

ΤΕΧΝΟΛΟΓΟΛΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΕ



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΓΙΑ
ΤΗΝ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ
ΣΠΗΛΑΙΩΣΗΣ ΣΕ ΦΥΓΟΚΕΝΤΡΙΚΗ ΑΝΤΛΙΑ.**

ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΓΕΩΡΓΑΚΟΠΟΥΛΟΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΣΚΟΥΡΑΣ ΕΥΓΕΝΙΟΣ

ΠΑΤΡΑ-2017

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την πτυχιακή αυτή θα ήθελα να ευχαριστήσω την εταιρία Wilo και ειδικότερα τον διευθύντα σύμβουλο κ. Παναγιώτη Στάπα για την ευκαιρία που μου δόθηκε να βελτιώσω και να χρησιμοποιήσω την πειραματική διάταξη σπηλαίωσης που έχουν στην κατοχή τους, και τους κ.κ. Γιώργο Παπαχρήστο, Γιώργο Καρτελιά και Βασίλη Μερζιώτη για την πολύτιμη βοήθεια τους. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ. Ευγένιο Σκούρα για την υπομονή και την καθοδήγηση του. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Γιάννη Χριστοδούλου και την οικογένεια μου για την συμπαράσταση που μου δώσανε.

Περιεχόμενα

Ενότητα 1 Εισαγωγικά στοιχεία	4
1.1 Ιστορία των φυγοκετρικών αντλιών	4
1.2 Σκοπός της Εργασίας.....	8

Ενότητα 2 Γενικά χαρακτηριστικά αντλιών	10
2.1. Χαρακτηριστικά μεγέθη αντλιών.....	11
2.1.1. Ύψος αναρρόφησης, καταθλίψεως & ολικό ύψος	11
2.1.2. Παροχή	13
2.1.3. Απαιτούμενη ισχύς για την λειτουργία της αντλίας	13
2.1.4. Βαθμός αποδόσεως	14
2.2. Νόμοι ομοιότητας φυγοκετρικών αντλιών	16
2.3. Καμπύλες λειτουργίας των δυναμικών αντλιών	17
2.3.1. Υπολογισμός χαρακτηριστικής καμπύλης αντλίας	17
2.3.2. Χαρακτηριστική καμπύλη ύψους παροχής	17
2.4. Χαρακτηριστική καμπύλη εγκατάστασης – σωληνογραμμής.....	18
2.5. Καθορισμός του σημείου λειτουργίας αντλητικής εγκατάστασης	20
2.6. Διαμόρφωση αντλιών	23
2.6.1. Τα εξαρτήματα της αντλίας	23
2.6.2. Το περίβλημα (σπειροειδές κέφυλος)	25
2.6.3. Η πτερωτή της αντλίας	26
2.6.4. Τρισδιάστατα κατασκευαστικά σχέδια αντλιών.....	28
Ενότητα 3 Το φαινόμενο της σπηλαίωσης στις αντλίες.....	31
3.1. Η σπηλαίωση γενικά	31
3.2. Καθαρό θετικό ύψος αναρρόφησης.....	31
3.2.1. Το $NPSH_a$ ως κριτήριο της σπηλαίωσης.....	37
3.3. Τα διάφορα είδη σπηλαίωσης – Προέλευση των φυσαλίδων.....	37
3.4. Ο μηχανισμός επίδρασης των φυσαλίδων	38
3.4.1. Δημιουργία και κατάρρευση φυσαλίδων	39
3.5. Τα βήματα της σπηλαίωσης ειδικότερα	41
3.6. Τα είδη της σπηλαίωσης τύπου “Vaporous”	42
3.6.1. Σπηλαίωση κλασσικού τύπου	42
3.6.2. Σπηλαίωση λόγω επανακυκλοφορίας.....	43
3.7. Η σπηλαίωση τύπου “Gaseous”	46
3.7.1. Επιπτώσεις του Ελεύθερου Αέρα εντός του Αντλούμενου Υγρού	46
3.7.2. Πηγές του ελεύθερου αέρα.....	46
3.7.3. Σχήμα του στροφέιου και δυνατότητες χειρισμού του αέρος	47

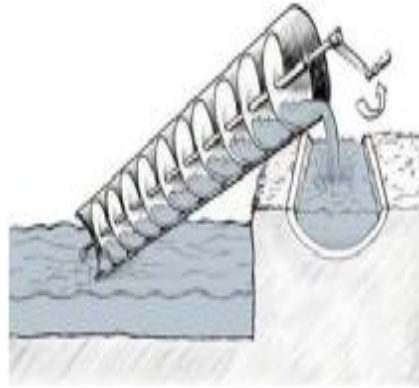
3.7.4. Η επίδραση αέρος ή αερίου που συνοπορεύεται στο υγρό	49
3.7.5. Άντληση μίγματος υγρού–αερίου.....	50
3.7.6. Γενικότερη επίδραση αέρα ή κάποιων αερίων του αντλούμενου υγρού στα χαρακτηριστικά λειτουργίας της ανλίας	52
3.8. Θέσεις του πτερυγίου όπου εκδηλώνεται η σπηλαίωση	53
3.9. Συχνοί λόγοι δημιουργίας σπηλαίωσης.....	55
3.10. Γενικά συμπτώματα σπηλαίωσης.....	55
Ενότητα 4 Προσαρμογή πειραματικής διάταξης στο εργαστήριο	59
Ενότητα 5 Πειραματική διαδικασία και μετρήσεις.....	75
5.1 Λειτουργία της πειραματικής διάταξης	75
5.2 Οι πειραματικές μετρήσεις	80
5.2.1 Μετρήσεις με μεταβαλλόμενη ταχύτητα και σταθερό ποσοστό ανοίγματος των βανών 1 και 2	80
5.2.2 Μετρήσεις με σταθερή ταχύτητα και μεταβαλλόμενο άνοιγμα της βάνας 2.....	88
5.3 Απώλειες	92
5.3.1 Απώλειες λόγω των βανών	92
5.3.2 Απώλειες λόγω των σωλήνων	94
5.3.3 Απώλειες λόγω των γωνιών.....	98
5.4 Αριθμός NPSH _a	99
5.5 Παρατηρήσεις/Συμπεράσματα	103

Ενότητα 1 Εισαγωγικά στοιχεία

1.1 Ιστορία των φυγοκετρικών αντλιών

Από την αρχαιότητα η εξασφάλιση νερού από διάφορες πηγές (όπως ποτάμια και λίμνες) ήταν από τα σημαντικότερα κριτήρια στην επιλογή ενός τόπου ως μόνιμη κατοικία διαβίωσης, αφού το νερό πάντα αποτελούσε ένα αναγκαίο συστατικό για την επιβίωση και την ανάπτυξη του ανθρώπου.

Ένας από τους πρώτους μηχανισμούς αντλisis νερού ήταν ο υδραυλικός ατέρμονας κοχλίας του Αρχιμήδη (287–212 π.Χ.). Ο κοχλίας του Αρχιμήδη (**Σχήμα 0.1**) αποτελούταν από έναν ξύλινο άξονα που έφερε περιελίξεις από λεπτά και εύκαμπτα κλαδιά ιτιάς ή λυγαριάς, συνδεδεμένα το ένα με το άλλο, ώστε να δημιουργείται ένας ατέρμονας κοχλίας.



Σχήμα 0.1
Ο κοχλίας του Αρχιμήδη

Ο κοχλίας εφαπτόταν εσωτερικά ενός ξύλινου κυλίνδρου. Η μηχανή τοποθετούνταν με κλίση 30° στο νερό και με την περιστροφή του κοχλίας το εγκλωβισμένο νερό στις σπείρες ανυψωνόταν και έρεε από το στόμιο του ξύλινου κυλίνδρου. Ήταν ένας μηχανισμός αντήσεως νερού μεγάλης παροχής, αλλά μικρής υψομετρικής διαφοράς, που χρησιμοποιήθηκε ευρέως σε πολλές περιοχές του αρχαίου κόσμου. Η αρχή λειτουργίας του εφαρμόζεται ακόμη και σήμερα σε τεχνολογικές εφαρμογές που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά ρευστών ή κονιορτοποιημένων υλικών.

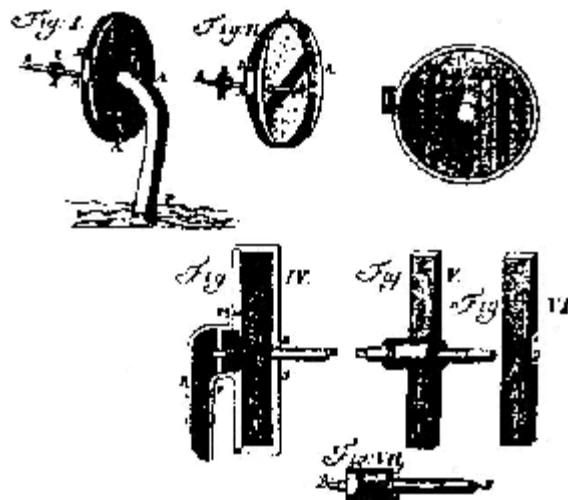
Ένας άλλος μηχανισμός, ήταν η Εμβολοφόρος Αντλία του Κτησιβίου (285–222 π.Χ.) του μαθηματικού, μηχανικού και εφευρέτη των ελληνιστικών χρόνων και ιδρυτή της Αλεξανδρινής Σχολής. Η αντλία του Κτησιβίου αποτελείται από δύο όμοιους κυλίνδρους, στο εσωτερικό των οποίων υπάρχουν έμβολα που κινούνται παλινδρομικά με την βοήθεια μοχλού (**Σχήμα 0.2**). Οι κύλινδροι είναι βυθισμένοι σε νερό.



Σχήμα 0.2
Η Αντλία του Κτησιβίου

Με την κίνηση των εμβόλων και την υποπίεση που δημιουργείται στο εσωτερικό των κυλίνδρων αναρροφάται νερό, το οποίο ωθείται και μέσω σωλήνα μεταφέρεται έξω από τον χώρο, στον οποίο είναι βυθισμένη η αντλία.

Εφευρέτης της φυγοκεντρικής αντλίας θεωρείται ο Γάλλος Denis Papin, που το 1687 περιέγραψε ένα τύπο αντλίας (Σχήμα 0.3), της οποίας η αρχή λειτουργίας ήταν η ίδια με τις σημερινές φυγοκεντρικές αντλίες. Στο πειραματικό αυτό μοντέλο η πτερωτή είχε δύο πλήρως ακτινικά πτερύγια. Το 1705 κατασκεύασε ο ίδιος το μοντέλο της πρώτης φυγοκέντρου αντλίας για άντληση νερού. Στο μοντέλο αυτό η πτερωτή είχε περισσότερα πτερύγια και κέλυφος.



Σχήμα 0.3

Φυγοκεντρική αντλία (1687) που εφευρέθηκε από τον Dennis Papin.

Το βασικό πρόβλημα εκείνης της εποχής ήταν η αποφυγή εισχώρησης αέρα στο εσωτερικό της αντλίας που διέκοπτε τη λειτουργία της. Ένα ακόμα σημαντικό τεχνολογικό πρόβλημα ήταν το γεγονός ότι οι φυγοκεντρικές αντλίες απαιτούσαν σχετικά μεγάλες ταχύτητες περιστροφής στην άτρακτο που ήταν δύσκολο να επιτευχθεί την εποχή εκείνη μια και η ανάπτυξη αξιόπιστων ιμάντων και εδράνων έγινε αργότερα. Πάντως οι ανάγκες της εποχής καλύπτονταν με τις εμβολοφόρες αντλίες. Το 1875 ο Osborne Reynolds κατασκεύασε την πρώτη στροβιλοαντλία (turbine pump), που είχε σημαντικά αυξημένη απόδοση. Ο ίδιος τότε παρουσίασε και τον διαχύτη με πτερύγια.

