



ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ
Τμήμα Μηχανολογίας
Εργαστήριο Ρευστοδυναμικών Μηχανών

775
NIX

Τ.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΤΟΥ
ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΗΣ ΣΠΗΛΑΙΩΣΗΣ ΣΕ ΦΥΓΟΚΕΝΤΡΙΚΕΣ
ΑΝΤΛΙΕΣ

ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ:

ΘΕΟΧΑΡΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

Κ.Α. ΚΑΒΒΑΔΙΑΣ

ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ
ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ

ΑΙΓΑΛΕΩ

ΙΟΥΝΙΟΣ 2013

ΓΡΑΜΜΑΤΕΙΑ ΜΗΧ/ΤΩΝ



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι να αναπτύξουμε μια ηλεκτρονική πλατφόρμα αυτόματης καταγραφής μετρήσεων η οποία **α)** θα οπτικοποιεί την απόδοση της αντλίας σε πραγματικό χρόνο **β)** καθιστά εφικτό τον πειραματικό προσδιορισμό του σημείου εμφάνισης του φαινομένου της σπηλαίωσης. Η πειραματική εγκατάσταση, η οποία αναπτύσσεται στην παρούσα εργασία, έχει σχεδιαστεί βάσει του διεθνούς προτύπου ISO9906:1999. Για να μπορέσει να στοιχειοθετηθεί πληρέστερα η εργασία αναπτύχθηκαν στην ίδια εργασία θεματικές ενότητες οι οποίες ασχολούνται με **α)** τις βασικές αρχές της ρευστομηχανικής **β)** τις αρχές λειτουργίας, εγκατάστασης και ελέγχου των ρευστοδυναμικών μηχανών **γ)** την ανάλυση παρόμοιων εγκαταστάσεων εκπαιδευτικών φορέων και βιομηχανιών παγκοσμίου κλάσης.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ : ISO 9909, Πειραματικές Εγκαταστάσεις, Σπηλαίωση, Οπτικοποίηση Αποτελεσμάτων, Μετρήσεις Πραγματικού Χρόνου, Χαρακτηριστική Καμπύλη Αντλιών.

ABSTRACT

With this study we aim to develop Data Acquisition Device which will be able to record experimental measurements in order to **a)** visualize pump performance curve in real time **b)** detect experimentally the particular point where pump starts to cavitate. The present study is designed according to the international standard ISO 9906:1999. In order to achieve our goal by the best possible way we enriched our study with 3 more chapters related to **a)** the basic fundamentals of fluid dynamics **b)** principles (installation and operation) of fluid pumps **c)** we analysed similar installations of educational institutes and industries worldwide.

KEY WORDS: ISO 9906, Experimental Installations, Cavitation, DAQ, Real Time Measurements, Pump Performance Curve.



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πρόλογος

Περιεχόμενα

Εισαγωγή _____ σελ. 1

Κεφ. 1 **Περί Ρευστομηχανικής**

Περίληψη Κεφαλαίου _____ σελ. 3

1-1 Ιδιότητες των Ρευστών _____ σελ. 4

1-2 Είδη Ροής _____ σελ. 6

1-3 Θεμελιώδεις Νόμοι της Μηχανικής των Ρευστών _____ σελ. 14

1-4 Ρυθμοί Ροής Μάζας και όγκου _____ σελ. 15

1-5 Μακροσκοπική Ανάλυση Ροής _____ σελ. 16

1-6 Μακροσκοπική Εξίσωση Ενέργειας _____ σελ. 22

Κεφ. 2 **Περί Ρευστοδυναμικών Μηχανών**

Περίληψη Κεφαλαίου _____ σελ. 43

2.1 Γενικά Χαρακτηριστικά Υδροδυναμικών Μηχανών _____ σελ. 44

2.2 Κατασκευαστικά Χαρακτηριστικά Αντλιών _____ σελ. 49

2.3 Χαρακτηριστικά μεγέθη-Χαρακτηριστικές καμπύλες
αντλιών(Μανομετρικό-Παροχή) _____ σελ. 58

2.4 Το Φαινόμενο της Σπηλαιώσης _____ σελ. 64

Κεφ. 3 **Πρότυπες Δοκιμαστικές Εγκαταστάσεις**

Περίληψη Κεφαλαίου _____ σελ. 76

3.1 Εγκαταστάσεις Εκπαιδευτικών Ιδρυμάτων _____ σελ. 77

3.2 Εγκαταστάσεις Βιομηχανικών Μονάδων _____ σελ. 86



Κεφ. 4 Σχεδιασμός Αντλιοστασίου κατά BS EN ISO 9906:2000

	Περίληψη Κεφαλαίου	σελ.90
4.1	Σκοπός του προτύπου	σελ.91
4.2	Όροι και συμβολισμοί	σελ.92
4.3	Διεξαγωγή των πειραμάτων	σελ.97
4.4	Διεξαγωγή του Test	σελ.98
4.5	Κατασκευαστικά Στοιχεία Δοκιμαστικής Εγκατάστασης	σελ. 101
4.6	Απαιτήσεις Δοκιμών Προσομοίωσης Ροής	σελ. 102
4.7	Ορισμός Σημείων Λήψης Μετρήσεων Σε Πρότυπη Εγκατάσταση	σελ. 102
4.8	Μετρητικές Διατάξεις	σελ. 104

Κεφ. 5 Τεύχος Υπολογισμών/Πρόγραμμα DAQ

	Περίληψη Κεφαλαίου	σελ.112
5.1	Διαδικασία Δοκιμής (εγχειρίδιο δοκιμής)	σελ. 113
5.2	Τεύχος Υπολογισμών Πειραματικής Διαδικασίας	σελ.117

Πηγές

Βιβλιογραφία

Εγχειρίδιο Χρήστη (User's Guide)



Εισαγωγή

Η πρόσβαση σε καθαρό νερό είναι ένα αυτονόητο κεκτημένο για τον ανεπτυγμένο κόσμο, μιας και το σύνολο του πληθυσμού, περίπου το 97% , έχει άμεση πρόσβαση σε καθαρό, πόσιμο νερό. Το ποσοστό αυτό μειώνεται σε 86% για τις αναπτυσσόμενες χώρες. **Μόνο το 61%** της υπο-Σαχάριας Αφρικής έχει πρόσβαση σε καθαρό νερό και **ένα ποσοστό 14%** χρησιμοποιεί

επιφανειακά ύδατα για την εξυπηρέτησή του (καλλιέργειες, διατροφή).

Καθημερινά **πάνω 3000** παιδιά χάνουν τη ζωή τους από αδυναμία πρόσβασης σε καθαρό νερό. Τα

world
water
day

unicef



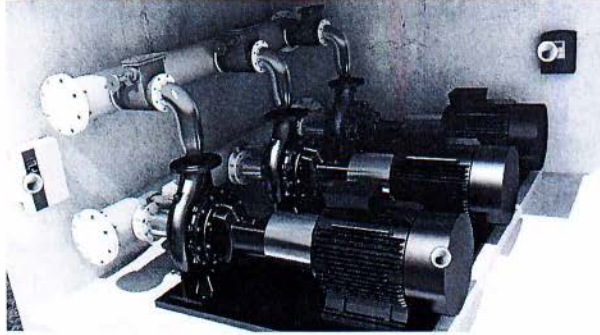
παραπάνω στοιχεία δημοσίευσε η unicef.org την παγκόσμια ημέρα νερού και μας δείχνουν ποσοτικοποιημένα την σημασία πρόσβασης σε καθαρό πόσιμο νερό. Σε περίπτωση που λάβουμε υπόψη και την εμπορική υπεραξία που αυτό προσθέτει (καλλιέργειες, γεωργία βιομηχανία κ.α.) κατανοούμε πλήρως την φράση πως **το νερό είναι πηγή ζωής**.

Η πρόσβαση σε καθαρό-ασφαλές νερό κρύβει ένα πολύ μεγάλο αριθμό ανθρώπων οι οποίοι εργάζονται αδειαιέπτως, και ένα ισχυρό βιομηχανικό κλάδο. Το βασικότερο στοιχείο σε αυτή την αλυσίδα, εκτός του ανθρώπινο παράγοντα, είναι οι ρευστοδυναμικές μηχανές, με την βοήθεια των οποίων αντλείται, επεξεργάζεται, διακινείται το νερό. Κατά συνέπεια στις ανεπτυγμένες χώρες και τις έντονα ανταγωνιστικές οικονομίες, κατευθυνθήκαμε σε εντατικές έρευνες και καινοτόμες λύσεις με σκοπό να κάνουν την πρόσβαση σε πόσιμο νερό συμφέρουσα. Κατά συνέπεια δημιουργήθηκαν συστήματα ελέγχου ποιότητας του νερού, αυτοματισμών των εγκαταστάσεων, ελέγχου των εγκαταστάσεων αλλά επίσης



αναπτύχθηκαν πρότυπα από τους μεγαλύτερους διεθνείς οργανισμούς (DIN, ASTM, ISO, BS) τα οποία αναφέρονται στην πιστοποίηση και την εγγύηση της αποδοτικής λειτουργίας των αντλιών.

Έχοντας κατά νου τα παραπάνω και βάσει της πενταετούς προϋπηρεσίας μου στον τομέα της διακίνησης, άντλησης και επεξεργασίας του νερού, προχώρησα στη σύνταξη της παρούσας, η οποία



έχει σαν βασικούς άξονες τον έλεγχο του βαθμού απόδοσης των υπό μελέτη αντλιών, την εγγύηση των αποτελεσμάτων, την ενσωμάτωση σε ένα αντλιοστάσιο συστημάτων τηλεμετρίας, την απρόσκοπτη λειτουργία των αντλητικών συγκροτημάτων, και την βέλτιστη οικονομική απόδοση αυτών.



Πρόλογος 1^{ου} Κεφαλαίου

Στο 1^ο κεφάλαιο γίνεται μια ανασκόπηση των βασικών ορισμών και των θεμελιωδών αρχών που διέπουν την Μηχανική Ρευστών. Ορίζουμε βασικές ιδιότητες των ρευστών όπως είναι η πυκνότητα, το ιξώδες, το ειδικό βάρος. Κατηγοριοποιούμε τα είδη της ροής συσχετίζοντας τα με βασικές φυσικές ιδιότητες. Έμφαση δίνεται στις βασικές αρχές της φυσικής και πώς αυτές περιγράφουν από μικροσκοπική ματιά μια ροή.

Στόχος του κεφαλαίου είναι να κατανοήσουμε το πώς από τις θεμελιώδεις αρχές (νόμος διατήρησης της μάζας, ο δεύτερος νόμος του Newton, ο πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής) **εξάγουμε τις εξισώσεις** με τις οποίες μελετάμε και **περιγράφουμε τα προβλήματα της ρευστομηχανικής από μακροσκοπική άποψη**. Η διαδικασία αυτή θα μας βοηθήσει στο να κατανοήσουμε σε βάθος τα προβλήματα της τεχνικής ρευστομηχανικής.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1-1 Ιδιότητες των Ρευστών

Εισαγωγικά θα αναλύσουμε τις κύριες παραμέτρους που μας απασχολούν κατά την μελέτη μιας ρευστοδυναμικής εγκατάστασης. Οι παράμετροι αυτές είναι η πυκνότητα του ρευστού και το ιξώδες. Οι δύο αυτές ιδιότητες είναι ιδιαίτερα σημαντικές για το χαρακτηρισμό του είδους της ροής και την αναλυτική περιγραφή της ρεολογικής συμπεριφοράς των ρευστών.

Πυκνότητα

Πυκνότητα ρ , ενός ρευστού είναι ο λόγος της μάζας m , του ρευστού προς τον όγκο V , που καταλαμβάνει αυτή στον χώρο m/V . Ο λόγος αυτός εκφράζει την πραγματική πυκνότητα του ρευστού μόνο σε περίπτωση ομοιόμορφης κατανομής της μάζας του ρευστού. Η πυκνότητα ενός ρευστού σε δεδομένο σημείο στον χώρο εκφράζεται από την εξίσωση (1-1)

$$\rho = \lim_{\delta V \rightarrow \delta V_0} \left(\frac{\delta m}{\delta V} \right) \quad (1.1)$$

Το αντίστροφο της πυκνότητας ονομάζεται **ειδικός όγκος**

$$v = \frac{1}{\rho} \quad (1.2)$$

Μια άλλη εύχρηστη ιδιότητα είναι το **ειδικό βάρος** το οποίο ορίζεται σαν το γινόμενο της πυκνότητας επί την τοπική επιτάχυνση της βαρύτητας.

$$\gamma = \rho \times g \quad (1.3)$$

Το **μέτρο συμπίεσιότητας** ενός ρευστού ορίζεται από την σχέση

$$k = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_T \quad (1.4)$$



και εκφράζει την σχετική μεταβολή της πυκνότητας $\partial\rho/\rho$ υπό σταθερή θερμοκρασία (δείκτης T). Το μέτρο συμπιεστότητας ενός ρευστού είναι το αντίστροφο του μέτρου ελαστικότητας ενός υλικού (μεγέθους που χρησιμοποιείται στην μηχανική). Ενδεικτικά αναφέρω μέτρο συμπιεστότητας του χάλυβα, του αέρα και του νερού 588×10^{-14} , 966×10^{-8} και $453 \times 10^{-8} \text{ Pa}^{-1}$ αντίστοιχα, από τα παραπάνω συμπεραίνουμε πως το νερό είναι 80 φορές πιο συμπιεστό από τον χάλυβα και ο αέρας 1.600.000 πιο συμπιεστός από το χάλυβα.

Ιξώδες

Το **ιξώδες μ** είναι η ιδιότητα των ρευστών που τους δίνει τη δυνατότητα να αντιστέκονται σε κάθε προσπάθεια αλλαγής της μορφής τους.

$$\text{Διατμητική τάση} = \mu \times \{\text{ρυθμός διάτμησης}\} \quad (1.5)$$

Η διατμητική τάση που αναπτύσσεται σε ένα τέτοιο ρευστό, όταν υφίσταται σταθερή διάτμηση είναι ευθέως ανάλογη με το ιξώδες του. Τα ρευστά τα οποία υπακούουν σε αυτόν τον νόμο ονομάζονται Νευτωνικά. Η μονάδα μέτρησης που χρησιμοποιείται για το ιξώδες είναι το poise (P)

$$\begin{aligned} 1 \text{ poise} &= 0.1 \text{ Pa} \times \text{sec} \\ 1 \text{ cP} &= 10^{-2} \text{ P} = 10^{-3} \text{ Pa} \times \text{sec} \end{aligned} \quad (1.6)$$

Ενδεικτικά αναφέρω πως το ιξώδες του νερού σε θερμοκρασία 20° C είναι 1 cP , έτσι η τιμή του ιξώδους ενός ρευστού σε cP μας δίνει μια τάξη μεγέθους αναλογικά με το ιξώδες του νερού.

Το ιξώδες μ ονομάζεται δυναμικό ιξώδες προς διάκριση με το **ν κινηματικό ιξώδες**, το οποίο ορίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.7)$$

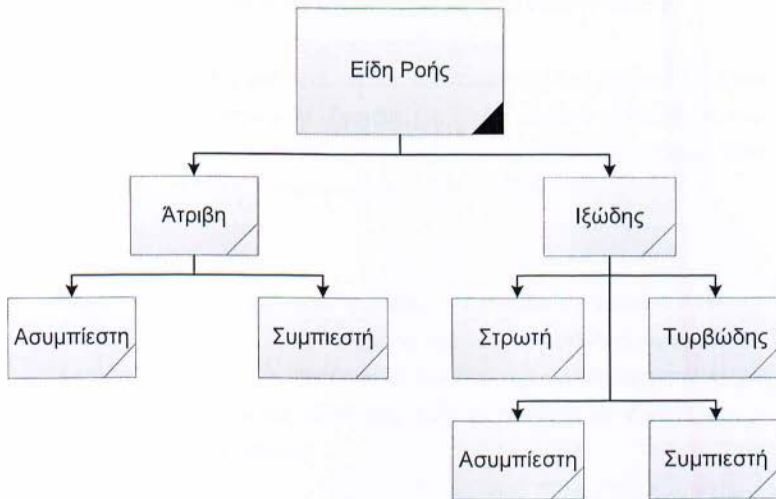


Η έννοια του κινηματικού ιξώδους εισήχθη από τον Maxwell το 1860 κυρίως για λόγους διευκόλυνσης των υπολογισμών και απλούστευσης των ρευστοδυναμικών σχέσεων, μιας και ο λόγος $\frac{\mu}{\rho}$ εμφανιζόταν αρκετά συχνά στους υπολογισμούς. Η μονάδα μέτρησης του κινηματικού ιξώδους στο SI είναι $\frac{m^2}{sec}$, έχει δηλαδή διαστάσεις κινηματικής :

$$1 St = 1 \frac{cm^2}{s} = 10^{-4} \frac{m^2}{s} \quad (1.8)$$

1-2 Είδη Ροής

Με τον όρο **ροή** εννοούμε την κίνηση ενός ρευστού σε μια ορισμένη περιοχή του χώρου, η οποία ονομάζεται **πεδίο ροής**.



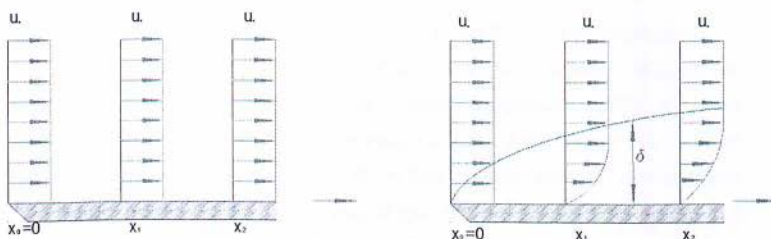


Άτριβη ροή ονομάζεται η ροή ρευστών με ιξώδες μηδέν. Τα ρευστά τα οποία έχουν ιξώδες μηδέν είναι τα ιδανικά ρευστά. Η άτριβη ροή είναι θεωρητική μιας και δεν υπάρχουν ρευστά με μηδενικό ιξώδες.

Ιξώδης ροή ονομάζεται η ροή των πραγματικών ρευστών. Τα πραγματικά ρευστά έχουν όλα ιξώδες ανεξάρτητα εάν η τιμή αυτού είναι μεγάλη ή μικρή.

(α) Άτριβη Ροή

(β) Ιξώδης Ροή



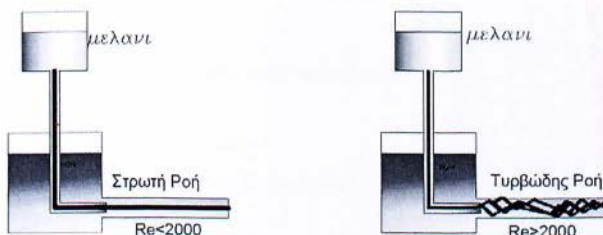
Εικόνα 1.1 Ροή ρευστού πάνω από επίπεδη επιφάνεια στερεού σώματος

Στρωτή ροή

Ονομάζεται η ιξώδης ροή κατά την οποία τα σωματίδια του ρευστού κινούνται ομαλώς και κατά στρώματα. Σε κάθε ένα τέτοιο στρώμα οι στοιβάδες του ρευστού έχουν ίδια ταχύτητα (η κατανομή της ταχύτητας του ρευστού είναι ομοιόμορφη σε όλη την έκταση της εγκάρσιας διατομής του ρευστού).

Τυρβώδης Ροή

Ονομάζεται η ιξώδης ροή κατά την οποία τα σωματίδια του ρευστού κινούνται σε ακανόνιστες τροχιές προς όλες τις διευθύνσεις κατά εντελώς τυχαίο τρόπο. Η τυχαία διακύμανση των ιδιοτήτων του ρευστού καθιστά αδύνατη την πλήρη αναλυτική περιγραφή της τυρβώδους ροής, σε αντίθεση με στρωτή ροή η οποία περιγράφεται πλήρως.



Εικόνα 1.2 Αρχή Λειτουργίας Συσσκευής Reynolds



Ο Reynolds ήταν ουσιαστικά ο πρώτος ερευνητής ο οποίος ασχολήθηκε με την πειραματική μελέτη της ροής των ρευστών σε αγωγούς κυλινδρικής διατομής και διασαφήνισε την ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς με την συσκευή Reynolds (Εικ.2) . Η συσκευή Reynolds αποτελείται από μια δεξαμενή νερού στην οποία είναι στερεωμένος ένας οριζόντιος γυάλινος σωλήνας. Στον σωλήνα αυτό διοχετεύεται το νερό της δεξαμενής με ρυθμιζόμενη παροχή, δηλ. ρυθμιζόμενη ταχύτητα. Το ένα άκρο του σωλήνα είναι συνδεδεμένο δε μια δεξαμενή ,η οποία περιέχει ένα χρωματισμένο υγρό (π.χ. μελάνι) , και στο άλλο άκρο του είναι συνδεδεμένο ένα ακροφύσιο. Για μικρές ταχύτητες ροής του νερού δια μέσου του γυάλινου σωλήνα το χρωματισμένο υγρό σχηματίζει μια ευθεία νηματοειδή φλέβα η οποία περιβάλλεται συμμετρικά από το κινούμενο νερό. Αυτό δείχνει ότι το **νερό κινείται κατά στρώματα και τα οποία έχουν μορφή ομόκεντρων κυλινδρικών δακτυλίων**. Αυτό μας δείχνει πως για μικρές ταχύτητες η ροή του νερού είναι **στρωτή**. Με την αύξηση της ταχύτητας η ροή του χρωματισμένου υγρού διαταράσσεται και η έγχρωμη φλέβα από ευθεία μετατρέπεται σε κυματοειδή δημιουργώντας στροβίλους. Με την αύξηση της ταχύτητας οι στρόβιλοι καλύπτουν ολόκληρη την διατομή του σωλήνα με αποτέλεσμα τον ομοιόμορφο χρωματισμό του νερού στο τέλος του σωλήνα. Η παρατηρούμενη ανάμειξη μεταξύ γειτονικών στρωμάτων του νερού αποτελεί το κύριο χαρακτηριστικό της **τυρβώδους ροής**. Ο Reynolds με τη προαναφερθείσα συσκευή κατάφερε να διασαφηνίσει πλήρως τα δύο είδη της ιξώδους ροής και να παρουσιάσει την βασική παράμετρο η οποία φέρει και το όνομά του, τον αριθμό **Reynolds (Re)**, ως κριτήριο που χαρακτηρίζει το είδος της ροής. Ο αριθμός **Reynolds** είναι μια αδιάστατη ομάδα γεωμετρικών και φυσικών μεταβλητών, και ορίζεται από την σχέση:

$$Re = \frac{\rho u d}{\mu} \quad (1.9)$$

Όπου:

- d :η εξωτερική διάμετρος του αγωγού.
- ρ :η πυκνότητα.
- μ :το δυναμικό ιξώδες.
- u :η μέση ταχύτητα του ρευστού.



Η μετατροπή της ιξώδους ροής από στρωτή σε τυρβώδη γίνεται όταν ο αριθμός **Reynolds** αποκτήσει μια **κρίσιμη** τιμή Re_c , η οποία είναι γνωστή ως **κρίσιμος αριθμός Reynolds**. Η ροή μετατρέπεται από στρωτή σε τυρβώδη για τιμές του Re μεγαλύτερες του 2000 και για τιμές μικρότερες των 4000. Στην πράξη θεωρείται πως η μετατροπή της ροής από στρωτή σε τυρβώδη γίνεται όταν ο αριθμός Reynolds υπερβεί την τιμή των 2000, δηλαδή:

$$Re_c = 2000$$

Ασυμπίεση Ροή

Ασυμπίεστη ονομάζεται η ροή ενός ρευστού κατά την οποία οι μεταβολές της πυκνότητας του σε όλη την έκταση του πεδίου ροής είναι αμελητέες. Στην πράξη ασυμπίεστη ροή χαρακτηρίζεται κάθε ροή στην οποία ο αριθμός **Mach** είναι μικρότερος ή το πολύ ίσος με 0.3.

$$M \leq 0.3$$

Συμπίεση Ροή

Αντίθετα ονομάζουμε την ροή κατά την οποία οι μεταβολές της πυκνότητας είναι σημαντικές. Η συνθήκη συμπίεστικότητας εμφανίζεται σε πολύ υψηλές ταχύτητες.

ΡΟΪΚΕΣ ΓΡΑΜΜΕΣ

Ροϊκή γραμμή ενός πεδίου ροής ονομάζεται κάθε γραμμή η οποία έχει την ιδιότητα η επαπτόμενη σε κάθε σημείο της να συμπίπτει με τη διεύθυνση του ανύσματος της ταχύτητας του ρευστού σε εκείνο το σημείο μια δεδομένη χρονική στιγμή t . Το σχεδιογράφημα ενός πεδίου ροής με ροϊκές γραμμές δίνει τη μορφή της ροής σε μια συγκεκριμένη χρονική γραμμή. Όταν το **πεδίο ταχύτητας** είναι **μόνιμο** επειδή η διεύθυνση της ταχύτητας δε μεταβάλλεται σε κανένα σημείου του πεδίου ροής **οι ροϊκές γραμμές έχουν σταθερή κλίση** σε κάθε σημείο και επομένως **είναι σταθερές στο χώρο**. Άρα στη **μόνιμη ροή οι τροχιές των σωματιδίων** του ρευστού και **οι ινώδεις φλέβες συμπίπτουν** με τις **ροϊκές γραμμές** του πεδίου.



Όταν το πεδίο ταχύτητας είναι μη μόνιμο επειδή η διεύθυνση της ταχύτητας μεταβάλλεται σε τυχαίο σημείο του πεδίου ροής, οι ροϊκές γραμμές μπορεί να μετατοπίζονται στο χώρο από στιγμή σε στιγμή. Επομένως στη μη μόνιμη ροή, οι τροχιές των σωματιδίων του ρευστού και οι ινώδεις φλέβες είναι εντελώς διαφορετικές από τις στιγμιαίες ροϊκές γραμμές του πεδίου.

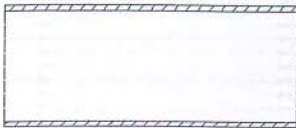
Η διάταξη των ροϊκών γραμμών ενός δισδιάστατου πεδίου ροής βρίσκεται πειραματικά ως εξής: Στην ελεύθερη επιφάνεια του ρευστού διασκορπίζονται στερεά σωματίδια (συνήθως λεπτά ρινίσματα αλουμινίου). Τα ρινίσματα αυτά παρασύρονται από το ρευστό, κινούμενα κατά μήκος των ροϊκών γραμμών του πεδίου. Εάν πάνω σε μια φωτογραφία χαραχθούν συνεχείς γραμμές που έχουν την διεύθυνση της τροχιάς των ρινισμάτων του αλουμινίου σε κάθε σημείο της φωτογραφίας, οι γραμμές αυτές θα παριστάνουν τις ροϊκές γραμμές του πεδίου τη στιγμή που έγινε η φωτογραφία.

Στην ακόλουθη παράγραφο θα αναφερθούμε στα είδη ροής τα οποία έχουν σχέση με την χώρο-χρονική μεταβολή των ιδιοτήτων του ρευστού.

Ομοιόμορφη Ροή

Ονομάζεται η ροή στην οποία το μέτρο και η διεύθυνση του ανύσματος της ταχύτητας είναι σταθερά κατά το μήκος οποιασδήποτε ροϊκής γραμμής του πεδίου ροής, ήτοι μεταφράζεται πως οι ροϊκές γραμμές είναι παράλληλες και ευθείες γραμμές. Μαθηματικά εκφράζεται από τη παρακάτω σχέση:

$$\frac{\partial u}{\partial s} = 0 \quad (1.10)$$



(α)



(β)

Εικόνα 1. 3 Πεδία Ομοιόμορφης Ροής (α) μεταξύ παράλληλων πλακών (β) σε ανοικτό κανάλι



Ανομοιόμορφη ροή

Ανομοιόμορφη ροή ονομάζεται η ροή στην οποία το μέτρο ή / και η διεύθυνση του ανύσματος της ταχύτητας μεταβάλλονται από σημείο σε σημείο κατά μήκος οποιασδήποτε ροϊκής γραμμής του πεδίου. Η ανομοιόμορφη ροή εκφράζεται μαθηματικά από την σχέση

$$\frac{\partial u}{\partial s} \neq 0 \quad (1.11)$$

Και σχηματικά παρίστανται ως κάτω:



Εικόνα 1.4 Ανομοιόμορφη ροή (α) σε στρωθιλόδη ροή (β) μεταξύ δύο ΜΗ παρ/λων πλακών

ΜΟΝΙΜΗ ΚΑΙ ΜΗ ΜΟΝΙΜΗ ΡΟΗ

ΜΟΝΙΜΗ ΡΟΗ

Ονομάζεται η ροή στην οποία το μέτρο και η διεύθυνση του ανύσματος της ταχύτητας u σε ένα δεδομένο σημείο του χώρου δε μεταβάλλονται ως προς το χρόνο. Η μόνιμη ροή εκφράζεται μαθηματικά με τη σχέση:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = 0 \quad (1.12)$$

Σε περίπτωση μόνιμης ροής η ταχύτητα του ρευστού μπορεί να μεταβάλλεται από σημείο σε σημείο μέσα στον χώρο, αλλά σε κάθε σημείο το μέτρο και η διεύθυνση του ανύσματος u παραμένουν σταθερά. Ότι αναφέραμε για την

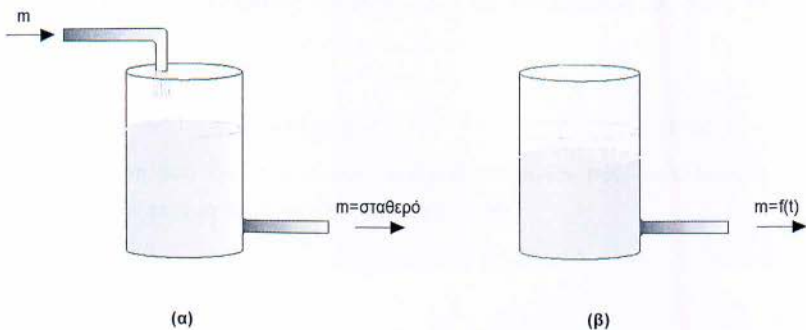


ταχύτητα ισχύει και για κάθε άλλη ιδιότητα του. Έτσι όταν η ροή είναι μόνιμη, η πυκνότητα, η πίεση και η θερμοκρασία του ρευστού σε δεδομένο σημείο του χώρου παραμένουν σταθερές και περιγράφονται από τη σχέση:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0, \frac{\partial p}{\partial t} = 0, \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (1.13)$$

ΜΗ ΜΟΝΙΜΗ ΡΟΗ

Ονομάζεται η ροή στην οποία το μέτρο της ταχύτητας (και κάθε άλλης ιδιότητας) του ρευστού σε ένα δεδομένο σημείο του χώρου μεταβάλλονται ως προς το χρόνο. Στη τυρβώδη ροή, λόγω ακανόνιστης κίνησης των σωματιδίων του ρευστού η τοπική ταχύτητα διακυμαίνεται, κατά εντελώς τυχαίο τρόπο, γύρω από μια μέση τιμή. Επομένως οι τυρβώδεις ροές ανήκουν στην κατηγορία των μη μόνιμων ροών, μπορεί όμως να επεκταθεί στην έννοια της μόνιμης ροής εάν αντί της στιγμιαίας τοπικής ταχύτητας u εξετάσουμε τη μέση χρονική ταχύτητα \bar{u} , του ρευστού.



Εικόνα 1.5 (α) μόνιμη ροή (β) μη μόνιμη ροή



ΜΟΝΟ-, ΔΙ-, ΚΑΙ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΡΟΗ

ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΗ ΡΟΗ

Ονομάζεται η ροή στην οποία η ταχύτητα του ρευστού **μεταβάλλεται ως προς μια χωρική συντεταγμένη** (έστω τη x_1) και ενδεχομένως ως προς το χρόνο, δηλαδή έχω:

$$u = u(x_1, t) \quad (1.13)$$

Παράδειγμα μονοδιάστατης ροής είναι η ροή μεταξύ δυο παράλληλων πλακών (Εικ.1.3.α). Παρατηρούμε πως η ταχύτητα εμεταβάλλεται μόνο ως προς τον άξονα y .

ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΡΟΗ

Ονομάζεται η ροή στην οποία η ταχύτητα του ρευστού μεταβάλλεται ως προς δύο χωρικές συντεταγμένες (έστω x_1, x_2) και ενδεχομένως ως προς το χρόνο.

$$u = u(x_1, x_2, t) \quad (1.14)$$

Δισδιάστατη ροή είναι π.χ. η ροή μεταξύ δύο πλακών που συγκλίνουν ή αποκλίνουν κατά τη διεύθυνση της ροής (Εικ.1.3.β).

ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΡΟΗ

Τρισδιάστατη ροή ονομάζεται η ροή στην οποία η ταχύτητα του ρευστού μεταβάλλεται και ως προς τις τρεις χωρικές συντεταγμένες (έστω τις x_1, x_2, x_3) και ενδεχομένως και ως προς το χρόνο :

$$u = u(x_1, x_2, x_3) \quad (1.15)$$



Τρισδιάστατη ροή είναι π.χ. αυτή του καπνού που εξέρχεται από μια καμινάδα.

Στην ανάλυση των προβλημάτων ροής και ιδιαίτερα σε αγωγούς χρησιμοποιείται ιδιαίτερα η έννοια της ομοιόμορφης ροής σε διατομή. Δηλαδή γίνεται η παραδοχή ότι η ταχύτητα (αλλά και άλλες ιδιότητες του ρευστού όπως π.χ. η πίεση και η πυκνότητα) είναι σταθερή πάνω σε κάθε διατομή η οποία είναι κάθετη προς τη κύρια διεύθυνση ροής. Όπως γίνεται αντιληπτό μια τέτοια παραδοχή μετατρέπει μια πραγματικά δισδιάστατη ροή σε υποθετικά μονοδιάστατη. Έτσι στην πράξη η έννοια της μονοδιάστατης ροής είναι λιγότερο περιοριστική και περιλαμβάνει κάθε ροή στην οποία αγνοούνται οι μεταβολές των ιδιοτήτων του ρευστού κάθετα προς την κύρια διεύθυνση ροής.

1-3 Θεμελιώδεις Νόμοι της Μηχανικής Ρευστών

Ο Νόμος Διατήρησης της Μάζας

αναφέρει απλώς ότι η μάζα ενός συστήματος παραμένει σταθερή στον χρόνο ανεξάρτητα από την διεργασία την οποία υφίσταται το σύστημα.

$$\left(\frac{dm}{dt}\right)_{\Sigma} = 0 \quad (1.16)$$

Εφεξής την παραπάνω εξίσωση θα την ονομάζουμε **εξίσωση συνέχειας**.

Ο Δεύτερος Νόμος του Newton

αναφέρει ότι η συνισταμένη των εξωτερικών δυνάμεων οιν οποίες ασκούνται πάνω σε ένα σύστημα από το περιβάλλον του είναι ίση με το ρυθμό μεταβολής της γραμμικής ορμής του συστήματος.

$$F = \left(\frac{dP}{dt}\right)_{\Sigma} \quad (1.17)$$

Στην μηχανική ρευστών η εξίσωση η οποία εκφράζει τον δεύτερο νόμο του Newton ονομάζεται **εξίσωση γραμμικής ορμής**.

Ο Πρώτος Νόμος της Θερμοδυναμικής

ή πρώτο θερμοδυναμικό αξίωμα αναφέρει ότι η διαφορά μεταξύ του καθαρού ποσού θερμότητας, δQ , που προστίθεται στο σύστημα από το περιβάλλον και του καθαρού ποσού έργου, δW , που αποδίδεται από το σύστημα στο περιβάλλον, κατά την διάρκεια μιας απειροστής διεργασίας, είναι ίση με τη μεταβολή της ενέργειας, dE , του συστήματος.

$$\delta Q - \delta W = dE \quad \text{ή} \quad \dot{Q} - \dot{W} = \left(\frac{dE}{dt} \right)_{\Sigma} \quad (1.18)$$

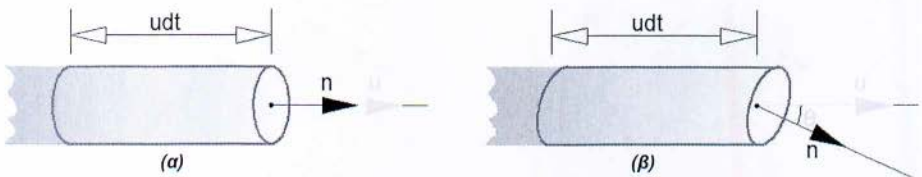
Στην μηχανική ρευστών η μαθηματική εξίσωση που εκφράζει τον πρώτο θερμοδυναμικό νόμο ονομάζεται **εξίσωση ενέργειας**.

Ο δείκτης Σ στις παραπάνω εξισώσεις δηλώνει ότι οι εξισώσεις αυτές εφαρμόζονται σε σύστημα και περιγράφουν τι συμβαίνει σε αυτό όταν υφίσταται κάποια επίδραση από το περιβάλλον του.

1-4 Ρυθμοί Ροής Μάζας και όγκου

Ρυθμός Ροής Μάζας \dot{m} ονομάζεται η ποσότητα του ρευστού που διέρχεται από μια ορισμένη επιφάνεια του πεδίου ροής, στη μονάδα του χρόνου και ορίζεται ως,

$$\dot{m} = \frac{dm}{dt} \quad (1.19)$$



Εικόνα 1.6 Ροή Μάζας Ρευστού το οποίο διέρχεται από μια Επίπεδη Επιφάνεια, η οποία είναι (α) κάθετη (β) κεκλιμένη ως προς την διεύθυνση ροής

Θεωρούμε ρευστό το οποίο κινείται με ομοιόμορφη ταχύτητα u και διέρχεται από μια επίπεδη κυκλική επιφάνεια, A . Ο προσανατολισμός της επιφάνειας A



στο χώρο καθορίζεται με την διεύθυνση του μοναδιαίου διανύσματος , n το οποίο είναι κάθετο σε αυτή .Σε περίπτωση που η επιφάνεια A είναι **κάθετη** προς τη διεύθυνση της ροής το άνυσμα n είναι παράλληλο προς το άνυσμα u της ταχύτητας. Σε αυτή τη περίπτωση η ποσότητα του ρευστού το οποίο διέρχεται από την εν λόγω επιφάνεια είναι ίσο με

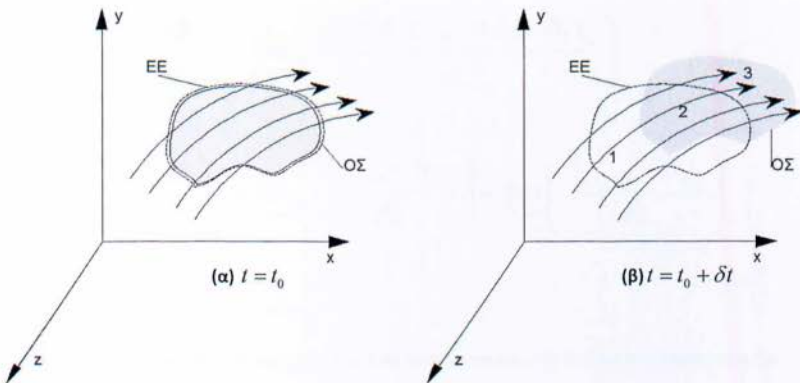
$$\dot{m} = \rho u A \quad \text{όταν} \quad n // u \quad (1.20)$$

Σε περίπτωση που η επιφάνεια A είναι **κεκλιμένη** ως προς τη διεύθυνση ροής η μάζα dm του ρευστού που διέρχεται από την επιφάνεια A σε χρόνο dt είναι ίση με τη μάζα που διέρχεται από τον κεκλιμένο "πλάγιο" κύλινδρο (Εικ. 1-3 β), έτσι η μάζα dm του ρευστού προκύπτει από την σχέση:

$$\dot{m} = \rho(u \times n)A = \rho u_n A \quad \text{όταν} \quad (\widehat{n, u}) = \theta \quad (1.21)$$

1-5 Μακροσκοπική Ανάλυση Ροής

Η μέθοδος της μακροσκοπικής ανάλυσης Ροής αποτελεί την τεχνική προσέγγιση των προβλημάτων. Για να περάσουμε από την διατύπωση των **φυσικών νόμων** για σύστημα σε διατύπωση σε **όγκο ελέγχου**, πρέπει να εκφράσουμε το ρυθμό μεταβολής της ιδιότητας B του συστήματος με χρονικές μεταβολές της ίδιας ιδιότητας για όγκο ελέγχου.



