



Τεχνολογικό Ίδρυμα Κρήτης

# Σπουδάστρια: Ειρήνη Κουντούπη



**Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών**

**Τμήμα Μηχανολογίας**

**Αριθμός Μητρώου 4672**

**Τίτλος πτυχιακής εργασίας:**

**Μελέτη του φαινομένου σπηλαίωσης σε  
φυγοκεντρική αντλία**

**Επιβλέπον Καθηγήτρια**

**Μεταξά Ελένη**

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπον καθηγήτριά μου κα. Ελένη Μεταξά για την καθοδήγηση και τη βοήθεια σε κάθε φάση αυτής της πτυχιακής εργασίας. Καθώς επίσης και τα υπόλοιπα μέλη του εργαστηρίου Υδροδυναμικών Μηχανών κ. Βασίλη Κουρούκλη και κ. Σταύρο Βασιλοκωνσταντάκη, η συνεισφορά των οποίων ήταν ιδιαίτερα σημαντική για την υλοποίηση των πειραμάτων. Θέλω να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στη μητέρα μου και να της αφιερώσω την πτυχιακή για τη διαρκή της υποστήριξη, που επέτρεψε την επιτυχή διεκπεραίωση των σπουδών μου. Τέλος θέλω να ευχαριστήσω το συνάδελφό μου Άγγελο που ήταν συνοδοιπόρος σε όλα αυτά τα όμορφα φοιτητικά μου χρόνια.

Ειρήνη Κουντούπη,

Ηράκλειο 24 Μαρτίου 2012

# Περιεχόμενα

Κεφάλαιο .....	4
Εισαγωγικά στοιχεία .....	4
1.1 Η ιστορία των αντλιών στην πάροδο των χρόνων .....	4
Κεφάλαιο .....	10
Γενικά περί αντλιών .....	10
2.1 Ορισμός της αντλίας .....	10
2.2 Βασικές έννοιες .....	10
2.3 Κατάταξη των αντλιών .....	11
2.4 Βασικά μεγέθη αντλιών .....	11
2.5 Χαρακτηριστικές καμπύλες αντλίας.....	14
2.6 Νόμοι ομοιότητας.....	18
2.7 Ειδική ταχύτητα .....	20
Κεφάλαιο .....	21
Φυγόκεντρες αντλίες .....	21
3.1 Ορισμός φυγόκεντρης αντλίας .....	21
3.2 Αρχή λειτουργίας.....	22
3.3 Δομή και σχεδιασμός.....	22
3.4 Έδρανα.....	30
3.5 Τύποι και εφαρμογές.....	31
Κεφάλαιο .....	34
Σπηλαίωση.....	34
4.1 Ορισμός σπηλαίωσης. ....	34
4.2 Περιγραφή ανάπτυξης σπηλαίωσης .....	34
4.3 Προϋποθέσεις εμφάνισης σπηλαίωσης.....	36
4.4 Θέσεις εκδήλωσης σπηλαίωσης. ....	36
4.5 Συμπτώματα της σπηλαίωσης. ....	37
4.6 Μέτρηση κρίσιμου ύψους σπηλαίωσης $NPSH_r$ .....	39
Κεφάλαιο .....	43
Πειραματικός σχεδιασμός .....	43
5.1 Γενικά. ....	43

5.2 Προδιαγραφές αντλίας.....	46
5.3 Χαρακτηριστικά αντλίας εργαστηρίου.....	46
5.4 Πειραματική διαδικασία.....	46
5.4.1 Καθορισμός παραμέτρων έναρξης σπηλαίωσης.....	47
5.4.2 Υπολογισμός παραμέτρου σπηλαίωσης μέσω της σχέσης Anderson βάση ορισμού.....	55
5.4.3 Υπολογισμός παραμέτρου σπηλαίωσης βάση κατασκευαστικών χαρακτηριστικών.....	61
5.5 Τελικά συμπεράσματα.....	62
Βιβλιογραφία.....	64

# Κεφάλαιο

# 1

## Εισαγωγικά στοιχεία

---

### 1.1 Η ιστορία των αντλιών στην πάροδο των χρόνων

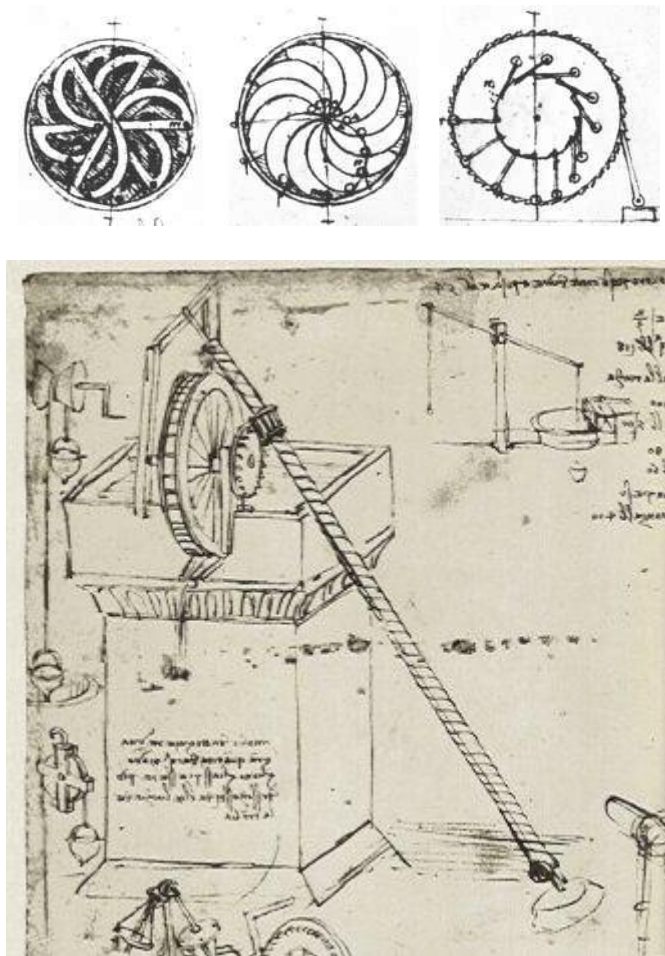
Όσο και αν αναπτύσσεται η γνώση του ανθρώπου και η τεχνολογία, πάντα θα είναι ένα βήμα πίσω από τον δημιουργό του. Η πρώτη και η τελειότερη αντλία που δουλεύει ασταμάτητα για δεκάδες χρόνια είναι η καρδιά. Αυτορυθμιζόμενη, αθόρυβη, αυτοεπισκευαζόμενη. Και ενώ ένα θαύμα λειτουργούσε μέσα στον άνθρωπο, αυτός για την εξυπηρέτηση των καθημερινών αναγκών του κατασκεύαζε και εξέλιξε τις τεχνητές αντλίες ξεκινώντας από πρωτόγονες μορφές.

Το νερό είναι απαραίτητο αγαθό για τη βιωσιμότητα της ανθρωπότητας. Έτσι η ανάγκη για την παροχή οδήγησε τον άνθρωπο στην εύρεση και την κατασκευή χιλιάδων συσκευών που θα μπορούσαν να ονομαστούν αντλίες. Οι συσκευές αυτές κινούντουσαν με τη βοήθεια του ανθρώπου, των ζώων ή του ανέμου.

Στην Αίγυπτο τον 17<sup>ο</sup> αιώνα π.χ. χρησιμοποιούσαν αντλίες με ατέρμονη αλυσίδα που ανύψωναν το νερό από το βάθος μέχρι 90 μέτρα. Στην αρχαία Ελλάδα τον 4<sup>ο</sup> αιώνα π.Χ. την εποχή του Αριστοτέλη υπήρχαν σε χρήση πρωτόγονες αντλίες. Παλινδρομικές αντλίες αναφέρεται ότι χρησιμοποιούνταν την εποχή του Καίσαρα Αύγουστου. Οι Ρωμαίοι πρώτοι κατασκεύασαν υδροστρόβιλους με τη μορφή υδραυλικού τροχού κυρίως για την κίνηση

υδρόμυλων. Ήταν η πρώτη αξιοποίηση του υδροδυναμικού για την παραγωγή ενέργειας.

Ο εφευρέτης της φυγόκεντρης αντλίας δε μπορεί να καθοριστεί με βεβαιότητα. Κάποια σχέδια του Leonardo Da Vinci χρονολογούνται από τον 15<sup>ο</sup> αιώνα μΧ. Δείχνουν πως η φυγόκεντρη δύναμη η οποία δρα επάνω στο νερό που περιστρέφεται σε μια καμπύλη δίοδο, μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να ανυψώσει το νερό σε συγκεκριμένο ύψος. (εικ.1.1) Μάλλον η φυγόκεντρη αντλία ανακαλύφθηκε από τον Ιταλό Jordan του οποίου το σχέδιο έγινε στο τέλος του 17<sup>ου</sup> αιώνα μΧ.

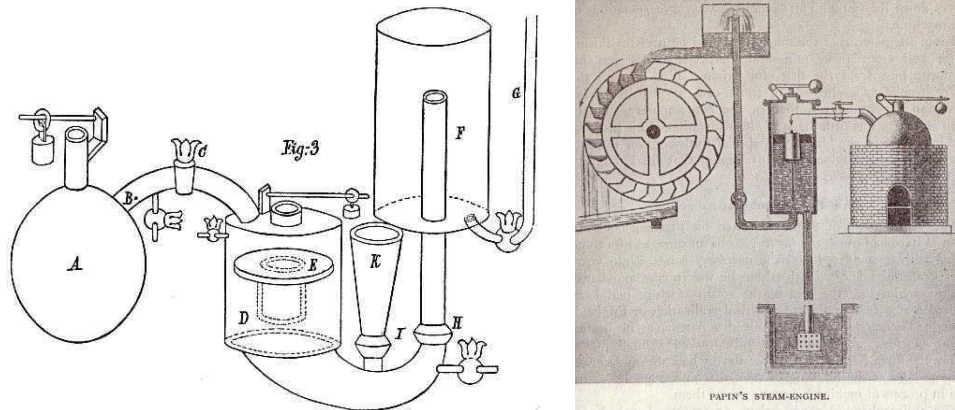


Εικ. 1.1

Οι πρώτες μηχανές που κατατάσσονται στις υδροδυναμικές μηχανές είναι οι αντλίες (φυγόκεντρες) και οι ανεμιστήρες του Γάλλου Φυσικού Denis Papin. (εικ.1.2) Το 1687 παρουσίασε ένα πειραματικό μοντέλο του οποίου η πτερωτή είχε δύο πλήρως ακτινικά επίπεδα πτερύγια. Το 1705 κατασκεύασε μοντέλο σε πραγματική κλίμακα στο οποίο η πτερωτή είχε περισσότερα πτερύγια και περιεβάλετο από κέλυφος. Βασικό πρόβλημα των αντλιών εκείνης της εποχής ήταν η αποφυγή εισχώρησης αέρα στο εσωτερικό της αντλίας που διέκοπτε τη

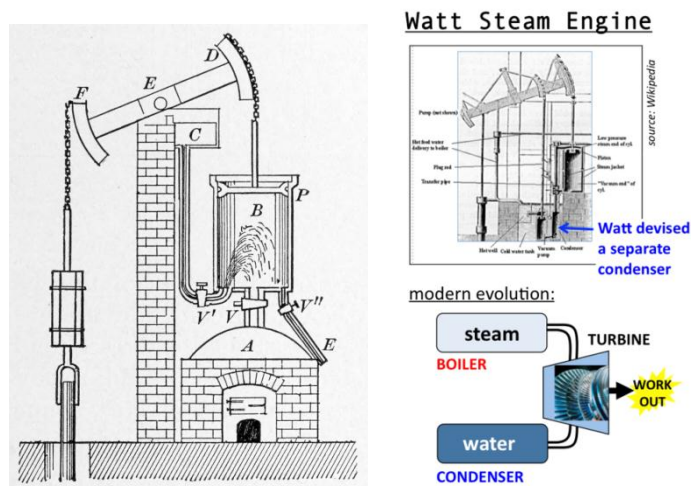


λειτουργία της. Ένα άλλο πρόβλημα ήταν η μη επίτευξη μεγάλων ταχυτήτων περιστροφής της πτερωτής λόγω της μη ύπαρξης αξιόπιστων ιμάντων και εδράνων την εποχή εκείνη.



Εικ.1.2

Το 1712 ο Newcomen (Μ.Βρετανία) κατασκεύασε μια παλινδρομική αντλία για την άντληση νερού από ένα ορυχείο. Η κίνησή της προερχόταν από έναν ατμοκύλινδρο με συμπύκνωση ατμού που χρησιμοποιούσε την ατμοσφαιρική πίεση για εξάσκηση της απαραίτητης δύναμης στο διωστήρα. (εικ.1.3) Το 1839 ήταν το επόμενο βήμα στην εξέλιξη των φυγόκεντρων αντλιών, όπου ο W.D. Andrews στις Η.Π.Α. πρόσθεσε σπειροειδές κέλυφος γύρω από τη φυγόκεντρη πτερωτή. Ο διάχυτης με πτερύγια παρουσιάστηκε από τον O. Reynolds το 1875. Από το 1887 αρχίζει η βιομηχανική παραγωγή φυγόκεντρικών αντλιών από μία αγγλική εταιρία, την Mather & Platt. Ενώ την επόμενη δεκαετία ιδρύονται οι εταιρίες κατασκευής αντλιών και υδροδυναμικών μηχανών, οι οποίες εξακολουθούν να δραστηριοποιούνται μέχρι σήμερα. Κάποιες από αυτές είναι οι Ratteau, Sulzer, Parsons, de Laval, Allis Chalmer, Worthington.

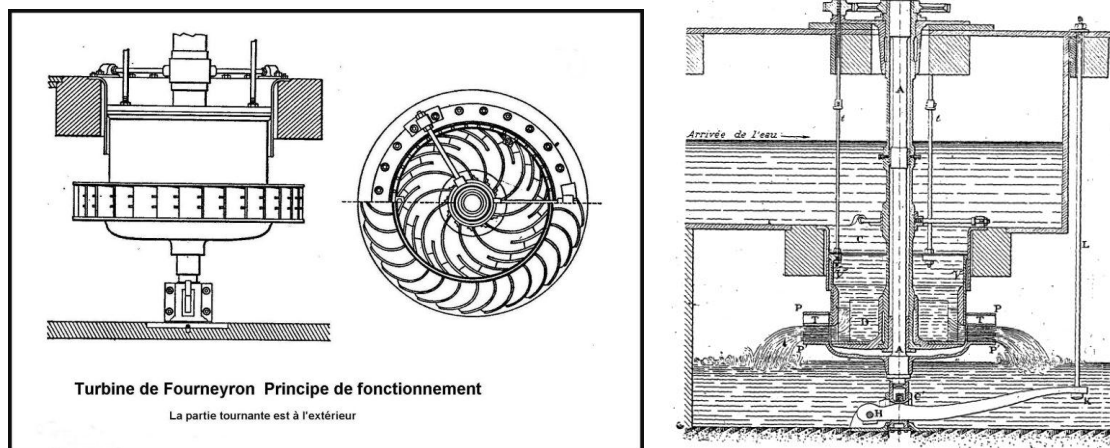


Εικ.1.3

Ο Γάλλος καθηγητής Claude Burdin εισήγαγε πρώτος τον όρο turbine από το λατινικό όρο turbo και συνέβαλε στην κατανόηση της αρχής λειτουργίας των υδροστρόβιλων και ιδιαίτερα στην διατύπωση των βασικών κανόνων της καλής σχεδίασης και λειτουργίας:

- Η μορφή των πτερυγίων του δρομέα πρέπει να εξασφαλίζει τη ροή χωρίς κρούση.
- Η ταχύτητα του νερού στην έξοδο του υδροστροβίλου πρέπει να είναι η μικρότερη δυνατή.

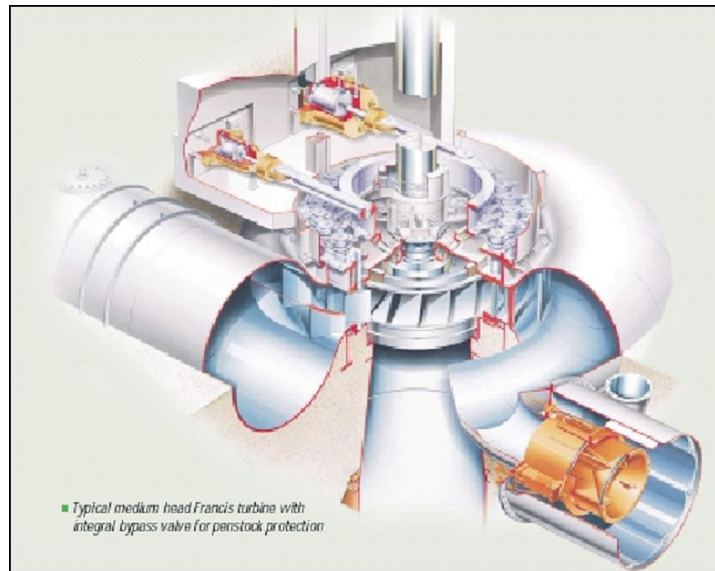
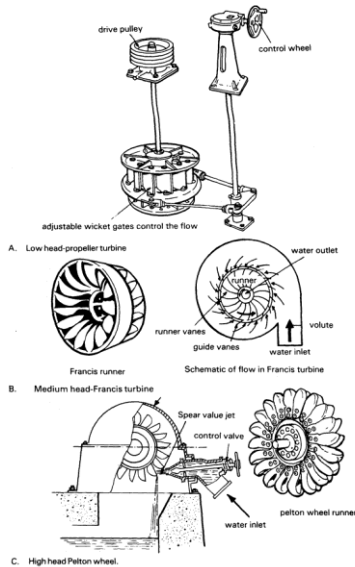
Όμως ο πρώτος σύγχρονος υδροστρόβιλος θεωρείται αυτός που σχεδιάστηκε από τον Γάλλο Benoit Fourneyron, μαθητή του Claude Burdin, τον οποίο παρουσίασε στο Παρίσι το 1827. (εικ.1.4) Πρόκειται για υδροστρόβιλο κατακόρυφου άξονα, φυγόκεντρης ροής και ολικής προσβολής. Οι υδροστρόβιλοι του ίδιου γνώρισαν σημαντική επιτυχία και διάδοση, και γι' αυτό το λόγο τυποποιήθηκαν με τα ακόλουθα λειτουργικά χαρακτηριστικά: Ισχύς  $P=40$  HP, υδραυλική πτώση  $H$  μέχρι 114 mΣΥ, παροχή  $Q=110$  m<sup>3</sup>/h και ταχύτητα περιστροφής  $n=2300$  RPM. Επίσης είναι οι πρώτες μηχανές που χαρακτηρίστηκαν ως στρόβιλοι, turbine. Συνολικά κατασκευάστηκαν 100 περίπου υδροστρόβιλοι τύπου Fourneyron που εγκαταστάθηκαν σε Η.Π.Α. και Ευρώπη.



Εικ.1.4

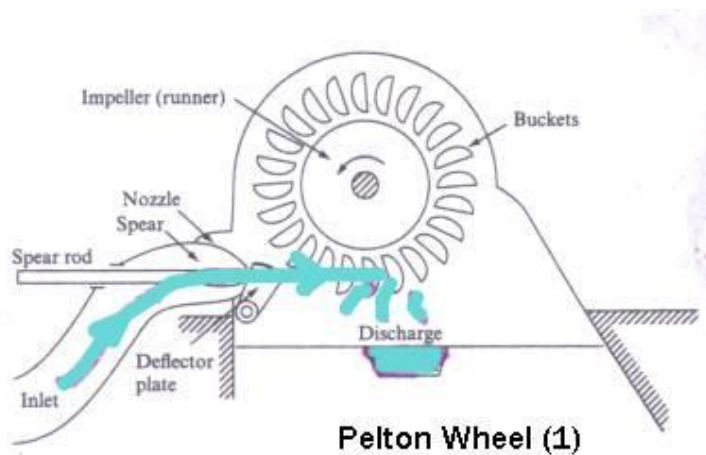
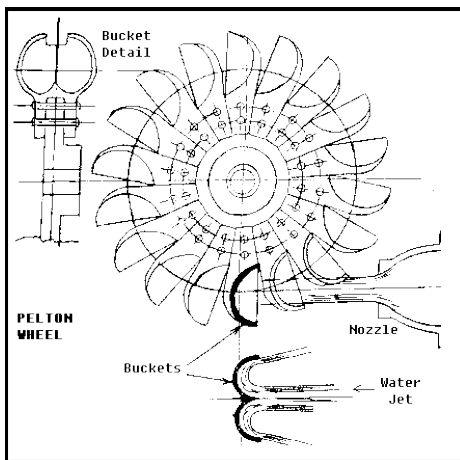
Το 1850 ο μηχανικός James B. Francis με την τοποθέτηση στεφάνης ρυθμιστικών πτερυγίων μέσω της οποίας επιτυγχάνεται ρυθμιστική παροχή βελτίωσε τον υδροστρόβιλο φυγόκεντρης ροής τύπου Fourneyron, καθιερώνοντας τον ως την καλύτερη σχεδίαση για μεσαίες τιμές της υδραυλικής πτώσης. ( $H=50-500$  mΣΥ περίπου) (εικ.1.5)





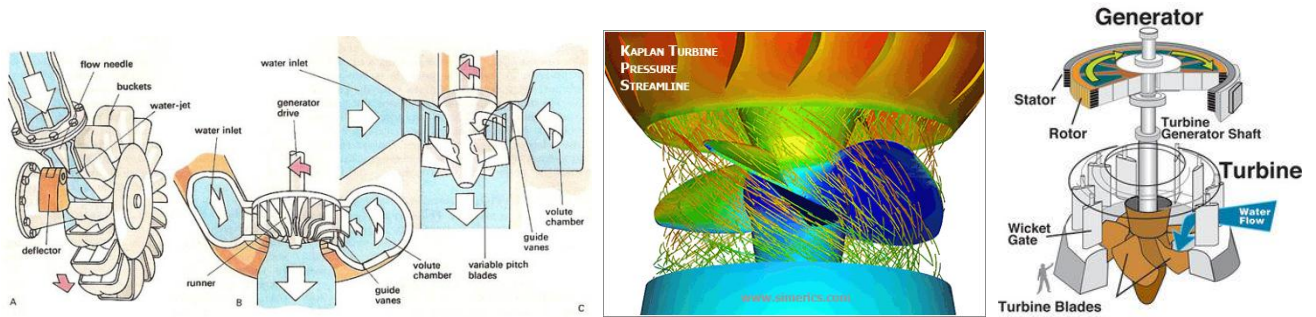
Εικ.1.5

Το 1880 ο Αμερικανός μηχανικός Lester Pelton σχεδιάζει το διπλό σκαφίδιο μέσω του οποίου επιτυγχάνεται σταδιακή μεταβολή της διεύθυνσης της ροής κατά 180<sup>ο</sup> περίπου, καθώς και το ακροφύσιο τροφοδοσίας με ρυθμιστική βελόνη. (εικ.1.6) Ο υδροστρόβιλος τύπου Pelton είναι κατάλληλος για μεγάλες τιμές της υδραυλικής πτώσης και σχετικά μικρές παροχές.