Από το 1840 άρχισαν να χρησιμοποιούνται οι ατμομηχανές για την κίνηση των αντλιών όταν ο H. Worthington κατασκεύασε μία παλινδρομική αντλία, της οποίας το έμβολο ήταν συνδεδεμένο απευθείας με το έμβολο της ατμομηχανής. Νέα ώθηση στην εξέλιξη των αντλιών και την επινόηση νέων τύπων έδωσε η εμφάνιση των κινητήρων εσωτερικής καύσεως. Επίσης οι αεροστρόβιλοι (steam turbines) και οι ηλεκτροκινητήρες, που δίνουν μεγάλο αριθμό στροφών και σταθερή ροπή, συντέλεσαν στην ταχεία εξέλιξη των φυγοκεντρικών αντλιών και την εκτόπιση των παλινδρομικών, εκτός από τις περιπτώσεις όπου επιζητείται υψηλή πίεση και μικρή παροχή. Παράλληλα αναπτύχθηκαν οι περιστροφικές αντλίες για μικρές παροχές με μέση πίεση ιδίως για υγρά με μεγάλο ιξώδες.

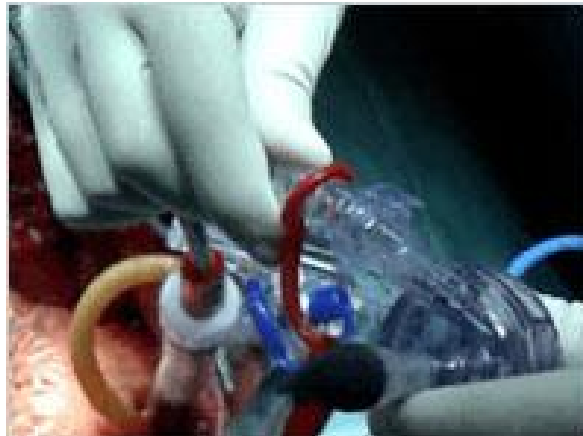
Γενικά η χρήση των αντλιών είναι ευρύτατη: Στα εργοστάσια είναι συνήθως εγκαταστημένες πολλές αντλίες για διάφορες χρήσεις (άντληση νερού από φρεάτια, κυκλοφορία νερού ψύξεως, τροφοδότηση καυστήρων πετρελαίου, τροφοδότηση ατμολεβητών κ.α.). Στα αυτοκίνητα οι αντλίες χρησιμοποιούνται

για την τροφοδοσία του κινητήρα με καύσιμο, καθώς και για την κυκλοφορία του νερού ψύξεως και του λαδιού λίπανσης. Στα πλοία χρησιμοποιούνται για την τροφοδοσία των ατμολεβητών με νερό ή των πετρελαιομηχανών με καύσιμο. Οι φυγοκεντρικές αντλίες έχουν βρει εφαρμογή και στον τομέα της ιατρικής όπου αντλίες πολύ μικρού μεγέθους χρησιμοποιούνται ακόμη και για την ανακυκλοφορία του αίματος. Στις παρακάτω εικόνες (**Σχήμα 0.4**, **0.5** και **0.6**) φαίνεται μια φυγοκεντρική αντλία που έχει αναπτυχθεί από την εταιρεία A-Med Systems Inc και χρησιμοποιείται για ιατρικούς σκοπούς.



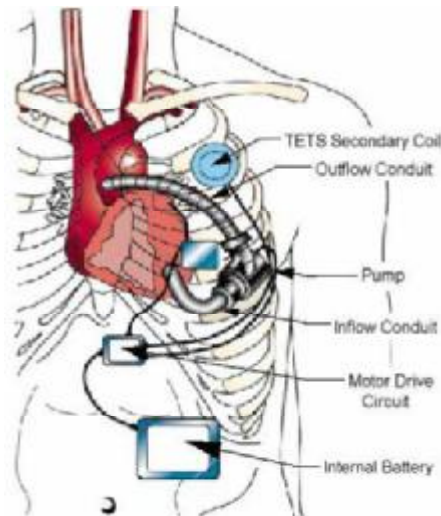
Σχήμα0.4

Φυγοκεντρική αντλία που αναπτύχθηκε από την A-Med Systems Inc για ιατρικές εφαρμογές



Σχήμα0.5

Φυγοκεντρική αντλία που αναπτύχθηκε από την A-Med Systems Inc για ιατρικές εφαρμογές



Σχήμα 0.6

Καλλιτεχνική απεικόνιση όπου φαίνεται η χρήση φυγοκεντρικής αντλίας για ανακυκλοφορία του αίματος. Εφαρμογή στον τομέα της ιατρικής.

1.2 Σκοπός της Εργασίας

Παρά την εξέλιξη της τεχνολογίας των αντλιών υπάρχουν ακόμα προβλήματα που εμφανίζονται κατά την χρήση τους, αυτά τα προβλήματα μπορεί να είναι μηχανικά ή υδραυλικά. Ένα από τα σημαντικά υδραυλικά προβλήματα είναι η σπηλαιώση. Η σπηλαιώση οφείλεται στην δημιουργία και σύλληψη φυσαλίδων αέρα μέσα στην αντλία που δημιουργούν κοιλότητες στο στροφείο της, σαν αποτέλεσμα αυτών των κοιλότητων έχουμε φθορά των πτερυγίων της αντλίας και μείωση της απόδοσης έως και πρόωρη αστοχία της αντλίας.

Ο σκοπός αυτής της εργασίας είναι η παρατήρηση, ο χαρακτηρισμός και η αποφυγή της σπηλαιώσης σε μία φυγοκεντρική αντλία. Στην Ενότητα 2 θα αναλύσουμε τα χαρακτηριστικά των αντλιών, στην Ενότητα 3 θα παρουσιαστεί το φαινόμενο της σπηλαιώσης, στην Ενότητα 4 θα δούμε την κατασκευή της πειραματικής μας διάταξης. Έπειτα στην Ενότητα 5 θα περιγραφεί η πειραματική διαδικασία, θα καταγραφούν οι μετρήσεις που πάρθηκαν κατά την διάρκεια του πειράματος και καταγραφεί τι παρατηρήθηκε κατά την πειραματική διαδικασία. Τέλος θα δοθούν τα συμπεράσματα που βγάλαμε από το πείραμα αυτό.

Ενότητα 2 Γενικά χαρακτηριστικά αντλιών

Σε αυτή την ενότητα θα μιλήσουμε για τα χαρακτηριστικά μεγέθη των αντλιών, τους νόμους ομοιότητας φυγοκεντρικών αντλιών, τις καμπύλες λειτουργίας των δυναμικών αντλιών, την χαρακτηριστική καμπύλη εγκατάστασης – σωληνογραμμής, τον καθορισμό του σημείου λειτουργίας αντλητικής εγκατάστασης και την διαμόρφωση των αντλιών

2.1. Χαρακτηριστικά μεγέθη αντλιών

Η απόδοση μιας αντλίας χαρακτηρίζεται από τις παρακάτω παραμέτρους:

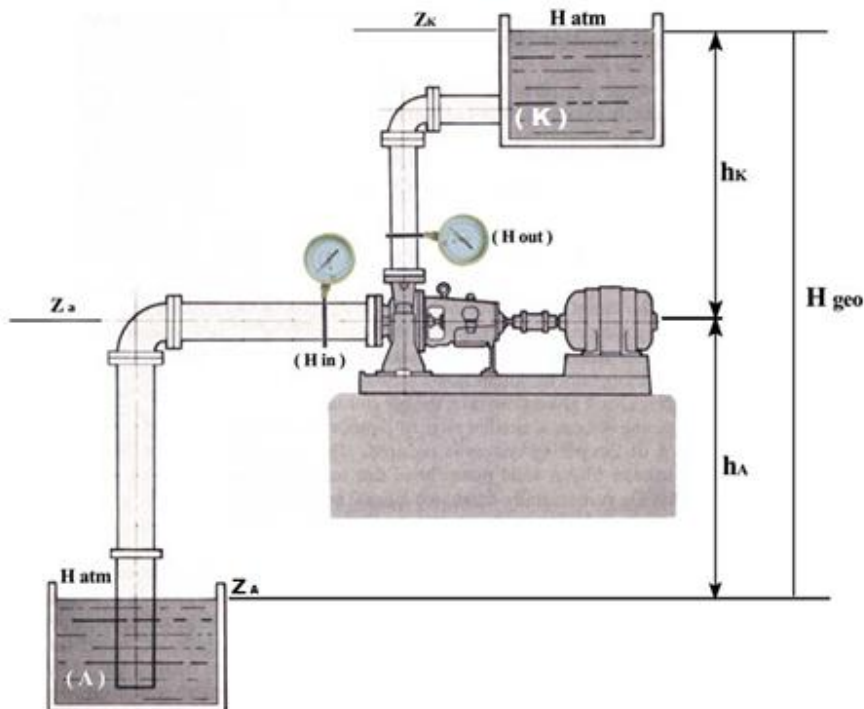
1. *Ύψος αναρρόφησης, καταθλίψεως & ολικό ύψος.*
2. *Παροχή.*
3. *Απαιτούμενη ισχύς για την λειτουργία της αντλίας.*
4. *Βαθμός αποδόσεως.*

2.1.1. Ύψος αναρρόφησης, καταθλίψεως & ολικό ύψος

Σε γενικές γραμμές χρησιμοποιούμε μία αντλία για τη μεταφορά υγρών μέσω σωληνώσεων από μια δεξαμενή, τη δεξαμενή αναρρόφησης, προς μια άλλη, τη δεξαμενή κατάθλιψης, η οποία βρίσκεται σε υψηλότερη στάθμη και στην οποία επικρατεί μεγαλύτερη στατική πίεση από την δεξαμενή αναρρόφησης. Άρα το υγρό στην δεξαμενή κατάθλιψης έχει μεγαλύτερη ολική ενέργεια ανά μονάδα μάζας.

Η ενέργεια αυτή προσδίδεται στο υγρό από την αντλία η οποία πρέπει να καλύψει και την απώλεια ενέργειας που λαμβάνει χώρα κατά την διακίνηση του υγρού μέσω των σωληνώσεων. Η εγκατάσταση που περιλαμβάνει την αντλία, τις δεξαμενές αναρρόφησης και κατάθλιψης, τις σωληνώσεις μεταξύ των δεξαμενών και τα σχετικά εξαρτήματα (που σχετίζονται με την ασφάλεια, λειτουργία και συντήρηση) ονομάζεται αντλητική εγκατάσταση.

Στο **Σχήμα 2.1** δίνεται σχηματικά απλή αντλητική εγκατάσταση στην οποία η αντλία αντλεί υγρό από την δεξαμενή αναρρόφησης Α και το καταθλίβει στην δεξαμενή κατάθλιψης Κ.



Σχήμα 2.1

Σχηματική διάταξη απλής αντλητικής εγκατάστασης

Έστω z_A και z_K οι στάθμες των ελεύθερων επιφανειών του υγρού στις δεξαμενές αναρρόφησης και κατάθλιψης αντίστοιχα, μετρημένες από κοινή στάθμη αναφοράς που συνήθως είναι η στάθμη της θάλασσας για τις μεγάλες αντλητικές εγκαταστάσεις. Στην περίπτωση της αντλητικής εγκατάστασης του **Σχήματος 2.1** και οι δύο δεξαμενές, αναρρόφησης και κατάθλιψης, βρίσκονται κάτω από την ίδια στατική πίεση, την ατμοσφαιρική H_{atm} (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.

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:

$$h_A = z_a - z_A \quad (2.1)$$

Το h_A θα είναι θετικό εάν $z_a > z_A$, δηλ. όταν η στάθμη της αντλίας είναι σε υψηλότερο σημείο από την στάθμη της δεξαμενής αναρρόφησης.

Ως γεωμετρικό ύψος κατάθλιψης h_K ορίζεται η υψομετρική διαφορά:

$$h_K = z_K - z_a \quad (2.2)$$

Τέλος, ως γεωμετρικό ύψος ανύψωσης (γεωδαιτικό ύψος) H_{geo} ορίζεται το άθροισμα των γεωμετρικών υψών μεταξύ της δεξαμενής κατάθλιψης και της δεξαμενής αναρρόφησης:

$$H_{geo} = h_A + h_K \quad (2.3)$$

Έστω h_A και h_K η στατική πίεση (σε m στήλης υγρού) στις διατομές εισόδου και εξόδου αντίστοιχα της αντλίας αναγόμενες στην στάθμη αναφοράς της αντλίας. Οι στατικές αυτές πιέσεις μετρώνται με μανόμετρα τοποθετημένα στην στάθμη z_a της αντλίας όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.1**. Προφανώς ισχύει: $H = P/\rho g$, με ρ την πυκνότητα του υγρού, g η επιτάχυνση της βαρύτητας [= 9.81 m/s^2] και P πίεση.

