πλάκα κινείται με σταθερή ταχύτητα U_0 και η δύναμη που εφαρμόζουμε απάνω της είναι F , τότε η διατμητική τάση που ασκείται πάνω στην επιφάνεια της πλάκας σε επαφή με το υγρό είναι $\tau = F/S$. Το ρευστό το οποίο έρχεται σε επαφή με την πλάκα κινείται με την ίδια ταχύτητα με αυτήν. Το ρευστό το οποίο είναι σε επαφή με τον πυθμένα είναι ακίνητο. Για περιπτώσεις που η ταχύτητα U_0 είναι αρκετά μικρή η ενδιάμεση κατανομή της ταχύτητας είναι γραμμική $U(y)/y = U_0/h$. Αξιωματικά ορίζουμε το ιξώδες του ρευστού από την σχέση: $\tau = \mu U_0 / h = \mu dU/dy$. Η σχέση αυτή ονομάζεται νόμος του Νεύτωνα για το ιξώδες. Ρευστά για τα οποία ισχύει νόμος αυτός ονομάζονται **Νευτώνεια ρευστά**. Τα περισσότερα ρευστά στην φύση μπορούν να χαρακτηριστούν σαν Νευτώνεια. Το κινηματικό ιξώδες ν ορίζεται σαν $\nu = \mu/\rho$. Έχει διαστάσεις επιφάνεια / χρόνος. Όσον αφορά τα υγρά, το ιξώδες μειώνεται με την θερμοκρασία, ενώ για τα αέρια συμβαίνει το αντίθετο

1.7 ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΤΑΣΗ

Στο εσωτερικό ενός υγρού ένα μόριο έλκεται με τον ίδιο τρόπο προς όλες τις κατευθύνσεις από τα άλλα μόρια που το περιβάλλουν. Στην διεπιφάνεια μεταξύ του νερού και του αέρα η παραπάνω κατάσταση ισορροπίας δεν ισχύει. Η επιφάνεια του υγρού συμπεριφέρεται σαν μία ελαστική μεμβράνη που βρίσκεται υπό πίεση. Αιτία για αυτήν την συμπεριφορά είναι η επιφανειακή τάση σ . Ορίζεται σαν η δύναμη που δρα σε μία γραμμή η οποία αποτελεί το όριο μίας ελεύθερης επιφάνειας. Η επιφανειακή τάση έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση της ελεύθερης επιφάνειας υγρού (Μία σταγόνα νερού τείνει να πάρει σφαιρικό σχήμα). Η επιφανειακή τάση επιτρέπει στο νερό να ανεβαίνει από το έδαφος στα φυτά και τα δέντρα, ανυψώνει την εδαφική υγρασία στο έδαφος και αποτελεί πηγή σφαλμάτων σε μερικά πειράματα υπό κλίμακα. Προφανώς δεν εμφανίζεται μόνο στην διεπιφάνεια νερού και αέρα, αλλά στην διεπιφάνεια δύο μη αναμίξιμων ρευστών με διαφορετικές ιδιότητες. Αν βυθίσουμε έναν σωλήνα διαμέτρου d σε ένα δοχείο με νερό παρατηρούμε ότι το νερό ανεβαίνει στον σωλήνα. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στις επιφανειακές τάσεις. Για να υπολογίσουμε το ύψος ανύψωσης πρέπει να λάβουμε υπόψη μας την ισορροπία μεταξύ δυνάμεων βαρύτητας και επιφανειακών τάσεων κατά την κατεύθυνση την κατακόρυφο. Οι δυνάμεις οι οποίες οφείλονται στην επιφανειακή τάση (έλξη προς τα επάνω) ισούνται με

$$F_{\sigma} = \sigma \pi d \cos\theta \quad (1.2)$$

Όπου: θ = γωνία μεταξύ του επιφάνειας νερού κοντά στα τοιχώματα και την κατακόρυφο διεύθυνσης, σ είναι η τάση σε N/m^2 , d είναι η διάμετρος σε m^2 και π η παράμετρος που είναι 3.14.

Οι δυνάμεις βαρύτητας ισούνται με τον όγκο νερού επί το ειδικό βάρος:

$$F_g = \rho g \pi / 4 d^2 \Delta h \quad (1.3)$$

Όπου ρ είναι η πυκνότητα σε kg/m^3 , g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας σε m/s^2 , d είναι η διάμετρος σε m^2 , π η παράμετρος που είναι 3.14 Δh είναι η διαφορά της η τελική στάθμης από την αρχική.

Εξισώνοντας τις δυνάμεις έχουμε:

$$\Delta h = 4\sigma \cos\theta / \rho g d. \quad (1.4)$$

Η γωνία θ μπορεί να θεωρηθεί μηδέν για νερό. Για κανονικές συνθήκες η ανύψωση του νερού είναι αντιστρόφως ανάλογη της διαμέτρου του σωλήνα. Γι' αυτό τα φαινόμενα στα οποία η επιφανειακή τάση παίζουν σημαντικό ρόλο ονομάζονται συχνά τριχοειδή φαινόμενα (Οι διάμετροι των αγωγών είναι πολύ μικροί). Από την

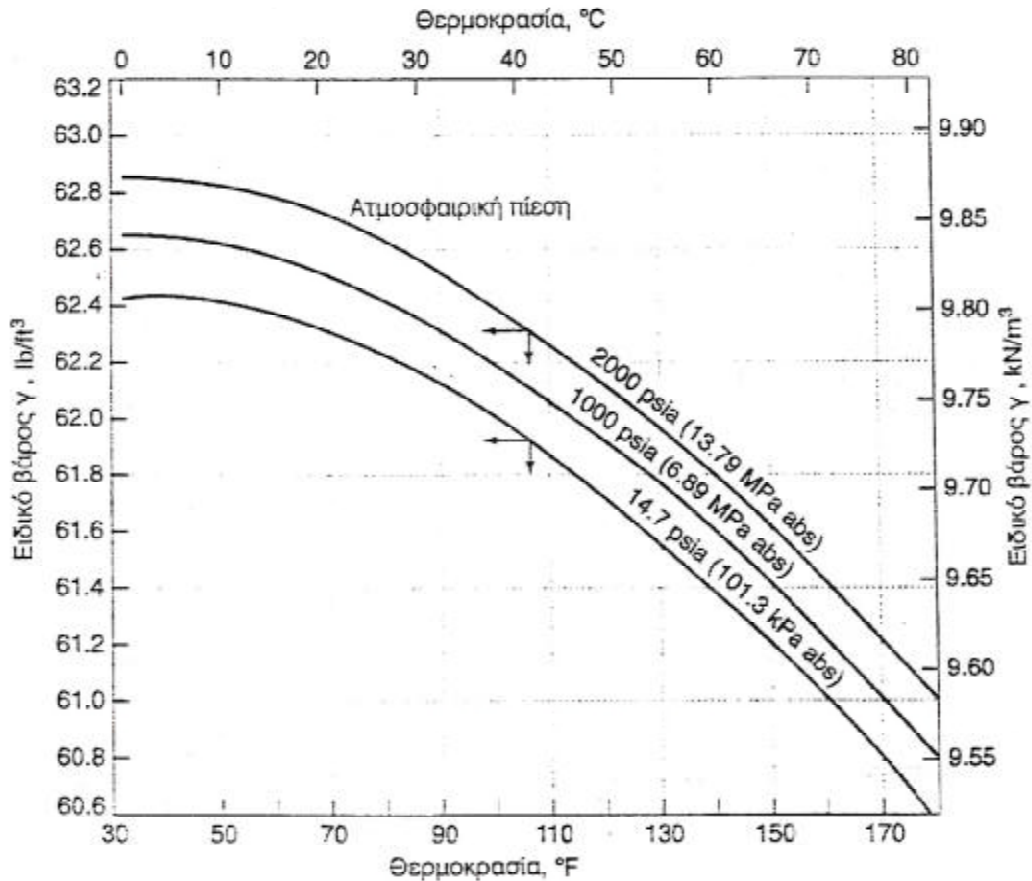
εμπειρία μας είναι γνωστό ότι η ανύψωση υγρού είναι πιο σημαντική σε κύβους από ζάχαρη απ'ότι σε ένα καλαμάκι.

1.8 ΕΙΔΙΚΟΣ ΟΓΚΟΣ

Ειδικός όγκος U είναι ο όγκος που καταλαμβάνει η μονάδα μάζας του ρευστού. Χρησιμοποιείται συνήθως για τα αέρια και συνήθως εκφράζεται σε m^3/kg . Ο ειδικός όγκος είναι το αντίστροφο της πυκνότητας. Έτσι: $U = 1/\rho$. Σχετική πυκνότητα s ενός υγρού είναι ο αδιάστατος λόγος $S_{υγρού} = V_{υγρού} / V_{νερού}$ (στην τυπ. θερμοκρασία) της πυκνότητας του ως προς την πυκνότητα του καθαρού νερού, σε μια σταθερή δεδομένη θερμοκρασία. Οι φυσικοί χρησιμοποιούν τους $40C^0$ ($39,2 F$) σαν τη σταθερά αυτή, αλλά οι μηχανικοί συχνά χρησιμοποιούν τους $15,50C^0$ ($60 F$). Η πυκνότητα του νερού στους $40C^0$ είναι $1,00 g/cm^3$, ισοδύναμη με $1000Kg/m^3$. επομένως η σχετική πυκνότητα έχει την ίδια αριθμητική τιμή για ένα υγρό με την πυκνότητα του εκφρασμένη σε gr/ml ή mg/m^3 .

1.9 ΣΧΕΤΙΚΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ

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.



Σχήμα: 1.1: Ειδικό βάρος γ καθαρού νερού συναρτήσει της θερμοκρασίας και της πίεσης για $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

1.10 ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Η δυναμική ενέργεια ενός ρευστού σωματιδίου εξαρτάται από το υψόμετρο του πάνω από ένα επίπεδο αναφοράς που το επιλέγουμε όπως θέλουμε. Συνήθως μας ενδιαφέρουν μόνο υψομετρικές διαφορές και για αυτό η θέση του επιπέδου αναφοράς καθορίζεται μόνο από λόγους εύκολων υπολογισμών. Ένα ρευστό σωματίδιο βάρους W που βρίσκεται σε απόσταση z πάνω από το επίπεδο αναφοράς έχει δυναμική ενέργεια Wz . Άρα, η δυναμική του ενέργεια ανά μονάδα βάρους είναι z , μετρημένη σε $\text{N}\cdot\text{m}/\text{N}=\text{m}$. Η δυναμική ενέργεια του σωματιδίου ανά μονάδα μάζας είναι gz , μετρημένη σε m^2/s^2 . Η δυναμική του ενέργεια ανά μονάδα όγκου είναι:

$$p * g * z \quad (1.5)$$

μετρημένη σε N/m^2 .

1.11 ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Εσωτερική ενέργεια είναι αποθηκευμένη ενέργεια που οφείλεται στη μοριακή ή στην εσωτερική κατάσταση της ύλης. Μπορεί να είναι αποθηκευμένη με διάφορες μορφές στις οποίες περιλαμβάνονται η θερμική, η πυρηνική, η χημική και η ηλεκτροστατική. Εδώ θα θεωρήσουμε μόνο την εσωτερική θερμική ενέργεια (θερμότητα), η οποία οφείλεται στην κίνηση των μορίων και στις ελκτικές δυνάμεις που ασκούνται μεταξύ αυτών. Τα εγχειρίδια θερμοδυναμικής περιγράφουν πλήρως το θέμα αυτό. Τα πειράματα έχουν καταδείξει ότι η εσωτερική θερμική ενέργεια είναι κυρίως συνάρτηση της θερμοκρασίας. Για υγρά και στερεά σώματα η μόνη εξαίρεση προκύπτει όταν αυτά πλησιάζουν την ατομική φάση, οπότε η εσωτερική ενέργεια εξαρτάται επίσης από τον ειδικό όγκο, ή την πίεση. Όταν ένα αέριο συμπεριφέρεται ως τέλειο αέριο, αυτό σημαίνει επίσης ότι η εσωτερική θερμική είναι συνάρτηση μόνο της θερμοκρασίας. Μπορούμε να εκφράσουμε την εσωτερική θερμική ενέργεια συναρτήσει της ενέργειας ανά μονάδα μάζας ή συναρτήσει της ενέργειας ανά μονάδα βάρους.

1.12 ΚΙΝΗΤΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Ένα σώμα μάζας m που κινείται με ταχύτητα u έχει κινητική ενέργεια

$$K = \frac{1}{2} m * u^2 \quad (1.6)$$

Έτσι αν ένα ρευστό έρεε κατά τέτοιο τρόπο όπου όλα τα σωματίδια του να κινούνταν με την ίδια ταχύτητα, η κινητική του ενέργεια θα ήταν επίσης $\frac{1}{2} m * u^2$.

1.13 ΣΥΜΠΙΕΣΤΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΥΓΡΩΝ

Η συμπιεστότητα (μεταβολή του όγκου εξαιτίας μεταβολής της πίεσης) ενός υγρού είναι αντιστρόφως ανάλογη προς το **μέτρο ελαστικότητας του όγκου** (volume modulus of elasticity), γνωστό επίσης και ως **μέτρο διόγκωσης** (bulk modulus). Αυτό το μέτρο ορίζεται από την σχέση $E_v = -u (dp/du) = -(u/du) dp$ Όπου: u = ειδικός όγκος και p = πίεση.

Επειδή ο λόγος u/du είναι αδιάστατος, οι μονάδες των E_u και p είναι ίδιες. Το μέτρο διόγκωσης είναι κάτι ανάλογο με το μέτρο ελαστικότητας των στερεών. Ωστόσο, για τα υγρά ορίζεται με βάση τον όγκο και όχι όπως στη γνωστή μονοδιάστατη σχέση τάσεων-τροπών για τα στερεά σώματα. Στα περισσότερα τεχνικά προβλήματα το μέτρο διόγκωσης ακριβώς ή κοντά στην τιμή της ατμοσφαιρικής πίεσης είναι το μόνο που μας ενδιαφέρει. Το μέτρο διόγκωσης αποτελεί ιδιότητα του ρευστού και για τα υγρά είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας και της πίεσης.

1.14 ΑΤΜΙΤΙΚΗ ΠΙΕΣΗ ΤΩΝ ΥΓΡΩΝ

Όλα τα υγρά τείνουν να εξατμισθούν ή να εξαερωθούν, και το κάνουν προωθώντας μόριά τους στο χώρο που βρίσκεται πάνω από την επιφάνειά τους. Αν αυτός ο χώρος είναι περιορισμένος, η μερική πίεση που ασκείται από τα μόρια αυξάνει μέχρις ότου ο ρυθμός επανεισόδου των μορίων στο υγρό γίνει ίσο με το ρυθμό εκουγής των. Στην κατάσταση ισορροπίας, την πίεση που έχει ο ατμός την ονομάζουμε πίεση κορεσμού. Η μοριακή δραστηριότητα αυξάνει με τη θερμοκρασία, και τη μείωση της πίεσης και το ίδιο ισχύει για την κορεστική ατμοπίεση. Σε κάθε δοσμένη θερμοκρασία, αν η πίεση στην επιφάνεια του υγρού πέσει κάτω από την κορεστική ατμοπίεση κορεσμού, εμφανίζεται εξάτμιση με πολύ γρήγορο ρυθμό, γνωστής ως **βρασμός**. Έτσι, μπορούμε να αναφερόμαστε στην κορεστική ατμοπίεση ως **πίεση βρασμού** για δοσμένη θερμοκρασία και αυτή έχει πρακτική σημασία για τα υγρά. Τη γρήγορη ατμοποίηση και επανασυμπύκνωση ενός υγρού καθώς αυτό περνά γρήγορα από μία περιοχή χαμηλής απόλυτης πίεσης την ονομάζουμε **σπηλαίωση**.

1.15 ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ

Κάθε σωματίδιο έχει ενέργεια εξαιτίας της πίεσης του πάνω από το πεδίο αναφοράς και μάλιστα συνήθως πάνω από την ατμοσφαιρική πίεση παρότι δεν την ονομάζουμε πιεστική ενέργεια. Η πίεση αυτή είναι:

$$p = g * h \quad (1.7)$$

και επομένως το ύψος του υγρού το οποίο παράγει μια τέτοια πίεση, το λεγόμενο «πιεζομετρικό φορτίο» είναι $h = p/g$, όπως βλέπουμε οι μονάδες του p/g είναι $m = N*m/N$ δηλαδή και πάλι ενέργεια ανά μονάδα βάρους.

1.16 ΜΕΤΡΗΣΗ ΠΙΕΣΕΩΣ

Υπάρχουν πολλοί τρόποι με τους οποίους μπορεί να μετρηθεί η πίεση ενός ρευστού, που βρίσκεται σε ηρεμία ή κίνηση. Στους τρόπους αυτούς λαμβάνεται υπόψη το γεγονός ότι η πίεση, που εφαρμόζεται σε μία ορισμένη επιφάνεια ενός υλικού, είναι η αιτία εμφανίσεως δυνάμεων και τάσεων και κατά συνέπεια παραμορφώσεων του υλικού. Τα αποτελέσματα αυτά της πίεσεως μπορούν να μετρηθούν με πολλούς τρόπους:

1. Με ισορροπία δυνάμεων.
2. Με το ύψος μιας στήλης υγρού (Μανόμετρο με υγρό).
3. Με τη μέτρηση της παραμορφώσεως (Μηχανικό μανόμετρο).

Η ισορροπία των δυνάμεων συνήθως χρησιμοποιείται για τη βαθμολόγηση ή τη ρύθμιση των οργάνων μετρήσεως πίεσεως παρά για τις καθημερινές μετρήσεις των πιέσεων όργανα, λοιπόν, που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της πίεσεως ενός ρευστού λέγονται γενικό μανόμετρα. Ο όρος μανόμετρα συνηθίζεται περισσότερο για τα όργανα εκείνα που χρησιμοποιούν στήλη υγρού για τη μέτρηση της πίεσεως. Ο όρος μηχανικό ή μεταλλικό μανόμετρο είναι εκείνος που η αρχή λειτουργίας του στηρίζεται στις παραμορφώσεις κάποιου υλικού (συνήθως μετάλλου) που προκαλεί η πίεση που θέλουμε να μετρήσουμε. Ειδικότερα τα μανόμετρα που μετρούν την ατμοσφαιρική πίεση λέγονται βαρόμετρα.