Εικ.1.6

Το 1913 ο Τσέχος Victor Kaplan παρουσίασε το πρώτο μοντέλο που αργότερα πήρε και το όνομά του, έναν υδροστρόβιλο αξονικής ροής με δρομέα τύπου έλικα, δίνοντας στα περύγια του δρομέα τη δυνατότητα μεταβολής της κλίσης τους. (εικ.1.7) Με τον τρόπο αυτό βελτιώνεται το εύρος λειτουργίας και ο βαθμός απόδοσης για λειτουργία σε μερικά φορτία. Ο υδροστρόβιλος αυτός είναι κατάλληλος για την αξιοποίηση μικρών υδραυλικών πτώσεων.



Εικ.1.7

Οι σύγχρονοι υδροστρόβιλοι μεγάλου μεγέθους έχουν φθάσει σήμερα σε οριακά υψηλά επίπεδα από πλευράς βαθμού απόδοσης, επιτυγχάνοντας ολικούς βαθμούς απόδοσης της τάξεως του 94.5%. Έτσι οι προσπάθειες των κατασκευαστών και των ερευνητών στον τομέα των υδροδυναμικών μηχανών στοχεύουν σήμερα κυρίως στη μείωση του όγκου και του κόστους, βελτιώνοντας τη ροή διαμέσου των διάφορων τμημάτων έτσι ώστε να εξασφαλίζεται καλύτερη συμπεριφορά ως προς τη **σπηλαιώση** με υψηλές τιμές του ολικού βαθμού απόδοσης, βελτίωσης της λειτουργίας σε μερικά φορτία.

# Κεφάλαιο

# 2

## Γενικά περί αντλιών

---

### 2.1 Ορισμός της αντλίας

Αντλίες ονομάζονται τα μηχανικά μέσα με τα οποία είναι δυνατό να μεταφερθεί μια ποσότητα υγρού από μια υψομετρική στάθμη σε μια άλλη που βρίσκεται υψηλότερα, ή από ένα χώρο χαμηλής πίεσεως σε άλλο υψηλής πίεσεως. Οι αντλίες τοποθετούνται πάντοτε μεταξύ των σημείων παραλαβής και αποστολής του υγρού και η μεταφορά του οφείλεται στη δημιουργία διαφοράς πίεσεως στις δύο πλευρές του κινούμενου στοιχείου της σωλήνας (έμβολο ή περιστρεφόμενος δρομέας) .

### 2.2 Βασικές έννοιες

**Σωλήνας αναρροφήσεως.** Το τμήμα του σωλήνα από το σημείο παραλαβής του υγρού μέχρι την είσοδό του στην αντλία.

**Σωλήνας καταθλίψεως.** Το τμήμα του σωλήνα από το σημείο εξόδου του υγρού από την αντλία μέχρι το σημείο αποστολής του.

**Σωληνογραμμή.** Το σύνολο των σωλήνων μέσα από τους οποίους ρέει το υγρό.

**Σύστημα αντλήσεως.** Η διάταξη του σωλήνα αναρροφήσεως της αντλίας, του σωλήνα καταθλίψεως και του κινητήρα.

**Αντλητικό συγκρότημα.** Το σύνολο αντλιών (μαζί με τον κινητήρα) που συνεργάζεται για την άντληση του υγρού.

### 2.3 Κατάταξη των αντλιών

Η κατάταξη των αντλιών μπορεί να γίνει βάση:

1. **Την αρχή λειτουργίας τους.** Δυναμικές αντλίες, αντλίες θετικής μετατόπισης, πνευματικές αντλίες, αντλίες ανέλκυσης και εγχυτήρες.
2. **Τη μορφή τους (κατασκευαστικές λεπτομέρειες).** Υποδιαίρεση φυγοκεντρικών αντλιών, υποδιαίρεση αντλιών θετικής μετατόπισης.
3. **Τον αριθμό βαθμίδων τους.** Μονοβάθμιες και πολυβάθμιες.
4. **Τη δυνατότητα αυτόματης αναρρόφησης.** Αντλίες αυτόματης αναρρόφησης και σε αντλίες μη-αυτόματης αναρρόφησης.
5. **Ανάλογα με τον τρόπο εγκατάστασης.** Αντλίες με σταθερή έδραση, αντλίες χωρίς σταθερή έδραση, αντλίες υγρής εγκατάστασης, αντλίες επιφάνειας.
6. **Τον τρόπο κίνησης.** Ηλεκτροκίνητες αντλίες, αεροκίνητες αντλίες, ατμοκίνητες αντλίες, αντλίες με αεριοστρόβιλο, αντλίες με υδραυλικό κινητήρα, αντλίες με μηχανή εσωτερικής καύσης, εξαρτημένες αντλίες, χειροκίνητες και ποδοκίνητες αντλίες, αντλίες με κινητήριο ρευστό (εγχυτήρες).
7. **Το είδος του αντλούμενου υγρού.** Αντλίες νερού και μειγμάτων του, αντλίες καυσίμων και λιπαντικών, αντλίες ποτών και τροφίμων, αντλίες χημικών ουσιών.
8. **Τη συγκεκριμένη χρήση τους.** Ανάλογα με το χρόνο, τη διάρκεια και τον τρόπο χρήσης, σε σχέση με το δίκτυο ή την εγκατάσταση που εξυπηρετούν, αντλίες κυκλοφορίας ή κυκλοφορητές.

### 2.4 Βασικά μεγέθη αντλιών

1. **Παροχή Q:** Ο χρήσιμος όγκος υγρού που αποδίδεται στο στόμιο κατάθλιψης αντλίας στη μονάδα χρόνου. Εκφράζεται σε  $m^3/h$  στο σύστημα S.I.
2. **Ολικό ύψος αντλίας H:** η διαφορά τις ολικής πίεσης του νερού από το στόμιο αναρρόφησης της αντλίας στο στόμιο κατάθλιψης, εκφρασμένη σε mΣΥ.

3. **Ταχύτητα περιστροφής N:** Η ταχύτητα με την οποία περιστρέφεται ο άξονας της αντλίας, άρα και η πτερωτή. Εκφράζεται πάντα σε RPM (Στροφές/λεπτό)
4. **Απορροφούμενη ισχύς  $P_M$ :** Η ισχύς που παραλαμβάνεται από τον άξονα της αντλίας από τον κινητήρα μέσω της στρεπτικής ροής (ισχύς εισόδου), και εκφράζεται σε Watt.
5. **Ωφέλιμη ισχύς  $P_W$ :** Η ισχύς που μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια και μεταφέρεται στο εργαζόμενο μέσο (ισχύς εξόδου). Εκφράζεται σε Watt.
6. **Ολικός βαθμός απόδοσης  $\eta$ :** Το πηλίκο της ωφέλιμης προς την απορροφούμενη ισχύ, και εκφράζεται σε ποσοστό %.
7. **Κρίσιμο ύψος σπηλαιώσης  $NPSH_r$ :** Χαρακτηριστική τιμή πίεσης η οποία απεικονίζει τη δυνατότητα της αντλίας να λειτουργεί χωρίς σπηλαιώση.

#### 2.4.1 Παροχή

1. Θεωρητική παροχή ( $Q_n$ ) είναι ο όγκος του υγρού που θα έπρεπε να αποδίδεται ανά μονάδα χρόνου αν δεν υπήρχαν εσωτερικές ή εξωτερικές διαρροές.
2. Κανονική παροχή ( $Q_n$ ) είναι η αποδιδόμενη παροχή όταν η αντλία εργάζεται με το μέγιστο βαθμό απόδοσής της.
3. Πραγματική παροχή ( $Q$ ) είναι ο όγκος του υγρού που αποδίδεται στο σωλήνα καταθλίψεως στη μονάδα του χρόνου υπό ορισμένο μανομετρικό ύψος  $H$ .
4. Εσωτερική παροχή ( $Q_e$ ) είναι ο όγκος του υγρού που διέρχεται από την πτερωτή στη μονάδα του χρόνου επομένως είναι το άθροισμα της πραγματικής παροχής και των αναπόφευκτων εσωτερικών διαρροών.

$$Q_e = Q + Q_\delta$$

Όπου  $Q_\delta$  είναι πολύ μικρό σε σύγκριση με το  $Q$

#### 2.4.2 Ολικό ύψος

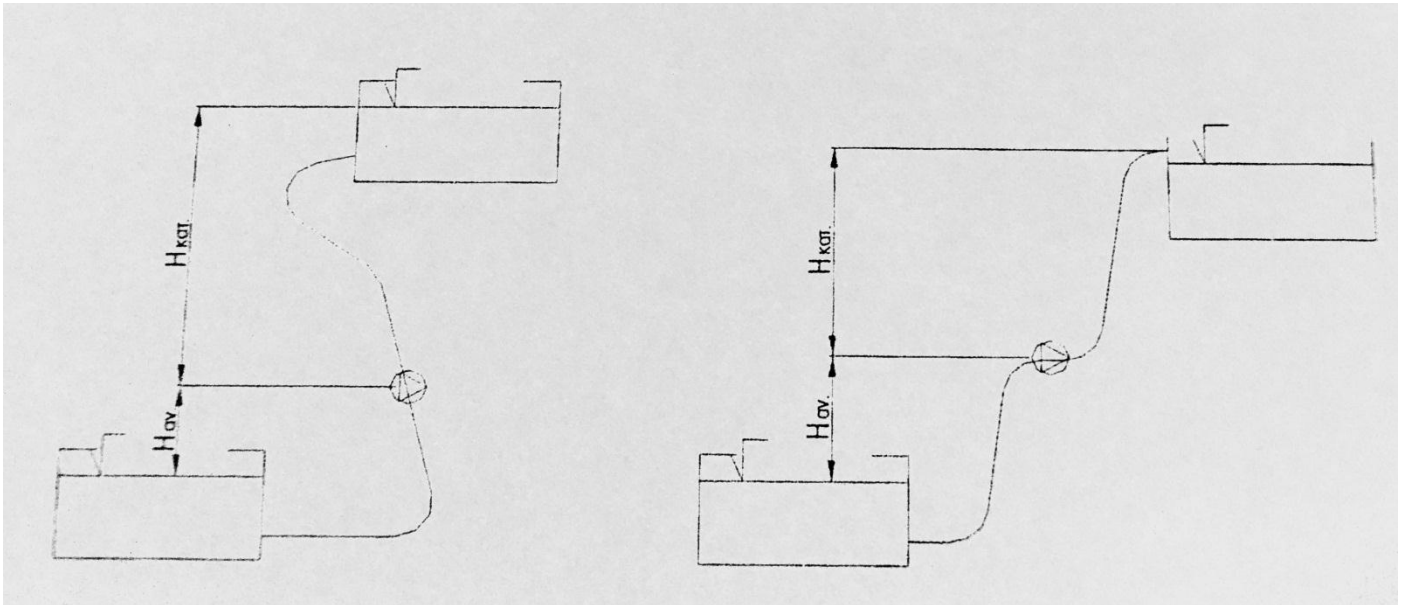
$H = H_{κατ} - H_{αν} =$  Μανομετρικό της αντλίας

Στατικό ύψος αναρρόφησης ( $H_{αν}$ ) είναι η κατακόρυφη απόσταση από την επιφάνεια ρευστού αναρρόφησης μέχρι τον άξονα της αντλίας ή το υψηλότερο

σημείο ανόδου του ρευστού. Μέγιστο ύψος (θεωρητικά 10.33m – πρακτικά 7m περίπου)

$$H_{αν} = f (P_{βαρομ} , T, \gamma , H_f, \text{στεγαν.σωλήνα}, N, \text{αριθμό βαλβίδων})$$

Στατικό ύψος κατάθλιψης ( $H_{κατ}$ ) είναι η κατακόρυφη απόσταση από τον άξονα της αντλίας μέχρι το υψηλότερο σημείο ανόδου του ρευστού (πρακτικά απεριόριστο).



Εικ. ύψος αναρρόφησης – ύψος κατάθλιψης

Ολικό μανομετρικό  $H$  σε m.

$$H = \frac{P_{\kappa} - P_{\alpha}}{g \cdot \rho} + h$$

$P_{\kappa}$  : Πίεση κατάθλιψης ( $Nt/m^2$ )

$P_{\alpha}$  : Πίεση αναρρόφησης ( $Nt/m^2$ )

$\rho$  : πυκνότητα ( $\rho_{H_2O} = 1000 \text{ kgr/m}^3$ )

$g$ : επιτάχυνση βαρύτητας ( $9.806 \text{ m/sec}^2$ )

$h$ : διαφορά ύψους μεταξύ των μανομέτρων αναρρόφησης και κατάθλιψης



### 2.4.3. Απορροφούμενη ισχύς

$$P_M = \frac{2 \cdot \pi \cdot N}{60} \cdot F \cdot L$$

F: Δύναμη παρμένη από το δυναμόμετρο (1 Kp = 9,806 Nt)

L: Μοχλοβραχίονας = 0,15m

N: Περιστροφική ταχύτητα RPM (Rounds Per Minute)

### 2.4.4 Ωφέλιμη ισχύς

$$P_w = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H$$

Q: Ογκομετρική παροχή (m<sup>3</sup>/sec)

H: Ολικό μανομετρικό (m)

### 2.4.5 Απόδοση αντλίας

$$n = \frac{P_w}{P_M} = \frac{P_{εξ}}{P_{εισ}} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{P_M}$$

## **2.5 Χαρακτηριστικές καμπύλες αντλίας**

Οι χαρακτηριστικές καμπύλες αντλίας παρουσιάζουν τα υδραυλικά χαρακτηριστικά και την απορροφούμενη ισχύ της αντλίας σε συγκεκριμένη ταχύτητα περιστροφής, είναι ξεχωριστές για κάθε τύπου αντλίας και δίνονται από τον κατασκευαστή. Ονομάζονται χαρακτηριστικές επειδή χαρακτηρίζουν την αντλία παρουσιάζοντας τα βασικά υδραυλικά της χαρακτηριστικά, με άλλα λόγια αποτελούν κομμάτι της ταυτότητας της αντλίας μαζί με τα υλικά της κατασκευής της και άλλα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά. Αποτελούν ένα από τα κύρια εργαλεία για την επιλογή της κατάλληλης αντλίας, για την εκάστοτε εφαρμογή είτε γνωρίζουμε το επιθυμητό σημείο λειτουργίας, είτε γνωρίζουμε την χαρακτηριστική καμπύλη του δικτύου. Οι χαρακτηριστικές καμπύλες χαράσσονται καταρχάς κατά τη σχεδίαση της αντλίας μετά την κατασκευή της αντλίας. Επαληθεύονται με τεστ και κατόπιν δημοσιεύονται. Περιγράφουν τη μεταβολή των βασικών υδραυλικών χαρακτηριστικών μεγεθών της αντλίας.

Οποιαδήποτε άλλα μεγέθη προκύπτουν από αυτά. Με αυτήν την έννοια οι χαρακτηριστικές καμπύλες είναι τρεις.

### 2.5.1 Χαρακτηριστική Παροχής – Ολικού ύψους (Q – H)

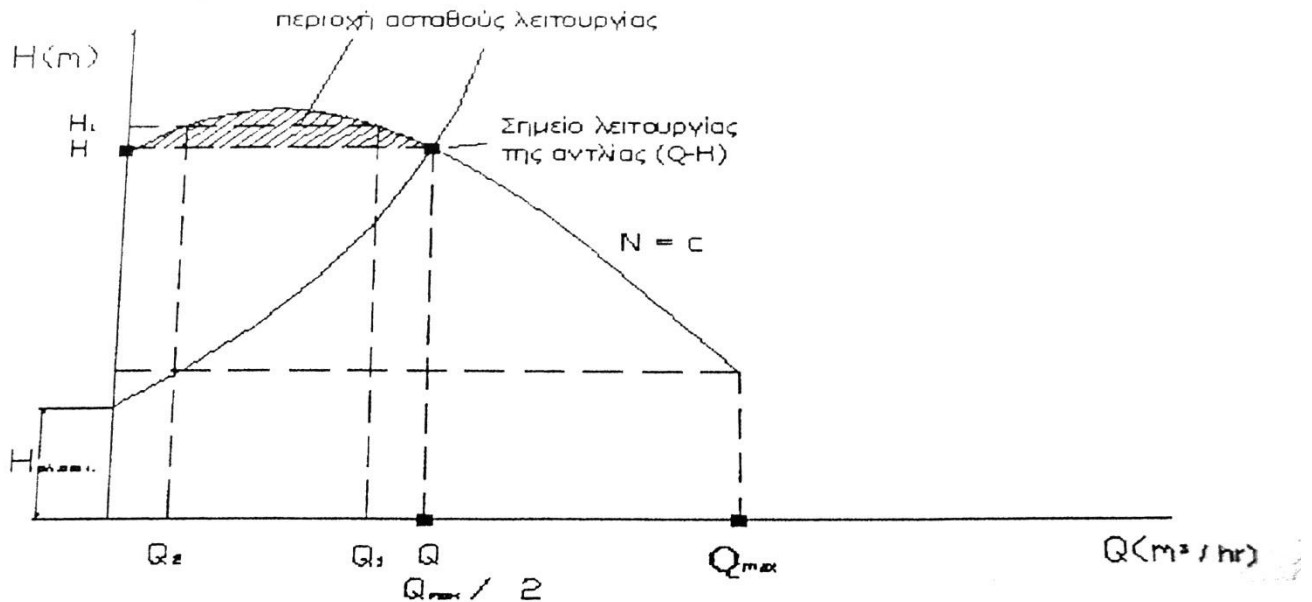
Η καμπύλη Q–H που έχει τη μορφή του σχήματος που απεικονίζεται παρακάτω (σχ.2.5.1) για φυγοκεντρικές αντλίες κατά κανόνα με κυρτά περύγια ονομάζεται χαρακτηριστική καμπύλη ύψους – παροχής. Αν κλείσει τελείως η δικλείδα στο στόμια κατάθλιψης της αντλίας, η πίεση που ασκείται στο σημείο εκείνο παίρνει οριακή τιμή H που προσεγγίζει το μανομετρικό ύψος της αντλίας. Το μανομετρικό αυτό της αντλίας (H) όταν η αντλία λειτουργεί με κλειστή βάνα  $Q=0 \text{ m}^3/\text{h}$  ονομάζεται ύψος μηδενικής παροχής. Αν μειωθεί λίγο το μανομετρικό ύψος, η παροχή παίρνει μία μεγάλη τιμή Q σχεδόν απότομα. Αν συνεχίσουμε να μειώνουμε το μανομετρικό ύψος η παροχή θα αυξάνεται σταθερά. Η περιοχή αυτής της καμπύλης στην οποία η παροχή Q είναι μεγαλύτερη από την  $Q_1$  ή το μανομετρικό ύψος  $H_1$  να είναι μικρότερο από το ύψος της μηδενικής παροχής H, λέγεται **περιοχή ευσταθούς λειτουργίας** της αντλίας και αντίστοιχα ευσταθής καμπύλη. Αν βρισκόμαστε στην περιοχή με παροχή Q και αυξηθεί λίγο το μανομετρικό ύψος μπορεί να επιτευχθούν τιμές του H μεγαλύτερες από την τιμή  $H_1$ . Παράλληλα θα μειωθεί η παροχή και θα παίρνει τιμές μικρότερες από την τιμή Q. Η τιμή  $Q_1$  του σχήματος είναι μικρότερη από την τιμή Q. Αλλά στην περιοχή αυτή της καμπύλης παρατηρείται ότι το μανομετρικό δίνει δύο τιμές παροχής  $Q_2$ ,  $Q_1$ . Έτσι υπάρχει κίνδυνος η παροχή να πέσει απότομα από την τιμή  $Q_2$  στην  $Q_1$  ή να γίνει μηδέν. Πράγματι αυτό συμβαίνει όταν λειτουργεί η αντλία με μανομετρικό ύψος μεταξύ του H και  $H_1$ . Η περιοχή αυτής της καμπύλης ή οποία είναι πάνω από τα σημεία τομής της με το μανομετρικό ύψος H λέγεται **περιοχή ασταθούς λειτουργίας** της αντλίας και αντίστοιχα ασταθής καμπύλη.

**Σημείο Λειτουργίας** της αντλίας είναι το σημείο τομής της χαρακτηριστικής Q – H της αντλίας με την χαρακτηριστική Q – H της εγκατάστασης. Σε αυτό το σημείο επιτυγχάνεται ο μέγιστος βαθμός απόδοσης, ο οποίος βρίσκεται στην περιοχή  $Q_{\max}/2$  ή στα  $7/10$  του μανομετρικού με μηδενική παροχή  $H_0$ .

$$H_0 = (D \cdot N / 84)^2$$

D: διάμετρος περωτής

Όλα τα σημεία που απαρτίζουν τη χαρακτηριστική ( $Q - H$ ) της αντλίας, η παροχή και το μανομετρικό που προκύπτουν από μια μελέτη αποτελούν ένα σημείο που ανήκει στη σωληνογραμμή της εγκατάστασης που μελετήθηκε και θέλουμε να ανήκει και στη χαρακτηριστική της αντλίας που επιλέγεται με τον μέγιστο βαθμό απόδοσης. Αυτά είναι τα πιθανά σημεία λειτουργίας της αντλίας.