2.1.2. Παροχή

Οι χαρακτηρισμοί παροχής είναι οι εξής:

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) (Q_o) είναι η αποδομένη παροχή ανά μονάδα χρόνου όταν η αντλία εργάζεται με το μέγιστο βαθμό αποδόσεώς 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_ε) είναι ο όγκος υγρού που διέρχεται μέσα από την πτερωτή στη μονάδα του χρόνου. Επομένως είναι το άθροισμα της πραγματικής παροχής και των αναπόφευκτων διαρροών:

$$Q_\varepsilon = Q + Q_\delta \quad (2.4)$$

Όπου Q_δ είναι ο όγκος των εσωτερικών διαρροών (το Q_δ είναι πολύ μικρό σε σύγκριση με το Q).

2.1.3. Απαιτούμενη ισχύς για την λειτουργία της αντλίας

Οι κατηγορίες ισχύος είναι οι εξείς:

α) Εισερχόμενη ισχύς στον άξονα της αντλίας (N_a) είναι η ισχύς που μεταδίδεται από τον κινητήρα στον άξονα της αντλίας. Αν η εισερχόμενη ισχύς μετράται στην πηγή που τροφοδοτεί τον κινητήρα τότε:

$$N_a = \eta_k * N_k \quad (2.5)$$

Όπου: η_k = βαθμός αποδόσεως του κινητήρα.

N_k = ισχύς του κινητήρα.

β) Εσωτερική ισχύς (N_ε) είναι η συνολική ισχύς που μεταβιβάζεται από την πτερωτή στο υγρό παροχής Q_ε . Δηλαδή:

$$N_\varepsilon = \gamma * Q_\varepsilon * H_\varepsilon + N_f \quad (2.6)$$

όπου N_f η απαιτούμενη ισχύς για την υπερνίκηση των τριβών μεταξύ του υγρού και της πτερωτής που εκδηλώνεται υπό μορφή θερμικής ενέργειας. Η εσωτερική ισχύς είναι ίση με την εισερχόμενη ισχύ στον άξονα της αντλίας μείον την ισχύ N_{mf} που απαιτείται για την υπερνίκηση των μηχανικών τριβών της αντλίας (τριβείς, σαλαμάστρα κ.α.):

$$N_\varepsilon = N_a - N_{mf} \quad (2.7)$$

γ) Αποδιδόμενη ισχύς (N) της αντλίας είναι το γινόμενο:

$$N = \gamma * Q * H_0 \left[\text{kp} * \frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \quad (2.8)$$

γ = ειδικό βάρος του υγρού [kp/m^3]

Q = πραγματική παροχή [m^3/s]

H_0 = αποδιδόμενο ή ολικό ύψος της αντλίας [m]

Αν το ειδικό βάρος του υγρού εκφραστεί σε N/m^3 η ισχύς δίνεται σε $N * \text{m}/\text{s}$ ή *Watts* ($1\text{kp} = 9,81N$)

Επειδή: $1HP = 75\text{kp} * \text{m}/\text{s} = 0,36KW$ η εξίσωση (2.8) γραφεται ως:

$$N = \frac{\gamma * Q * H_0}{75} HP \quad (2.9)$$

$$N = \frac{\gamma * Q * H_0}{102} KW \quad (2.10)$$

2.1.4. Βαθμός αποδόσεως

Η ροή του ρευστού δια μέσω της αντλίας, συνοδεύεται από την ανάπτυξη απωλειών. Οι απώλειες αυτές διακρίνονται σε τρεις τύπους, τις *υδραυλικές*, τις *ογκομετρικές* και τις *μηχανικές*. Μέσω αυτών των απωλειών μπορεί να καθοριστούν οι βαθμοί απόδοσης μιας αντλίας.

2.1.4.1. Υδραυλικός βαθμός απόδοσης

Το ολικό ύψος της αντλίας H (**μανομετρικό**) ορίζεται ως $H = H_{out}^t - H_{in}^t$ και εκφράζει την ανα μονάδα μάζας ενέργεια (εκφρασμένη σε m στήλης του διακινούμενου υγρού) την οποία παραλαμβάνει το υγρό από τη διατομή εισόδου (*in*) της αντλίας μέχρι τη διατομή εξόδου (*out*). Συνολικά αναπτύσσονται υδραυλικές απώλειες $\delta h_{f_{in \rightarrow out}}$, οι οποίες αναλύονται:

- **Στο τμήμα εισόδου**, από τη διατομή εισόδου *in* της αντλίας μέχρι τη διατομή εισόδου (1) στην πτερωτή, δηλ. τις $\delta h_{f_{in \rightarrow 1}}$.
- **Στο εσωτερικό της πτερωτής**, από τη διατομή εισόδου (1) στη πτερωτή, μέχρι τη διατομή εξόδου (2) από την πτερωτή, δηλ. τις $\delta h_{f_{1 \rightarrow 2}}$.
- **Στο τμήμα εξόδου**, από τη διατομή εξόδου (2) από την πτερωτή μέχρι τη διατομή εξόδου *out* από την αντλία, δηλ. τις $\delta h_{f_{2 \rightarrow out}}$.

Προφανώς θα ισχύει:

$$\delta h_{f_{in \rightarrow out}} = \delta h_{f_{in \rightarrow 1}} + \delta h_{f_{1 \rightarrow 2}} + \delta h_{f_{2 \rightarrow out}} \quad (2.11)$$

Από την εφαρμογή της σχέσεις Bernoulli των διατομών (*in*) και (1) και των (2) και (*out*) προκύπτει ότι:

$$H_{in}^t = H_1^t + \delta h_{f_{in \rightarrow 1}} \quad (2.12)$$

$$H_{out}^t = H_2^t - \delta h_{f_{2 \rightarrow out}} \quad (2.13)$$

Επίσης γνωρίζουμε ότι το θεωρητικό ύψος H_u συνδέεται με την μεταβολή της ολικής ενέργειας μεταξύ εισόδου και εξόδου απο την πτερωτή μέσω της σχέσης:

$$H_u = H_2^t - H_1^t + \delta h_{f_{1 \rightarrow 2}} \quad (2.14)$$

Αφαιρώντας κατά μέλη τις σχέσεις (2.12) και (2.13) και λαμβάνοντας υπόψη τη σχέση (2.14), προκύπτει η παρακάτω σχέση (2.15):

$$H = H_{out}^t - H_{in}^t = H_2^t - H_1^t - (\delta h_{f_{2 \rightarrow out}} + \delta h_{f_{in \rightarrow 1}}) \rightarrow$$

$$\rightarrow H = H_u - (\delta h_{f_{2 \rightarrow out}} + \delta h_{f_{1 \rightarrow 2}} + \delta h_{f_{in \rightarrow 1}}) \quad (2.15)$$

Τελικά λαμβάνοντας την σχέση (2.11) θα έχουμε:

$$H = H_u - \delta h_{f_{in \rightarrow out}} \quad (2.16)$$

Σύμφωνα με τη σχέση (1.16) η ανά μονάδα μάζας ενέργεια H την οποία παραλαμβάνει το υγρό από τη διατομή εισόδου μέχρι τη διατομή εξόδου της αντλίας είναι ίση με την ενέργεια (το θεωρητικό ύψος που προσδίδει η πτερωτή στο υγρό) που του προσδίδει η πτερωτή (και η οποία προέρχεται από την ισοδύναμη μετατροπή μηχανικής ενέργειας) μειωμένη κατά τις ενεργειακές απώλειες της ροής μέσω της μηχανής, δηλ τις υδραυλικές απώλειες $\delta h_{f_{in \rightarrow out}}$.

Ο υδραυλικός βαθμός απόδοσης η_h της αντλίας ορίζεται ως ο λόγος:

$$\eta_h = H/H_u \quad (2.17)$$

Οι υδραυλικές απώλειες της ροής δια μέσω της αντλίας $\delta h_{f_{in \rightarrow out}}$ διακρίνονται σε υδραυλικές απώλειες τριβής δh_T , και σε υδραυλικές απώλειες κρούσεως δh_a :

$$\delta h_{f_{in \rightarrow out}} = \delta h_T + \delta h_a \quad (2.18)$$

2.1.4.2. Ογκομετρικός βαθμός απόδοσης

Στην παράγραφο αυτή θα αναλυθεί η διαφορά μεταξύ των παροχών Q_u (που διέρχεται από τη πτερωτή) και της Q (της συνολικής παροχής) και θα γίνει ορισμός του ογκομετρικού βαθμού απόδοσης της αντλίας.

Η στρεφόμενη πτερωτή περιβάλλεται από το ακίνητο κέλυφος της αντλίας το οποίο εξασφαλίζει την στεγανότητα της αντλίας με τον εξωτερικό χώρο. Στη διατομή εξόδου της πτερωτής το ρευστό εξέρχεται με αυξημένη στατική πίεση σε σχέση με τη διατομή εισόδου, δηλ. $P_2 > P_1$. Η διαφορά $P_2 - P_1$ είναι δυνατόν να υπολογιστεί από την εφαρμογή του θεωρήματος Βερνούλλι στη σχετική κίνηση και τα τρίγωνα ταχυτήτων εισόδου και εξόδου.

Δεδομένου ότι πάντοτε $P_2 - P_1 > 0$ υπάρχει η τάση ανάπτυξης ροής στο διάκενο μεταξύ της στρεφόμενης πτερωτής και του σταθερού κελύφους η οποία συμβολίζεται με δQ . Η παροχή δQ εισέρχεται και πάλι στην πτερωτή και παραλαμβάνει από αυτήν ενέργεια την οποία καταναλώνει στη συνεχή αυτή ανακυκλοφορία. Από την αρχή της συνέχειας θα είναι προφανώς:

$$Q_u = Q + \delta Q \quad (2.19)$$

Ως ογκομετρικός βαθμός απόδοσης της αντλίας ορίζεται ο λόγος :

$$\eta_Q = Q/Q_u = 1 - (\delta Q/Q_u) \quad (2.20)$$

2.1.4.3. Μηχανικός βαθμός απόδοσης

Από τη μηχανική ισχύ N που προσδίδεται στην άτρακτο της αντλίας μέσω του κινητήρα ένα τμήμα N_m δαπανάται για την υπερνίκηση των απωλειών τριβής των στρεφομένων μερών της αντλίας και το υπόλοιπο N_u , η περιφερειακή ισχύς της πτερωτής, διατίθεται στη πτερωτή ώστε να μετατραπεί σε υδραυλική ενέργεια του διακινούμενου ρευστού. Άρα έχουμε:

$$N = N_m + N_u \quad (2.21)$$

Ο μηχανικός βαθμός απόδοσης η_m ορίζεται ως ο λόγος :

$$\eta_m = N_u/N \quad (2.22)$$

2.1.4.4. Ολικός βαθμός απόδοσης

Ο ολικός βαθμός απόδοσης της αντλίας ορίζεται ως ο λόγος :

$$\eta = N_i/N = \rho * g * H * Q/N \quad (2.23)$$

$$\text{ή } N = \rho * g * H * Q/\eta \quad (2.24)$$

λαμβάνοντας υπόψη τις σχέσεις ορισμού (2.17), (2.20) και (2.22) των βαθμών απόδοσης υδραυλικού η_h , ογκομετρικού η_Q και μηχανικού η_m θα έχουμε:

$$N = N_u/n_m = \frac{\gamma * H_u * Q_u}{\eta_m} = \frac{\gamma * H * Q}{(\eta_h * \eta_Q * \eta_m)} \quad (2.25)$$

Από τις σχέσεις (2.24) και (2.25) προκύπτει ότι:

$$\eta = \eta_m * \eta_h * \eta_Q \quad (2.26)$$

Δηλαδή ο ολικός βαθμός απόδοσης είναι το γινόμενο των τριών βαθμών απόδοσης, υδραυλικού η_h , ογκομετρικού η_Q και μηχανικού η_m . Από αυτούς ο μηχανικός και (λιγότερο) ο ογκομετρικός, εξαρτώνται ελάχιστα από το σημείο λειτουργίας ενώ οι υδραυλικές απώλειες και αντίστοιχα ο υδραυλικός βαθμός απόδοσης μεταβάλλεται πολύ έντονα με τη διακινούμενη παροχή.