Εικόνα 1.7 Κίνηση Συστήματος ως προς Ακίνητο Όγκο Ελέγχου



Όπου:

ΕΕ: επιφάνεια ελέγχου

ΟΣ: Όγκος συστήματος

ΟΕ: Όγκος ελέγχου

Στο παραπάνω σχήμα:

(α) Το **σύστημα** (το οποίο αποτελείται από μια ορισμένη ποσότητα ρευστού) **κινείται** μέσα στο πεδίο Ροής.

(β) Ο **όγκος ελέγχου** παραμένει **ακίνητος** ως προς το σύστημα συντεταγμένων xyz.

Μετά από χρόνο δt το σύστημα έχει μετατοπιστεί στο χώρο και καταλαμβάνει τις περιοχές 2 και 3 του πεδίου ροής, αυτό σημαίνει ότι κατά την διάρκεια του χρόνου δt μια ποσότητα ρευστού εισέρχεται στον όγκο ελέγχου (ποσότητα 1) και ταυτόχρονα μια άλλη ποσότητα ρευστού εξέρχεται από τον όγκο ελέγχου (ποσότητα 3). Ας προχωρήσουμε στην ποσοτική συσχέτιση των ρυθμών μεταβολής της εκτατικής¹ ιδιότητας B και του όγκου ελέγχου. Η εν λόγω μεταβολή δίνεται από την εξίσωση:

$$\left(\frac{dB}{dt}\right)_{\Sigma} = \lim_{\delta t \rightarrow 0} \left(\frac{B_{t_0+\delta t} - B_{t_0}}{\delta t}\right) \quad (1.22)$$

Αντικαθιστώντας από το παραπάνω σχήμα τα μεγέθη B_{t_0} & $B_{t_0+\delta t}$ με τις ισοδύναμες εκφράσεις τους, έχω:

$$\left(\frac{dB}{dt}\right)_{\Sigma} = \lim_{\delta t \rightarrow 0} \left(\frac{(B_2 + B_3)_{t_0+\delta t} - (B_1 + B_2)_{t_0}}{\delta t}\right) \quad (1.23)$$

ή

$$\left(\frac{dB}{dt}\right)_{\Sigma} = \lim_{\delta t \rightarrow 0} \left(\frac{B_{2,t_0+\delta t} - B_{2,t_0}}{\delta t}\right) + \lim_{\delta t \rightarrow 0} \left(\frac{B_{3,t_0+\delta t} - B_{1,t_0}}{\delta t}\right) \quad (1.5.3)$$

1. **Εκτατικές Ιδιότητες:** Οι ιδιότητες οι οποίες εξαρτώνται από την έκταση ή την ποσότητα του συστήματος. Η τιμή τους είναι άθροισμα όλων των υποσυστημάτων που το αποτελούν.



Στην εξίσωση 1.5.3 το μέγεθος $B_{3,t_0+\delta t}$ παριστάνει την ποσότητα της ιδιότητας B που εξέρχεται από τον όγκο ελέγχου το διάστημα δt ενώ το μέγεθος B_{1,t_0} παριστάνει την ποσότητα της B που εισέρχεται στον όγκο ελέγχου το ίδιο χρονικό διάστημα. Ο ρυθμός αυτός δίνεται από την εξίσωση:

$$\lim_{\delta t \rightarrow 0} \left(\frac{B_{3,t_0+\delta t} - B_{1,t_0}}{\delta t} \right) = \oiint_{EE} bp(u \cdot n) dA \quad (1.24)$$

όπου:

$bp(u \cdot n) dA$: ο ρυθμός ροής μάζας του ρευστού
διαμέσου του στοιχειώδους τμήματος dA της
επιφάνειας ελέγχου.

Ο πρώτος όρος της 1.24 παριστάνει τον ρυθμό μεταβολής της ιδιότητας B του ρευστού που περιέχεται στον όγκο ελέγχου τη χρονική στιγμή t_0 . Ο ρυθμός αυτός δίνεται από την ολική παράγωγο της ιδιότητας B ως προς τον χρόνο, δηλαδή:

$$\lim_{\delta t \rightarrow 0} \left(\frac{B_{2,t_0+\delta t} - B_{2,t_0}}{\delta t} \right) = \left(\frac{dB}{dt} \right)_{OE} \quad \eta$$

$$\lim_{\delta t \rightarrow 0} \left(\frac{B_{2,t_0+\delta t} - B_{2,t_0}}{\delta t} \right) = \frac{d}{dt} \iiint b\rho dV \quad (1.26)/(1.27)$$

Η μαθηματική έκφραση και η φυσική διατύπωση του **θεωρήματος μεταφοράς** για ακίνητο όγκο ελέγχου έχει ως εξής:

$$\left(\frac{dB}{dt} \right)_{\Sigma} = \frac{d}{dt} \iiint_{OE} b\rho dV + \oiint_{EE} b\rho(u \cdot n) dA \quad (1.28)$$

&



$$\left\{ \begin{array}{l} \text{ρυθμός μεταβολής} \\ \text{εκτατικής ιδιότητας B} \\ \text{του συστήματος} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{ρυθμός μεταβολής} \\ \text{της ιδιότητας B του ρευστού} \\ \text{που περιέχεται στον όγκο} \\ \text{ελέγχου} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{ρυθμός καθαρής εκροής της} \\ \text{ποσότητας B από τον όγκο ελέγχου} \\ \text{διαμέσου της επιφάνειας ελέγχου} \\ \text{λόγω ροής του ρευστού.} \end{array} \right\}$$

ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΕΞΙΣΩΣΗ ΣΥΝΕΧΕΙΑΣ

Η μακροσκοπική εξίσωση συνέχειας αποτελεί τη μαθηματική διατύπωση του νόμου διατήρησης της μάζας για όγκο ελέγχου. Για την εξαγωγή της εξίσωσης συνέχειας θα εφαρμόσουμε το **θεώρημα μεταφοράς**, θέτοντας αντί της τυχαίας μεταβλητής B τη μάζα m . Στην περίπτωση αυτή, $B=m$, τα μεγέθη είναι βαθμωτά άρα έχω επίσης και $b=1$, συνεπώς το θεώρημα της μεταφοράς τροποποιείται ως εξής:

$$\left(\frac{dm}{dt} \right)_{\Sigma} = \frac{d}{dt} \iiint_{OE} \rho dV + \iint_{EE} \rho(u \cdot n) dA \quad (1.29)$$

Ο **πρώτος όρος** της εξίσωσης εκφράζει το **ρυθμό μεταβολής της μάζας του συστήματος**, εξ' ορισμού όμως, η μάζα του συστήματος είναι **σταθερή και** ως εκ τούτου, το αριστερό μέλος της εξίσωσης **1.29 είναι μηδέν**, οπότε η εξίσωση γίνεται:

$$\frac{d}{dt} \iiint_{OE} \rho dV + \iint_{EE} \rho(u \cdot n) dA = 0 \quad (1.30)$$

Η **1.30** αποτελεί τη γενική μορφή της μακροσκοπικής εξίσωσης συνέχειας και εκφράζει το νόμο διατήρησης της μάζας για ακίνητο όγκο ελέγχου. Η φυσική διατύπωση της εξίσωσης έχει ως εξής:



$$\left. \begin{array}{l} \text{ρυθμός μεταβολής της} \\ \text{μάζας του ρευστού που} \\ \text{περιέχεται στον όγκο} \\ \text{ελέγχου} \end{array} \right\} + \left. \begin{array}{l} \text{ρυθμός καθαρής εκροής} \\ \text{μάζας από τον όγκο ελέγχου} \\ \text{διαμέσου της επιφάνειας ελέγχου} \\ \text{λόγω ροής του ρευστού.} \end{array} \right\} = 0$$

ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΕΞΙΣΩΣΗ ΣΥΝΕΧΕΙΑΣ ΓΙΑ ΜΟΝΙΜΗ ΡΟΗ

Αν η ροή είναι μόνιμη τότε οι ιδιότητες του ρευστού (άρα και η πυκνότητα ρ) **δεν μεταβάλλονται με το χρόνο**. Έτσι ο πρώτος όρος της εξίσωσης **1.30** είναι μηδέν, συνεπώς έχω:

$$\oiint_{EE} \rho(u \cdot n) dA = 0 \quad (1.31)$$

Ας εφαρμόσουμε την **1.31** σε περίπτωση μόνιμης ροής σε αγωγό μεταβλητής διατομής.

$$\iint_{A_1} \rho_1(u_1 \cdot n_1) dA_1 + \iint_{A_2} \rho_2(u_2 \cdot n_2) dA_2 = 0 \quad (1.32)$$

με εσωτερικό γινόμενο των $u_1 \cdot n_1 = -u_1$ & $u_2 \cdot n_2 = u_2$, οπότε

$$\iint_{A_1} \rho_1 u_1 dA_1 = \iint_{A_2} \rho_2 u_2 dA_2 = \dot{m} \quad (1.33)$$

Η **1.33** δείχνει πως στη μόνιμη ροή σε αγωγό ο **ρυθμός ροής μάζας \dot{m}** του ρευστού **δεν μεταβάλλεται** από διατομή σε διατομή κατά μήκος του αγωγού, ισχύει δηλαδή:

$$\dot{m} = \iint_A \rho u dA = \text{σταθ.} \quad (1.34)$$



Αν η ροή εκτός από μόνιμη θεωρηθεί και μονοδιάστατη ισχύει η ακόλουθη εξίσωση:

$$\rho_1 u_1 A_1 = \rho_2 u_2 A_2 = \dot{m} \quad (1.35)$$

ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΕΞΙΣΩΣΗ ΣΥΝΕΧΕΙΑΣ ΓΙΑ ΑΣΥΜΠΙΕΣΤΗ ΡΟΗ

Αν η ροή είναι ασυμπίεστη τότε η πυκνότητα του ρευστού είναι σταθερό μέγεθος, οπότε η εξίσωση 1.30 γράφεται:

$$\frac{d}{dt} \left(\rho \iiint_{OE} dV \right) + \rho \oiint_{EE} (u \cdot n) dA = 0 \quad (1.36)$$

ή

$$\frac{d}{dt} (\rho V) + \rho \oiint_{EE} (u \cdot n) dA = 0 \quad (1.37)$$

Ο πρώτος όρος της εξίσωσης είναι μηδέν εφόσον η πυκνότητα ρ και ο όγκος V είναι σταθερά μεγέθη, συνεπώς η τελική μορφή της εξίσωσης είναι

$$\rho \oiint_{EE} (u \cdot n) dA = 0 \quad (1.38)$$

Δηλαδή σε ασυμπίεστη ροή ο ρυθμός εκροής του ρευστού από τον όγκο ελέγχου είναι μηδέν. Ισχύει το αυτό τόσο για τη μόνιμη όσο και για τη μόνιμη ροή, μιας και δεν τέθηκε περιορισμός στην εξίσωση σε ότι αφορά την εξάρτηση των ιδιοτήτων από το χρόνο.

Για τη ροή του σχήματος η εξίσωση 1.36 γράφεται

$$\iint_{A_1} u_1 dA_1 = \iint_{A_2} u_2 dA_2 \quad (1.39)$$

Δηλαδή στην ασυμπίεστη ροή, η ογκομετρική παροχή \dot{V} , του ρευστού δεν μεταβάλλεται από διατομή σε διατομή κατά μήκος του αγωγού.



$$\dot{V} = \iint_A u dA = \sigma \alpha \theta. \quad (1.40)$$

Αν η ροή εκτός από ασυμπίεστη θεωρηθεί και μονοδιάστατη, τότε η εξίσωση 1.39 μας οδηγεί στην πιο συνήθη μορφή της για τις τεχνικές εφαρμογές.

$$u_1 A_1 = u_2 A_2 \quad (1.41)$$

1-6 ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΕΞΙΣΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η μακροσκοπική εξίσωση ενέργειας αποτελεί μαθηματική διατύπωση του νόμου διατήρησης ενέργειας για όγκο ελέγχου. Για την εξαγωγή της συγκεκριμένης εξίσωσης θα εφαρμόσουμε το θεώρημα μεταφοράς 1.34

$$\left(\frac{dE}{dt} \right)_\Sigma = \frac{d}{dt} \iiint_{OE} \rho e dV + \iint_{EE} \rho e (u \cdot n) dA \quad (1.42)$$

Στη περίπτωση αυτή όμως στη θέση της αυθαίρετης εκτατικής ιδιότητας B θα θέσουμε την ολική ενέργεια E . Γνωρίζουμε επιπλέον ότι η ενέργεια:

$$E = m \times e$$

Όπου m =μάζα

e =ειδική ενέργεια,

Έτσι θέτοντας στην (1.32) όπου $B = E$ και $b = e$ οδηγούμαστε στην 1.42. Το πρώτο μέλος της 1.39 εκφράζει το ρυθμό μεταβολής της ενέργειας του συστήματος τη χρονική στιγμή t_0 , όμως σύμφωνα και με το πρώτο θερμοδυναμικό νόμο έχω:



$$\dot{Q} - \dot{W} = \left(\frac{dE}{dt} \right)_\Sigma$$

Έτσι

$$1.5.21 \xrightarrow{1.3.3} \dot{Q} - \dot{W} = \frac{d}{dt} \iiint_{OE} e \rho dV + \iint_{EE} e \rho (u \cdot n) dA$$

Η εξίσωση 1.5.22 αποτελεί τη γενική μορφή της **μακροσκοπικής εξίσωσης ενέργειας** για ακίνητο όγκο ελέγχου. Η φυσική διατύπωση της εξίσωσης αυτής έχει ως εξής:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Ρυθμός πρόσδοσης θερμότητας} \\ \text{στον όγκο ελέγχου από το περιβάλλον} \\ \text{λόγω διαφοράς θερμοκρασίας.} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{Ρυθμό απόδοσης έργου} \\ \text{από τον όγκο ελέγχου στο} \\ \text{περιβάλλον} \end{array} \right\} =$$

$$= \left\{ \begin{array}{l} \text{Ρυθμό συσσώρευσης} \\ \text{ενέργειας στον όγκο} \\ \text{ελέγχου} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{Ρυθμό καθαρής εκροής} \\ \text{ενέργειας από τον όγκο} \\ \text{ελέγχου διαμέσου της} \\ \text{επιφάνειας ελέγχου, λόγω} \\ \text{ροής του ρευστού} \end{array} \right\}$$

Για να κάνουμε πιο σαφή τη διατύπωση της μακροσκοπικής εξίσωσης ενέργειας θα πρέπει να **προσδιορίσουμε τις διάφορες μορφές ενέργειας** που εμπριέχονται στους όρους e , Q και W .

ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Στα προβλήματα μηχανικής ρευστών αντιμετωπίζουμε συνήθως τρεις μορφές ενέργειας : τη δυναμική, τη μηχανική και την εσωτερική ενέργεια, έτσι η τιμή της ειδικής ενέργειας e είναι ίση με το άθροισμα:

$$e = e_{\text{δυναμική}} + e_{\text{κινητική}} + u \quad (1.43)$$

Δυναμική Ενέργεια

Είναι η ενέργεια την οποία έχει το ρευστό λόγω της θέσης του μέσα σε ένα δυναμικό πεδίο. Η δυναμική ενέργεια e_δ λόγω του βαρυτικού πεδίου είναι:



$$e_s = g \times z \quad (1.44)$$

Όπου:

g : είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας

z : η απόσταση του κέντρου μάζας του ρευστού από ένα επίπεδο το οποίο το δεχόμαστε σαν επίπεδο αναφοράς και δεχόμαστε αυθαίρετα ότι η δυναμική ενέργεια σε αυτό το επίπεδο έχει τιμή μηδέν.

Κινητική Ενέργεια

Είναι η ενέργεια την οποία έχει το ρευστό λόγω της ταχύτητάς του. Η κινητική ενέργεια e_k δίνεται από την εξίσωση:

$$e_k = \frac{u^2}{2} \quad (1.45)$$

Εσωτερική Ενέργεια

Είναι η ενέργεια την οποία έχει ππο ρευστό λόγω της κίνησης, της κατανομής, και της διαμόρφωσης των μορίων του. Η εσωτερική ενέργεια είναι μια θερμοδυναμική ιδιότητα η τιμή της οποίας εξαρτάται από την κατάσταση του ρευστού.

ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ

Αγωγή θερμότητας

Η θερμότητα μεταδίδεται με αγωγή στα στερεά σώματα και τα κινητοποιημένα ρευστά.

Μεταφορά Θερμότητας

Η θερμότητα μεταδίδεται με μεταφορά στα ρευστά. Η μεταφορά θερμότητας συνίσταται σε μετακίνηση μάζας ρευστού από μια θερμή σε μια ψυχρή περιοχή του χώρου. Το ρευστό που μετακινείται φέρει μαζί του και την



αποθηκευμένη σε αυτό ενέργεια επηρεάζοντας έτσι το ενεργειακό περιεχόμενο της περιοχής του χώρου όπου καταλήγει.

Ακτινοβολία Θερμότητας

Το χαρακτηριστικό του μηχανισμού αυτού είναι ότι δεν απαιτείται παρουσία ύλης για τη μετάδοση θερμότητας. Στα συνήθη προβλήματα μηχανικής ρευστών η θερμική ακτινοβολία είναι αμελητέα.

ΕΡΓΟ

Στις περισσότερες εφαρμογές της μηχανικής ρευστών το έργο W , εμφανίζεται με δύο μορφές: ως αξονικό έργο W_s και ως έργο επιφανειακών δυνάμεων W_σ . Επομένως η ισχύ \dot{W} ισοδυναμεί:

$$\dot{W} = \dot{W}_s + \dot{W}_\sigma \quad (1.46)$$

Αξονικό Έργο W_s

Το έργο αυτό παράγεται από το ρευστό μέσα στον όγκο ελέγχου και μεταφέρεται στο περιβάλλον από τμήματα της επιφάνειας ελέγχου διαμέσου των οποίων δεν υπάρχει ροή ρευστού. Για παράδειγμα κάτι τέτοιο μπορεί να συμβεί με περιστροφή ενός άξονα ή μετατόπιση των ορίων του όγκου ελέγχου.

Έργο επιφανειακών δυνάμεων W_σ

Το έργο αυτό χρησιμοποιείται για την εξουδετέρωση των δυνάμεων που δρουν πάνω στην επιφάνεια ελέγχου και σε τμήματα αυτής διαμέσου των οποίων διέρχεται ρευστό. Για να προσδιορίσουμε αναλυτικά τα λεγόμενα μας θεωρούμε ένα στοιχειώδες τμήμα dA της επιφάνειας ελέγχου πάνω στο οποίο ασκείται από το περιβάλλον η τάση σ_n . Ο ρυθμός \dot{W}_σ του έργου που δαπανάται από τον όγκο ελέγχου για την υπερνίκηση του συνόλου των επιφανειακών δυνάμεων οι οποίες δρουν πάνω σε αυτόν δίνεται από την εξίσωση



$$\dot{W}_\sigma = -\iint_{EE} (\sigma_n \cdot u) dA \quad (1.47)$$

Όπου:

u : το άνυσμα της ταχύτητας με την οποία το ρευστό διέρχεται από την επιφάνεια dA . (το αρνητικό πρόσημο στο 2^ο μέλος της εξίσωσης μας δείχνει ότι η τάση που ασκεί ο όγκος ελέγχου πάνω στο περιβάλλον είναι ίση και αντίθετη προς την τάση σ_n).

Το έργο των κάθετων επιφανειακών δυνάμεων είναι περισσότερο γνωστό ως έργο ροής W_f , επειδή το έργο αυτό δαπανάται για τη μεταφορά του ρευστού στο χώρο. Ο ρυθμός W_f του έργου ροής το οποίο δαπανάται για από τον όγκο ελέγχου για την υπερνίκηση του συνόλου των κάθετων δυνάμεων που δρουν πάνω στην επιφάνεια ελέγχου δίνεται από την εξίσωση:

$$\dot{W}_f = -\iint_{EE} (\sigma_m \cdot u) dA = \iint_{EE} \sigma_m (n \cdot u) dA \quad (1.48)$$

Όπου:

n : το μοναδιαίο άνυσμα κάθετο στην επιφάνεια dA και σ_m η συνιστώσα της τάσης σ_n κατά τη διεύθυνση του ανύσματος n . Αν λάβουμε υπόψη τη γενική εξίσωση (βλέπε παράρτημα)

$$\sigma_{ij} = -p + t_{ij} \quad \forall i = j \text{ τότε}$$

$$\dot{W}_f = \iint_{EE} p(n \cdot u) dA - \iint_{EE} \tau_{mn} (n \cdot u) dA \quad (1.49)$$

Όπου

p : είναι η πίεση

τ_{mn} : η συνιστώσα του ανύσματος τ_n της ιξώδους τάσης κατά τη διεύθυνση του ανύσματος n .

Τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των δύο ολοκληρωμάτων της (1.49)



Πρώτος όρος:

$$\dot{W}_p = \iint_{EE} p(n \cdot u) dA \quad (1.50)$$

Παριστάνει το ρυθμό κατανάλωσης έργου για την εξουδετέρωση όλων των δυνάμεων πίεσης που δρουν πάνω στην επιφάνεια ελέγχου. Το έργο W_p αναφέρεται συχνά και ως έργο πίεσης.

Δεύτερος όρος:

$$\dot{W}_k = -\iint_{EE} \tau_{nm} (n \cdot u) dA \quad (1.51)$$

Παριστάνει το ρυθμό κατανάλωσης έργου για την εξουδετέρωση όλων των καθέτων ιξωδών δυνάμεων που δρουν πάνω στην επιφάνεια ελέγχου. Στις περισσότερες τεχνικές εφαρμογές δεχόμαστε ότι το έργο W_k είναι αμελητέο σε σύγκριση προς το έργο W_p .

Έργο Διάτμησης

Το έργο των επαπτομενικών επιφανειακών δυνάμεων είναι περισσότερο γνωστό ως έργο διάτμησης W_δ . Το έργο αυτό δαπανάται για την υπερνίκηση των διατμητικών δυνάμεων που δρουν πάνω στην επιφάνεια ελέγχου. Ο ρυθμός \dot{W}_δ του έργου διάτμησης δίνεται από την εξίσωση

$$\dot{W}_\delta = -\iint_{EE} \tau_{ne} (\varepsilon \cdot u) dA \quad (1.52)$$

Όπου:

ε : το μοναδιαίο διάνυσμα το επαπτόμενο στην επιφάνεια dA κατά τη διεύθυνση του ανύσματος τ_{ne}

Το έργο της διάτμησης είναι μηδέν όταν ο όγκος ελέγχου εκλέγεται έτσι ώστε η επιφάνεια του να συμπίπτει με την επιφάνεια των στερεών σωμάτων που



περιβάλλουν το ρευστό και να τέμνει κάθετα τα ρεύματα που εισέρχονται και εξέρχονται από τον όγκο ελέγχου (εικ. 1-5B). Μια τέτοια περίπτωση είναι αυτή του σχήματος 1.5 (β). Η επιφάνεια ελέγχου συμπίπτει με τα εσωτερικά τοιχώματα του αγωγού, αγωγό εκροής και αγωγό εισροής, τέμνει κάθετα το ρεύμα του ρευστού που εισέρχονται και εξέρχονται αντίστοιχα από τον όγκο ελέγχου. Σε αυτή τη περίπτωση η εξίσωση **1.52** γίνεται:

$$\dot{W}_\delta = -\iint_{A_1} \tau_{ne} (\varepsilon \cdot u) dA - \iint_{A_w} \tau_{ne} (\varepsilon \cdot u) dA - \iint_{A_2} \tau_{ne} (\varepsilon \cdot u) dA$$

Όπου:

- A_1 : είναι η διατομή εισόδου
- A_w : παράπλευρη επιφάνεια
- A_2 : διατομή εξόδου

Κάθε ένα από τρία ολοκληρώματα ισούται με το μηδέν επειδή το εσωτερικό γινόμενο $\varepsilon \cdot u$ είναι μηδέν σε κάθε σημείο της επιφάνειας ελέγχου. Αν προσθέσουμε κατά μέλη τις εξισώσεις **1.51** και **1.52** τότε προκύπτει:

$$\dot{W}_\tau = \dot{W}_x + \dot{W}_\delta = -\oiint_{EE} (\tau_n \cdot u) dA \quad (1.53)$$

Το \dot{W}_τ παριστάνει το ρυθμό κατανάλωσης έργου από τον όγκο ελέγχου για την εξουδετέρωση του συνόλου των ιξώδων δυνάμεων που δρουν πάνω στην επιφάνεια ελέγχου (EE).

Ορισμένες σημαντικές παρατηρήσεις που έχουν σχέση με το έργο W_τ :

1. Στα ιδανικά ρευστά το έργο W_τ είναι πάντοτε μηδέν, αφού σε αυτά δεν αναπτύσσονται ποτέ ιξώδεις τάσεις.
2. Το έργο W_τ των επιφανειακών ιξωδών τάσεων **δεν πρέπει να ταυτίζεται με το έργο τριβών, δηλαδή την ενέργεια που καταναλώνεται για την υπερνίκηση των τριβών στο εσωτερικό του ρευστού.**

Επομένως με βάσει τα προηγούμενα η εξίσωση 1.48 γράφεται:

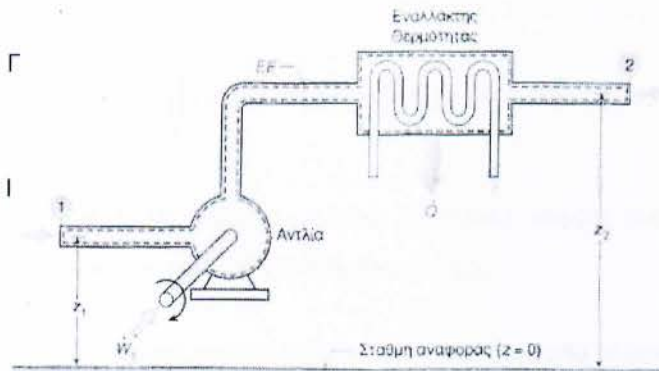


$$\dot{W} = \dot{W}_s + \dot{W}_p + \dot{W}_\tau = \dot{W}_s + \iint_{EE} \left(\frac{p}{\rho} \right) \rho(u \cdot n) dA + \dot{W}_\tau \quad (1.54)$$

Άρα αν αντικαταστήσουμε στην εξίσωση ενέργειας την παραπάνω σχέση έχουμε μια πιο σαφή έκφραση της εξίσωσης ενέργειας.

ΕΙΔΙΚΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΤΗΣ ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗΣ ΕΞΙΣΩΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η γενική μορφή της μακροσκοπικής εξίσωσης ενέργειας απλοποιείται σημαντικά όταν εφαρμόζεται σε ειδικές περιπτώσεις ροής.



Εικόνα 1.8 Όγκος ελέγχου για τον οποίο το έργο διάτμησης είναι μηδέν

Για παράδειγμα ας δούμε πως τροποποιείται η εξίσωση αυτή για τον όγκο ελέγχου που εικονίζεται στην Εικ. 1.8 για διάφορα είδη ροής. Σε αυτή την περίπτωση βλέπουμε ότι η επιφάνεια ελέγχου συμπίπτει με τα εσωτερικά τοιχώματα του κυκλώματος και τέμνει κάθετα το ρεύμα που εισέρχεται και εξέρχεται από τον όγκο ελέγχου. Επομένως σύμφωνα με όσα αναφέραμε στην προηγούμενη παράγραφο, το έργο των διατμητικών τάσεων (και πρακτικά το έργο των W_τ του συνόλου των ιξώδων τάσεων) που δρουν πάνω στην επιφάνεια ελέγχου είναι μηδέν. Έτσι η μακροσκοπική εξίσωση ενέργειας γράφεται:



$$\dot{Q} - \dot{W}_s = \frac{d}{dt} \iiint_{OE} e \rho dV + \oint_{EE} (e + pv) \rho (u \cdot n) dA \quad (1.55)$$

Επειδή η παράπλευρη επιφάνεια του όγκου ελέγχου είναι αδιαπέραστη από το ρευστό η παραπάνω εξίσωση γράφεται:

$$\begin{aligned} \dot{Q} - \dot{W}_s = \frac{d}{dt} \iiint_{OE} e \rho dV + \iint_{A_1} (e_1 + p_1 v_1) \rho_1 (u_1 \cdot n_1) dA_1 \\ + \iint_{A_2} (e_2 + p_2 v_2) \rho_2 (u_2 \cdot n_2) dA_2 \end{aligned} \quad (1.56)$$

Αν θεωρήσουμε τη ροή στις διατομές A_1 και A_2 **ομοιόμορφη** η **1.56** γίνεται:

$$\dot{Q} - \dot{W}_s = \frac{d}{dt} \iiint_{OE} e \rho dV + \dot{m}_2 (e_2 + p_2 v_2) - \dot{m}_1 (e_1 + p_1 v_1) \quad (1.57)$$

Όπου:

$\dot{m}_1 (= \rho_1 u_1 A_1)$ και $\dot{m}_2 (= \rho_2 u_2 A_2)$ είναι οι ρυθμοί εισροής και εκροής αντίστοιχα του ρευστού από τον όγκο ελέγχου.

Σε περίπτωση **μόνιμης ροής** ο πρώτος όρος του δεύτερου μέλους γίνεται μηδέν και οι ρυθμοί \dot{m}_1 και \dot{m}_2 είναι ίσοι, οπότε η **1.57** γίνεται

$$\dot{Q} - \dot{W}_s = \dot{m} [(e_2 + p_2 v_2) - (e_1 + p_1 v_1)] \quad (1.58)$$

Η οποία εξίσωση λόγω των σχέσεων $e = u + \frac{u^2}{2} + gz$ και $h = u + pv$ έχω την παρακάτω έκφραση της εξίσωσης ενέργειας για **μόνιμη και ομοιόμορφη ροή**:

$$\dot{Q} - \dot{W}_s = \dot{m} \left[(h_2 - h_1) + \left(\frac{u_2^2 - u_1^2}{2} \right) + g(z_2 - z_1) \right] \quad (1.59)$$



Διαιρώντας με τη ροή μάζας \dot{m} και τα δύο μέρη και έχω ομοίως

$$q - w_s = \Delta h + \Delta \left(\frac{u^2}{2} \right) + g \Delta z \quad (1.60)$$

Όπου: q : η ανα μονάδα μάζας ρευστού θερμότητα που προσδίδεται στον όγκο ελέγχου από το περιβάλλον.

w_s : το αντίστοιχο αξονικό έργο που αποδίδεται από τον όγκο ελέγχου στο περιβάλλον.

Δh : η διαφορά της ειδικής ενθαλπίας.

Δz : η διαφορά που οφείλεται στο πεδίο βαρύτητας.

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ ΚΙΝΗΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Αν η ροή στις διατομές A_1 και A_2 δεν μπορεί να θεωρηθεί ομοιόμορφη οι εξισώσεις της προηγούμενης παραγράφου **ΔΕΝ** ισχύουν. Στην περίπτωση αυτή ο υπολογισμός του ρυθμού της κινητικής ενέργειας με βάση τη μέση ταχύτητα του ρευστού **μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικό υπολογιστικό σφάλμα**. Το σφάλμα αυτό αίρεται με τη χρησιμοποίηση ενός αδιάστατου συντελεστή α , ο οποίος ονομάζεται συντελεστής διόρθωσης κινητικής ενέργειας και υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$\alpha = \frac{1}{A} \iint_A \left(\frac{u}{\bar{u}} \right)^3 dA \quad (1.61)$$

Όπου u : τοπική ταχύτητα

\bar{u} : μέση ταχύτητα του ρευστού στη διατομή A

ΕΞΙΣΩΣΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Πολύ συχνά αντιμετωπίζονται προβλήματα ροής ρευστών στα οποία το ενεργειακό ενδιαφέρον εστιάζεται μόνο στους όρους της **μηχανικής ενέργειας**, δηλαδή την **κινητική ενέργεια**, τη **δυναμική ενέργεια**, το **αξονικό έργο** και το **έργο πίεσης**. Το χαρακτηριστικό γνώρισμα των μορφών της κινητικής ενέργειας είναι ότι αυτές, θεωρητικά μπορούν να



μετατραπούν πλήρως σε εκμεταλλεύσιμο έργο. Η εξίσωση ενέργειας η οποία δεν περιλαμβάνει όρους θερμικής ενέργειας ονομάζεται εξίσωση μηχανικής ενέργειας.

Για να εξάγουμε την εξίσωση της μηχανικής ενέργειας θα απαλείψουμε από την εξίσωση ενέργειας του όρους οι οποίοι εμπεριέχουν τη θερμική ενέργεια, αντικαθιστώντας τους με ισοδύναμους όρους μηχανικής ενέργειας.

Άρα

$$q - w_s = \Delta h + \Delta \left(\alpha \frac{u^2}{2} \right) + g \Delta z \quad (1)$$

Από την παραπάνω εξίσωση αντικαθιστώ τους όρους q και Δh

Από τον 1° ν. θερμοδυναμικής έχω:

$$\delta q = du + \delta w \quad (2) \quad \text{και}$$

$$\delta q = du + \delta w_R - \delta w_i \quad (3)$$

Γνωρίζοντας ότι το μέγιστο έργο δίνεται από την εξίσωση

$$\delta w_R = p dv \quad (4)$$

Και λόγω του ορισμού της ενθαλπίας έχω: $h = u + pV$ (5)

$$\delta q = dh - v dp - \delta w_i = dh - \frac{dp}{\rho} - \delta w_i \quad \text{ολοκληρώνοντας την παραπάνω}$$

$$\text{σχέση έχω} \quad q = \Delta h - \int_{p_1}^{p_2} \frac{dp}{\rho} - w_i \quad \text{την οποία εάν αντικαταστήσουμε στην}$$

(1) προκύπτει:

$$\Delta \left(\alpha \frac{u^2}{2} \right) + g \Delta z + \int_{p_1}^{p_2} \frac{dp}{\rho} + w_i + w_s = 0 \quad (1.62)$$

Και είναι η έκφραση της εξίσωσης μηχανικής ενέργειας.



Σε περίπτωση που η ροή θεωρηθεί ΑΣΥΜΠΙΕΣΤΗ & ΑΤΡΙΒΗ

τότε ισχύει:

$$\frac{p_1}{\rho} + \alpha_1 \frac{u_1^2}{2} + gz_1 = \frac{p_2}{\rho} + \alpha_2 \frac{u_2^2}{2} + gz_2$$

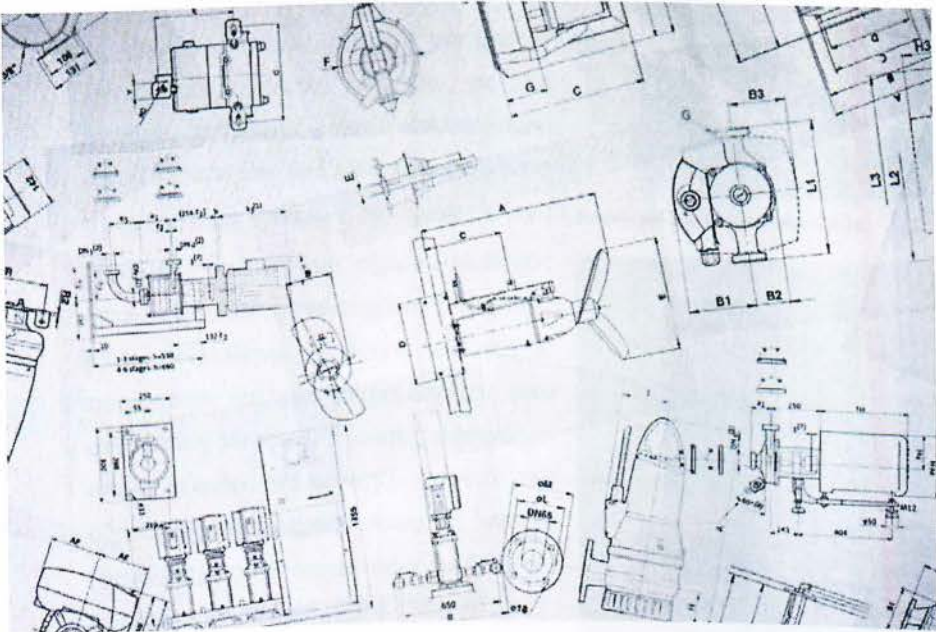
Η τελευταία εξίσωση ονομάζεται εξίσωση Bernoulli. Η φυσική ερμηνεία της εξίσωσης Bernoulli αναφέρει ότι η ολική μηχανική ενέργεια, την οποία έχει η μονάδα μάζας του ρευστού, διατηρείται σταθερή κατά μήκος μιας ορισμένης ροϊκής γραμμής.

Με το πέρας του 1^{ου} κεφαλαίου [Περί Ρευστομηχανικής] πρέπει να σημειώσω πως για εκτενή τμήματα του παρόντος χρησιμοποιήθηκε σαν βάση το βιβλίο του κ. Άγγελου Θ. Παπαϊωάννου Μηχανική των Ρευστών Β' Έκδοση (βλ. βιβλιογραφία).



Πρόλογος 2ου Κεφαλαίου

Στο παρόν κεφάλαιο θα κάνουμε μια αναφορά στις υδροδυναμικές μηχανές, τον τρόπο λειτουργίας τους, τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά τους, τα χαρακτηριστικά μεγέθη τους. Ιδιαίτερη αναφορά θα κάνουμε στο παρόν κεφάλαιο για την σημασία των χαρακτηριστικών καμπυλών απόδοσης και την μεθοδολογία χάραξης αυτών.



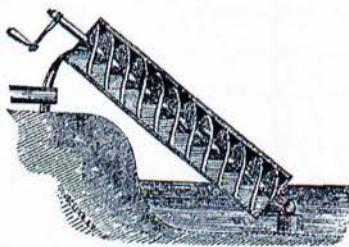


02-1 Γενικά Χαρακτηριστικά Υδροδυναμικών-Ρευστοδυναμικών Μηχανών

i- ιστορικά στοιχεία

Οι υδροδυναμικές μηχανές (αντλίες και υδροστρόβιλοι) κατέληξαν στην σημερινή τους μορφή μετά από μακροχρόνιες προσπάθειες. Η ανάπτυξή τους, συμβάδιζε με την ανάπτυξη των αντίστοιχων αναγκών αλλά και με την γενικότερη τεχνολογική πρόοδο.