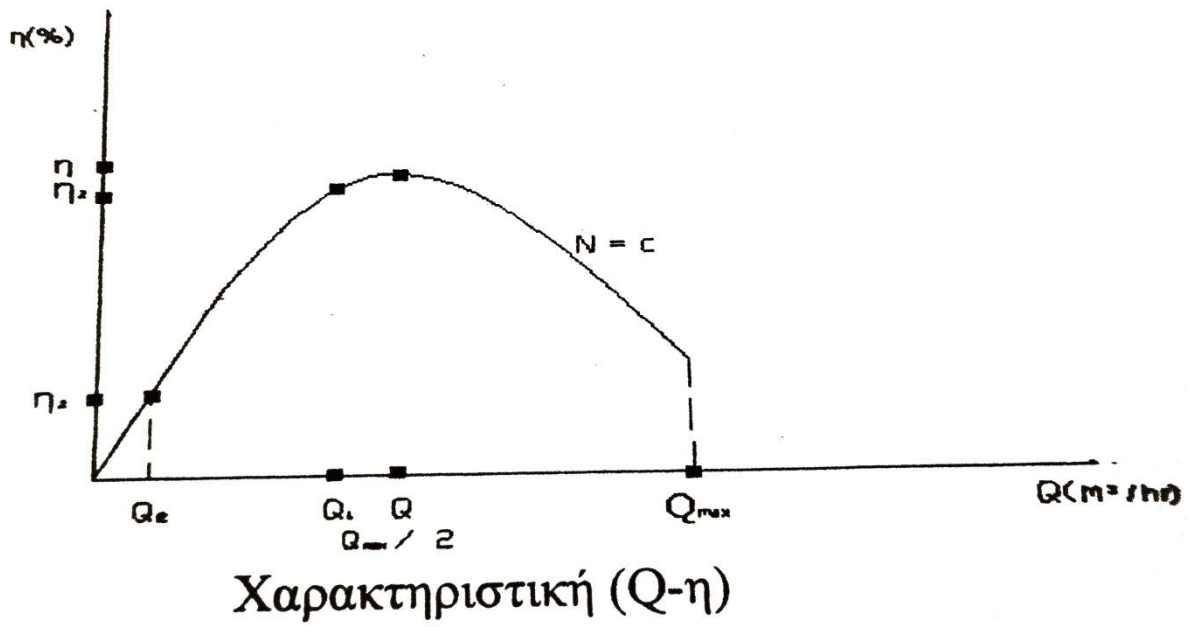


### Χαρακτηριστική ( $Q-H$ )

Σχ.2.5.1 χαρακτηριστική  $Q - H$

#### 2.5.2 Χαρακτηριστική Παροχής – Ολικού βαθμού απόδοσης ( $Q - \eta$ )

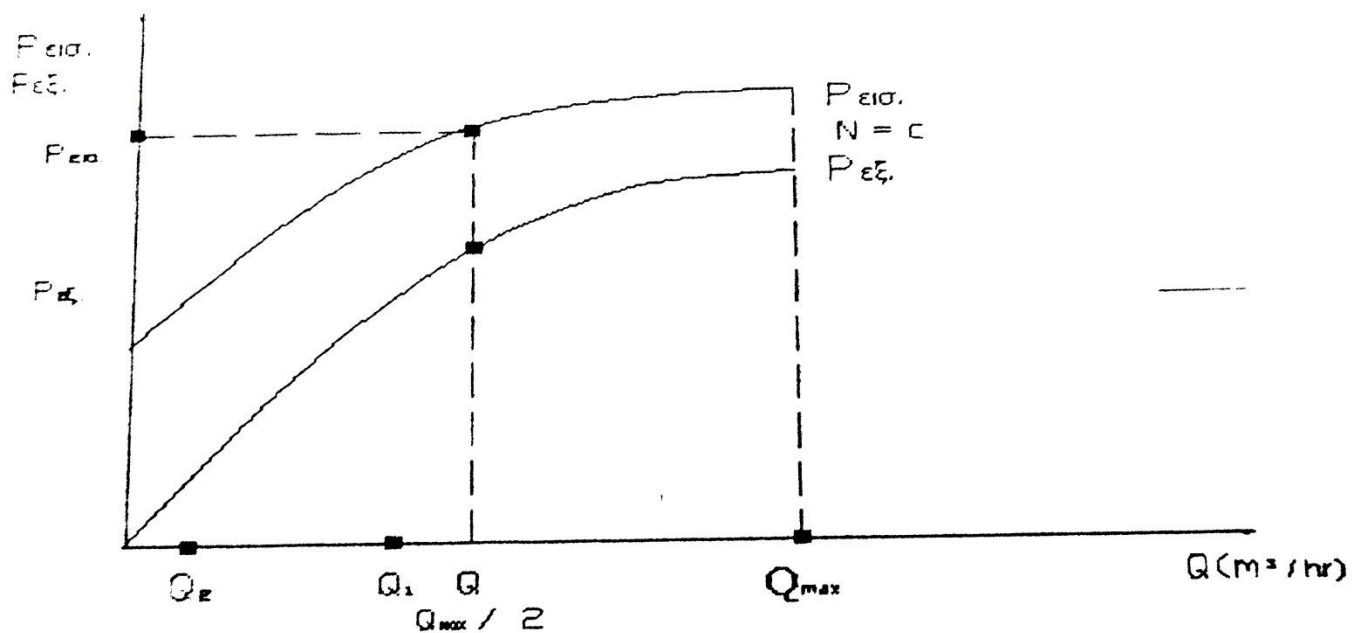
Σε αυτήν την καμπύλη ο μέγιστος βαθμός απόδοσης βρίσκεται περίπου στο μέσο της καμπύλης. Εάν η χαρακτηριστική ( $Q - \eta$ ) (σχ.2.5.2) βρίσκεται ακριβώς κάτω και με ίδια κλίμακα από την χαρακτηριστική ( $Q - H$ ), τότε μια νοητή κάθετη γραμμή βρίσκεται ο βαθμός απόδοσης ( $\eta$ ) της συγκεκριμένης αντλίας στην εγκατάσταση. Σημειώνεται πως είναι επιθυμητό η αντλία να επιλέγεται ώστε να δουλεύει στο σημείο βέλτιστου βαθμού απόδοσης για την αποφυγή ακτινικών (καμπτικών) τάσεων στον άξονα της αντλίας.



Σχ.2.5.2 χαρακτηριστική Q - η

### 2.5.3 Χαρακτηριστική Παροχής- Ισχύος (Q – P)

Η χαρακτηριστική αυτή (σχ.2.5.3) είναι παραγωγή καμπύλης που προκύπτει γραφικά από τις χαρακτηριστικές (Q – H) και (Q – η) και μπορεί να παραλειφθεί χωρίς καμία απώλεια πληροφόρησης για τα τεχνικά χαρακτηριστικά της αντλίας. Συνήθως παρουσιάζεται στις δημοσιευμένες καμπύλες. Αυτό εξυπηρετεί το μηχανικό που κάνει την επιλογή της αντλίας, τον διευκολύνει δίνοντάς του μια εικόνα για το μέγεθος της εγκαταστημένης ισχύος που απαιτείται για να λειτουργήσει η αντλία κοντά στο επιλεγμένο σημείο λειτουργίας.



### Χαρακτηριστική (Q- P<sub>εισ</sub>, P<sub>εξ</sub>)

Σχ.2.5.3 χαρακτηριστική Q – P

## 2.6 Νόμοι ομοιότητας

Όταν δύο αντλίες είναι γεωμετρικά όμοιες και εργάζονται σε όμοιες συνθήκες λειτουργίας τότε οι παράμετροι αυτές είναι ίσες και για τις δύο αντλίες. Δηλαδή οι τιμές των παροχών είναι ανάλογες των τιμών των περιστροφών.

$$Q_1/Q_2 = N_1/N_2$$

Οι τιμές των μανομετρικών είναι ανάλογες του τετραγώνου του αριθμού των περιστροφών.

$$H_1/H_2 = \left( N_1/N_2 \right)^2$$



Η ισχύς εξόδου αλλάζει με τον αριθμό περιστροφών στον κύβο.

$$P_{W1}/P_{W2} = \left( N_1/N_2 \right)^3$$

Οι παραβολικές καμπύλες του μανομετρικού με την παροχή είναι ισοδυναμικές καμπύλες ή με τον ίδιο βαθμό απόδοσης.

$$n_1 = n_2$$

## 2.7 Ειδική ταχύτητα

Είναι η ταχύτητα μιας από τις ομόλογες αντλίες που έχει τέτοιο μέγεθος κατασκευής ώστε να έχει παροχή μεγέθους μονάδας σε ολικό ύψος μεγέθους μονάδας. Είναι μία σταθερά που χρησιμοποιείται σαν βάση για τη σωστή εκλογή κατάλληλου τύπου αντλίας κατά την αρχική φάση της μελέτης. Σχετίζεται με τον τύπο της αντλίας ή το σχήμα της πτερωτής αλλά είναι ανεξάρτητη από το μέγεθος της αντλίας. Συμβολίζοντας με  $N$  την ταχύτητα περιστροφής σε RPM,  $Q$  την παροχή σε  $m^3/h$  και  $H$  το μανομετρικό της κάθε βαθμίδας σε  $m$ , τότε:

$$Ns = \frac{N \cdot \sqrt{Q}}{H^{0,75}}$$

Βάση των τιμών που προκύπτουν από το αποτέλεσμα της εξίσωσης  $Ns$ , οι αντλίες ταξινομούνται σε:

1. Αντλίες ακτινικής ροής με  $Ns$  από 400 έως 450 για συνθήκες μεγάλης διαφοράς ύψους.
2. Αντλίες μικτής ροής με  $Ns$  από 450 έως 9.000 για μεσαία ύψη και παροχές.
3. Αντλίες αξονικής ροής με  $Ns$  από 9.000 έως 15.000 για μεγάλες παροχές και σχετικά μικρά ύψη.

Αν δύο αντλίες δίνουν το ίδιο μανομετρικό ύψος και την ίδια παροχή, η αντλία που έχει μεγαλύτερη τιμή ειδικής ταχύτητας εργάζεται με μεγαλύτερο αριθμό στροφών και έχει μικρότερες διαστάσεις.

# Κεφάλαιο

# 3

## Φυγόκεντρες αντλίες

---

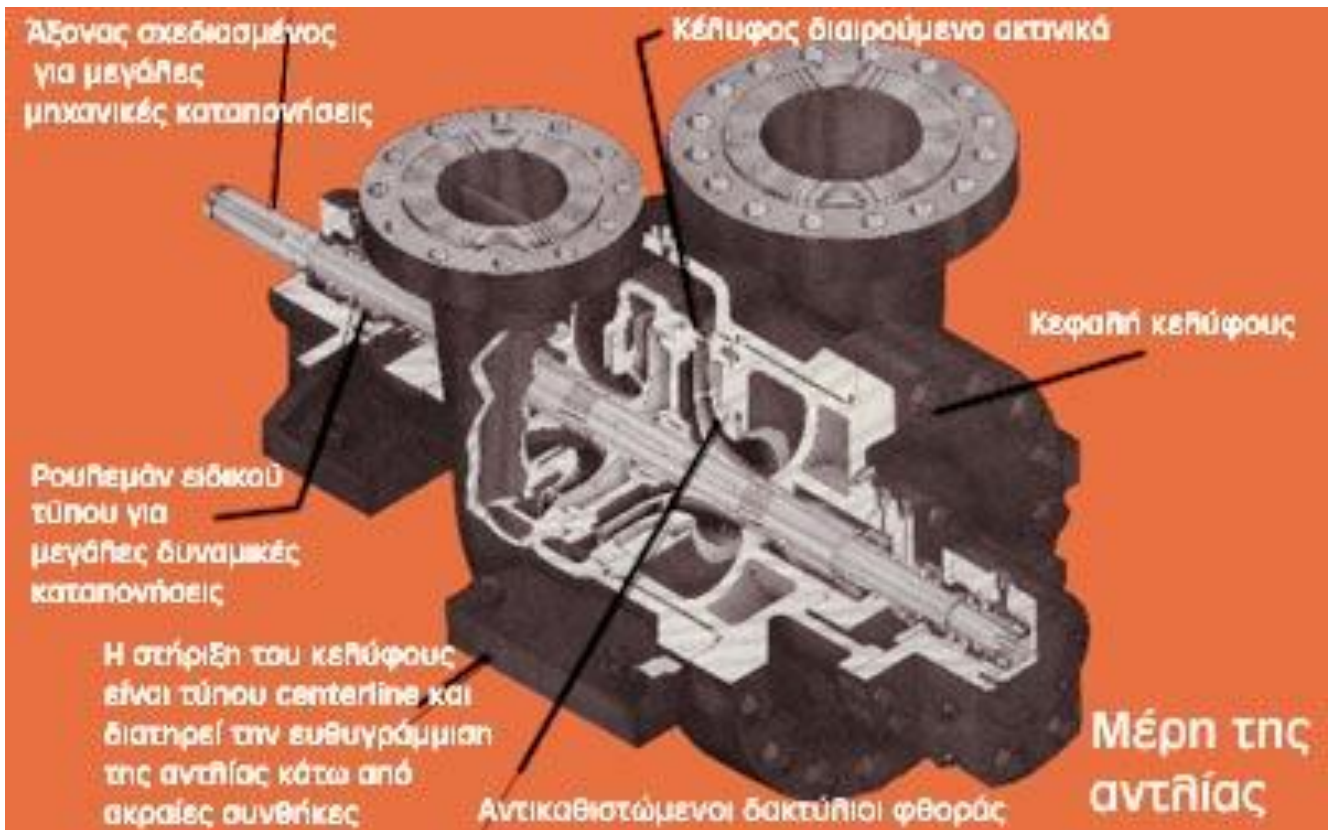
### 3.1 Ορισμός φυγόκεντρης αντλίας

Με τον όρο φυγόκεντρες αντλίες (σχ.3.1) συνήθως εννοούνται οι φυγόκεντρες αντλίες ακτινικής ροής. Στη χημική βιομηχανία με φυγοκεντρικές αντλίες ακτινικής ροής διακινείται μεγαλύτερος όγκος υγρών από ότι με όλους τους άλλους τύπους αντλιών μαζί (90% εγκατεστημένων).

Σε αυτόν τον τύπο αντλιών η κινητική ενέργεια προσδίδεται στο υγρό με φυγοκεντρικές δυνάμεις. Ο μηχανισμός κίνησης της αντλίας προσδίδει ορμή στο διακινούμενο υγρό με αποτέλεσμα την αύξηση της κινητικής του ενέργειας, η οποία στη συνέχεια μετατρέπεται σε στατική πίεση

Ανάλογα με το είδος της περωτής και τον τρόπο κίνησης του διακινούμενου υγρού εντός αυτής οι φυγοκεντρικές αντλίες διακρίνονται σε τέσσερις κατηγορίες:

- ακτινικής ροής
- μικτής ροής
- αξονικής ροής
- στροβιλαντλίες



Σχ.3.1 φυγόκεντρη αντλία

### 3.2 Αρχή λειτουργίας

Οι φυγόκεντρικές αντλίες χρησιμοποιούν τη φυγόκεντρο δύναμη που δημιουργείται από έναν περιστρεφόμενο δίσκο πάνω στον οποίο υπάρχουν πτερύγια ειδικής μορφής και ο οποίος είναι γνωστός ως στροφείον ή περωτή. Αποτελούνται από περιστρεφόμενες μονάδες υψηλής ταχύτητας και μεγάλης δυναμικότητας, οι οποίες κινούνται είτε από μηχανές εσωτερικής καύσεως, είτε από ηλεκτρικούς κινητήρες είτε από ατμοστροβίλους. Η ροή του υγρού στις φυγόκεντρικές αντλίες δημιουργείται από τη φυγόκεντρη κινητική ενέργεια που δημιουργεί η περιστροφική κίνηση του στροφείου. Το αναρροφούμενο υγρό φτάνει στο άνοιγμα αναρρόφησης και παρασύρεται στην περιστροφή οδηγούμενο από τα πτερύγια. Η περιστροφική κίνηση της περωτής προσδίδει περιστροφή στη μάζα του υγρού η οποία οδηγείται από τα πτερύγια μεταδίδοντας φυγόκεντρη δύναμη στο υγρό. Το υγρό υποχρεώνεται να διατρέχει κατά μήκος των πτερυγίων και να πετάγεται έξω από την περωτή. Το υγρό μόλις διαφύγει από την περωτή συλλέγεται σε έναν εσωτερικό χώρο της αντλίας, ο οποίος έχει σπειροειδή μορφή με συνεχώς αυξανόμενη διατομή και τελικά φεύγει από την έξοδο της αντλίας.

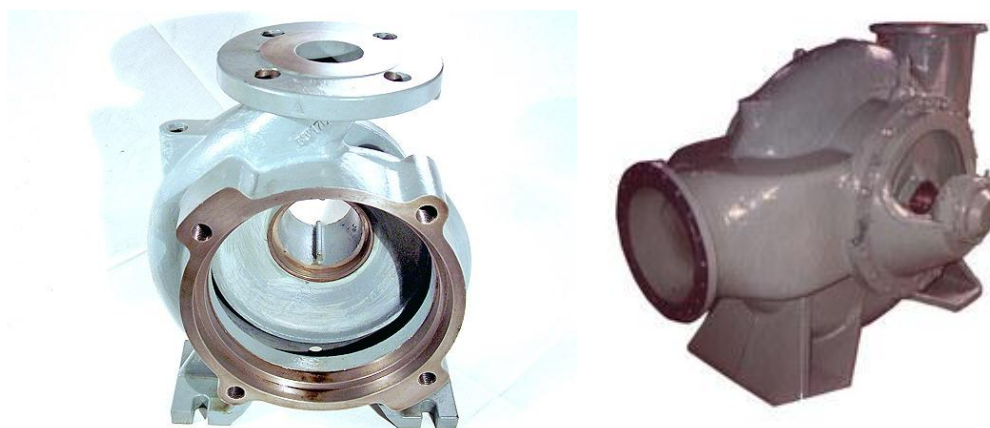
### 3.3 Δομή και σχεδιασμός

Οι φυγόκεντρικές αντλίες αποτελούνται από ένα μεγάλο πλήθος εξαρτημάτων. Τα βασικότερα μέρη τους είναι τα παρακάτω:

- Το σώμα της αντλίας.
- Το στροφείο ή πτερωτή.
- Τους δακτυλίους φθοράς.
- Την άτρακτο τη αντλίας
- τα παρελκόμενα εξαρτήματα.

### 3.3.1 Το σώμα της αντλίας

Το σώμα της αντλίας (σχ. 3.3.1) είναι το πλαίσιο πάνω στο οποίο μοντάρονται όλα τα άλλα μέρη της αντλίας. Κατασκευάζεται από υλικά ανθεκτικά και στα υγρά που πρόκειται να μεταφερθούν και στις διάφορες θερμοκρασίες λειτουργίας. Το κέλυφος της αντλίας είναι διαιρούμενο, είτε οριζόντια, είτε κάθετα, είτε διαγώνια σε μια γωνία διαφορετική από 90 μοίρες. Αυτά που διαιρούνται οριζόντια λέγονται και αξονικά διαιρούμενα κελύφη, ενώ τα κάθετα διαιρούμενα λέγονται και ακτινικά διαιρούμενα. Οι λαιμοί (nozzles) για τις φλάντζες εισόδου και εξόδου είναι και οι δύο στο κάτω τμήμα του διαιρούμενου κελύφους. Αναφορικά με το σώμα της αντλίας σημειώνεται πως υπάρχει και ο σχεδιασμός τύπου βαρελιού (barrel type), που χρησιμοποιούνται κυρίως σε αντλίες πολύ υψηλών πιέσεων. Σε αυτό το σχεδιασμό, το εσωτερικό του κελύφους προσαρμόζεται στο εξωτερικό του «βαρελιού». Το σώμα έχει βάσεις με τις οποίες αγκυρώνεται είτε στον εξοπλισμό που βρίσκεται κάτω από αυτό είτε στο έδαφος, πράγμα που αποτελεί και τη συνηθέστερη περίπτωση. Το σώμα της αντλίας με βάση το κριτήριο της λειτουργικότητας μπορεί να χωριστεί σε δύο μέρη το τμήμα εισόδου και το τμήμα εξόδου.



Σχ.3.3.1 κέλυφος – σώμα αντλίας

### 3.3.1.1 Τμήμα εισόδου

Η βασική απαίτηση για να επιτυγχάνεται ικανοποιητική λειτουργία στην αναρρόφηση της αντλίας είναι το τμήμα εισόδου να είναι έτσι διαμορφωμένο, ώστε να εξασφαλίζεται ομοιόμορφη διανομή της ταχύτητας στην συμμετρική ως προς τον άξονα επιφάνεια εισόδου της περωτής. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται όλα τα περύγια της περωτής να λειτουργούν ομοιόμορφα. Ευκολότερος είναι ο σωστός σχεδιασμός του τμήματος εισόδου σε ορισμένους τύπους αντλιών, όπως στις μονοβάθμιες αντλίες με την περωτή σε πρόβολο και στις κατακόρυφες αντλίες αξονικής ή μικτής ροής. Σε αυτούς τους τύπους αντλιών το τμήμα εισόδου έχει μορφή, είτε κωνική συγκλίνουσα προς την είσοδο της περωτής, είτε κυλινδρική με κυκλική διατομή. Ωστόσο το τμήμα εισόδου δεν μπορεί να έχει κωνική ή κυλινδρική μορφή στις πολυβάθμιες αντλίες και στις αντλίες διπλής αναρρόφησης γιατί σε αυτούς τους τύπους αντλιών η διεύθυνση του ρευστού στη διατομή εισόδου είναι κάθετη προς τον άξονα περιστροφής της περωτής. Για να εξαλειφθεί λοιπόν η συστροφή του ρευστού στη διατομή εισόδου, αλλά παράλληλα και για να αλλάξει η διεύθυνση του ρευστού μετά την είσοδό του στην αντλία σχεδιάστηκε το τμήμα εισόδου με τη μορφή ημισπειροειδούς κελύφους. Σχεδιάζοντας τη διατομή του ημισπειροειδούς αυτού κελύφους υποπολλαπλάσια της διατομής εισόδου επιτυγχάνουμε την επιθυμητή επιταχυνόμενη ροή στο τμήμα εισόδου. Στις αντλίες που έχουν περωτή διπλής αναρρόφησης το τμήμα εισόδου είναι συμμετρικό και διαμοιράζει τη ροή σε δύο ίσα μέρη με συνέπεια η τροφοδοσία κάθε μιας εισόδου της περωτής να γίνεται από ένα ημισπειροειδές κέλυφος όπως και στις πολυβάθμιες αντλίες.

### 3.3.1.2 Τμήμα εξόδου

Το τμήμα εξόδου μιας φυγόκεντρικής αντλίας φαίνεται να καταλαμβάνει το μεγαλύτερο όγκο του συνολικού σώματος (κελύφους) της αντλίας και είναι αυτό που συλλέγει το αντληθέν ρευστό και το καθοδηγεί στη διατομή εξόδου της αντλίας. Στην έξοδο της περωτής (που εντάσσεται στο τμήμα εισόδου) το ρευστό έχει μια αρκετά μεγάλη ταχύτητα που είναι συνάρτηση μιας σειράς παραμέτρων (τύπος περωτής, μορφή τμήματος εισόδου, πίεση ρευστού στην αναρρόφηση κλπ), η οποία όμως πρέπει να μειωθεί όταν το ρευστό θα φτάσει στην κυκλική διατομή εξόδου μέχρι μια ταχύτητα της τάξεως 4-6 μέτρων το δευτερόλεπτο. Η πτώση της ταχύτητας πρέπει να συνοδευτεί από μια μετατροπή της κινητικής ενέργειας σε στατική πίεση. Στα κελύφη των φυγόκεντρικών



αντλιών συναντώνται δύο βασικοί τύποι τμημάτων εξόδου, το σπειροειδές κέλυφος και ο διαχύτης (diffuser).



Σχ.3.3.1 Είσοδος και έξοδος υγρού στην αντλία.

### 3.3.1.2α Σπειροειδές κέλυφος.

Είναι ο συνηθέστερος τύπος κελύφους εξόδου μιας φυγόκεντρικής αντλίας. Για να σχεδιαστεί το σπειροειδές κέλυφος χρησιμοποιούνται σήμερα δύο μέθοδοι που κάθε μια έχει τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Η πρώτη μέθοδος που είναι και η πιο παραδοσιακή και συνήθως χρησιμοποιούμενη βασίζεται σε δύο βασικές αρχές της μηχανικής των ρευστών, την αρχή της διατήρησης της συστροφής και την αρχή της συνέχειας και υπολογίζει την κλίση της γραμμής ροής του αντληθέντος ρευστού στη διαδρομή εξόδου συναρτήσει της απόστασης του όγκου ελέγχου (μονάδα αναφοράς του ρευστού που χρησιμοποιείται για θεωρητικούς υπολογισμούς στη μηχανική των ρευστών) του προωθούμενου ρευστού από το κέντρο της κυκλικής διατομής εισόδου. Από την εξίσωση που προκύπτει διαπιστώνεται ότι η γραμμή ροής, στον αξονομετρικό χώρο που αποτελεί νοητή προέκταση των αξονομετρικών επιφανειών των



δίσκων της πτερωτής, είναι σπειροειδής καμπύλη. Αν οι προεκτάσεις των αξονομετρικών επιφανειών είναι κάθετα επίπεδα προς τον άξονα συμμετρίας τότε οι γραμμές ροής είναι λογαριθμικές σπείρες. Η γεωμετρία λοιπόν του κελύφους καλείται να ακολουθήσει τη γραμμή ροής που προέκυψε με βάση τους υπολογισμούς αυτούς, ωστόσο είναι προσεγγιστική για δύο βασικούς λόγους.