Επιπλέον οι τιμές των η_Q και η_m είναι πολύ κοντά στην μονάδα με αποτέλεσμα η τιμή του ολικού βαθμού απόδοσης να προσεγγίζει τον υδραυλικό βαθμό απόδοσης.

2.2. Νόμοι ομοιότητας φυγοκετρικών αντλιών

Στις φυγοκετρικές αντλίες είναι πολύ χρήσιμο να γνωρίζουμε πως μεταβάλλεται η παροχή, το ολικό ύψος και η ισχύς της αντλίας, όταν μεταβάλλεται ο αριθμός στροφών αυτής.

Έστω μια φυγοκετρική αντλία, η οποία σε αριθμό στροφών n ανά λεπτό δίνει παροχή Q (m^3/sec) σε ολικό ύψος H .

Αν ο αριθμός των στροφών μεταβληθεί σε n' , τότε :

- 1) Η παροχή της αντλίας μεταβάλλεται ανάλογα με το αριθμό στροφών, δηλ η νέα παροχή Q' θα είναι τόσο ώστε :

$$\frac{Q'}{Q} = \frac{n'}{n} \text{ ή } n' = \left(\frac{Q'}{Q}\right) * n \quad (2.27)$$

- 2) Το ολικό ύψος της αντλίας μεταβάλλεται ανάλογα του τετραγώνου του αριθμού στροφών. Δηλαδή, αν H' το νέο ύψος θα είναι :

$$\frac{H'}{H} = \left(\frac{n'}{n}\right)^2 \text{ ή } H' = \left(\frac{n'}{n}\right)^2 * H \quad (2.28)$$

- 3) Η ισχύς της αντλίας μεταβάλλεται ανάλογα του κύβου των αριθμών των στροφών. Αν N' η νέα ισχύς αυτή, θα είναι:

$$\frac{N'}{N} = \left(\frac{n'}{n}\right)^3 \text{ ή } N' = \left(\frac{n'}{n}\right)^3 * N \quad (2.29)$$

2.3. Καμπύλες λειτουργίας των δυναμικών αντλιών

2.3.1. Υπολογισμός χαρακτηριστικής καμπύλης αντλίας

Κάθε αντλία είναι κατασκευασμένη να εργάζεται σε ορισμένο μανομετρικό ύψος και να αποδίδει μία ορισμένη παροχή που δεν μπορεί να απέχει πολύ από μια συγκεκριμένη μέση τιμή.

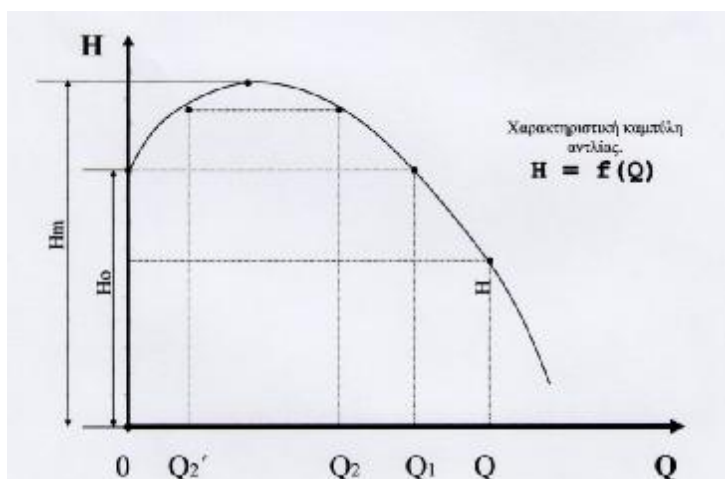
Όταν όμως η αντλία τοποθετηθεί και εργαστεί στις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας της, οι συνθήκες αυτές δεν διατηρούνται σταθερές σε όλη τη διάρκεια της λειτουργίας της, π.χ. αν η αντλία γεμίζει μια δεξαμενή νερού από τον πυθμένα της, τότε καθώς γεμίζει η δεξαμενή, αυξάνεται η πίεση του νερού στο στόμιο εκροής της κατάθλιψης που βρίσκεται μέσα στη δεξαμενή και μεταβάλλεται το μανομετρικό ύψος της αντλίας. Η μεταβολή αυτή συνεπάγεται μεταβολή της παροχής.

Τις μεταβολές του μανομετρικού ύψους μπορούμε να τις μετρήσουμε με ένα μανόμετρο τοποθετημένο στο στόμιο κατάθλιψης και ένα μανόμετρο στο στόμιο αναρρόφησης, αν στραγγαλίζουμε με μία δικλείδα – κοινώς «βάννα» – την ροή καθώς λειτουργεί η αντλία και μετρούμε παράλληλα με ένα παροχόμετρο την παροχή.

Την αντιστοιχία των τιμών του μανομετρικού ύψους H και της παροχής Q δηλ. την συνάρτηση $H = f(Q)$ μπορούμε να την απεικονίσουμε σε γραφική παράσταση η οποία ονομάζεται χαρακτηριστική καμπύλη αντλίας.

2.3.2. Χαρακτηριστική καμπύλη ύψους παροχής

Η καμπύλη $H = f(Q)$, που έχει την μορφή του **Σχήματος 2.2**, για φυγοκεντρικές αντλίες κατά κανόνα με κυρτά πτερύγια, ονομάζεται χαρακτηριστική καμπύλη ύψους – παροχής.



Σχήμα 2.2

Χαρακτηριστική καμπύλη αντλίας (ύψους-παροχής)

Αν κλείσουμε τελείως την δικλείδα στο στόμιο κατάθλιψης της αντλίας, η πίεση που ασκείται στο σημείο εκείνο παίρνει μια οριακή τιμή H_0 που προσεγγίζει το μανομετρικό ύψος της αντλίας. Το μανομετρικό αυτό ύψος της αντλίας (H_0), όταν η αντλία λειτουργεί με κλειστή βάννα (δηλ. με παροχή $Q = 0$) ονομάζεται ύψος μηδενικής παροχής.

Αν μειωθεί λίγο το μανομετρικό ύψος, ανοίγοντας ελάχιστα την βάνα, η παροχή παίρνει μια μεγάλη τιμή ($Q1$) σχεδόν απότομα. Αν συνεχίσουμε να μειώνουμε το μανομετρικό ύψος η παροχή θα αυξάνεται σταθερά. Η περιοχή αυτή της καμπύλης $H = f(Q)$ στην οποία η παροχή Q είναι μεγαλύτερη από την παροχή $Q1$, ($Q > Q1$) ή το μανομετρικό ύψος H είναι μικρότερο από ύψος μηδενικής παροχής ($H < H_0$), λέγεται **περιοχή ευσταθούς λειτουργίας** της αντλίας και αντίστοιχα ευσταθής καμπύλη.

Αν βρισκόμαστε στην περιοχή με παροχή $Q1$ και αυξήσουμε λίγο το μανομετρικό ύψος, κλίνοντας την βάνα κατά ένα ποσοστό, μπορούμε να πετύχουμε τιμές του H , μεγαλύτερες από την τιμή H_0 . Παράλληλα θα μειωθεί η παροχή και θα παίρνει τιμές μικρότερες από την τιμή $Q1$. Η τιμή $Q2$ του σχήματος είναι μικρότερη από την τιμή $Q1$. Αλλά στην περιοχή αυτή της καμπύλης $H = f(Q)$ παρατηρούμε ότι το μανομετρικό δίνει δύο τιμές παροχής $Q2$ και $Q2'$ έτσι υπάρχει κίνδυνος η παροχή να πέσει απότομα από την τιμή της $Q2$ στη τιμή της $Q2'$ ή να γίνει μηδέν.

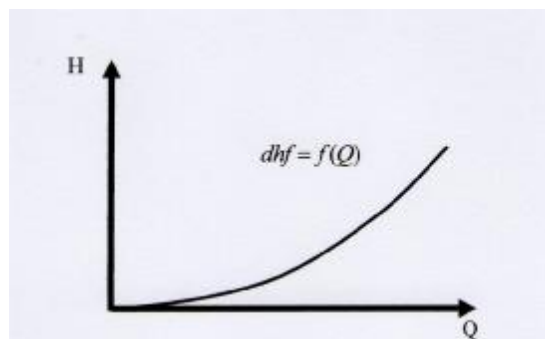
Πράγματι αυτό συμβαίνει όταν η αντλία λειτουργεί με μανομετρικό ύψος μεταξύ του H_0 και του H_m (μεγίστου). Η περιοχή αυτή της καμπύλης $H = f(Q)$, η οποία είναι πάνω από τα σημεία τομής της με το μανομετρικό ύψος H_0 , λέγεται **περιοχή ασταθούς λειτουργίας** της αντλίας και αντίστοιχα ασταθής καμπύλη.

Η μορφή της καμπύλης $H = f(Q)$ δεν είναι ίδια για όλους τους τύπους των αντλιών. Εξαρτάται από την ειδική ταχύτητα της αντλίας, την κατασκευή του θαλάμου και τον αριθμό των πτερυγίων. Στις αντλίες μικτής ροής και αξονικής ροής δεν υπάρχει τμήμα ασταθούς λειτουργίας. Όσο πιο μεγάλη είναι η ειδική ταχύτητα, τόσο πιο απότομη είναι η πτώση της καμπύλης $H = f(Q)$.

2.4. Χαρακτηριστική καμπύλη εγκατάστασης – σωληνογραμμής

Στη σχέση (2.28) των νόμων ομοιότητας των αντλιών έχουμε ότι $\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2$, αν αντικατασταθεί ο λόγος $\frac{n_1}{n_2}$ με τον ίσο του $\frac{Q_1}{Q_2}$ τότε θα έχουμε την νέα σχέση $\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)^2$ που μας λέει ότι αν η παροχή μεταβληθεί κατά ένα ποσοστό, το μανομετρικό ύψος, θα μεταβληθεί κατά ένα μεγαλύτερο ποσοστό.

Η σχέση αυτή γράφεται και ως εξής : $dhf = f(Q)$ δηλ. η μεταβολή του μανομετρικού ύψους που είναι η μεταβολή των απωλειών φορτίου λόγω απωλειών στους σωλήνες, συναρτηθεί της παροχής, απεικονίζει καμπύλη της μορφής του **Σχήματος 2.3** :

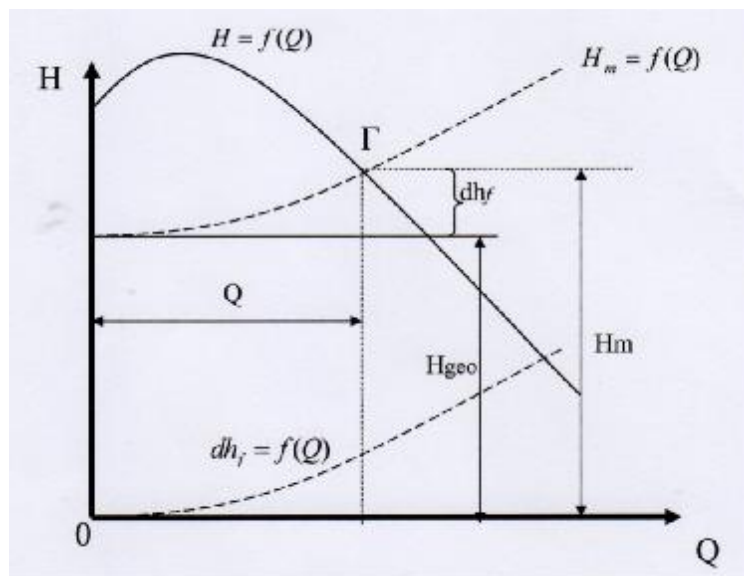


Σχήμα 2.3
Χαρακτηριστική καμπύλη εγκατάστασης (σωληνώσεως)

Η καμπύλη $dh_f = f(Q)$ είναι παραβολικού τύπου και λέγεται χαρακτηριστική καμπύλη της εγκατάστασης (σωληνώσεως).