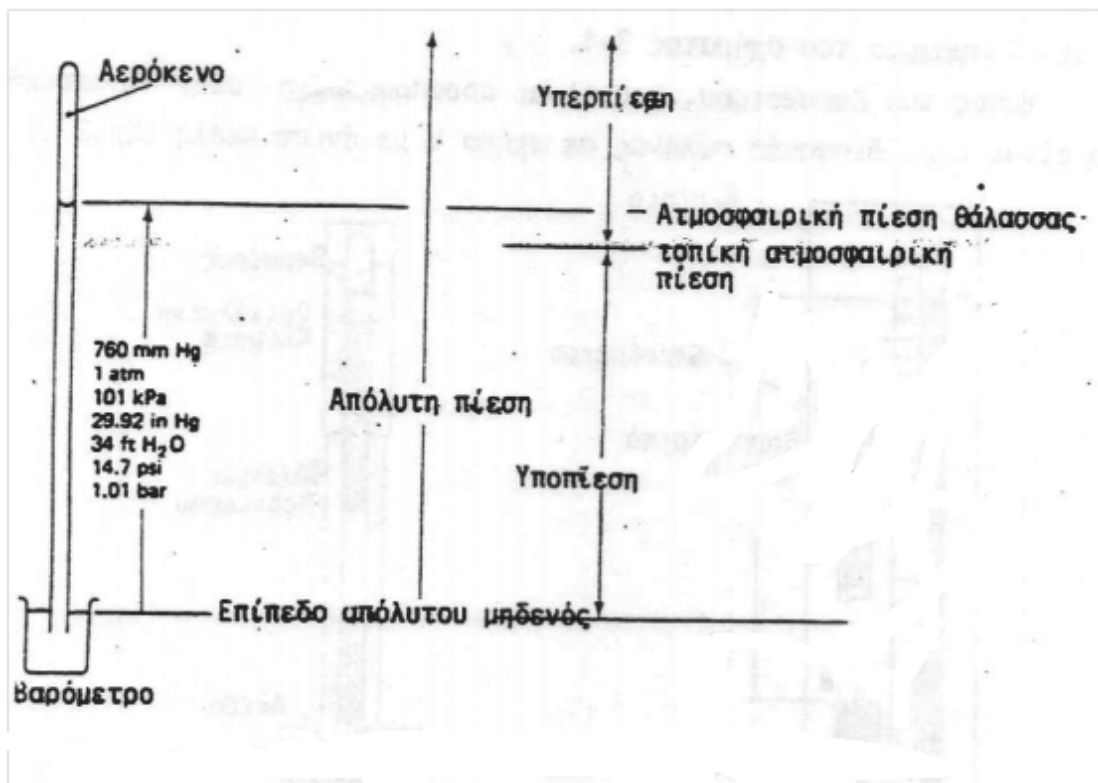
1.16.1 Βαρόμετρα

Το βαρόμετρο είναι ένα όργανο μετρήσεως της πίεσεως, που χρησιμοποιείται ευρύτατα όχι μόνο στα επιστημονικά εργαστήρια αλλά και σε πολλά σπίτια. Στα σπίτια χρησιμοποιείται περισσότερο για την πρόβλεψη των συνθηκών του καιρού, ενώ στο εργαστήριο για να δείχνει την απόλυτη πίεση που έχει η ατμόσφαιρα (δηλαδή, το αέρινο περίβλημα της γης) στο μέρος του εργαστηρίου. Η ατμοσφαιρική πίεση σένα σημείο (γενικότερα σένα τοπίο την εννοούμε ίση με το βάρος μιας στήλης της ατμόσφαιρας, που έχει διατομή ίση με τη μονάδα επιφάνειας και ύψος, το ύψος της ατμόσφαιρας από το σημείο εκείνο και προς τα επάνω. Γι'αυτό η ατμοσφαιρική πίεση λέγεται και βαρομετρική πίεση. Οπότε τα όργανα που μετρούν την ατμοσφαιρική ή βαρομετρική πίεση λέγονται βαρόμετρα. Τα βαρόμετρα διακρίνονται σε δύο τύπους: τα υδραργυρικά βαρόμετρα, που η κατασκευή τους στηρίζεται στο πείραμα Torricelli και τα μεταλλικά βαρόμετρα, που η αρχή τους στηρίζεται στις παραμορφώσεις που προκαλεί η ατμοσφαιρική πίεση σε μεταλλικό αερίων δοχείο με πτυχωσεις. Τα τελευταία χρησιμοποιούνται κυρίως στα σπίτια. Ο Torricelli (1608-1647) ήταν ο πρώτος που ανακάλυψε ότι η ατμοσφαιρική πίεση μπορεί να υποβαστάζει μια στήλη ενός υγρού και γι αυτό το ύψος της στήλης αυτής του υγρού μετράει την ατμοσφαιρική πίεση.

Το βαρόμετρο του Torricelli είναι ένας κλειστός διαφανής σωλήνας, που είναι αναποδογυρισμένος μέσα σε υδράργυρο κατά τέτοιο τρόπο, που να μην υπάρχει αέρας εντός αυτού, αλλά μόνο υδράργυρος. Η πίεση στο οριζόντιο επίπεδο, που περιέχει το σημείο A, θα είναι η ίδια παντού. Δηλαδή, η πίεση P_A , που εξασκεί ο ατμοσφαιρικός αέρας εκτός του σωλήνα θα είναι ίση με τη πίεση της στήλης του υδραργύρου, ήτοι,

$$P_A = \varepsilon h \quad (1.8)$$

(όπου ε είναι το ειδικό βάρος του υδραργύρου και h το ύψος της στήλης του μέσα στο αναποδογυρισμένο σωλήνα)



Σχήμα 1.2: Βαρόμετρο Torricelli – Απόλυτη και σχετική πίεση

Η πίεση των ατμών του υδραργύρου στο αερόκενο χώρο του πάνω μέρους του σωλήνα είναι αμελητέα. Η ατμοσφαιρική πίεση από το ορισμό της φαίνεται ότι μεταβάλλεται με το ύψος ενός τόπου από την επιφάνεια της θάλασσας. Πειραματικά βρέθηκε ότι στην επιφάνεια της θάλασσας το ύψος h είναι $h = 760\text{mmHg}$. Γι'αυτό η πίεση αυτή λέγεται ατμοσφαιρική πίεση της θάλασσας και γενικότερα, κανονική ατμοσφαιρική πίεση και εκφράζεται με

$$P=760 \text{ mm Hg} = 1 \text{ atm} = 101 \text{ KPa} = 1.01 \text{ bar} = 10.3 \text{ m H}_2\text{O}.$$

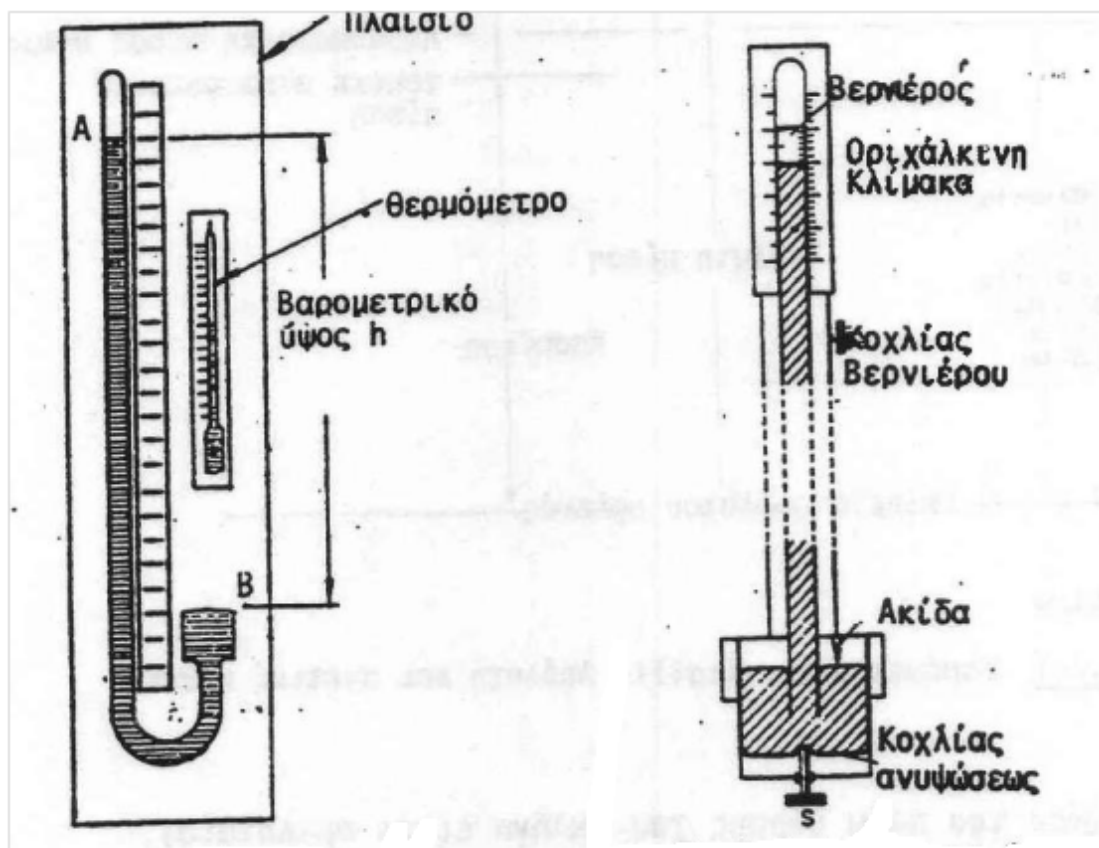
Η τοπική ατμοσφαιρική πίεση ενός τόπου εξαρτάται, εκτός από το υψόμετρο του τόπου από την επιφάνεια της θάλασσας, και από τις καιρικές συνθήκες. Η τοπική ατμοσφαιρική πίεση χρησιμοποιείται ως βάση για τη μέτρηση των πιέσεων στην τεχνική. Κάθε πίεση που εκφράζεται σαν διαφορά της τιμής της και της τοπικής ατμοσφαιρικής πίεσεως, λέγεται σχετική πίεση.

Ενώ οποιαδήποτε πίεση που εκφράζεται σαν διαφορά της τιμής της και της πίεσεως του απόλυτου κενού (δηλ. απόλυτο μηδέν), λέγεται απόλυτη πίεση .

Από τους παραπάνω ορισμούς φαίνεται αμέσως ότι,

$$P_{απολ} = P_{ατμ} + P_{σχ} \quad (1.9)$$

Όπου: $P_{σχ}$ = σχετική πίεση ως προς την τοπική ατμοσφαιρική πίεση $P_{ατμ}$. Η σχετική πίεση μπορεί να πάρει θετικές τιμές, οπότε λέγεται υπερπίεση ή αρνητικές τιμές οπότε λέγεται υποπίεση. Οι σχέσεις των πιέσεων προς το απόλυτο μηδέν και την τοπική ατμοσφαιρική πίεση φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα του σχήματος 1.3. Ο τύπος του βαρομέτρου που είναι προσαρμοσμένο στην «δραστική τράπεζα» είναι ένας διαφανής σωλήνας σε σχήμα U με άνισα σκέλη.



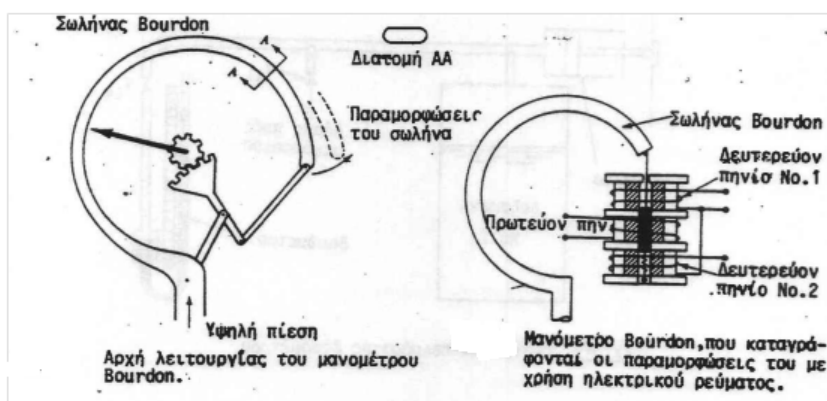
Σχήμα 1.3 : Απλό Βαρόμετρο(αριστερά) – Βαρόμετρο Fortin (δεξιά)

Το μεγαλύτερο σκέλος είναι κλειστό στο πάνω άκρο, ενώ το μικρότερο είναι ανοικτό. Όλος ο σωλήνας περιέχει υδράργυρο από το Α μέχρι το Β. Ο χώρος πάνω από το Α είναι το αερόκενο, που το είδαμε στο πείραμα Torricelli στην αρχή του κεφαλαίου 1.16.1.

Η ατμοσφαιρική πίεση δρα στο Β και υποβαστάζει τη στήλη h του υδραργύρου, όπως είδαμε και στο Βαρόμετρο Torricelli. Ένας άλλος τύπος βαρομέτρου είναι το βαρόμετρο Fortin, που είναι μια βελτίωση του βαρομέτρου Torricelli. Η λεκάνη που είναι αναποδογυρισμένος ο σωλήνας Torricelli μπορεί να μετακινηθεί κατακορύφως μέχρι την ακίδα με τη βοήθεια κοχλίας, ενώ οι ενδείξεις διαβάζονται με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια με την βοήθεια βερνιέρου (Σχ.1.3). Έτσι το βαρόμετρο αυτό είναι πολύ εύχρηστο και μετακινείται εύκολα.

1.16.2 Μανόμετρα τύπου Bourdon

Ένας συνηθισμένος τύπος μανομέτρου, πού η αρχή λειτουργίας του στηρίζεται στις παραμορφώσεις της πίεσεως σε μεταλλικό υλικό είναι το μανόμετρο Bourdon. Το μανόμετρο αυτό χρησιμοποιείται στη βιομηχανία για τη μέτρηση της πίεσεως υπεράνω από την ατμοσφαιρική πίεση, δηλαδή για τη μέτρηση της υπερπίεσεως. Η αρχή λειτουργίας του μανομέτρου Bourdon φαίνεται στο σχήμα 1.4. Το όργανο αυτό βασικά αποτελείται από ένα σωλήνα (το σωλήνα Bourdon όπως λέμε), που έχει διατομή πλατυσμένη και είναι κατασκευασμένος συνήθως από φωσφορούχο μπρούτζο. Η πίεση του ρευστού μεταφέρεται στο σωλήνα αυτό με την εισαγωγή του ρευστού εντός αυτού δια μέσου του κεντρικού σωλήνα. Η άκρη του σωλήνα τότε μετακινείται κατά ένα διάστημα ανάλογα προς την πίεση του ρευστού. Η κίνηση αυτή του σωλήνα παρασύρει σύστημα μοχλού, που περιστρέφει το δείκτη, που δείχνει τις ενδείξεις του οργάνου στην κλίμακα. Η ακρίβεια ενός τέτοιου οργάνου εξαρτάται από τον κατάλληλο σχεδιασμό του.

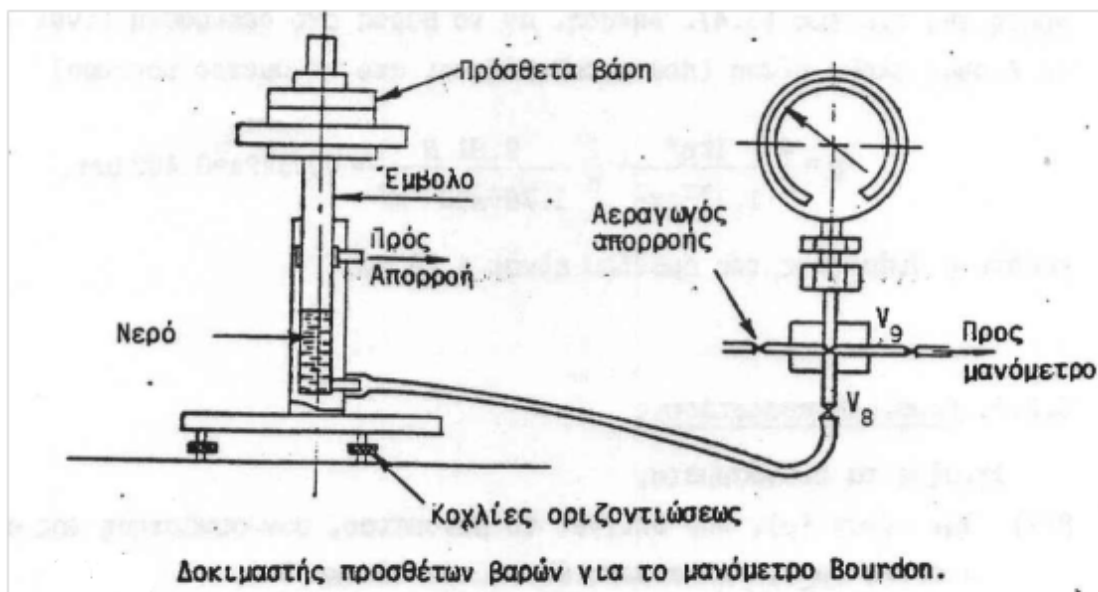


Σχήμα 1.4: Αρχή λειτουργίας μανομέτρου Bourdon(αριστερά)- Μανόμετρο Bourdon που καταγράφονται οι παραμορφώσεις του , με χρήση ηλεκτρικού ρεύματος(δεξιά)

Μια βελτίωση του μανόμετρου Bourdon είναι η καταγραφή της παραμορφώσεως του σωλήνα με ηλεκτρικό ρεύμα, που παρουσιάζεται με τη βοήθεια μαγνητικής αντιστάσεως, όπως φαίνεται στο σχήμα 3-6. Το μεγάλο πλεονέκτημα της βελτιώσεως αυτής είναι ότι μπορούμε να καταγράψουμε συνεχώς τις πιέσεις σε ταινία χαρτιού ή μαγνητικούς δίσκους. Όταν επιθυμούμε να ελέγξουμε την ακρίβεια ενός μανόμετρου Bourdon συνηθισμένη μέθοδος είναι να συγκρίνουμε τις μετρήσεις του με γνωστές πιέσεις με το δοκιμαστή προσθέτων βαρών, χρησιμοποιώντας για τη μεταβίβαση των πιέσεων νερό (ή λάδι). Ο δοκιμαστής αυτός αποτελείται από ένα κυλινδρικό δοχείο, όπου κινείται ελεύθερα ένα έμβολο, στη κορυφή του οποίου προσθέτουμε κάθε φορά βάρη (Σχ. 1.5). Το έμβολο πιέζει το υγρό με πίεση

$$P = \frac{B}{A} = \frac{4}{\pi} \frac{B}{D^2} \quad (1.9)$$

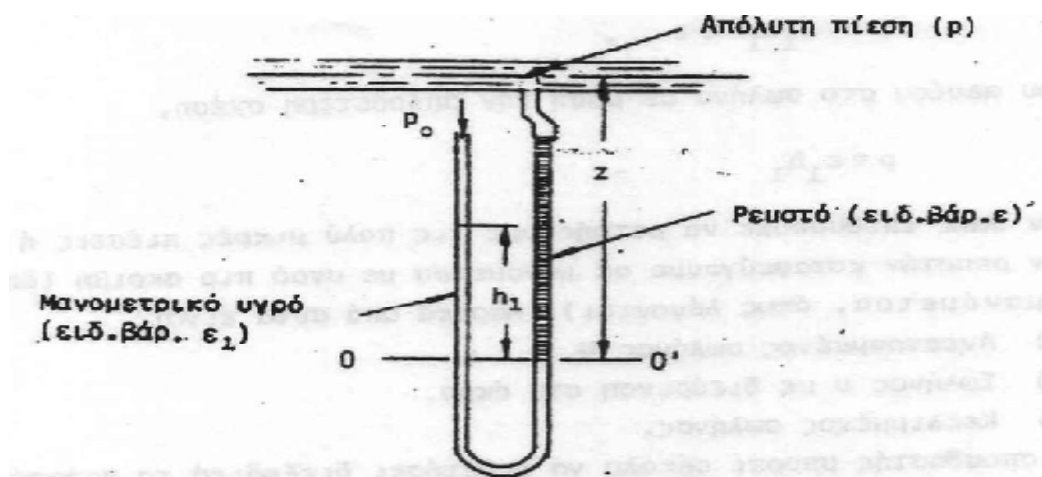
όπου B είναι το ολικό βάρος του εμβόλου και των προσθέτων βαρών και D η διάμετρος τού εμβόλου. Έτσι, μπορούμε να συγκρίνουμε τις ενδείξεις του μανόμετρου με τις ακριβείς πιέσεις του δοκιμαστού και να φτιάξουμε μια διορθωτική καμπύλη, που θα τη χρησιμοποιούμε για τη διόρθωση των τιμών του μανόμετρου όταν χρησιμοποιείται.