α) Οι υπολογισμοί της γραμμής ροής γίνονται με την παραδοχή ιδανικής και όχι συνεκτικής ροής.

β) Για πρακτικούς κατασκευαστικούς λόγους το σπειροειδές κέλυφος ακολουθεί την υπολογισθείσα γεωμετρία της σπειροειδούς καμπύλης μόνο για μια περιστροφή και μετά διαμορφώνεται έτσι ώστε να προσαρμοστεί σταδιακά στην κυκλική διατομή εξόδου.

Η δεύτερη μέθοδος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της γεωμετρίας του σπειροειδούς κελύφους είναι η μέθοδος της σταθερής μέσης ταχύτητας. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην αρχή της σταθερής μέσης ταχύτητας της ροής στις διάφορες διατομές και υπολογίζει τη διατομή του σπειροειδούς κελύφους συναρτήσει της γωνίας περιστροφής του μονάδας αναφοράς του προωθούμενου ρευστού (όγκος ελέγχου). Η αφορμή για τη χρησιμοποίηση αυτή της μεθόδου δόθηκε από τη διαπίστωση ότι υπήρξαν σημαντικές αποκλίσεις στη διανομή της ταχύτητας στο τμήμα εξόδου σε σπειροειδή κέλυφη που υπολογίζονταν με τη μέθοδο της διατήρησης της συστροφής. Ολοκληρώνοντας την αναφορά στο σπειροειδές κέλυφος πρέπει να σημειωθεί ότι μέθοδος της διατήρησης της συστροφής δίνει αντλίες με λίγο μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης, ενώ η μέθοδος της σταθερής μέσης ταχύτητας δίνει περισσότερο ομοιόμορφη διανομή της στατικής πίεσης στο σπειροειδές κέλυφος.

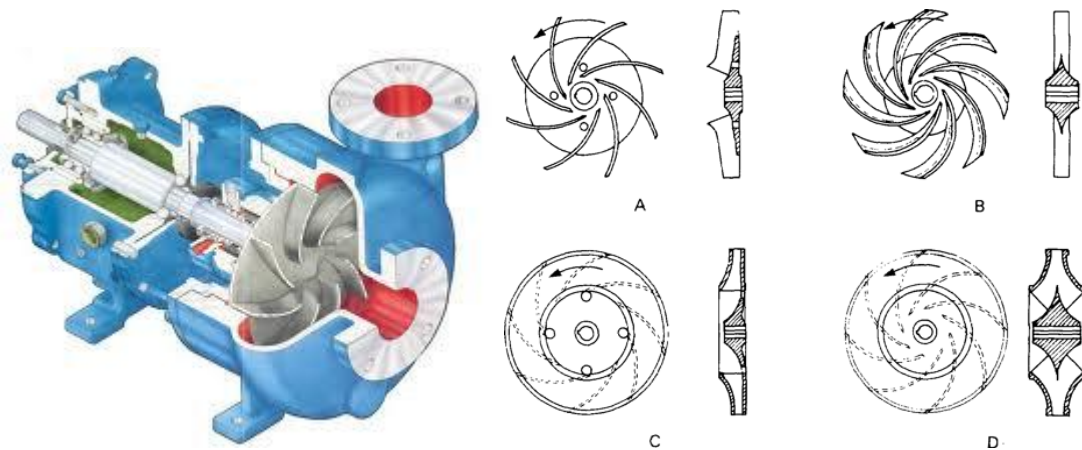
### 3.3.1.2β Διαχύτης.

Το τμήμα εξόδου μπορεί να έχει τη μορφή διαχύτη, ο οποίος μπορεί να είναι κατασκευασμένος με ή χωρίς πτερύγια. Ο διαχύτης χωρίς πτερύγια δεν είναι παρά ένα αξονομετρικό κέλυφος οδήγησης της ροής, εντός του οποίου η περιφερειακή ταχύτητα μεταβάλλεται αντίστροφα ανάλογα προς την ακτίνα ενώ η ακτινική ταχύτητα ικανοποιεί την αρχή της συνέχειας. Δεν αποτελεί καλή λύση γιατί η διαδρομή του ρευστού μέχρι τη φλάντζα εξόδου είναι μεγάλη όπως επίσης και οι αντίστοιχες απώλειες τριβής. Ο διαχύτης με πτερύγια είναι μια ακίνητη ακτινική στεφάνη πτερυγίων διατεταγμένη γύρω από την πτερωτή. Τα πτερύγια της στεφάνης επιτυγχάνουν σε μικρή σχετικά ακτινική απόσταση την

επιθυμητή επιβράδυνση της ταχύτητας που έχει το ρευστό στην έξοδο της περωτής. Όταν χρησιμοποιείται σχεδιασμός τύπου διαχύτη με περύγια σε μικρού μεγέθους αντλίες προκύπτουν ιδιαίτερα μεγάλες απώλειες τριβής. Από την άλλη πλευρά σε αντλίες με μικρό ειδικό αριθμό στροφών συχνά μια στεφάνη διαχύτη με περύγια παρεμβάλλεται μεταξύ περωτής και σπειροειδούς κελύφους. Ο διαχύτης στην περίπτωση αυτή επιτυγχάνει μια καταρχήν επιβράδυνση της ροής πριν το ρευστό προχωρήσει στο σπειροειδές κέλυφος και παράλληλα μια μείωση των υδραυλικών απωλειών.

### 3.3.2 Η περωτή (στροφείο)

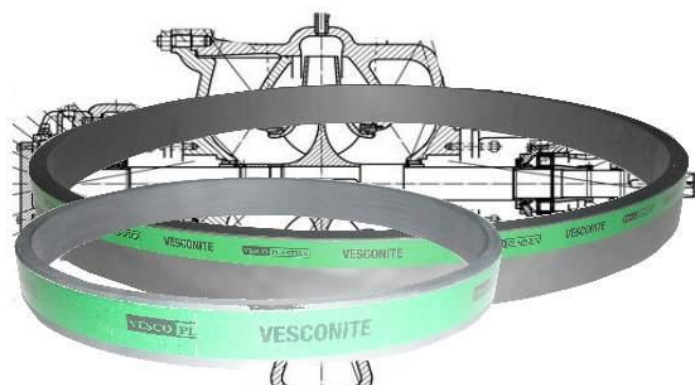
Για το σχεδιασμό της περωτής (σχ.3.3.2) δύο είναι τα καθοριστικά σημεία. Ο υπολογισμός της γωνίας κλίσης των περυγίων στη διατομή εξόδου της περωτής, και ο καθορισμός του αριθμού των περυγίων της περωτής. Όσο μειώνεται η γωνία κλίσης των περυγίων, τόσο αυξάνεται η απόλυτη τιμή της κλίσης. Αυτό ευνοεί την ευστάθεια της λειτουργίας μιας αντλητικής εγκατάστασης με θετικό μανομετρικό. Στις περιπτώσεις αυτές που αποτελούν και τη μεγάλη πλειοψηφία, η γωνία κλίσης κυμαίνεται μέσα σε ένα εύρος 17-35 μοιρών και συνήθως επιλέγεται να είναι 20–25 μοίρες. Στις ειδικές περιπτώσεις που δεν απαιτείται ένα θετικό μανομετρικό, όπως στους κυκλοφορητές των κτιριακών δικτύων, δεν τίθεται πρόβλημα ευστάθειας λειτουργίας της συνολικής αντλητικής εγκατάστασης, οπότε η γωνία κλίσης παίρνει μεγαλύτερη τιμή (μέχρι τις 90 μοίρες), δεδομένου άλλωστε ότι με μεγαλύτερη γωνία κλίσης επιτυγχάνεται το επιθυμητό σημείο λειτουργίας με μικρότερες διαστάσεις περωτής αλλά και της αντλίας συνολικά. Το πλήθος των περυγίων της περωτής με βάση τη θεωρία των φυγόκεντρικών αντλιών συνδέεται άμεσα με το βαθμό απόδοσης της περωτής και κατ' επέκταση και της αντλίας καθώς όσο περισσότερα είναι τα περύγια τόσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός απόδοσης. Ωστόσο ο ιδεατός βαθμός απόδοσης της περωτής είναι αντίστροφα ανάλογος με τη γωνία κλίσης των περυγίων και από αυτόν επίσης εξαρτάται το μέσο πραγματικό τρίγωνο των ταχυτήτων εξόδου. Από την άλλη πλευρά η αύξηση του πλήθους των περυγίων επιφέρει αύξηση των απωλειών τριβής και κατά συνέπεια μείωση του υδραυλικού βαθμού απόδοσης της αντλίας. Έτσι, για κάθε περιοχή τιμών της γωνίας κλίσης των περυγίων πρέπει να υπολογίζεται ένας βέλτιστος αριθμός περυγίων, ώστε να βελτιστοποιείται το γινόμενο  $n_1 \cdot n_2$ , όπου  $n_1$  είναι ο ιδεατός βαθμός απόδοσης της περωτής και  $n_2$  ο υδραυλικό βαθμός απόδοσης της αντλίας.



Σχ.3.3.2 Πτερωτή αντλίας

### 3.3.3 Δακτύλιοι φθοράς (Wear Rings)

Ένα άλλο δομικό στοιχείο των φυγόκεντρικών αντλιών είναι οι δακτύλιοι φθοράς (σχ.3.3.3). Έχουν συγκεκριμένη διαμόρφωση ώστε να επιτυγχάνουν μια δακτυλιοειδή σχισμή μεταξύ του ακίνητου κελύφους και της πτερωτής. Η σχισμή αφήνει ένα συγκεκριμένο κατά περίπτωση ακτινικό διάκενο και έχει ένα επίσης συγκεκριμένο μήκος. Σκοπός της διαμόρφωσης λαβυρίνθων με τη χρήση των δακτυλίων φθοράς είναι η διατήρηση των ογκομετρικών απωλειών στην επιθυμητή χαμηλή τιμή οπότε η αντίστοιχη τιμή του ογκομετρικού βαθμού απόδοσης να έχει την τιμή που προδιαγράφεται. Οι δακτύλιοι φθοράς μπορούν να αφαιρεθούν και να αντικατασταθούν όταν έχουν φθαρεί αρκετά με χαμηλό κόστος, πολύ χαμηλότερο φυσικά από αυτό που θα απαιτείτο για την αντικατάσταση, είτε του κελύφους, είτε της πτερωτής.

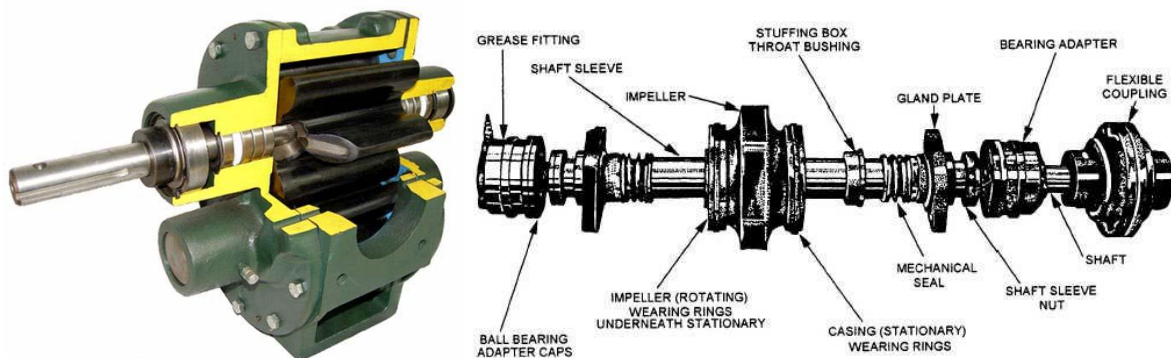


Σχ.3.3.3 Δακτύλιοι φθοράς

### 3.3.4 Άτρακτος

Η άτρακτος (σχ.3.3.4) μεταφέρει τη ροπή στρέψης από τον κινητήρα προς την πτερωτή ή τις πτερωτές. Σε μια μόνιμη λειτουργία μιας φυγόκεντρικής αντλίας με σταθερή ταχύτητα περιστροφής η ροπή αυτή ισούται με τη ροπή αντιστάθμισης που προκύπτει από τις μηχανικές απώλειες κατά τη λειτουργία.

Πάντως καθώς η άτρακτος είναι προσδεμένη στην περωτή παραλαμβάνει επίσης εκτός από τη μηχανική ροπή αντίστασης και αντιστάσεις «υδραυλικής προέλευσης» που προέρχονται από τις αξονικές και ακτινικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στην/στις περωτές καθώς αυτή/αυτές μετακινούν το ρευστό. Το σύνολο των προβλεπόμενων δυνάμεων και ροπών που μπορούν να εφαρμοστούν στην άτρακτο, επιβάλλει καταρχήν ένα στατικό υπολογισμό στη φάση του σχεδιασμού της. Δεδομένου του μεγάλου κατά κανόνα μήκους της άτρακτου πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η ελαστικότητά της. Στόχος είναι κατά τη λειτουργία της να έχει μικρή κλίση και βέλος κάμψης της άτρακτου, για να μην επηρεάζεται η λειτουργία του πλήθους των συνδεδεμένων με αυτήν εξαρτημάτων. Παράλληλα πρέπει να μελετηθεί η ιδιοσυχνότητα του μηχανικού υποσυστήματος άτρακτος-περωτή ώστε να μην συμπέσει με την ιδιοσυχνότητα του συνολικού στρεφομένου συστήματος και προκληθούν έτσι αυξημένες καταπονήσεις και συνεπώς ανεπιθύμητα μεγάλες παραμορφώσεις στην άτρακτο κατά τη λειτουργία.



Σχ.3.3.4 άτρακτος της αντλίας

### 3.3.5 Παρελκόμενα εξαρτήματα

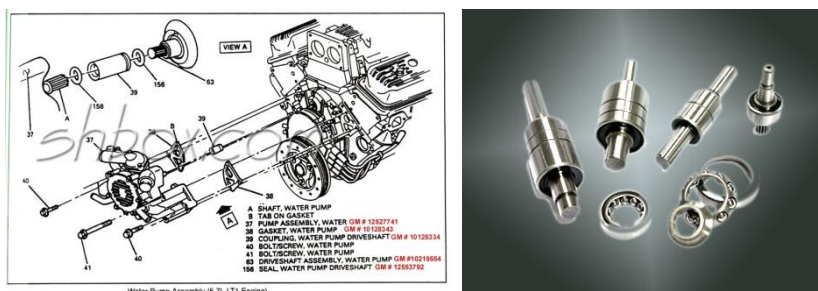
Από κατασκευαστική σκοπιά η άτρακτος πρέπει να διαθέτει τις κατάλληλες ανοχές για να λειτουργεί σωστά ένα πλήθος καθοριστικών για τη λειτουργία της αντλίας παρελκόμενων εξαρτημάτων τα κυριότερα των οποίων είναι οι σαλαμάστρες και τα έδρανα στήριξης. Γύρω από τον άξονα των αντλιών τοποθετούνται σαλαμάστρες για να επιτευχθεί στεγανότητα. Το πρόβλημα της στεγανότητας είναι από τα σημαντικότερα για το σχεδιασμό και τη λειτουργία μιας αντλίας. Αντιμετωπίζεται με τη χρήση στυπιοθλιπτών των οποίων σκοπός είναι η εξασφάλιση της στεγανότητας της αντλίας με το εξωτερικό περιβάλλον στο σημείο όπου η άτρακτος διαπερνά το σταθερό κέλυφος της αντλίας. Στην

περίπτωση όπου το ύψος της αντλίας είναι σημαντικό και κατά την εκκίνησή της η στατική πίεση στο σημείο εξόδου της ατράκτου πέσει κάτω από την ατμοσφαιρική, σκοπός του στυπιοθλίπτη είναι να εμποδίσει την είσοδο του αέρα από το περιβάλλον. Σε αντίθετη περίπτωση η κίνηση της αντλίας γίνεται προβληματική. Διακρίνονται δύο ειδών στυπιοθλίπτες:

- Τους συμβατικούς με στυπεία (σαλαμάστρα) στους οποίους η στεγανότητα εξασφαλίζεται από τη συμπίεση των στυπείων μέσω του στυπιοθλίπτη.
- Τους μηχανικούς στους οποίους η στεγανότητα εξασφαλίζεται με την επαφή δύο λείων δίσκων, ενός στρεφόμενου με την άτρακτο και ενός μη στρεφόμενου.

### 3.4 Έδρανα

Σημαντική παράμετρος στο σχεδιασμό των αντλιών είναι η στήριξη της ατράκτου, η οποία επιτυγχάνεται με τη βοήθεια εδράνων (σχ.3.4). Σκοπός των εδράνων είναι η στήριξη της ατράκτου τόσο κατά την αξονική όσο και κατά την ακτινική διεύθυνση ώστε να εξασφαλίζεται η λειτουργία της πτερωτής. Για να επιτευχθεί αυτό θα πρέπει τα έδρανα να μπορούν να παραλάβουν και να μεταφέρουν στο στερεό σώμα της αντλίας τις αξονικές και ακτινικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στην πτερωτή, στο σημείο μετάδοσης της κίνησης, καθώς και το ίδιο βάρος της ατράκτου. Στη γενική περίπτωση η άτρακτος των αντλιών έχει δύο έδρανα, οπότε οι δυνάμεις που αναπτύσσονται σ' αυτά προκύπτουν από την ισορροπία των εξωτερικών δυνάμεων, σύμφωνα με τη μηχανική του στερεού σώματος. Στις τυποποιημένες αντλίες ή αντλίες γενικής χρήσης χρησιμοποιούνται έδρανα κύλισης (ρουλεμάν), παρά το γεγονός ότι είναι ακριβότερα από τα έδρανα ολίσθησης, διότι έχουν μια σειρά άλλων πλεονεκτημάτων. Βρίσκονται εύκολα στο εμπόριο σε όλα τα μεγέθη και τους τύπους, έχουν 25-50% μικρότερες απώλειες, απαιτούν μικρότερες διαστάσεις και εξασφαλίζουν λειτουργία με μικρότερες ανοχές.



Σχ.3.4 έδρανα αντλιών



### 3.5 Τύποι και εφαρμογές

Οι φυγόκεντρικές αντλίες διακρίνονται σε:

1. Οριζόντιες και κάθετες με βάση το κριτήριο της διεύθυνσης της γραμμής αναρρόφησης
2. Ακτινικής και αξονικής ροής με βάση το κριτήριο της κατεύθυνσης της ροής του καταθλιβόμενου ρευστού
3. Απλής και διπλής αναρρόφησης με βάση το κριτήριο της μορφής της χρησιμοποιούμενης πτερωτής και σε μονοβάθμιες
4. Πολυβάθμιες με βάση το κριτήριο του αριθμού των στροφείων ή πτερωτών που χρησιμοποιούν.

Μολονότι όπως καταδεικνύεται παραπάνω υπάρχει μια μεγάλη γκάμα φυγόκεντρικών αντλιών υπάρχουν κοινά συγκριτικά πλεονεκτήματά όλων των τύπων των φυγόκεντρικών αντλιών σε σχέση με τους άλλους τύπους αντλιών. Αυτά είναι η στρωτή και ομαλή λειτουργία τους (σε σχέση με τις παλινδρομικές) αλλά κυρίως η ευκαμψία λειτουργίας τους με την έννοια της δυνατότητας επιλογής του επιθυμητού εύρους λειτουργίας (η επιλογή αυτή γίνεται με βάση κατασκευαστικές και λειτουργικές παραμέτρους, πχ διάμετρο στροφείου, ταχύτητα περιστροφής, κλπ). Παράλληλα οι φυγόκεντρικές αντλίες απαιτούν κατά κανόνα μικρό χώρο συγκριτικά με άλλους τύπους αντλιών για το ίδιο μανομετρικό ή παροχή. Έχουν τη δυνατότητα να προσφέρουν τύπους αντλιών με πολύ μεγάλες παροχές που οι άλλοι τύποι αντλιών αδυνατούν να επιτύχουν (με μια εύλογη τεχνοοικονομικά κατασκευή) και για το λόγο αυτό συνήθως προτιμώνται σε γραμμές μεγάλων παροχών. Παρακάτω παρουσιάζονται τα κύρια κατασκευαστικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά ορισμένων βασικών τύπων αντλιών καθώς και οι ιδιαίτερες εφαρμογές τους.

#### 3.5.1 Μονοβάθμιες αντλίες απλής αναρρόφησης

Οι μονοβάθμιες αντλίες απλής αναρρόφησης έχουν μεγάλη χρήση γιατί καλύπτουν εκτεταμένες τεχνικές εφαρμογές (ύδρευση, άρδευση, κυκλοφορία υγρών σε βιομηχανίες κλπ). Όλοι σχεδόν οι κατασκευαστές αντλιών κατασκευάζουν πλήρεις σειρές τυποποιημένων αντλιών αυτού του τύπου για ταχύτητα περιστροφής 1450 και 2900 RPM, που καλύπτουν την περιοχή παροχών από 6,0-500,0 m<sup>3</sup>/h και ολικών υψών 15-80 mΣΥ. Μια πολύ πρακτική διαμόρφωση των μονοβάθμιων φυγόκεντρικών αντλιών που συνηθίζεται στη χημική βιομηχανία και είναι οι λεγόμενες in-line αντλίες, οι οποίες

τοποθετούνται συνήθως με κατακόρυφο τον άξονα. Σ' αυτές η διατομή εισόδου βρίσκεται στην ίδια ευθεία με τη διατομή εξόδου με αποτέλεσμα η αντλία να παρεμβάλλεται στη σωληνογραμμή χωρίς την παρέμβαση καμπυλών. Μια άλλη συνηθισμένη διαμόρφωση των μονοβάθμιων αντλιών που εφαρμόζεται συνήθως για τη διακίνηση υγρών ή σε δίκτυα θέρμανσης – ψύξης (κυκλοφορητές), είναι αυτή στην οποία ο ηλεκτροκινητήρας προσαρμόζεται με φλάντζα πάνω στο σώμα της αντλίας και έχει κοινή άτρακτο με αυτήν. Αυτές οι αντλίες ονομάζονται monoblock και κατασκευάζονται για παροχές από 10-80 m<sup>3</sup>/h και μανομετρικά ύψη 8-50 mΣΥ.