Μία φυγοκεντρική αντλία, όταν εργάζεται έχει να υπερνικήσει :

1. Το γεωμετρικό ύψος H_{geo} που παραμένει σταθερό δηλαδή $dH_{geo} = 0$,
2. Το ύψος απωλειών λόγω τριβών h_f που μεταβάλλεται (dh_f) σύμφωνα με την παραπάνω καμπύλη:



Σχήμα 2.4

Καμπύλη μεταβολής ύψους απωλειών λόγω τριβών

Αλλά το άθροισμα $H_{geo} + dh_f$ δίνει το μανομετρικό ύψος της αντλίας H_m . Μεταφέρουμε στους ίδιους άξονες συντεταγμένων την καμπύλη $H_m = f(Q)$ δηλαδή την μεταβολή του μανομετρικού ύψους H_m της χαρακτηριστικής καμπύλης της αντλίας ύψους-παροχής.

Οι δύο καμπύλες τέμνονται στο σημείο Γ, που λέγεται σημείο λειτουργίας της αντλίας ή του συστήματος (εγκατάστασης). Αν πάρουμε μια σειρά σωλήνων που δημιουργούν τριβές διαφορετικού ύψους, θα έχουμε αντίστοιχες καμπύλες $dh_f = f(Q)$ και κατά συνέπεια αντίστοιχες καμπύλες του μανομετρικού ύψους $H_m = f(Q)$.

Αυτό μπορεί να γίνει εύκολα με δικλείδα στραγγαλισμού της ροής στο στόμιο κατάθλιψης. Αν αρχίσουμε να στραγγαλίζουμε τη ροή, θα παίρνουμε κάθε φορά διαφορετική καμπύλη $H_m = f(Q)$.

2.5. Καθορισμός του σημείου λειτουργίας αντλητικής εγκατάστασης

Για την πλέον απλή περίπτωση διακίνησης υγρού μεταξύ δύο δεξαμενών με ελεύθερη επιφάνεια στην ατμόσφαιρα και για την μόνιμη λειτουργία της αντλίας και της αντλητικής εγκατάστασης εκφράζεται η ολική πίεση (σε m στήλης υγρού) στην διατομή εισόδου και εξόδου της αντλίας in και out αντίστοιχα εφαρμόζοντας τη γενικευμένη σχέση Bernoulli:

$$H_{out}^t = H_K + z_a + c_K^2/2g = H_{atm} + z_K + \delta h_{fK} \quad (2.30)$$

$$H_{in}^t = H_A + z_a + c_A^2/2g = H_{atm} + z_A - \delta h_{fA} \quad (2.31)$$

στις οποίες με δh_f συμβολίζονται οι υδραυλικές απώλειες της σωλήνωσης (όπου οι δείκτες A και K για την αναρρόφηση και κατάθλιψη αντίστοιχα) που όπως είναι φυσικό εξαρτώνται και από την διακινούμενη παροχή Q. Αφαιρώντας κατά μέλη τις σχέσεις (2.30) και (2.31) προκύπτει:

$$H = H_{out}^t - H_{in}^t = H_{geo} + (\delta h_{fK} + \delta h_{fA}) = H_{geo} + \delta h_{fAK} \quad (2.32)$$

συμβολίζοντας με δh_{fAK} τις υδραυλικές απώλειες της σωλήνωσης που είναι το άθροισμα των υδραυλικών απωλειών στις σωληνώσεις αναρρόφησης και κατάθλιψης. Σύμφωνα με την σχέση (2.32) το ολικό ύψος $H = H_{out}^t - H_{in}^t$ είναι το ολικό ύψος της αντλίας (μανομετρικό), δηλ. η ενέργεια ανά μονάδα μάζας του υγρού την οποία προσδίδει η αντλία θα είναι ίση προς το άθροισμα της ενέργειας που παραλαμβάνει το υγρο, δηλ. το ύψος ανύψωσης H_{geo} και της ενέργειας που δαπανάται στη σωλήνωση για τη διακίνηση του υγρού μέσω αυτής, δηλ των υδραυλικών απωλειών δh_{fAK} .

Οι υδραυλικές απώλειες σε μια σωλήνωση που είναι το άθροισμα γραμμικών και σημειακών απωλειών, θα εκφράζονται ως εξής :

$$\delta h_{fAK} = \sum \lambda_i \frac{l_i c_i^2}{d_i 2g} + \sum \zeta_K \frac{c_K^2}{2g} \quad (2.33)$$

Στην σχέση (2.33), ο πρώτος όρος εκφράζει τις γραμμικές απώλειες στα διάφορα τμήματα της σωλήνωσης διαμέτρου d_i και μήκους l_i . Ο δεύτερος όρος εκφράζει τις υδραυλικές απώλειες (σημειακές) στις διάφορες εντοπισμένες αντιστάσεις της σωλήνωσης.

Ο συντελεστής λ_i των γραμμικών απωλειών είναι συνάρτηση της σχετικής τραχύτητας του αγωγού και του αριθμού Reynolds ($Re_i = c_i * d_i / \nu$) της ροής. Διερευνώντας το είδος της ροής με βάση τον αριθμό Reynolds, ο συντελεστής λ_i των γραμμικών απωλειών προκύπτει από την σχέση $\lambda = 64/Re$ για στρωτή ροή, ενώ όταν πρόκειται για τυρβώδη ροή (συνήθης περίπτωση), ο συντελεστής λ προκύπτει από το διάγραμμα *Moody* όπου πάλι φαίνεται η εξάρτηση του συντελεστή λ από τον αριθμό Reynolds.

Στην πλήρως τυρβώδη περιοχή της ροής και οι συντελεστές ζ_K των σημειακών αντιστάσεων (απωλειών) είναι επίσης σταθεροί και ανεξάρτητοι της ταχύτητας και άρα της διακινούμενης παροχής.

Για τα διάφορα τμήματα της σωλήνωσης ισχύει προφανώς η αρχή της συνέχειας, δηλ. η διακινούμενη από αυτή παροχή Q, είναι η ίδια για τα διάφορα τμήματα της σωλήνωσης και για την αντλία :

$$Q = c_i * A_i = c_K * A_K \quad (2.34)$$

στην οποία με A συμβολίζεται η διατομή των τμημάτων της σωλήνωσης και των εξαρτημάτων της. Άρα η σχέση (1.33) εκφράζεται ως:

$$\delta h_{fAK} = \left[\sum \lambda_i \frac{l_i}{d_i} \frac{1}{2gA_i^2} + \sum \zeta_K \frac{1}{2gA_K^2} \right] * Q^2 = \zeta_{AK} * Q^2 \quad (2.35)$$

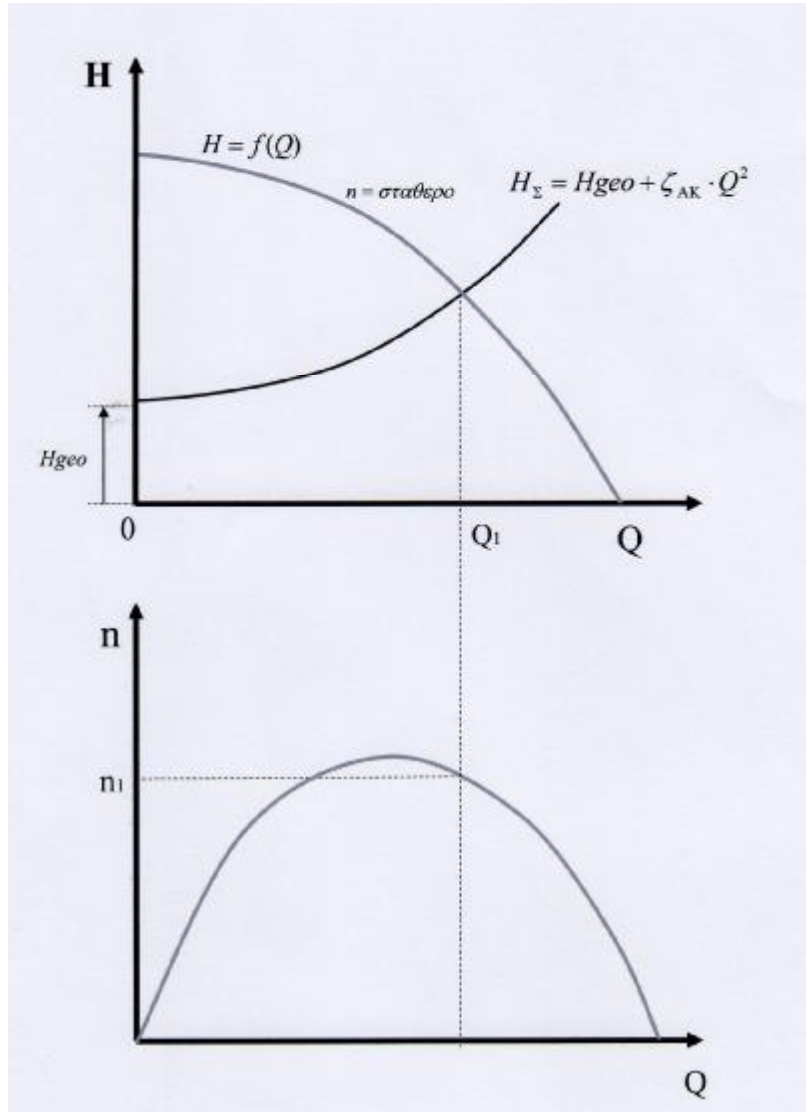
Άρα για την διακίνηση παροχής Q μέσω της δεδομένης αντλητικής εγκατάστασης, το υγρό ανά μονάδα μάζας πρέπει να παραλαμβάνει ενέργεια H που περιγράφεται από τη σχέση :

$$H = H_S = H_{geo} + \zeta_{AK} * Q^2 \quad (2.36)$$

Η σχέση (2.36) εκφράζει τη χαρακτηριστική της σωλήνωσης, δηλ την ανά μονάδα μάζας ενέργεια που πρέπει να προσδίνεται στο υγρό ώστε να διακινείται μέσω της σωλήνωσης με παροχή Q . Η ενέργεια αυτή H_S είναι ίση προς την ενέργεια H_{geo} κατά την οποία αυξάνεται η ανά μονάδα μάζας ενέργειά του και την ενέργεια δh_{fAK} που δαπανάται στις υδραυλικές απώλειες της σωλήνωσης. Το σημείο λειτουργίας αντλητικής εγκατάστασης, με δεδομένη τη χαρακτηριστική (H, Q) της αντλίας, δηλ. η διακινούμενη παροχή Q , θα είναι αυτή για την οποία η ενέργεια $H = f(Q)$ που προσδίδει η αντλία, είναι ίση με αυτή που απαιτείται για την διακίνηση της παροχής στην αντλητική εγκατάσταση και η οποία περιγράφεται από την χαρακτηριστική καμπύλη της εγκατάστασης $H_S = f(Q)$. Άρα το σημείο λειτουργίας της δεδομένης αντλητικής εγκατάστασης με την δεδομένη αντλία, θα προκύψει ως το σημείο τομής της χαρακτηριστικής (H, Q) της αντλίας με την χαρακτηριστική $H_S = f(Q)$ της σωλήνωσης (**Σχήμα 2.5.α**).