Ιστορικά, από τις πρώτες ρευστοδυναμικές μηχανές ήταν ο κοχλίας του Αρχιμήδη (Archimedes' screw), μια κατασκευή η οποία χρησιμοποιούνταν για να ανυψώσει νερό από τα ποτάμια ή λίμνες σε αρδευτικά κανάλια για τις ανάγκες άρδευσης των καλλιεργειών. Αποτελούταν από μία ελικοειδή επιφάνεια προσαρτημένη πάνω σε έναν άξονα (κοχλίας). Το σύστημα άξονα-ελικοειδούς επιφανείας είναι τοποθετημένο εντός ενός κοίλου κύλινδρου. Η κίνηση του κοχλία προερχόταν είτε από ανεμόμυλο είτε από ανθρώπινη κίνηση. Οι πρώτες μηχανές οι οποίες τεχνικά, πλέον, κατατάσσονται στις υδροδυναμικές μηχανές είναι οι αντλίες (φυγόκεντρες) και ανεμιστήρες του Γάλλου φυσικού Denis Papin (1674-1714).



Εικόνα 2-1 Κοχλίας του Αρχιμήδη



Εικόνα 2-2 Denis Papin

Το επόμενο βήμα στην εξέλιξη των φυγόκεντρικών αντλιών σημειώνεται γύρω στο 1839 στις ΗΠΑ οπότε και ο W.D. Andrews προσέθεσε το σπειροειδές κέλυφος γύρω από την φυγόκεντρική πτερωτή. Από την δεκαετία του 1880 αρχίζει πλέον η μαζική παραγωγή φυγόκεντρικών αντλιών.

**ii- ορισμοί**

Οι στροβιλομηχανές μπορούν να ορισθούν γενικά ως οι μηχανές μέσω των οποίων γίνεται εναλλαγή της μηχανικής ενέργειας σε ενέργεια του ρευστού ή αντίστροφα (δηλ της ενέργειας του ρευστού σε μηχανική ενέργεια) μέσω συνεχούς ροής του ρευστού και σταθερής περιστροφικής κίνησης.

Σύμφωνα με το γενικό αυτό ορισμό μια στροβιλομηχανή χαρακτηρίζεται από τα εξής :

- Τη ροή του ρευστού μέσω της σταθερής ροής μάζας (σε ένα μόνιμο σημείο λειτουργίας). Το ρευστό μπορεί να είναι νερό, αέρας, ατμός, καυσαέρια κλπ. Δηλ διακρίνεται σε δυο κύριες κατηγορίες: τα ασυμπίεστα ρευστά (όπως το νερό ή τα θεωρούμενα ως ασυμπίεστα, π.χ. Ο αέρας σε χαμηλές τιμές του αριθμού Mach, για $Mach < 0,3$ περίπου, θεωρείται ως ασυμπίεστος με την έννοια ότι δεν εκδηλώνονται τα φαινόμενα που σχετίζονται με τη συμπίεσσή του) και τα συμπίεστα όπως ο ατμός κλπ.
- Τη σταθερή περιστροφική κίνηση μέσω της οποίας γίνεται η μεταφορά της μηχανικής ενέργειας η οποία εμφανίζεται υπό τη μορφή ροπής M σε άτρακτο στρεφόμενη με σταθερή γωνιακή ταχύτητα ω , σε rad/sec . Άρα η αντίστοιχη μηχανική ισχύς είναι ίση με N :

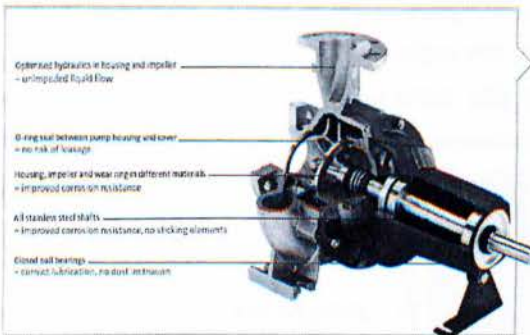
$$N = M \cdot \omega \quad (2.1)$$

Η μετατροπή της ενέργειας του ρευστού σε μηχανική ή το αντίστροφο, λαμβάνει χώρα σε ένα στρεφόμενο τμήμα της μηχανής το οποίο **ορίζεται ως πτερωτή**. Ένα βασικό χαρακτηριστικό των στροβιλομηχανών είναι ότι στη μετατροπή της ενέργειας του ρευστού σε μηχανική ενέργεια ή το αντίστροφο σημαντικό ρόλο παίζει η ενέργεια του ρευστού μορφής κινητικής ενέργειας. Για το λόγο αυτό οι στροβιλομηχανές ασυμπίεστου ρευστού χαρακτηρίζονται ως «ρευστοδυναμικές». Οι στροβιλομηχανές διακρίνονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με την κατεύθυνση ροής της ενέργειας: τις **εργοστροβιλομηχανές** και τις **κινητήριες στροβιλομηχανές**.

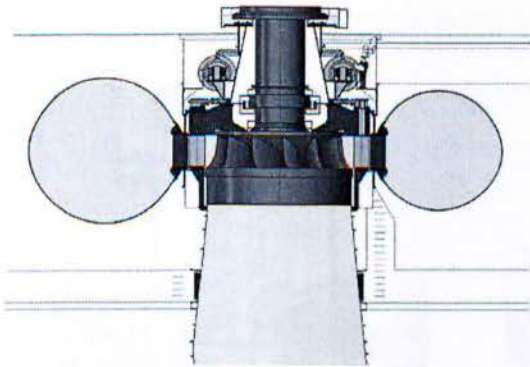


Στις πρώτες επιτυγχάνεται μετατροπή της μηχανικής ενέργειας, που προσδίδεται από ένα κινητήρα στη στρεφόμενη άτρακτο, σε ενέργεια που μεταφέρεται στο ρευστό.

Άρα στις εργοστροβιλομηχανές η ροπή που αναπτύσσεται στο στρεφόμενο τμήμα της μηχανής, την πτερωτή, είναι ανθιστάμενη και για να



Εικόνα 2-3 παράδειγμα Εργοστροβιλομηχανής



Εικόνα 2-4 Παράδειγμα Κινητήριας Μηχανής - Υδροστρόβιλος

στρέφεται το σύστημα με σταθερή γωνιακή

ταχύτητα ω , σε rad/sec ,

θα πρέπει η ανθιστάμενη ροπή να είναι ίση με την

κινητήρια του συνδεδεμένου κινητήρα..

Στις εργοστροβιλομηχανές κατατάσσονται οι αντλίες,

οι ανεμιστήρες, οι φυσητήρες, οι

στροβιλοσυμπιεστές.

Αντίθετα στις κινητήριες μηχανές ή τους

στροβίλους επιτυγχάνεται το αντίστροφο:

αφαιρείται ενέργεια από το διερχόμενο

ρευστό η οποία μετατρέπεται σε

μηχανική ενέργεια. Άρα

στις κινητήριες στροβιλομηχανές η ροπή που αναπτύσσεται στην άτρακτο είναι κινητήρια και για να στρέφεται το σύστημα με σταθερή γωνιακή ταχύτητα

ω θα πρέπει να συνδέεται η άτρακτος με μηχανή που απορροφά τη μηχανική ενέργεια προβάλλοντας ροπή ανθιστάσεως, π.χ. με μία ηλεκτρική γεννήτρια.

Μια τρίτη κατηγορία των στροβιλομηχανών που είναι συνδυασμός των δυο παραπάνω κατηγοριών αποτελούν οι υδροδυναμικοί συμπλέκτες, οι

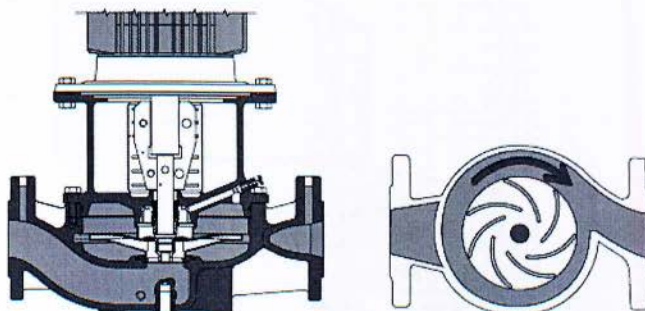
ρευστοδυναμικοί μετατροπείς ροπής και οι υδραυλικές πένδες. Σύμφωνα με τα προηγούμενα στις στροβιλομηχανές δεν κατατάσσονται οι υδραυλικές



μηχανές μετατόπισης (π.χ. γραναζωτές αντλίες και οι εμβολοφόροι συμπιεστές) για δύο λόγους: η παροχή του διερχόμενου ρευστού δεν είναι συνεχής ενώ στην λειτουργία τους η κινητική ενέργεια του ρευστού δεν παίζει κανένα ρόλο. Ενώ στις αντλίες, φυγοκεντρικές και αξονικές, η ενέργεια που προσδίδεται στο υγρό είναι επιθυμητό να είναι κύρια υπό μορφή δυναμικής ενέργειας, δηλ στατικής πίεσης, στους ανεμιστήρες είναι επιθυμητή η πρόσδοση ενέργειας στο ρευστό κύρια υπό μορφή κινητικής ενέργειας, δηλ επιδιώκεται η επιτάχυνση του ρευστού υπό σταθερή στατική πίεση, την ατμοσφαιρική. Οι έλικες, ναυτικές και αεροπορικές, μπορούν να καταταγούν στις υδροδυναμικές μηχανές. Στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε μόνο με τις αντλίες .

iii. υδροδυναμικές μηχανές

Το 1689 ο φυσικός Dr Denis Papin εφηύρε την φυγοκεντρική αντλία ο τύπος της οποίας είναι ο πλέον διαδεδομένος μέχρι και σήμερα.



Εικόνα 2-5 Αρχή λειτουργίας Φυγοκεντρικής Αντλίας

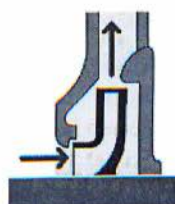
Η λειτουργία της βασίστηκε σε μια απλή αρχή, το υγρό εισέρχεται εντός της αντλίας και υπό την επίδραση της φυγόκεντρου δύναμης από την πτερωτή, εκτοπίζεται και αποκτά την απαιτούμενη πίεση.

Κύριες κατηγορίες (σε σχέση με την κατασκευαστική δομή της πτερωτής του) είναι οι εξής

- ακτινικής ροής
- μικτής ροής



- αξονικής ροής



Radial flow pump



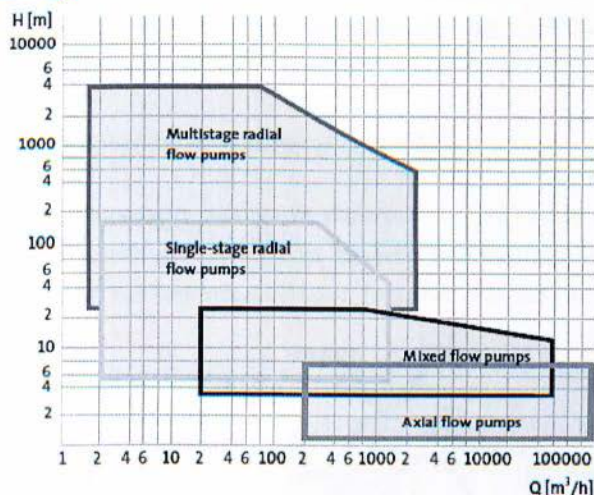
Mixed flow pump



Axial flow pump

Εικόνα 2-6 Κατηγορίες Αντλιών

Ανάλογα με τις ανάγκες του δικτύου ύδρευσης και κυρίως τις απαιτήσεις σε παροχή και μανομετρικό ύψος, χρησιμοποιούνται και οι κατάλληλου τύπου αντλίες.



Εικόνα 2-7 Σχέση Κατασκευαστικών Χαρακτηριστικών Αντλίας και περιοχή λειτουργίας

Η ραγδαία τεχνολογική πρόοδος του τελευταίου αιώνα και οι συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις, οδήγησαν σε ανάλογη εξέλιξη και τις υδροδυναμικές μηχανές. Για να καλυφθούν πλήρως οι ανάγκες κατασκευάστηκαν διάφορων τύπων αντλίες. Το παρακάτω διάγραμμα μας δίνει μια πρώτη εικόνα της σχέσης που συνδέει τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της αντλίας με τις απαιτήσεις σε παροχή και μανομετρικό.



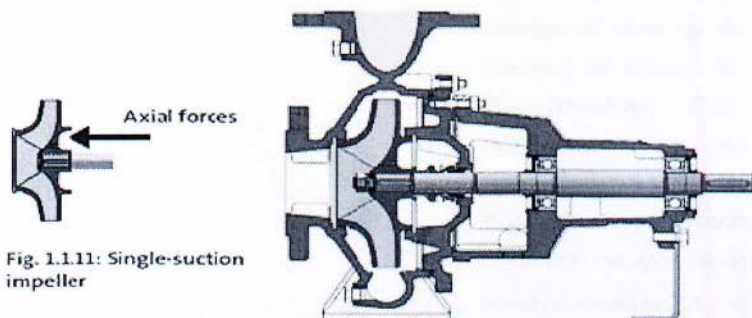
Βλέπουμε πως για πολύ μεγάλες παροχές και χαμηλό μανομετρικό οι ανάγκες καλύπτονται με αξονικής ροής αντλίες, ενώ για, σχετικά, μικρότερες παροχές αλλά κατά πολύ μεγαλύτερο μανομετρικό χρησιμοποιούμε πολυβάθμιες ακτινικές αντλίες. Για να μπορέσουμε να κατανοήσουμε καλύτερα την σχέση μεταξύ των απαιτήσεων ενός δικτύου και των κατασκευαστικών χαρακτηριστικών της κατάλληλης αντλίας, κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστούν οι διαθέσιμοι τύποι αντλιών.

02-2 Κατασκευαστικά Χαρακτηριστικά Αντλιών

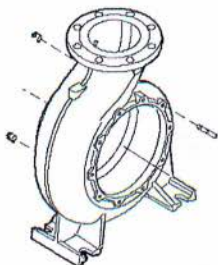
Τις παρακάτω σελίδες θα τις αφιερώσουμε προσπαθώντας να παρουσιάσουμε το σύνολο των διαθέσιμων εμπορικών εφαρμογών, κάνοντας κάποια σχόλια σχετικά με τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά, παραθέτοντας ανεπτυγμένο κατασκευαστικό διάγραμμα για κάθε τύπο και αναφέροντας ορισμένα case studies.

i. Μονοβάθμια Φυγοκεντρική Αντλία

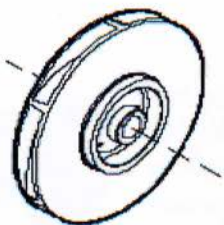
Ξεκινώντας κρίνεται σκόπιμο να παρουσιάσουμε τα κυρίως κατασκευαστικά χαρακτηριστικά μιας μονοβάθμιας φυγοκεντρικής αντλίας (μιας και θεωρείται η "μητέρα" των υπόλοιπων αντλιών). Τα βασικά μέρη μιας τυπικής



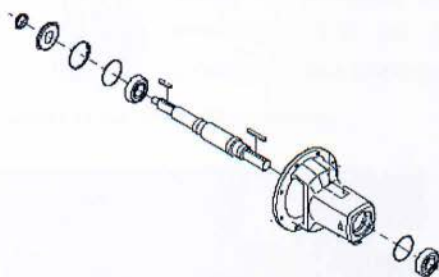
Εικόνα 2-8 Τομή Μονοβάθμιας Φυγοκεντρικής Αντλίας



Εικόνα 2-9 Σπειροειδές Περίβλημα Μονοθάμβιας Φυγοκεντρικής Αντλίας



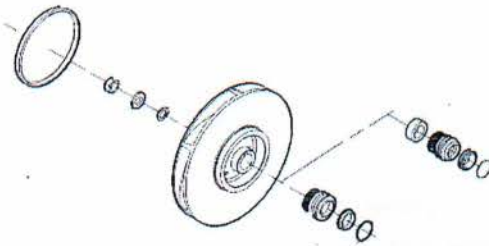
Εικόνα 2-10 Πτερωτή Κλειστού Τύπου Φυγοκεντρικής Αντλίας



Εικόνα 2-11 Στυπιοθάλαμος, Άξονας και Ρουλιάν μονοθάμβιας φυγοκεντρικής Αντλίας

φυγοκεντρικής αντλίας είναι α) το σπειροειδές περίβλημα (σαλίγκαρος), β) η πτερωτή της αντλίας (ανοικτού ή κλειστού τύπου) γ) ο άξονας της αντλίας, ο οποίος παίρνει κίνηση από τον Η/Κ ή ΜΕΚ κινητήρα, και πάνω στον οποίο εδράζεται η πτερωτή. Ο άξονας διαπερνά το κέλυφος της αντλίας και καταλήγει σε ένα ελεύθερο άκρο, πάνω στο οποίο συνδέεται η κίνηση (Η/Κ ή ΜΕΚ) δ) **στυπιοθάλαμος**. Ο στυπιοθάλαμος αποτελεί μέρος του σώματος της αντλίας και συμβάλλει στη στεγανοποίηση του διακένου μεταξύ του περιβλήματος και του άξονα της πτερωτής. Προορισμός του στυπιοθάλαμου είναι i) να εμποδίζει την είσοδο του αέρα στο περίβλημα και ii) να εμποδίζει τη διαρροή του υγρού κατά μήκος του άξονα. Στις σύγχρονες κατασκευές έχει επικρατήσει ο **μηχανικός στυπιθλιπτής (mechanical seal)**, ο οποίος αποτελείται από δακτυλίου, τόσο σταθερούς όσο και περιστρεφόμενους και από ελατήριο το οποίο κρατάει συνεχώς σε επαφή τους δύο δακτυλίου. Όπως αναφέραμε και προηγούμενα, ο τύπος του προς εγκατάσταση αντλητικού συγκροτήματος ποικίλει ανάλογα με τις απαιτήσεις της κατανάλωσης, συνεπώς,

σαν μηχανικοί, κρίνεται απαραίτητο να γνωρίζουμε τις διαθέσιμες εμπορικές εφαρμογές, ούτως ώστε να ήμαστε σε θέση να ανταποκριθούμε στις ανάγκες των επαγγελματικών απαιτήσεων.



Εικόνα 2-12 Μηχανισμός Μηχανικού Στυπιοθλίπτη
(Mechanical Seal)

b

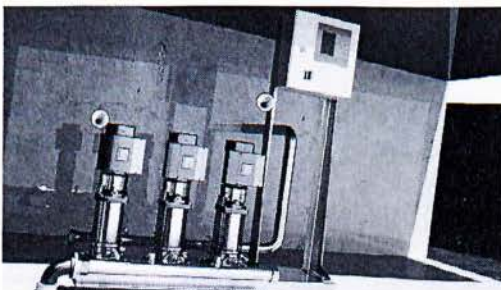
ii. Πολυβάθμιες Εξωτερικές Αντλίες Ανύψωσης Πίεσης (Pressure Boosting)



Χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές κατά τις οποίες το ζητούμενο είναι η επίτευξη υψηλού μανομετρικού και όχι τόσο οι υψηλές τιμές παροχής. Κύρια τεχνικά χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου τύπου αντλίας είναι η εν σειρά σύνδεση πλήθους βαθμίδων

Σε πολλές εφαρμογές μπορούμε να δούμε πολυβάθμιες αντλίες να εργάζονται και εν σειρά, ή παράλληλα αποτελώντας έτσι ένα σύστημα ανύψωσης πίεσης (pressure boosting systems).

Εικόνα 2-13 Πολυβάθμια Εξωτερική Αντλία



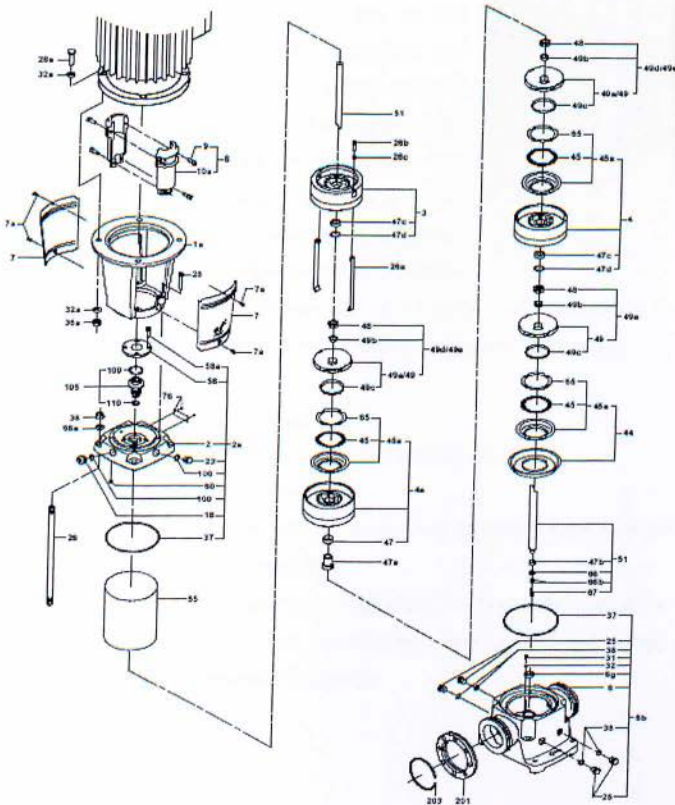
Εικόνα 2-14 Πιεστικό Συγκρότημα



Εφαρμογές Πολυβάθμιων Αντλιών

- i. Διανομή νερού σε μεγάλες ξενοδοχειακές εγκαταστάσεις, δημόσια κτίρια κ.α.
- ii. Σύγχρονες μονάδες αγροτικής παραγωγής
- iii. ύδρευση πόλεων
- iv. Βιομηχανικές Εφαρμογές
- v. Συστήματα επεξεργασίας νερού (αφαλάτωση)

Στο παρακάτω τρισδιάστατο ισομετρικό ανεπτυγμένο σκαρίφημα βλέπουμε τις κατασκευαστικές λεπτομέρειες μιας πολυβάθμιας εξωτερικής αντλίας



Εικόνα 2-15 Ανεπτυγμένο Κατασκευαστικό Σκαρίφημα Πολυβάθμιας Εξωτερικής Αντλίας



iii. Άντληση Υπεδάφιων Υδάτων (Groundwater supply)

Κατασκευαστικά το υδραυλικό τμήμα του συγκεκριμένου τύπου αντλίας είναι **παρόμοιο με αυτό των πολυβάθμιων αντλιών**. Μεγάλη **διαφορά υπάρχει στον Η/Κ** ο οποίος είναι ειδικής κατασκευής (έδρανα, περιέλιξη, τρόπος ψύξης) μιας και εργάζεται στην πλειοψηφία των περιπτώσεων εντός γεωτρήσεως, γεγονός καθιστά δυσκολότερη την ψύξη του Η/Κ.

Ιδιαίτερο κατασκευαστικό ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα εξαρτήματα α/α 203 και 206 τα οποία αποτελούν την έδραση του άξονα, στο σώμα του Η/Κ. Κατασκευασμένα από κράματα κεραμικών υλικών εδράζουν όλο το φορτίο της υποβρύχιας αντλίας και περιστρέφουν την υποβρύχια αντλία. Ιδιαίτερη προσοχή κατά την εγκατάσταση ενός υποβρύχιου κινητήρα πρέπει να δοθεί στον τρόπο ψύξης μιας και εργάζεται



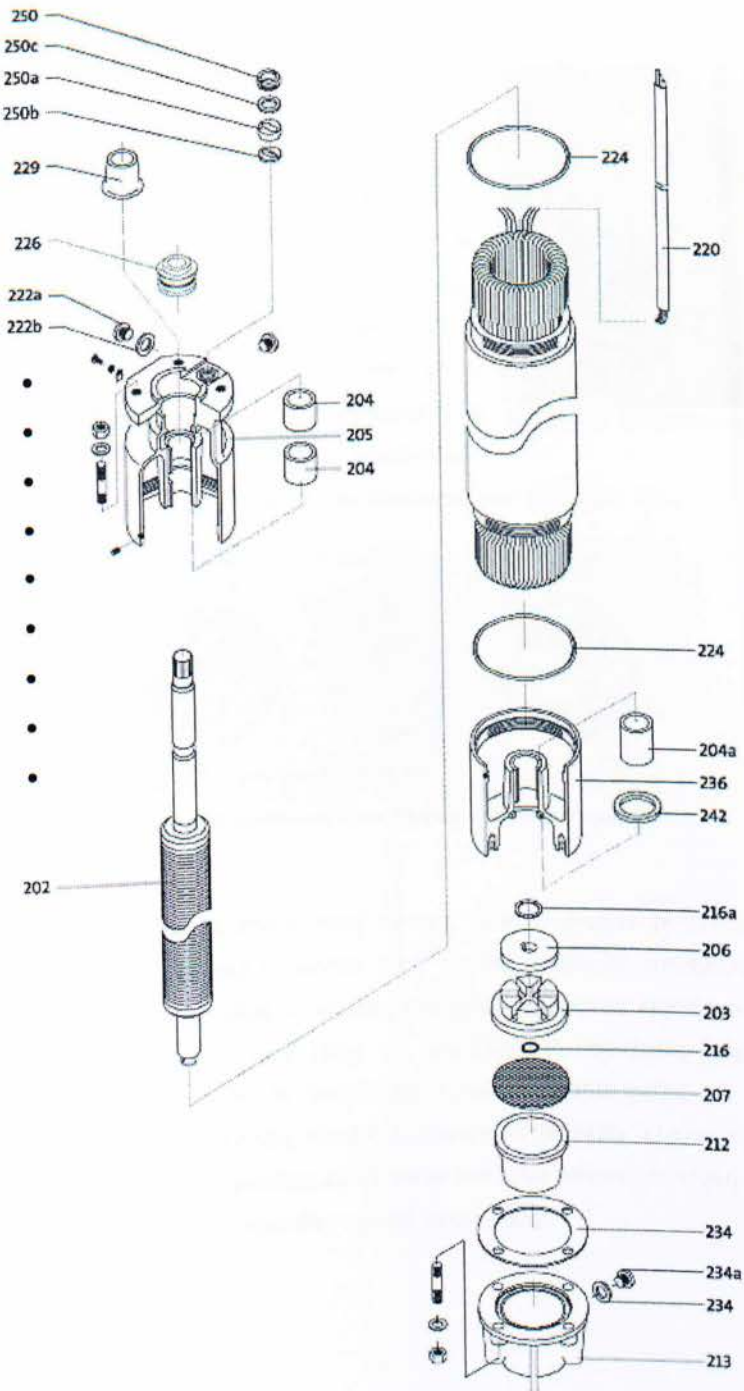
Εικόνα 2-16 Εγκατάσταση Υποβρύχιας Αντλίας

συνεχώς εντός του αντλούμενου ύδατος. Η ψύξη ενός υποβρύχιου κινητήρα επιτυγχάνεται από το ίδιο το προς άντληση νερό μέσω συναγωγής.

Εφαρμογές Υποβρύχιων Αντλιών

Η κύρια χρήση του συγκεκριμένου τύπου αντλίας είναι στην

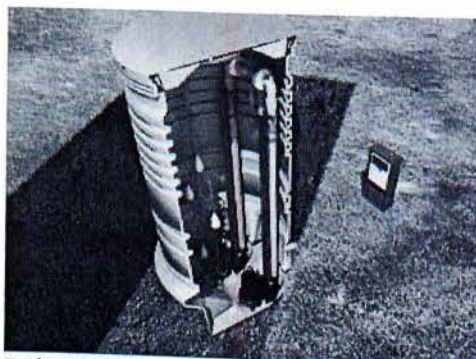
- i. άντληση υπόγειων υδάτων,
- ii. άντληση υδάτων από δεξαμενή. Βρίσκει εφαρμογή κυρίως, στον αγροτικό, κτηνοτροφικό τομέα.
- iii. Το υδραυλικό κομμάτι μιας υποβρύχιας αντλίας χρησιμοποιείται επίσης και σε εφαρμογές αφαλάτωσης, συστημάτων ανύψωσης πίεσης για εφαρμογές ύδρευσης.



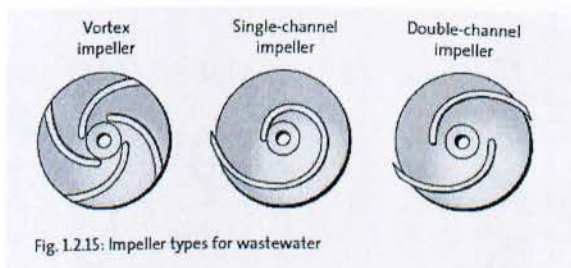
Εικόνα 2-17 Ισομετρικό Σκαρίφημα Υποβρύχιου Κινητήρα

**iv. Διακίνηση Ακαθάρτων υγρών-Λυμάτων (WasteWater)**

Η κύρια κατασκευαστική διαφορά των αντλιών οι οποίες εργάζονται για την ανύψωση λυμάτων έγκειται κυρίως στον τύπο της περρωτής. Οι περρωτές (α/α 49 Εικ. 2-20) οι οποίες χρησιμοποιούνται σε αυτές τις περιπτώσεις είναι ανοικτού τύπου, συνεπώς δεν επιτυγχάνονται υψηλά μανομετρικά ύψη. Ο λόγος που χρησιμοποιείται ανοικτού τύπου περρωτή, είναι για να επιτυγχάνεται τεμαχισμός των στερεών αποβλήτων, καθιστώντας έτσι τεχνικά εφικτή την διακίνηση των λυμάτων.

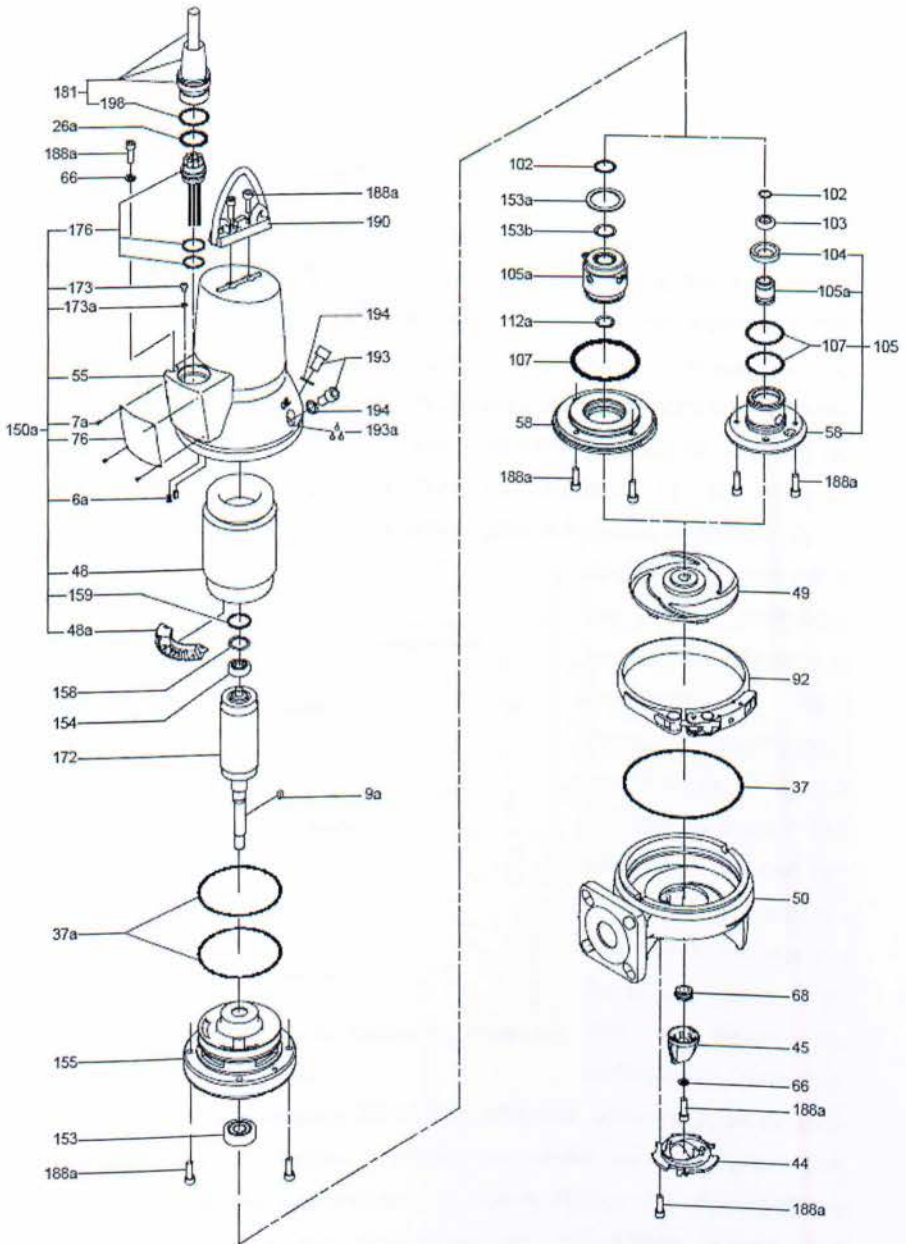


Εικόνα 2-18 Εγκατάσταση Αντλίας Λυμάτων



Εικόνα 2-19 Διαθέσιμοι τύποι Περρωτής Αντλιών Λυμάτων

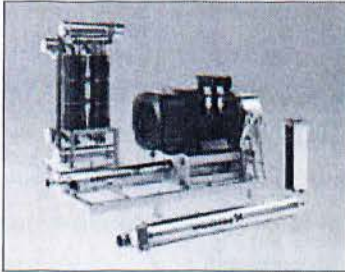
Στην εικόνα 2-19 βλέπουμε τους τύπους των περρωτών οι οποίες είναι διαθέσιμες και χρησιμοποιούνται στις αντλίες στερεών αποβλήτων και υδάτων. Όπως οι υποβρύχιες αντλίες έτσι αντλίες λυμάτων εργάζονται εντός του αντλούμενου ρευστού (ίλης εν προκειμένω), συνεπώς ερχόμαστε αντιμέτωποι και σε αυτή τη περίπτωση με την δυσκολία ψύξης του Η/Κ. Η ψύξη του Η/Κ μιας αντλίας λυμάτων επιτυγχάνεται μέσω ελαίου το οποίο βρίσκεται εντός της περιέλιξης και γι αυτόν τον λόγο απαιτείται συχνή και ανά συγκεκριμένες ώρες λειτουργίας τακτική συντήρηση.



Εικόνα 2-20 Ισομετρικό Σκαρίφημα Αντλίας Λυμάτων

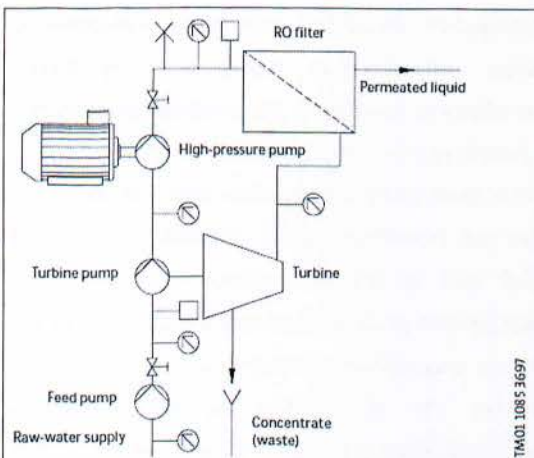


v. Αντλίες Υψηλής Πίεσης



Εικόνα 2-21 Αντλία Υψηλής Πίεσης με Αναγέννηση

Οι αντλίες υψηλής πίεσης χρησιμοποιούνται κυρίως σε εγκαταστάσεις αφαλάτωσης, με την μέθοδο της αντίστροφης όσμωσης (RO), επιτυγχάνουν αύξηση της πίεσης έως και **80 bar**. Κατασκευαστικά έχουν το ίδιο ακριβώς υδραυλικό σύστημα με τις υποβρύχιες αντλίες. Η ειδοποιός διαφορά τους είναι στον Η/Κ, μιας και σε αυτές τις εφαρμογές χρησιμοποιούνται κινητήρες των 5000grm. Για την επίτευξη μεγαλύτερου βαθμού απόδοσης, μέγεθος εξαιρετικά κρίσιμο σε εφαρμογές



Εικόνα 2-22 Μονογραμμικό Σχέδιο Λειτουργίας Αντλητικού Συγκροτήματος με Αναγέννηση.

αφαλάτωσης, μιας και ο τον βαθμός απόδοσης των αντλιών εξαρτάται η βιωσιμότητα ενός τέτοιου συστήματος αναπτύχθηκε το σύστημα με αναγέννηση **ΕΙΚ.2-22**. Η διαφορά του συγκεκριμένου συστήματος έγκειται στο ότι το εξερχόμενο νερό από τα φίλτρα της αντίστροφης όσμωσης, το οποίο έχει πίεση περίπου 20-30 bar, οδηγείται μέσω αγωγών σε έναν υδροστρόβιλο τύπου Pelton (Turbine) τον οποίο και περιστρέφει (του προσδίδει δηλαδή κινητική ενέργεια). Ο άξονας εξόδου του υδροστρόβιλου pelton με την σειρά του περιστρέφει μια πολυβάθμια φυγοκεντρική αντλία(Turbine Pump) η οποία αποτελεί το 1^ο επίπεδο ανύψωσης πίεσης και τροφοδοτεί την αντλία υψηλής πίεσης (High Pressure Pump). Η συγκεκριμένη εγκατάσταση υπολογίζεται πως εξοικονομεί έως και 34%.

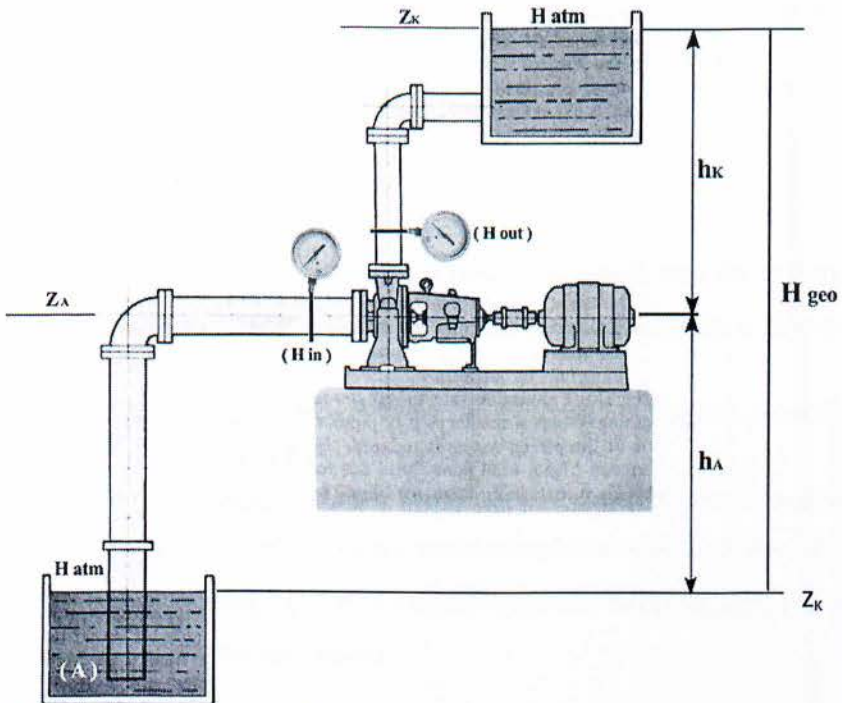


02-3 Χαρακτηριστικά Μεγέθη - Χαρακτηριστικές Καμπύλες Αντλιών (Μανομετρικό/Παροχή)

i. Ύψος αναρρόφησης, καταθλίψεως & ολικό μανομετρικό ύψος

Πριν ξεκινήσουμε την ανάλυση των χαρακτηριστικών μεγεθών μιας αντλητικής εγκατάστασης, κρίνεται σκόπιμο να δώσουμε **τον ορισμό αυτής**.