Σχημα:1.5

1.16.3 Μανόμετρα με υγρό

Για τη μέτρηση σχετικά μικρών πιέσεων χρησιμοποιούνται, τα μανόμετρα υγρού. Η χρήση ενός τέτοιου μανομέτρου είναι απλή. Ένα μανόμετρο με υγρό είναι ένα όργανο, με το οποίο μετριέται μια άγνωστη πίεση ρευστού (ή διαφορά πιέσεων ρευστών) εξισορροπώντας την με μια στατική στήλη ενός ή περισσοτέρων υγρών. Τέτοιου είδους μανόμετρα είναι πολύ απλά όργανα και μάλιστα φθηνά, γι'αυτό χρησιμοποιούνται ευρύτατα για τη μέτρηση σχετικά μικρών πιέσεων με μεγάλη ακρίβεια. Το ακριβές σχήμα ενός μανομέτρου με υγρό και το είδος του υγρού της στήλης (δηλαδή, του μανομετρικού υγρού, όπως λέμε) εξαρτάται από τις τιμές του πεδίου πιέσεων, που θέλουμε να μετρήσουμε. Το συνηθισμένο σχήμα ενός τέτοιου μανομέτρου είναι ένας διαφανής σωλήνας που είναι καμπυλομένος σε σχήμα U. Ένα απλό μανόμετρο με υγρό σχήματος U φαίνεται στο σχήμα 1.6 όπου το ένα άκρο του συνδέεται με σωλήνα, που περιέχει ρευστό (κινούμενο ή ακίνητο) άγνωστης πίεσεως p και ειδικού βάρους ϵ ενώ το άλλο άκρο είναι ανοικτό και είναι εκτεθειμένο στη ατμοσφαιρική πίεση $p_{\text{ατμ}}$.



Σχημα1.6: Απλό μανόμετρο υγρού για την μέτρηση της πίεσεως ρευστού στο κέντρο σωλήνα

Εξισώνοντας τις πιέσεις στο επίπεδο $00'$ και έχοντας υπόψη το βασικό νόμο της Υδροστατικής έχουμε

$$P = \epsilon Z = P_0 + \epsilon_1 h_1 \quad (1.10)$$

Οπότε η σχετική πίεση του ρευστού στο σωλήνα θα είναι

$$P_{\sigma} = P - P_0 = \varepsilon_1 h_1 - \varepsilon z \quad (1.11)$$

Στην περίπτωση που στο σωλήνα το ρευστό άγνωστης πίεσεως είναι αέριο το ειδικό βάρος του ρευστού της δεξιάς στήλης είναι πολύ μικρό ως προς το ειδικό βάρος του μανομετρικού υγρού (δηλ. $\varepsilon \ll \varepsilon_1$), οπότε ο όρος εz έχει αμελητέα τιμή, δίνει

$$P_{\sigma} = P - P_0 = \varepsilon_1 h_1 \quad (1.12)$$

Σημειώνεται ότι αν το μανόμετρο σχήματος U ήταν κλειστό στο ένα σκέλος του (στο Σχ.1-6 στο αριστερό σκέλος του), όπου θα σχημάτιζε αερόκενο (όπως στο πείραμα Torricelli), τότε δεν θα υπάρχει η ατμοσφαιρική πίεση P_0 στην Εξ.(1.10). Τότε, το μανόμετρο θα μετράει την απόλυτη πίεση του υγρού στο σωλήνα με βάση τη σχέση,

$$P = \varepsilon_1 h_1 - \varepsilon Z \quad (1.13)$$

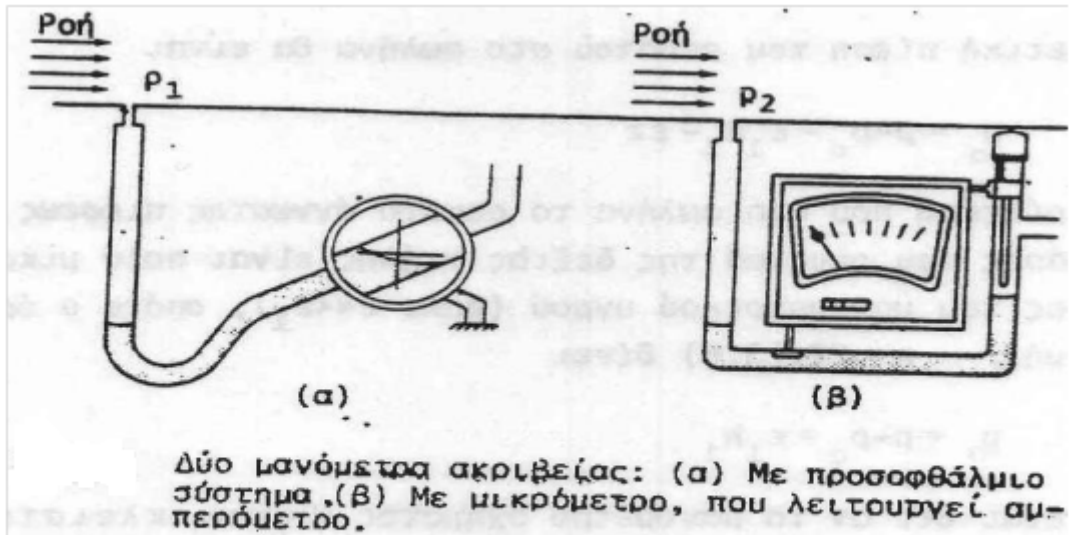
ενώ του αερίου στο σωλήνα με βάση την απλούστερη σχέση,

$$P = \varepsilon_1 h_1 \quad (1.14)$$

Αν όμως επιθυμούμε να μετρήσουμε τις πολύ μικρές πιέσεις ή διαφορές πιέσεων ρευστών καταφεύγουμε σε μανόμετρα με υγρό πιο ακριβή (δηλ. στα μικρομανόμετρα, όπως λέγονται). Μερικά από αυτά είναι:

- (1) Ανεστραμμένος σωλήνας U.
- (2) Σωλήνας U με διεύρυνση στα άκρα.
- (3) Κεκλιμένος σωλήνας.

Πάντως, πρέπει να τονίσουμε ότι με τα μανόμετρα μετρούμε πάντοτε τη στατική πίεση (είτε αυτή είναι απόλυτη είτε σχετική). Όταν μάλιστα μετρούμε τη στατική πίεση ενός κινούμενου ρευστού με ένα μανόμετρο, πρέπει να λαμβάνεται ειδική φροντίδα ώστε να μη διαταράσσεται η ροή του. Ο καλύτερος τρόπος είναι να συνδέεται το μανόμετρο στη στατική οπή, που είναι κάθετα στο σωλήνα με διάμετρο πολύ μικρή (περίπου 1mm) οπότε η ροή του ρευστού παραμένει σχεδόν αμετάβλητη. Στο σχήμα 1.7 φαίνεται η σύνδεση δύο συγχρόνων μανομέτρων σε μια ροή ρευστού για τη μέτρηση της στατικής πίεσεως με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια.



Σχήμα 1.7: Δυο μανόμετρα ακριβείας(α) Με προσοφθάλμιο σύστημα,(β) Με μικρόμετρο, που λειτουργεί αμπερόμετρο

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.

ΕΙΔΗ ΚΑΙ ΜΟΡΦΕΣ ΡΟΩΝ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναφερθούμε στα είδη και στις μορφές των ροών οι οποίες είναι πολύ χρήσιμες στο να κατανοήσει κανείς σε τη φάση βρίσκεται στο ρευστό μέσα στο σωλήνα.

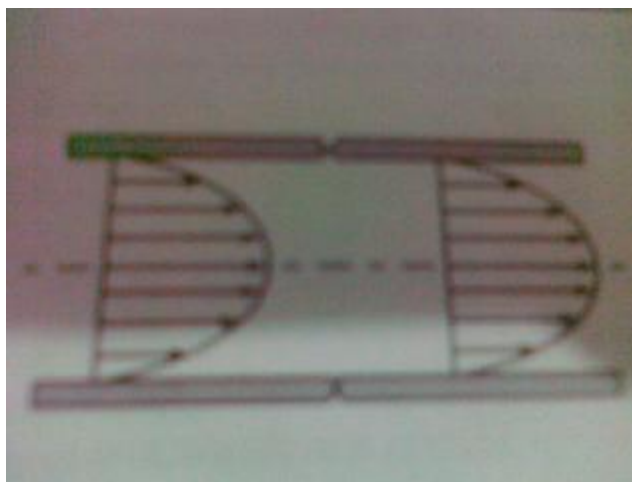
2.2 ΜΟΡΦΕΣ ΡΟΩΝ

2.2.1 Σταθερή ή μόνιμη και ασταθής ή μη μόνιμη

Σταθερή ή μόνιμη ροή ονομάζεται η ροή στην οποία η ταχύτητα σε κάποιο σημείο της δεν είναι συνάρτηση του χρόνου, δηλαδή δεν μεταβάλλεται με το χρόνο. Παρόλο ότι σε σταθερή ροή η ταχύτητα δεν μεταβάλλεται στο ίδιο σημείο του χώρου, μπορεί να διαφέρει από σημείο σε σημείο. Αντιθέτως **ασταθής ή μη μόνιμη** καλείται η ροή της οποίας η ταχύτητα μεταβάλλεται με τον χρόνο.

2.2.2 Ομοιόμορφη και ανομοιόμορφη ροή

Ομοιόμορφη ονομάζεται η ροή κατά την οποία η ταχύτητα σε κάποιο χρονικό διάστημα t δεν μεταβάλλεται κατά μήκος του πεδίου, παρουσιάζει όμως μεταβολές σε μια κάθετη διατομή, λόγω ιξώδους. Συνήθως ομοιόμορφη ροή παρατηρείται σε αγωγούς σταθερής διατομής.



Σχήμα 2.1: Ομοιόμορφη ροή

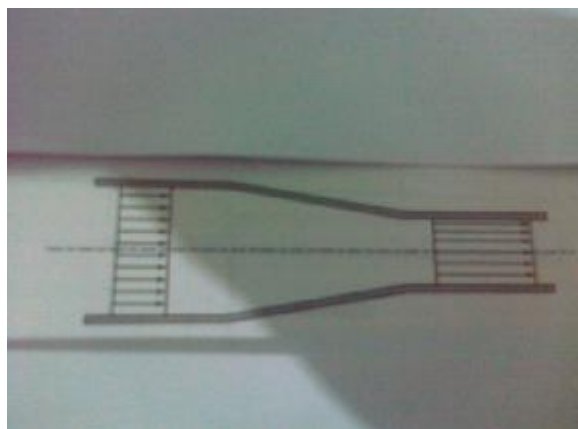
Μια ροή λέγεται **ανομοιόμορφη** όταν η ταχύτητα μεταβάλλεται κατά μήκος της ροής. Συνήθως ανομοιόμορφη ροή υπάρχει όταν η διατομή δεν είναι η ίδια σε όλο το μήκος της.



Σχήμα 2.2: Ανομοιόμορφη ροή

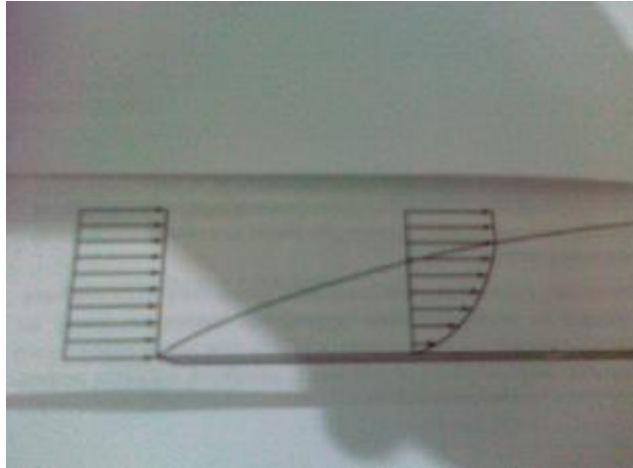
2.2.3 Μονοδιάστατη, δισδιάστατη και τρισδιάστατη ροή

Μονοδιάστατη καλείται η ροή στην οποία η ταχύτητα παραμένει παράλληλη προς ένα άξονα και έχει αυτό το μέγεθος σε κάθε διατομή. Μονοδιάστατη ροή εντός αγωγού είναι μονάδα θεωρητικώς υπαρκτή αφού μπορεί να υπάρχει μόνον όταν $\mu=0$, δηλαδή μονοδιάστατη ροή έχουν μόνο τα ιδεώδη ρευστά. Επίσης αξίζει να αναφέρουμε και τον ορισμό των ιδεωδών ρευστών όπου ιδεώδη ρευστά χαρακτηρίζονται υποθετικά ρευστά (συνήθως υγρά) τα οποία είναι τελείως ασυμπίεστα και καμία εσωτερική τριβή των μορίων τους δεν αναπτύσσεται κατά τη ροή τους. Όπως επίσης και καμία δύναμη συνάφειας μεταξύ αυτών και των τοιχωμάτων των δοχείων ή αγωγών που περιέχονται.



Σχήμα 2.3: Μονοδιάστατη ροή

Δυσδιάστατη ροή έχουμε λόγω ιξώδους και προσφύσεως των στοιχείων του υγρού επί των τοιχωμάτων. Παρόλα αυτά, πολλές φορές μια δυσδιάστατη ροή μπορεί να αντικατασταθεί από μια μονοδιάστατη στην οποία σαν ταχύτητα λαμβάνεται η μέση ταχύτητα ροής.



Σχήμα 2.4: Δισδιάστατη ροή

Τέλος **τρισδιάστατη** ροή έχουμε γενικά όταν το ρευστό διέρχεται πάνω από μια καμπύλη επιφάνεια.

2.3 ΕΙΔΗ ΡΟΩΝ

2.3.1 Στρωτή και τυρβώδης ροή

Με τον όρο **στρωτή ροή**, γενικά εννοούμε τη ροή εκείνη που γειτονικά στρώματα του ρευστού κινούνται χωρίς μακροσκοπική ανάμιξη μεταξύ τους. Η ροή αυτή απεικονίζεται με τις ρευματικές γραμμές. Δεν υπάρχει μετακίνηση ρευστών σωματιδίων κάθετα στις γραμμές αυτές. Η στρωτή ροή παρατηρείται όταν οι δυνάμεις συνοχής 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 στρώματα της στρωτής ροής εδώ δεν υπάρχει γιατί γίνεται ανάμιξη μεταξύ των διαφόρων στρωμάτων και ρευστά σωματίδια μετακινούνται από το ένα στρώμα στο άλλο.

Μια ροή για το πότε είναι τυρβώδης ή στρωτή εξαρτάται από τον αδιάστατο αριθμό Reynolds όπου θα αναφερθούμε διεξοδικά πιο κάτω.

2.3.1.1 Αριθμός Reynolds

Όπως προαναφέραμε για το πότε μια ροή είναι στρωτή ή τυρβώδης εξαρτάται από μια σημαντική παράμετρο που είναι ο αδιάστατος αριθμός Reynolds που δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$Re = \rho \cdot u \cdot D / \mu$$

όπου ο καθένας από τους παραπάνω όρους σημαίνει,

ρ : η πυκνότητα του ρευστού σε Kg/m^3 ,

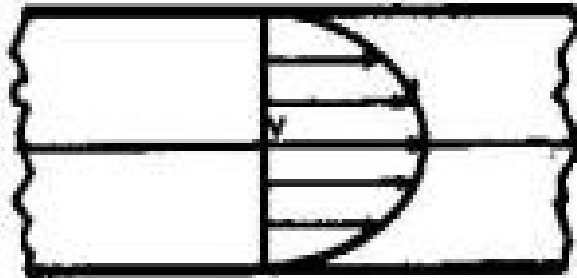
u : η ταχύτητα του ρευστού σε m/s ,

D : η διάμετρος του αγωγού σε m , και

μ το ιξώδες του ρευστού σε $\text{Pa}\cdot\text{s}$.

Η κίνηση του ρευστού είναι στρωτή όταν τιμή του αριθμού Reynolds είναι μικρότερη του 2000 ($Re < 2000$).

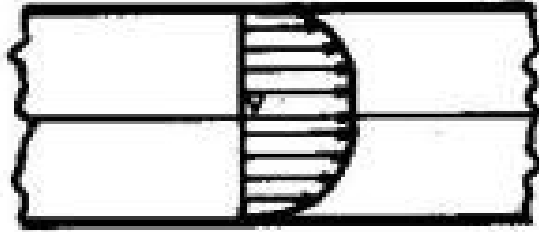
ΣΤΡΩΤΗ ΡΟΗ



Σχήμα 2.5: Στρωτή ροή

Η κίνηση του ρευστού είναι τυρβώδης όταν ο αδιάστατος αριθμός Reynolds είναι μεγαλύτερος του 2000 ($Re > 2000$).

ΤΥΡΒΩΔΗΣ ΡΟΗ



Σχήμα 2.6: Τυρβώδης ροή

2.4 ΕΞΙΣΩΣΗ BERNOULLI

Μια πολύ χρήσιμη σχέση μεταξύ της πίεσης, της ταχύτητας και του υψομέτρου ενός κινούμενου ρευστού διατυπώθηκε από τον Daniel Bernoulli το 1738. Η απόδειξη της μπορεί να γίνει με τη θεώρηση μιας μόνιμης ροής ενός ιδανικού ρευστού δηλαδή ενός ρευστού που είναι ασυμπίεστο και δεν έχει ιξώδες διαμέσου ενός στοιχειώδους ροικού σωλήνα.

Η διατομή A του στοιχειώδους αυτού κυλινδρικού σωλήνα είναι αρκετά μικρή, ώστε η ταχύτητα u , η πυκνότητα ρ και η πίεση p του ρευστού να θεωρούνται ομοιόμορφες σε όλη τη διατομή αυτή. Η εξίσωση Bernoulli παίρνει τις παρακάτω τρεις μορφές οι οποίες είναι οι ακόλουθες:

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{1}{2} u_1^2 + g h_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{1}{2} u_2^2 + g h_2 \quad (2.1)$$

(Joule/kg)

Όπου: u = ταχύτητα σε m/s

p = ολική πίεση σε N/m^2

ρ = πυκνότητα σε kg/m^3

g = επιτάχυνση βαρύτητας σε m/s^2

h = πιεζομετρικό ύψος σε m

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho u_1^2 + \rho g h_1 = p_2 + \frac{1}{2} \rho u_2^2 + \rho g h_2 \quad (2.2)$$

(Pascal)

Όπου: u = ταχύτητα σε m/s

p = στατική πίεση σε N/m^2

ρ = πυκνότητα σε kg/m^3

g = επιτάχυνση βαρύτητας σε m/s^2

h = πιεζομετρικό ύψος σε m

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{1}{2g} u_1^2 + h_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{1}{2g} u_2^2 + h_2 \quad (2.3)$$

(m)

Όπου: u = ταχύτητα σε m/s

P = στατική πίεση σε N/m^2

ρ = πυκνότητα σε kg/m^3

g = επιτάχυνση βαρύτητας σε m/s^2

h = πιεζομετρικό ύψος σε m

2.5 ΕΞΙΣΩΣΗ ΣΥΝΕΧΕΙΑΣ

Η εξίσωση της συνέχειας για μονοδιάστατη και μόνιμη ροή, θεωρείται η πιο απλουστευμένη ροή των περισσότερων πρακτικών προβλημάτων.