Σύμφωνα με τα προηγούμενα το σημείο λειτουργίας της αντλητικής εγκατάστασης εξαρτάται τόσο από την διαμόρφωση της αντλητικής εγκατάστασης, όπως εκφράζεται μέσω της χαρακτηριστικής της σωλήνωσης, όσο και από την αντλία, όπως εκφράζεται από τη χαρακτηριστική λειτουργίας της (H_m, Q) . Από τη χαρακτηριστική του ολικού βαθμού απόδοσης (n, Q) της αντλίας και για το σημείο λειτουργίας, δηλ. την διακινούμενη παροχή Q , προκύπτει η τιμή του ολικού βαθμού απόδοσης με τον οποίο θα λειτουργεί η αντλία (**Σχήμα 2.5.β**). Άρα η ισχύς την οποία απορροφά η αντλία από τον κινητήρα της θα είναι ίση προς :

$$N = \frac{\gamma * H_m * Q}{n} \quad (2.37)$$



Σχήματα 2.5.α και 2.5.β
 Εύρεση του σημείου λειτουργίας αντλητικής εγκατάστασης

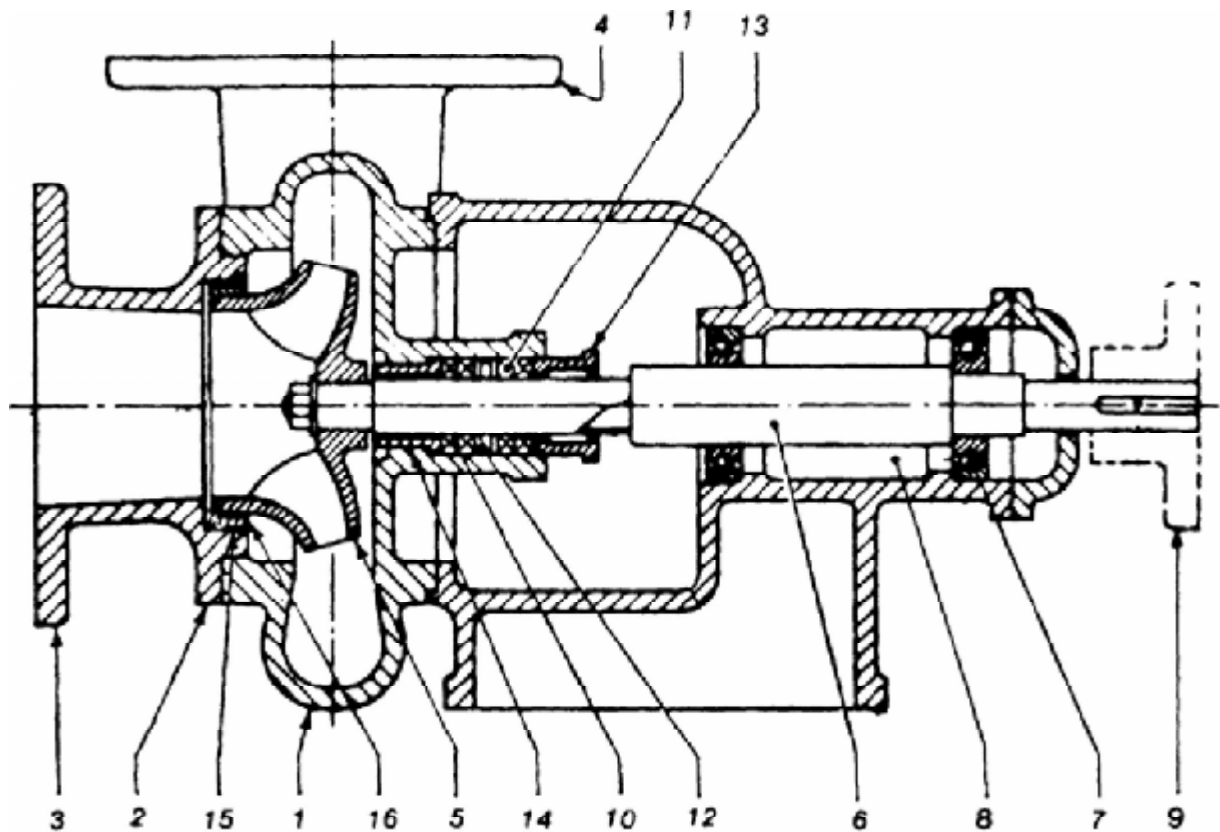
2.6. Διαμόρφωση αντλιών

2.6.1. Τα εξαρτήματα της αντλίας

Τα βασικά εξαρτήματα μιας τυπικής φυγοκέντρου αντλίας (**Σχήμα 2.6**) είναι το σπειροειδές περίβλημα (θάλαμος, σαλίγκαρος), το *κάλυμμα* με το στόμιο εισόδου του υγρού, η φλάντζα για τη σύνδεση του σωλήνα αναρρόφησης, η *χοάνη κατάθλιψης* (έξοδος του υγρού) με τη φλάντζα για τη σύνδεση του σωλήνα κατάθλιψης και ο *άξονας* της αντλίας που δίνει την κίνηση στην *πτερωτή* με την οποία είναι στερεά συνδεδεμένος. Ο άξονας της αντλίας στηρίζεται συνήθως σε δύο τριβείς (ρουλεμάν ή κουζινέτα) που βρίσκονται στις δύο άκρες του θαλάμου ελαίου ενώ στο ελεύθερο άκρο του τοποθετείται ένας *συνδετήρας* για τη σύνδεση της αντλίας με τον κινητήρα ή μια τροχαλία όταν η κίνηση δίνεται με ιμάντα.

Ο άξονας διαπερνά το πίσω μέρος του σπειροειδούς περιβλήματος όπου στεγανοποιείται για να μη διαρρέει το υγρό που βρίσκεται υπό πίεση μέσα στο περίβλημα ή για να μην εισχωρήσει αέρας, οπότε δημιουργούνται ανωμαλίες στη λειτουργία της αντλίας και ο βαθμός αποδόσεως μειώνεται κατά πολύ. Το βασικό εξάρτημα της στεγανοποίησης είναι η *σαλαμάστρα*, που τοποθετείται υπό μορφή δακτυλίων μέσα στο *στυπιοθάλαμο*. Στις αντλίες που η σαλαμάστρα υδρολιπαίνεται από εξωτερική παροχή, ανάμεσα στους δακτυλίους της παρεμβάλλεται ένας *ορειχάλκινος δακτύλιος* (φανάρι) με περιφερειακή αυλάκωση και διάτρηση όπου καταλήγει ένας αγωγός που μεταφέρει νερό υπό πίεση από το περίβλημα ή από εξωτερικό δοχείο υδρολιπάνσεως.

Για τη στεγανοποίηση η σαλαμάστρα σφίγγεται με το *στυπιοθλίπτη*. Όπως θα δειχθεί στην περιγραφή της πτερωτής υπάρχει πάντοτε διαφορά πιέσεως μεταξύ του στομίου εισόδου του υγρού και του εσωτερικού της πτερωτής. Η διαφορά πιέσεως προκαλεί διαρροή του υγρού από το διάκενο μεταξύ της περιστρεφόμενης πτερωτής και του καλύμματος. Για τη μείωση της διαρροής αυτής τοποθετούνται δακτύλιοι στεγανώσεως στα χείλη επαφής της πτερωτής και του καλύμματος.



Σχήμα 2.6
Σχηματικό διάγραμμα μονοβάθμιας φυγοκέντρου αντλίας

Παρακάτω παρουσιάζονται οι ονομασίες των διαφόρων εξαρτημάτων από τα οποία αποτελείται η αντλία με τις αντιστοιχίες τους στο παραπάνω σχήμα:

- 1) Σπειροειδές περιβλήμα (σαλίγκαρος).
- 2) Κάλυμμα του σπειροειδούς περιβλήματος.
- 3) Φλάντζα στομίου εισόδου.
- 4) Χοάνη καταθλίψεως (έξοδος του υγρού).
- 5) Πτερωτή.
- 6) Άξονας της αντλίας.
- 7) Τριβέας (ένσφαιρος ή κουζινέτο).
- 8) Θάλαμος λαδιού.
- 9) Συνδετήρας της αντλίας με τον κινητήρα.
- 10) Σαλαμάστρα (εσωτερικό τμήμα).
- 11) Σαλαμάστρα (εξωτερικό τμήμα).
- 12) Δακτύλιος υδρολιπάνσεως της σαλαμάστρας (φανάρι).
- 13) Στυπιοθλίπτης.
- 14) Δακτυλιοειδής τριβέας.
- 15) Δακτύλιος στεγανώσεως του σπειροειδούς περιβλήματος.
- 16) Δακτύλιος στεγανώσεως της πτερωτής.

2.6.2. Το περίβλημα (σπειροειδές κέλυφος)

Το περίβλημα των φυγοκεντρικών αντλιών αποτελείται συνήθως από δύο τμήματα, τα οποία είναι δυνατό να διαχωρίζονται οριζοντίως, καθέτως ή και διαγωνίως.



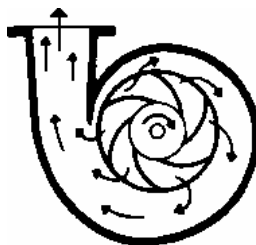
Σχήμα 2.7

Φωτογραφία σπειροειδούς κελύφους

Στην πρώτη περίπτωση τόσο το στόμιο εισόδου όσο και η χοάνη καταθλίψεως βρίσκονται στο κατώτερο τμήμα του περιβλήματος έτσι ώστε το ανώτερο τμήμα να απομακρύνεται εύκολα όταν χρειαστεί κάποια επισκευή. Η δεύτερη περίπτωση χρησιμοποιείται στις αντλίες που συνδέονται απευθείας με τον κινητήρα ή στις αντλίες απλής αναρροφήσεως. Υπάρχουν και περιπτώσεις όπου το διαχωριζόμενο περίβλημα περιβάλλεται από ένα «μονοκόμματο» κέλυφος. Η κατασκευή αυτή χρησιμοποιείται στις αντλίες υψηλής πίεσεως.

Το σχήμα του περιβλήματος είναι σπειροειδές (**Σχήμα 2.8**) και η πτερωτή τοποθετείται έτσι ώστε το υγρό, το οποίο φεύγει από την πτερωτή υπό την επίδραση της φυγοκέντρου δύναμης και ωθείται προς τη χοάνη καταθλίψεως, να κινείται σε αγωγό με διάμετρο συνεχώς αυξανόμενη. Η προοδευτική αύξηση της διατομής του αγωγού του περιβλήματος είναι τέτοια ώστε η παροχή ανά μονάδα επιφάνειας να είναι περίπου σταθερή σε όλη τη διαδρομή του υγρού μέσα στο περίβλημα.

Κατ' αυτό τον τρόπο η ταχύτητα κινήσεως του υγρού ελαττώνεται προοδευτικά και η κινητική του ενέργεια μετατρέπεται σε στατική πίεση με όσο το δυνατό μικρότερες απώλειες. Η μείωση αυτή της ταχύτητας του υγρού μετά την έξοδο από την πτερωτή της αντλίας είναι απαραίτητη, διότι αν το υγρό οδηγηθεί στο σωλήνα καταθλίψεως με την ταχύτητα που έχει κατά την έξοδο από την πτερωτή, οι απώλειες τριβών θα είναι πολύ μεγάλες.

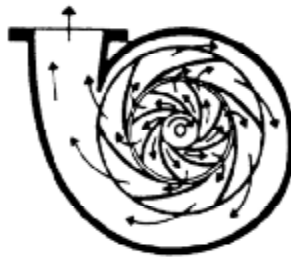


Σχήμα 2.8

Ροή του υγρού σε μονοβάθμια φυγοκεντρική αντλία

Ένας άλλος τύπος φυγοκεντρικής αντλίας είναι η φυγοκεντρική αντλία με πτερύγια διαχύσεως (**Σχήμα 2.9**). Στον τύπο αυτό γύρω από την πτερωτή σχηματίζονται δίοδοι με προοδευτικά αυξανόμενη διατομή προσθέτοντας μια σειρά μη κινουμένων πτερυγίων. Καθώς το υγρό περνά μέσα από τις διόδους που σχηματίζουν τα πτερύγια διαχύσεως, αλλάζει η διεύθυνση κινήσεως του με παράλληλη μείωση της ταχύτητας, ενώ η πίεση αυξάνεται πριν ακόμη το υγρό εισέλθει στον αγωγό του περιβλήματος. Επομένως οι απώλειες μέσα στο περίβλημα μειώνονται και κατά την έξοδο του υγρού η κινητική του ενέργεια μετατρέπεται πληρέστερα σε στατική πίεση, επομένως ο βαθμός αποδόσεως της αντλίας βελτιώνεται. Στην περίπτωση αυτή, το κέλυφος, που περιβάλλει τον δίσκο με τα πτερύγια διαχύσεως δεν χρειάζεται να έχει την μορφή κοχλίας και η διατομή του είναι σχεδόν σταθερή.