### 3.5.2 Αντλίες διπλής αναρρόφησης

Αναφορικά με το σχεδιασμό των περωτών, διακρίνονται στις απλές και τις διπλές περωτές καθώς επίσης τις ανοικτές και τις κλειστές περωτές. Οι αντλίες απλού στροφείου ή απλής περωτής έχουν δύο ανοίγματα, ένα από κάθε πλευρά. Το πρώτο είναι για την εισαγωγή του υγρού, ενώ το δεύτερο χρησιμεύει για την είσοδο του άξονα από τον κινητήρα ή τη μηχανή που προσδίδει την κίνηση. Ένα τρίτο ακτινικό άνοιγμα αποτελεί τον αγωγό εξόδου. Εκτός όμως από τις «μονές» περωτές υπάρχουν και οι διπλές περωτές που είναι συμμετρικές ως προς επίπεδο κάθετο στον άξονά τους. Χρησιμοποιούνται αντλίες διπλής αναρρόφησης για την αύξηση της ροής. Στις αντλίες διπλής αναρρόφησης κάθε μια περωτή διακινεί το μισό της συνολικής παροχής δηλαδή  $Q' = Q/2$ , οπότε ο ειδικός αριθμός στροφών της περωτής χαρακτηρίζεται από την παροχή  $Q'$ . Οι αντλίες διπλής αναρρόφησης κατασκευάζονται με σκοπό τη μείωση του ειδικού αριθμού στροφών (ο οποίος είναι πλέον συνάρτηση του  $Q'$  αντί του  $Q$ ) ώστε αυτός να έχει τιμές μεταξύ 2.000 και 4.000 ( $Q$  σε m<sup>3</sup>/h), οπότε η περωτή έχει έξοδο ακτινικής ροής και ο βαθμός απόδοσης της αντλίας είναι υψηλός. Λόγω της ιδιομορφίας όλων των τμημάτων της αντλίας διπλής αναρρόφησης (διαμπερής άτρακτος, τμήμα εισόδου κλπ), οι αντλίες αυτές κατασκευάζονται μόνο για μεγάλα μεγέθη και συγκεκριμένα για παροχές 500 - 8.000 m<sup>3</sup>/h και ολικά μανομετρικά ύψη 42 - 128 mΣΥ. Οι αντλίες διπλής αναρρόφησης είναι συνήθως αντλίες οριζόντιου άξονα.

### 3.5.3 Πολυβάθμιες αντλίες

Οι αντλίες που κατασκευάζονται με πολλά στροφεία σε σειρά συνιστούν τις πολυβάθμιες αντλίες. Σε αυτούς τους τύπους των φυγόκεντρικών αντλιών η ποσότητα του υγρού που μεταφέρεται από τα στροφεία είναι πάντοτε η ίδια. Η

κάθε περωτή χρησιμεύει μόνο για να αυξάνει την πίεση. Στην έξοδο της αντλίας το υγρό αποκτά ταχύτητα ίση προς την ταχύτητα που θα είχε με μόνο μια περωτή, ενώ η τελική πίεση δίνεται από τη διαφορά πίεσης που επιτυγχάνεται από τη μεμονωμένη λειτουργία της μιας περωτής, αν αυτή η τιμή πολλαπλασιαστεί επί τον αριθμό των περωτών. Οι πολυβάθμιες αντλίες χρησιμοποιούνται για να καλύψουν ανάγκες όπου απαιτείται μεγάλο μανομετρικό με σχετικά μικρές παροχές. Ο αριθμός των βαθμίδων για δεδομένη πίεση και παροχή λειτουργίας υπολογίζεται έτσι ώστε ο ειδικός αριθμός στροφών κάθε περωτής να είναι της τάξης του 2.500 και με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται υψηλός ολικός βαθμός απόδοσης.

#### 3.5.4 Ειδικές φυγόκεντρικές αντλίες

Ο συνηθέστερος τύπος ειδικών αντλιών είναι οι αντλίες λυμάτων και οι αντλίες υγρών – στερεών μιγμάτων (πχ μίγματα νερού με πέτρες, χρώματα ή άλλα στερεά για την υγρή μεταφορά υλικών). Η συγκέντρωση και το είδος των μεταφερόμενων στερεών λαμβάνεται υπόψη στην επιλογή των υλικών των διαφόρων τμημάτων της αντλίας ώστε να αντέχουν ικανοποιητικά στη μηχανική διάβρωση, ενώ για τη σχεδίαση της αντλίας λαμβάνεται υπόψη η μέγιστη διάμετρος του στερεού σώματος που μπορεί να περάσει από την αντλία. Οι αντλίες λυμάτων ή στερεών είναι πάντοτε μονοβάθμιες. Στην περίπτωση οριζόντιου άξονα έχουν την περωτή σε πρόβολο, ενώ στην περίπτωση κατακόρυφου άξονα είναι τύπου monoblock με στεγανό υποβρύχιο κινητήρα. Οι αντλίες λυμάτων σχεδιάζονται με αρκετά μεγάλο πλάτος περωτής και σπειροειδούς κελύφους, έτσι ώστε αυτά να επιτρέπουν τη διέλευση στερεών σωμάτων μέχρι ενός ορισμένου μεγέθους.

#### 3.5.5 Αντλίες αξονικής ροής

Οι αντλίες αξονικής ροής χρησιμοποιούνται συνήθως στην άντληση νερού. Οι αντλίες αυτές διακινούν υγρά σε κατεύθυνση παράλληλη, προς τον άξονά τους. Το διακινούμενο υγρό στις αντλίες αξονικής ροής κινείται από ένα στροφείο όμοιο με την προπέλα ενός πλοίου. Χρησιμοποιούνται σε συστήματα που έχουν μεγάλη ροή και χαμηλή κατάθλιψη.



# Κεφάλαιο

# 4

## Σπηλαιώση

---

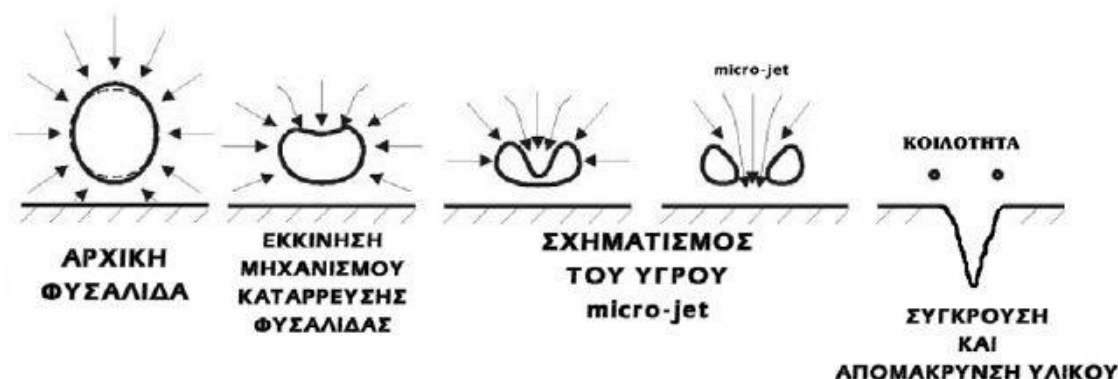
### 4.1 Ορισμός σπηλαιώσης.

Το φαινόμενο της σπηλαιώσης αναπτύσσεται όταν σε μία περιοχή της ροής η στατική πίεση τείνει τοπικά να γίνει μικρότερη από την πίεση ατμοποίησης του υγρού, οπότε αυτό ατμοποιείται και αναπτύσσεται ένας θύλακας ατμοποιημένου υγρού (ατμού). Άρα η σπηλαιώση είναι ένα φαινόμενο που αναπτύσσεται αποκλειστικά σε ροές υγρών.

### 4.2 Περιγραφή ανάπτυξης σπηλαιώσης

Σύμφωνα με την εξίσωση Bernoulli, σε οποιαδήποτε αύξηση ταχύτητας της ροής του υγρού μειώνεται αντίστοιχα η πίεση. Επομένως αυξάνεται η ταχύτητα κίνησης του υγρού ώστε η πίεση να γίνει ίση με τη μέγιστη τάση των ατμών, όπου σχηματίζονται μέσα στη μάζα του φυσαλίδες ατμού. Στη συνέχεια, εκτός και αν υπάρχει αλλαγή στις συνθήκες λειτουργίας, νέες φυσαλίδες σχηματίζονται διαρκώς ενώ οι παλιές αυξάνονται σε μέγεθος. Οι φυσαλίδες παρασύρονται από το υγρό καθώς αυτό ρέει από το «μάτι» του στροφείου προς το άκρο εξόδου του στροφείου κατά μήκος του πτερυγίου έως το χείλος εκφυγής. Καθώς οι φυσαλίδες ατμού κινούνται κατά μήκος των πτερυγίων του στροφείου, η πίεση γύρω από τις φυσαλίδες αρχίζει να αυξάνεται έως ότου επιτυγχάνεται ένα σημείο όπου η πίεση έξω από τη φυσαλίδα είναι μεγαλύτερη από την πίεση μέσα σε αυτή. Έτσι στο σημείο αυτό θα πρέπει να επαναυγροποιηθεί η μάζα του ατμού. Αυτό που ακολουθεί είναι η κατάρρευση της φυσαλίδας (σχ.4.2). Όταν οι φυσαλίδες μεταφερθούν σε περιοχή με μικρότερη ταχύτητα ροής (υψηλότερη πίεση) συμπυκνώνονται με μεγάλη ταχύτητα, με αποτέλεσμα την πρόσκρουση

του υγρού στις μεταλλικές επιφάνειες της αντλίας. Οι κρούσεις αυτές είναι διαδοχικές και έχουν μεγάλη συχνότητα προκαλώντας μικρές κοιλότητες στα μέταλλα της αντλίας, έχοντας σαν επίπτωση τη μείωση του βαθμού απόδοσης, ακόμα και την καταστροφή της.



Σχ.4.2 Η εξέλιξη της σπηλαίωσης

Από πειραματικές μετρήσεις (Morgan) έχει αποδειχθεί ότι η σπηλαίωση αρχίζει να εμφανίζεται όταν η στατική πίεση είναι μικρότερη από τη μέγιστη τάση των ατμών. Η διαφορά τάσεως και πίεσης του υγρού για να ξεκινήσει η σπηλαίωση εξαρτάται από τη φύση του υγρού. Η επικρατέστερη θεωρία για τη δημιουργία κοιλοτήτων στις μεταλλικές επιφάνειες λόγω της σπηλαίωσης, είναι αυτή της μηχανικής δράσεως. Πιο συγκεκριμένα, οι μεταλλικές επιφάνειες στις οποίες προσκρούει το υγρό υπόκεινται σε κραδασμούς ενώ η πίεση που εξασκείται σε αυτές αυξομειώνεται με μεγάλη ταχύτητα. Οι πιέσεις δε δρουν μόνο στο σημείο όπου εκδηλώνεται η σπηλαίωση αλλά εκτείνονται σε μεγαλύτερη επιφάνεια. Οι δυνάμεις δημιουργούν την αυξομείωση της πίεσης σπρώχνοντας μέρος του υγρού στους πόρους του μετάλλου, ενώ το υγρό που βρίσκεται στους πόρους απομακρύνεται με μεγάλη ταχύτητα. Οι εναλλαγές αυτές διευρύνουν τους πόρους του μετάλλου, καταστρέφουν τη συνοχή του και αποσπών μέρος του υλικού. Έχουν παρατηρηθεί διαβρώσεις σε όλα τα είδη των στερεών σωμάτων, μεταλλικών ή μη μεταλλικών χημικώς ενεργών ή μη χημικώς αδρανών (Knapp et al, 1970).

Το φαινόμενο της σπηλαίωσης επηρεάζει τη λειτουργία της αντλίας. Οι κραδασμοί που προκαλούνται από τις διαδοχικές αυξομειώσεις της πίεσης του υγρού, μεταφέρονται σε όλα τα εξαρτήματα της αντλίας, ακόμα και στη βάση στήριξης αυτής.

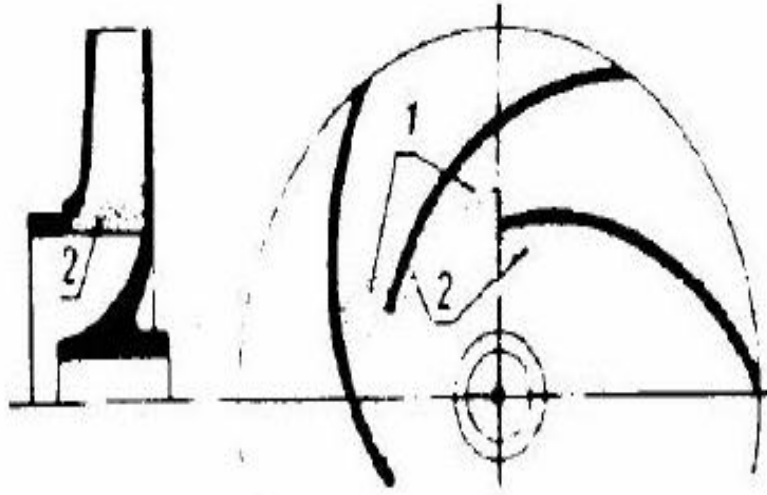
### **4.3 Προϋποθέσεις εμφάνισης σπηλαιώσης.**

Οι προϋποθέσεις κάτω από τις οποίες εμφανίζεται το φαινόμενο της σπηλαιώσης αναφέρονται παρακάτω:

1. Η μικρή πίεση σε σύγκριση με τη μέγιστη τάση των ατμών του υγρού που αντλείται. Αυτό συμβαίνει όταν το ύψος αναρρόφησης είναι μεγάλο ή το στόμιο εισόδου στο σωλήνα αναρρόφησης βρίσκεται σε μικρή απόσταση από την επιφάνεια του υγρού.
2. Όταν η παροχή είναι μεγαλύτερη από την κανονική η σπηλαιώση εμφανίζεται ευκολότερα γιατί αυξάνεται η ταχύτητα ροής με αντίστοιχη πτώση πίεσης.
3. Από κινηματική άποψη το σχήμα των γραμμών ροής επηρεάζει την εμφάνιση της σπηλαιώσης. Απότομη αλλαγή της διεύθυνσης ροής, απότομη διερεύνηση των διόδων ροής μέσα στην αντλία ή κακές συνθήκες εισόδου του υγρού στην πτερωτή είναι δυνατόν να προκαλέσουν σπηλαιώση.

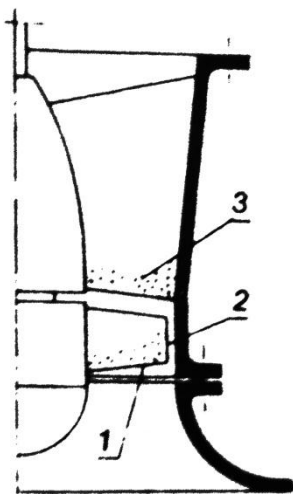
### **4.4 Θέσεις εκδήλωσης σπηλαιώσης.**

Στις φυγόκεντρες αντλίες, οι περιοχές στις οποίες υπάρχει ο κίνδυνος της σπηλαιώσης είναι η πίσω πλευρά των πτερυγίων κοντά στο χείλος εισόδου του υγρού. Στις περιοχές αυτές η πίεση έχει τη μικρότερη τιμή λόγω της απότομης αύξησης της ταχύτητας της ροής του υγρού. Επίσης η σπηλαιώση εμφανίζεται συχνά μεταξύ των πτερυγίων. Όταν η σπηλαιώση είναι μεγάλης έκτασης μπορεί να φθαρθούν και τα άκρα των πτερυγίων στην έξοδο, τα πτερύγια διάχυσης και ο αγωγός του σπειροειδούς περιβλήματος (σχ.4.4.1)



Σχ.4.4.1 περιοχές εμφάνισης σπηλαιώσης φυγόκεντρων αντλιών

Στις αντλίες μεικτής και αξονικής ροής όπου τα πτερύγια είναι πάντα ανοιχτού τύπου, η σπηλαιώση εκδηλώνεται στο χείλος εισόδου του υγρού στα πτερύγια, στα άκρα των πτερυγίων προς τα τοιχώματα του περιβλήματος και στο χείλος εισόδου του υγρού στα πτερύγια διάχυσης (σχ.4.4.2).



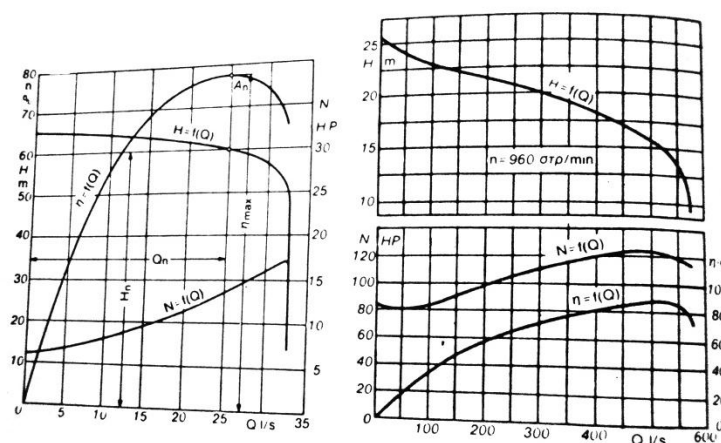
Σχ. 4.4.2 περιοχές σπηλαιώσης μεικτής και αξονικής ροής

#### 4.5 Συμπτώματα της σπηλαιώσης.

1. **Θόρυβος.** Προκαλείται από την πρόσκρουση του υγρού στις μεταλλικές επιφάνειες κατά την απότομη συμπύκνωση των φυσαλίδων.
2. **Κραδασμοί της αντλίας.** Προκαλούνται από τις ταλαντώσεις των τμημάτων στα οποία προσκρούει το υγρό. Όσο μεγαλύτερη είναι η αντλία τόσο πιο έντονοι είναι θόρυβοι και οι κραδασμοί.

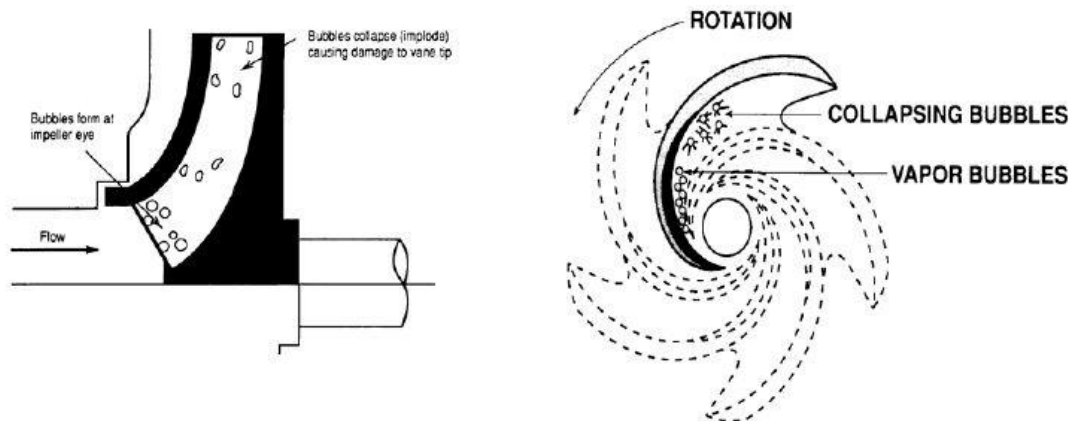
3. **Φθορά των μεταλλικών επιφανειών.** Πολλές φορές έχει μεγάλη έκταση, ιδίως όταν το υγρό περιέχει διαβρωτικές ουσίες (οξυγόνο ή οξέα). Αρχικά η επιφάνεια των μετάλλων σκληραίνει κ η τοπική υψηλή θερμοκρασία (έως 10.000 C°) έχει επιπτώσεις στο υλικό ακριβώς κάτω από την επιφάνειά του, καθιστώντας το λίγο «σπογγώδες» έτσι ώστε οι ρωγμές της επιφάνειας να επιτρέψουν την όξινη επίθεση στο εσωτερικό του δημιουργώντας του μια επιφάνεια με «κρατήρες» Η φθορά που προέρχεται από τη σπηλαιώση διαφέρει μικροσκοπικώς από τις συνήθεις διαβρώσεις των μετάλλων για τι εμφανίζεται μόνο σε ορισμένα σημεία και όχι σε όλο το μήκος των γραμμών ροής του υγρού. Η αντοχή των μετάλλων στη σπηλαιώση εξαρτάται από τη χημική τους σύνθεση και από το βαθμό λείανσης της επιφάνειάς τους. Κάποια υλικά έχουν διαφορετικό βαθμό αντοχής στη σπηλαιώση. Η κατάταξή τους κατά αύξουσα σειρά ανθεκτικότητας είναι: μόλυβδος, χυτοσίδηρος, ορείχαλκος, αλουμίνιο με άνθρακα, ανοξείδωτο ατσάλι.

4. **Απότομη πτώση των χαρακτηριστικών καμπυλών.** Γενικά οφείλεται στο γεγονός ότι στη ζώνη σπηλαιώσης αυξάνονται οι τριβές και οι υδραυλικές απώλειες. Εξαρτάται από διάφορους παράγοντες και κυρίως από την ειδική ταχύτητα της αντλίας. Στις φυγόκεντρες αντλίες με μικρή ειδική ταχύτητα ( $N_s < 30$ ) η πτώση των χαρακτηριστικών καμπυλών είναι πιο έντονη (σχ. 4.5.4). Στο παρακάτω σχήμα η σπηλαιώση εκδηλώνεται σε παροχή 32,5 Lt/s. Στις αντλίες αξονικής ροής με ειδική ταχύτητα ( $30 < N_s < 80$ ) η πτώση των χαρακτηριστικών καμπυλών αρχίζει πριν από την πλήρη εκδήλωση της σπηλαιώσης.



Σχ.4.5.4 αριστερά χαρακτ. μονοβάθμιας φυγόκεντρου αντλίας – δεξιά χαρακτ. αντλίας αξονική ροής

**5. Στραγγαλισμός ροής.** Εάν το φαινόμενο της σπηλαιώσης είναι έντονο η ανάπτυξη των φυσαλίδων μπορεί να δημιουργήσει αρχικά τοπικό στραγγαλισμό της ροής (σχ.4.5.5) και να μειώσει την απόδοση της αντλίας. Σε ακραίες περιπτώσεις είναι δυνατόν να παρατηρηθεί ολική απώλεια του ύψους της αντλίας και διακοπή της λειτουργίας της.



Σχ.4.5.5. ανάπτυξη σπηλαιώσης φυγόκεντρων αντλιών

#### 4.6 Μέτρηση κρίσιμου ύψους σπηλαιώσης $NPSH_r$ .

Όταν στα περύγια της περωτής αναπτυχθούν θύλακες σπηλαιώσης αλλάζει αμέσως η γεωμετρία της ροής με αποτέλεσμα να μειώνεται σημαντικά το διάκενο μεταξύ δύο διαδοχικών περυνγιών από το οποίο διακινείται η παροχή  $Q$ . Άρα για τη διακίνηση της ίδιας παροχής όπως οι συνθήκες χωρίς σπηλαιώση, η ταχύτητες της ροής αυξάνονται σημαντικά στην περιοχή αυτή, το ίδιο και οι υδραυλικές απώλειες με αποτέλεσμα τη μείωση του ολικού ύψους  $H$  και του ολικού βαθμού απόδοσης  $\eta_{ολ}$  δηλαδή την πτώση της χαρακτηριστικής  $(H-Q)$  και  $(\eta-Q)$  σε σχέση με αυτές για λειτουργία απαλλαγμένη σπηλαιώση.