Στη γενική περίπτωση η διακίνηση υγρών μέσω σωλήνωσης γίνεται από μια δεξαμενή, τη **δεξαμενή αναρρόφησης**, προς μια άλλη, τη **δεξαμενή κατάθλιψης**, που βρίσκεται σε μεγαλύτερη στάθμη και στην οποία επικρατεί μεγαλύτερη στατική πίεση από την δεξαμενή αναρρόφησης. Η ενέργεια η οποία προσδίδεται στο υγρό από αντλία η οποία πρέπει να καλύψει και την την απώλεια ενέργειας που λαμβάνει χώρα κατά την διακίνησή του μέσω της σωλήνωσης (τριβές). Η εγκατάσταση που περιλαμβάνει την αντλία, τις σωληνώσεις από την δεξαμενή αναρρόφησης μέχρι τη δεξαμενή κατάθλιψης, το χώρο αναρρόφησης, κατάθλιψης και τα σχετικά εξαρτήματα ορίζεται ως **αντλητική εγκατάσταση**. Στην παρακάτω Εικόνα (εικ.2-24) δίνεται σχηματικά μια απλή αντλητική εγκατάσταση στην οποία η αντλία αντλεί υγρό από την δεξαμενή αναρρόφησης και το καταθλίβει στην δεξαμενή κατάθλιψης. Στην περίπτωση της αντλητικής εγκατάστασης του Σχήματος της εικόνας 2-24 και οι δύο δεξαμενές, αναρρόφησης και κατάθλιψης, βρίσκονται υπό την αΐτη στατική πίεση, την ατμοσφαιρική (σε m στήλης υγρού). Το τμήμα της σωλήνωσης από την δεξαμενή αναρρόφησης μέχρι την διατομή εισόδου **in** της αντλίας ονομάζεται σωλήνωση αναρρόφησης, ενώ το τμήμα της σωλήνωσης από την διατομή εξόδου **out** της αντλίας μέχρι την δεξαμενή κατάθλιψης ονομάζεται σωλήνωση κατάθλιψης.



Εικόνα 2-23 Τυπική Αντλητική Εγκατάσταση

Ως στάθμη της αντλίας z_A συμβολίζεται η στάθμη της ατράκτου της αντλίας εάν αυτή είναι οριζόντια ή η στάθμη της διατομής εισόδου στην πτερωτή εάν αυτή είναι κατακόρυφη. Φυσικά η στάθμη z_A μετράται ως προς την ίδια στάθμη αναφοράς με τις z_A και z_K .

Ως γεωμετρικό ύψος αναρρόφησης h_A ορίζεται η υψομετρική διαφορά:

$$h_A = z_K - z_A$$

Το h_A θα είναι θετικό εάν $z_A > z_K$, δηλ όταν η στάθμη της αντλίας είναι μεγαλύτερη από την στάθμη της δεξαμενής αναρρόφησης.

Ως γεωμετρικό ύψος κατάθλιψης ορίζεται η υψομετρική διαφορά:

$$h_k = z_k - z_a$$



Τέλος, ως γεωμετρικό ύψος ανύψωσης (γεωδαιπικό ύψος) H_{geo} ορίζεται η διαφορά στάθμης μεταξύ της δεξαμενή κατάθλιψης και της δεξαμενής αναρρόφησης και το οποίο είναι φυσικά ανεξάρτητο της στάθμης της:

ii. Παροχή

α) Θεωρητική παροχή (Q_n) είναι ο όγκος του υγρού που θα έπρεπε να αποδίδεται ανά μονάδα χρόνου αν δεν υπήρχαν εσωτερικές ή εξωτερικές διαρροές.

β) Κανονική παροχή (Optimum) είναι η αποδιδόμενη παροχή όταν η αντλία εργάζεται με το μέγιστο βαθμό αποδόσεως της.

γ) Πραγματική παροχή (Q) είναι ο όγκος υγρού που αποδίδεται στο σωλήνα καταθλίψεως στη μονάδα του χρόνου υπό ορισμένο μανομετρικό ύψος H_m .

δ) Εσωτερική παροχή (Q_e) είναι ο όγκος υγρού που διέρχεται μέσα από την πτερωτή στη μονάδα του χρόνου.

iii. Χαρακτηριστικές Καμπύλες Αντλιών

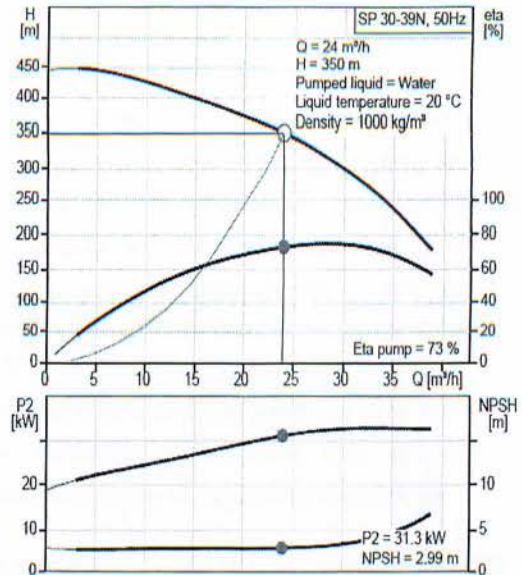
Κάθε αντλία όπως είδαμε κατασκευάζεται για ορισμένη παροχή Q και ορισμένο ολικό ύψος H . Όταν όμως η αντλία εγκατασταθεί σε ένα αντλητικό συγκρότημα δεν θα εργάζεται κατ'ανάγκη με τις συνθήκες για τις οποίες έχει κατασκευαστεί. Για παράδειγμα ας υποθέσουμε ότι ο σωλήνας καταθλίψεως καταλήγει στον πυθμένα μιας δεξαμενής αποθηκείσεως υγρού. Κατά τη λειτουργία της αντλίας η στάθμη του υγρού ανέρχεται συνεχώς με αντίστοιχη μεταβολή του Q ενώ η ταχύτητα περιστροφής της αντλίας παραμένει σταθερή. Επομένως για την εγκατάσταση μιας αντλίας εκτός από τις παραμέτρους Q_n, H_n, N_n σε n αριθμό στροφών πρέπει να είναι γνωστή και η συμπεριφορά της όταν οι συνθήκες λειτουργίας μεταβάλλονται. Για τον καθορισμό των υδραυλικών χαρακτηριστικών μιας αντλίας μετράται το ύψος καταθλίψεως H όταν μεταβάλλεται η παροχή Q με στραγγαλισμό της ροής στο σωλήνα καταθλίψεως ενώ ο αριθμός των στροφών παραμένει σταθερός. Η μεταβολή αυτή εκφράζεται με την σχέση:



$$H = f(Q)$$

Η καμπύλη της παραπάνω εξίσωσης ονομάζεται **χαρακτηριστική καμπύλη**

ύψους παροχής. Επίσης μετρώντας την ισχύ που καταναλίσκει ο κινητήρας είναι δυνατό να υπολογιστεί η ισχύς που μεταβιβάζεται στον άξονα της αντλίας N_a και ο βαθμός απόδοσής της, με αυτόν τον τρόπο καθορίζονται δύο πειραματικές καμπύλες **α)** η χαρακτηριστική ισχύος παροχής $N_a = f(Q)$ και **β)** η χαρακτηριστική καμπύλη βαθμού απόδοσης παροχής $\eta = f(Q)$. Οι παραπάνω τρεις καμπύλες των εξισώσεων ονομάζονται **χαρακτηριστικές**



Εικόνα 2-24 Χαρακτηριστική Καμπύλη υποβρύχιας Αντλίας SP30-39N

καμπύλες. Για να κατανοήσουμε καλύτερα την χρησιμότητα και το πώς λειτουργούν οι χαρακτηριστικές καμπύλες, ας δούμε την παρακάτω εικόνα, η οποία αναφέρεται σε μια υποβρύχια αντλία. Επιλέξαμε βάσει μελέτης της σωληνογραμμής μας ότι η προς επιλογή αντλία εργάζεται σε μονομετρικό ύψος, συνυπολογίζοντας και τις απώλειες τριβών της σωληνογραμμής $H = 350m$, συνεπώς για την ολοκλήρωση των υπολογισμών μας, λαμβάνουμε από τις χαρακτηριστικές καμπύλες της αντλίας τα εξής μεγέθη τα οποία αντιστοιχούν στο συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας (duty point)

$$H_{dp} = 350m$$

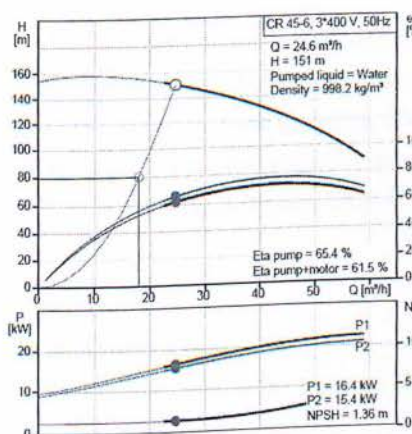
$$Q_{dp} = 24 \frac{m^3}{Hr}$$

$$P_{dp} = 31.3Kw$$

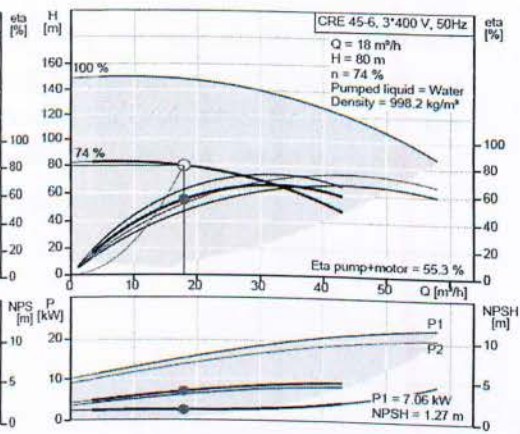
$$Eta_{dp} = 73\%$$

**iv. Αντλίες Μεταβλητών Στροφών**

Οι σύγχρονες ανάγκες εξοικονόμησης ενέργειας και οι ευρωπαϊκές οδηγίες τις οποίες είμαστε υποχρεωμένοι να εφαρμόσουμε μας οδήγησαν σε πιο φιλικές προς το περιβάλλον λύσεις. Μια τέτοια εφαρμογή είναι η χρήση Η/Κ μεταβλητών στροφών στους κινητήρες των αντλιών, σε συνδυασμό με την χρήση πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων μέτρησης πίεσης. Με την συγκεκριμένη τεχνολογία, ο πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας μετράει την απαιτούμενη πίεση του δικτύου και εν συνεχεία δίνει εντολή τον Η/Κ μεταβλητών στροφών να αυξομειώσει τις στροφές του ανάλογα με τις απαιτήσεις. Πρακτικά, αυτό σημαίνει πως, εάν στο δίκτυό μας υπάρχει μικρή ζήτηση ο Η/Κ θα λειτουργήσει όχι με το 100% της ισχύος του αλλά με ένα μικρότερο ποσοστό της ονομαστικής του ισχύος π.χ. 75%. Θα λέγαμε πιο ορθά πως η λειτουργία μιας αντλίας inverter **δεν περιγράφεται πλέον από μια καμπύλη αλλά από μια περιοχή**. Για να γίνει πιο κατανοητή η λειτουργία μιας αντλίας μεταβλητών στροφών κρίνεται σκόπιμο να δούμε το παρακάτω παράδειγμα.



Εικόνα 2-25α Χαρακτηριστική Καμπύλη Πολυβάθμιας Εξωτερικής Αντλίας CR 45-6 με συμβατικό κινητήρα



Εικόνα 2-25β Χαρακτηριστική Καμπύλη Πολυβάθμιας Εξωτερικής Αντλίας CRE 45-6 με κινητήρα μεταβλητών στροφών

Στην εικόνα 2-25 (β) απεικονίζονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη λειτουργίας της αντλίας CRE45-6 GRUNDFOS όταν η απαιτούμενη πίεση της κατανάλωσης είναι $H = 80m$ βλέπουμε αναλυτικά στον παρακάτω πίνακα το ποσοστό της



εξοικονομούμενης ενέργειας, ενώ ο συμβατικός κινητήρας θα εργαστεί με ισχύ $22kW$, ο κινητήρας τύπου inverter θα λειτουργήσει μόνο σύμφωνα με την κατανάλωση, και πάνω σε μια νέα χαρακτηριστική καμπύλη, η οποία αντιστοιχεί στο 74% της ονομαστικής καμπύλης και σε ισχύ του κινητήρα $7.4kW$. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνουμε μια εξοικονόμηση ενέργειας 68%.

Τύπος Αντλίας	CR 45-6	CRE 45-6
Απαιτούμενη Παροχή (m^3/Hr)	18	
Απαιτούμενο Μανομετρικό (m)	80	
Ισχύς Κινητήρα (Kw)	22Kw	7,06 Kw
Χρόνος Λειτουργίας Hr/ ημέρα	5	5
Καταναλισκόμενη Ισχύς (Kwh)	110	35,3
Κόστος Kwh	0,12 €	
Ημερήσιο Κόστος Λειτουργίας	13,20 €	4,24 €
Ημερήσια Εξοικονομούμενα Χρήματα	8,96 €	
Ποσοστό Εξοικονομούμενης Ενέργειας	68%	

Πίνακας 2-1

Παρατηρώντας την χαρακτηριστική της αντλίας μεταβλητών στροφών, βλέπουμε πως η λειτουργία της αντλίας πλέον περιγράφεται όχι από μια καμπύλη αλλά από μια περιοχή, δίνοντας μας μεγάλη ευελιξία στον άρτιτερο σχεδιασμό και την επίτευξη μεγαλύτερου βαθμού απόδοσης κατά τον σχεδιασμό ενός αντλητικού συγκροτήματος.



02-4 Το Φαινόμενο της Σπηλαιώσης

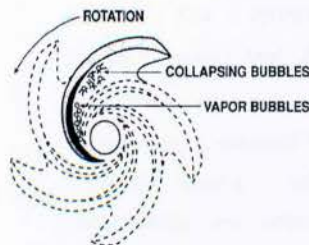
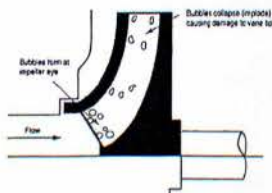
i. Γενικά

Το φαινόμενο της σπηλαιώσης είναι δυνατό να αναπτυχθεί σε ροές υγρών και μόνον. Στην περίπτωση αυτή το φαινόμενο της σπηλαιώσης αναπτύσσεται όταν σε περιοχή ροής η στατική πίεση τείνει τοπικά να γίνει μικρότερη από την πίεση ατμοποίησης του υγρού οπότε αυτό ατμοποιείται και αναπτύσσεται ένας θύλακας ή σπηλαία ατμού, δηλ ατμοποιημένου υγρού.

Η πίεση ατμοποίησης του κάθε υγρού είναι χαρακτηριστικό θερμοδυναμικό μέγεθος και εξαρτάται από την θερμοκρασία του.

Στις υδροδυναμικές μηχανές και εγκαταστάσεις η μείωση της στατικής πίεσης οφείλεται στην τοπική αύξηση της ταχύτητας του υγρού, οπότε σύμφωνα με την εξίσωση Bernoulli μειώνεται αντίστοιχα η στατική του πίεση. Στην περιοχή όπου η στατική πίεση P τείνει να γίνει μικρότερη από την πίεση ατμοποίησης P_s αναπτύσσεται θύλακας ατμοποίησης τον οποίο η πίεση διατηρείται σταθερή και ίση προς την πίεση ατμοποίησης P_s , και όπως αναφέρθηκε εξαρτάται μόνο από την (τοπική) θερμοκρασία του νερού.

Για παράδειγμα Το νερό βράζει στους 100°C και υπό πίεση μίας ατμόσφαιρας, όμως υπό απόλυτη πίεση 10 atm βράζει στους 179°C , και υπό πίεση 0.024 atm βράζει στους 21°C .



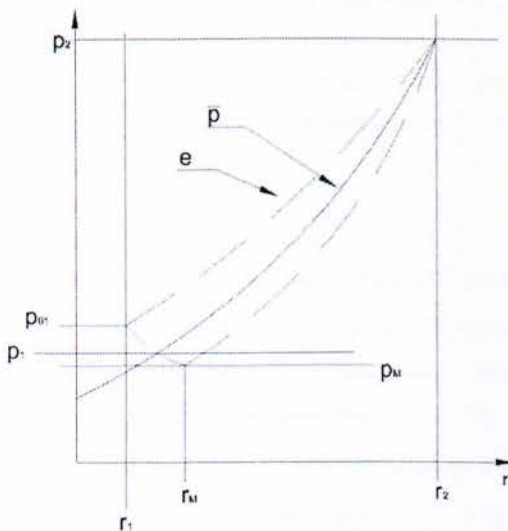
Εικόνα 2-26 Ανάπτυξη του Φαινομένου της Σπηλαιώσης σε Φυγοκεντρικές Αντλίες



Αποδεικνύεται πειραματικά ότι η ανάπτυξη θυλάκων ατμού προκαλείται σε θέσεις όπου υπάρχουν μικρές ανωμαλίες στην μάζα του υγρού, όπως μικρές φυσαλίδες αέρα που έχουν εγκλωβισθεί στις μικροανωμαλίες της στερεής περιρρεόμενης επιφάνειας όπου επιπλέον λαμβάνουν χώρα σημαντικές μεταβολές της στατικής πίεσης. Γι αυτό η σπηλαιώση ξεκινά κατά προτίμηση κοντά στις περιρρεόμενες στερεές επιφάνειες. Σύμφωνα με τα προηγούμενα το φαινόμενο της σπηλαιώσης είναι δυνατόν να αναπτυχθεί σε όλες τις ροές υγρών και ιδιαίτερα στις περιοχές όπου είναι δυνατόν να αναπτυχθούν μεγάλες τιμές της ταχύτητας της ροής, όπως στις υδροδυναμικές μηχανές.

ii. Ανάπτυξη Σπηλαιώσης σε Φυγοκεντρικές Αντλίες

Όπως αναπτύχθηκε στα προηγούμενα οι πλέον πιθανές περιοχές ανάπτυξης της σπηλαιώσης είναι αυτές στις οποίες η στατική πίεση είναι ήδη χαμηλή οπότε με περαιτέρω μείωσή της λόγω των υδροδυναμικών φαινομένων επιτάχυνση της ροής ενδέχεται αυτή να μειωθεί κάτω από την



Εικόνα 2-27 Διανομή της μέσης Στατικής Πίεσης στις Επιφάνειες Πτερυγίου Πτερωτής

πίεση ατμοποίησης p_v . Άρα στην περίπτωση των φυγοκεντρικών αντλιών η πιθανή περιοχή ανάπτυξης σπηλαιώσης είναι στην διατομή εισόδου της πτερωτής (όπου η στατική πίεση είναι ακόμα πιο χαμηλή) δηλ. στην γειτονιά της ακμής πρόσπτωσης των πτερυγίων και μάλιστα στην πλευρά των υποπίεσης. Στο διπλανό σχήμα (εικ. 2-27) δίνεται σχηματικά και για ένα σημείο λειτουργίας η ακτινική διανομή της στατικής πίεσης στις πλευρές υπερπίεσης και υποπίεσης του πτερυγίου καθώς και η ακτινική

μεταβολή της μέσης στατικής πίεσης από τη διατομή εισόδου ($r = r_1$) μέχρι τη



διατομή εξόδου ($r = r_2$). Έστω M το σημείο ελάχιστης μέσης στατικής πίεσης p_M στην επιφάνεια υποπίεσης του πτερυγίου και το οποίο βρίσκεται στην ακτίνα r_M που αναμένεται να είναι γειτονική της r_1 , άρα η συνθήκη ανάπτυξης ή μη σπηλαίωσης στην αντλία θα διατυπώνεται ως εξής συμβολίζοντας με p_s την πίεση ατμοποίησης του υγρού και η οποία θα εξαρτάται από την φύση του υγρού και από την μέση θερμοκρασία του:

- iv. Για $p_M > p_s$ δεν υπάρχει κίνδυνος ανάπτυξης σπηλαίωσης
- v. Για $p_M \approx p_s$ αναπτύσσεται μη συστηματικά σπηλαίωση στην περιοχή $r = r_M$ λαμβάνοντας υπόψη τον τυρβώδη χαρακτήρα της ροής οπότε ενδέχεται να αναπτυχθούν τιμές της στατικής πίεσης μικρότερες για p_s
- vi. Για $p_M < p_s$ υπάρχει συστηματική ανάπτυξη του φαινομένου της σπηλαίωσης στην περιοχή της ακτίνας $r = r_M$.

Άρα το όριο μεταξύ ασφαλούς και μη ασφαλούς λειτουργίας της αντλίας όσον αφορά την ανάπτυξη σπηλαίωσης αποτελεί η συνθήκη.

$$p_M \approx p_s$$

Το κριτήριο δεν είναι στην πράξη εφαρμόσιμο επειδή η τιμή της p_M (ελάχιστη μέση στατική πίεση στην επιφάνεια υποπίεσης) δεν είναι εύκολα υπολογίσιμο μέγεθος και για τον λόγο αυτόν γίνεται η ακόλουθη ανάλυση που οδηγεί σε χρήσιμα συμπεράσματα. Μεταξύ της e (διατομή εισόδου της αντλίας) και της θέσης στην ακτίνα r_m (ακτίνα στην οποία βρίσκεται η επιφάνεια υποπίεσης του πτερυγίου) όπου εμφανίζεται η ελάχιστη στατική πίεση στην πλευρά υποπίεσης του πτερυγίου, εφαρμόζεται η εξίσωση Bernoulli, από την οποία προκύπτει

$$p_{oM} = p_{oe} + \delta p_o - \delta p_{feM} \quad (2.2)$$



p_{oM} : η ολική πίεση στην θέση ελάχιστης στατικής πίεσης

δp_{feM} : οι υδραυλικές απώλειες της ροής από την διατομή εισόδου e μέχρι τ
ο σημείο M

δp_o : η προσδιδόμενη ενέργεια στο ρευστό από την πτερωτή

Η ολική πίεση στο σημείο M εκφράζεται ως εξής συμβολίζοντας με C_M την
απόλυτη ταχύτητα της ροής στην θέση r'_M της πλευράς υποπίεσης

$$p_{oM} = \rho/2 * c_M^2 + p_M \quad (2.3)$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει

$$p_{oE} = p_M + \rho/2 * c_M^2 - \delta p_o + \delta p_{feM} \quad (2.4)$$

ο όρος $\rho/2 * c_M^2 - \delta p_o$ είναι δυναμικός και εξαρτάται από την λειτουργία της
πτερωτής. Για τον λόγο αυτόν είναι δυνατόν να εκφρασθεί ως:

$$\rho/2 * c_M^2 - \delta p_o = a * \rho/2 * c_1^2 \quad (2.5)$$

όπου c_1 η απόλυτη ταχύτητα στην διατομή εισόδου της πτερωτής.
Λαμβάνοντας υπόψη ότι η ακτίνα r'_M είναι πολύ γειτονική με την ακτίνα
εισόδου r_1 η προσδιδόμενη ενέργεια (ανά μονάδα μάζας) στο ρευστό θα είναι
πολύ μικρή, δηλαδή $\delta p_o \approx 0$ οπότε η εξίσωση (2.5) γράφεται

$$a \approx \frac{c_M^2}{c_1^2} \quad (2.6)$$



Η απόλυτη ταχύτητα c_M θα είναι προφανώς μεγαλύτερη από την απόλυτη ταχύτητα εισόδου στην πτερωτή, την c_1 , αφού σε αυτή (την c_M) αντιστοιχεί η μέγιστη δυναμική υποπίεση. Έτσι η τιμή του a θα είναι μεγαλύτερη από την μονάδα, δηλ $a > 1$. Η τιμή του a εξαρτάται προφανώς από το σημείο λειτουργίας και τη διαμόρφωση του πτερυγίου στην ακμή πρόσπτωσης.

Οι υδραυλικές απώλειες δp_{feM} είναι επίσης δυνατόν να εκφραστούν ως

$$\delta p_{feM} = \zeta * \rho / 2 * c_1^2 \quad (2.7)$$

συμβολίζοντας με ζ τον συντελεστή των αντίστοιχων υδραυλικών απωλειών.

Από τις παραπάνω εξισώσεις (2.5), (2.6) και (2.7) η εξίσωση (2.2) γράφεται

$$p_{oe} = p_M + (a + \zeta) * c_1^2 / 2g \quad (2.8)$$

εκφράζοντας την πίεση σε μέτρα στήλης υγρού η παραπάνω εξίσωση γράφεται

$$H_{OE} = H_M + (a + \zeta) * c_1^2 / 2g \quad (2.9)$$

Όπου, εάν από τους δύο όρους της παραπάνω εξίσωσης αφαιρεθεί η πίεση ατμοποίησης σε μέτρα στήλης υγρού, $H_S = P_s / (\rho g)$ και ορισθεί το μέγεθος

$H_\Theta = H_{OE} - H_S$, τότε σύμφωνα με την εξίσωση (2.9) προκύπτει:

$$H_\Theta = H_{oe} - H_S = (H_M - H_S) + (a + \zeta) * c_1^2 / 2g \quad (2.10)$$

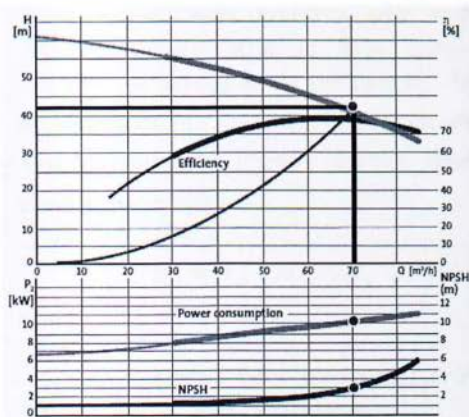
Στην οριακή λειτουργία μεταξύ ασφαλούς και μη ασφαλούς λειτουργίας της αντλίας της αντλίας ως προς την σπηλαιώση, δηλαδή όταν $H_M \approx H_S$, η τιμή του $H_\Theta = H_{oe} - H_S$ σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση παίρνει την ακόλουθη τιμή:



$$H_{xp} = (H_{\Theta})_{xp} = (H_{oc})_{xp} - H_s = (a + \zeta)c_1^2 / 2g \quad (2.11)$$

- H_{xp} : το κρίσιμο ύψος σπηλαίωσης NPSH, (Net Positive Suction Head required).
- c_1 : η απόλυτη ταχύτητα στη διατομή εισόδου της περωτής.
- ζ : συντελεστής υδραυλικών απωλειών.
- $a \approx c_M^2 / c_1^2$ με c_M την απόλυτη ταχύτητα της ροής στην θέση r_m της πλευράς της υποπίεσης.
- H_s : η πίεση ατμοποίησης σε μέτρα στήλης νερού.

Η τιμή του κρίσιμου ύψους σπηλαίωσης H_{xp} όπως ορίζεται από την εξίσωση 2.11 εκφράζει την διαφορά της ολικής πίεσης στην διατομή εισόδου της αντλίας από την πίεση ατμοποίησης του υγρού για την όποια η κατάσταση λειτουργίας της αντλίας είναι στο όριο εμφάνισης σπηλαίωσης. Όπως γίνεται αντιληπτό είναι επιθυμητό για μια αντλία να έχει τη μικρότερη δυνατή τιμή του H_{xp} ώστε να είναι περισσότερο εύκολη η ικανοποίηση της



Εικόνα 2-28 Χαρακτηριστικές Καμπύλες Λειτουργίας Τυπικής Φυγοκεντρικής Αντλίας

συνθήκης λειτουργίας χωρίς σπηλαίωση. Από τον τελευταίο όρο της εξίσωσης 2.11 γίνεται φανερό ότι το μέγεθος H_{xp} είναι χαρακτηριστικό της λειτουργίας (τιμή του c_1 και του a) και της σχεδίασης της αντλίας, ιδιαίτερα της ακμής πρόσπτωσης- τιμή (a και ζ), άρα η καμπύλη



του H_{kp} συναρτήσει της διακινούμενης παροχής Q , δηλαδή η χαρακτηριστική καμπύλη σπηλαιώσης, για σταθερή ταχύτητα περιστροφής της αντλίας, αποτελεί μία από τις χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας.

Από την καμπύλη H_{kp}, Q (εικ. 2-28) γίνεται φανερό η συνεχής αύξηση της τιμής του H_{kp} (NPSH) συναρτήσει της διακινούμενης παροχής Q και μάλιστα παραβολικά, γεγονός που εξηγείται ως εξής: για σταθερές (σχεδόν) τιμές των συντελεστών a και ζ της εξίσωσης 2.11 ο όρος c_1^2 είναι ανάλογος του Q^2 (εξίσωση συνέχειας). Η τιμή του ζ (συντελεστής γραμμικών απωλειών) είναι, ουσιαστικά, σταθερή και ανεξάρτητη της παροχής Q , ενώ η τιμή του a εξαρτάται από την διακινούμενη παροχή δεδομένου ότι μεταβάλλεται η γωνία πρόσπτωσης στα περύγια. Άρα θεωρώντας σε πρώτη προσέγγιση τις τιμές των a και ζ ως ανεξάρτητες της παροχής η τιμή του H_{kp} μεταβάλλεται σχεδόν παραβολικά με το τετράγωνο της διακινούμενης παροχής (εικ. 2-28).

iii. Εγκατάσταση Αντλίας για Λειτουργία Χωρίς Σπηλαιώση

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, κάθε εγκατάσταση ενός αντλητικού συγκροτήματος σχεδιάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να αποφεύγεται η ανάπτυξη του φαινομένου της σπηλαιώσης. Το κρίσιμο μέγεθος το οποίο μας εξασφαλίζει τη συγκεκριμένη συνθήκη ονομάζεται Καθαρό Θετικό Ύψος Αναρρόφησης (Net Positive Suction Head Available $NPSH_A$) και υπολογίζεται ως εξής:

$$H_{\Theta} = H_{oe} - H_s = (H_M - H_S) + H_{kp} \quad (2.12)$$

Όπου :

H_{kp} : Κρίσιμο ύψος σπηλαιώσης ($NPSH_r$), χαρακτηριστικό της αντλίας και του σημείου λειτουργίας της

H_{Θ} : Καθαρό θετικό ύψος αναρρόφησης ($NPSH_A$)



H_M : Μέση στατική πίεση στην πλευρά της αναρρόφησης

H_s : Πίεση ατμοποίησης

Για αντλία η οποία αναρροφά από δεξαμενή απόλυτης στατικής πίεσης H_E η τιμή του H_Θ εκφράζεται εφαρμόζοντας τη γενικευμένη εξίσωση του Bernoulli και από: την

$$H_\Theta = H_{se} - H_s = H_E - h_e - \zeta_e * Q^2 - H_s \quad (2.13)$$

Όπου:

h_e : $h_e = z_a - z_E$, συμβολίζεται το ύψος αναρρόφησης

$\zeta_e * Q^2$: οι υδραυλικές απώλειες της σωλήνωσης αναρρόφησης.

Από τις σχέσεις 2.12 & 2.13 είμαστε σε θέση να καταρτίσουμε τις συνθήκες εμφάνισης σπηλαίωσης, οι οποίες έχουν ως εξής:

-ασφαλής λειτουργία $H_\Theta > H_{κρ}$

-επισφαλής λειτουργία $H_\Theta \approx H_{κρ}$

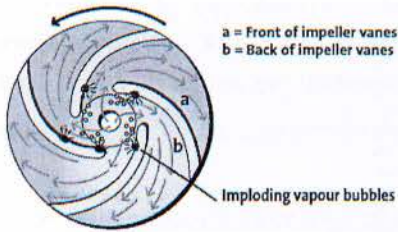
-μη ασφαλής λειτουργία $H_\Theta < H_{κρ}$

Από τις παραπάνω συνθήκες συμπεραίνουμε πως η εμφάνιση ή μη σπηλαίωσης εξαρτάται από

- καθαρό ύψος αναρρόφησης $NPSH_A$, μέγεθος το οποίο εξαρτάται από κυρίως από την αντλητική εγκατάσταση.
- κρίσιμο ύψος σπηλαίωσης $NPSH_R$, το οποίο χαρακτηρίζει την αντλία και το σημείο λειτουργίας της.

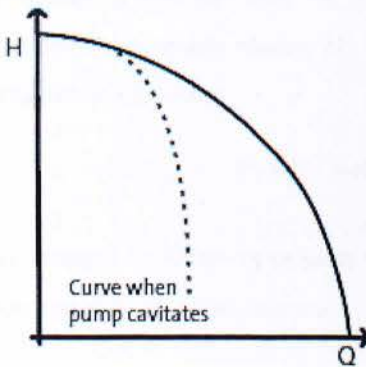


iv. Λειτουργία Αντλίας Με Σπηλαιώση και Κριτήριο Σπηλαιώσης



Εικόνα 2-29 Ανάπτυξη του φαινομένου της σπηλαιώσης

Στην πράξη η έναρξη πτώσης του βαθμού απόδοσης σε σχέση με την λειτουργία χωρίς σπηλαιώση μπορεί να θεωρηθεί ως ένδειξη έναρξης εμφάνισης σπηλαιώσης. Όμως επειδή το κριτήριο αυτό μπορεί να θεωρηθεί ως αυστηρό, το κριτήριο λειτουργίας με σπηλαιώση καθορίζεται ως το σημείο λειτουργίας στο οποίο η πτώση του ολικού ύψους δH , ως προς αυτό της λειτουργίας χωρίς σπηλαιώση είναι ίση με 3%. Στην εικ. 2-30



Εικόνα 2-30 Μεταβολή του ολικού ύψους κατά την εμφάνιση του φαινομένου σπηλαιώσης.

βλέπουμε την μεταβολή της χαρακτηριστικής καμπύλης λειτουργίας μιας αντλίας όταν σε αυτή εμφανίζεται το φαινόμενο της σπηλαιώσης.

v. Εργαστηριακός προσδιορισμός του κρίσιμου ύψους σπηλαιώσης

Ο εργαστηριακός προσδιορισμός του κρίσιμου ύψους σπηλαιώσης αντλίας γίνεται εφαρμόζοντας το κριτήριο της πτώσης του ολικού ύψους H κατά 3% ως προς αυτόν της λειτουργίας χωρίς σπηλαιώση. Συγκεκριμένα το κρίσιμο ύψος σπηλαιώσης, $NPSH_{required}$ είναι ίσο προς την τιμή του καθαρού θετικού ύψους αναρρόφησης, $NPSH_{available}$ κατά την λειτουργία η οποία καθορίστηκε



ως κριτήριο εμφάνισης σπηλαιώσης. Ο καθορισμός του $NPSH_{required}$ γίνεται για συγκεκριμένη κάθε φορά τιμή της διακινούμενης παροχής Q για την οποία προϋποτίθεται πως έχουμε ήδη προσδιορίσει το ολικό ύψος και τον ολικό βαθμό απόδοσης για λειτουργία χωρίς σπηλαιώση. Εργαστηριακά, η μείωση του $NPSH_{available}$ μπορεί να γίνει με τους εξής τρεις τρόπους:

- Μειώνοντας την πίεση H_E της δεξαμενής.
- Αυξάνοντας το ύψος αναρρόφησης.
- Αυξάνοντας τις υδραυλικές απώλειες.

Ο Πρώτος τρόπος είναι και ο πλέον αξιόπιστος. Η αντλία λειτουργεί σε κλειστό κύκλωμα και αναρροφά από κλειστή δεξαμενή με ελεύθερη επιφάνεια η στατική πίεση της οποίας ρυθμίζεται μέσω αντλίας κενού. Μείωση της στατικής πίεσης H_E , με σταθερούς τους άλλους όρους της παρακάτω εξίσωσης:

$$H_{\ominus} = H_{oe} - H_s = H_E - h_e - \zeta_e * Q^2 - H_s$$

Αντιστοιχεί σε ισόποση μείωση της τιμής του H_{\ominus} μέχρι την επίτευξη του κριτηρίου της σπηλαιώσης.



νί. Ο μηχανισμός της φθοράς από σπηλαιώση

Ο μηχανισμός της φθοράς του υλικού οφείλεται στην δομή το. Δεδομένου ότι όλα τα εν χρήσει υλικά αποτελούνται από κόκκους διαφόρων στοιχείων με διαφορετικά χαρακτηριστικά ως προς την σκληρότητα, ελαστικότητα αντοχή.



Εικόνα 2-31(α) Φθορά πτερωτής από σπηλαιώση

Για παράδειγμα το πλέον σύνηθες υλικό κατασκευής των πτερωτών απλών αντλιών είναι ο περλιτικός φαιός χυτοσίδηρος, αποτελείται από κόκκους περλίτη με κόκκους γραφίτη και φερρίτη. Οι κόκκοι του περλίτη είναι σκληροί και εύθραυστοι ενώ ο γραφίτης είναι μαλακός και πρακτικά χωρίς αντοχή.

Κατά την ανάπτυξη σπηλαιώσης και ιδιαίτερα στην περιοχή της επανυγροποίησης όπου αναπτύσσονται οι υψίσυχνες οι κόκκοι του γραφίτη καταστρέφονται, αποκολλούνται από τον ιστό του υλικού αφήνοντας την θέση



Εικόνα 2-31(α) Φθορά πτερωτής από σπηλαιώση

τους κενή. Έτσι οι κόκκοι του περλίτη χάνουν την καλή τους έδραση, η επιφάνεια του υλικού γίνεται λιγότερο λεία, γεγονός που επιταχύνει την ανάπτυξη της σπηλαιώσης, με αποτέλεσμα να απομακρύνονται σταδιακά οι κόκκοι του περλίτη. Μετά από

μακροχρόνια ανάπτυξη του φαινομένου στην επιφάνεια του

υλικού αναπτύσσονται τρύπες, που οφείλονται στην σταδιακή αφαίρεση των κόκκων, και η επιφάνεια αποκτά σπογγώδη μορφή, που μπορεί να φθάσει μέχρι την πλήρη εξαφάνιση μέρους του περιρρεόμενου στερεού (π.χ. του πτερυγίου της πτερωτής).



Από τα προηγούμενα γίνεται φανερό πως ένα υλικό είναι τόσο πιο ανθεκτικό στην φθορά από σπηλαίωση όσο η δομή του είναι ομοιόμορφη και ανθεκτική στην κόπωση και στην μηχανική διάβρωση. Συνήθως η αντοχή των υλικών σε σπηλαίωση, μετράται με την απώλεια μάζας όπως αυτή προκύπτει από ζύγισμα πλακιδίου που υπόκειται σε σπηλαίωση επί συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Εάν βαθμολογηθεί με δείκτη 1 ο κλασσικός χυτοσίδηρος GG-25 που εκφράζει την απώλεια μάζας λόγω σπηλαίωσης, τα υπόλοιπα συνήθη υλικά χαρακτηρίζονται από τους ακόλουθους δείκτες.