Η βελτίωση όμως του βαθμού απόδοσης είναι μικρή σε σύγκριση με την επί πλέον δαπάνη που απαιτείται για την κατασκευή και τοποθέτηση των πτερυγίων διαχύσεως. Για το λόγο αυτό οι αντλίες με πτερύγια διαχύσεως δε θεωρούνται πλεονεκτικές εκτός από ειδικές περιπτώσεις όπου θέλουμε υψηλή πίεση. Η αντλία αυτού του τύπου αναφέρεται και ως στροβιλοαντλία (**turbine pump**) γιατί η κατασκευή της μοιάζει με τον υδροστρόβιλο τύπου Francis (**Hydraulic turbine**) αλλά με αντίστροφη λειτουργία.



Σχήμα 2.9
Ροή του υγρού σε μονοβάθμια φυγοκεντρική αντλία με πτερύγια διαχύσεως

Η διάμετρος του στομίου καταθλίψεως του κοχλίας υπολογίζεται έτσι ώστε, η ταχύτητα ροής σε αυτόν να κυμαίνεται μεταξύ $2 - 3,5 \text{ m/s}$. Η σύνδεση με το σωλήνα καταθλίψεως επιτυγχάνεται μέσω φλάντζας η οποία τοποθετείται στο στόμιο καταθλίψεως. Η διάμετρος του στομίου καταθλίψεως d_K πρέπει να αντιστοιχεί στην εσωτερική διάμετρος του σωλήνα καταθλίψεως.

2.6.3. Η πτερωτή της αντλίας

Υπάρχουν τρία βασικά είδη πτερωτών:

- **Αντλίες με κλειστά πτερύγια:** Ο δρομέας της πτέρωσης κλειστού τύπου έχει δυο δίσκους και τα πτερύγια βρίσκονται ανάμεσα τους. Ο ένας δίσκος έχει στο κέντρο μια οπή για την είσοδο του νερού κατά την αναρρόφηση στα πτερύγια. Οι αντλίες με πτερώσεις κλειστού τύπου έχουν καλύτερες αποδόσεις και δίνουν υψηλότερες πιέσεις στην έξοδο της αντλίας συγκριτικά με τους δύο επόμενους τύπους, αλλά 'μπουκώνουν' ευκολότερα από τις ξένες φερτές ύλες.



Σχήμα 2.10

Πτερύγιο κλειστού τύπου

- **Αντλίες με ανοιχτά πτερύγια:** Είναι απλές στην κατασκευή, έχουν μεγάλα κενά μεταξύ των πτερυγίων και αφήνουν να περάσουν χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα ξένες φερτές ύλες που περιέχονται από ακάθαρτα νερά . Ο βαθμός απόδοσης αυτών είναι μικρότερος των άλλων δύο ειδών, λόγω της διαρροής ύδατος από τη σάλπιγγα προς το στόμιο αναρρόφησης.



Σχήμα 2.11

Πτερύγια ανοικτού τύπου

- **Αντλίες με ημίκλειστα πτερύγια:** Η πτερωτή του ημίκλειστου τύπου αποτελείται από ένα δίσκο. Τα καμπυλωτά πτερύγια είναι τοποθετημένα στην μία πλευρά του δίσκου και από το μέρος της αναρρόφησης του νερού. Μειονέκτημα των αντλιών αυτών βρίσκεται στο ότι δεν πληρούν στεγανότητα μεταξύ πτερυγίων και τοιχώματος του σώματος της αντλίας. Για τον λόγο αυτό, οι αντλίες αυτές έχουν κατά κανόνα μικρότερο βαθμό απόδοσης από ότι οι αντλίες με κλειστά πτερύγια. Πλεονέκτημα όμως αυτών, είναι η εύκολη και γρήγορη πρόσβαση καθαρισμού στην περίπτωση εισόδου στερεών σωμάτων.

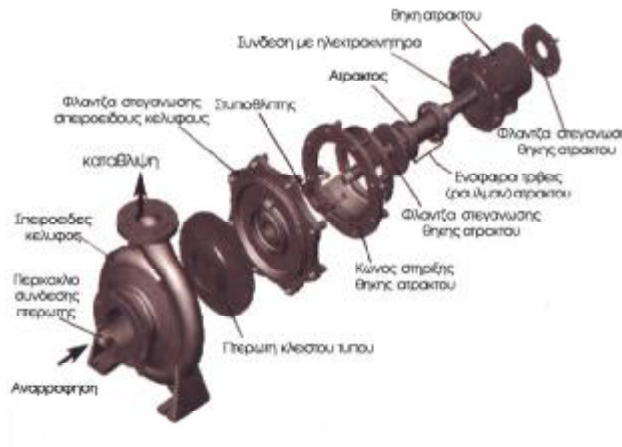


Σχήμα 2.12

Πτερύγιο ημίκλειστου τύπου

2.6.4. Τρισδιάστατα κατασκευαστικά σχέδια αντλιών

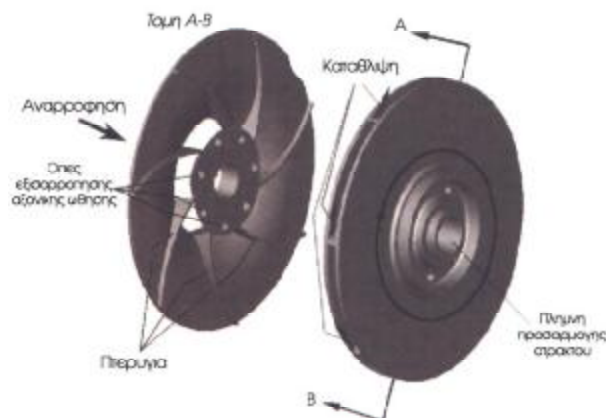
Παρακάτω δίνονται κάποια τρισδιάστατα σχέδια συναρμολόγησης αντλίας στα οποία φαίνονται αναλυτικά όλα τα επιμέρους τμήματα της, με τις ονομασίες τους.



Σχήμα 2.13

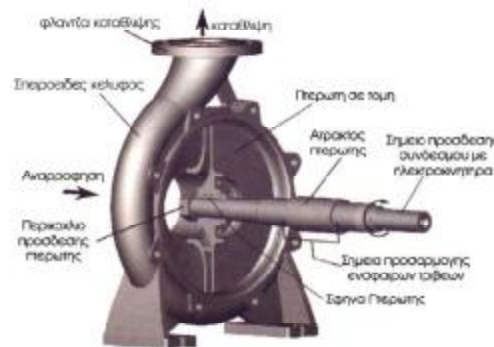
Η γενική διάταξη των επιμέρους εξαρτημάτων, τυπικής φυγοκεντρικής αντλίας. Περιλαμβάνει:

- το σπειροειδές κέλυφος,
- την περρωτή.
- την άτρακτο.
- τη θήκη με τους τριβείς της ατράκτου.
- τα εξαρτήματα σύνδεσης του συγκροτήματος της θήκης της ατράκτου με την περρωτή και το σπειροειδές κέλυφος,
- Τον στυπιοθλίπτη.



Σχήμα 2.14

Περρωτή κλειστού τύπου φυγοκεντρικής αντλίας. Η περρωτή μπορεί να είναι και ανοικτού ή ημίκλειστου τύπου και συνήθως φέρει αξονικές σπές τόσο για τη ζυγοστάθμισή της όσο και την εξορρόπηση της αξονικής ώθησης της ατράκτου. Τα πτερύγια έχουν αντίθετη κλίση από τη φορά περιστροφής της περρωτής, ώστε να ωθείται το ρευστό προς τη χοάνη κατάθλιψης.



Σχήμα 2.15

Σπειροειδής κέλυφος, πτερωτή και άτρακτος σε θέση λειτουργίας. Οι φλάντζες αναρρόφησης και κατάθλιψης ικανοποιούν την τυποποίηση κατά DIN και ISO.



Σχήμα 2.16

Συναρμολόγηση στεγανού σπειροειδούς κελύφους με τον κώνο στήριξης της θήκης της ατράκτου. Η στεγανοποίηση της ατράκτου επιτυγχάνεται με την σύσφιξη του στυπιοθλίπτη προς τη φλάντζα στεγάνωση του σπειροειδούς κελύφους ωθώντας τη σαλαμάστρα προς την άτρακτο.



Σχήμα 2.17

Συναρμολογημένη φυγοκεντρική αντλία. Οι ένσφαιροι τριβείς περιορίζονται κατά την αξονική τους κίνηση από τις δακτυλιωτές ασφάλειες οι οποίες προσαρμόζονται σε κατάλληλες εγκοπές στο εσωτερικό της θήκης της ατράκτου.

Ενότητα 3 Το φαινόμενο της σπηλαίωσης στις αντλίες

Σε αυτή την ενότητα θα μιλήσουμε για τα γενικά χαρακτηριστικά της σπηλαίωσης, το καθαρό θετικό ύψος αναρρόφησης, τα διάφορα είδη σπηλαίωσης και η προέλευση των φυσαλίδων, τον μηχανισμό επίδρασης των φυσαλίδων, τα βήματα της σπηλαίωσης ειδικότερα, τα είδη της σπηλαίωσης τύπου “Vaporous” και “Gaseous”, για τις θέσεις του πτερυγίου όπου εκδηλώνεται η σπηλαίωση, οι συχνοί λόγοι δημιουργίας σπηλαίωσης και τα γενικά συμπτώματα σπηλαίωσης.

3.1. Η σπηλαίωση γενικά

Η εμφάνιση του φαινομένου της σπηλαίωση αποτελεί ένα σημαντικό πρόβλημα των βιομηχανικών μονάδων (π.χ. παραγωγής ενέργειας, επεξεργασίας). Αυτό, επειδή έχει επιπτώσεις σε ένα βασικό εργαλείο, τη φυγοκεντρική αντλία.

Μια ξαφνική αύξηση της τοπικής ταχύτητας του αντλούμενου υγρού προκαλεί πτώση της τοπικής πίεσης, μερικές φορές κάτω από την πίεση ατμοποίησης του υγρού. Το αποτέλεσμα είναι η ατμοποίηση του υγρού και η ανάπτυξη ενός θύλακα ατμού ή «σπηλαίας ατμού» δηλ. ατμοποιημένου υγρού και φυσαλίδων. Όμως, η πίεση ατμοποίησης κάθε υγρού είναι χαρακτηριστικό θερμοδυναμικό μέγεθος του κάθε υγρού που εξαρτάται από τη θερμοκρασία του. Συνεπώς, ακόμη και μια τοπική αύξηση της θερμοκρασίας μπορεί επίσης να έχει τα παραπάνω αποτελέσματα. Κάθε υγρό λοιπόν έχει μια σταθερή σχέση μεταξύ της θερμοκρασίας στην οποία αρχίζει να βράζει και της πίεσής του. Το νερό, για παράδειγμα, βράζει στους 100 °C (212 °F) και υπό πίεση μίας (1) ατμόσφαιρας. Όμως, υπό απόλυτη πίεση 10 ατμοσφαιρών βράζει στους 179 °C (355 °F). Παρόμοια, υπό πίεση 0.024 atm., βράζει στους 70 °F (21°C).