Θεωρούμε λοιπόν, ένα ροικό σωλήνα μιας μόνιμης ροής. Αφού η ροή θεωρείται μόνιμη, οι ρευματικές γραμμές είναι μόνιμες και, κατά συνέπεια και ο ροικός σωλήνας είναι μόνιμος. Όλα τα ρευστά σωματίδια θα κινούνται κατά μήκος σταθερών παράλληλων ρευματικών γραμμών. Συνεπώς η ροή μέσα στο ροικό σωλήνα είναι μονοδιάστατη. Η μεταβολή της μάζας στη μονάδα του χρόνου που εισέρχεται θα είναι ίση με την αντίστοιχη μεταβολή, που εξέρχεται και έτσι θα έχουμε:

$$m = \rho_1 A_1 u_1 = \rho_2 A_2 u_2 = \text{σταθερό} \quad (2.4)$$

Αν το ρευστό είναι ασυμπίεστο, η πυκνότητα ρ είναι σταθερή. Οπότε η εξίσωση της συνέχειας γίνεται:

$$Q = A_1 u_1 = A_2 u_2 = \text{σταθερό} \quad (2.5)$$

Όπου: Q = παροχή σε m^3/s

A = διατομή του σωλήνα σε mm

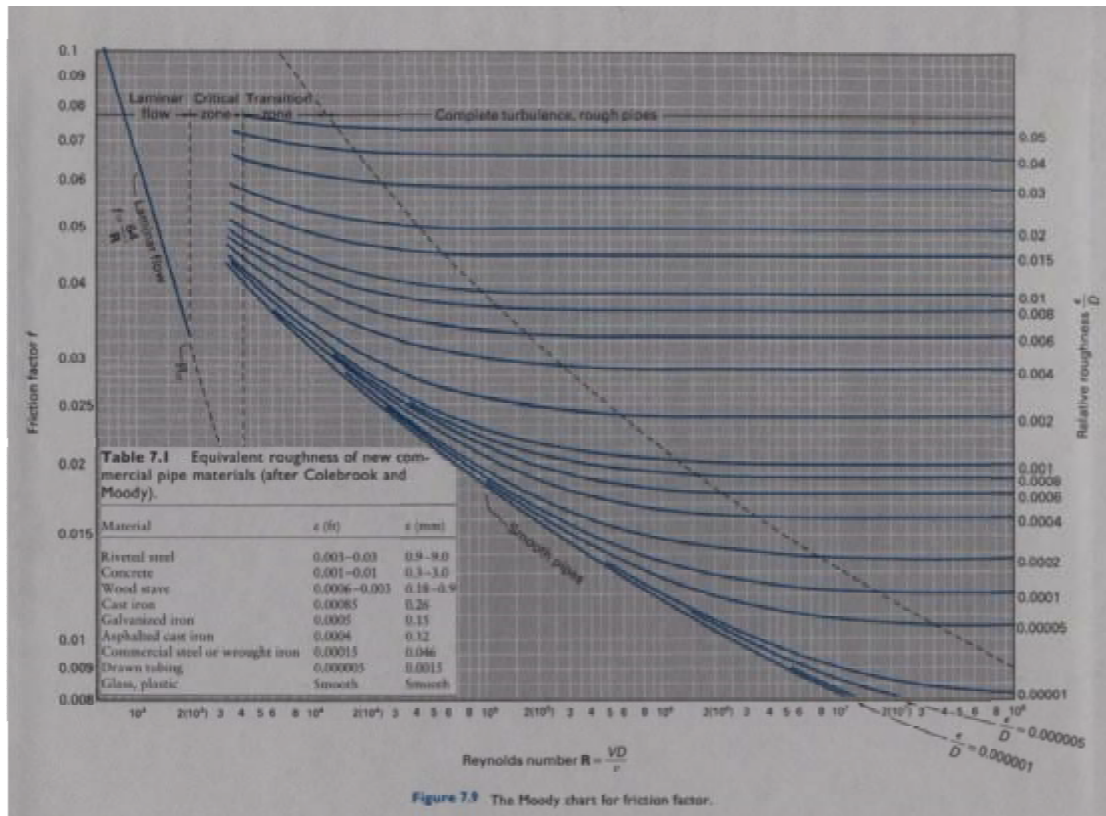
u = η ταχύτητα του ρευστού σε m/s

Η τελευταία μορφή της εξίσωσης της συνέχειας μας λέει ότι σε μικρή διατομή σωλήνα ροής ενός ασυμπίεστου ρευστού θα αντιστοιχεί με μεγάλη ταχύτητα και αντίστροφα.

2.6 ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ ΑΓΩΓΟΥ

Στην συγκεκριμένη υποενότητα θα εξετάσουμε την τραχύτητα ενός αγωγού ο οποίος είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας για το πόσο λείος ή μη είναι ένας αγωγός. Πιο συγκεκριμένα όταν έχουμε τυρβώδη ροή σε σωλήνες των οποίων τα τοιχώματα δεν θεωρούνται λεία είναι μεγάλης σημασίας αφού έχει πρακτική εφαρμογή και στις περισσότερες των περιπτώσεων οι αγωγοί παρουσιάζουν τραχύτητα, από υδραυλικής τουλάχιστον σκοπιάς τραχύτητα αυτή εκφράζεται από το μέσο ύψος ϵ των διαφόρων μικρών προεξοχών που προεκτείνονται από την επιφάνεια. Στην πραγματικότητα είναι το αδιάστατο πηλίκο ϵ/D που ευθύνεται για τη συμπεριφορά της ροής. Το πηλίκο αυτό ονομάζεται σχετική τραχύτητα. Ο Nikuradse απέδειξε με τα πειράματα του την πρακτική σπουδαιότητα της σχετικής τραχύτητας ϵ/D χρησιμοποιώντας λείους αγωγούς που στα τοιχώματα τους είχε κολλήσει κόκκους άμμου. Μεταβαλλόντας δε το μέγεθος της διαμέτρου κατόρθωσε να σχηματίσει τις αντιπροσωπευτικές καμπύλες ροής για διάφορες τιμές του ϵ/D . Οι καμπύλες αυτές μετά τη μεταβολή της ροής από στρωτή σε τυρβώδη αρχικά, όλες, συμπίπτουν με την καμπύλη (ευθεία) για λείους αγωγούς καθώς ο αριθμός Reynolds αυξάνει, οι καμπύλες αποκολλούνται από τη γραμμή (για λείους αγωγούς) και διαγράφοντας μια κοίλη καμπύλη στη συνέχεια παραλληλίζονται με τον άξονα των τιμών του Reynolds.

Παρακάτω βλέπουμε ένα διάγραμμα Moody



Σχήμα 2.7: Διάγραμμα Moody

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι στη δεξιά κάθετη πλευρά είναι ο λόγος ϵ/D , στην αριστερή κάθετη πλευρά είναι ο συντελεστής τριβής f και στην κάθετη πλευρά είναι ο αδιάστατος αριθμός Reynolds. Εύκολα καταλαβαίνουμε ότι αν γνωρίζουμε τα κατασκευαστικά στοιχεία του σωλήνα δηλαδή την διάμετρο του, την τραχύτητα και τον αριθμό Reynolds μπορούμε να βρούμε τον συντελεστή τριβής f .

Στον παρακάτω πίνακα βλέπουμε την τραχύτητα ορισμένων υλικών.

Πίνακας 2.1: Τραχύτητες ορισμένων προαναφερθέντων υλικών

α/α	ΥΛΙΚΟ	ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ (cm)
1	Εμπορικός χάλυβας ή σίδηρος	0,046
2	Ασφαλτωμένος χυτοσίδηρος	0,012
3	Σίδηρος γαλβάνιζε	0,0152
4	Χυτοσίδηρος	0,0259
5	Λείο ξύλο	0,0183-0,091
6	Χάλυβας με ηλώσεις	0,091-0,91
7	Σκυρόδεμα	0,03-0,3
8	Εξηλασμένοι σωλήνες	0,00015



Εικόνα 2.1: Σωλήνας από χυτοσίδηρο



Εικόνα 2.2: Σωλήνας από σίδηρο γαλβάνιζε.

2.7 ΤΡΟΧΙΕΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΡΕΥΣΤΟΥ-ΡΟΙΚΕΣ ΓΡΑΜΜΕΣ

Τροχιά στοιχείου ρευστού, είναι η τροχιά που ακολουθεί ένα και μόνο σωματίδιο σε μία χρονική περίοδο. Αν υπήρχε μία φωτογραφική μηχανή για να τραβήξει μία φωτογραφία της ροής, στην οποία ένα ρευστό σωματίδιο θα ήταν χρωματισμένο έτσι που να «γράφεται» στο αρνητικό, η εικόνα θα έδειχνε τη διαδρομή που ακολουθήθηκε από το σωματίδιο. Αυτή θα ήταν η τροχιά του. Η τροχιά δείχνει την κατεύθυνση της ταχύτητας του σωματιδίου σε διαδοχικές χρονικές στιγμές.

Οι γραμμές ροής ή ροϊκές γραμμές δείχνουν τη μέση κατεύθυνση ενός αριθμού σωματιδίων κατά την ίδια χρονική στιγμή. Αν υπήρχε μία φωτογραφική μηχανή για να πάρει μία φωτογραφία, πολύ μικρής διάρκειας, μιας ροής στην οποία θα υπήρχε μεγάλος αριθμός σωματιδίων, κάθε σωματίδιο θα διέτρεχε μία σύντομη διαδρομή, η οποία θα έδειχνε την ταχύτητά του κατά τη διάρκεια αυτού του σύντομου διαστήματος. Μια σειρά καμπυλών, σχεδιασμένων να εφάπτονται στα μέσα των διανυσμάτων των ταχυτήτων θα αποτελούσαν τις γραμμές ροής.

Τροχιές και γραμμές ροής είναι ακριβώς οι ίδιες στη μόνιμη ροή ενός ρευστού στο οποίο δεν υπάρχουν διακυμαινόμενες συνιστώσες ταχύτητας, με άλλα λόγια, για πραγματικά μόνιμη ροή. Τέτοια ροή μπορεί να είναι είτε εκείνη ενός ιδεατού ρευστού χωρίς τριβές ή εκείνη ενός συνεκτικού ρευστού που θα κινείται τόσο αργά ώστε να μη σχηματίζονται δίνες. Η τελευταία περίπτωση είναι η λεγόμενη στρωτή ροή, όπου τα στρώματα του ρευστού ολισθαίνουν απαλά το ένα πάνω στο άλλο. Ωστόσο, στην τυρβώδη ροή οι τροχιές και οι μέσης χρονικής ταχύτητας ροϊκές γραμμές δεν συμπίπτουν, οι τροχιές είναι πολύ ακανόνιστες ενώ οι ροϊκές γραμμές εφάπτονται παντού στην τοπική μέση χρονική ταχύτητα.

2.8 ΣΥΝΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΡΕΥΣΤΟΥ

Η συνεκτικότητα (viscosity, ιξώδες) ενός ρευστού αποτελεί ένα μέτρο της αντίστασης του σε διατμητική ή γωνιακή παραμόρφωση. Λόγου χάρη, τα λάδια των μηχανών των αυτοκινήτων έχουν υψηλή συνεκτικότητα και αντίσταση σε διάτμηση, είναι συνεκτικά, ενώ η βενζίνη έχει μικρή συνεκτικότητα. Οι δυνάμεις τριβής κατά τη ροή ρευστού είναι αποτέλεσμα της συνοχής και της ανταλλαγής ορμής μεταξύ των μορίων του ρευστού. Όταν η θερμοκρασία αυξάνει, τα ιξώδη όλων των υγρών μειώνονται, ενώ τα ιξώδη όλων των αερίων αυξάνονται. Αυτό οφείλεται στο ότι η δύναμη συνοχής, που ελαττώνεται με την θερμοκρασία, δεσπόζει στα υγρά, ενώ στα αέρια ο σημαντικός παράγοντας είναι η ανταλλαγή μορίων μεταξύ στρωμάτων διαφορετικών ταχυτήτων. Έτσι ένα ταχέως κινούμενο μόριο αερίου που μετακινείται σε στρώμα βραδύτερης κίνησης, τείνει να επιταχύνει το τελευταίο. Ενώ ένα βραδέως κινούμενο μόριο, που εισέρχεται σε ταχύτερο στρώμα, τείνει να το επιβραδύνει. Αυτή η ανταλλαγή μορίων δημιουργεί διάτμηση, ή παράγει δύναμη τριβής μεταξύ των προσκείμενων στρωμάτων. Σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες η μοριακή δραστηριότητα αυξάνει και προκαλεί την αύξηση του ιξώδους των αερίων με τη θερμοκρασία.

Όπως προαναφέραμε και στο πρώτο κεφάλαιο οι μονάδες για τη συνεκτικότητα του ρευστού είναι οι ακόλουθες:

Μονάδες ιξώδους

Δυναμικό ιξώδες: $\mu = \tau \cdot d / u = f \cdot d / u \cdot A$, μονάδες: $N \cdot \text{sec} / \text{m}^2 = \text{Kg} / \text{m} \cdot \text{sec}$

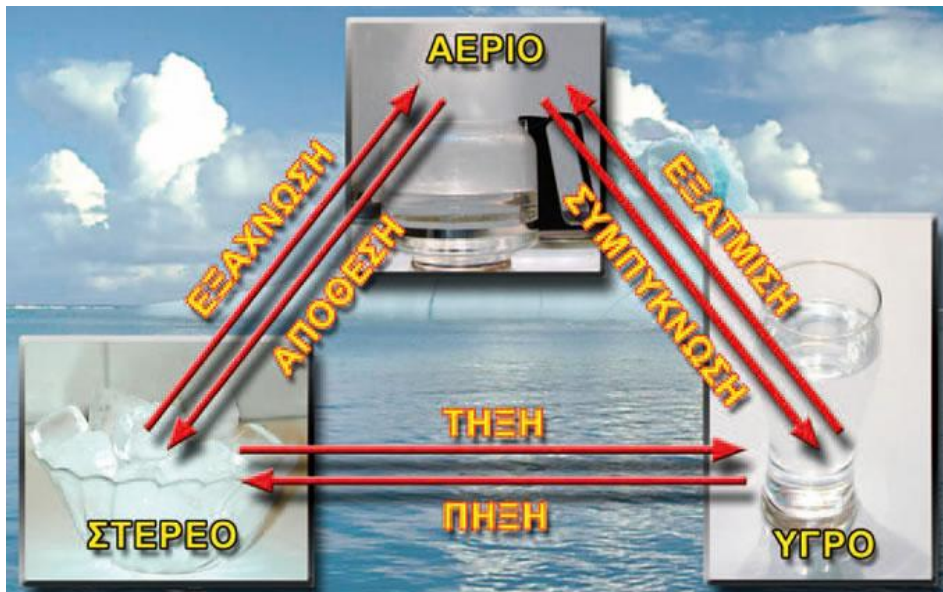
Κινητικό ιξώδες: $\nu = \mu / \rho$, μονάδες: m^2 / sec

2.9 ΤΡΟΠΟΙ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΣ ΕΝΟΣ ΡΕΥΣΤΟΥ

Η κατάσταση ενός ρευστού προσδιορίζεται από τις τιμές ορισμένων μεγεθών όπως της πίεσης, θερμοκρασίας, πυκνότητας, κλπ. Όταν οι τιμές δυο εξ αυτών των μεγεθών αλλάζουν, τότε λέμε ότι το ρευστό μεταβάλλει κατάσταση. Έτσι όταν ο αέρας συμπιεστεί σε ένα κύλινδρο, ο αρχικός του όγκος θα ελαττωθεί. Είναι δυνατόν κανείς να πετύχει τη συμπίεση αυτή με διάφορους τρόπους όπως για παράδειγμα κρατώντας τη θερμοκρασία του αέρα στον κύλινδρο σταθερή, ή κατά έναν άλλο τρόπο, μη επιτρέποντας θερμότητα να εγκαταλείψει να εισχωρήσει στο χώρο του κυλίνδρου. Ο καθένας από αυτούς τους τρόπους θα δώσει μια τελική κατάσταση, που θα είναι διαφορετική από την άλλη.

Όταν η κατάσταση ενός ρευστού μεταβάλλεται κατά τρόπο ώστε το ρευστό ανά πάσα στιγμή να επιστρέψει στην αρχική του κατάσταση χωρίς να διαφοροποιηθεί η κατάσταση του χώρου που το περιβάλλει, τότε την μεταβολή αυτή την ονομάζουμε αντιστρεπτή. Στην αντίθετη περίπτωση η μεταβολή ονομάζεται αντιστρεπτή.

Στην ουσία όμως δεν υπάρχει μεταβολή καταστάσεως που να είναι αντιστρεπτή. Το ιξώδες, οι δυνάμεις Coulomb κλπ. εμποδίζουν την αντιστρεπτότητα μιας μεταβολής. Με άλλα λόγια όλες οι μεταβολές καταστάσεων στην πραγματικότητα δεν παρουσιάζουν το φαινόμενο της αντιστρεπτότητας. Σε μερικές μόνο περιπτώσεις, όταν η μεταβολή συμβαίνει με αργό ρυθμό, μπορεί να απλουστευθεί σαν αντιστρεπτή. Με άλλα λόγια όταν κανείς διαθέτει ένα ορισμένο ποσό ενέργειας για να μεταβάλλει την κατάσταση του ρευστού, ποσοστό της ενέργειας δαπανάται για να υπερνικηθούν οι τριβές εξαιτίας της αντιστρεπτότητας. Ο βαθμός λοιπόν αντιστρεπτότητας κατά τη μεταβολή μιας κατάστασης χαρακτηρίζει την απώλεια ενέργειας.



Εικόνα 2.3: Τρόπος μεταβολής κατάστασης ενός ρευστού

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα κάνουμε μια αναφορά στα κυρία μέρη της πειραματικής διάταξης. Πιο συγκεκριμένα θα περιγράψουμε τα πιο σημαντικά εξαρτήματα της πειραματικής μας συσκευής, δίνοντας κάποιες εικόνες από τα βασικά αυτά εξαρτήματα και ακόμη θα δούμε κάποιες φωτογραφίες από την πορεία εξέλιξης της εργασίας.

3.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΩΝ

3.2.1 Μανόμετρο πίεσης

Πριν αναφερθούμε στη λειτουργία του μανόμετρου πίεσης θα ήταν χρήσιμο να ορίσουμε τον όρο της πίεσης. Γενικά, σε ένα σημείο πίεση ορίζουμε όπου F είναι η κάθετη δύναμη στη στοιχειώδη επιφάνεια A , που περιέχει το αναφερόμενο σημείο. Όταν η πίεση είναι ομοιόμορφη σε όλη την επιφάνεια A τότε η πίεση δίνεται από τη σχέση, $P = \frac{F}{A}$ και οι μονάδες της πίεσης στο SI είναι $1\text{Pa}=1\text{N/m}^2$.