ΥΛΙΚΟ	ΔΕΙΚΤΗΣ
GG-25	1.0
ΧΥΤΟΧΑΛΥΒΑΣ GG-C25	0.8
ΟΡΕΙΧΑΛΚΟΣ G-CuSn10	0.5
ΧΡΩΜΙΟΥΧΟΣ ΧΥΤΟΧΑΛΥΒΑΣ G-X20Cr14	0.2
ΣΥΝΘΕΤΟΣ ΟΡΕΙΧΑΛΚΟΣ G-AlBz10Fe	0.1
ΧΡΩΜΟΝΙΚΕΛΙΟΥΧΟΣ ΧΑΛΥΒΑΣ G-X6CrNi18 9	0.05

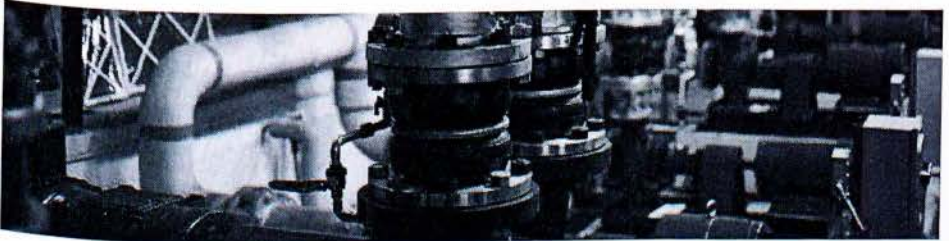


Σύμφωνα με τον προηγούμενο πίνακα ο ανοξειδωτος χρωμονικελιούχος χάλυβας είναι κατά 20 φορές πιο ανθεκτικός στην φθορά από σπηλαίωση από ότι ο χυτοσίδηρος.



Πρόλογος 3^{ου} Κεφαλαίου

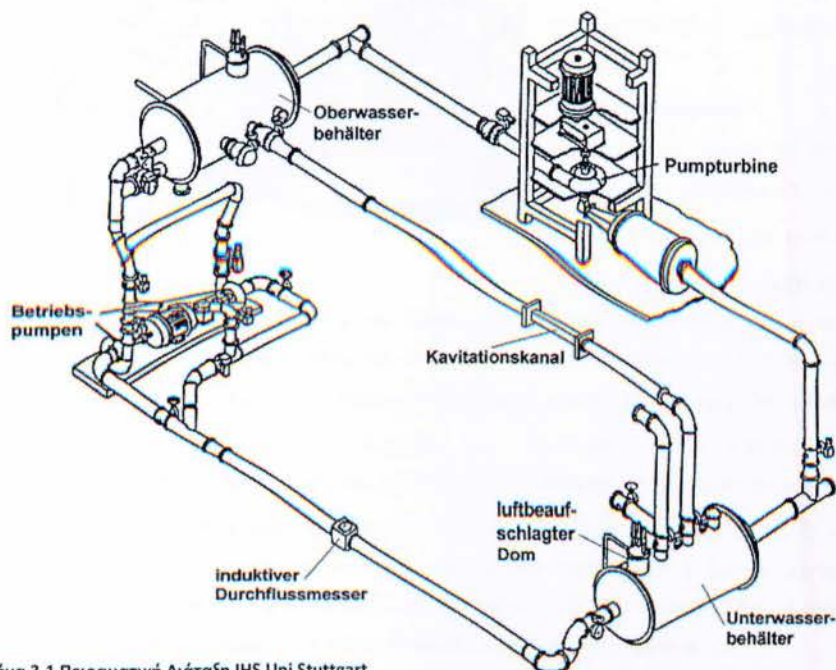
Στην προσπάθειά μας να σχεδιάσουμε μια σύγχρονη εγκατάσταση δοκιμής αντλιών (χάραξης χαρακτηριστικών καμπυλών) κρίνεται απαραίτητο να παραθέσουμε τα αποτελέσματα της έρευνας που διεξήγαμε σχετικά με παρόμοιες εγκαταστάσεις τόσο από τον κλάδο της εκπαίδευσης όσο και από τον βιομηχανικό τομέα. Σκοπός της έρευνας και της μελέτης παρόμοιων εγκαταστάσεων του "ανταγωνισμού" θα μας οδηγήσει στην επιλογή της βέλτιστης λύσης.





03-1 Εγκαταστάσεις Εκπαιδευτικών Ιδρυμάτων

i. *IHS-Universität Stuttgart Institute of fluid Mechanics and Hydraulic Machinery.*



Εικόνα 3-1 Πειραματική Διάταξη IHS Uni Stuttgart

Oberwasserbehälter: άνω δεξαμενή νερού

Betriebspumpen: προς δοκιμή αντλία

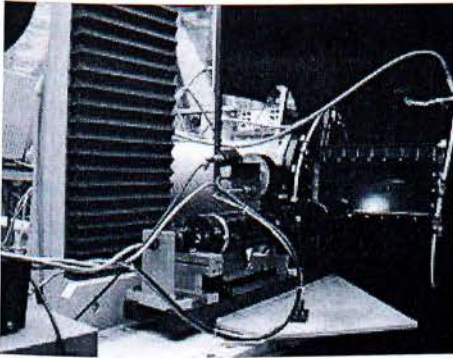
Induktiver Durchflussmesser: επαγωγικό ροόμετρο

Unterwasserbehälter: κάτω δεξαμενή νερού

Kavitationskanal: κανάλι παρακολούθησης φαινομένου σπηλαιώσης



Στην **εικ. 3-1** βλέπουμε την πειραματική διάταξη του εργαστηρίου Ρευστοδυναμικών μηχανών του Πανεπιστημίου της Στουτγάρδης. Έχουμε να κάνουμε με μία διάταξη κλειστού κυκλώματος **-closed loop test rig-**. Η



Εικόνα 3-2 Συσκευή LDA

παραπάνω διάταξη δεν είναι μια διάταξη μόνο για δοκιμές φυγοκεντρικών αντλιών αλλά επιπλέον στην ίδια διάταξη με τις κατάλληλες ρυθμίσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν και πειράματα προσομοίωσης λειτουργίας Υδροστροβίλων.

Οι πειραματικές μετρήσεις λαμβάνονται με πληθώρα

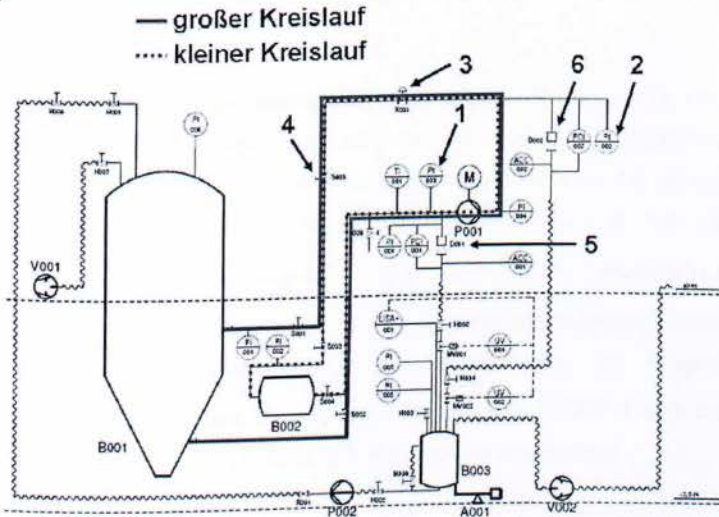
διατάξεων. Η ροή μετράται με **ηλεκτρομαγνητικά ροόμετρα**, τα οποία βαθμονομούνται στις πρότυπες εγκαταστάσεις βαθμονόμησης (εντός του εργαστηρίου). Επιπλέον υπάρχουν και **ροόμετρα υπερήχων** τα οποία βασίζονται στην αρχή λειτουργίας του πλωτήρα, καθώς επίσης και **ακροφύσια Venturi**. Για την **μέτρηση της πίεσης** υπάρχουν διαφόρων ειδών μετατροπείς πίεσης οι οποίοι λειτουργούν βάσει της λήψης ενδείξεων μέσω **πιεζοηλεκτρικών συστημάτων (piezo-resistive)** ή με τη χρήση **strain gauges**. Η ταχύτητα μετράται με οπτικές μεθόδους **laser LDA (Laser Doppler Anemometry)** ή **PDA (Particle Image Velocimetry)**.



ii. Technische Universität Darmstadt Fluid System Technik

Το εργαστήριο Ρευστοδυναμικών Μηχανών του Πολυτεχνείου του Darmstadt έχει αναπτύξει μια αξιοσημείωτη πρότυπη πειραματική εγκατάσταση μελέτης του φαινομένου της σπηλαίωσης ρευστοδυναμικών μηχανών. **Σκοπός** της εγκατάστασης αυτής είναι να διερευνήσει την συμπεριφορά των ρευστοδυναμικών μηχανών κατά την λειτουργία αυτών σε ένα κύκλωμα και φυσικά την εύρεση του πλέον οικονομικού σημείου λειτουργίας του. Στην προσπάθεια αυτή λαμβάνονται υπόψη οι εξής παράμετροι:

- η επίδραση των εξωγενών παραμέτρων κατά τη διεξαγωγή του πειράματος.
- Το πως αυτοί επηρεάζουν τα αποτελέσματα
- Τις απαραίτητες μετρήσεις για να ελαχιστοποιήσουμε την στρέβλωση των αποτελεσμάτων.
-

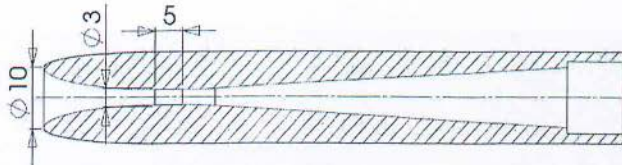


11
Εικόνα 3-3 Πειραματική διάταξη Πολυτεχνείου Darmstadt



1. Θέση μέτρησης της πίεσης αναρρόφησης της αντλίας
2. Θέση μέτρησης της πίεσης κατάθλιψης της αντλίας.
3. Πνευματική βάννα δικοπής.
4. Χειροκίνητη βάννα.
5. Θέση ακροφυσίου μέτρησης πίεσης στην πλευρά της αναρρόφησης.
6. Θέση ακροφυσίου μέτρησης πίεσης στην πλευρά της κατάθλιψης.

Η πειραματική εγκατάσταση αποτελείται από δύο διαφορετικές Σωληνογραμμές κλειστού κυκλώματος, μια μικρή (kleiner Kreislauf) και μια μεγαλύτερη (großer Kreislauf). Η μέτρηση της πίεσης πραγματοποιείται από ένα ακροφύσιο τύπου Venturi, του οποίου τα κατασκευαστικά στοιχεία φαίνονται στην **Εικ. 3-2**. Το ακροφύσιο είναι τοποθετημένο εντός του αγωγού, όπως ακριβώς αναφέρεται και στο εγχειρίδιο "in situ Düse".



Εικόνα 3-2: ακροφύσιο λήψης μετρήσεων

Η **διαδικασία του πειράματος** περιλαμβάνει παρατηρήσεις κατά τη απαρχή του φαινομένου της σπηλαίωσης, αλλά και εξειδικευμένες παρατηρήσεις της εξέλιξης αυτού κατά τη λειτουργία της προς δοκιμή αντλίας. Η έναρξη του φαινομένου της σπηλαίωσης διαπιστώνεται δια οπτικής παρατήρησης και εν συνεχεία η τιμή του $NPSHR_i$ υπολογίζεται Σε περίπτωση όπου διαπιστώσουμε (μέσω οπτικής παρατήρησης) ανάπτυξη σπηλαίωση σε διαφορετικές ζώνες της πτερωτής με διαφορετικά χαρακτηριστικά η καθεμία υπολογίζουμε τη τιμή του $NPSH$. Παράμετροι οι οποίες λαμβάνονται υπόψη κατά τη διαδικασία του πειράματος:

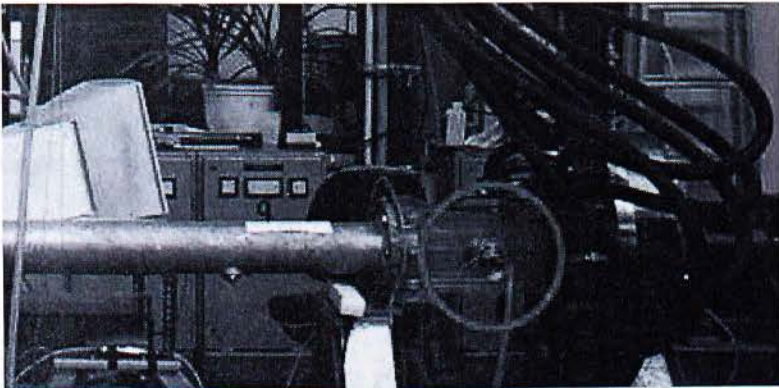
- Ο λόγος των παροχών $\frac{Q}{Q_{opt}}$
- Το ποσοστό περιεχόμενου αέρα στο νερό (διαλυμένο και μη).
- Το ποσοστό βακτηριδίων στο νερό.
- Χρόνος κύκλου.



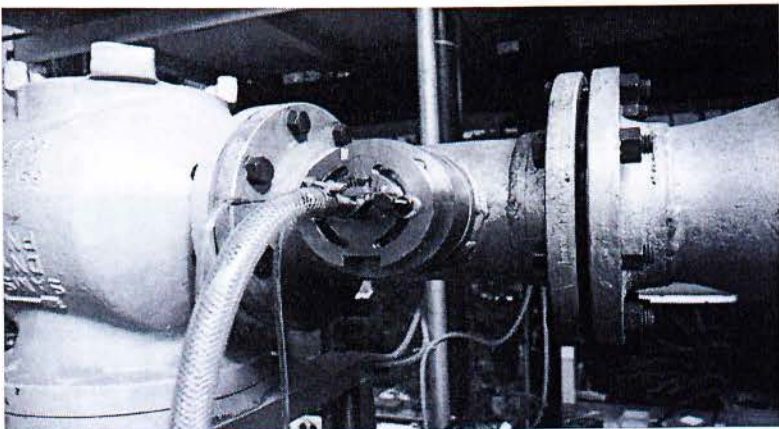
Παρακάτω βλέπουμε ορισμένα στοιχεία λήψης μετρήσεων στη πειραματική διάταξη.



Εικόνα 3-3 Ακροφύσιο Μέτρησης Πίεσης Αναρρόφησης Εντός Αγωγού



Εικόνα 3-6 Ακροφύσιο Μέτρησης Πίεσης Κατάθλιψης Εντός του Αγωγού

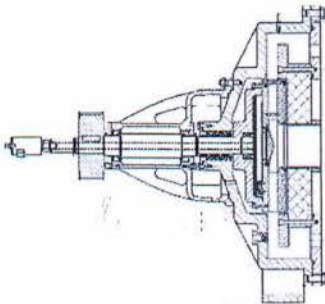


Εικόνα 3-7 Μέτρηση Πίεσης Αναρρόφησης με Ακροφύσιο Εντός του Αγωγού
(In-situ-düse Εικ.5)



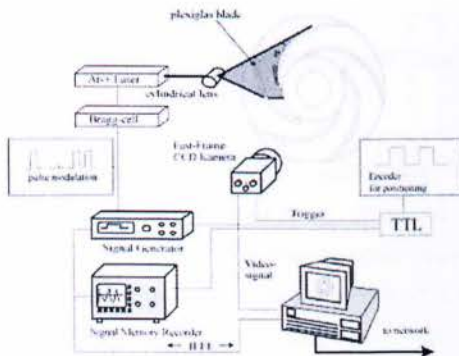
i. Technische Universität Darmstadt (TUD) Laboratory für Turbomachinery and fluid Power & Laboratoire des Ecoulements Geophysiques et Industriels de Grenoble (LEGI)

Στα πλαίσια του ευρωπαϊκού προγράμματος **PROCOPE** τα δύο εργαστήρια **TUDTMFP** και **LEGI** ανέπτυξαν μία πειραματική διαδικασία η



Εικόνα 3-8 Ιδιοκατασκευή Πειραματικής Αντλίας με Κέλυφος Plexiglas

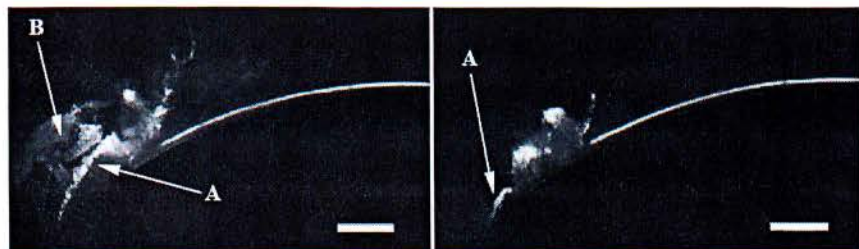
οποία περιλαμβάνει τόσο οπτική παρακολούθηση του φαινομένου της σπηλαίωσης φυγοκεντρικών αντλιών όσο και μαθηματικές μεθόδους προσδιορισμού αυτής. Η προς δοκιμή αντλία τοποθετήθηκε σε κλειστό κύκλωμα και διασφαλίστηκε οπτική επαφή με κέλυφος κατασκευασμένο από διάφανο Plexiglas (**ΕΙΚ. 3-8**). Οπτικοποίηση των πειραματικών αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε με την χρήση στρομψοσκοπικής συσκευής (**ΕΙΚ.3-9**).



Εικόνα 3-9 Στρομψοσκοπική Συσκευή



Εικόνα 3-10 Ασταθής κατάσταση στην πλευρά της αναρρόφησης. NPSH=8m



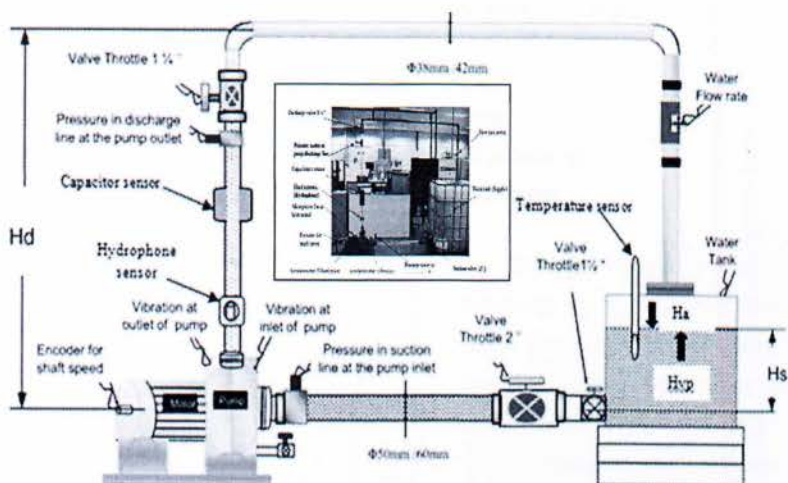
Εικόνα 3-11 Ασταθής κατάσταση στην πλευρά της πίεσης σε δύο διαφορετικούς χρόνους
 $NPSH=7m$

iv. *University of Huddersfield*

Ερευνητές του πανεπιστημίου *Huddersfield* θέλοντας να προσεγγίσουν το φαινόμενο της σπηλαιώσης σε φυγοκεντρικές αντλίας στάθηκαν σε μια διαφορετική οπτική γωνία. Διεξήγαγαν μετρήσεις της στάθμης ήχου και εντόπισαν πως ο θόρυβος κατά την διάρκεια του φαινομένου της σπηλαιώσης είναι καθαρά ευκρινής σε κάθε ανάλυση της στάθμης ήχου που πραγματοποίησαν.

Η ανάλυση από την οπτική γωνία των ερευνητών του πανεπιστημίου *Huddersfield* έχει ως εξής:

Μια φυγοκεντρική αντλία αποτελείται από δύο κύρια τμήματα: Τα περιστρεφόμενα μέρη (άξονας, πτερωτή) και τα σταθερά μέρη (κέλυφος, στάτης). Κατά την λειτουργία μιας φυγοκεντρικής αντλίας παράγονται δονήσεις και ήχοι οι οποίοι οφείλονται στην καθεαυτού λειτουργία της αντλίας (περιστρεφόμενα μέρη, ήχος του διακινούμενου υγρού). Παρόλαταυτα στρεβλώσεις στον “συνήθη” ήχο και δονήσεις των αντλιών προκαλούνται από μη ζυγοσταθμισμένες μάζες, φαινόμενο το οποίο παρατηρείτε κατά την λειτουργία με σπηλαιώση. Βασιζόμενοι σε αυτό το φυσικό φαινόμενο οι ερευνητές σχεδίασαν και βαθμονόμησαν την πειραματική διάταξη της εικόνας 3-12.



Εικόνα 3-12 Πειραματική διάταξη University of Huddersfield

Πειραματική διαδικασία:

Για τον προσδιορισμό του φαινομένου της σπηλαιώσης κατασκευάστηκε ένα κλειστό σύστημα δοκιμής, περιλαμβάνοντας τα εξής

- i. Φυγοκεντρική αντλία
- ii. Δεξαμενή νερού
- iii. Αγωγός αναρρόφησης
- iv. Αγωγός κατάθλιψης

Η αντλία είναι μονοβάθμια φυγοκεντρική με κλειστού τύπου πτερωτή και χαρακτηριστικά μεγέθη λειτουργίας:

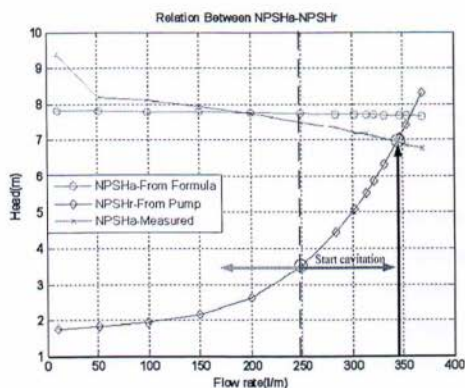
$$Q = 30 \text{ m}^3/\text{hr}, H = 55 \text{ m}, P = 4 \text{ kW}, n = 2950 \text{ rpm}.$$

Για την επίτευξη της προσομοίωσης λειτουργίας υπό διαφορετικές συνθήκες έχουν εγκατασταθεί βάνες στραγγαλισμού, τόσο στην πλευρά της αναρρόφησης όσο και στην πλευρά της κατάθλιψης. Για την παρατήρηση της ανάπτυξης του φαινομένου της σπηλαιώσης, έχει εγκατασταθεί ένας διαφανής αγωγός στον αγωγό της αναρρόφησης.



Η καταγραφή των πειραματικών μεγεθών της αντλίας γίνεται με:

- Συσκευή μέτρησης γωνιακής ταχύτητας του Η/Κ
- Παροχόμετρο στην πλευρά της κατάθλιψης
- Αισθητήρας πίεσης στην πλευρά της αναρρόφησης
- Αισθητήρας πίεσης στην πλευρά της κατάθλιψης



Εικόνα 3-13 Χαρακτηριστική $NPSH_A$ & $NPSH_R$

Η δοκιμή πραγματοποιείται σύμφωνα με το πρότυπο ISO 3555. Θεωρείται αρχική θέση της πειραματικής διαδικασίας η βάνα κατάθλιψης σε θέση 100% (πλήρως ανοικτή) και στροφές του κινητήρα 2950rpm. Συνεχίζουμε την διαδικασία στραγγαλίζοντας την βάνα. Από την εικόνα 3-13 βλέπουμε πως αρχίζει να εμφανίζεται σπηλαιώση για παροχή $Q = 249 \text{ l/min}$. Κατά την

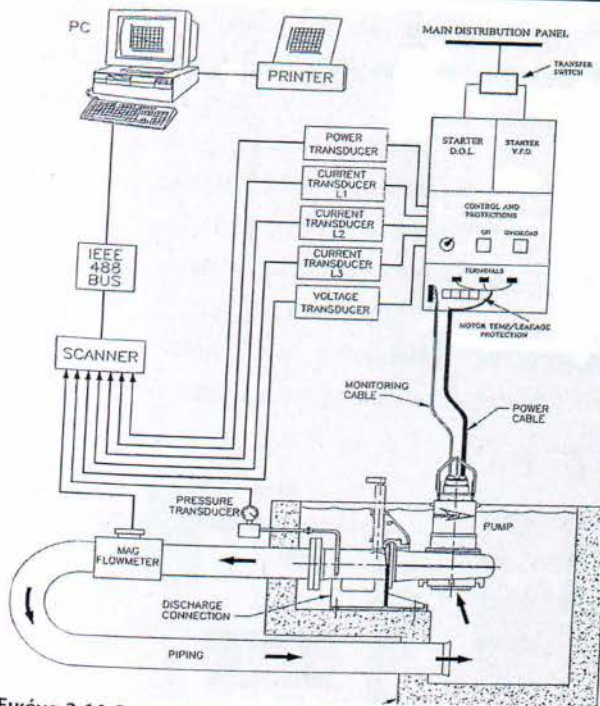
διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας βρέθηκε πως τόσο οι κραδασμοί όσο η στάθμη ήχου εμφανίζουν σημαντικές μεταβολές για παροχή $Q = 249 \text{ l/min}$ και μεγαλύτερη.



03-2 Εργαστηριακές Εγκαταστάσεις Βιομηχανικών Μονάδων

i. ITT FCDN LARGE SUBMERSIBLE PUMP TEST FACILITY FLYGT-ITT INDUSTRIES

Η επόμενη πειραματική εγκατάσταση που θα παρουσιάσουμε είναι της φήμης βιομηχανίας αντλιών Flygt (<http://www.ittwww.com/>). Το paper το οποίο θα παρουσιάσουμε αναφέρεται σε **δοκιμαστική εγκατάσταση υποβρυχίων αντλιών μεγάλης κλίμακας**. Σκοπός της αναφοράς αυτής είναι να **παρουσιάσουμε το σύστημα** συλλογής δεδομένων (**Data Acquisition System-DAQ**). Για τον λόγο αυτό δεν θα αναφερθούμε καθόλου στη κατασκευαστική δομή του αντλιοστασίου παρά μόνο στην δομή του συστήματος DAQ. Στην **εικ.3-14** βλέπουμε το μονογραμμικό διάγραμμα σύνδεσης των επιμέρους στοιχείων τα οποία μας επιτρέπουν να οπτικοποιήσουμε και να αποθηκευτούν τα δεδομένα κατά τη δοκιμή μιας αντλίας. Οι αισθητήρες τροφοδοτούν με σήματα 4mA έως 20mA έναν Αναλογικό/Ψηφιακό (Α/Ψ) μετατροπέα Pnuma 5000, ο οποίος είναι εξοπλισμένος με σύνδεσμο IEEE για εύκολη επικοινωνία αυτού και με άλλα περιφερειακά. Τα δεδομένα από τους αισθητήρες επεξεργάζονται χρησιμοποιώντας ένα «κλειστό λογισμικό» (customized) της ITT, το CAPT-CAS. Το συγκεκριμένο λογισμικό εξάγει απευθείας τις χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας της αντλίας κάνοντας χρήση του plotter το οποίο είναι συνδεδεμένο στην εγκατάσταση. Στην εικόνα 13 βλέπουμε μια γενική παρουσίαση της αρχιτεκτονικής του συστήματος Computer Aided Pump testing (CAPT)



Εικόνα 3-14 Computer Aided Pump Testing (CAPT)

Οι μετρήσεις παροχής και πίεσης πραγματοποιούνται με χρήση μαγνητικού παροχόμετρου και ακρίβειας $\pm 0,5\%$ και πιεζοστατικών αισθητήρων πίεσης ακρίβειας $\pm 0,25\%$. Ιδιαίτερη σημασία πρέπει να δώσουμε στη διαδικασία βαθμονόμησης των οργάνων μέτρησης η οποία γίνεται βάσει των προτύπων του οργανισμού **National Institute of Standards and Technology** βάσει του φύλλου **MIL-STD 45662a**.

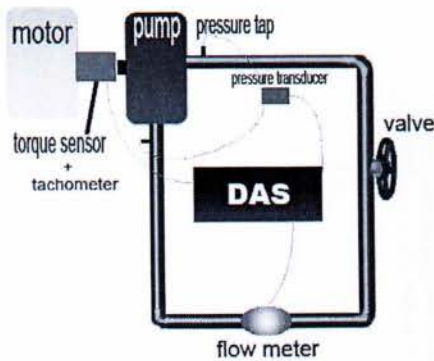
ii. Yeomans Chicago Co

Η συγκεκριμένη εταιρεία κατασκευάζει αντλίες τόσο για τον βιομηχανικό τομέα, όσο και για εγκαταστάσεις δικτύου αποχέτευσης. Θέλοντας να τηρήσει τις δεσμεύσεις ποιότητας έναντι στο απαιτητικό πελατολόγιο, με το οποίο συνεργάζεται, έχει αναπτύξει στις εγκαταστάσεις της δοκιμαστήριο στο οποίο δοκιμάζεται κάθε αντλία πριν αυτή παραδοθεί στον πελάτη. Η απόδοση της αντλίας αναλύεται από την γραφική παράσταση $H = f(Q)$, $H = f(P)$, $H = f(\eta)$. Τα δεδομένα συλλέγονται μέσω συστήματος **Data Acquisition System (DAS)** το οποίο αλληλεπιδρά με



πλήθος αισθητήρων, οι οποίοι συλλέγουν τα δεδομένα λειτουργίας της αντλίας. Το σύστημα συλλογής δεδομένων (όπως αυτό φαίνεται στην **εικ. 3-15** περιλαμβάνει

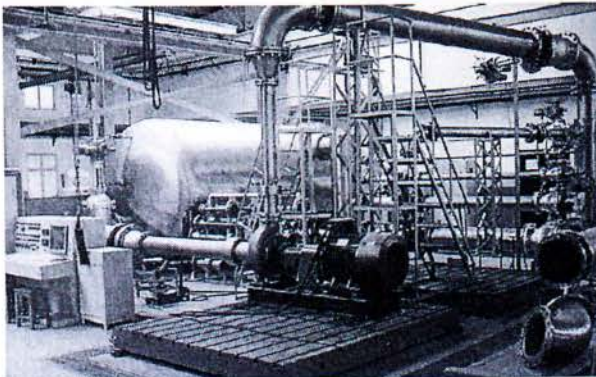
- i. Μετρητή ροπής (στον Η/Κ)
- ii. Μετρητή ταχύτητας (στον Η/Κ)
- iii. Αισθητήρες πίεσης στην είσοδο και στην έξοδο της αντλίας
- iv. Παροχόμετρο
- v. Βάνα (για αυξομείωση της παροχής και προσομοίωση διαφόρων καταστάσεων λειτουργίας)



Τα δεδομένα συλλέγονται μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή, και εκτυπώνονται σε γραφική παράσταση, **αντίγραφο** της οποίας λαμβάνει και ο πελάτης.

Εικόνα 3-15 Σύστημα DAS της Yeomans Chicago Co

iii. PWT Pumps



Στο ίδιο μήκος κύματος βρίσκονται και οι δοκιμαστικές εγκαταστάσεις της εταιρείας κατασκευής αντλιών Pentair Water.

Εικόνα 3-16 Δοκιμαστικές Εγκαταστάσεις Pentair Water

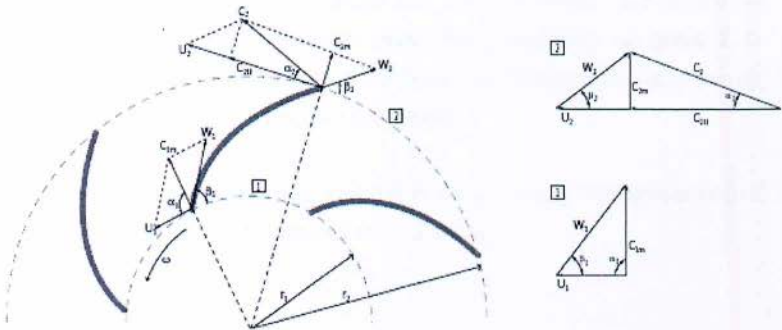


Η εν λόγω εταιρεία δοκιμάζει κάθε παραγόμενη αντλία θέλοντας να διασφαλίσει την άριστη υδραυλική της απόδοση. Οι δοκιμές πραγματοποιούνται βάση του προτύπου **ISO-9906**. Αξίζει να σημειωθεί από την **εικ. 3-16** το πλήθος των **αγωγών διαφορετικών διαμέτρων** οι οποίοι είναι σε αναμονή και προσαρμόζονται ανάλογα με την προς δοκιμή αντλία.



Πρόλογος 4^{ου} Κεφαλαίου

Στο 4^ο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας θα αναλύσουμε τον σχεδιασμό ενός πρότυπου αντλιοστασίου. Βάση για το σχεδιασμό της δικής μας πρότυπης εγκατάστασης θα αποτελέσει το διεθνές πρότυπο **BS EN ISO 9906:1999 Rotodynamic pumps-Hydraulic performance acceptance tests (Grades 1 and 2)**





4-1 Σκοπός του Προτύπου BS EN ISO 9906:1999

Το πρότυπο περιγράφει - συγκεκριμενοποιεί τη μεθοδολογία η οποία θα πρέπει να ακολουθηθεί ούτως ώστε οι προς δοκιμή ρευστοδυναμικές μηχανές (φυγοκεντρικές, μικτής ροής και αξονικές, οι οποίες εφεξής θα αναφέρονται ως αντλίες) να εξάγουν αποτελέσματα **αποδεκτά** και **εγκεκριμένα** από τους φορείς της αγοράς. Δε λαμβάνουμε υπόψη ούτε τις κατασκευαστικές λεπτομέρειες της αντλίας ούτε τις μηχανικές ιδιότητες των εξαρτημάτων τους.

Το διεθνές αυτό πρότυπο περιέχει δύο τάξεις ακρίβειας των μετρήσεων **grade 1** (αναφέρεται σε μετρήσεις μεγαλύτερης ακρίβειας) και **grade 2**. Οι δύο αυτές βαθμίδες ακρίβειας, αναφέρονται σε διαφορετικές τιμές ανοχής σφαλμάτων και αβεβαιότητας των μετρήσεων.

Για αντλίες ισχύος μικρότερης των 10kW και οι οποίες παράγονται μαζικά, ισχύει το παράρτημα A (**Annex A**) του παρόντος.



4-2 Όροι Ορισμοί και Συμβολισμοί (§ 3)

Μέγεθος		Ορισμός	Μαθηματική Σχέση	Παρατηρήσεις
3.1	γωνιακή ταχύτητα	αριθμός περιστροφών στη μονάδα του χρόνου	$\omega = 2 \times \pi \times \nu$	
3.2	ταχύτητα περιστροφής	Αριθμός περιστροφών στην μονάδα του χρόνου		
3.3	πυκνότητα	μάζα ανά μονάδα όγκου		
3.4	Πίεση	δύναμη ανά μονάδα επιφανείας		Στο παρόν πρότυπο όλες οι τιμές των πιέσεων μετρώνται αναφορικά με την ατμοσφαιρική πίεση (δεν είναι απόλυτες τιμές). Εκτός από την ατμοσφαιρική πίεση και την πίεση ατμών οι οποίες είναι απόλυτες τιμές .
3.5	Ισχύς	η ενέργεια ανά μονάδα χρόνου		
3.6	αριθμός Reynolds		$Re = \frac{U \times D}{\nu}$	
3.7	ροή μάζας	Εξωτερική ροή μάζας, δηλαδή η ποσότητα του ρευστού η οποία εκτοπίζεται-από τον αγωγό κατάθλιψης της αντλίας.	$\frac{U^2}{2g}$	
3.8	Παροχή όγκου		$Q = \frac{q}{p}$	
3.9	μέση ταχύτητα	ο λόγος της παροχής προς την επιφάνεια του τμήματος της σωλήνωσης		



§	Μέγεθος	Ορισμός	Μαθηματική Σχέση	Παρατηρήσεις
3.17	Μανομετρικό εισαγωγής	Η πίεση στην έξοδο της αντλίας	$H_1 = z_1 + \frac{P_1}{\rho \times g}$	
3.18	Μανομετρικό εξαγωγής	Η πίεση στην είσοδο της αντλίας	$H_2 = z_2 + \frac{P_2}{\rho \times g}$	
3.19	Συνολικό μανομετρικό	Η αλγεβρική διαφορά $H = H_1 - H_2$	$H = z_2 - z_1 + \frac{P_2 - P_1}{\rho g}$	Υπολογίζεται από την συγκεκριμένη μαθηματική σχέση.
3.20	Ειδική Ενέργεια Ρευστού	Η ενέργεια ανά μονάδα μάζας	$y = g * H$	
3.21	Υδραυλικές Απώλειες στην Είσοδο			Η διαφορά μεταξύ του συνολικού μανομετρικού ύψους του ρευστού στο σημείο μέτρησης και του συνολικού μανομετρικού ύψους του ρευστού στο σημείο <u>εισόδου</u> της αντλίας.
3.22	Υδραυλικές Απώλειες στην έξοδο της αντλίας			Η διαφορά μεταξύ του συνολικού μανομετρικού ύψους του ρευστού στο σημείο μέτρησης και του συνολικού μανομετρικού ύψους του ρευστού στο σημείο <u>εξόδου</u> της αντλίας
3.23	Απώλειες τριβής στις σωληνώσεις	Οι Υδραυλικές απώλειες της σωληνογραμμής		
3.24	Καθαρό ύψος αναρρόφησης	$NPSH$	$NPSH = H_1 - z_1 + \dots$	(Net Positive suction head- NPSH)
3.25				
3.26				
3.27	Διαθέσιμο NPSH			Η τιμή του $NPSH_{available}$ καθορίζεται από τις συνθήκες ροής-παροχής



Μέγεθος		Ορισμός	Μαθηματική Σχέση	Παρατηρήσεις
3.28	Απαιτούμενο NPSHrequired	$NPSH_R$		Η ελάχιστη τιμή του NPSH η οποία απαιτείται ώστε να επιτευχθεί η ελάχιστη απόδοση της αντλίας υπό συνθήκες οι οποίες υποδεικνύονται από τον κατασκευαστή
3.29	NPSH3			
3.30	Type number	Αδιάστατο μέγεθος το οποίο υπολογίζεται στο σημείο βέλτιστης λειτουργίας	$K = \frac{2\pi Q^2}{(gH)^3} =$	
3.31	Προσδιδόμενη ενέργεια στην αντλία			Η ενέργεια η οποία προσδίδεται στην αντλία μέσω του Η/Κ ή οιασδήποτε άλλης μορφής κίνησης (π.χ. ΜΕΚ)
3.32	Προσδιδόμενη ενέργεια από την αντλία		$P_u = \rho Q g H$	Η ενέργεια η οποία προσδίδεται από την αντλία στο διακινούμενο ρευστό.
3.33	Απώλειες Η/Κ			
3.34	Βαθμός απόδοσης αντλίας		$\eta = \frac{P_u}{P}$	Η προσδιδόμενη ενέργεια από την αντλία στο ρευστό προς την προσδιδόμενη ενέργεια στην αντλία
3.35	Συνολικός βαθμός απόδοσης		$\eta = \frac{P_u}{P}$	



4-3 ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

ι. Αντικείμενο των Πειραμάτων

Εάν δεν έχει επιτευχθεί ως άλλη συμφωνία μεταξύ του κατασκευαστή /προμηθευτή και του αγοραστή, κατά τη διεξαγωγή του πειράματος τα κάτωθι πρέπει να εφαρμοστούν:

- Διεξαγωγής του πειράματος με ακρίβεια κατά grade 2
- Οι δοκιμές θα πρέπει να πραγματοποιηθούν σε πειραματική διάταξη η οποία θα βρίσκεται στον χώρο του κατασκευαστή.
- Η δοκιμή NPSH δε συμπεριλαμβάνεται.