Στην πράξη, ακριβώς η έναρξη της πτώσης του βαθμού απόδοσης σε σχέση με τη λειτουργία χωρίς σπηλαιώση, μπορεί να θεωρηθεί ως έναρξη του φαινομένου. Επειδή όμως το κριτήριο αυτό μπορεί να θεωρηθεί ως αυστηρό, το κριτήριο λειτουργίας με σπηλαιώση καθορίζεται ως το σημείο λειτουργίας στο οποίο η πτώση  $\delta H$  του ολικού ύψους ως προς αυτό της λειτουργίας χωρίς σπηλαιώση, γίνεται ίση προς 3% για μικρού μεγέθους αντλίες ή 1% για αντλίες μεγάλου μεγέθους. Η τιμή λοιπόν του  $NPSH_r$  (κρίσιμο ύψος σπηλαιώσης) θα είναι ίση με την τιμή του μεγέθους  $NPSH_{av}$  (διαθέσιμο θετικό ύψος) για το σημείο λειτουργίας που ορίζεται συμβατικά ως το σημείο λειτουργίας με σπηλαιώση.

Το  $NPSH_{av}$  ορίζεται από τη σχέση  $NPSH_{av} = H_{oe} - H_s$

όπου:  $H_{oe} = H$  ολική πίεση στο στόμιο της αντλίας.

$H_s = H$  τάση ατμοποίησης του νερού στη συγκεκριμένη θερμοκρασία του.

Το  $NPSH_{av}$  καθορίζεται από την εγκατάσταση και εκφράζει τη διαφορά της ολικής πίεσης στη διατομή αναρρόφησης της αντλίας ως προς την πίεση ατμοποίησης του υγρού. Η διαφορά αυτή διατίθεται στην αντλία από την αντλιτική εγκατάσταση και γι' αυτό το  $NPSH_{av}$  χαρακτηρίζει την εγκατάσταση.

Η σχέση μπορεί να γραφτεί και ως:

$$NPSH_{av} = H_M - H_s \cdot \lambda_1 \frac{W_1^2}{2g} \cdot \lambda_2 \cdot \frac{c_1^2}{2g}$$

Όπου:

$H_M$ : Η ελάχιστη πίεση μέσα στην πτερωτή

$\lambda_1 \frac{W_1^2}{2g} \cdot \lambda_2 \cdot \frac{c_1^2}{2g}$  : Οι απώλειες από το στόμιο της αντλίας αναρρόφησης στο σημείο M.

Το σημείο M βρίσκεται κοντά στην ακμή πρόσπτωσης των πτερυγίων αλλά δεν ταυτίζεται με αυτήν, είναι το σημείο με την ελάχιστη πίεση μέσα στην αντλία. Οι αριθμοί  $\lambda_1, \lambda_2$  δεν έχουν καμία σχέση με τον αριθμό  $\lambda$  της σχέσης Darcy. Ο αριθμός  $\lambda_1$  είναι ενδεικτικός της σχεδίασης της ακμής πρόσπτωσης των πτερυγίων και του σημείου λειτουργίας, ενώ ο αριθμός  $\lambda_2$  εξαρτάται από τη σχεδίαση του τμήματος εισόδου της αντλίας και το βαθμό κατεργασίας. Είναι συνεπώς συγκεκριμένοι για κάθε αντλία και σημείο λειτουργίας.

$W_1$ : Η σχετική ταχύτητα του ρευστού στη διατομή αναρρόφησης.

$C_1$ : Η απόλυτη ταχύτητα του ρευστού στη διατομή αναρρόφησης.

Στην οριακή κατάσταση λειτουργίας ως προς τη σπηλαιώση, η ελάχιστη πίεση εντός της αντλίας ισούται με την πίεση ατμοποίησης του υγρού, το υγρό ατμοποιείται και ξεκινάει το φαινόμενο της σπηλαιώσης ( $H_M = H_s$ ). Από αυτή την τιμή του  $NPSH_r$  (δηλαδή πιο χαμηλές τιμές) η εγκατάσταση δε διαθέτει τη απαραίτητη πίεση στην αναρρόφηση για λειτουργία χωρίς σπηλαιώση και η σπηλαιώση λαμβάνει χώρα συστηματικά. Αυτή η τιμή του  $NPSH_r$  ονομάζεται «κρίσιμο ύψος σπηλαιώσης  $NPSH_r$ » (Net Positive Suction Head required).



Το  $NPSH_r$  αποτελεί χαρακτηριστικό της αντλίας και εξαρτάται από τη σχεδίαση και κατεργασία της και ιδιαίτερα από την ακμή πρόσπτωσης και το τμήμα εισόδου. Έτσι λοιπόν η καμπύλη ( $Q - NPSH_r$ ) αποτελεί μια από τις χαρακτηριστικές της αντλίας (σχ.4.6) Η σχέση του  $NPSH_r$  γράφεται και διαφορετικά.

$$NPSH_{av} = H_E - h_e - \zeta_e \cdot Q^2 - H_s$$

$H_E$ : Η πίεση (το ύψος της πίεσης, σε m ) στην επιφάνεια δεξαμενής αναρρόφησης

$h_e$ : Το γεωδαιτικό ύψος μεταξύ επιφάνειας δεξαμενής αναρρόφησης και άξονα αντλίας (για οριζόντιες αντλίες) ή μεταξύ επιφάνειας δεξαμενής αναρρόφησης και στομίου αναρρόφησης (για κατακόρυφες αντλίες).

$\zeta_e \cdot Q^2$ : Οι συνολικές απώλειες στο σωλήνα αναρρόφησης.

$H_s$ : Η τάση ατμοποίησης του νερού, ή του εκάστοτε υγρού, σε συνθήκες πειράματος.

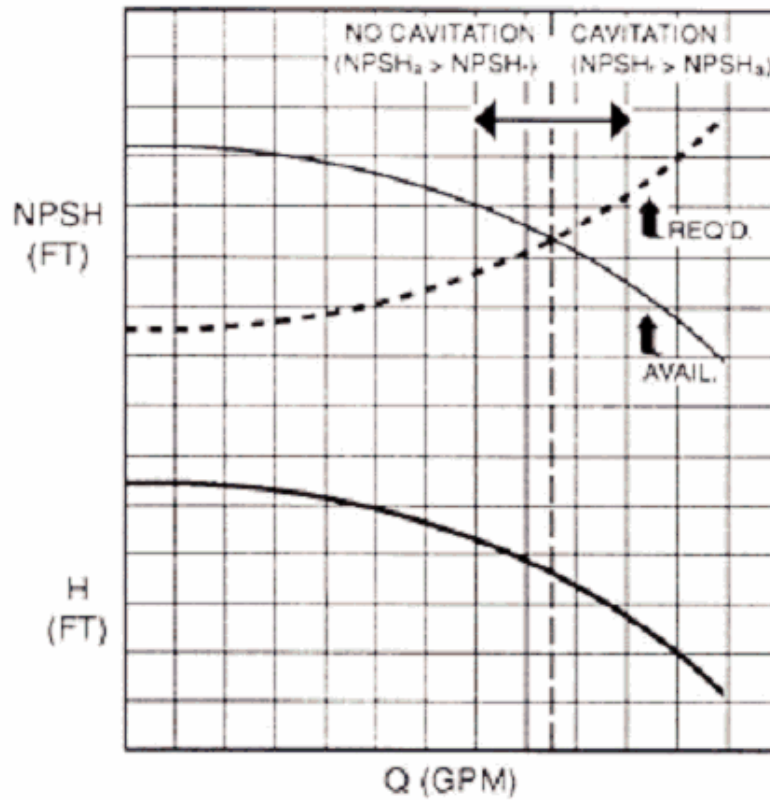
Έτσι λοιπόν για την κανονική παροχή κάθε φορά, που διατηρείται σταθερή, αν μεταβληθεί κάποιος/κάποιοι από τους παράγοντες που επηρεάζουν το  $NPSH_{av}$  και μειωθεί η τιμή μέχρι την επίτευξη του κριτηρίου εμφάνισης σπηλαιώσης, τότε η τιμή αυτή του  $NPSH_{av}$  θα είναι ίση με το  $NPSH_r$ .

Η μείωση του  $NPSH_r$  για σταθερή παροχή μπορεί να γίνει με τρεις τρόπους καθένας από τους οποίους αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη διαδικασία. Όπως φαίνεται από την εξίσωση  $NPSH_{av} = H_E - h_e - \zeta_e \cdot Q^2 - H_s$  -η μείωση του  $NPSH_{av}$  μέχρι να επιτευχθεί το κριτήριο σπηλαιώσης είναι δυνατόν να γίνει:

1. Μειώνοντας την πίεση  $H_E$  της δεξαμενής αναρρόφησης
2. Αυξάνοντας το ύψος αναρρόφησης  $h_e$
3. Αυξάνοντας τις υδραυλικές απώλειες στην αναρρόφηση της αντλίας.

Ο πρώτος τρόπος είναι ο πιο αξιόπιστος αλλά απαιτεί σημαντικό εξοπλισμό. Ο δεύτερος τρόπος δεν απαιτεί ιδιαίτερο εξοπλισμό είναι όμως επίπονη διαδικασία, χρονοβόρα και μη συνεχής. Εφαρμόζεται ο τρίτος τρόπος ο οποίος έχει την απλούστερη εφαρμογή αλλά είναι και ο λιγότερο αξιόπιστος στα αποτελέσματα που προκύπτουν. Αυτό οφείλεται στο ότι η αύξηση των υδραυλικών απωλειών με στραγγαλισμό στη βάννα αναρρόφησης, συνοδεύεται πάντα από διαταραχή της διανομής της ταχύτητας στην είσοδο της περωτής,

γεγονός που έχει ως συνέπεια την ανομοιόμορφη λειτουργία της περωτής και την επιτάχυνση της ανάπτυξης σπηλαίωσης.



Σχ.4.6 Μεταβολή των  $NPSH_r$  και  $NPSH_{av}$  συναρτήσει της Παροχής Q

# Κεφάλαιο

# 5

## Πειραματικός σχεδιασμός

---

### 5.1 Γενικά.

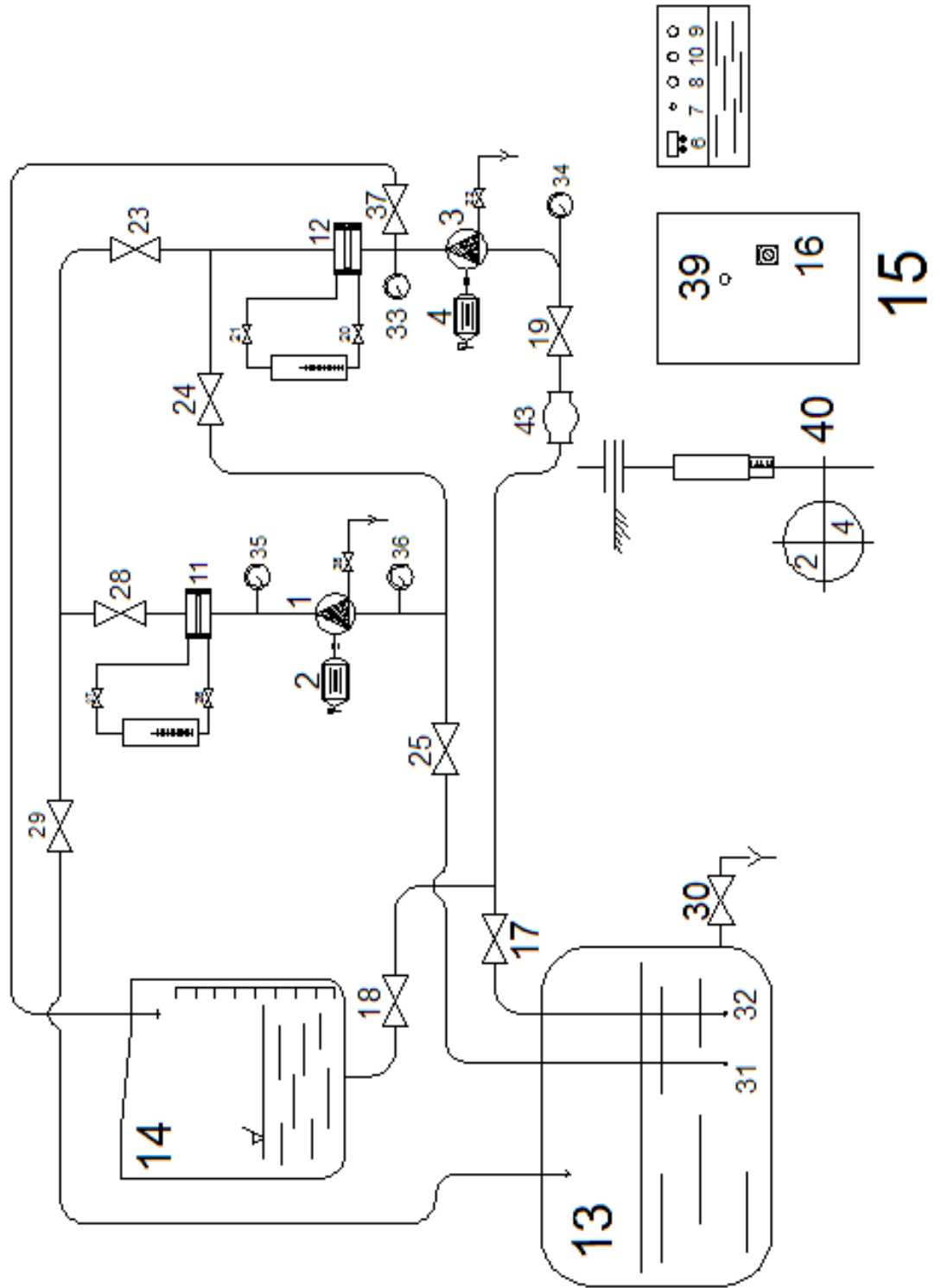
Η αντλία που χρησιμοποιήθηκε για την πειραματική διαδικασία είναι της εταιρίας Prodit η οποία την σχεδίασε καθαρά για εκπαιδευτικούς λόγους. Το μοντέλο της είναι το SA303/011.002.

Η μονάδα (σχ.5.1) σχεδιάστηκε για τη μελέτη των φυγοκεντρικών αντλιών και την επίτευξη της λειτουργίας σε σειρά και παράλληλη σύνδεση. Η κίνηση των αντλιών επιτυγχάνεται από ένα κινητήρα συνεχούς ρεύματος, η κάθε μία χωριστά. Στη μονάδα περιλαμβάνονται δύο δεξαμενές νερού, ροόμετρα, πιεσιόμετρα, ηλεκτρονικά ταχύμετρα, βάνες και σωληνώσεις.



Σχ.5.1 Μονάδα εργαστηρίου

# ΜΟΝΑΔΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΑΝΤΛΙΩΝ ΣΕ ΣΕΙΡΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΛΛΗΛΗ ΔΙΑΤΑΞΗ



1 ΑΝΤΛΙΑ Β΄ ΒΑΘΜΙΔΑΣ	
2 Η/Κ DC Β΄ ΒΑΘΜΙΔΑΣ	
3 ΑΝΤΛΙΑ Α΄ ΒΑΘΜΙΔΑΣ	22 ΒΑΝΑ ΕΚΡΟΗΣ ΑΝΤΛΙΑΣ Α΄ ΒΑΘΜΙΔΑΣ
4 Η/Κ DC Α΄ ΒΑΘΜΙΔΑΣ	23 ΒΑΝΑ ΕΛΕΓΧΟΥ Α΄ ΒΑΘΜΙΔΑΣ
5 ΔΥΝΑΜΟΜΕΤΡΟ	24 ΒΑΝΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΣΕΙΡΑΣ (ΠΑΡΑΛΛΗΛΗ ΔΙΑΚΟΠΗ)
6 ΤΑΧΟΜΕΤΡΟ	25 ΒΑΝΑ ΕΛΕΓΧΟΥ Β΄ ΒΑΘΜΙΔΑΣ
7 ΠΟΤΕΣΙΟΜΕΤΡΟ	26 ΒΑΝΑ ΡΟΟΜΕΤΡΟΥ Β΄ ΒΑΘΜΙΔΑΣ
8 ΔΙΑΚΟΠΤΗΣ ON	27 ΒΑΝΑ ΡΟΟΜΕΤΡΟΥ Β΄ ΒΑΘΜΙΔΑΣ
9 ΔΙΑΚΟΠΤΗΣ ΚΙΝΔΥΝΟΥ	28 ΒΑΝΑ ΕΛΕΓΧΟΥ Β΄ ΒΑΘΜΙΔΑΣ
10 ΔΙΑΚΟΠΤΗΣ OFF	29 ΒΑΝΑ ΕΛΓΧΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΣΕΙΡΑ
11 ΡΟΟΜΕΤΡΟ Β΄ ΒΑΘΜΙΔΑΣ	30 ΒΑΝΑ ΑΔΕΙΑΣΜΑΤΟΣ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ
12 ΡΟΟΜΕΤΡΟ Α ΒΑΘΜΙΔΑΣ	31 ΠΟΔΟΒΑΛΒΙΔΕΣ Α&Β ΒΑΘΜΙΔΑΣ
13 ΚΑΤΩ ΔΕΞΑΜΕΝΗ(1000LT)	32 ΠΟΔΟΒΑΛΒΙΔΕΣ Α&Β ΒΑΘΜΙΔΑΣ
14 ΠΑΝΩ ΔΕΞΑΜΕΝΗ (500LT)	33 ΒΑΝΑ ΡΟΟΜΕΤΡΟΥ Α΄ ΒΑΘΜΙΔΑΣ
15 ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΛΕΓΧΟΥ	34 ΜΑΝΟΜΕΤΡΟ ΑΝΑΡΡΟΦΗΣΗΣ Α΄ ΒΑΘΜΙΔΑΣ
16 ΚΥΡΙΟΣ ΔΙΑΚΟΠΤΗΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ	35 ΜΑΝΟΜΕΤΡΟ ΚΑΤΑΘΛΨΗΣ Β΄ ΒΑΘΜΙΔΑΣ
17 ΒΑΝΑ ΔΕΞΑΜΕΝΗ ΑΝΑΡΡΟΦΗΣΗΣ	36 ΜΑΝΟΜΕΤΡΟ ΑΝΑΡΡΟΦΗΣΗΣ Β΄ ΒΑΘΜΙΔΑΣ
18 ΒΑΝΑ ΔΕΞΑΜΕΝΗ ΑΝΑΡΡΟΦΗΣΗΣ	37 ΒΑΝΑ ΓΕΜΙΣΜΑΤΟΣ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ
19 ΒΑΝΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΡΟΗΣ ΑΝΑΡΡΟΦΗΣΗΣ Α΄ ΒΑΘΜΙΔΑΣ	38 ΒΑΝΑ ΕΚΡΟΗΣ ΑΝΤΛΙΑΣ Β΄ ΒΑΘΜΙΔΑΣ
20 ΒΑΝΑ ΡΟΟΜΕΤΡΟΥ Α΄ ΒΑΘΜΙΔΑΣ	39 ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΗ ΛΥΧΝΙΑ ΡΕΥΜΑΤΟΣ
21 ΒΑΝΑ ΡΟΟΜΕΤΡΟΥ Α΄ ΒΑΘΜΙΔΑΣ	40 ΑΝΑΦΟΡΑ ΕΥΘΥΓΡΑΜΙΣΗΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ
	41 ΚΑΤΩ ΚΟΜΒΙΟ ΕΛΕΓΧΟΥ ΔΥΝΑΜΟΜΕΤΡΟΥ
	42 ΕΠΑΝΩ ΚΟΜΒΙΟ ΕΛΕΓΧΟΥ ΔΥΝΑΜΟΜΕΤΡΟΥ
	43 ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ

## 5.2 Προδιαγραφές αντλίας.

- Δύο φυγοκεντρικές αντλίες
- Παροχή 7,5 - 15 m<sup>3</sup>/hr
- Μανομετρικό αντλίας 11 – 23,5 m
- Κινητήρας συνεχούς ρεύματος με εύκολη μέτρηση της ροπής
- Τάξη κινητήρα 1,7 kWh σε 2600 RPM

## 5.3 Χαρακτηριστικά αντλίας εργαστηρίου.

Χαρακτηριστικά μονάδας:

- Μέτρηση ροπής
- Μέτρηση παροχής
- Έλεγχος ταχύτητας από 500 έως 2900 RPM (Στροφές/ λεπτό)
- Ανεξάρτητος έλεγχος ταχύτητας για κάθε αντλία
- Ανεξάρτητο ταχύμετρο για κάθε αντλία
- Υψηλή ισχύς εξόδου
- Σωληνώσεις από μαύρο χαλυβδοσωλήνα και ορειχάλκινα εξαρτήματα.

## 5.4 Πειραματική διαδικασία.

Η πειραματική διαδικασία για τη μελέτη του φαινομένου της σπηλαίωσης αποτελείται από 4 μέρη τα οποία θα αναλυθούν παρακάτω.

1. Καθορισμός παραμέτρων έναρξης σπηλαίωσης. Στο πείραμα αυτό περιγράφεται ο πειραματικός τρόπος με τον οποίο μπορεί να βρεθεί το μέγιστο ύψος αναρρόφησης  $H_k$  που καθορίζει την έναρξη της σπηλαίωσης.
2. Υπολογισμός παραμέτρου σπηλαίωσης μέσω της σχέσης Anderson και βάση ορισμού, όπου θα παρθούν διάφορες τιμές του κρίσιμου ύψους σπηλαίωσης και του μανομετρικού για τον υπολογισμό του ορισμού.
3. Υπολογισμός παραμέτρου σπηλαίωσης βάση χαρακτηριστικών.

Στόχος της πρώτης πειραματικής διαδικασίας είναι η σύγκριση του θεωρητικού κρίσιμου ύψους αναρρόφησης με το πειραματικό, και ο στόχος των επόμενων τριών διαδικασιών είναι η σύγκριση των μεθόδων υπολογισμού της σπηλαίωσης ως προς την αποτελεσματικότητα και την εγκυρότητά τους.

### 5.4.1 Καθορισμός παραμέτρων έναρξης σπηλαιώσης.

Σκοπός του πειράματος είναι ο υπολογισμός του συντελεστή σπηλαιώσης και του μέγιστου ύψους αναρρόφησης για την έναρξη της σπηλαιώσης της αντλίας με αριθμό στροφών πτερωτής (N) 2750 RPM.

Σύντομη Θεωρία. Σπηλαιώση: Ο σχηματισμός θυλάκων ή φυσαλίδων ατμών του υγρού που προέρχεται από την εξάτμισή του στις περιοχές όπου η στατική πίεση ελαττώνεται μέχρι την τιμή της πίεσης των ατμών του υγρού για την θερμοκρασία που επικρατεί εκεί.

Προϋποθέσεις για την εμφάνιση της σπηλαιώσης.

- Η μικρή πίεση σε σύγκριση με τη μέγιστη τάση των ατμών του υγρού που αντλείται όταν το ύψος αναρρόφησης βρίσκεται σε μικρή απόσταση από την επιφάνεια του υγρού.
- Όταν οι παροχή Q είναι μεγαλύτερη από την κανονική, εμφανίζεται ευκολότερα γιατί αυξάνεται η ταχύτητα ροής με αντίστοιχη πτώση της πίεσης.
- Από κινηματική άποψη το σχήμα των γραμμών ροής επηρεάζεται από την εμφάνιση της σπηλαιώσης. Απότομη αλλαγή της διεύθυνσης ροής, απότομη διεύρυνση των διόδων ροής μέσα στην αντλία ή κακές συνθήκες στην είσοδο του υγρού στην πτερωτή είναι δυνατόν να προκαλέσουν σπηλαιώση.