Στη συνέχεια πρέπει να αναφέρουμε και τον ορισμό του μανόμετρου της πίεσης. Με τον όρο μανόμετρο πίεσης εννοούμε το όργανο μέτρησης της πίεσης αερίων ή υγρών και χρησιμοποιείται κατά κόρον στη βιομηχανία. Η μέτρηση της πίεσης όμως αρχίζει από αυτή της ατμοσφαιρικής πίεσης και προς τα άνω, οπότε και εκφράζει την **πραγματική πίεση** (η οποία λέγεται και μανομετρική πίεση).



Εικόνα 3.1: Μανόμετρο πίεσης

Το συγκεκριμένο μανόμετρο που χρησιμοποιούμε στην πειραματική μας διάταξη, το εύρος της κλίμακας του φτάνει μέχρι 1.6 bar, έχει ελάχιστη υποδιαίρεση 0.05 bar και το σφάλμα του οργάνου ισούται με 0.025 bar, όπου το σφάλμα προκύπτει αν διαιρέσουμε την ελάχιστη υποδιαίρεση δια του δύο.

3.2.2 Σιδηροσωλήνας

Ο σωλήνας που χρησιμοποιείται στην πειραματική μας διάταξη είναι πολύ σημαντικό μέρος. Μέσου αυτού του σωλήνα διέρχεται το νερό και όπως είναι φυσικό δημιουργούνται κάποιες τριβές, που όπως γνωρίζουμε οι τριβές αυτές υπολογίζονται από τον αδιάστατο αριθμό Reynolds για να ξέρουμε αν έχουμε στρωτή ή τυρβώδη ροή. Τα βασικά χαρακτηριστικά του σιδηροσωλήνα μας είναι ότι έχει εξωτερική διάμετρο $\Phi 10$ (διάμετρο 10 mm) και εσωτερική διάμετρο $\Phi 8$ (διάμετρο 8mm).



Εικόνα 3.2: Σιδηροσωλήνας

3.2.3 Βασικά εμπλεκόμενα μικροεξαρτήματα

Στην υποενότητα αυτού του υποκεφαλαίου θα παρουσιάσουμε ορισμένες εικόνες από διάφορα μικροεξαρτήματα που παρεμβάλλονται ανάμεσα στο υδρόμετρο και το σιδηροσωλήνα, το σιδηροσωλήνα και τους ορειχάλκινους σταυρούς, και τους ορειχάλκινους σταυρούς με τις βάνες απομόνωσης του υδραργύρου.

3.2.3.1 Ρακόρ



Εικόνα 3.3: Ρακόρ ένωσης υδρομέτρου



Εικόνα 3.4 Εσωτερικό μέρος από Ρακόρ ένωσης υδρομέτρου



Εικόνα 3.5: Ρακόρ σύνδεσης σιδηροσωλήνα με ορειχάλκινους σταυρούς



Εικόνα 3.6: Εσωτερικό μέρος από Ρακόρ σύνδεσης σιδηροσωλήνα με ορειχάλκινους σταυρούς

3.2.3.2 Υδρομέτρο

Με τον όρο υδρόμετρο αναφερόμαστε σε μια συσκευή που χρησιμοποιείται για την μέτρηση του όγκου χρήσης νερού στην πειραματική μας συσκευή. Υπάρχουν διάφοροι τύποι υδρομετρητών. Η επιλογή είναι βασισμένη στις διαφορετικές μεθόδους μέτρησης ροής, τα απαραίτητα ποσοστά ροής και τις απαιτήσεις για μετρήσεις ακριβείας. Το συγκεκριμένο υδρόμετρο της πειραματικής μας διάταξης, η κύρια κλίμακα του μετράει σε κυβικά μέτρα (m^3) και έχει ακόμη μια άλλη κλίμακα μεγαλύτερης ακρίβειας που μετράει σε κυβικά δεκατόμετρα (dcl). Ακόμη το υδρόμετρο αυτό έχει ονομαστική παροχή 1.5 κυβικά μέτρα ανά ώρα (m^3/h).



Εικόνα 3.7: Υδρόμετρο

3.2.3.3 Κολεκτέρ εξαέρωσης- Κύρια κολεκτέρ

Το κολεκτέρ εξαέρωσης χρησιμοποιείται είτε για την προσθήκη πεπιεσμένου αέρα μέσω της βαλβίδας του ποδηλάτου που έχουμε, είτε για να κάνουμε εξαερισμό μέσω της βαλβίδας εξαέρωσης.

Τα κύρια κολεκτέρ χρησιμεύουν στην ένωση του μανόμετρου του νερού με αυτό του υδραργύρου, έτσι ώστε το νερό να εισέρχεται στο μανόμετρο υδραργύρου και να πιέζει τον υδράργυρο.



Εικόνα 3.8: Κολεκτέρ ένωσης νερού με υδραργύρου



Εικόνα 3.9: Βαλβίδα ποδηλάτου για εξαέρωση



Εικόνα 3.10: Κολεκτέρ εξαέρωσης

3.2.3.4 Μεταλλική βάση- Ορειχάλκινος σταυρός

Στην μεταλλική βάση στηρίζεται το πιο σημαντικό τμήμα της πειραματικής μας διάταξης. Ο ορειχάλκινος σταυρός έχει τέσσερις εισόδους, όπου από τις δυο εισόδους διέρχεται ο σιδηροσωλήνας, και από τις άλλες δυο ξεκινάνε οι πιεζομετρικοί σωλήνες όπου ο ένας πιεζομετρικός σωλήνας καταλήγει στο κύριο κολεκτέρ και ο άλλος στο κολεκτέρ εξαέρωσης.



Εικόνα 3.11: Ορειχάλκινος σταυρός



Εικόνα 3.12: Μεταλλική βάση

3.2.3.5 Ρυθμιστής παροχής- Μετρητική ταινία- Πιεζομετρικοί σωλήνες

Ο ρυθμιστής παροχής βρίσκεται στο τέλος του σιδηροσωλήνα όπου ρυθμίζουμε εμείς τον ρυθμό με τον οποίο θα εξέρχεται το νερό από την πειραματική μας συσκευή. Η μετρητική ταινία εκτείνεται μέχρι 53 χιλιοστά (mm), έχει ελάχιστη υποδιαίρεση 1 χιλιοστό (mm) και το σφάλμα της μετρικής ταινίας είναι 0.5 χιλιοστά (mm) δηλαδή η ελάχιστη υποδιαίρεση δια δύο. Οι πιεζομετρικοί σωλήνες είναι σωλήνες από πλαστικό όπου από εκεί μέσα διέρχεται το νερό και ο υδράργυρος.



Εικόνα 3.13: Ρυθμιστής παροχής



Εικόνα 3.14: Μετρητική ταινία



Εικόνα 3.15: Πιεζομετρικοί σωλήνες

3.3 ΕΙΚΟΝΕΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΟΡΕΙΑ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στο υποκεφάλαιο αυτό θα παρουσιάσουμε ορισμένες εικόνες από την κατασκευή της πειραματικής συσκευής, όπου πραγματοποιήθηκε στην αίθουσα της υδραυλικής.



Εικόνα 3.16: Κατασκευή πειραματικής συσκευής με την βοήθεια του Τεχνικού Εργαστηρίου (ΤΕ) Αχιλλέα Παπαθανασόπουλου



Εικόνα 3.17: Κατασκευή πειραματικής συσκευής υπό την επίβλεψη του καθηγητή



Εικόνα 3.18: Η πειραματική μας συσκευή πρέπει να έρθει σε ισορροπία γι αυτό χρησιμοποιούμε το αλφάδι.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

4.1 ΓΕΝΙΚΑ

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα αναφερθούμε στον σκοπό της άσκησης, στα μέρη της πειραματικής συσκευής, καθώς και στο πως πραγματοποιείται η πειραματική διαδικασία. Τέλος θα παρουσιάσουμε και κάποια διαγράμματα που θα μας τονίζουν πως μεταβάλλονται κάποια σημαντικά μεγέθη.

4.2 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΑΣΚΗΣΗΣ

Το **αντικείμενο** λοιπόν αυτής της εργαστηριακής ασκήσεως είναι: η πειραματική απόδειξη του νόμου των ενεργειακών απωλειών κατά μήκος ενός σωλήνα και ειδικότερα, η αλλαγή της εκφράσεως του για την στρωτή και τυρβώδη ροή με τον υπολογισμό της κρίσιμης τιμής του αριθμού Reynolds. Επίσης πρέπει να προσδιορίσουμε το ιξώδες του ρευστού από το νόμο των ενεργειακών απωλειών λόγω τριβών για στρωτή ροή και προσδιορίσουμε τον συντελεστή τριβής από το νόμο των ενεργειακών απωλειών για τυρβώδη ροή και η μεταβολή του σαν συνάρτηση του αριθμού Reynolds.

4.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Η συσκευή του πειράματος 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 υπερχειλίσεως νερού ή απ' ευθείας από τη δεξαμενή νερού του υδραυλικού τραπέζιου και όπου εκεί περνάει από το υδρόμετρο όπου για να δούμε τον όγκο του νερού που θα εισέρθει στην πειραματική συσκευή. 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 στην 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.

4.4 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ

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

1. Τοποθετούμε την συσκευή πάνω στο υδραυλικό τραπέζι.

Συνδέουμε 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 (αυτό πρέπει να γίνει ύστερα από σύσταση του διδάσκοντα).

2. Στη συνέχεια το νερό εισέρχεται από το υδρόμετρο όπου εκεί μετράμε τον όγκο του νερού που περνάει στη συσκευή μας.

3. Στρέφουμε το πρώτο διακοπτάκι κάθετα προς τον μεταλλικό σωλήνα και το δεύτερο παράλληλα προς τον μεταλλικό σωλήνα προς το μέρος των πιεζομετρικών σωλήνων (να είναι κλειστά και τα δύο) για να λειτουργήσει το μανόμετρο νερού.

4. Κλείνουμε τον ρυθμιστή παροχής της διάταξης και ανοίγουμε την αντλία του τραπεζιού, έτσι ώστε το νερό να ανέβει προοδευτικά στους πιεζομετρικούς σωλήνες.

5. Το νερό ισορροπεί περίπου στη μέση της κλίμακας. Αυτό συμβαίνει διότι προϋπήρχε αέρας εντός των πιεζομετρικών σωλήνων ο οποίος αέρας πιέζεται τώρα από το νερό δημιουργώντας έτσι υπερπίεση.

6. Αν θέλουμε να αυξήσουμε το ύψος της στάθμης του νερού στους πιεζομετρικούς σωλήνες πιέζουμε με ένα αιχμηρό αντικείμενο την αεροβαλβίδα που βρίσκεται στα δεξιά του κολεκτέρ αποβάλλοντας έτσι αέρα από το σύστημα. Αν θέλουμε τώρα να μειώσουμε το ύψος της στάθμης του νερού θα πρέπει να προσθέσουμε αέρα πάλι από τη δεξιά αεροβαλβίδα του κολεκτέρ. Επειδή όμως το κολεκτέρ είναι βαρέως τύπου δεν μας κάνει μια απλή τρόμπα ποδήλατου αλλά η χρήση αεροσυμπιεστή υψηλής πίεσεως. Γι αυτό καλό είναι να αφήνουμε τη στάθμη του νερού στη μέση των σωλήνων έτσι ώστε να έχουμε μια καλή εικόνα μετρήσεων αφού το εργαστήριο δεν διαθέτει αεροσυμπιεστή υψηλής πίεσεως.

7. Αν υπάρχουν δακτύλιοι νερού στους πιεζομετρικούς σωλήνες χτυπάμε το δάχτυλο μας τους σωλήνες μέχρι όπου τους απαλλάξουμε από αυτούς, προσπαθώντας έτσι το ύψος του νερού να είναι το ίδιο και στους δυο πιεζομετρικούς σωλήνες

8. Παρατηρούμε τη στάθμη του νερού στους πιεζομετρικούς σωλήνες. Αν δεν παραμένει σταθερή η στάθμη αυτή, τότε πρέπει να αλλάξουμε τους πιεζομετρικούς σωλήνες. Αν η στάθμη του νερού παραμένει σταθερή, προχωρούμε στην εκτέλεση

του πειράματος.

9. Τέλος πρέπει να θυμηθούμε με ένα αιχμηρό αντικείμενο (πχ κατσαβίδι) να πατήσουμε την αεροβαλβίδα για να φύγει το νερό από τους πιεζομετρικούς σωλήνες και να πέσει στο υδραυλικό τραπέζι.

4.5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Ύστερα από την προετοιμασία της συσκευής εκτελείται το πείραμα.

α) Πειραματική απόδειξη του νόμου των απωλειών

α(1) Πρέπει να έχετε έτοιμο χαρτί για δύο 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 στον 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 τον ρυθμιστή παροχής ελέγχου σιγά και να αυξήσετε την παροχή του νερού μέχρι ότου η διαφορά της στάθμης του νερού γίνει μεγίστη. Αυτό σημαίνει ότι το ύψος h_1 φτάσει λίγο πριν μπει στο κολεκτέρ (προσοχή μην μπει το νερό μέσα στο κολεκτέρ γιατί θα πρέπει να θέσουμε τη λειτουργία του τραπέζιου εκτός)

α(3) Με τον ρυθμιστή παροχής μπορείτε να αυξομειώνετε την παροχή του νερού που μετριέται με τη βοήθεια του υδρομέτρου, έτσι μπορείτε να μετρήσετε διάφορες ποσότητες (ανά 500 ml) μετρώντας τον αντίστοιχο χρόνο. Θα πάρετε τόσες μετρήσεις που θα τις καταχωρήσετε στον πίνακα 1 του παραρτήματος III αυτής άσκησης τόσες όσες χρειάζονται για την καλύτερη σχεδίαση της γραφικής παράστασης όπως αναφέρεται στην οδηγία α(1).

α(4) Σημειωτέον η ροή μας είναι τυρβώδης σε όλο το μήκος του σωλήνα.

α(5) Προετοιμάζουμε την πειραματική συσκευή για το πείραμα αφού προηγουμένως στρίψουμε το πρώτο διακοπτάκι παράλληλα προς τον μεταλλικό σωλήνα και το δεύτερο διακοπτάκι κάθετα προς τον μεταλλικό σωλήνα (να είναι ανοιχτά και τα δυο) για να λειτουργήσει το μανόμετρο υδραργύρου.

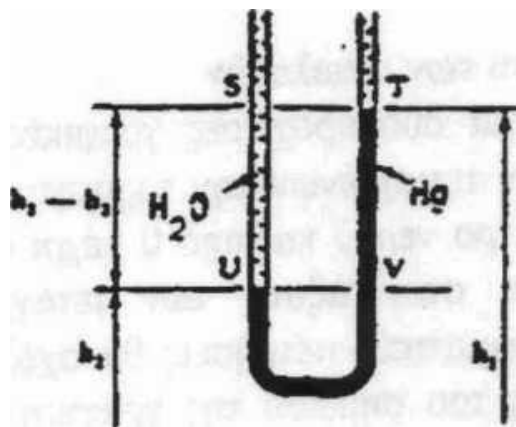
α(6) Σε περίπτωση που υπάρχουν αεροφυσαλίδες (σχεδόν ποτέ) ανοίγουμε τις βαλβίδες εξαέρωσης στο πάνω μέρος του μανομέτρου τύπου U έτσι ώστε να φύγει ο αέρας και να αρχίσει να τρέχει νερό.

α(7) Να επαναλάβετε τις πειραματικές διαδικασίες α(2) και α(3) με τις καινούργιες προϋποθέσεις της πειραματικής συσκευής (δηλ. με λειτουργία του υδραυλικού

μανομέτρου) έχοντας υπόψη σας πάλι την περίπτωση α(1). Τα αποτελέσματα τώρα θα καταχωρούνται στον πίνακα 2 του συμπληρώματος της ασκήσεως μας όπου οι αναγνώσεις των διαφορών h_1-h_2 σε ύψος υδραργύρου μετατρέπονται σε ισοδύναμο ύψος νερού, όταν πολλαπλασιασθούν με το συντελεστή **12.6**.

Σημείωση: Η χρήση του συντελεστή 12.6 φαίνεται από το Σχήμα 4.1. Οι πιέσεις στα σημεία U και V είναι ίσες καθότι βρίσκονται στο ίδιο οριζόντιο επίπεδο. Η πίεση στο σημείο S είναι $(h_1-h_2)mH_2O$. Ενώ η πίεση στο T είναι $(h_1-h_2)mHg=(h_1-h_2) \times 13.6 mH_2O$. Η διαφορά τους θα είναι:

$$(h_1 - h_2) \times 13,6 \text{ mH}_2\text{O} - (h_1 - h_2) \text{ mH}_2\text{O} = 12,6(h_1 - h_2) \text{ mH}_2\text{O}$$



Σχήμα 4.1 Διάγραμμα υδραργυρικού μανομέτρου

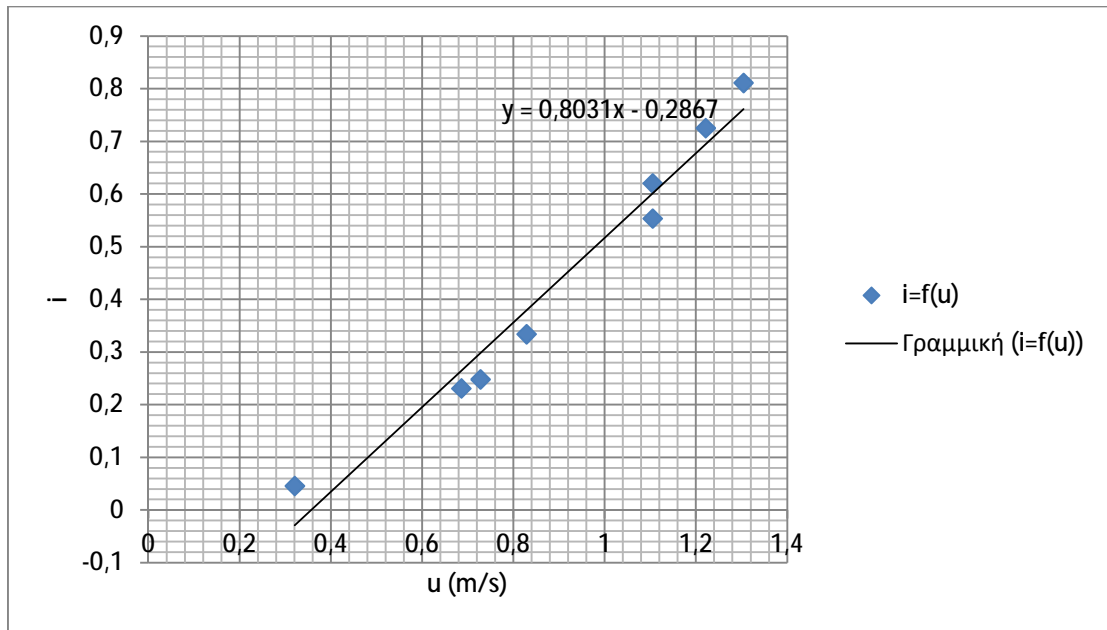
4.6 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