Οποιοσδήποτε αποκλίσεις από την ως άνω διαδικασία θα πρέπει να συμφωνηθεί ρητά από τα δύο μέρη (κατασκευαστή/προμηθευτή και αγοραστή).

Οι αποκλίσεις οι οποίες είναι δυνατόν να λάβουν χώρα είναι οι:

- Διεξαγωγή του πειράματος με ακρίβεια κατά grade 2
- Μη αρνητικές τιμές ανοχής των μετρήσεων.
- Στατιστική αξιολόγηση των μετρήσεων σύμφωνα με το παράρτημα Annex I
- Δοκιμή σε ουδέτερο χώρο ή σε στο εργοτάξιο (χώρος εγκατάστασης της αντλίας)
- Αποκλίσεις από τις προδιαγραφές σχετικά με την εγκατάσταση της αντλίας και τις συσκευές μέτρησης.
- Απαιτήση για μέτρηση του NPSH.

Στο παράρτημα K (Annex K) μπορούμε να επιλέξουμε μια λίστα πραγμάτων με τα οποία έχουμε τη δυνατότητα να προσαρμόσουμε την δοκιμή μας στις απαιτήσεις μας.



ii. Συμπληρωματικές Δοκιμές-Επίτευξη Εγγυημένων Αποτελεσμάτων.

Οι δοκιμές στοχεύουν στο να διαπιστώσουμε την απόδοση των αντλιών και να τη συγκρίνουμε με την απόδοση την οποία μας εγγυάται ο κατασκευαστής/προμηθευτής. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής μπορούμε επίσης να παρατηρήσουμε και την εν γένει λειτουργία της αντλίας, σχετικά με τη θερμοκρασία των παρεμβυσμάτων των εδράνων τις διαρροές νερού και αέρα, καθώς επίσης και του ελέγχου των κραδασμών και του ελέγχου της στάθμης εκπομπής θορύβου. Προς την κατεύθυνση αυτή μελετάται η έκδοση του πρότυπου δοκιμών ISO/TC 115.

4.4 Διεξαγωγή του Test

i. Διεξαγωγή Του Test στον τόπο εγκατάστασης (site test).

Για τη διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας στον τόπο εγκατάστασης απαιτείται ειδική συμφωνία μεταξύ των δύο μερών (προμηθευτής/κατασκευαστής-αγοραστής) η οποία ικανοποιεί όλες τις απαιτήσεις του προτύπου. Είναι όμως παραδεκτό, πως στα περισσότερα αντλιοστάσια οι συνθήκες λειτουργίας των αντλιών, αποκλίνουν από αυτές που περιγράφονται στο πρότυπο. Σε αυτές τις περιπτώσεις μπορεί να συμφωνηθεί από τις δύο πλευρές, το μέγεθος της ανοχής των αποτελεσμάτων το οποίο αναπόφευκτα θα υπάρχει.

ii. Πρόγραμμα Διεξαγωγής του Test

Οι διαδικασίες οι οποίες θα ακολουθηθούν κατά τη διεξαγωγή του πειράματος προετοιμάζονται από τον υπεύθυνο του πειράματος και υποβάλλονται αρκετό χρονικό διάστημα πριν το πείραμα στους δύο φορείς, με σκοπό αυτοί να μελετήσουν την διαδικασία και να συμφωνήσουν με αυτή.



iii Εξοπλισμός του Test

Εφόσον συμφωνηθεί η διαδικασία διεξαγωγής του πειράματος, πρέπει να συμφωνηθούν και οι συσκευές μέτρησης και καταγραφής των μετρούμενων μεγεθών.

Υπεύθυνος για τον έλεγχο, και την ορθή εγκατάσταση των μετρητικών και καταγραφικών συσκευών είναι ο επιβλέπων του πειράματος. Το σύνολο των μετρητικών συσκευών θα πρέπει να συνοδεύονται από αναφορές (reports) σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα **IEC & ISO** και φυσικά να είναι σύμφωνα με τις απαιτήσεις του παρόντος προτύπου (**ISO 9906**).

iv. Αναφορά της Δοκιμής (Test Report).

Υπόδειγμα της αναφοράς η οποία πρέπει να εκδοθεί μετά το πέρας του πειράματος βλέπουμε παρακάτω (**εικ.4.1**):



Annex J (informative)

Pump test sheet

The pump test sheet illustrated in this annex is given for guidance for presenting pump test results and to assist in their interpretation. It does not purport to include all the information required from a pump test and modifications may be necessary depending on the type of pump, its application, and the mode of calculation.

PUMP TEST SHEET			Sheet Number			Nature of test					
Purchaser		Type			Manufacturer's order number			Order number		Inlet diameter	
Pump		Rate of flow (Q_{12})			Speed of rotation (n_{sp})			Power input (P_{12})		Outlet diameter	
Guaranteed values		Total head (H_G)			Efficiency (η_G)			Net positive suction head (NPSH)		Impeller diameter	
Pumped liquid		Temperature (t)			Vapour pressure (p_v)			Kinematic viscosity (ν)		Degree of acidity (pH)	
Motor		Density (ρ)			Test certificate			Number of phases		Voltage	
		Type			Power			Speed of rotation		Current	
Measuring method		Method used			Rate of flow			Inlet head		Outlet head	
		Constant			(NPSH)			Torque		Power	
Test conditions		Ambient temperature			Barometric pressure			Head correction to reference plane		Inlet	
		Temperature of test liquid								Outlet	
Result of measurement		Speed of rotation			Units			1		2	
		Time interval						3		4	
Rate of flow		Reading						5		6	
		Measured flow						7		8	
		Outlet head reading						9		10	
		Inlet head reading						11			
		Outlet head									
		Inlet head									
Head		$\Delta U \cdot 2/g$									
		Difference of measuring position									
		Pump total head									
		$U_1^2/2g$									
		(NPSH)									
		Pump power output P_u									
		Voltage									
		Current									
		Wattmeter reading 1									
		Wattmeter reading 2									
		Total of wattmeter readings									
Power (torque)		Motor power input									
		Motor efficiency									
		Torque reading									
		Gear efficiency									
		Motor power output									
		Pump power input									
		Overall efficiency									
		Pump efficiency									
Values referred to specified speed of rotation		Volume rate of flow									
		Total head									
		Power									
		NPSH									
NOTES				Date		Chief of tests			Representatives		
									of the purchaser		of the supplier

Εικόνα 4-1 Πρότυπη φόρμα αναφοράς δοκιμής αντλίας κατά ISO 9906



4-5 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

i. Πρότυπες Διατάξεις και Μέθοδοι του test

Οι βέλτιστες συνθήκες λήψης μετρήσεων επιτυγχάνονται όταν η ροή πληροί τις ακόλουθες παραδοχές:

- Αξονική και συμμετρική κατανομή της ταχύτητας.
- Ομοιόμορφη τιμή της στατικής πίεσης.
- Ροή χωρίς στροβιλισμούς προκαλούμενοι από σφάλματα κατά την εγκατάσταση.
- Για να αποφευχθεί η πολύ μικρή διανομή ταχύτητας ή για να αποφευχθούν οι στοβιλισμοί κατά μήκος της σωλήνωσης θα πρέπει να αποφύγουμε καμπύλες της σωληνωγραμμής μας ή οιαδήποτε μορφή ασυνέχειας αυτής σε μήκος λιγότερο των $4 \times D$ από το σημείο λήψης μετρήσεων.
- Πρέπει να λάβουμε υπόψη το συντελεστή K , όπου K είναι χαρακτηριστικό μέγεθος της αντλίας και μας προσδιορίζει το κατά πόσο ομαλή και απελευθερωμένη από στροβιλισμούς είναι η ροή στην είσοδο της αντλίας. Σε περίπτωση όπου ο συντελεστής $K \geq 1,2$ θα πρέπει να προσομοιώνουμε την πειραματική λειτουργία της αντλίας με αυτή της πραγματικής εγκατάστασης.
- Σε περιπτώσεις κατά τις οποίες η τροφοδοσία νερού του κυκλώματος γίνεται από δεξαμενή ελεύθερης επιφανείας ή από ακίνητη δεξαμενή, το ευθύγραμμο μήκος του αγωγού αναρρόφησης θα πρέπει να ισούται με :

$$L/D = K + 5$$

όπου D είναι η διάμετρος του αγωγού αναρρόφησης.



ΑΠΟΦΥΓΗ ΣΤΡΟΒΙΛΙΣΜΩΝ

- Προσεκτικός σχεδιασμός του αγωγού αναρρόφησης
- Συνετή χρήση τυχόν εξομαλυντικών ροής¹
- Κατασκευή των σημείων λήψης μετρήσεων² της πίεσης σε κατάλληλα σημεία και με τις κατάλληλες προδιαγραφές, ούτως ώστε να μην επηρεάσουν την μέτρηση.

4-6 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΔΟΚΙΜΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΡΟΗΣ

Σε περίπτωση όπου συμφωνηθεί η δοκιμή να πραγματοποιηθεί προσομοιώνοντας την πραγματική εγκατάσταση της αντλίας (site conditions) είναι σημαντικό, στην είσοδο της αντλίας η ροή να είναι **απαλλαγμένη από στροβιλισμούς**, οι οποίο προκαλούνται από την ίδια την εγκατάσταση, και **να έχει συμμετρική κατανομή ταχύτητας**. Για να επιτευχθεί αυτό θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν όλες οι απαραίτητες διατάξεις.

Για να προσδιοριστεί κατανομή της ταχύτητας εντός του κυκλώματος, πραγματοποιώντας τη δοκιμή με ακρίβεια κατά **grade 1** χρησιμοποιούμε **σωλήνες Pitot**, ώστε να εξασφαλίσουμε ότι τα χαρακτηριστικά της ροής εντός της σωληνογραμμής είναι τα αναμενόμενα. Σε περίπτωση όπου δεν επιτυγχάνεται ροή ομαλή, τότε, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε διάφορα κατάλληλα μέσα, όπως **εξομαλυντές ροής (flow straighteners)**.

4-7 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ ΛΗΨΗΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΣΕ ΜΙΑ ΠΡΟΤΥΠΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ.

i. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΟΝ ΑΓΩΓΟ ΑΝΑΡΡΟΦΗΣΗΣ

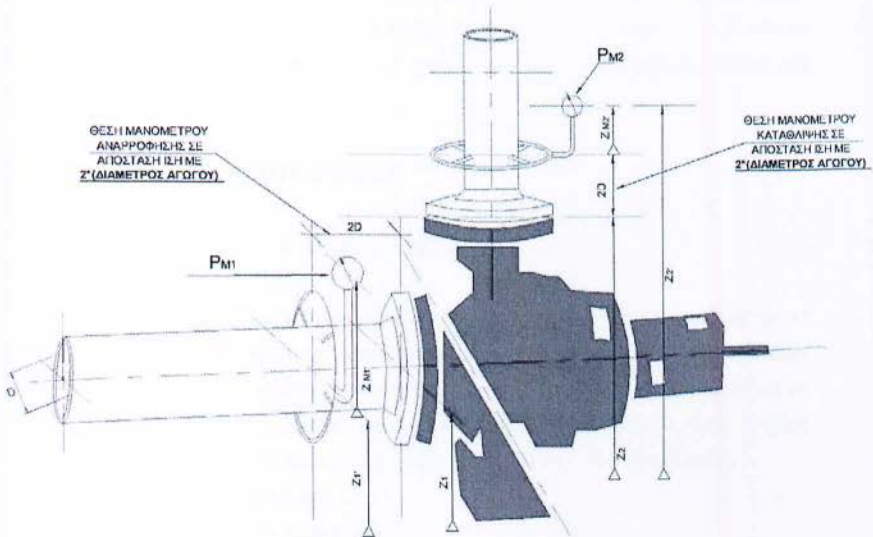
¹ Θα αναφερθούμε εκτενέστερα σε αυτούς σε επόμενο κεφάλαιο, αναλύοντας όλα τα όργανα μέτρησης τα οποία θα χρησιμοποιήσουμε.

² Οι τεχνικές προδιαγραφές αυτών θα περιγραφούν σε επόμενο κεφάλαιο.

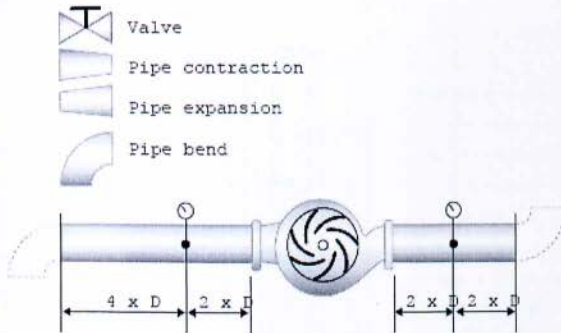


Η συσκευή μέτρησης της πίεσης αναρρόφησης θα πρέπει κανονικά να τοποθετείται:

**σε μήκος ίσο με το διπλάσιο της διαμέτρου του αγωγού αναρρόφησης
ανάτη της φλάντζας αναρρόφησης της αντλίας (εικ. 4-2 & 4.3).**



Εικόνα 4-2 Σημεία τοποθέτησης μετρητικών διατάξεων.



Εικόνα 4-3 Θέσεις και διαστάσεις αγωγών πειραματικής διάταξης

Το σημείο λήψης μετρήσεων πρέπει να είναι επιπλέον ομοαξονικό, και ίδιας διαμέτρου με τον αγωγό αναρρόφησης. Ομοίως και στον αγωγό κατάθλιψης τοποθετείται στην ίδια απόσταση (ίση με $2 \cdot D$). Για δοκιμή με τάξη ακρίβειας grade 2 είναι δυνατό να



τοποθετηθεί στη φλάντζα εξόδου της αντλίας.

ii. Μετρήσεις στον αγωγό κατάθλιψης

Ομοίως με τον αγωγό αναρρόφησης η θέση των μετρητικών διατάξεων στον αγωγό κατάθλιψης πρέπει να βρίσκεται σε μια απόσταση ίση με $2 \cdot D$ από τη φλάντζα εξόδου, να βρίσκεται ομοαξονικά και σε ευθύγραμμο τμήμα του αγωγού.

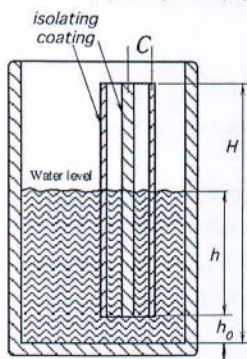
4-8 Μετρητικές Διατάξεις

i. Μέτρηση της Στάθμης του Υγρού

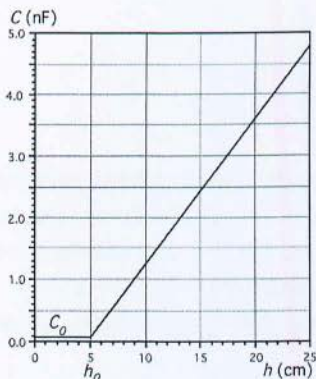
Η στάθμη καθ'ολη τη διάρκεια διεξαγωγής του πειράματος θα πρέπει να παραμένει σταθερή και αδιατάραχη. Για να επιτευχθεί το παραπάνω είναι αναγκαίο να τοποθετηθεί μια πλάκα "ηρεμίας" δηλαδή μια διάτρητη πλάκα σε επικοινωνία με τη δεξαμενή αναρρόφησης (stilling box ή stilling well). Πλήθος συσκευών δύναται να χρησιμοποιηθούν ανάλογα με την εγκατάστασή.

Ενδεικτικά αναφέρονται:

- Εξωτερικά σταθμήμετρα
- Σταθμήμετρα με πλωτήρες
- Μανόμετρα υγρού με απόλυτη ή διαφορική πίεση
- Χωρητικούς Αισθητήρες στάθμης (Capacitive water Level Sensor)



(α)



(β)

H

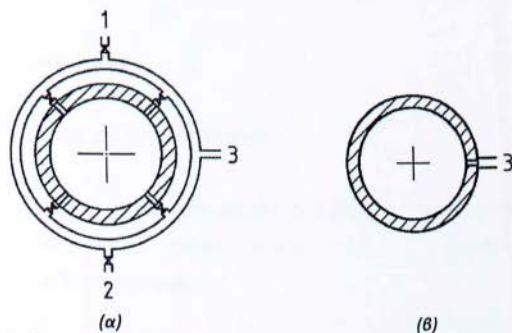
Εικόνα 4-4 Χωρητικό Σταθμήμετρο, αρχή λειτουργίας



Λειτουργία των **χωρητικών αισθητήρων** στάθμης βασίζεται στην απλή αρχή του πυκνωτή. Το υγρό της δεξαμενής χρησιμοποιείται σαν διηλεκτρικό υλικό το οποίο ρυθμίζει την χωρητικότητα του πυκνωτή. Βαθμονομώντας κατάλληλα το σύστημα (βλέπουμε στην εικόνα **4-4β** τη καμπύλη βαθμονόμησης) μπορούμε να λαμβάνουμε ακριβείς μετρήσεις για το ύψος της στάθμης υγρού.

ii. Μέτρηση Πίεσης

Για τη διεξαγωγή του test με βαθμό ακριβείας grade 1 πρέπει να υπάρχουν 4 κοχλιοτομημένες οπές συμμετρικά καταναμημένες συνδέοντας τον αγωγό με τον περιμετρικό σωλήνα μέτρησης (βλέποντας το σχήμα **4-5α**)

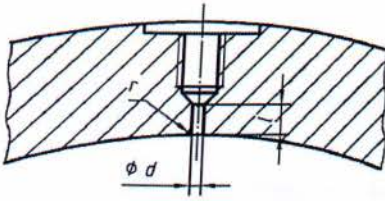


Εικόνα 4-5 Λήψη Μετρήσεων Πίεσης

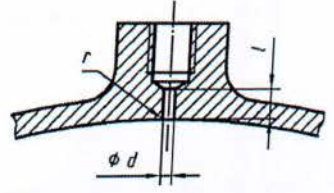
Όπου:

- 1: οπή εξαερισμού
- 2: οπή εκκροής
- 3: σύνδεση με μανόμετρο

Για δοκιμές με ακρίβεια μετρήσεων κατά grade 2 ισχύει το σχήμα (**4-5β**), όπου μια κοχλιοτομημένη οπή επαρκεί, (εκτός περιπτώσεων με έντονους στροβιλισμούς ή ασυμμετρία, όπου απαιτούνται 2 αντιδιαμετρικές οπές). Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται για τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των κοχλιοτομημένων οπών, όπως βλέπουμε στην παρακάτω Εικόνα (**εικ 4.6**).



(α) αγωγός επαρκούς πάχους



(β) αγωγός λεπτού τοιχώματος

Εικόνα 4-6 Οπές στον αγωγό αναρρόφησης και κατάθλιψης για την λήψη μετρήσεων

Όπου για τα παραπάνω ισχύουν οι σχέσεις:

$$l \geq 2,5 d \quad (4.1)$$

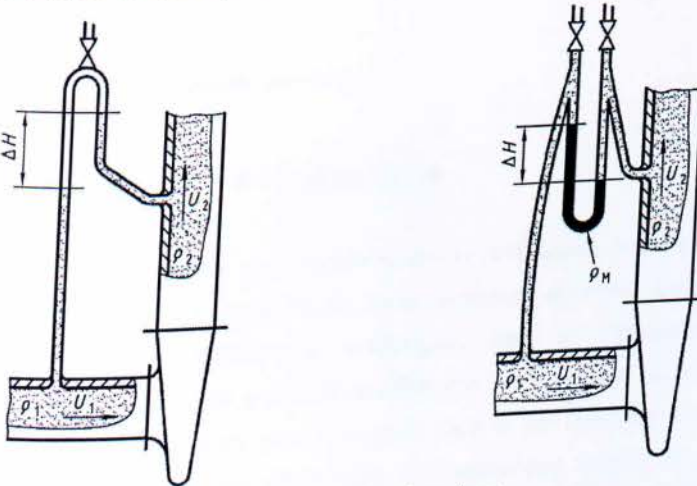
σε περίπτωση όπου $d = 3\text{mm}$ έως 6mm ή το $\frac{1}{10}$ της διαμέτρου του αγωγού

σε περίπτωση κατά την οποία το τοίχωμα είναι μικρότερο από 6mm .

Τύποι μανομέτρων

➤ Μανόμετρα στήλης υγρού

Ο συγκεκριμένος τύπος μανομέτρου θα πρέπει να χρησιμοποιείται κυρίως σε χαμηλές πιέσεις. Ο πλέον συνήθης τύπος μανόμετρου είναι νερού υδραργύρου & αέρα-νερού.



Εικόνα 4-7 Μανόμετρο Νερού-Αέρα και Νερού-Υδραργύρου

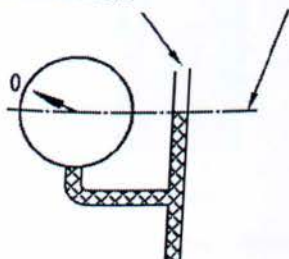


Σε περίπτωση που χρησιμοποιηθούν τα παραπάνω μανόμετρα θα πρέπει να γίνουν τροποποιήσεις σχετικά με τη μετρούμενη ένδειξη.

➤ Μανόμετρα τύπου Burdon



Εικόνα 4-8 Πίσω όψη μανομέτρου
τύπου Burdon



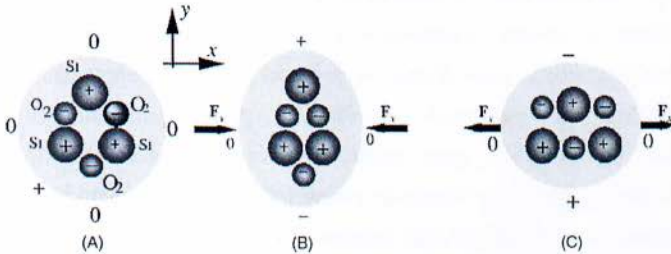
Εικόνα 4-9 Σημείο αναφοράς μανομετρικού
ύψους

➤ Πιεζοηλεκτρικοί Αισθητήρες Πίεσης

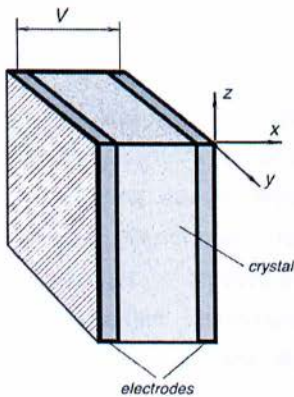
Υπάρχει μεγάλη ποικιλία αισθητήρων οι οποίοι λειτουργούν βασιζόμενοι σε διάφορους μηχανικούς μηχανισμούς ή/και ηλεκτρικές ιδιότητες. Στόχος της εφαρμογής των συγκεκριμένων αισθητήρων είναι να διασφαλιστεί η απαιτούμενη ακρίβεια και η αξιοπιστία. Ιδιαίτερη βαρύτητα πρέπει να δοθεί στη συχνή βαθμονόμηση των συσκευών αυτών με πρότυπο συσκευή μεγαλύτερης ακρίβειας και αξιοπιστίας. Οι αισθητήρες πίεσης, οι οποίοι χρησιμοποιούνται κατά κόρον βασίζονται τη λειτουργία τους στο



πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Φυσικοί κρύσταλλοι, όπως χαλαζιακοί SiO_2 κρύσταλλοι χρησιμοποιούνται για τις εν λόγω εφαρμογές.

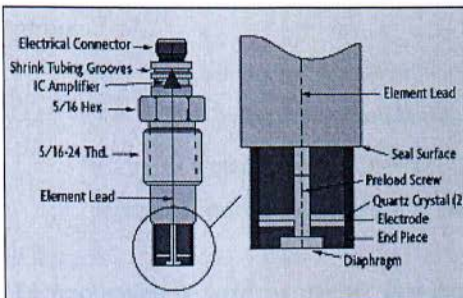


Εικόνα 4-10 Αρχή του πιεζοηλεκτρικού Φαινομένου



Από την παραπάνω εικόνα μπορούμε να καταλάβουμε την αρχή λειτουργίας των πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων. Σε συνθήκες μη φόρτισης (A) ο χαλαζιακός κρύσταλλος είναι αφόρτιστος (μιας και βρίσκεται σε ισορροπία), σε περίπτωση όμως που αυτός φορτισθεί από μια εξωτερική δύναμη F_x αλλάζει η δομή των ατόμων εντός της κρυσταλλικής δομής.

Εικόνα 4-11 Τρόπος Λειτουργίας Πιεζοηλεκτρικού Αισθητήρα



Εικόνα 4-12 Τομή Πιεζοηλεκτρικού Αισθητήρα Πίεσης

Στο σχήμα (4-10-B) βλέπουμε τη συμπεριφορά του ατόμου χαλαζία, όταν σε αυτό ασκείται θλιπτική δύναμη. Τα άτομα τα οποία αποτελούν τον κρύσταλλο



κατανέμονται με τέτοιο τρόπο, ώστε να εμφανίζεται θετικά φορτισμένο το άνω μέρος του κρυστάλλου.

Στο σχήμα (4-10 Γ) βλέπουμε την αντίδραση του κρυστάλλου, όταν σε αυτό ασκείται δύναμη εφελκυσμού. Ο κρύσταλλος φορτίζεται αντίθετα. Στο εξαιρετικά χρήσιμο αποτέλεσμα του να φορτίζεται ο κρύσταλλος ανάλογα με την εφαρμοζόμενη δύναμη, βασίζεται η λειτουργία των πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων. Εφαρμόζοντας στα άκρα ενός κρυσταλλικού υλικού δύο αγώγιμες πλάκες (ηλεκτρόδια) ικανές να άγουν τη μεταβολή του ηλεκτρικού φορτίου (Εικ. 4-12) έχουμε τη δημιουργία ενός πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα.

iii. Μέτρηση της ταχύτητας περιστροφής

Η τιμή της ταχύτητας περιστροφής μπορεί να προσδιοριστεί μετρώντας τις περιστροφές του Η/Κ σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, μέσω ενός ταχομέτρου, οπτικού ταχομέτρου, ταχομέτρου τεχνολογίας laser.

Σε περίπτωση που η αντλία είναι συνδεδεμένη με Η/Κ εναλλασσόμενου ρεύματος (πλειοψηφία των περιπτώσεων) μπορούμε έμμεσα να υπολογίσουμε τις στροφές βασιζόμενοι στην συχνότητα του δικτύου και τα χαρακτηριστικά περιστροφής του κινητήρα. Για την εξαγωγή αποτελεσμάτων με την προαναφερθείσα μέθοδο χρησιμοποιούμε την ακόλουθη σχέση;

$$n = \frac{2}{i} \left(f - \frac{j}{\Delta t} \right) \quad (4.2)$$

όπου:

i : ο αριθμός των ζευγών πόλων του Η/Κ

f : Η συχνότητα του δικτύου σε Hz

j : οι μετρούμενες εικόνες σε χρονικό διάστημα Δt με στροβοσκόπιο συνδεδεμένο με το δίκτυο ηλ. Ενέργειας.

Σε περιπτώσεις κατά τις οποίες δεν έχουμε πρόσβαση στο σύνδεσμο αντλίας-ηλεκτροκινητήρα (υποβρύχιες αντλίες, κλειστού συνδέσμου, κυκλοφορητές), χρησιμοποιούμε μόνο τα δεδομένα τα οποία έχουμε από το δίκτυο, και τα οποία είναι συνήθως επαρκή για να ολοκληρώσουμε την μελέτη μας.



iv. Μέτρηση της καταναλισκόμενης ενέργειας

Η καταναλισκόμενη ενέργεια του Η/Κ θα πρέπει να υπολογίζεται είτε από μέτρηση της ταχύτητας περιστροφής και ροπής είτε μετρώντας απευθείας την καταναλισκόμενη ενέργεια.

Σε (σπάνια) περίπτωση κατά την οποία μεσολαβεί κιβώτιο ταχυτήτων-μειωτήρας οι μετρήσεις της καταναλισκόμενης ισχύος θα πρέπει να λαμβάνουν υπόψη και τις απώλειες στο κιβώτιο ταχυτήτων.

v. Μέτρηση Παροχής

Η μέτρηση της παροχής μπορεί να γίνει μέσω μιας μεγάλης σειράς οργάνων μέτρησης, βασιζόμενο καθένα και σε διαφορετική αρχή λειτουργίας. Στην παρούσα εργασία **δε** θα αναλύσουμε το σύνολο των διαθέσιμων οργάνων μέτρησης παροχής, μιας και ο σκοπός μας είναι διαφορετικός.

Είδη παροχομέτρων ανάλογα με την αρχή λειτουργίας τους:

- i. Μέτρηση παροχής με τη μέθοδο ζύγισης (*Measurement by weighing*)
- ii. Ογκομετρική μέθοδος (*Volumetric method*)
- iii. Παροχόμετρα διαφορικής πίεσης (*differential pressure devices*)
- iv. Μέτρηση παροχής μέσω της ταχύτητας του ρευστού (*Velocity area methods*)
- v. Μέτρηση παροχής με υπερήχους
- vi. Μέτρηση παροχής με μαγνητικά ροόμετρα (*magnetic flow meters*)

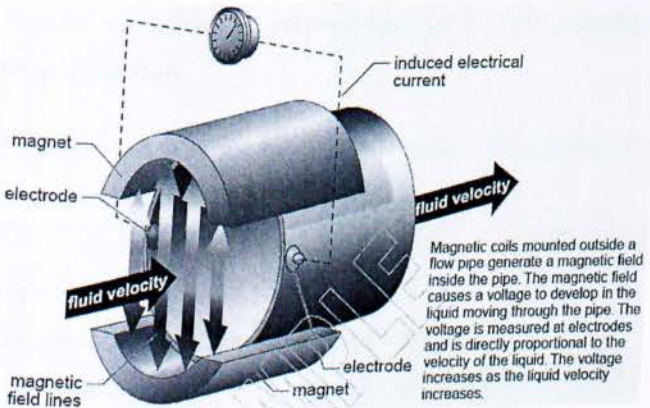
➤ Μαγνητικά Παροχόμετρα (*magnetic flow meters*)

Αρχή Λειτουργίας:

Δύο ηλεκτρομαγνήτες (**εικ.4-13**) προσαρμόζονται στην εξωτερική διάμετρο του αγωγού, δημιουργώντας στο εσωτερικό του μαγνητικό πεδίο. Το μαγνητικό πεδίο με την σειρά του προκαλεί διαφορά δυναμικού στο διερχόμενο υγρό, η αναπτυσσόμενη διαφορά δυναμικού μετράται από τα ηλεκτρόδια τα οποία είναι τοποθετημένα στον αγωγό. Πρέπει να σημειωθεί



Πως η αναπτυσσόμενη διαφορά δυναμικού είναι ευθέως ανάλογη με την ταχύτητα του υγρού



Εικόνα 4-13 Μαγνητικό Παροχόμετρο, Τρόπος Λειτουργίας

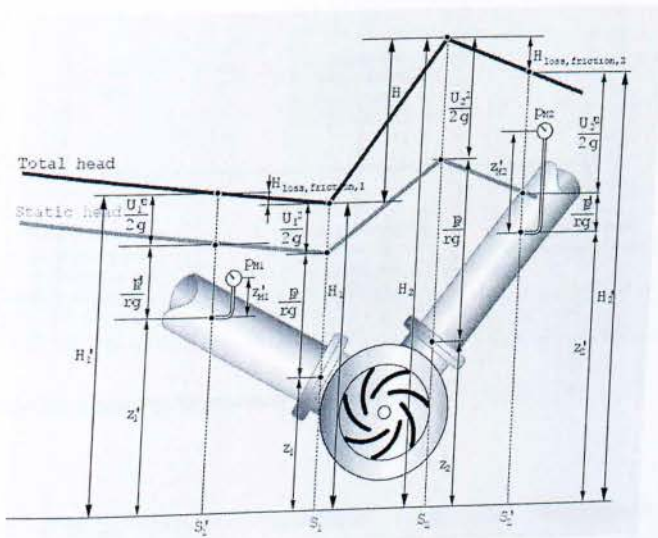
Συνοψίζοντας οφείλουμε να σημειώσουμε πως η εκτενής χρήση των μαγνητικών (ή ηλεκτρομαγνητικών παροχομέτρων) σε πλήθος εφαρμογών όπως π.χ. στην γεωργία, στη Βιομηχανία Φαρμάκων, σε Διυλιστήρια, στην Χημική Βιομηχανία κ.α. , συνηγορούν στην άποψη μας πως είναι η πλέον αξιόπιστη εφαρμογή, και επιβεβαιώνουν την απόφασή μας να χρησιμοποιήσουμε στην εφαρμογή μας τον συγκεκριμένο τύπο παροχόμετρου.



Πρόλογος 5^{ου} Κεφαλαίου

Στο 5ο κεφάλαιο θα περιγράψουμε την πειραματική διάταξη, πιο συγκεκριμένα:

- Το Σύστημα Αυτόματης Καταγραφής Πειραματικών Δεδομένων – Data Acquisition System (DAQ).
- Τον τρόπο υπολογισμού των μεγεθών-χαρακτηριστικής καμπύλης.
- Τη μέθοδο Προσδιορισμού της Σηπλιάωσης.
- Τον τρόπο λειτουργίας της εφαρμογής μας – εγχειρίδιο χρήστη.

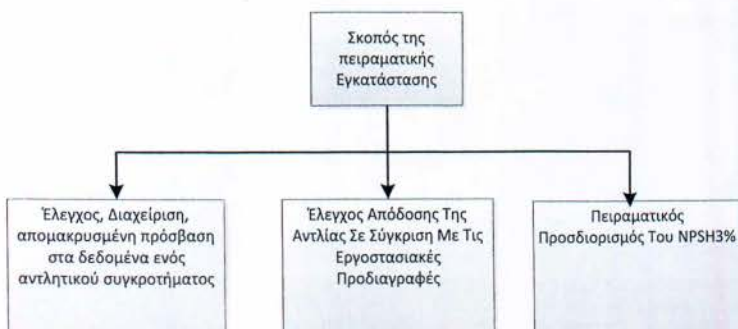




05-01 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΗΣ

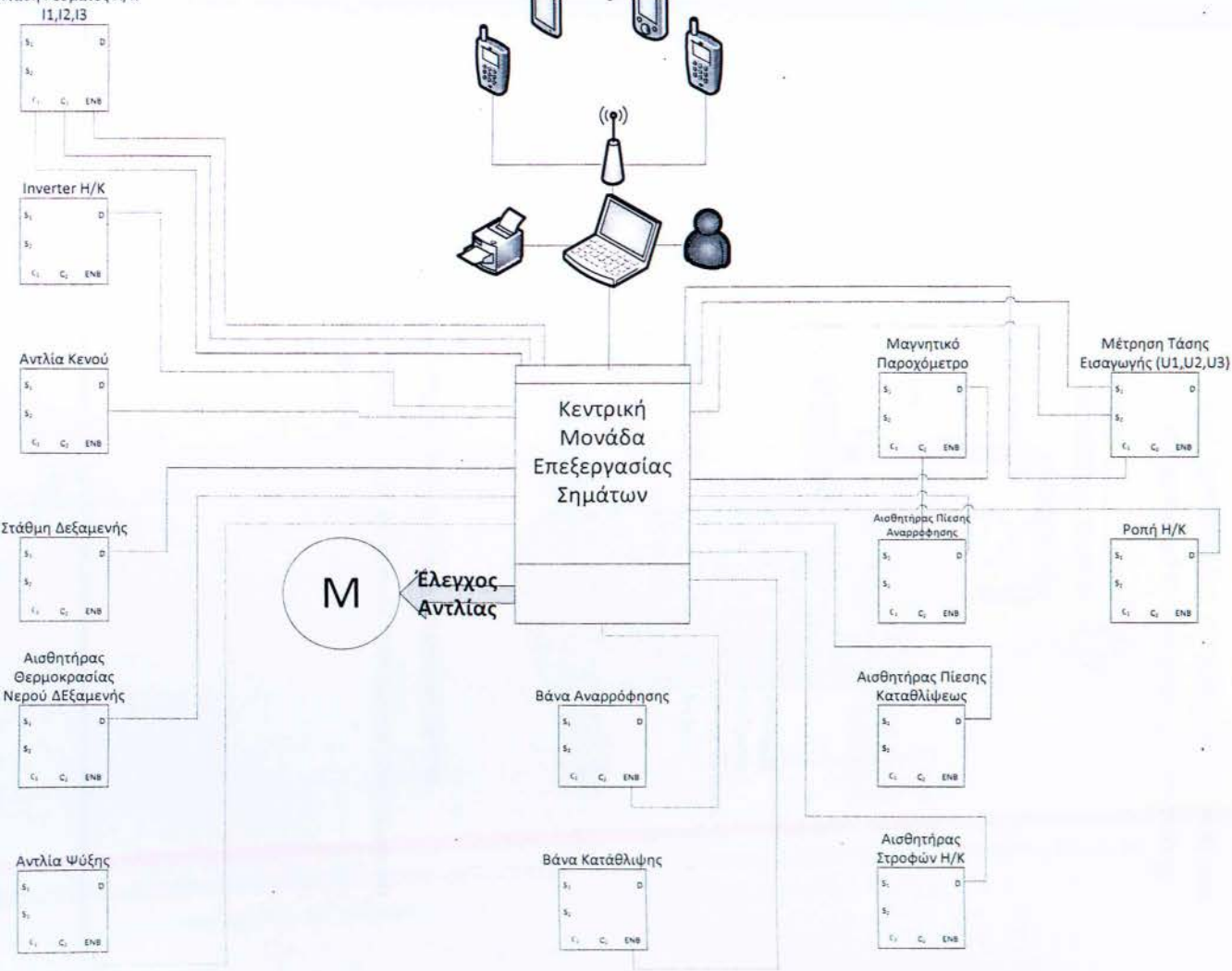
i. Στόχοι



Πριν ξεκινήσουμε την περιγραφή της πειραματικής εγκατάστασης και τον τρόπο λειτουργίας αυτής, κρίνεται σκόπιμο να παρουσιάσουμε τους στόχους-σκοπούς τους οποίους θέλουμε να επιτύχουμε με την κατασκευή του αντλιοστασίου μας.



Διάγραμμα 5-1 Σκοπός Της Πειραματικής Εγκατάστασης.