Υπολογιστικό μέρος.

Πίνακας δεδομένων

$N_1$ (RPM)	$Q_1$ (m <sup>3</sup> /h)	$P_{k1}$ (bar)	$P_{a1}$ (bar)	$F_1$ (kg)
2750	19,684	-0,089	-0,291	2,821
2750	15,288	0,680	-0,148	2,714
2750	10,108	1,075	-0,029	2,367
2750	5,669	1,284	0,035	1,867
2750	0	1,363	0,100	1,194

Υπολογισμός μανομετρικού H:

$$H_1 = \frac{P_k - P_a}{g \cdot \rho} + h = \frac{(-0,089 + 0,291) \text{ bar}}{9806 \text{ Nt/m}^3} \cdot 10^5 \frac{\text{Nt/m}^2}{\text{bar}} + 0,4 \text{ m} = 2,46 \text{ m}.$$



$$H_2 = 8,84 \text{ m}$$

$$H_3 = 11,66 \text{ m}$$

$$H_4 = 13,14 \text{ m}$$

$$H_5 = 13,28 \text{ m}$$

Υπολογισμός ισχύος εισόδου  $P_{\text{εισ}}$ :

$$\begin{aligned} P_{\text{εισ}1} &= \frac{2 \cdot n \cdot T}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot f \cdot l}{60} \\ &= \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 2750 \text{ RPM} \cdot 2,821 \text{ Kg} \cdot 0,15 \text{ m} \cdot 9,806 \text{ Nt/Kp}}{60 \text{ sec}} \\ &= 1194,338 \text{ Watt.} \end{aligned}$$

$$P_{\text{εισ}2} = 1149,037 \text{ Watt}$$

$$P_{\text{εισ}3} = 1002,126 \text{ Watt}$$

$$P_{\text{εισ}4} = 7090,4394 \text{ Watt}$$

$$P_{\text{εισ}5} = 505,5086 \text{ Watt}$$

Υπολογισμός ισχύος εξόδου  $P_{\text{εξ}}$ :

$$P_{\text{εξ}1} = \gamma \cdot Q \cdot H = \frac{9,806 \frac{\text{Nt}}{\text{m}^3/\text{h}} \cdot 2,72 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 2,46 \text{ m}}{3600 \text{ sec/h}} = 131,90 \text{ Watt}$$

$$P_{\text{εξ}2} = 368,2811 \text{ Watt}$$

$$P_{\text{εξ}3} = 320,992 \text{ Watt}$$

$$P_{\text{εξ}4} = 202,86 \text{ Watt}$$

$$P_{\text{εξ}5} = 0 \text{ Watt}$$

Υπολογισμός βαθμού απόδοσης  $n$ :

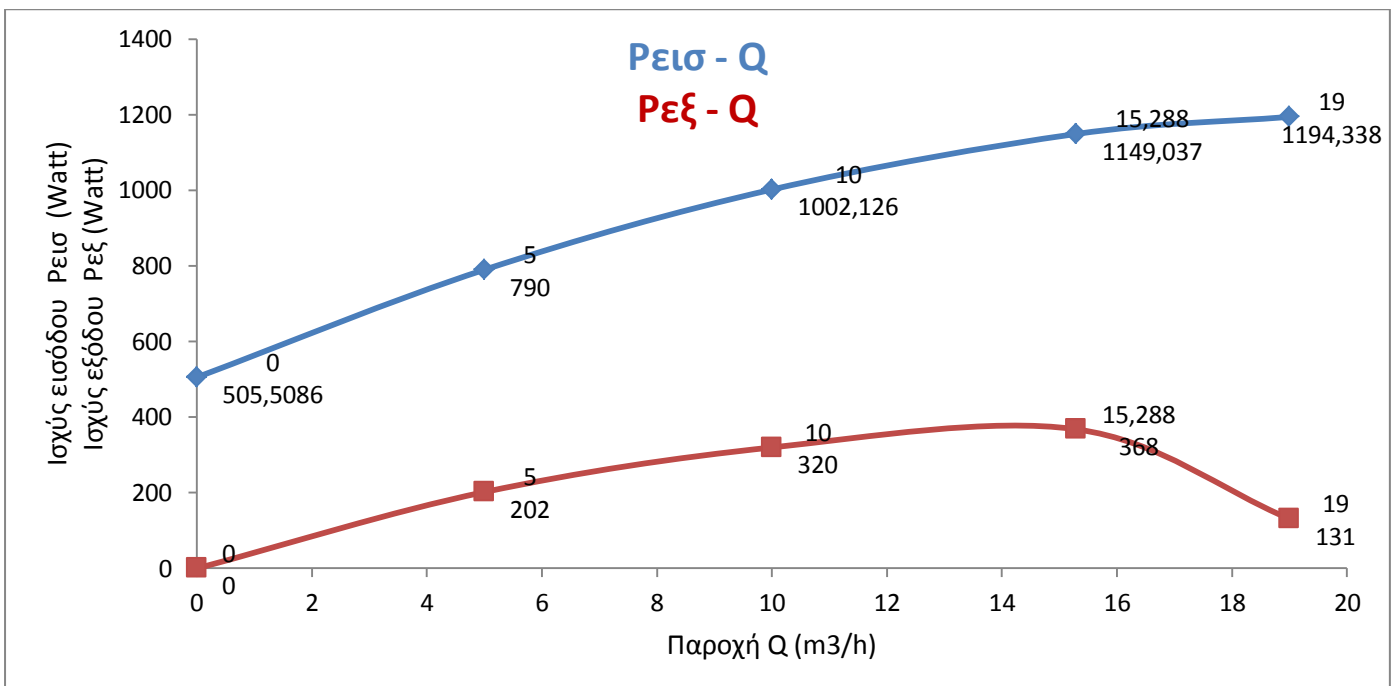
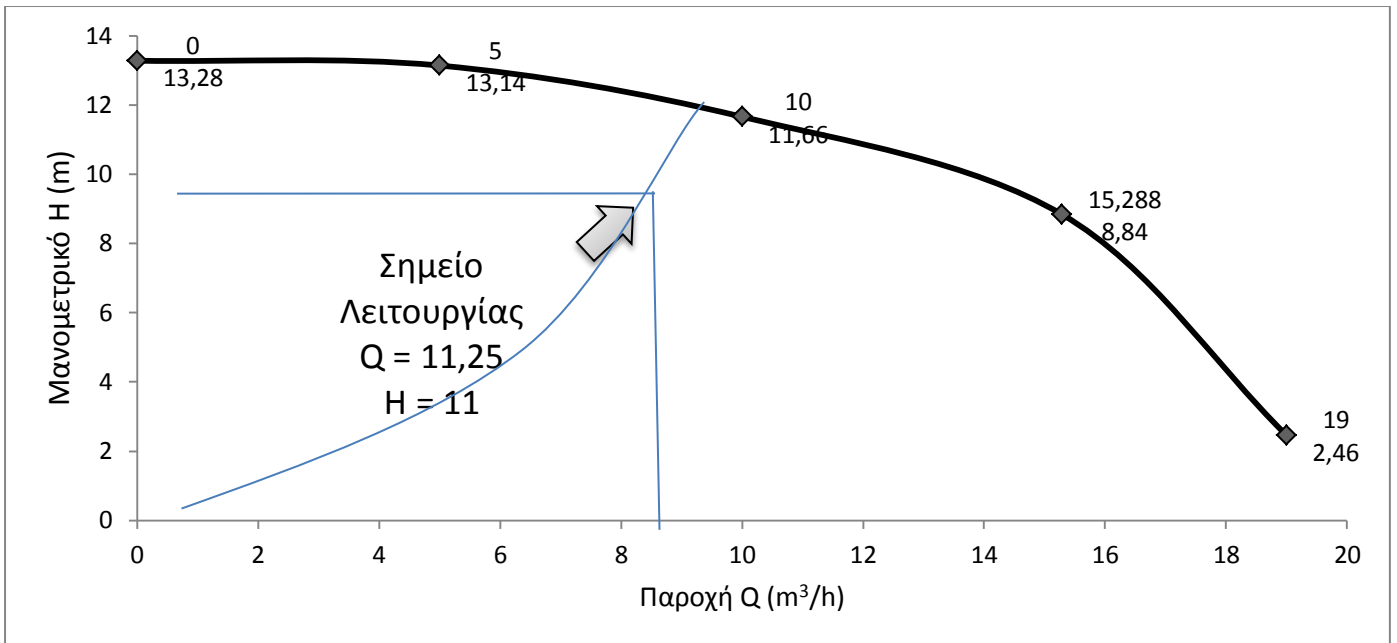
$$n_1 \cdot \% = \frac{P_{εξ1}}{P_{εισ1}} = \frac{131,90}{1194,338} \cdot 100 \approx 11\%$$

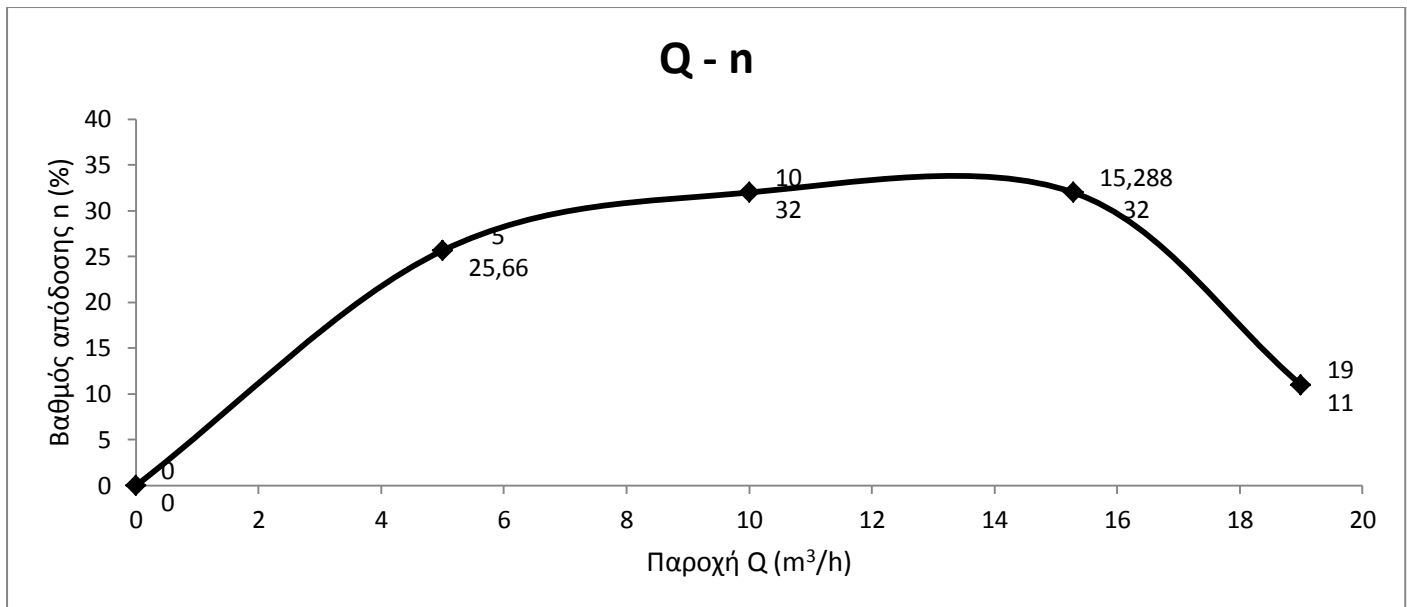
$$n_2 = 32.051\%$$

$$n_3 = 32.031\%$$

$$n_4 = 25.66\%$$

$$n_5 = 0\%$$





Κάνοντας τα διαγράμματα H,Q με βάση το ολικό στατικό (πειραματικά  $H_{ολ} = 0,42$  m) βρίσκεται το σημείο λειτουργίας  $Q = 11,25$  m<sup>3</sup>/h ,  $H = 11$ m με βαθμό απόδοσης  $n=34\%$ . Το πείραμα έχει ως στόχο τη σύγκριση του θεωρητικού ύψους αναρρόφησης με το πραγματικό ύψος αναρρόφησης.

Ειδική ταχύτητα  $N_s$ :

$$N_s = \frac{N \cdot \sqrt{Q}}{H^{0,75}} = \frac{2750 \text{ RPM} \cdot \sqrt{11,25}}{11^{0,75}} = 1527$$

Συντελεστής σπηλαίωσης  $\sigma$ :

$$\sigma = \frac{3,75 \cdot 10^{-6}}{n^2} \cdot N_s^{1,33} = \frac{3,75 \cdot 10^{-6}}{0,34^2} \cdot 1527^{1,33} = 7,92 \cdot 10^{-3}$$

$$= 0,00792 \text{ (τύπος } Anderson, 1962)$$

Από την εξίσωση ενέργειας μεταξύ της επιφάνειας, της δεξαμενής αναρρόφησης και του σημείου εισόδου του υγρού στην περωτή προκύπτει η εξίσωση:

$$\frac{P_{\delta\alpha}}{\gamma} = \frac{P_o}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + H_a + K \cdot \frac{W_1^2}{2g} + \Delta h_a \text{ (εξίσωση 1)}$$

$P_{\delta\alpha}$  : απόλυτη πίεση στη δεξαμενή αναρρόφησης. Για ελεύθερη επιφάνεια είναι ίση με την ατμοσφαιρική πίεση.

$P_o$  : απόλυτη πίεση στο σημείο όπου εμφανίζεται η σπηλαίωση. Η μικρότερη τιμή της πίεσης για την εμφάνιση (κρίσιμη πίεση) είναι ίση με τη μέγιστη τάση των κορεσμένων ατμών  $P_o$ .

$V_1$  : απόλυτη ταχύτητα του υγρού στην είσοδο της περωτής.

$H_a$  : στατικό ύψος αναρρόφησης

$K$  : συντελεστής απωλειών στην είσοδο της περωτής, ο οποίος εξαρτάται από την ειδική ταχύτητα της αντλίας  $N_s$  και το σχήμα των περυγίων.

$W_1$  : στατική ταχύτητα του υγρού στην είσοδο της περωτής.

$\Delta h_a$  : άθροισμα των υδραυλικών απωλειών στο σωλήνα αναρρόφησης και στο στόμιο εισόδου της αντλίας.

Για την εμφάνιση της σπηλαίωσης  $P_o = P_v$

$$H_a = \frac{P_{\delta\alpha}}{\gamma} - \frac{P_v}{\gamma} - \frac{V_1^2}{2g} - K \cdot \frac{W_1^2}{2g} - \Delta h_a \text{ (εξίσωση 2)}$$

Η πτώση της απόλυτης πίεσης μεταξύ της εισόδου στην περωτή και της εισόδου στα περύγια προκαλεί τη σπηλαίωση και οφείλεται στην αύξηση του ύψους ταχύτητας και στις απώλειες λόγω τριβών.

$$\Delta h = \frac{V_1^2}{2g} + K \cdot \frac{W_1^2}{2g} \text{ (εξίσωση 3)}$$

$\Delta h$  : δυναμική πτώση πίεσης ανάλογη του ολικού ύψους της αντλίας

$$\Delta h = \sigma \cdot H \text{ (εξίσωση 4)}$$

$\sigma$  : συντελεστής σπηλαίωσης και αποτελεί κριτήριο εμφάνισης της σπηλαίωσης μέσα στην αντλία.

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση 2 τους αντίστοιχους όρους (εξ. 3 και εξ.4) και εκφράζοντας τις πιέσεις ως ύψη πίεσης προκύπτει:

$$H_a = h_{\delta\alpha} - h_v - \sigma H - \Delta H_a \text{ (εξίσωση 5)}$$

$$\text{άρα: } \sigma = \frac{h_{\delta\alpha} - h_v - \Delta H_a - H_a}{H} \text{ (εξίσωση 6)}$$

Όπου ο αριθμητής αναφέρεται ως καθαρό ύψος αναρρόφησης NPSH του συστήματος άντλησης και σύμφωνα με τις εξισώσεις 1,2,3 η τιμή είναι ίση με τη

δυναμική πτώση πίεσης επομένως  $H\delta_\alpha = 10,33$  (λόγω της ατμοσφαιρικής πίεσης).

$h_v = 0,105$  λόγω του ότι η πίεση στο σημείο βρασμού είναι 1 ατμόσφαιρα.

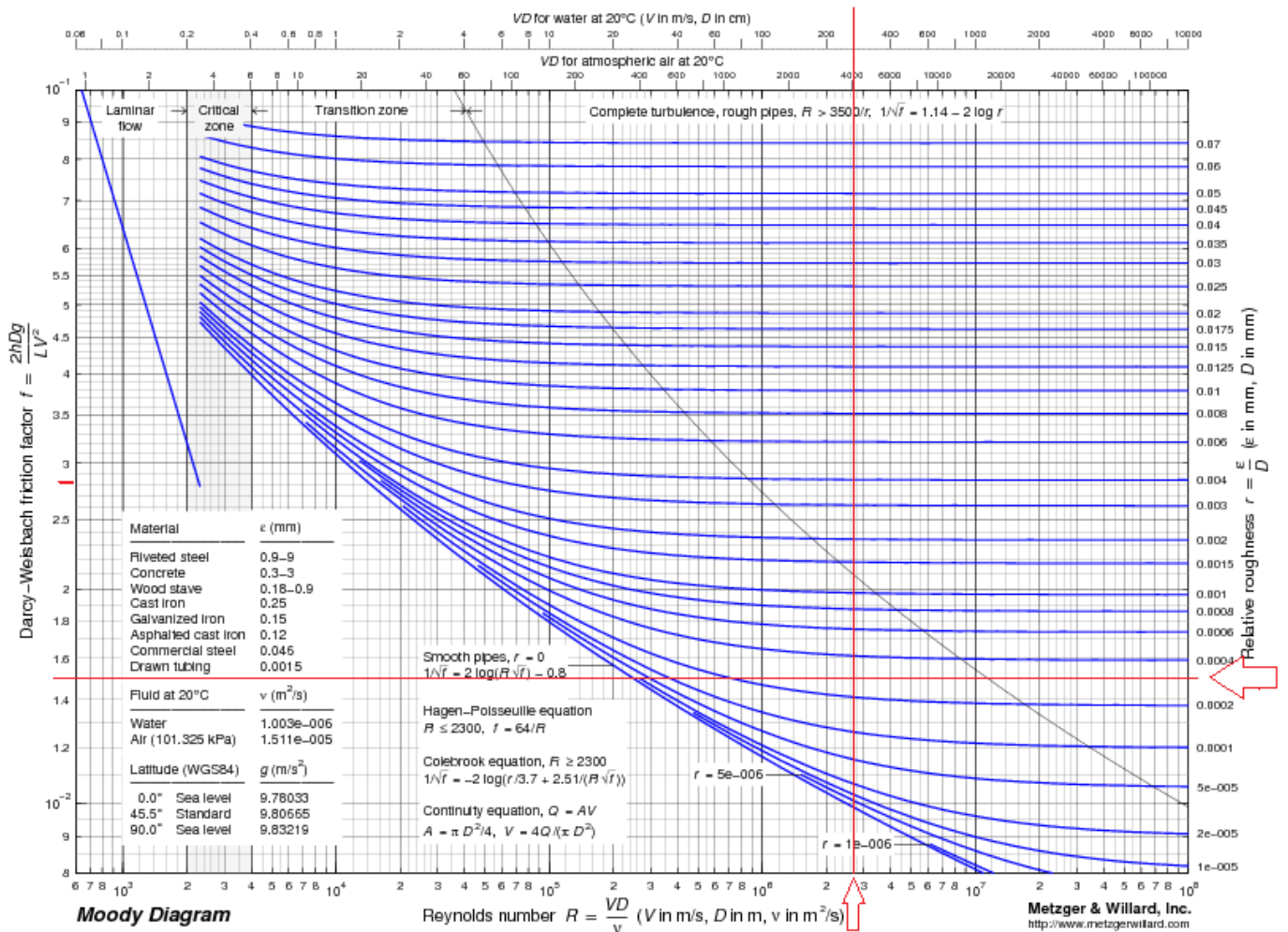
Το άθροισμα των υδραυλικών απωλειών στο σωλήνα αναρρόφησης και στο στόμιο εισόδου της αντλίας  $\Delta h_\alpha$  υπολογίζεται ως εξής:

$$Hf_{\sigma v} = \frac{f \cdot L \cdot u^2}{D \cdot 2g}$$

$$Re = \frac{u \cdot D}{\nu} = \frac{4Q}{\pi \cdot D \cdot \nu} = \frac{4 \cdot 11 \text{ m}^3/h}{3,14 \cdot 0,0508 \text{ m} \cdot 1,007 \cdot 10^{-6}} = 2,74 \cdot 10^7$$

$$\frac{E}{D} = \frac{0,00152 \text{ cm}}{5,08 \text{ cm}} = 2,99 \cdot 10^{-4}$$

Σύμφωνα με το διάγραμμα του Moody ο συντελεστής τριβής είναι  $f = 0,0145$ .



Διάγραμμα moody

$f$  : συντελεστής τριβής από διάγραμμα moody.

$L$  : μήκος σωληνογραμμής (περίπου 300m).

$D$  : Διάμετρος αγωγού (0,0508 m).

$g$  : επιτάχυνση βαρύτητας (9,806  $m/sec^2$ ).

$\nu$  : κινηματικό ιξώδες ( $1,007 \cdot 10^{-6} m^2/sec$ )

$E/D$  : σχετική τραχύτητα του σωλήνα (0,00152 cm)

$$Hf_{\text{συν}} = \frac{0,0145 \cdot 300 m \cdot (1,539 m/sec)^2}{0,0508 m \cdot 2 \cdot 9,806 m/sec^2} = 0,525 m$$

Τοπικές απώλειες:

$$Hf_{\text{τοπ}} = \frac{\Sigma \zeta \cdot u^2}{2g} = \frac{1 \cdot (1,539 m/sec)^2}{2 \cdot 9,806 m/sec^2} = 0,121 m$$

Σζ : άθροισμα συντελεστών αντίστασης  $\zeta_1+\zeta_2+\zeta_3\dots\zeta_1,\zeta_2,\zeta_3\dots$  από πίνακες (περίπου 1)

$H_{f_{\text{τοπ}}}$  : οι απώλειες της εγκατάστασης λόγω των εξαρτημάτων (μούφες, βάνες κλπ), έχουν υπολογιστεί προσεγγιστικά και οι σωληνώσεις είναι από μαύρο χαλυβδοσωλήνα.

$$\text{Άρα: } \Delta H_{\alpha} = H_{f_{\text{τοπ}}} + H_{f_{\text{συν}}} = 0,121 \text{ m} + 0,525 \text{ m} = 0,646 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} H_{\alpha \text{ max}} &= h_{\delta_{\alpha}} - h_{\nu} - \sigma \cdot H - \Delta H_{\alpha} \\ &= 10,33 \text{ m} - 0,105 \text{ m} - 7,92 \cdot 10^{-3} \cdot 11 \text{ m} - 0,646 \text{ m} = 9,492 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\sigma = \frac{H_{\theta \text{ max}}}{H} \Leftrightarrow H_{\theta \text{ max}} = \sigma \cdot H = 7,92 \cdot 10^{-3} \cdot 11 \text{ m} = 0,087 \text{ m}$$

$\sigma$ : συντελεστής σπηλαίωσης

$H_{\alpha \text{ max}}$  : Πραγματικό ύψος αναρρόφησης

$H_{\theta \text{ max}}$  : Δυναμική πτώση πίεσης

$H$  : Μανομετρικό

Με το σταδιακό άδειασμα της δεξαμενής, η στάθμη κατεβαίνει και αυξάνει αντίστοιχα το ύψος αναρρόφησης γίνεται 9,492 m με συντελεστή σπηλαίωσης  $7,92 \cdot 10^{-3}$ .