4.6.1 Μετρήσεις μανομέτρου νερού

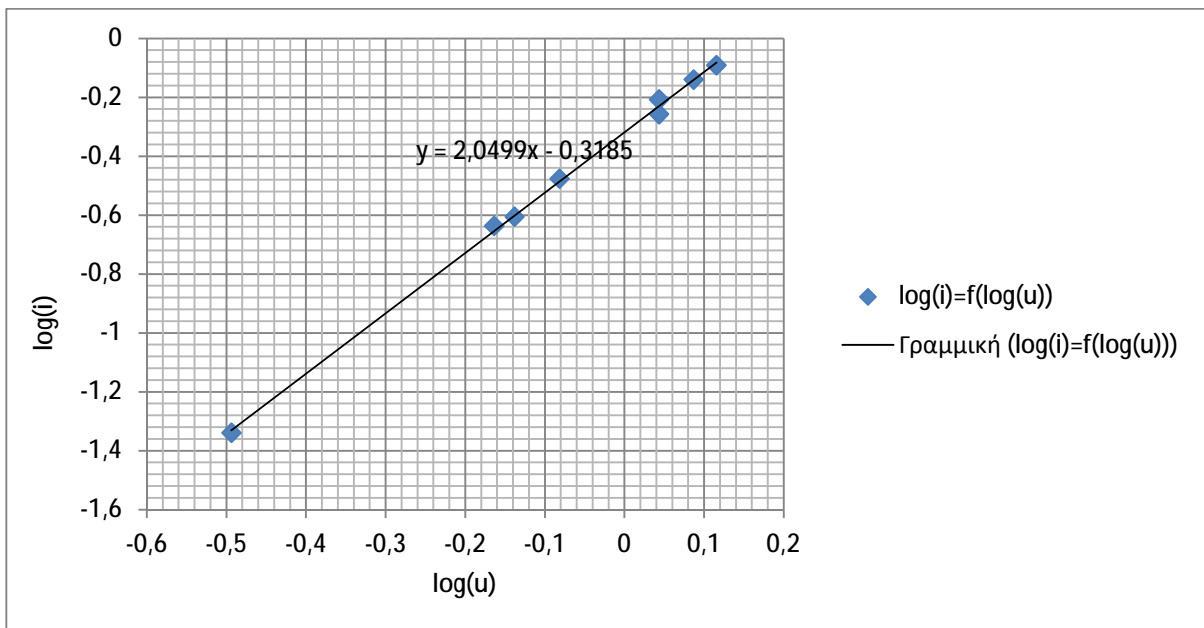
Πίνακας 4.1

όγκος νερού	Χρόνος	ύψος εισόδου	ύψος εξόδου	ταχύτητα	διαφορά υψών	υδρ/κη βαθμίδα	logi
V (ml)	t (sec)	h ₁ (mm)	h ₂ (mm)	u (m/sec)	h ₁ -h ₂ (mH ₂ O)	i	
500	31	260	236	0,3208769	0,024	0,045801527	- 1,33912005
1000	29	305	184	0,68601269	0,121	0,230916031	- 0,63654592
1500	41	315	185	0,72784273	0,13	0,248091603	- 0,60538793
2000	48	335	160	0,828932	0,175	0,333969466	- 0,47629324
2500	45	385	95	1,10524266	0,29	0,553435115	- 0,25693329
3000	54	400	75	1,10524266	0,325	0,620229008	- 0,20744793
3500	57	425	45	1,22158399	0,38	0,72519084	- 0,13954769
4000	61	445	20	1,30454871	0,425	0,811068702	- 0,09094236

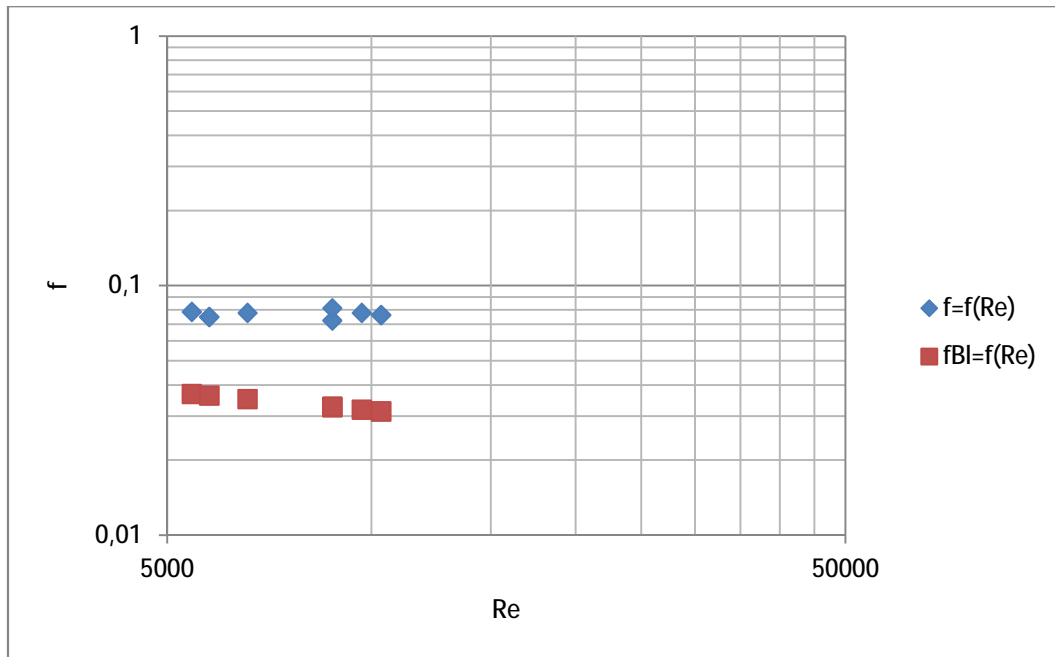
Logu	συν/της τριβής	Αρ. Reynolds	Blaussius
	f	Re	f=0,316Re ^{-0,25}
-0,49366154	0,071174271	2541,599219	0,044505155
-0,16366785	0,078507251	5433,763847	0,03680543
-0,13796245	0,074930211	5765,090911	0,036264821
-0,0814811	0,077765853	6565,797982	0,035104695
0,04345764	0,072488884	8754,39731	0,0326686
0,04345764	0,081237543	8754,39731	0,0326686
0,086923333	0,077754517	9675,912816	0,031861344
0,115460301	0,076253016	10333,05912	0,031342227



Διάγραμμα 4.1: Μεταβολή της υδραυλικής βαθμίδας συναρτήσει της ταχύτητας.



Διάγραμμα 4.2: Λογαριθμικό διάγραμμα μεταβολής της υδραυλικής βαθμίδας συναρτήσει της ταχύτητας.



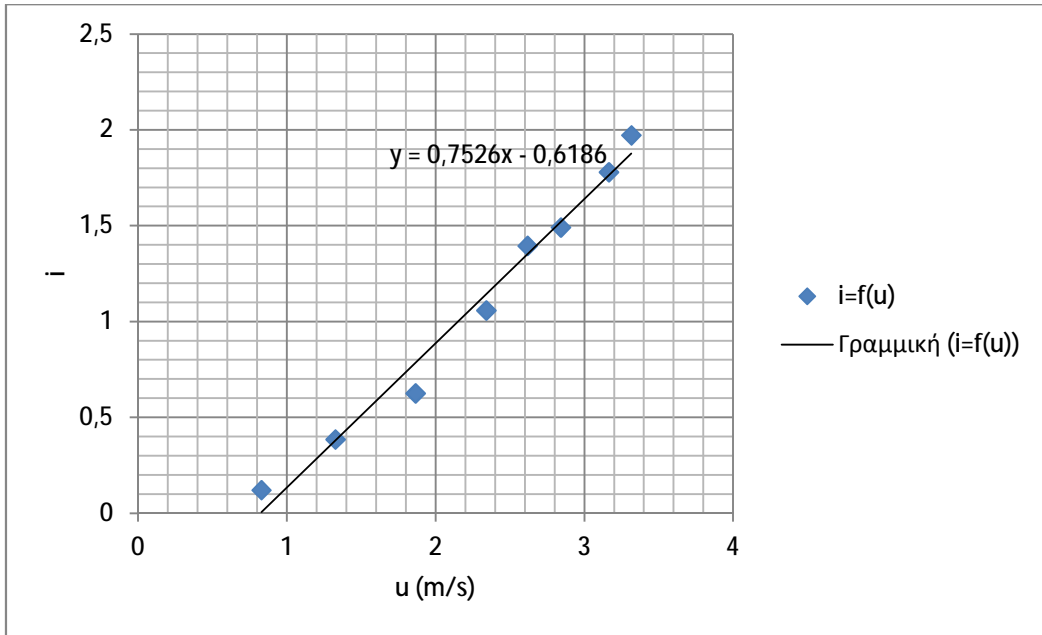
Διάγραμμα 4.3: Μεταβολή του συντελεστή του συντελεστή τριβής συναρτήσει του αριθμού Reynolds.

4.6.2 Μετρήσεις μανομέτρου υδραργύρου

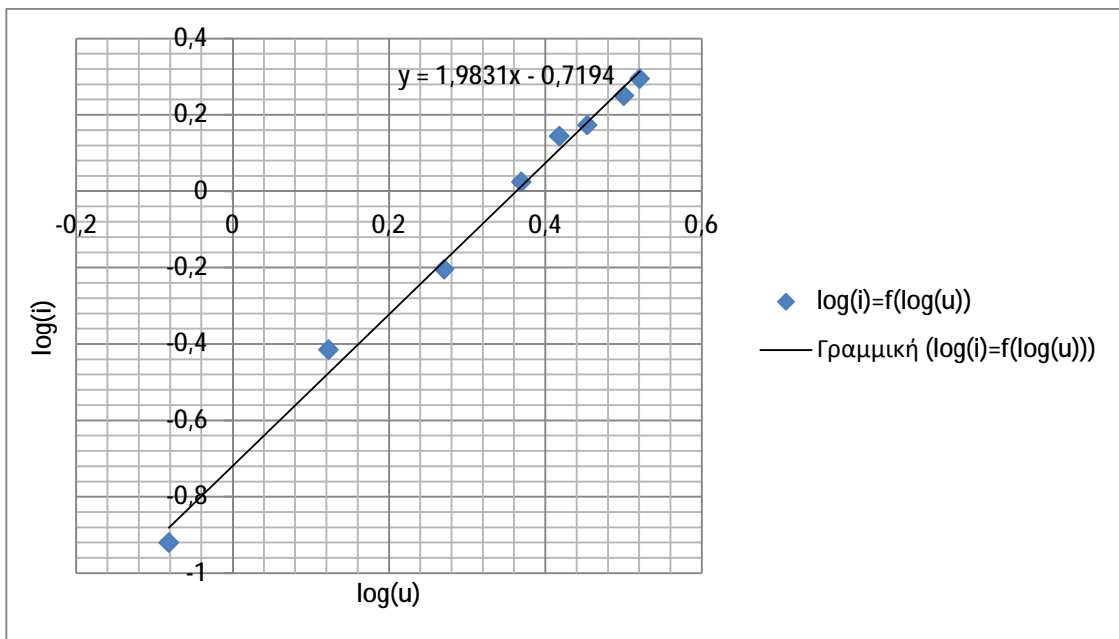
Πίνακας 4.2

V (ml)	t (sec)	h ₁ (mm)	h ₂ (mm)	u (m/sec)	h ₁ -h ₂ (mH ₂ O)	υδρ/κη βαθμίδα i	logi
500	12	250	245	0,828932	0,063	0,120229008	-0,91999074
1000	15	258	242	1,32629119	0,2016	0,384732824	-0,41484076
1500	16	262	236	1,86509699	0,3276	0,62519084	-0,20398739
2000	17	272	228	2,34051387	0,5544	1,058015267	0,024491935
2500	19	280	222	2,61767999	0,7308	1,394656489	0,144467252
3000	21	282	220	2,84205256	0,7812	1,490839695	0,173430948
3500	22	289	215	3,16501307	0,9324	1,779389313	0,250270978
4000	24	294	212	3,31572798	1,0332	1,971755725	0,294853111

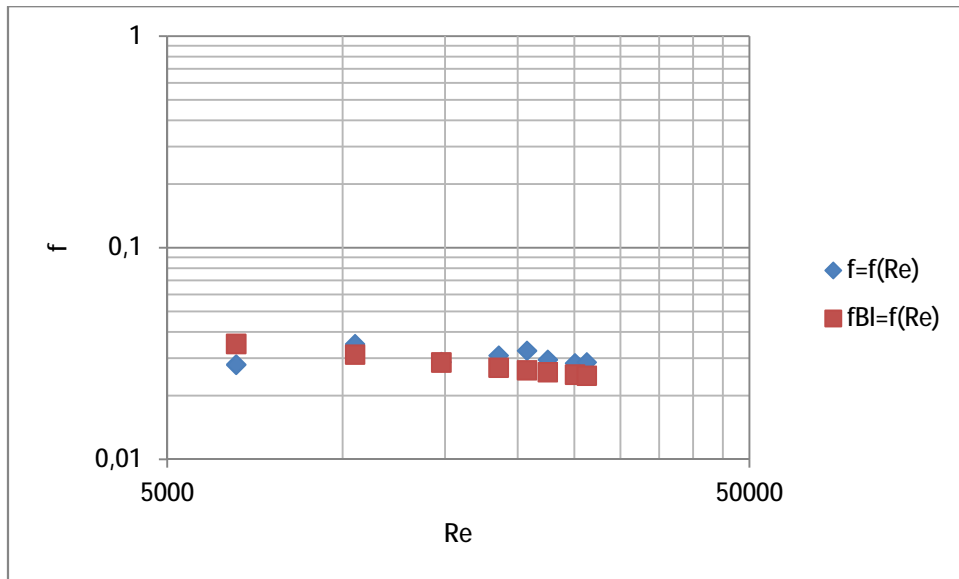
logu	συν/της τριβής	Αρ. Reynolds	Blaussius
	f	Re	f=0,316Re ^{-0.25}
-0,0814811	0,027995707	6565,797982	0,035104695
0,122638886	0,034994634	10505,27677	0,031212978
0,270701421	0,028756084	14773,04546	0,028662863
0,369311219	0,030902206	18538,72371	0,027081151
0,417916552	0,032565228	20734,09889	0,026333937
0,453632105	0,029531583	22511,30737	0,025798051
0,500375508	0,028421039	25069,41048	0,025113142
0,520578894	0,0286956	26263,19193	0,024822768



Διάγραμμα 4.4: Μεταβολή της υδραυλικής βαθμίδας συναρτήσει της ταχύτητας.



Διάγραμμα 4.5: Λογαριθμικό διάγραμμα μεταβολής της υδραυλικής βαθμίδας συναρτήσει της ταχύτητας.



Διάγραμμα 4.6: Μεταβολή του συντελεστή του συντελεστή τριβής συναρτήσει του αριθμού Reynolds.

4.7 ΣΧΟΛΙΑ

Σχόλιο (i):

Βασιζόμενοι στο διάγραμμα (ii) να αναφερθούν οι περιοχές τιμών και στα δύο μανόμετρα (νερού και υδραργύρου) και να αναφερθεί ο αριθμός Re οπότε δηλώνεται αν έχω στρωτή ή τυρβώδη ροή βασιζόμενος στη τιμή του κρίσιμου αριθμού Re. Να αναφερθεί και η περιοχή των ταχυτήτων που έχω μετάβαση από στρωτή σε τυρβώδη ροή.

Απάντηση:

Στον 1^ο πίνακα και στον 2^ο έχουμε συνεχώς τυρβώδη ροή διότι ο αριθμός Reynolds είναι παντού μεγαλύτερος από 2000 ($Re > 2000$). Για το μανόμετρο νερού η ταχύτητα κυμαίνεται από 0.32 m/s έως 1.30 m/s ενώ για το μανόμετρο υδραργύρου η ταχύτητα κυμαίνεται από 0.82 m/s έως 3.31 m/s.

Σχόλιο (ii):

Ποια θα είναι η αλλαγή στους υπολογισμούς του ιξώδους μ αν έχουμε τα εξής λάθη στις μετρήσεις μας:

(α) Λάθος 1,0 mm στο μήκος του σωλήνα μεταξύ των δυο πιεζομετρικών σωλήνων

(β) Λάθος 0,003 mm στη μέτρηση της διαμέτρου του σωλήνα.

Απάντηση:

(α) Λάθος υπολογισμός του μήκους L κατά 1mm (π.χ. αύξηση) για την ίδια πτώση πίεσης, θα έχει ως αποτέλεσμα σύμφωνα με τον τύπο $i=\Delta H/\Delta L$, τον υπολογισμό εσφαλμένης υδραυλικής βαθμίδας i (μικρότερης). Όμως σύμφωνα με την εξίσωση Darcy-Weisbach, $\mu=i g D^2/32u$, η υποεκτίμηση της υδραυλικής βαθμίδας θα έχει σαν επακόλουθο την υποεκτίμηση του δυναμικού ιξώδους, μ . Το αντίστροφο ισχύει για την μείωση του σωλήνα μήκους L κατά 1mm.

(β) αν η διάμετρος D αυξάνει κατά 0.03mm, τότε σύμφωνα με την εξίσωση Darcy-Weisbach, $\mu=i g D^2/32u$ και με παρόμοιο σκεπτικό με το (α), θα υπερεκτιμηθεί και ο συντελεστής ιξώδους, μ . Αντιστρόφως μείωση της D κατά 0.03 mm θα συνεπάγεται υποεκτίμηση του ιξώδους μ .

Σχόλιο (iii):

Να συγκρίνετε τις τιμές του συντελεστή τριβής f με χρήση της σχέσης του Blasius ($f=0,316 Re^{-0.25}$) με τις αντίστοιχες τιμές f από τον συμπληρωμένο πίνακα τιμών.

Απάντηση:

Για μανόμετρο νερού:

Blasius $f=0.316 Re^{-0.25}$	Συντελεστής τριβής f
0,044505155	0,071174271
0,03680543	0,078507251
0,036264821	0,074930211
0,035104695	0,077765853
0,0326686	0,072488884
0,0326686	0,081237543
0,031861344	0,077754517
0,031342227	0,076253016

Για μανόμετρο υδραργύρου:

Blausius $f=0.316 Re^{-0.25}$	Συντελεστής τριβής f
0,027995707	0,035104695
0,034994634	0,031212978
0,028756084	0,028662863
0,030902206	0,027081151
0,032565228	0,026333937
0,029531583	0,025798051
0,028421039	0,025113142
0,0286956	0,024822768

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Δρ Περικλής Κορωνάκης, ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΡΕΥΣΤΩΝ, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΙΩΝ, ΤΡΙΤΗ ΕΚΔΟΣΗ
2. Νανούσης Δ.Νανούσης, ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗ, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΙΩΝ, Β' ΤΟΜΟΣ
3. Εργαστηριακές σημειώσεις Α.Τ.Ε.Ι ΠΑΤΡΩΝ, ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΡΕΥΣΤΩΝ Ι
4. Εργαστηριακές σημειώσεις Α.Τ.Ε.Ι ΠΑΤΡΩΝ, ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΡΕΥΣΤΩΝ ΙΙ

Πηγες από το διαδίκτυο:

1. <http://www.hvacolutions.gr>
2. www.deka.gr

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

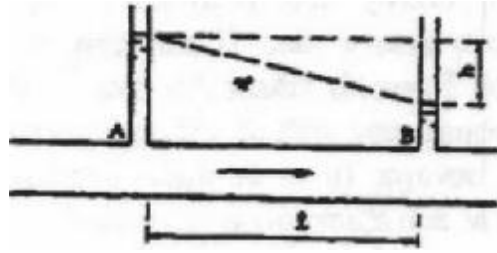
Στο συγκεκριμένο παράρτημα θα αναφερθούμε στο θεωρητικό μέρος της άσκησης και πιο συγκεκριμένα θα αναφέρουμε τον σκοπό, τα είδη των ροών και στην τραχύτητα του σωλήνα, ώστε να ενσωματωθεί στο φυλλάδια διδασκαλίας του πειράματος στο εργαστήριο Μηχανικής Ρευστών.