Για να εξυπηρετηθούν οι παραπάνω παράμετροι, (διάγραμμα 5-1) κατασκευάστηκε μια πλατφόρμα συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων σε πρόγραμμα **LabView** της εταιρείας **National Instruments**. Στην **Εικόνα 5-1** παρουσιάζεται η εικόνα χρήστη (**Front End**) την οποία θα κληθεί να χειριστεί ο διενεργών το πείραμα. Η συλλογή των δεδομένων γίνεται από κατάλληλους αισθητήρες και η επεξεργασία αυτών γίνεται μέσω του προγράμματος **LabView**. Η βασική αρχιτεκτονική δομή φαίνεται στην **Εικόνα 5-2**. Με τις **πράσινες καλωδιώσεις** παριστάνονται τα **εισερχόμενα δεδομένα-σήματα** στην κεντρική μονάδα επεξεργασίας σημάτων, ενώ με **κόκκινες**



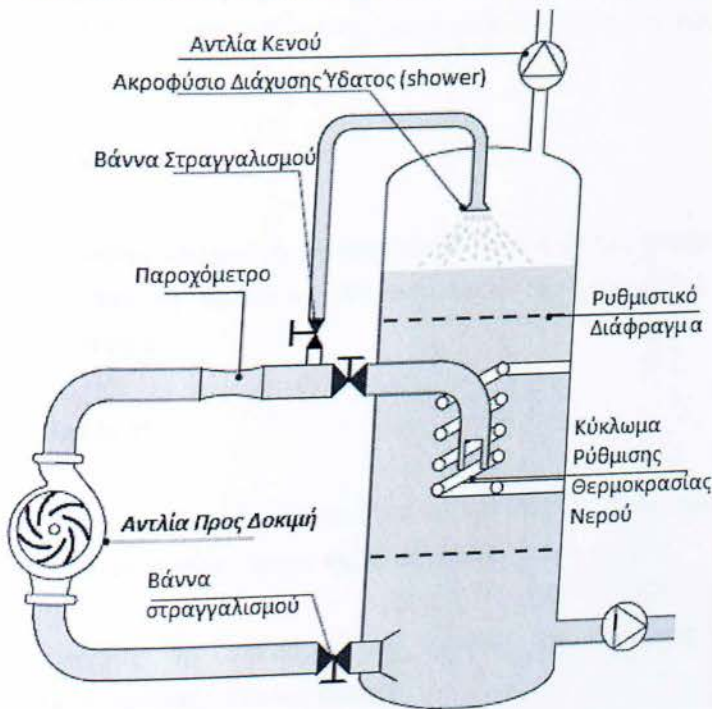
 Input Data
 Output Data



καλωδιώσεις οι εντολές προς τα στοιχεία της αντλητικής εγκατάστασης.
Βασικός στόχος μας είναι:

i. Έλεγχος Πειραματικής Διάταξης

Για την πραγματοποίηση της δοκιμής της αντλίας κατασκευάζεται η **πρότυπη πειραματική διάταξη** όπως αυτή απεικονίζεται στην **εικ. 5-3**. Η ίδια εικόνα βρίσκεται και στο Front-End εμπλουτισμένη με indicators τα οποία μας **πληροφορούν σε πραγματικό χρόνο** για τη λειτουργία της εγκατάστασης.



Εικόνα 5-3 Κατασκευαστική Δομή Πειραματικής Διάταξης κατά BS EN ISO-9906

Οι θέσεις και οι προδιαγραφές των μετρητικών συστημάτων είναι σύμφωνα με αυτά της παραγράφου 4-5

*i. Έλεγχος του αντλιοστασίου***➤ Πεδίο 1ο (εικ. 5.1)**

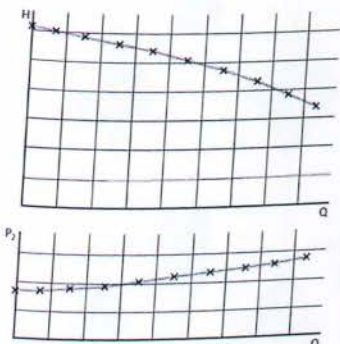
Βρίσκεται το μπλόκ το οποίο σε πραγματικό χρόνο μας δίνει τα στοιχεία λειτουργίας της αντλητικής εγκατάστασης, μέσω των αντίστοιχων ενδεικτικών (*indicators*). Το πρόγραμμα έχει παραμετροποιηθεί κατάλληλα ούτως ώστε εκτός από οπτικοποίηση των παραμέτρων λειτουργίας, να ελέγχει και την αντλητική εγκατάσταση και να διασφαλίζει την ασφαλή λειτουργία αυτής. Στην **εικόνα 5.3** βλέπουμε το πώς λειτουργούν οι αισθητήρες και το πώς ασκείται ο έλεγχος.

➤ Πεδίο 2°

Είναι ο πίνακας ελέγχου της εγκατάστασής μας. Παρακάτω παρουσιάζοντας αναλυτικότερα τις διαδικασίες θα αναλύουμε την χρησιμότητα καθενός κομβίου ελέγχου.

➤ Πεδίο 3°

Το σχέδιο της αντλητικής εγκατάστασης τις ενδείξεις οι οποίες δείχνουν σε πραγματικό χρόνο τη λειτουργία της εγκατάστασής.

ii. Έλεγχος της απόδοσης της αντλίας (σε σύγκριση με τις εργοστασιακές προδιαγραφές)

Εικόνα 5.4 Χαρακτηριστικές Καμπύλες

$$H = f(Q) \text{ και } P = f(Q)$$

Ένας από τους βασικούς σκοπούς της παρούσας εργασίας και της εφαρμογής είναι ο έλεγχος της καμπύλης λειτουργίας της αντλίας σε σύγκριση με τις εργοστασιακές τιμές. Η σύγκριση των δύο τιμών αυτών γίνεται στο πεδίο 4 στο οποίο “φορτώνουμε” τόσο τις τιμές των μεγεθών οι οποίες προκύπτουν από το πείραμα όσο και τις

Διάγραμμα 5.2
 Λογική σχεδίαση Ελέγχου Αντλιοστασίου

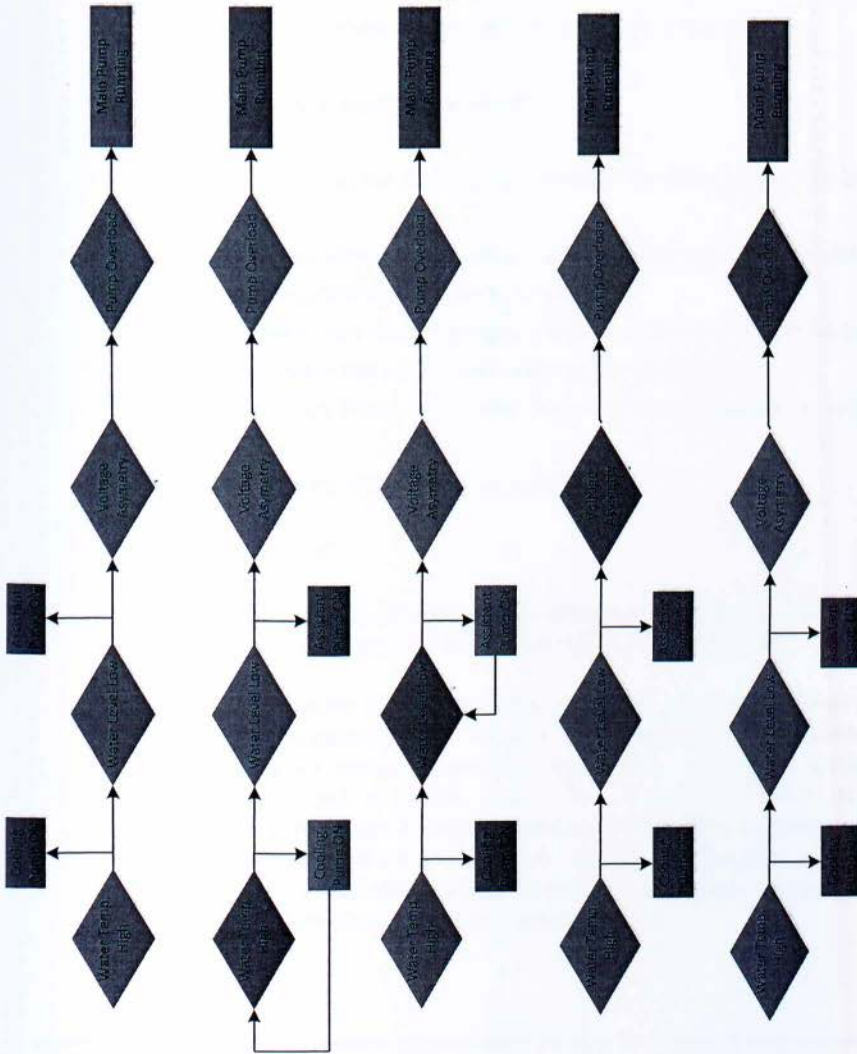
Σενάριο Λειτουργίας
 Όλες οι Παράμετροι Πρέπει να ικανοποιούνται για να λειτουργήσει η αντλία

Σφάλμα Θεωρητικές
 Νερού

Σφάλμα Στάθους
 Δεξαμενής

Σφάλμα Ασυμμετρίας
 Φάσεων

Σφάλμα Υπερφόρτισης
 Ηλεκτροκινητήρα





εργοστασιακές τιμές των χαρακτηριστικών μεγεθών. Με τη δημιουργία της συγκεκριμένης σύνθετης γραφικής παράστασης σκοπεύουμε στο να μπορεί ο μηχανικός με μια γρήγορη ματιά να διαπιστώσει την κατάσταση στην οποία βρίσκεται η αντλία μας. Το λογικό διάγραμμα το οποίο περιγράφει τη διαδικασία το βλέπουμε στο **διάγραμμα 5.3**. Ο τρόπος υπολογισμού των μεγεθών είναι σύμφωνος με το πρότυπο **BS EN ISO-9906 § 8.2.1**. Όλοι οι χειρισμοί (εκτός της αλλαγής αγωγών αναρρόφησης και κατάθλιψης) γίνονται μέσω της κονσόλας (Front Panel/εικ.5.1) του προγράμματος. Για να μπορέσουμε να γίνουμε πιο κατανοητοί στην παρουσίαση της διαδικασίας χωρίσαμε το front panel σε πεδία. Πιο αναλυτικά:

➤ Πεδίο 5° (ομοίως και τα 6,7)

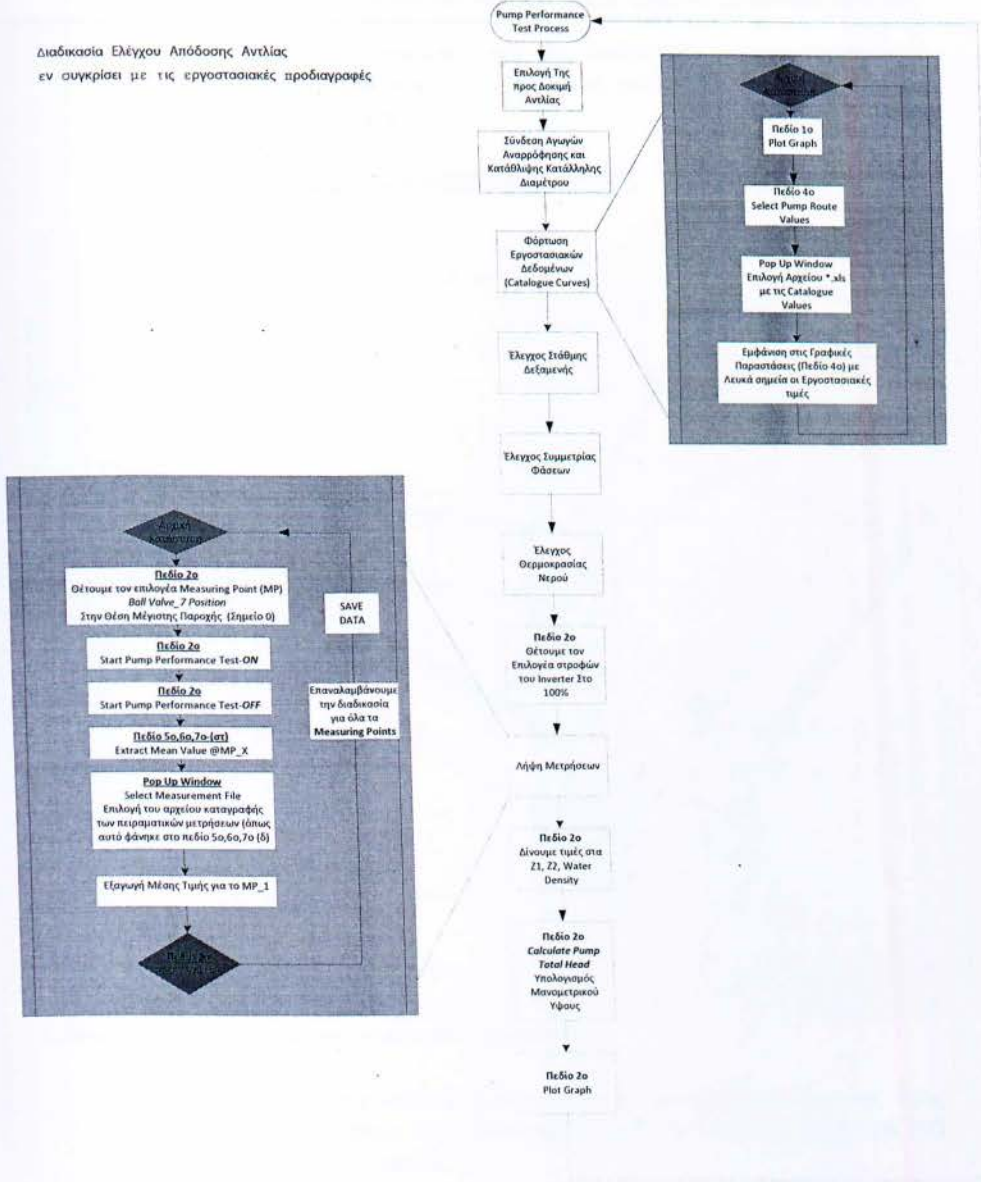
- (α) Η διακύμανση του μετρούμενου μεγέθους (μέτρηση Ισχύος) στη διάρκεια του χρόνου.
- (β) Η διακύμανση του μεγέθους στη διάρκεια ενός κύκλου διάρκειας ρυθμιζόμενης από το radio button (time) πεδίο 2°.
- (γ) Η μέγιστη τιμή max, η Ελάχιστη τιμή ,in, η Μέση τιμή RMS (είναι και η αποθηκευόμενη τιμή με την οποία γίνονται οι υπολογισμοί).
- (δ) Η διαδρομή (Path) στην οποία αποθηκεύεται το αρχείο με τις μετρήσεις (RMS Values).
- (ε) Μετρητής της ισχύος σε πραγματικό χρόνο.

➤ Πεδίο 8°

Οι RMS τιμές των μετρούμενων μεγεθών σε πραγματικό χρόνο (οι τιμές αποθηκεύονται σε αρχείο *.lvm επεξεργάσιμο από το MS excel)

Κατά το πρότυπο ISO ο πειραματικός έλεγχος αναπτύσσεται επιλέγοντας έναν συγκεκριμένο αριθμό σημείων λειτουργίας (operating points) για συγκεκριμένο αριθμό στροφών της αντλίας. Τα σημεία λειτουργίας λαμβάνονται από τη μέγιστη παροχή έως την ελάχιστη δυνατή. Σε κάθε σημείο λειτουργίας (operating ή measuring point-MP-) λαμβάνουμε όσες μετρήσεις θέλουμε και με συχνότητα την οποία ρυθμίζουμε εμείς (πεδίο 4° –time), επιπρόσθετα έχουμε πρόσβαση στο αρχείο των μετρήσεων για τυχόν διορθώσεις τυχαίων σφαλμάτων.

Διαδικασία Ελέγχου Απόδοσης Αντλίας
 εν συγκρίσει με τις εργοστασιακές προδιαγραφές

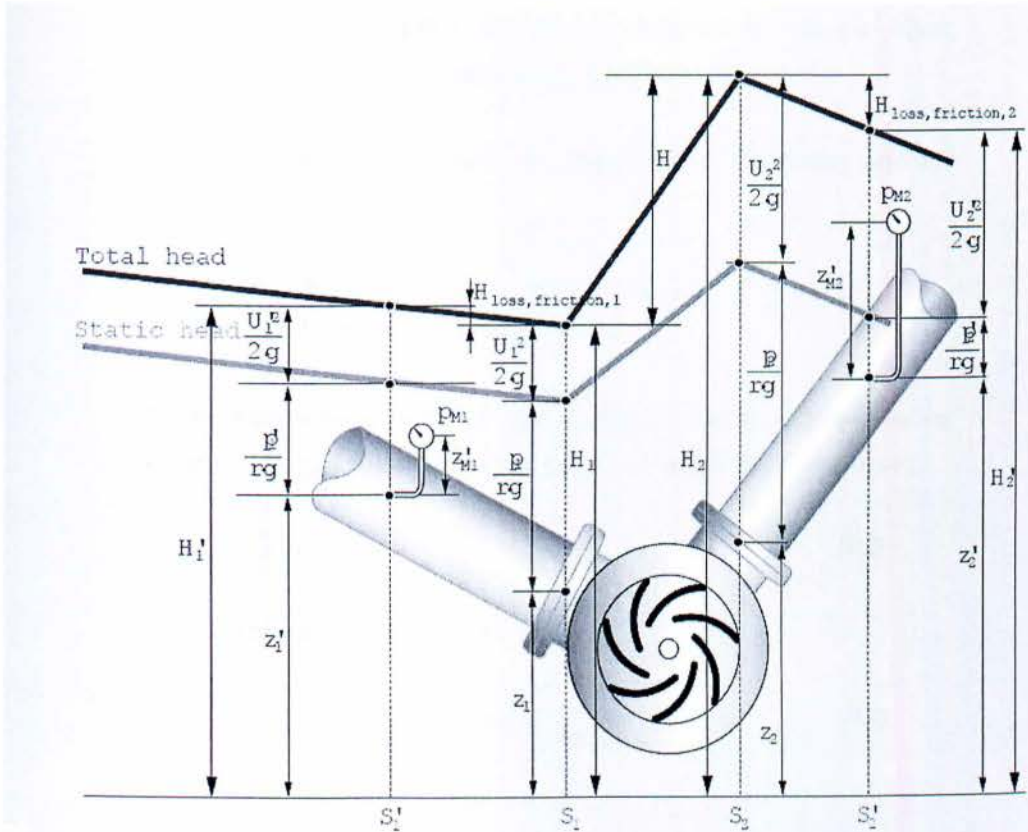


Διάγραμμα 5.3



Περισσότερες πληροφορίες για τη διαδικασία λήψης μετρήσεων ακολουθεί το διάγραμμα 5.3 το οποίο σε μορφή flowchart περιγράφει την ακριβή διαδικασία

Τεύχος Υπολογισμών Απόδοσης Αντλίας



Εικόνα 5-5 Σχέδιο Προς Δοκιμή αντλίας με μεγέθη υπολογισμού

Η γενική εξίσωση υπολογισμού του ολικού μανομετρικού ύψους της προς δοκιμή αντλίας, όπως αυτή υποδεικνύεται από το πρότυπο (§ 8.2.1 EN ISO 9906:1999) είναι η κάτωθι:

$$H = \left[z'_2 + \left(\frac{p_{M2'}}{\rho g} + z'_{M2} \right) + \frac{U_2'^2}{2g} + H_{loss, friction, 2} \right] - \left[z'_1 + \left(\frac{p_{M1'}}{\rho g} + z'_{M1} \right) + \frac{U_1'^2}{2g} - H_{loss, friction, 1} \right]$$

Τα μεγέθη της παραπάνω εξίσωσης τα διαπιστώνουμε στην **εικόνα 5-5**.

Απώλειες λόγω τριβής στους αγωγούς (§ 8.2.4)

Όπως είδαμε και προηγούμενα οι θέσεις των μετρητικών διατάξεων βρίσκονται σε απόσταση από τις φλάντζες εισόδου και εξόδου. Γι αυτό το λόγο κρίνεται σκόπιμο να προσθέσουμε στο μετρούμενο μανομετρικό ύψος τις απώλειες λόγω τριβής H_{J1} & H_{J2} ανάμεσα στα σημεία λήψης μετρήσεων και τις φλάντζες εισόδου και εξόδου αντίστοιχα.

Μια τέτοια διόρθωση θα πρέπει να εφαρμόζεται σε περίπτωση κατά την οποία:

$$H_{J1} + H_{J2} \geq 0.005H \text{ για τάξη ακριβείας Grade 2}$$

$$H_{J1} + H_{J2} \geq 0.002H \text{ για τάξη ακριβείας Grade 1}$$

Σε περίπτωση όπου οι θέσεις των μετρητικών διατάξεων βρίσκονται σε απόσταση L , τότε οι απώλειες λόγω τριβής υπολογίζονται από την σχέση:

$$H_J = \lambda \frac{L U^2}{D 2g} \quad (5.2)$$

Η τιμή του λ υπολογίζεται

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log_{10} \left[\frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} + \frac{k}{3.7D} \right] \quad (5.3)$$

Όπου

k : η τραχύτητα του αγωγού

D : η διάμετρος του αγωγού

$\frac{k}{D}$: αδιάστατο πηλίκο σχετικής τραχύτητας

Η πολύπλοκη εξίσωση 5.3 είναι δυνατό μετά από μακρούς υπολογισμούς να οδηγήσει στο συμπέρασμα πως δεν είναι αναγκαίο να ληφθούν υπόψη οι διορθώσεις λόγω των απωλειών λόγω τριβών. Για να αποφευχθούν πλήθος άσκοπων υπολογισμών το πρότυπο ISO 9906 έχει συντάξει τους πίνακες Annex C (σελ Π1/Π2/Π3 της παρούσας εργασίας) C.1 C.2 C.3 οι οποίοι θα

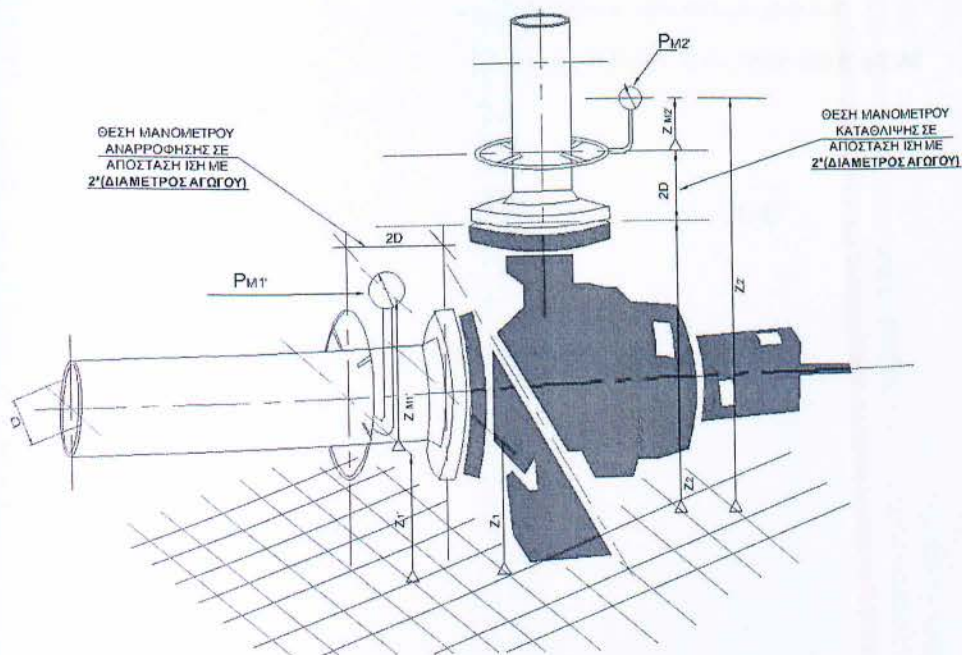


μας καθοδηγήσουν στο συμπέρασμα. Η επίλυση πλήθους παραδειγμάτων για μεγάλης κλίμακας φυγοκεντρικές αντλίες έδειξαν ότι σπάνια και για πολύ μεγάλες φυγοκεντρικές αντλίες χρειάζεται η παραπάνω διόρθωση, συνεπώς για να μην κάνουμε πολύ περίπλοκη την πλατφόρμα υπολογισμών, η συγκεκριμένη διόρθωση παρελήφθη.

Υπολογισμός Μανομετρικού Αντλίας §8.2.1.

Μετά τα συμπεράσματα της προηγούμενης παραγράφου (υπολογισμός υδραυλικών απωλειών) η **εξίσωση 5.1** γίνεται:

$$H = \left[z_2' + \left(\frac{P_{M2'}}{\rho g} + z_{M2}' \right) + \frac{U_2'^2}{2g} \right] - \left[z_1' + \left(\frac{P_{M1'}}{\rho g} + z_{M1}' \right) + \frac{U_1'^2}{2g} \right]$$



Εικόνα 5.6 Ισομετρική άποψη σημείων λήψης μετρήσεων πειραματικής εγκατάστασης

Στην εικόνα 5-6 βλέπουμε τα μετρούμενα μεγέθη, τα οποία συμπληρώνουμε στο **πεδίο 2^ο ΕΙΚ.5.1**.



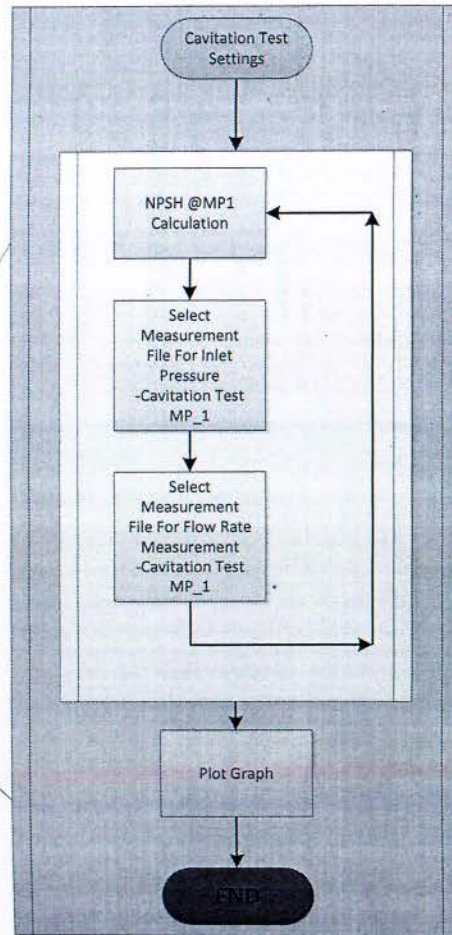
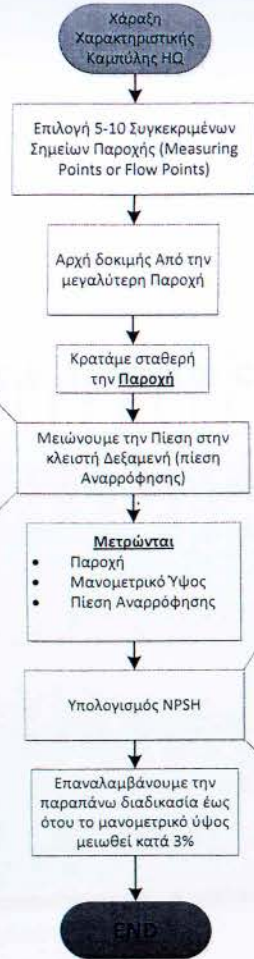
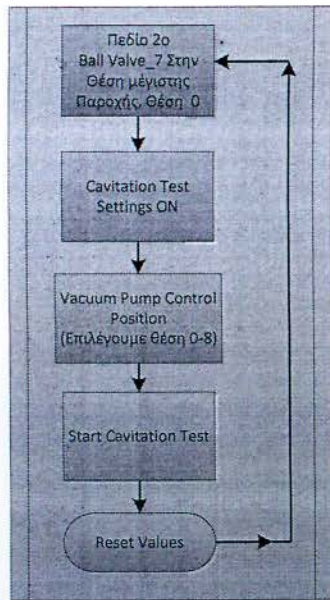
Θέτοντας τις αντίστοιχες τιμές το πρόγραμμα υπολογίζει αυτόματα το μανομετρικό ύψος το οποίο απεικονίζεται στο 6^ο πεδίο.

Προσδιορισμός σημείου εμφάνισης του φαινομένου της σπηλαίωσης μέσω της παραμέτρου $NPSH_{3\%}$ μειώνοντας την πίεση αναρρόφησης (§11.1.2.3)

Ο προσδιορισμός της παραμέτρου $NPSH_{3\%}$ πραγματοποιείται διατηρώντας την παροχή σταθερή ενώ μειώνεται η πίεση αναρρόφησης, εξαιτίας της οποίας η τιμή του $NPSH_A$ μειώνεται σταδιακά έως ότου το μανομετρικό ύψος μειωθεί περισσότερο από 3%. Η μετρούμενη τιμή του $NPSH_A$ για την οποία παρατηρείται το παραπάνω φαινόμενο χαρακτηρίζεται ως $NPSH_{3\%}$. Η ακολουθούμενη διαδικασία φαίνεται στο διάγραμμα 5.4

Ο υπολογισμός του $NPSH$ βάσει της του **BS EN ISO-9906:1999 §3.24** υπολογίζεται από την εξίσωση 5.4

$$NPSH = H_1 - z_D + \frac{P_{amb} - P_v}{\rho_1 g} \quad (5.4)$$



Διάγραμμα 5.4 Διαδικασία Υπολογισμού NPSH



Υπολογιστικό Παράδειγμα

Σε αυτή τη παράγραφο θα παρουσιάσουμε τον τρόπο υπολογισμού των χαρακτηριστικών μεγεθών. Θα χρησιμοποιήσουμε τα δημιουργούμενα αρχεία πειραματικών μετρήσεων *.LVM . Θα ακολουθήσουμε την πειραματική διαδικασία όπως αυτή περιγράφεται από τα **διαγράμματα 5.3 και 5.4**.

HQ test

> Pump Literature

NB 32-160/154 Grundfos (for further details see pages 121a, 121b, 121c, 121d)

> Operating Point 1st

Ball Valve OPEN **20deg**

Main Pump Speed of Rotation **100%**

Time Stamp (sec)	Q(m ³ /Hr)	Inlet Pressure (bar)	Outlet Pressure (bar)	Power Input (kW)
6	2,62202	0,559031	24,00553	2,036354
12	2,627789	0,567012	24,00489	2,027668
18	2,627026	0,543462	24,00452	2,030573
24	2,621617	0,539591	24,0042	2,040524
30	2,625422	0,521032	24,00561	2,026004
36	2,626698	0,546519	24,00531	2,03572
42	2,628181	0,508403	24,00529	2,030817
48	2,625028	0,524106	24,00583	2,028651
54	2,628922	0,5568	24,00532	2,03381
60	2,622411	0,529371	24,00491	2,03488
66	2,623149	0,555195	24,00551	2,033826
72	2,626191	0,535188	24,00501	2,0325
78	2,624908	0,563578	24,00558	2,035509
84	2,62401	0,57766	24,00528	2,027215
Average	2,62524	0,54478	24,0052	2,03243

Πίνακας 5.1 Πίνακας Μετρήσεων για Operating Point 5 (20deg open)



- Τα χαρακτηριστικά όπως αυτά φαίνονται στην παρακάτω εικόνα έχουν ως εξής.

$$Z_2' = Z_2 + 2D + Z_{M2'} = 1.0 + 0.064 + 0.01 = 1.074m$$

$$Z_2 = 1.0m$$

$$2D_{outlet} = 2 * 0.032 = 0.064m$$

$$Z_{M2'} = 10cm = 0.01m$$

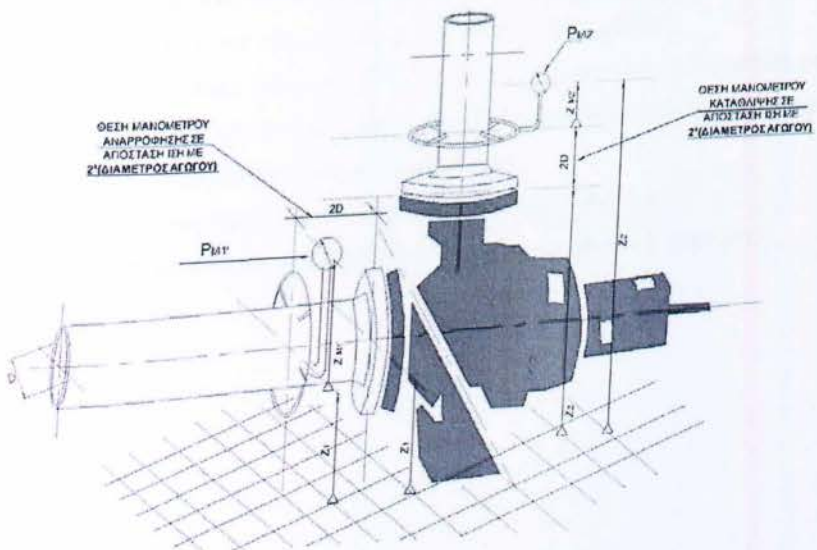
$$A_{outlet} = \pi r^2 = 3.14 * 256 * 10^{-4} = 0.080384m^2$$

$$A_{inlet} = \pi r^2 = 3.14 * 625 * 10^{-4} = 0.196250m^2$$

$$Q = A * u \Rightarrow u_2 = \frac{Q}{A_{outlet}}, Q = const$$

$$u_2 = \frac{2.134}{0.08} \left(\frac{m^3}{hr} \right) = 26.675 \left(\frac{m}{hr} \right) = 7.409 \times 10^{-3} \left(\frac{m}{sec} \right) \Rightarrow u_2 = \text{αμελητέα}$$

$$H = \left[z_2' + \left(\frac{p_{M2'}}{\rho g} + z_{M2'} \right) + \frac{U_2'^2}{2g} \right] - \left[z_1' + \left(\frac{p_{M1'}}{\rho g} + z_{M1} \right) + \frac{U_1'^2}{2g} \right]$$





Σχόλια-Συμπεράσματα:

Ο μεγάλος ανταγωνισμός στον χώρο της προμήθειας, εγκατάστασης και λειτουργίας αντλητικών συγκροτημάτων έχει σαν αποτέλεσμα οι απαιτήσεις το τελικού αποδέκτη να είναι συνεχώς μεγαλύτερες. Στηριζόμενος στην εργασιακή μου εμπειρία διαπίστωσα πως στη συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων οι απαιτήσεις ήταν οι εξής:

- i. Το χαμηλό λειτουργίας (ενεργειακό)
- ii. Χαμηλό κόστος συντήρησης
- iii. Συνεχής Διαθεσιμότητα αντλίας
- iv. Δυνατότητα απομακρυσμένου ελέγχου και χειρισμού, στοχεύοντας στην μείωση των λειτουργικών εξόδων συντήρησης και εξοικονόμησης πολύτιμων εργατωρών.
- v. Η αξιόπιστη και στηριζόμενη σε διεθνή πρότυπα εγκατάσταση
- vi. Το χαμηλό αρχικό κόστος εξοπλισμού

Η λύση σε όλα τα παραπάνω δεν είναι εύκολή, με τη παρούσα εργασία όμως έγινε ένα πρώτο, σημαντικό, βήμα προς αυτή τη κατεύθυνση, διότι είμαστε σε θέση να:

- i. Παρακολουθούμε σε πραγματικό χρόνο την χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας εν συγκρίσει με τη πρότυπη καμπύλη λειτουργίας
- ii. Εξακριβώνουμε πειραματικά σε πραγματικό χρόνο εάν αναπτύσσεται το φαινόμενο της σπηλαίωσης με αποτέλεσμα την μείωση του βαθμού απόδοσης της και της πρόκλησης εκτεταμένης φθοράς
- iii. Προβλέπουμε βάσει της απόδοσης της αντλίας το πότε η αντλία μας χρειάζεται τακτικό service, το οποίο είναι σημαντικά οικονομικότερο από την αποκατάσταση έκτακτων βλαβών.
- iv. Εξασφαλίζουμε συνεχή διαθεσιμότητα στον πελάτη μας.
- v. Κατασκευάσουμε ένα αντλιοστάσιο βάσει των διεθνών προτύπων.



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

User's Guide

Πρόλογος:

Σκοπός του εγχειριδίου είναι:

- να δώσει στο νέο χρήστη του προγράμματος τη δυνατότητα να πραγματοποιήσει μόνος του ένα πείραμα χρησιμοποιώντας τις εικόνες και ακολουθώντας τα βήματα.
- Να δώσει αναλυτικά τις δυνατότητες και τη φιλοσοφία του προγράμματος με σκοπό να μπορέσει, το πρόγραμμα, να αξιοποιηθεί από το εργαστήριο σαν βάση με τελικό στόχο να αναπτυχθεί μια πλήρης εφαρμογή.

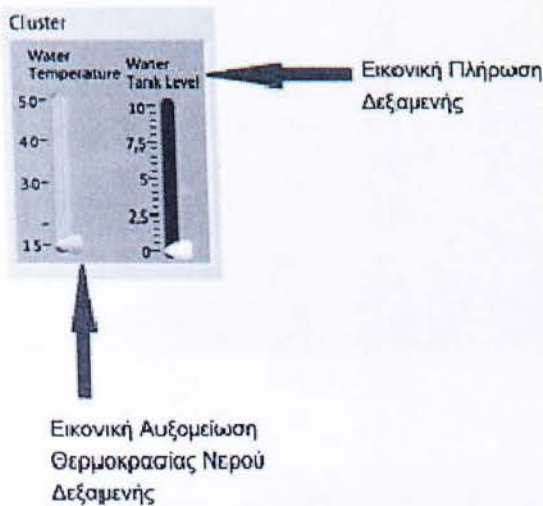




1. Εκκίνηση του προγράμματος

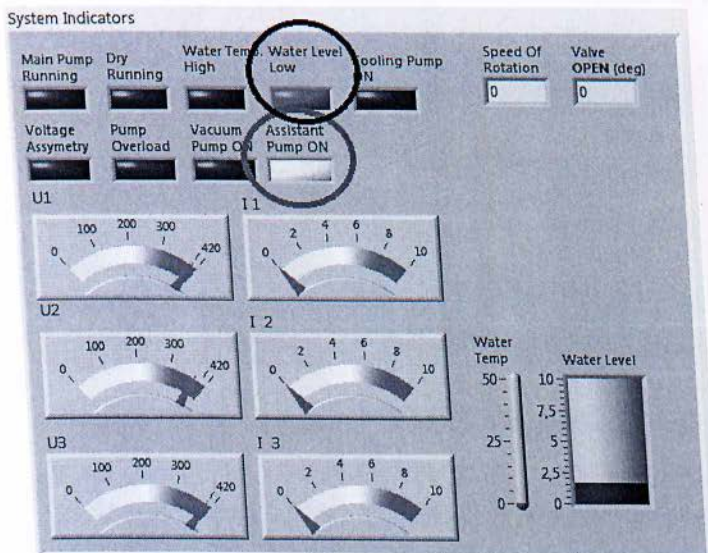
Για να τεθεί σε λειτουργία το πρόγραμμα συλλογής δεδομένων θα πρέπει η στάθμη της δεξαμενής αναρρόφησης να βρίσκεται σε θέση $L \geq 2,5$

Με τα παρακάτω στοιχεία ελέγχου (**ΕΙΚ.1**) αυξομειώνουμε την στάθμη της δεξαμενής ύδατος και τη θερμοκρασία του προς δοκιμή νερού. Τα στοιχεία ελέγχου έχουν τοποθετηθεί ελλείψει των αντίστοιχων αισθητήρων οι οποίοι θα υπάρχουν σε μια πραγματική εγκατάσταση.