### 5.4.2 Υπολογισμός παραμέτρου σπηλαίωσης μέσω της σχέσης Anderson

#### βάση ορισμού.

Σκοπός του πειράματος είναι ο υπολογισμός παραμέτρου σπηλαίωσης μέσω της σχέσης Anderson και βάση ορισμού, όπου θα παρθούν διάφορες τιμές του κρίσιμου ύψους σπηλαίωσης και του μανομετρικού για τον υπολογισμό του ορισμού.

#### Σύντομη θεωρία.

$$\sigma = \frac{3,75 \cdot 10^{-6}}{n^2} \cdot Ns^{1,33} \text{ (τύπος Anderson, 1962)}$$

Όπου:

$\sigma$ : Συντελεστής σπηλαίωσης.

$Ns$ : Ειδική ταχύτητα.

$N$ : Βαθμός απόδοσης.

$$\sigma = \frac{NPSH_r}{H} \text{ (τύπος ορισμού)}$$

Όπου:

$NPSH_r$  : Κρίσιμο ύψος σπηλαίωσης (αναφέρεται στην §4.6 ο υπολογισμός του)

$H$ : Μανομετρικό.

Υπολογιστικό μέρος.

## Πίνακας βασικών δεδομένων και αποτελεσμάτων:

Στροφές N (RPM)	Παροχή Q (m <sup>3</sup> /hr)	Πίεση Κατάθλιψης P <sub>k</sub> (bar)	Πίεση Αναρρόφησης P <sub>a</sub> (bar)	Δύναμη f (Kgr)	Μανομετρικό H (m)	Ισχύς Εισόδου P <sub>εισ</sub> (Watt)	Ισχύς εξόδου P <sub>εξ</sub> (Watt)	Βαθμός απόδοσης η(%)
2750	19,684	-0,089	-0,291	2,821	2,460	1194,338	131,896	11,043
2750	15,288	0,68	-0,148	2,714	8,844	1149,037	368,281	32,051
2750	10,108	1,075	-0,029	2,367	11,658	1002,126	320,992	32,031
2750	5,669	1,284	0,035	1,867	13,137	790,439	202,859	25,664
2750	0	1,363	0,1	1,194	13,280	505,509	0,000	0
2769,344	19,676	-0,201	-0,349	2,769	1,909	1180,569	102,328	8,668
2770,814	15,311	0,813	-0,143	2,684	10,149	1144,937	423,274	36,969
2756,706	10,311	1,339	-0,008	2,278	14,136	966,798	397,038	41,067
2748,623	5,671	1,634	0,074	1,625	16,309	687,638	251,922	36,636
2731,428	0,061	1,606	0,098	1,178	15,778	495,366	2,622	0,529
2763,76	16,313	-0,457	-0,473	2,489	0,563	1059,051	25,024	2,363
2764,642	12,236	0,832	-0,195	2,512	10,873	1069,178	362,398	33,895
2748,182	7,667	1,42	-0,009	1,908	14,973	807,264	312,691	38,735
2735,249	3,544	1,634	0,083	1,369	16,217	576,490	156,549	27,155
2726,284	0,04	1,642	0,102	1,023	16,105	429,376	1,755	0,409

Στις πρώτες 5 στήλες καταγράφονται τα πειραματικά δεδομένα σε:

1. Κανονική λειτουργία (2750 RPM)
2. Αδειάζοντας μέρος υγρού από τη δεξαμενή και με ύψος αναρρόφησης 308mm με σκοπό την εμφάνιση σπηλαίωσης.
3. Στραγγαλίζοντας τη βάνα αναρρόφησης με σκοπό την εμφάνιση σπηλαίωσης.

Η διαδικασία αδειάσματος της δεξαμενής δεν απαιτεί ιδιαίτερο εξοπλισμό, είναι όμως επίπονη, χρονοβόρα και μη συνεχής. Σε αντίθεση με τη διαδικασία στραγγαλισμού της βάνας αναρρόφησης που είναι απλή στην εφαρμογή της, έχει όμως λιγότερο αξιόπιστα αποτελέσματα που οφείλονται στην αύξηση των υδραυλικών απωλειών.

Στις επόμενες 4 στήλες καταγράφονται τα αποτελέσματα υπολογισμών του μανομετρικού, των ισχύων εισόδου και εξόδου, και του βαθμού απόδοσης. Ο υπολογισμός τους αναφέρεται αναλυτικά στο προηγούμενο πείραμα.

Υπολογισμός συντελεστή σπηλαίωσης μέσω σχέσης Anderson.

Βρίσκοντας σε κάθε μια από τις 3 χαρακτηριστικές το σημείο λειτουργίας (πιο συγκεκριμένα την παροχή, τον βαθμό απόδοσης και το μανομετρικό στα οποία

λειτουργεί η αντλία) υπολογίζεται η ειδική ταχύτητα και ο συντελεστής σπηλαίωσης.

Στην πρώτη (κανονική) διαδικασία στο σημείο λειτουργίας τα χαρακτηριστικά της αντλίας είναι:

Μανομετρικό ύψος  $H=11\text{m}$

Παροχή  $Q=11,25\text{m}^3/\text{s}$

Βαθμός απόδοσης  $\eta=34\%$

Υπολογισμός συντελεστή σπηλαίωσης:

$$\sigma = \frac{3,75 \cdot 10^{-6}}{\eta^2} \cdot N_s^{1,33} = \frac{3,75 \cdot 10^{-6}}{0,34^2} \cdot 1527,089^{1,33} = 7,92 \cdot 10^{-3} = 0,008$$

Υπολογισμός κρίσιμου ύψους αναρρόφησης μέσω ορισμού με βάση τον συντελεστή σπηλαίωσης Anderson:

$$\sigma = \frac{NPSH_r}{H} \Rightarrow NPSH_r = \sigma \cdot H = 7,92 \cdot 10^{-3} \cdot 11\text{m} = 0,087\text{m}$$

Ακριβώς με την ίδια διαδικασία υπολογίζονται η ειδική ταχύτητα  $N_s$ , ο συντελεστής σπηλαίωσης  $\sigma$ , και το κρίσιμο ύψος αναρρόφησης  $NPSH_r$  και για τις επόμενες δύο διαδικασίες.

Με την διαδικασία αδειάσματος της δεξαμενής στο σημείο λειτουργίας τα χαρακτηριστικά της αντλίας είναι:

Μανομετρικό ύψος  $H=11,9\text{m}$

Παροχή  $Q=11,5\text{m}^3/\text{s}$

Βαθμός απόδοσης  $\eta=42\%$

$\sigma=0,005$

$NPSH_r=0,062\text{m}$

Με τη διαδικασία στραγγαλισμού της βάνας αναρρόφησης στο σημείο λειτουργίας τα χαρακτηριστικά της αντλίας είναι:

Μανομετρικό ύψος  $H=13\text{m}$

Παροχή  $Q=12\text{m}^3/\text{s}$

Βαθμός απόδοσης  $\eta=36\%$

$\sigma=0,007$

$NPSH_r=0,092m$

Εν συνεχεία υπολογίζεται ξανά το κρίσιμο ύψος αναρρόφησης βάσει των χαρακτηριστικών της αντλίας τα οποία είναι η διάμετρος  $D$  της διατομής στο σημείο αναρρόφησης, και η κλίση των πτερυγίων στη διατομή εισόδου  $\beta$ .

Διάμετρος  $D=2''=0,0508m$

Η γωνία κλίσης ( $\beta$ ) των πτερυγίων επιδιώκεται να είναι μικρή, της τάξεως  $17^\circ$ .

$$NPSH_r = H_M - H_s \cdot \lambda_1 \frac{W_1^2}{2g} \cdot \lambda_2 \cdot \frac{c_1^2}{2g} = \lambda \cdot \frac{c_1^2}{2 \cdot g}$$

Όπου:

$c_1$ : Απόλυτη ταχύτητα στη διατομή εισόδου

$$c_1 = \frac{Q}{A} \quad \left( \frac{\pi \cdot D^2}{4} \right)$$

$$\lambda = \frac{\lambda_1}{\sin^2 \beta} + \lambda_2 = 2,824$$

Για την διαδικασία κανονικής λειτουργίας:

$$NPSH_r = \lambda \cdot \frac{c_1^2}{2 \cdot g} = 2,824 \cdot \frac{1,539^2}{2 \cdot 9,81} = 0,171m$$

Με τον ίδιο ακριβώς τρόπο υπολογίζεται το κρίσιμο ύψος αναρρόφησης και για τις άλλες δύο περιπτώσεις.

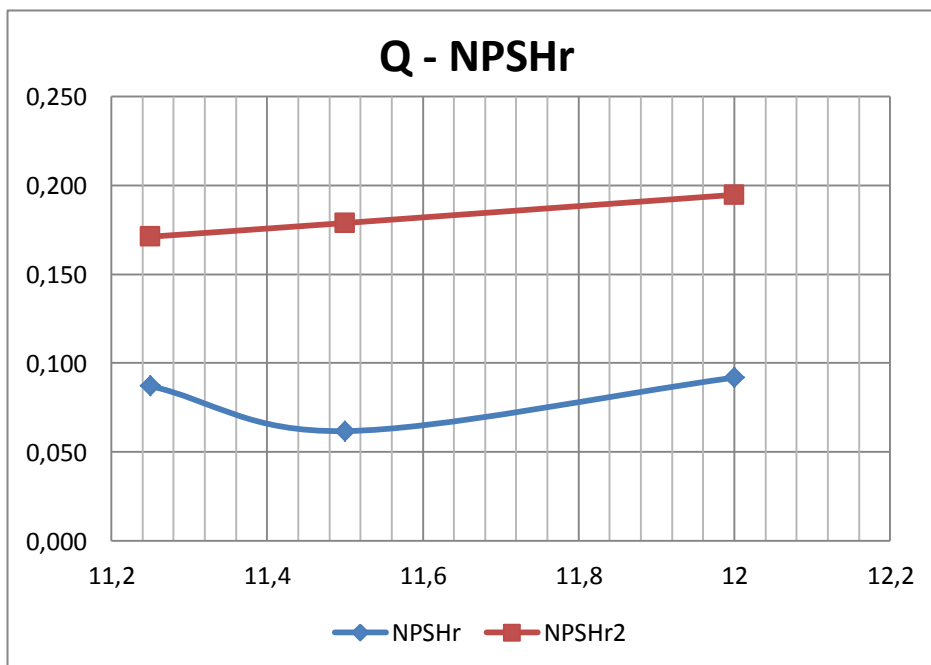
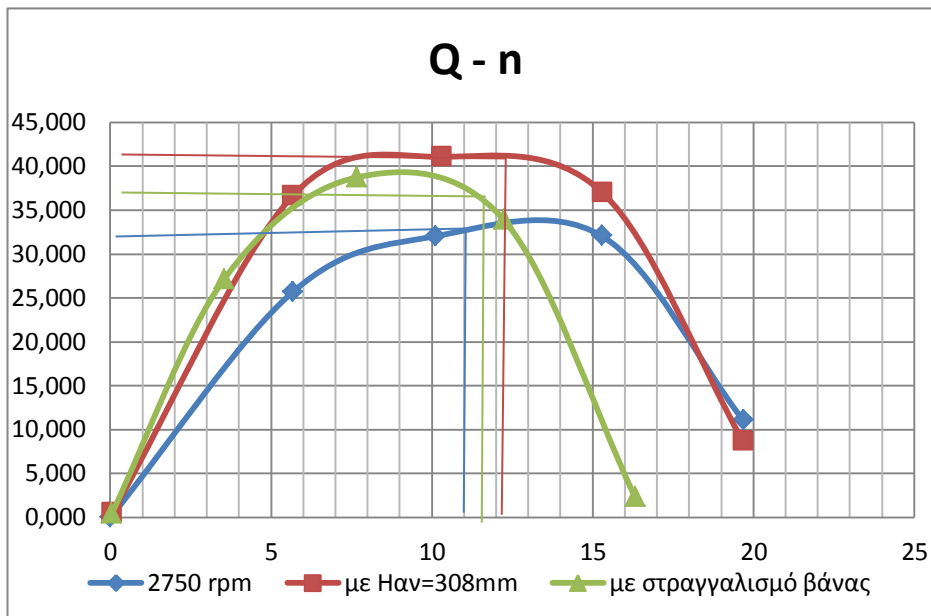
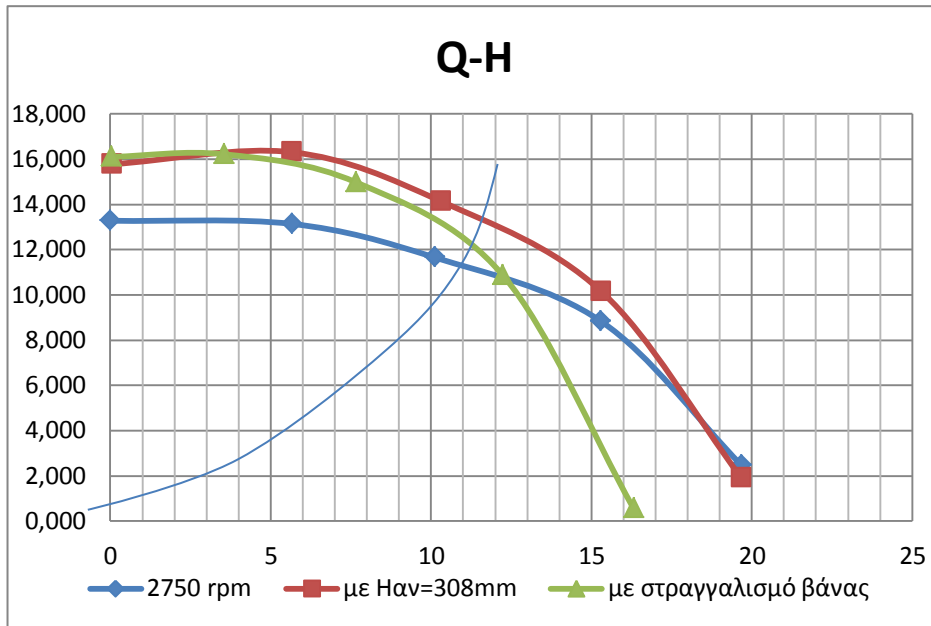
Με άδειασμα της δεξαμενής  $NPSH_r=0,179m$ .

Με στραγγαλισμό της βάνας  $NPSH_r=0,195m$ .

## Πίνακας αποτελεσμάτων:

	Συντελεστής Σπηλαίωσης (τύπος Anderson) $\sigma$	Ειδική ταχύτητα $N_s$	Σημεία λειτουργίας	Κρίσιμο ύψος σπηλαίωσης $H_{kr}$ ( $\sigma=H_{kr}/H$ )	Απόλυτη ταχύτητα C	Κρίσιμο ύψος σπηλαίωσης $H_{kr}$ ( $H_{kr}=\lambda^*c1^2/2g$ )	Συντελεστής σπηλαίωσης ( $\sigma=H_{kr}/H$ )
2750 RPM	0,008	1527,089	H (m)	0,087	1,539	0,171	0,016
			11				
			Q (m <sup>3</sup> /hr)				
			11,25				
			n=34%				
$H_{av}=308mm$	0,005		H (m)	0,062	1,574	0,179	0,015
			11,9				
			Q (m <sup>3</sup> /hr)				
			11,5				
			n=42%				
Στραγγαλισμός	0,007		H (m)	0,092	1,642	0,195	0,015
			13				
			Q (m <sup>3</sup> /hr)				
			12				
			n=36%				

Παρακάτω φαίνονται τα διαγράμματα που προκύπτουν.



### 5.4.3 Υπολογισμός παραμέτρου σπηλαίωσης βάση κατασκευαστικών χαρακτηριστικών.

Ένας εύκολος τρόπος υπολογισμού των παραμέτρων σπηλαίωσης είναι βάση των κατασκευαστικών χαρακτηριστικών της αντλίας. Το πλεονέκτημά του είναι πως αν τα στοιχεία ,που είναι απαραίτητα για τον υπολογισμό, είναι πλήρη τότε είναι απλή αντικατάσταση του τύπου που δίνεται παρακάτω. Σημαντικό μειονέκτημα όμως είναι το μεγάλο σφάλμα που προκύπτει μεταξύ θεωρητικού υπολογισμού και πρακτικού, κατά κύριο λόγο γιατί θεωρία και πράξη συνήθως έχουν μεγάλη απόκλιση μεταξύ τους, καθώς επίσης και γιατί τα περισσότερα μεγέθη είναι αρκετά δύσκολο να μετρηθούν, και εμπεριέχονται πολλά μεγέθη (μερικά μικρά και μερικά μεγάλα) με μεγάλη επιρροή στο αποτέλεσμα.

$$\sigma = \frac{\lambda}{2 \cdot n \cdot n_i} \cdot \frac{D_1}{D_2} \cdot \frac{c_1}{u_2} \cdot \frac{tg\beta_1}{1 - \frac{c_2}{u_2 \cdot tg\beta_2}}$$

Όπου:

$\lambda$ : Καθαρός αριθμός

$n$ : Βαθμός απόδοσης της αντλίας

$n_i$ : Ιδεατός βαθμός απόδοσης της αντλίας

$D_1$ : Διάμετρος πτερυγίων εισόδου

$D_2$ : Εξωτερική διάμετρος πτερυγίων

$c_1$ : Απόλυτη ταχύτητα στην διατομή εισόδου των πτερυγίων

$c_2$ : Απόλυτη ταχύτητα στην διατομή εξόδου των πτερυγίων

$tg\beta_1$ : Κλίση των πτερυγίων στη διατομή εισόδου

$tg\beta_2$ : Κλίση των πτερυγίων στη διατομή εξόδου

$u_2$ : ( $=\omega D_2/2$ ) περιφερειακή ταχύτητα της πτερωτής στη διατομή εξόδου

Ήταν αδύνατη η υλοποίηση αυτού του πειράματος καθώς τα απαιτούμενα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά ήταν ελλιπή, και μετά από επικοινωνία με την



κατασκευάστρια εταιρία της αντλίας ήταν αδύνατη η παροχή του εγχειριδίου της αντλίας με τα χαρακτηριστικά της.

### 5.5 Τελικά συμπεράσματα

Οι εξωτερικές μεταβλητές επηρεάζουν το αποτέλεσμα των μετρήσεων, και η σημαντικότερη από αυτές είναι η θερμοκρασία του νερού και η περιεκτικότητα του που ευθύνονται για το ιξώδες του. Δεν είναι μετρήσιμες μεταβλητές καθώς αλλάζουν κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της αντλίας, κάτι το οποίο αλλοιώνει και το βαθμό απόδοσης.

Κάθε όργανο που χρησιμοποιείται περιέχει από μόνο του ένα σφάλμα της τάξης του 1%. Όσο περισσότερα όργανα υπάρχουν στην εγκατάσταση τόσο μεγαλύτερο είναι και το σφάλμα στο τελικό αποτέλεσμα κάθε μέτρησης του πειράματος.

Η έλλειψη των εγχειριδίων (manual) του κατασκευαστή της αντλίας, τα οποία περιέχουν τις χαρακτηριστικές καμπύλες και τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της αντλίας, ο προσδιορισμός του σημείου λειτουργίας για τον υπολογισμό του συντελεστή σπηλαίωσης έγινε πειραματικά και κατά προσέγγιση. Καθώς επίσης, λόγω των ελλিপών κατασκευαστικών χαρακτηριστικών δεν ήταν ακριβή τα αποτελέσματα των πειραμάτων.

Συγκρίνοντας τις μεθόδους υπολογισμού της παραμέτρου σπηλαίωσης της αντλίας, προκύπτει πως η πιο έγκυρη μέθοδος είναι η μέθοδος βάση ορισμού γιατί εμπλέκονται τα λιγότερα και άμεσα μετρήσιμα μεγέθη. Όσο αναφορά την κάθε σχέση ξεχωριστά προκύπτει ότι:

- i. Στη σχέση Anderson απαιτείται ο υπολογισμός του βαθμού απόδοσης και της ειδικής ταχύτητας, κάτι το οποίο λόγω της ακολουθίας μετρήσεων έχει πιθανό αποτέλεσμα το σφάλμα στο συντελεστή σπηλαίωσης. Στο συγκεκριμένο όμως πείραμα, οι μετρήσεις είναι οι πιο αξιόπιστες κάτι το οποίο κάνει τη σχέση Anderson πιο έγκυρη.
- ii. Στη σχέση βάση του ορισμού τα αποτελέσματα είναι πιο κοντινά σε αναμενόμενα.
- iii. Στη σχέση υπολογισμού με κατασκευαστικά χαρακτηριστικά είναι πολύ πιθανά τα σφάλματα ή και τα λάθη στις μετρήσεις. Αυτό μπορεί να οφείλεται είτε στα πολλά μεγέθη που επηρεάζουν το αποτέλεσμα, είτε σε πιθανές φθορές των εξαρτημάτων οι οποίες είναι δύσκολο να εντοπισθούν

άμεσα. Ο τρόπος αυτός είναι ο πιο αξιόπιστος για την εύρεση της κατάλληλης πτερωτής για την αποφυγή σπηλαιώσης κατά την κατασκευαστική μελέτη.

## Βιβλιογραφία

1. Αντλίες και σωληνώσεις, Ιωάν. Μ. Μαυρουδής.
2. Υδροδυναμικές Μηχανές, Νικ. Α. Αθανασιάδη.
3. Αντλίες, Κων. Ακριτίδη.
4. Υδροδυναμικές μηχανές αντλίες – υδροστροβίλοι υδροδυναμικές μεταδόσεις, Δημ. Ε. Παπαντώνης.
5. Σημειώσεις εργαστηρίου υδροδυναμικών μηχανών, Μιχ. Ριτσατάκης.
6. Σύνολο διαφανειών Θεωρίας – Εργαστηρίου υδροδυναμικών μηχανών, Μιχ. Ριτσατάκης.
7. Αντλίες μεταβλητών στροφών: Θεωρία-Τεχνολογία-Τύποι και εφαρμογές τους, Ιωάννης Γουναρίδης.
8. Υδροδυναμικές εγκαταστάσεις, Δημ. Ε. Παπαντώνης.
9. Cavitation and bubble dynamics, Chris.Earls Brennen
10. Ρευστοδυναμικές μηχανές, Δ. Παπανίκας.
11. Centrifugal pumps, H.H.Anderson
12. Φυγόκεντρες αντλίες, S.Yedidiah.