Όταν ένα ρευστό κινείται μέσα σ' ένα σωλήνα, τότε δυνάμεις τριβής αναπτύσσονται μεταξύ των εσωτερικών τοιχωμάτων του και του ρευστού. Οι δυνάμεις αυτές μαζί με τις δυνάμεις εσωτερικής τριβής (λόγω του ιξώδους του ρευστού) έχουν σαν συνέπεια την **απώλεια ενέργειας του κινουμένου ρευστού κατά μήκος 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 μήκος του σωλήνα θα είναι συνάρτηση των παραπάνω ποσοτήτων καθώς και των κατασκευαστικών στοιχείων του σωλήνα (δηλ. του μήκους της διαμέτρου και της τραχύτητας 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 (τυρβώδη ροή). Ο προσδιορισμός της φύσεως της ροής, **στρωτής ή τυρβώδους**, που γίνεται ως γνωστό με τον αριθμό Reynolds, και ο υπολογισμός του συντελεστή 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: η πειραματική απόδειξη του νόμου των ενεργειακών απωλειών κατά μήκος ενός σωλήνα και ειδικότερα, η αλλαγή της εκφράσεως του για την στρωτή και τυρβώδη ροή με τον υπολογισμό της κρίσιμης τιμής του αριθμού Reynolds. Επίσης πρέπει να προσδιορίσουμε το ιξώδες του ρευστού από το νόμο των ενεργειακών απωλειών λόγω τριβών για στρωτή ροή και προσδιορίσουμε τον συντελεστή τριβής από το νόμο των ενεργειακών απωλειών για τυρβώδη ροή και η μεταβολή του σαν συνάρτηση του αριθμού Reynolds.

ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Θεωρούμε το κλασσικό πρόβλημα της ροής ρευστού σε γεμάτο σωλήνα, εντός του οποίου το ρευστό κινείται είτε λόγω πιέσεως είτε λόγω βαρύτητας ή και από τα δύο μαζί. Θα εξετάσουμε την περίπτωση του οριζόντιου ευθυγράμμου σωλήνα. Το σχήμα δείχνει την απλή αυτή περίπτωση.



Σχήμα 1: Διάγραμμα επεξηγήσεως της υδραυλικής βαθμίδας

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 στο μήκος l του σωλήνα. Συνήθως τη μεταβολή της απώλειας του ολικού ύψους κατά μήκος του σωλήνα εκφράζουμε με τον όρο **υδραυλική βαθμίδα (i)**, δηλαδή:

$$i = \frac{dh}{dl} \quad (i)$$

Αν στηριχθούμε στις εισηγήσεις του Reynolds, οι ροές των ρευστών διαχωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες με το εξής απλό πείραμα. Διοχετεύοντας 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.

Στρωτή ροή, γενικά, είναι η ροή εκείνη, που γειτονικά στρώματα του ρευστού κινούνται χωρίς μακροσκοπική ανάμιξη 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 εσωτερικής 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 στρώματα της στρωτής ροής εδώ δεν υπάρχει γιατί γίνεται μίξη μεταξύ των διαφόρων στρωμάτων και ρευστά σωματίδια μετακινούνται από το ένα στρώμα στο άλλο. Τούτο 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 με διαφορετικά υγρά σε διαφορετικές θερμοκρασίες συμπεραίνουμε ότι η παράμετρος που καθόριζα τότε μια ροή είναι στρωτή ή τυρβώδης είναι **ο αριθμός Reynolds της κινήσεως**, δηλαδή:

$$Re = \frac{\rho u D}{\mu} \quad (ii)$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα του ρευστού, u η ταχύτητα του ρευστού, D η διάμετρος του σωλήνα και μ το ιξώδες του ρευστού. **Η κίνηση του ρευστού 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 κατά μήκος αυτού. Από την άλλη πλευρά, αν τα πειράματα γίνονται ελαττώνοντας την τιμή της ροής η μετάπτωση της ροής από τυρβώδη σε στρωτή ροή 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:

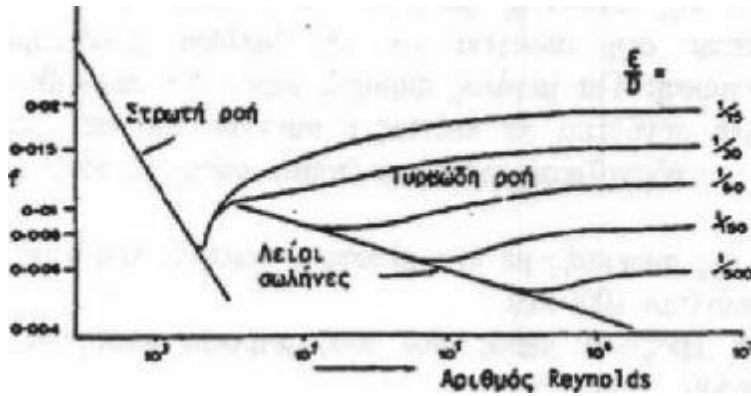
$$i \sim u^n \quad (iii)$$

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

Αντίθετα η έκφραση του νόμου (iii) για τυρβώδη ροή δεν είναι τόσο απλή. Στην πράξη χρησιμοποιείται η **εξίσωση των Darcy-Weisbach**:

$$i = \frac{f u^2}{D 2g} \quad (iv)$$

όπου f είναι ο συντελεστής τριβής, που προσδιορίζεται πειραματικά. Το f μεταβάλλεται και είναι συνάρτηση του αριθμού Re και της τραχύτητας του σωλήνα (Σχήμα 2).



Σχήμα 2: Μεταβολή του συντελεστού τριβής f σαν συνάρτηση του αριθμού Reynolds (και με διαφορετικούς λόγους τραχύτητας/διαμέτρου).

Παρατηρούμε ότι η εξίσωση (iv), όταν τεθεί,

$$f = \frac{64}{Re} \quad (v)$$

αποδεικνύεται πειραματικά ότι ισχύει μόνο για στρωτή ροή. Ο προσδιορισμός του συντελεστού τριβής από την σχέση (iv) και η μεταβολή του συναρτήσει του αριθμού Reynolds (αφού η τραχύτητα του σωλήνα θεωρείται σταθερή) θα εμφανισθεί σε γραφική παράσταση (Σχήμα 2).

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ

Στο συγκεκριμένο παράρτημα θα αναφερθούμε αναλυτικά την πειραματική διαδικασία και παραθέτουμε τις γραφικές παραστάσεις από όπου μπορούμε να αντλήσουμε διάφορα δεδομένα. Σκοπός αυτού του παραρτήματος είναι να ενσωματωθεί στην εργαστηριακή άσκηση της Μηχανικής των Ρευστών, ως υπόδειγμα άσκησης.

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Η συσκευή του πειράματος 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 υπερχειλίσεως νερού ή απ' ευθείας από τη δεξαμενή νερού του υδραυλικού τραπέζιου και όπου εκεί περνάει από το υδρόμετρο όπου για να δούμε τον όγκο του νερού που θα εισέρθει στην πειραματική συσκευή. 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 στην 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 τον ρυθμιστή παροχής και υπολογίζεται με τη βοήθεια της συλλογής του νερού σε ογκομετρικό σωλήνα.

ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ

Η συσκευή του πειράματος μας, που περιγράφηκε παραπάνω μεταφέρεται έτοιμη για χρήση. Η προετοιμασία για το πείραμα γίνεται με τις παρακάτω ενέργειες:

1. Να τοποθετήσετε την 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 τραπέζιου. Σημείωση: Για μεγάλες παροχές νερού δεν παρεμβάλλεται η δεξαμενή υπερχειλίσεως αλλά συνδέεται απ' ευθείας η συσκευή του πειράματος μας με τη βαλβίδα εφοδιασμού του υδραυλικού τραπέζιου (αυτό πρέπει να γίνει ύστερα από σύσταση του διδάσκοντα).

3. Στη συνέχεια το νερό εισέρχεται από το υδρόμετρο όπου εκεί μετράμε τον όγκο του νερού που περνάει στη συσκευή μας.
4. Να στρίψετε το πρώτο διακοπτάκι κάθετα προς τον μεταλλικό σωλήνα και το δεύτερο παράλληλα προς τον μεταλλικό σωλήνα προς το μέρος των πιεζομετρικών σωλήνων για να λειτουργήσει το μανόμετρο νερού.
5. Κλείστε τον ρυθμιστή παροχής της διάταξης και ανοίξτε την αντλία του τραπέζιου, έτσι ώστε το νερό να ανέβει προοδευτικά στους πιεζομετρικούς σωλήνες.
6. Το νερό ισορροπεί περίπου στη μέσο της κλίμακας. Αυτό συμβαίνει διότι προϋπήρχε αέρας εντός των πιεζομετρικών σωλήνων ο όποιος αέρας πιέζεται τώρα από το νερό δημιουργώντας έτσι υπερπίεση.
7. Αν θέλετε να αυξήσετε το ύψος της στάθμης του νερού στους πιεζομετρικούς σωλήνες πιέστε με ένα αιχμηρό αντικείμενο την αεροβαλβίδα που βρίσκεται στα δεξιά του κολεκτέρ αποβάλλοντας έτσι αέρα από το σύστημα. Αν θέλετε τώρα να μειώσετε το ύψος της στάθμης του νερού θα πρέπει να προσθέσετε αέρα πάλι από τη δεξιά αεροβαλβίδα του κολεκτέρ. Επειδή όμως το κολεκτέρ είναι βαρέως τύπου δεν αρκεί μια απλή τρόμπα ποδήλατου αλλά η χρήση αεροσυμπιεστή υψηλής πίεσεως. Γι αυτό καλό είναι να αφήσετε τη στάθμη του νερού στη μέση των σωλήνων έτσι ώστε να έχετε μια καλή εικόνα μετρήσεων αφού το εργαστήριο δεν διαθέτει αεροσυμπιεστή υψηλής πίεσεως.
8. Αν υπάρχουν δακτύλιοι νερού στους πιεζομετρικούς σωλήνες χτυπάτε με το δάχτυλο σας τους σωλήνες μέχρι ότου τους απαλλάξετε από αυτούς, προσπαθώντας έτσι το ύψος του νερού να είναι το ίδιο και στους δυο πιεζομετρικούς σωλήνες
9. Να παρατηρήσετε τη στάθμη του νερού στους πιεζομετρικούς σωλήνες. Αν δεν παραμένει σταθερή η στάθμη αυτή, τότε πρέπει να αλλάξετε τους πιεζομετρικούς σωλήνες. Αν η στάθμη του νερού παραμένει σταθερή, προχωρείστε στην εκτέλεση του πειράματος.

Τέλος θυμηθείτε με ένα αιχμηρό αντικείμενο (πχ κατσαβίδι) να πατήσετε την αεροβαλβίδα για να φύγει το νερό από τους πιεζομετρικούς σωλήνες και να πέσει στο υδραυλικό τραπέζι.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Ύστερα από την προετοιμασία της συσκευής εκτελείται το πείραμα.

α) Πειραματική απόδειξη του νόμου των απωλειών

α(1) Πρέπει να έχετε έτοιμο χαρτί για δύο 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 στον 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 τον ρυθμιστή παροχής ελέγχου σιγά και να αυξήσετε την παροχή του νερού μέχρι όπου η διαφορά της στάθμης του νερού γίνει μέγιστη. Αυτό σημαίνει ότι το ύψος h_1 όταν φτάσει στο μέγιστο σημείο και λίγο πριν μπει στο κολεκτέρ (προσοχή μην μπει το νερό μέσα στο κολεκτέρ γιατί θα πρέπει να θέσουμε τη λειτουργία του τραπέζιου εκτός).

α(3) Με τον ρυθμιστή παροχής μπορείτε να αυξομειώνετε την παροχή του νερού που μετριέται με τη βοήθεια του υδρομέτρου, έτσι μπορείτε να μετρήσετε διάφορες ποσότητες (ανά 500 ml) μετρώντας τον αντίστοιχο χρόνο. Θα πάρετε τόσες μετρήσεις που θα τις καταχωρήσετε στον πίνακα 1 του παραρτήματος III αυτής άσκησης τόσες όσες χρειάζονται για την καλύτερη σχεδίαση της γραφικής παράστασης όπως αναφέρεται στην οδηγία α(1).

α(4) Σημειώστεν η ροή μας είναι τυρβώδης σε όλο το μήκος του σωλήνα.

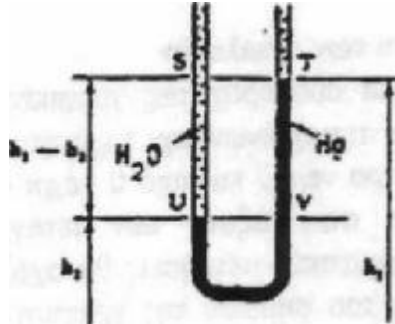
α(5) Προετοιμάζουμε την πειραματική συσκευή για το πείραμα αφού προηγουμένως στρίψουμε το πρώτο διακοπτάκι παράλληλα προς τον μεταλλικό σωλήνα και το δεύτερο διακοπτάκι κάθετα προς τον μεταλλικό σωλήνα για να λειτουργήσει το μανόμετρο υδραργύρου.

α(6) Σε περίπτωση που υπάρχουν αεροφουσαλίδες (σχεδόν ποτέ) ανοίγουμε τις βαλβίδες εξαέρωσης στο πάνω μέρος του μανόμετρου τύπου U έτσι ώστε να φύγει ο αέρας και να αρχίσει να τρέχει νερό.

α(7) Να επαναλάβετε τις πειραματικές διαδικασίες α(2) και α(3) με τις καινούργιες προϋποθέσεις της πειραματικής συσκευής (δηλ. με λειτουργία του υδραργυρικού μανομέτρου) έχοντας υπόψη σας πάλι την περίπτωση α(1). Τα αποτελέσματα τώρα θα καταχωρούνται στον πίνακα 2 του συμπληρώματος της ασκήσεως μας όπου οι αναγνώσεις των διαφορών h_1-h_2 σε ύψος υδραργύρου μετατρέπονται σε ισοδύναμο ύψος νερού, όταν πολλαπλασιασθούν με το συντελεστή **12.6**.

Σημείωση: Η χρήση του συντελεστή 12.6 φαίνεται από το Σχ. 6.7. Οι πιέσεις στα σημεία U και V είναι ίσες καθότι βρίσκονται στο ίδιο οριζόντιο επίπεδο. Η πίεση στο σημείο S είναι $(h_1-h_2)mH_2O$. Ενώ η πίεση στο T είναι $(h_1-h_2)mHg=(h_1-h_2) \times 13.6 mH_2O$. Η διαφορά τους θα είναι:

$$(h_1 - h_2) \times 13,6 mH_2O - (h_1 - h_2) mH_2O = 12,6(h_1 - h_2) mH_2O$$



Σχήμα 1: Διάγραμμα υδραργυρικού μανομέτρου

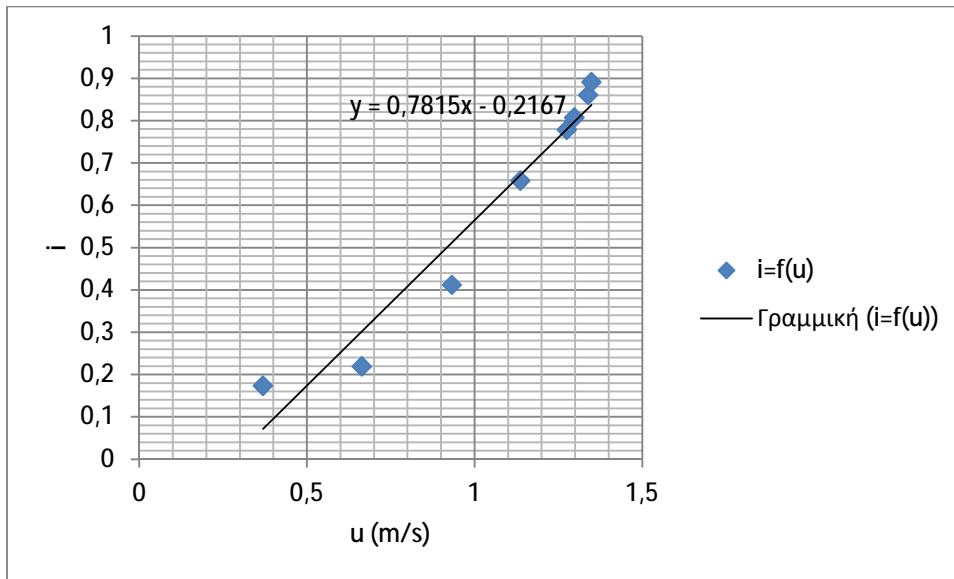
ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Μετρήσεις μανομέτρου νερού

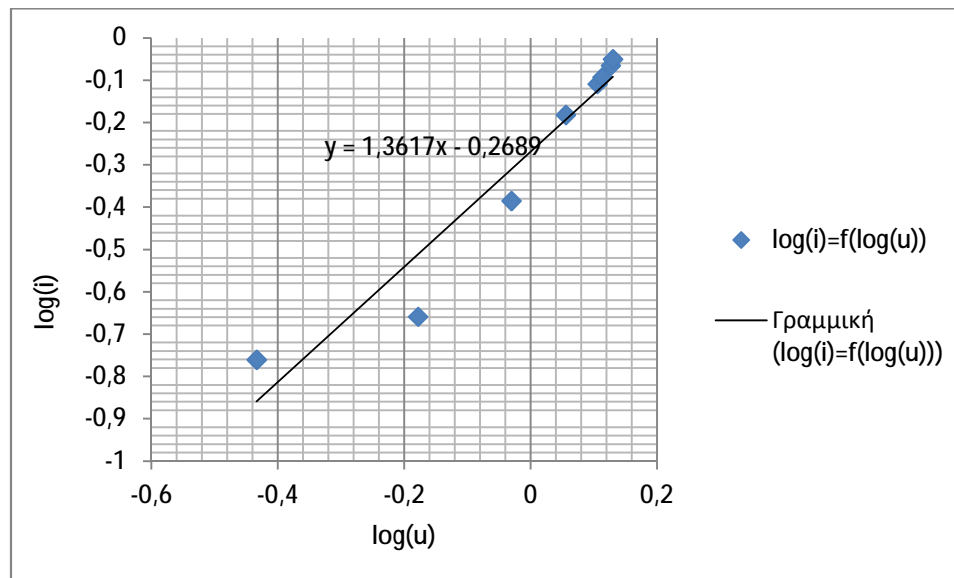
Πίνακας 1

όγκος νερού	χρόνος	ύψος εισόδου	ύψος εξόδου	Ταχύτητα	διαφορά υψών	υδρ/κη βαθμίδα	logi
V (ml)	t (sec)	h ₁ (mm)	h ₂ (mm)	u (m/sec)	h ₁ -h ₂ (mH ₂ O)	i	
500	27	310	219	0,36873489	0,091	0,173664122	- 0,76028989
1000	30	320	205	0,66357125	0,115	0,219465649	- 0,65863345
1500	32	350	134	0,93254849	0,216	0,41221374	- 0,38487754
2000	35	415	70	1,13682102	0,345	0,658396947	- 0,18151219
2500	39	445	37	1,27527999	0,408	0,778625954	- 0,10867112
3000	46	450	27	1,29745878	0,423	0,807251908	- 0,09299092
3500	52	465	14	1,33904399	0,451	0,860687023	- 0,06515475
4000	59	472	5	1,3487707	0,467	0,891221374	- 0,05001441