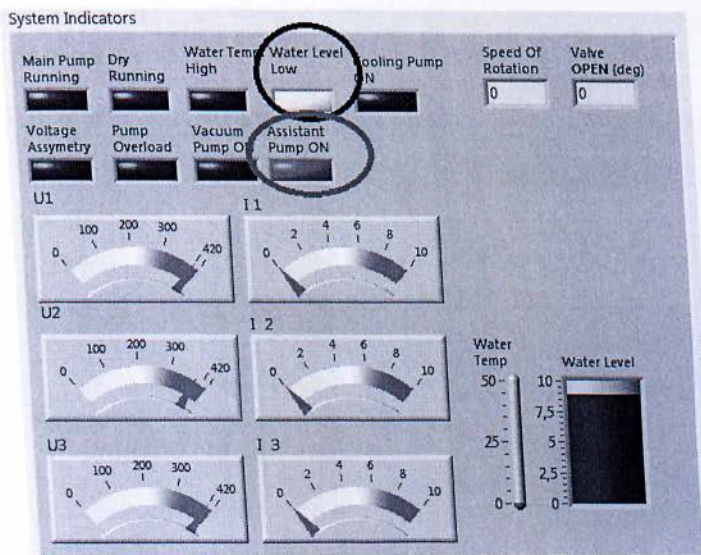


Εικόνα 1 Στοιχεία ελέγχου Στάθμης και Θερμοκρασίας

Τιμή της στάθμης $L \leq 2,5$ ενεργοποιεί **α)** την ενδεικτική λυχνία Χαμηλής Στάθμης (**Water Level Low**) **β)** Θέτει σε λειτουργία την βοηθητική αντλία (**Assistant Pump ON**) (**Εικ. 2α**). Στην **εικόνα 2β** βλέπουμε τις λυχνίες όταν $L > 2.5$



Εικόνα 2α

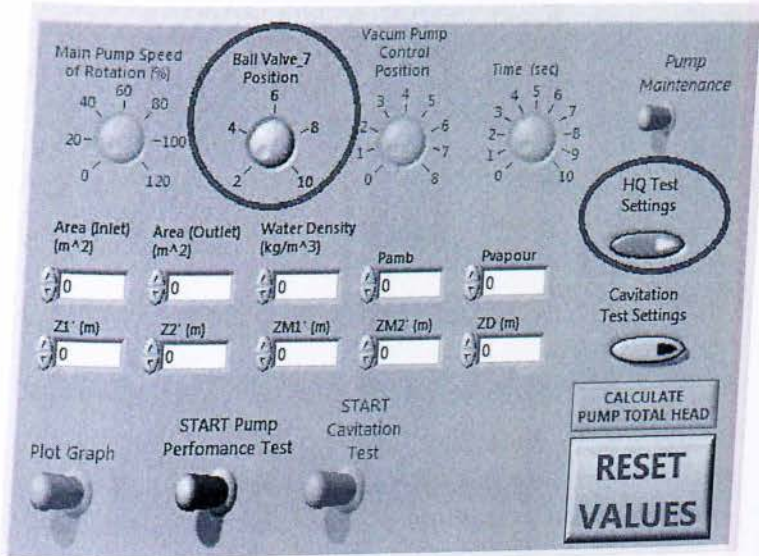


Εικόνα 2β



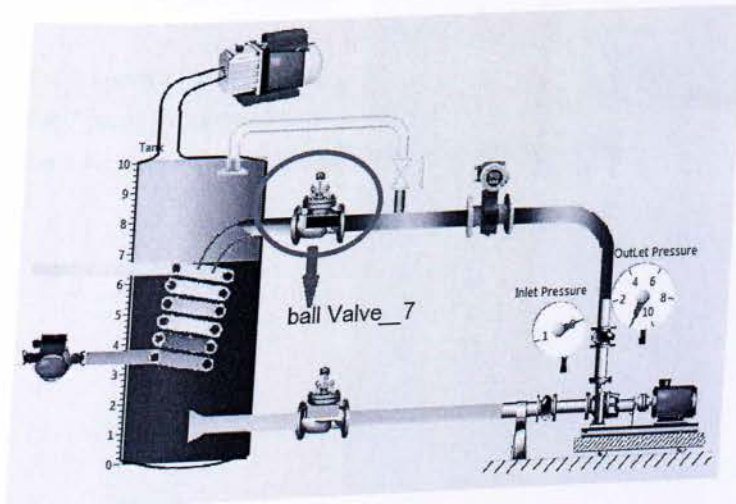
2. Λήψη Πειραματικών Μετρήσεων δοκιμής $H = f(Q)$

Θέτουμε το στοιχείο ελέγχου (Push Button) HQ Test Settings σε θέση ON (εικ.3)



Εικόνα 3

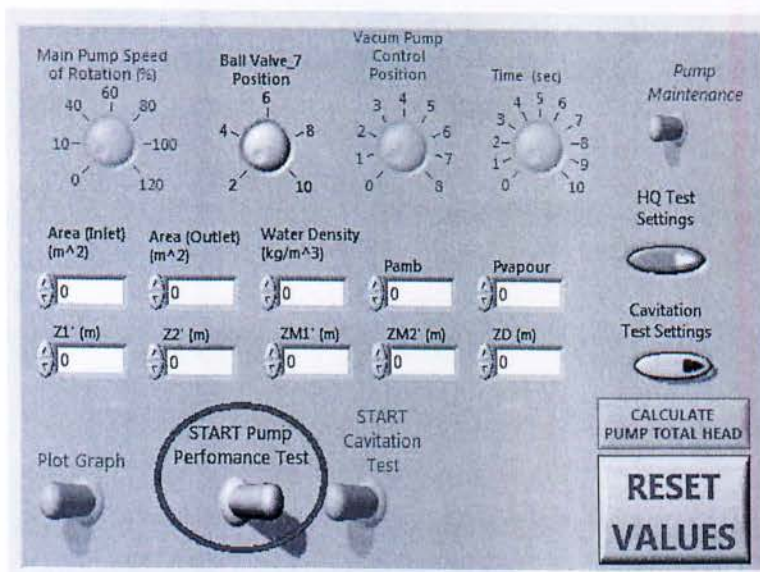
Επιλέγουμε μέσω της βάνας κατάθλιψης (Ball Valve_7) το σημείο μέτρησης (εικ.3) και (εικ.4).



Εικόνα 4



Έναρξη δοκιμής. Θέτουμε τον διακόπτη δύο θέσεων (START Pump Performance Test) στη δεξιά θέση (εικ. 5)



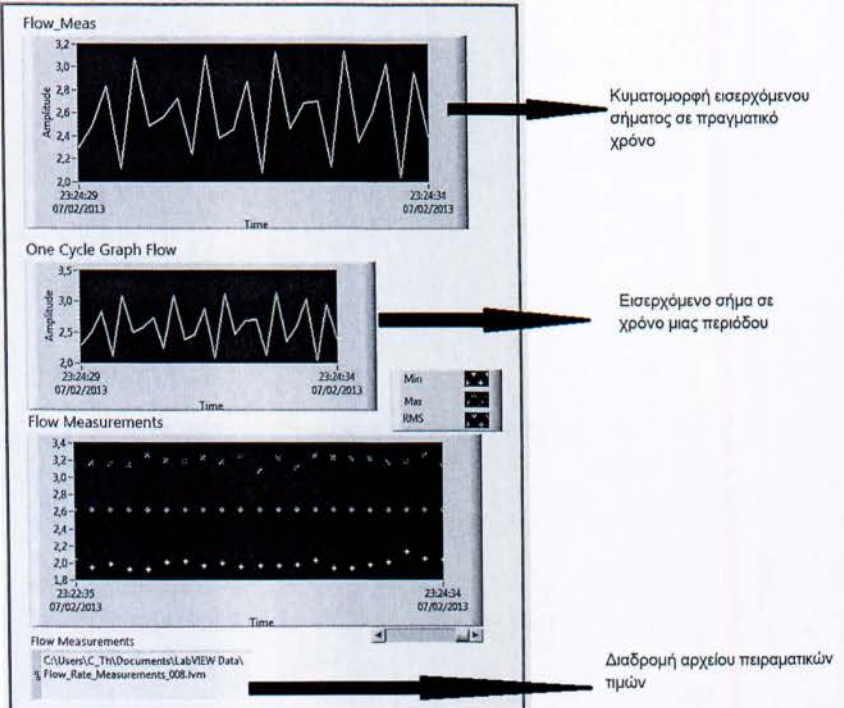
Εικόνα 5

3. Παρατήρηση και καταγραφή πειραματικών δεδομένων σε πραγματικό χρόνο

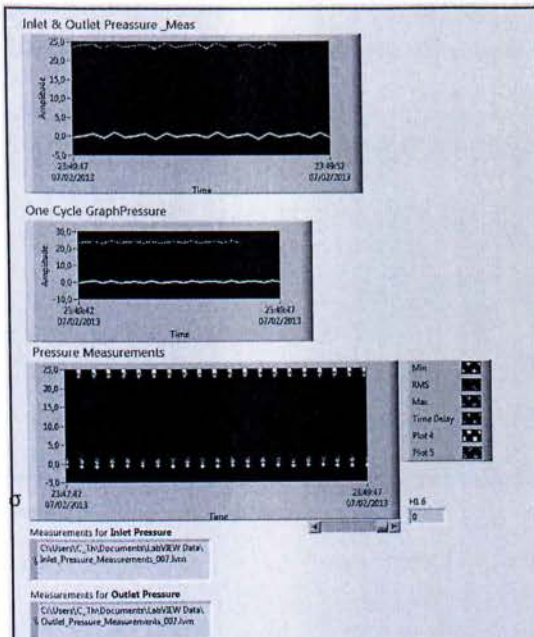
Εικ.6 παροχή (Flow)

Εικ.7 πίεση αναρρόφησης και πίεση κατάθλιψης (Inlet & Outlet Pressure)

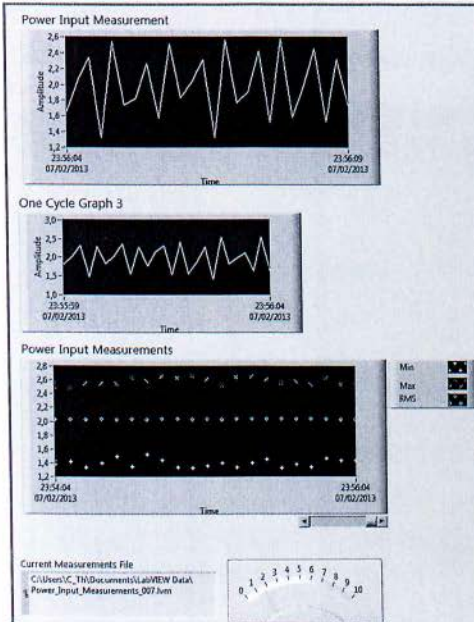
Εικ.8 Καταναλισκόμενη Ισχύς(Power Input Measurement)



Εικόνα 6



Εικόνα 7



Εικόνα 8

Συγκεντρωτικός πίνακας πειραματικών δεδομένων (εικ. 9)

Flow Measurement	Inlet Pressure	Outlet Pressure	Power Input
RMS	RMS	RMS	RMS
2,631112	0,555119	24,005288	2,038225
2,625760	0,567586	24,005546	2,032568
2,626344	0,536941	24,005435	2,037056
2,622183	0,552432	24,005377	2,035100
2,626145	0,576660	24,005718	2,037159
2,626748	0,527632	24,005026	2,033551
2,627495	0,532589	24,005005	2,037923
2,621484	0,552176	24,005985	2,034245
2,629736	0,518123	24,005706	2,036488
2,621739	0,545032	24,005251	2,039179
2,625970	0,546505	24,005779	2,029921

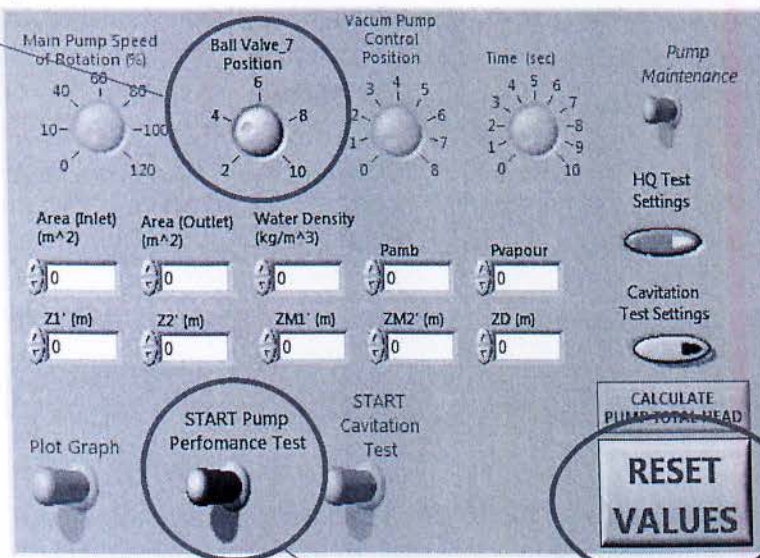
Εικόνα 9



Σημείωση:

Για τη μετάβαση σε διαφορετικό σημείο μέτρησης ακολουθείται η εξής διαδικασία:

επιλέγουμε νέα θέση



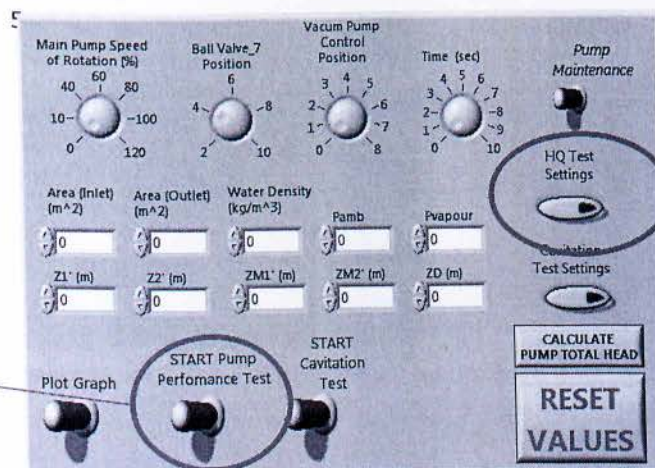
1. Θέση OFF

2. Πατάμε επαναλαμβάνει (2-3 φορές)

Εικόνα 10

4. Υπολογισμοί

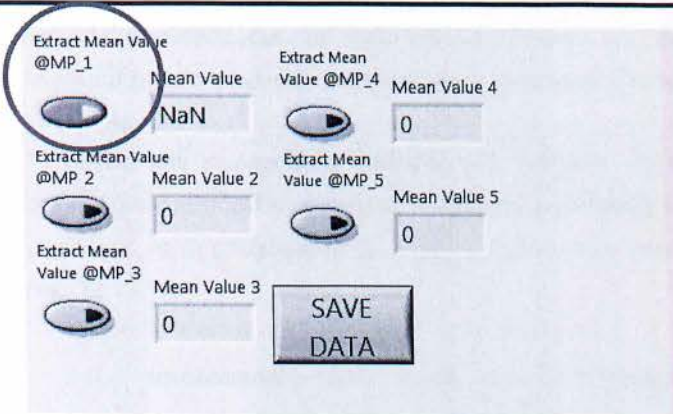
ι. υπολογισμός μέσης τιμής παροχής



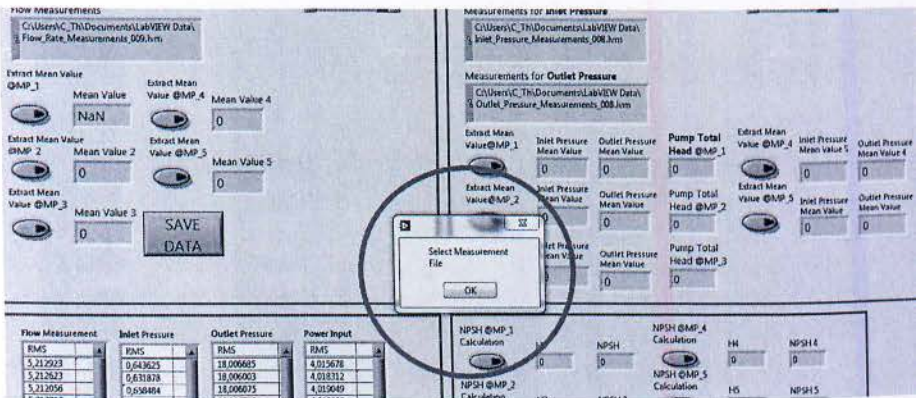
2. Θέση OFF

Θέση OFF

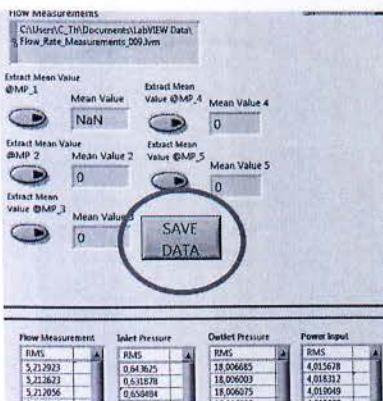
Εικόνα 11



Εικόνα 12



Εικόνα 13



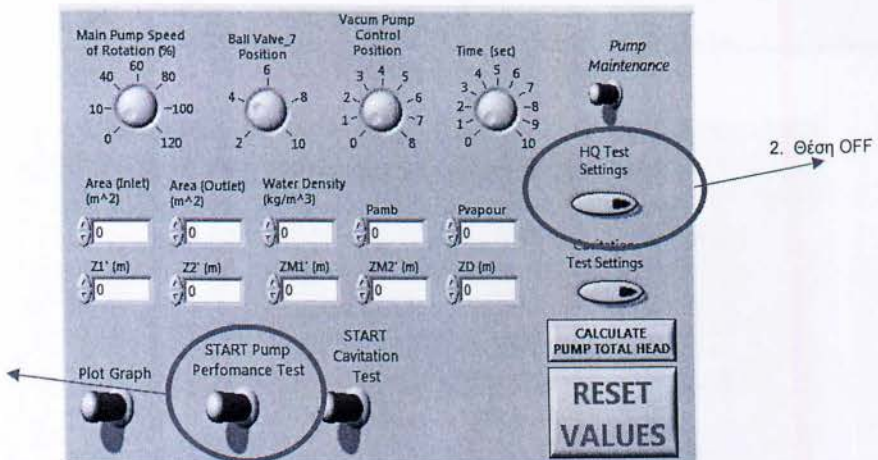
Εικόνα 14



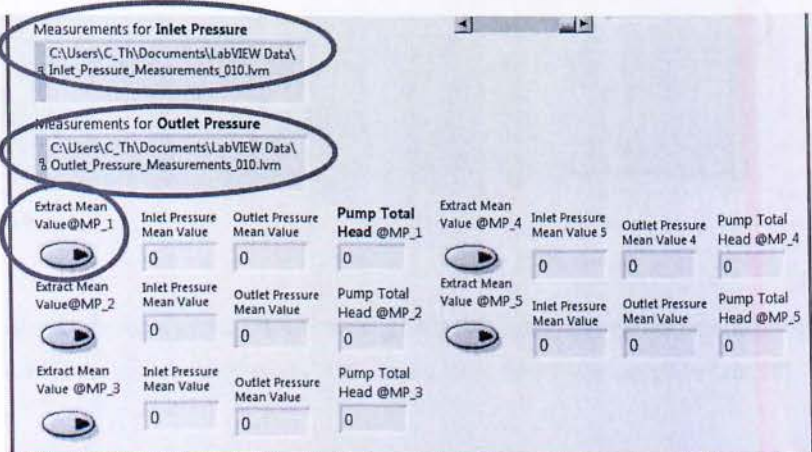
Εφόσον επαναλάβουμε τη παραπάνω διαδικασία και για τα πέντε (ή λιγότερα) σημεία μέτρησης, αποθηκεύουμε τα δεδομένα πατώντας το κουμπί **save data**.

Το αρχείο των πειραματικών δεδομένων (η διαδρομή του οποίου φαίνεται στην εικόνα 6) μπορεί να ανοίξει με το πρόγραμμα Notepad των Windows και μπορούμε να το επεξεργαστούμε ανάλογα πριν υπολογίσουμε την μέση τιμή (εικ. 12,13,14).

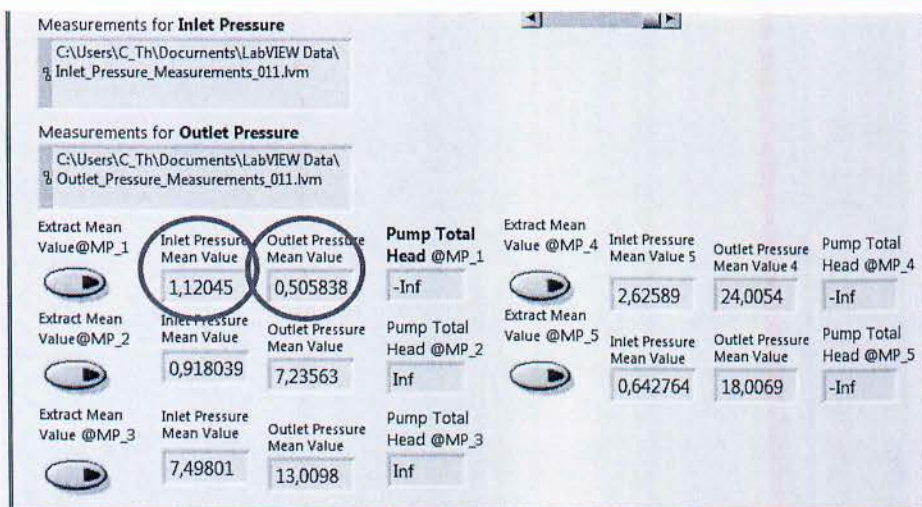
- ii. υπολογισμός μέσης τιμής πίεσης αναρρόφησης πίεσης κατάθλιψης και μανομετρικού ύψους.



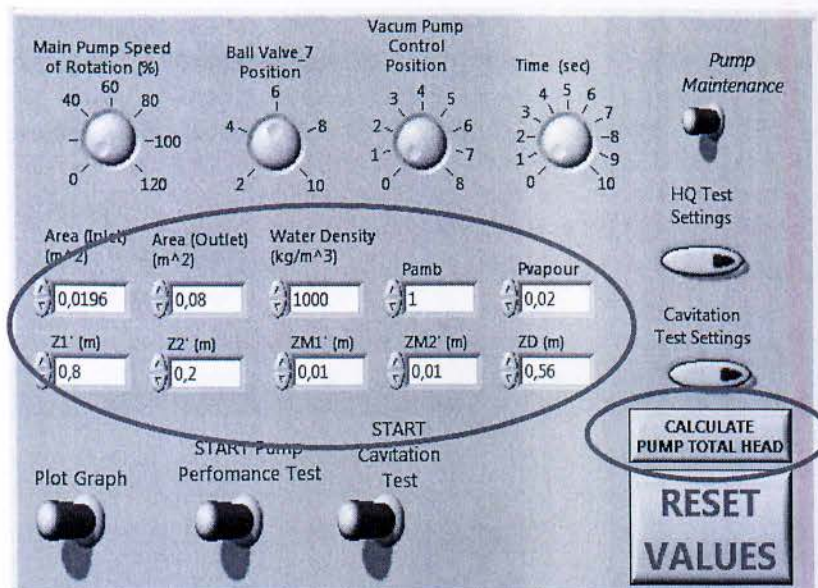
Εικόνα 15



Εικόνα 16

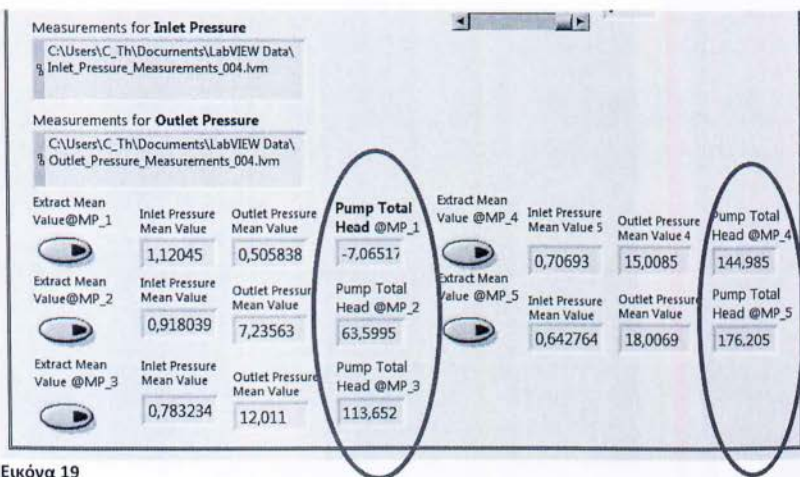


Εικόνα 17



Εικόνα 18

υπολογισμός των μέσων τιμών πίεσης αναρρόφησης και πίεσης κατάθλιψης (εικ.17) θέτουμε τις αντίστοιχες τιμές των χαρακτηριστικών μεγεθών (εικ.18)

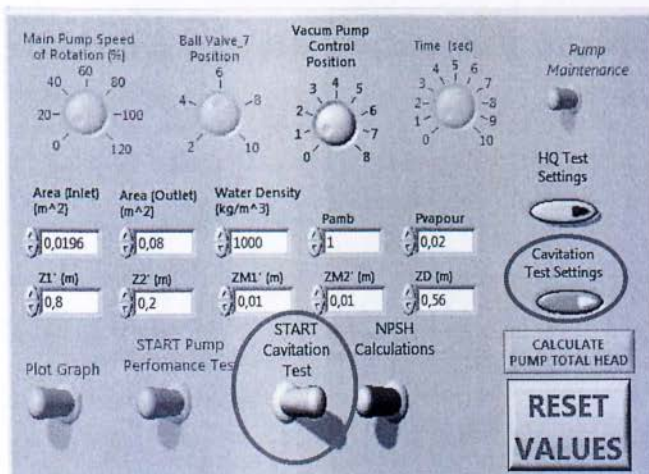


Εικόνα 19

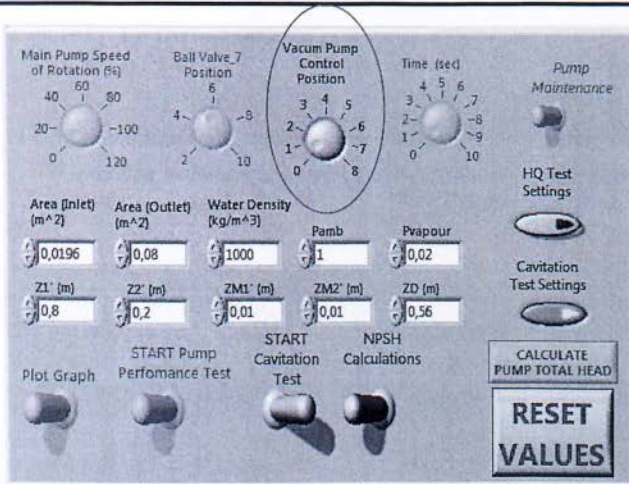
iii. Υπολογισμός NPSH

Για τον υπολογισμό της τιμής του NPSH μετρούμενα μεγέθη είναι:

- Παροχή
- Πίεση Αναρρόφησης
- Πίεση Κατάθλιψης

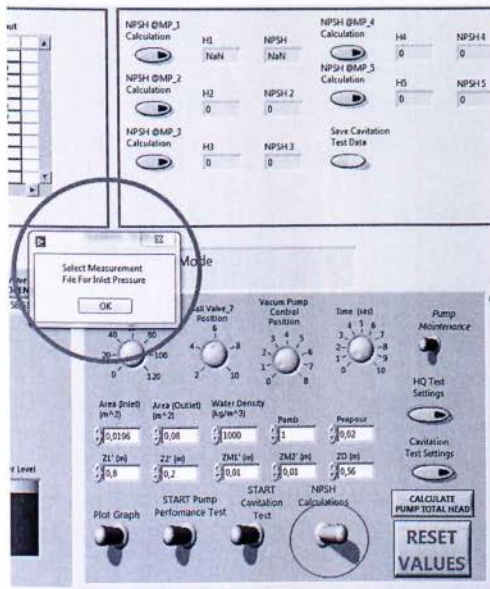


Εικόνα 20



Εικόνα 21

Μεταβάλλοντας τη θέση της αντλίας κενού (*Vacuum Pump Control Position*) δημιουργούμε τα αντίστοιχα σημεία λήψης μετρήσεων (*Measuring Points*)



Εικόνα 22



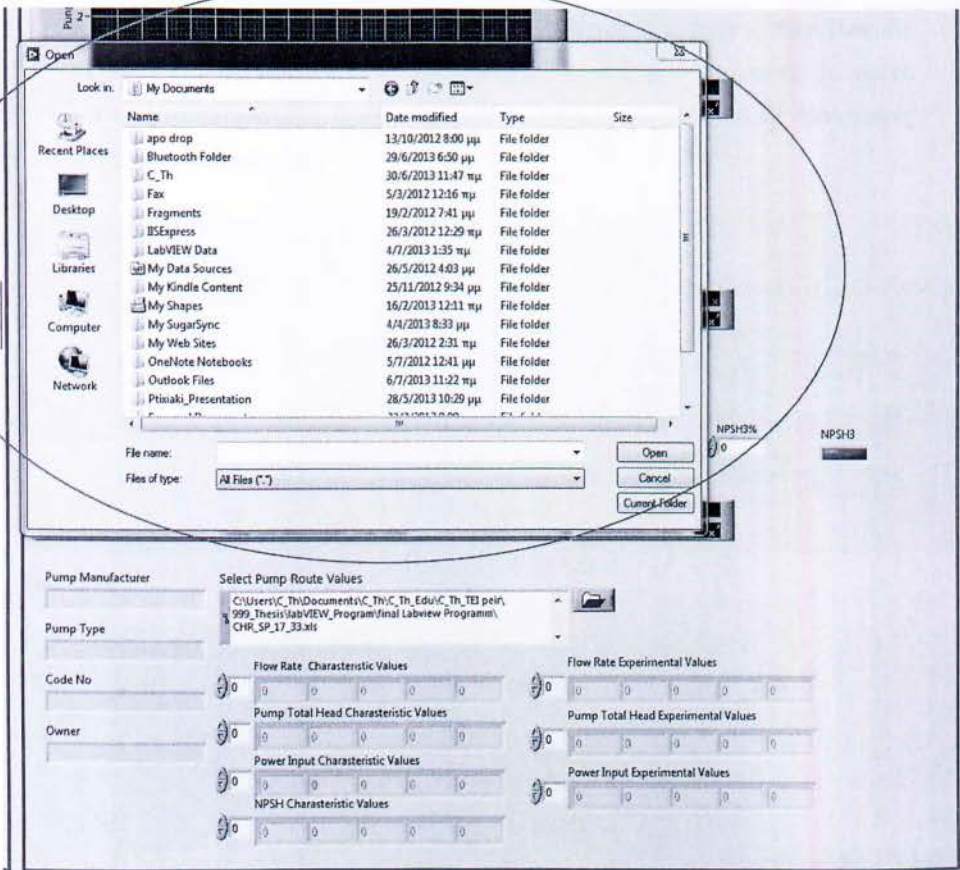
5. Οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων

Σκοπός της παρούσας διαδικασίας είναι να προβάλουμε στον πίνα αποτελεσμάτων τις πειραματικές μετρήσεις, τις οποίες λάβαμε με παραπάνω διαδικασίες, και να τις συγκρίνουμε με τις εργοστασιακές τιμές προς δικιμή αντλίας.

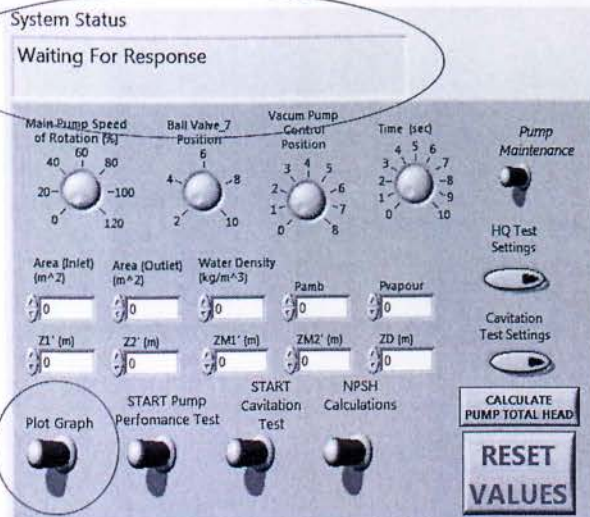
Field	Unit	Value 1	Value 2	Value 3	Value 4	Value 5
Pump Manufacturer						
Pump Type						
Code No						
Owner						
Select Pump Route Values	%					
Flow Rate Characteristic Values	m³/s	0	0	0	0	0
Pump Total Head Characteristic Values	m	0	0	0	0	0
Power Input Characteristic Values	kW	0	0	0	0	0
NPSH Characteristic Values	m	0	0	0	0	0
Flow Rate Experimental Values	m³/s	0	0	0	0	0
Pump Total Head Experimental Values	m	0	0	0	0	0
Power Input Experimental Values	kW	0	0	0	0	0

Εικόνα 23

Επιλέγουμε τις εργοστασιακές τιμές (ΕΙΚ. 23 & 24)



Εικόνα 24



Εικόνα 25



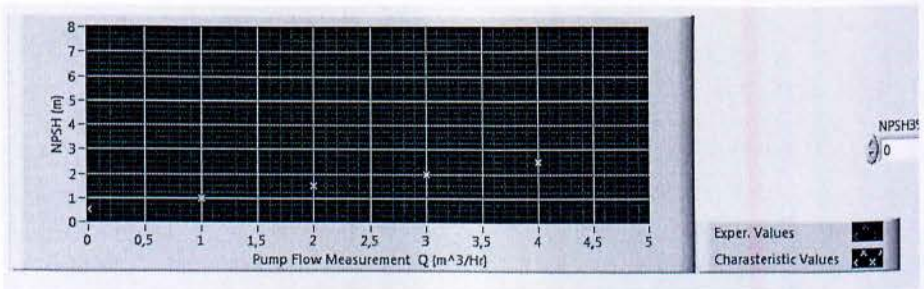
Κρατάμε παρατεταμένα τον διακόπτη **Plot Graph** στην δεξιά θέση έως ότου εμφανιστεί στο κείμενο ελέγχου (**System Status**) η έκφραση **See Results Table**. Εν συνεχεία (**εικ.26,27,28,29**) εμφανίζονται τα πειραματικά δεδομένα και οι χαρακτηριστικές τιμές στους αντίστοιχους πίνακες και τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις.

Pump Manufacturer: Grundfos
 Pump Type: CR 5-12
 Code No: 9647561
 Owner: ΤΕΙ Πειραιώς

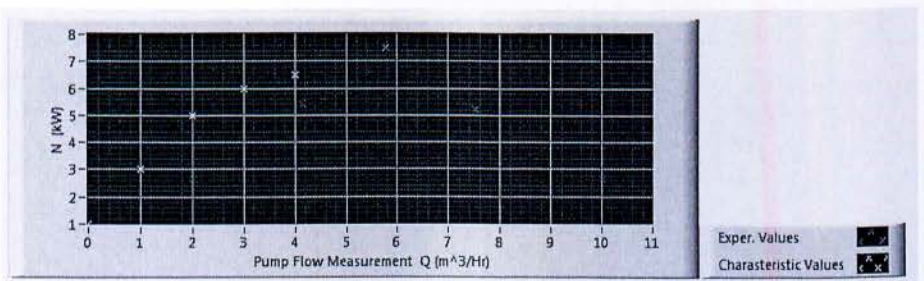
Select Pump Route Values
 C:\Users\c_th\Documents\c_th\c_th_Edu\c_th_TEI\peir\999_Thesis\labVIEW_Program\final Labview Program\CHR_CR_5_12.xls

Flow Rate Characteristic Values	Flow Rate Experimental Values
0 1 2 3 4	0 2,626 5,212 7,498 5,399 2,626
Pump Total Head Characteristic Values	Pump Total Head Experimental Values
3,2 3,4 3,6 3,8 4	0 -7,065 63,599 113,652 144,985 176,205
Power Input Characteristic Values	Power Input Experimental Values
1 3 5 6 6,5	0 10,007 7,523 5,772 4,16 2,033
NPSH Characteristic Values	
0,5 1 1,5 2 2,5	

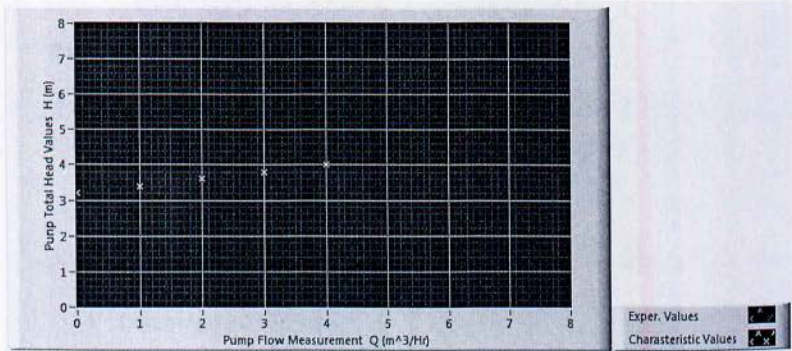
Εικόνα 26



Εικόνα 27



Εικόνα 28



Εικόνα 29

Στοιχεία Επικοινωνίας:e-mail : c.d.theocharis@gmail.com

mob. : +30.6974.07.36.30

phone : +30.210.66.23.429



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

- Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης www.iso.org
- Unicef www.unicef.org
- National Instruments www.ni.com
- Grundfos www.grundfos.com
- ABB www.abb.com
- Omega www.omega.com
- Siemens www.siemens.com
- Τεχνικό Πανεπιστήμιο Darmstadt <http://www.tu-darmstadt.de/>
- Τεχνικό Πανεπιστήμιο Stuttgart <http://www.uni-stuttgart.de>
- Πανεπιστήμιο Huddersfield <http://www.hud.ac.uk/>
- ITT flygt www.itt.com
- PWT pumps <http://www.pentair.com/>



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. **Δρ. Περικλής Κορωνάκης** *Μηχανική Ρευστών 2001*, εκδόσεις ΙΩΝ.
2. **Δημήτριος Ε. Παπαντώνης** *Υδροδυναμικές Μηχανές Αντλίες Υδροστρόβιλοι, Έκδοση 2^η*, Εκδόσεις Συμεών.
3. **Άγγελος Θ. Παπαϊωάννου** *Μηχανική των Ρευστών ΤΟΜΟΣ Ι β' έκδοση*.
4. **Δημήτριος Ε. Παπαντώνης** *Υδροδυναμικές Εγκαταστάσεις 1998*, Εκδόσεις Συμεών.
5. **Κωνσταντίνος Β. Ακριτίδης** *Αντλίες (τύποι, επιλογή, λειτουργία, εγκατάσταση)*, Εκδόσεις βιβλίων Γιαχούδη-Γιαπούλη.
6. **Γ. Μπεγλερές Δ. Παπαντώνης Σ. Τσαγκάρης** *Τεχνικές Μετρήσεις Ρευστοδυναμικών Μηχανών Αθήνα 1998*, Εκδόσεις Σημεών
7. **Σωκράτης Τσαγγάρης** *Μηχανική των Ρευστών Αθήνα 2005*, Εκδόσεις Σημεών
8. **International Standard Organisation** *Rotodynamic pumps-Hydraulic Performance Acceptance Tests- Grades 1 and 2 BS EN ISO9906:2000*
9. **Grundfos Research and Technology Library** *The Centrifugal Pump, Grundfos.com Library*
10. **Jean-Pierre Franc Jean Marie Michel** *Fundamentals of Cavitation 2005* Kluwer Academic Publishers
11. **John Essick** *Hands-on Introduction to LabVIEW for scientists and Engineers*, Oxford University Press
12. **Robert H. King** *Introduction to Data Acquisition with LabVIEW Second Edition*