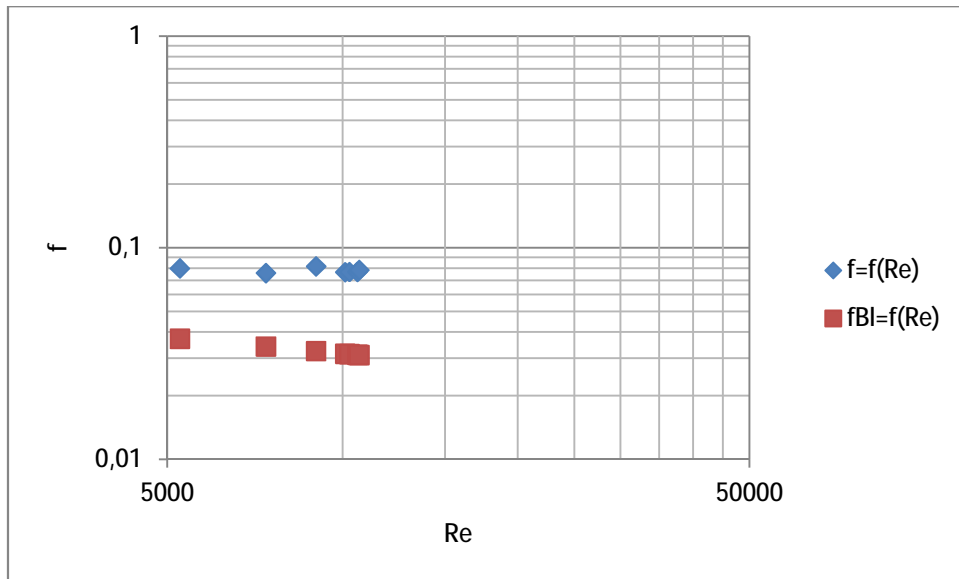
logu	συν/της τριβής	Αρ. Reynolds	Blaussius
	F	Re	f=0,316Re ^{-0.25}
-0,43328577	0,204362695	2920,672396	0,042984945
-0,17811244	0,07974646	5256,009901	0,037112742
-0,03032857	0,075840222	7386,52273	0,034086081
0,055692096	0,081512385	9004,522947	0,032439332
0,105605546	0,076601587	10101,22767	0,031520532
0,113093568	0,076725889	10276,90119	0,031384957
0,126794845	0,076802534	10606,28905	0,031138395
0,129938124	0,078384344	10683,33231	0,031082103



Διάγραμμα 1: Μεταβολή της υδραυλικής βαθμίδας συναρτήσει της ταχύτητας



Διάγραμμα 2: Λογαριθμικό διάγραμμα μεταβολής της υδραυλικής βαθμίδας συναρτήσει της ταχύτητας.



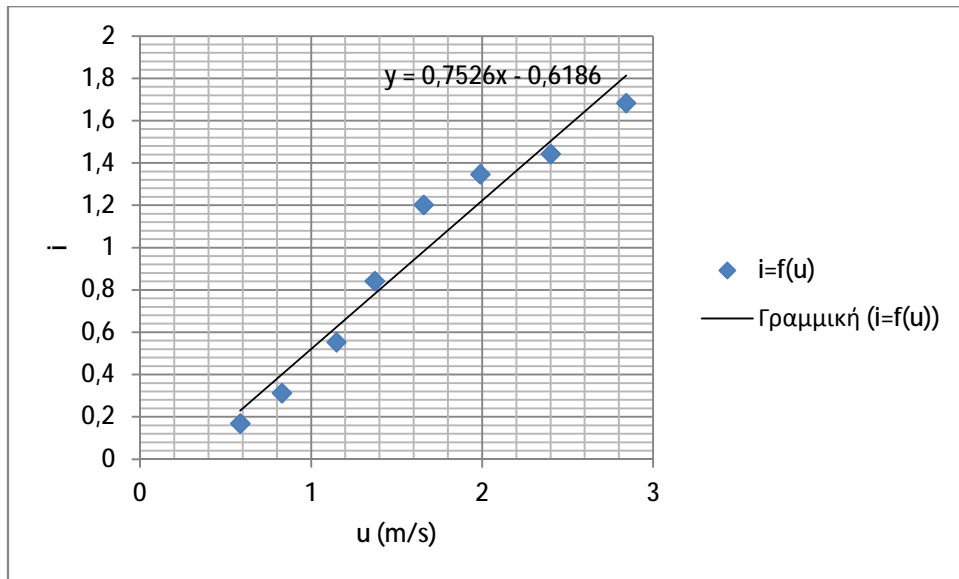
Διάγραμμα 3: Μεταβολή του συντελεστή του συντελεστή τριβής συναρτήσει του αριθμού Reynolds

Μετρήσεις μανομέτρου υδραργύρου

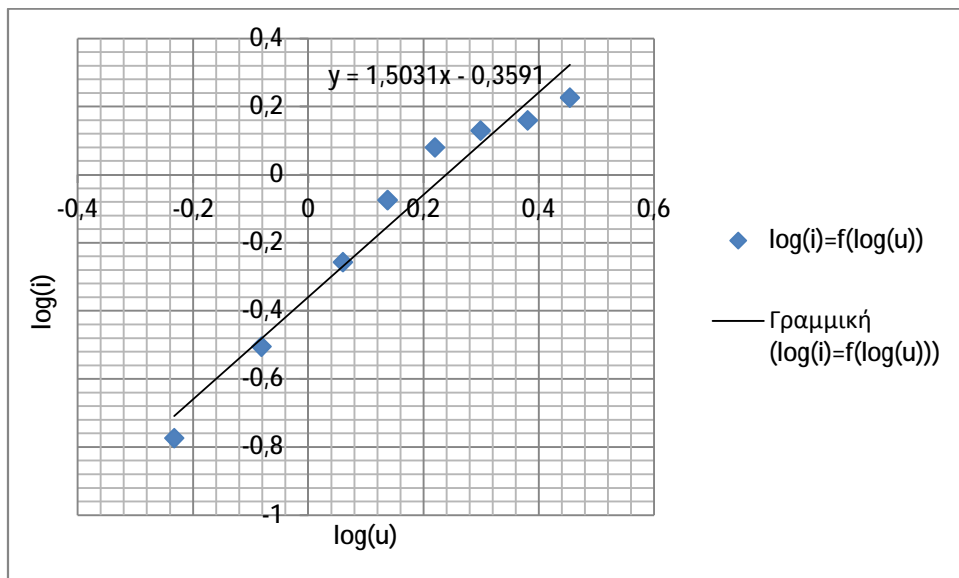
Πίνακας 2

V (ml)	t (sec)	h ₁ (mm)	h ₂ (mm)	u (m/sec)	h ₁ -h ₂ (mH ₂ O)	υδρ/κη βαθμίδα i	logi
500	17	252	245	0,58512847	0,0882	0,168320611	-0,7738627
1000	24	255	242	0,828932	0,1638	0,31259542	-0,50501739
1500	26	260	237	1,14775199	0,2898	0,553053435	-0,25723291
2000	29	265	230	1,37202537	0,441	0,841603053	-0,0748927
2500	30	275	225	1,65786399	0,63	1,202290076	0,080009262
3000	30	278	222	1,98943679	0,7056	1,346564885	0,129227285
3500	29	279	219	2,4010444	0,756	1,442748092	0,159190509
4000	28	285	215	2,84205256	0,882	1,683206107	0,226137298

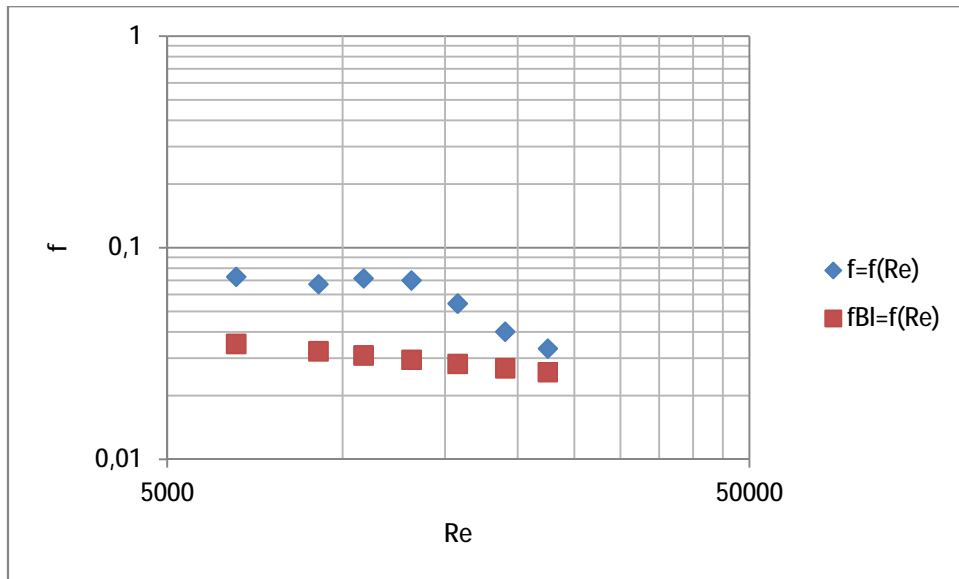
logu	συν/της τριβής	Αρ. Reynolds	Blaussius
	f	Re	f=0,316Re ^{-0.25}
-0,23274877	0,07866016	4634,680929	0,038298532
-0,0814811	0,072788838	6565,797982	0,035104695
0,059848056	0,067172415	9091,104899	0,032361818
0,137362142	0,071532434	10867,52769	0,030949554
0,219548899	0,069989267	13131,59596	0,029519412
0,298730145	0,054436097	15757,91516	0,02820411
0,380400191	0,040041479	19018,17347	0,026908834
0,453632105	0,033342109	22511,30737	0,025798051



Διάγραμμα 4: Μεταβολή της υδραυλικής βαθμίδας συναρτήσει της ταχύτητας



Διάγραμμα 5: Λογαριθμικό διάγραμμα μεταβολής της υδραυλικής βαθμίδας συναρτήσει της ταχύτητας.



Διάγραμμα 6: Μεταβολή του συντελεστή του συντελεστή τριβής συναρτήσει του αριθμού Reynolds

ΣΧΟΛΙΑ

Σχόλιο (i):

Βασιζόμενοι στο διάγραμμα να αναφερθούν οι περιοχές τιμών και στα δύο μανόμετρα (νερού και υδραργύρου) και να αναφερθεί ο αριθμός Re οπότε δηλώνεται αν έχω στρωτή ή τυρβώδη ροή βασιζόμενος στη τιμή του κρίσιμου αριθμού Re. Να αναφερθεί και η περιοχή των ταχυτήτων που έχω μετάβαση από στρωτή σε τυρβώδη ροή.

Απάντηση:

Στον 1^ο πίνακα και στον 2^ο έχουμε συνεχώς τυρβώδη ροη διότι ο αριθμός Reynolds είναι παντού μεγαλύτερος από 2000 ($Re > 2000$). Για το μανόμετρο νερού η ταχύτητα κυμαίνεται από 0.32 m/s έως 1.30 m/s ενώ για το μανόμετρο υδραργύρου η ταχύτητα κυμαίνεται από 0.82 m/s έως 3.31 m/s.

Σχόλιο (ii):

Ποια θα είναι η αλλαγή στους υπολογισμούς του ιξώδους μ αν έχουμε τα εξής λάθη στις μετρήσεις μας:

(α) Λάθος 1,0 mm στο μήκος του σωλήνα μεταξύ των δυο πιεζομετρικών σωλήνων

(β) Λάθος 0,003 mm στη μέτρηση της διαμέτρου του σωλήνα.

Απάντηση:

(α) Λάθος υπολογισμός του μήκους L κατά 1mm (π.χ. αύξηση) για την ίδια πτώση πίεσης, θα έχει ως αποτέλεσμα σύμφωνα με τον τύπο $i = \Delta H / \Delta L$, τον υπολογισμό εσφαλμένης υδραυλικής βαθμίδας i (μικρότερης). Όμως σύμφωνα με την εξίσωση Darcy-Weisbach, $\mu = i g D^2 / 32 u$, η υποεκτίμηση της υδραυλικής βαθμίδας θα έχει σαν επακόλουθο την υποεκτίμηση του δυναμικού ιξώδους, μ . Το αντίστροφο ισχύει για την μείωση του σωλήνα μήκους L κατά 1mm.

(β) αν η διάμετρος D αυξάνει κατά 0.03mm, τότε σύμφωνα με την εξίσωση Darcy-Weisbach, $\mu = i g D^2 / 32 u$ και με παρόμοιο σκεπτικό με το (α), θα υπερεκτιμηθεί και ο συντελεστής ιξώδους, μ . Αντιστρόφως μείωση της D κατά 0.03 mm θα συνεπάγεται υποεκτίμηση του ιξώδους μ .

Σχόλιο (iii):

Να συγκρίνετε τις τιμές του συντελεστή τριβής f με χρήση της σχέσης του Blasius ($f = 0,316 Re^{-0.25}$) με τις αντίστοιχες τιμές f από τον συμπληρωμένο πίνακα τιμών.

Απάντηση:

Για μανόμετρο νερού:

Blasius $f = 0.316 Re^{-0.25}$	Συντελεστής τριβής f
0,044505155	0,071174271
0,03680543	0,078507251
0,036264821	0,074930211
0,035104695	0,077765853
0,0326686	0,072488884
0,0326686	0,081237543
0,031861344	0,077754517
0,031342227	0,076253016

Για μανόμετρο υδραργύρου:

Blausius $f=0.316 Re^{-0.25}$	Συντελεστής τριβής f
0,035104695	0,027995707
0,031212978	0,034994634
0,028662863	0,028756084
0,027081151	0,030902206
0,026333937	0,032565228
0,025798051	0,029531583
0,025113142	0,028421039
0,024822768	0,0286956

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ

Στο συγκεκριμένο παράρτημα θα παραθέσουμε δυο πινάκες έναν για μανόμετρο νερού και έναν για μανόμετρο υδραργύρου για να εξασκηθούν στις πράξεις και να αφομοιώσουν οι φοιτητές το συγκεκριμένο πείραμα.

Πίνακας 1: Αποτελέσματα με χρήση μανόμετρο νερού

Δεδομένα: Μήκος σωλήνα: $l=524\text{mm}$, Διάμετρος σωλήνα: $D=8\text{mm}$, Διάμετρος σωλήνα: $A=50,24\text{ mm}^2$

ΟΓΚΟΣ ΝΕΡΟΥ V (ml)	ΧΡΟΝΟΣ t (sec)	ΥΨΟΣ ΕΙΣΟΔΟΥ h ₁ (mm)	ΥΨΟΣ ΕΞΟΔΟΥ h ₂ (mm)	ΤΑΧΥΤΗΤΑ u (m/sec)	ΔΙΑΦΟΡΑ ΥΨΩΝ h ₁ -h ₂ (mH ₂ O)	ΥΔΡ/ΚΗ ΒΑΘΜΙΔΑ i	logi	logu	ΣΥΝ/ΤΗΣ ΤΡΙΒΗΣ f	ΑΡΙΘΜΟΣ REYNOLDS Re

Βοηθητικές σχέσεις για τους υπολογισμούς του πίνακα: $u = \frac{V}{At}$, $i = \frac{h_1 - h_2}{l}$,
 $f = i / (\frac{u^2}{2gD})$, $Re = \frac{\rho u D}{\mu}$, όπου $\rho = 1000\text{ kg/m}^3$, $\mu = 0,00101\text{ Pa s}$

Πίνακας 2: Αποτελέσματα με χρήση μανομέτρου υδραργύρου

Δεδομένα: Μήκος σωλήνα: $l=524\text{mm}$, Διάμετρος σωλήνα: $D=8\text{mm}$, Διάμετρος σωλήνα: $A=50,24\text{ mm}^2$

ΟΓΚΟΣ ΝΕΡΟΥ V (ml)	ΧΡΟΝΟΣ t (sec)	ΥΨΟΣ ΕΙΣΟΔΟΥ h_1 (mm)	ΥΨΟΣ ΕΞΟΔΟΥ h_2 (mm)	ΤΑΧΥΤΗΤΑ U (m/sec)	ΔΙΑΦΟΡΑ ΥΨΩΝ h_1-h_2 (mH ₂ O)	ΥΔΡ/ΚΗ ΒΑΘΜΙΔΑ i			ΣΥΝ/ΤΗΣ ΤΡΙΒΗΣ f	ΑΡΙΘΜΟΣ REYNOLDS Re

Βοηθητικές σχέσεις για τους υπολογισμούς του πίνακα: $u = \frac{V}{At}$, $i = \frac{h_1 - h_2}{l}$,
 $f = i / (\frac{u^2}{2gD})$, $Re = \frac{\rho u D}{\mu}$, όπου $\rho = 1000\text{ kg/m}^3$, $\mu = 0,00101\text{ Pa s}$

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ IV

Σε αυτό το παράρτημα θα πιστοποιήσουμε περαιτέρω την ορθή λειτουργία της διάταξης μας ελέγχοντας την επαναληψιμότητα των μετρήσεων. Λαμβάνοντας δύο ενδεικτικά σετ μετρήσεων από αυτά που πραγματοποιήσαμε στο εργαστήριο, παρατηρούμε ότι οι μετρήσεις υπό τις ίδιες συνθήκες διεξαγωγής του πειράματος έχουν (παρακάτω πίνακας) έχουν ελάχιστη διαφορά από τις μετρήσεις των πινάκων που βρίσκονται στο κεφάλαιο 4 και παράρτημα II αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι όλες οι μετρήσεις έχουν πραγματοποιηθεί στο εργαστήριο υδραυλικής του Α.Τ.Ε.Ι. ΠΑΤΡΩΝ. Οι μετρήσεις αυτές έχουν καταχωρηθεί στους παρακάτω πίνακες. Στον πρώτο πίνακα βρίσκονται οι μετρήσεις από τη στήλη νερού ενώ στο δεύτερο από τη στήλη υδραργύρου.

Μετρήσεις μανομέτρου νερού

ΟΓΚΟΣ ΝΕΡΟΥ V (ml)	ΧΡΟΝΟΣ t (sec)	ΥΨΟΣ ΕΙΣΟΔΟΥ h ₁ (mm)	ΥΨΟΣ ΕΞΟΔΟΥ h ₂ (mm)
500	25	310	219
1000	30	320	205
1500	32	360	134
2000	35	415	70
2500	39	445	37
3000	46	450	27
3500	52	465	14
4000	59	472	05

Μετρήσεις μανομέτρου υδραργύρου

ΟΓΚΟΣ ΝΕΡΟΥ V (ml)	ΧΡΟΝΟΣ t (sec)	ΥΨΟΣ ΕΙΣΟΔΟΥ h ₁ (mm)	ΥΨΟΣ ΕΞΟΔΟΥ h ₂ (mm)
500	17	252	245
1000	24	255	242
1500	26	260	237
2000	29	265	230
2500	30	275	225
3000	30	276	223
3500	29	279	220
4000	28	285	218