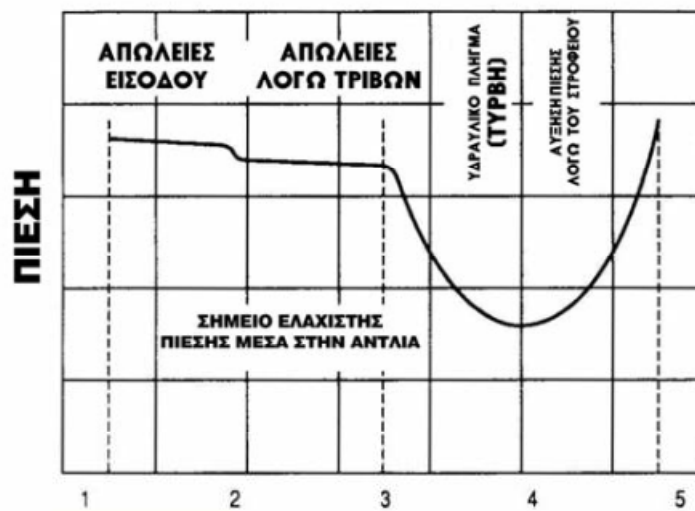
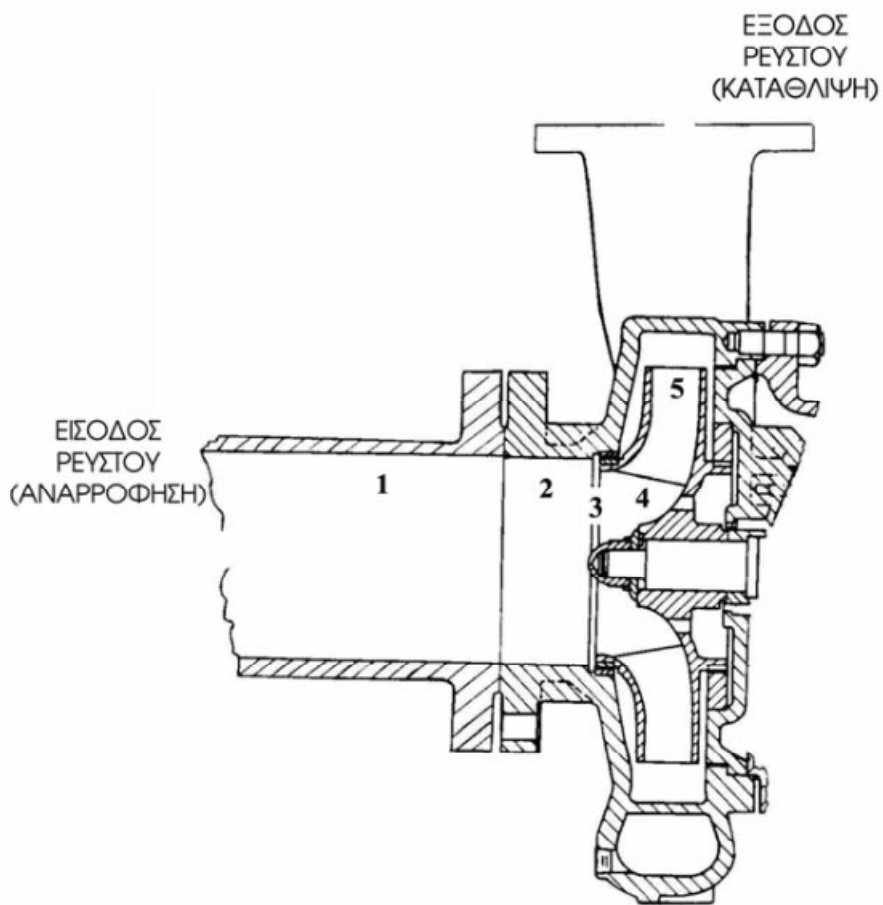
Η ύπαρξη διαφόρων αερίων υπό την μορφή φυσαλίδων στο εσωτερικό του αντλούμενου υγρού επίσης μπορεί να αποτελέσει έναν άλλο λόγο δημιουργίας ενός τύπου σπηλαίωσης.

Η αναγνώριση των συμπτωμάτων της σπηλαίωσης, και η σωστή διάγνωση του τύπου της σπηλαίωσης, μπορούν να βοηθήσουν έναν χειριστή να αποτρέψει μια σοβαρή ζημία.

3.2. Καθαρό θετικό ύψος αναρρόφησης

(NPSHa διαθέσιμο / NPSHr απαιτούμενο)

Σε ένα υγρό από την είσοδο του μέσω της φλάντζας της αντλίας, αλλά και καθώς ρέει μέσα σε αυτήν και συναντά το στροφέιο, εμφανίζεται πτώση της πίεσης του. Το ποσοστό της πτώσης πίεσης είναι συνάρτηση πολλών παραγόντων, όπως , η γεωμετρία της αντλίας, η ταχύτητα περιστροφής, οι απώλειες λόγω τριβών αλλά και οι υδραυλικές απώλειες (λόγω τύρβης). Εν τούτοις, εάν αυτή η πίεση σε κάποιο σημείο μέσα στην αντλία πέσει κάτω από την πίεση ατμών του αντλούμενου υγρού στην δεδομένη θερμοκρασία, θα εμφανιστεί εξάτμιση του υγρού ή αλλιώς το φαινόμενο της σπηλαίωσης. [Περιγραφή (Σχήμα 3.1)]



Σχήμα 3.1

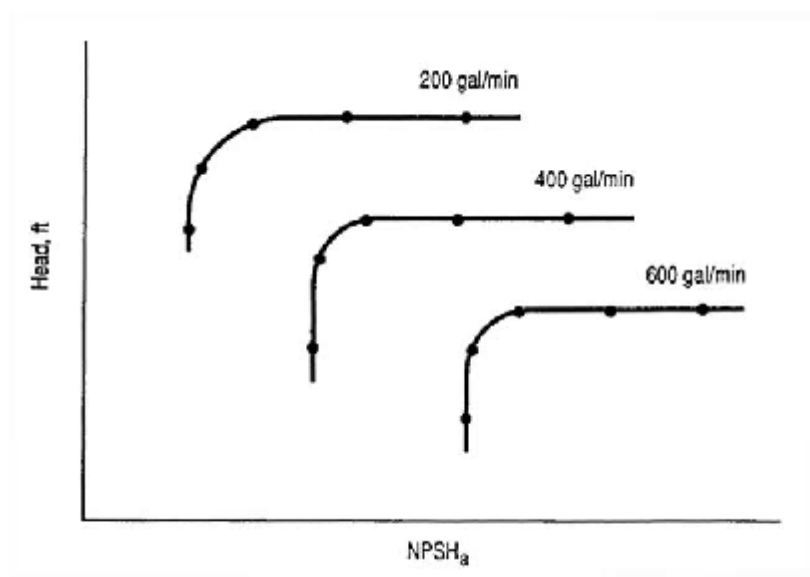
Πτώση πίεσης του ρευστού κατά την κίνηση του μέσα στην αντλία

Το ελάχιστο μανομετρικό που απαιτείται ώστε να αποφευχθεί η σπηλαιώση σε ένα δεδομένο υγρό σε μια δεδομένη παροχή καλείται «απαιτούμενο καθαρό θετικό ύψος αναρρόφησης» ή «Net Positive Suction Head *required*» (NPSH_r). Σε ένα αντλητικό σύστημα, η διαφορά μεταξύ της πραγματικής πίεσης ή του διαθέσιμου μανομετρικού (μετρημένο από την φλάντζα αναρρόφησης της αντλίας) και της πίεσης ατμών του συγκεκριμένου υγρού καλείται «διαθέσιμο καθαρό θετικό ύψος αναρρόφησης» ή «Net Positive Suction Head *available*» (NPSH_a).

Οι κατασκευαστές αντλιών, καθορίζουν το NPSH_r κατά τον σχεδιασμό στροφείου διεξάγοντας κάποια πειράματα, χρησιμοποιώντας ως αντλούμενο υγρό, το νερό. Αυτά τα test γίνονται συνήθως μια φορά για κάθε σχέδιο στροφείου και όχι σε κάθε ξεχωριστή αντλία.

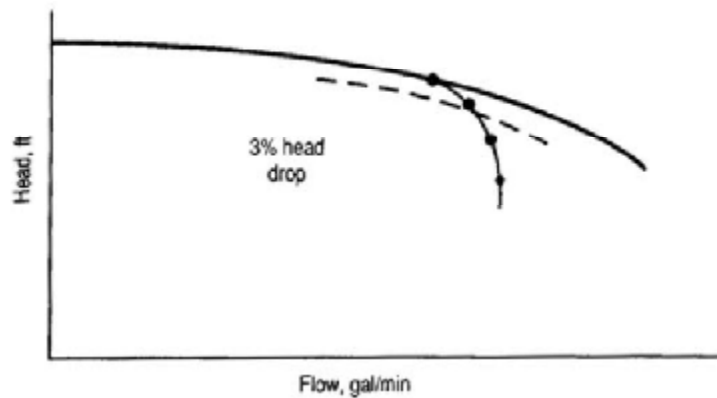
Ο κύριος σκοπός όλων αυτών των test είναι να καθορίσουμε τις απαιτήσεις σε NPSH, για διάφορες παροχές για ένα δεδομένο σχέδιο συνδιασμού στροφείου- κελύφους και να σχεδιάσουμε καμπύλες του NPSH_r σε συνάρτηση με την παροχή (Σχήμα 3.2). Εν τούτοις, ανεξαρτήτως της μεθόδου που χρησιμοποιείται, κάθε διαδικασία σκοπεύει στον καθορισμό του NPSH_r ανιχνεύοντας κάποια πρωτοεμφανιζόμενη δυσλειτουργία της αντλίας και πτώση της απόδοσης της.

Κατά τον υπολογισμό του NPSH_r σύμφωνα με την χαρακτηριστική καμπύλη της αντλίας, λαμβάνεται υπόψη μια πτώση 3% του μανομετρικού λόγω σπηλαιώσης, μια σύμβαση που καθορίστηκε πολλά χρόνια πριν από το Hydraulic Institute Standards (Σχήμα 3.3). Επιτρέποντας αυτή την μεγάλη πτώση μανομετρικού σημαίνει ότι θα έπρεπε ήδη να έχει αρχίσει να συμβαίνει σπηλαιώση σε κάποια μεγαλύτερη παροχή πριν παρατηρηθεί πτώση στην απόδοση της αντλίας.



Σχήμα 3.2

Καμπύλες μανομετρικού συναρτήσεως του NPSH_a για διάφορες παροχές

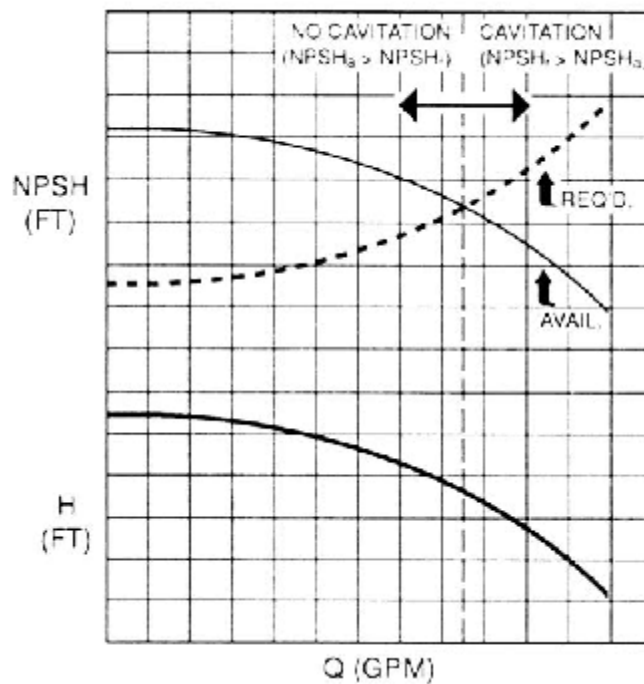


Σχήμα 3.3

Χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας αντλίας και καμπύλη NPSHa συνάρτηση της παροχής λειτουργίας

Διαφορές πάνω από 5 ft στις τιμές του NPSHr, εντοπίζονται μεταξύ διαφόρων αντλιών ίδιου μεγέθους και τύπου που είναι εφοδιασμένες με στροφέιο του ίδιου σχεδιασμού. Αυτή η διαφορά οφείλεται στις διαφορές στην επιφάνεια στο μάτι του στροφείου, περιλαμβάνοντας επίσης τις γωνίες των πτερύγων, την κατεργασία επιφανειών και τις διόδους από τις οποίες περνάει το ρευστό. Επίσης στις διαφορές στην επιφάνεια του ακροφυσίου αναρρόφησης, εισόδου του ρευστού.

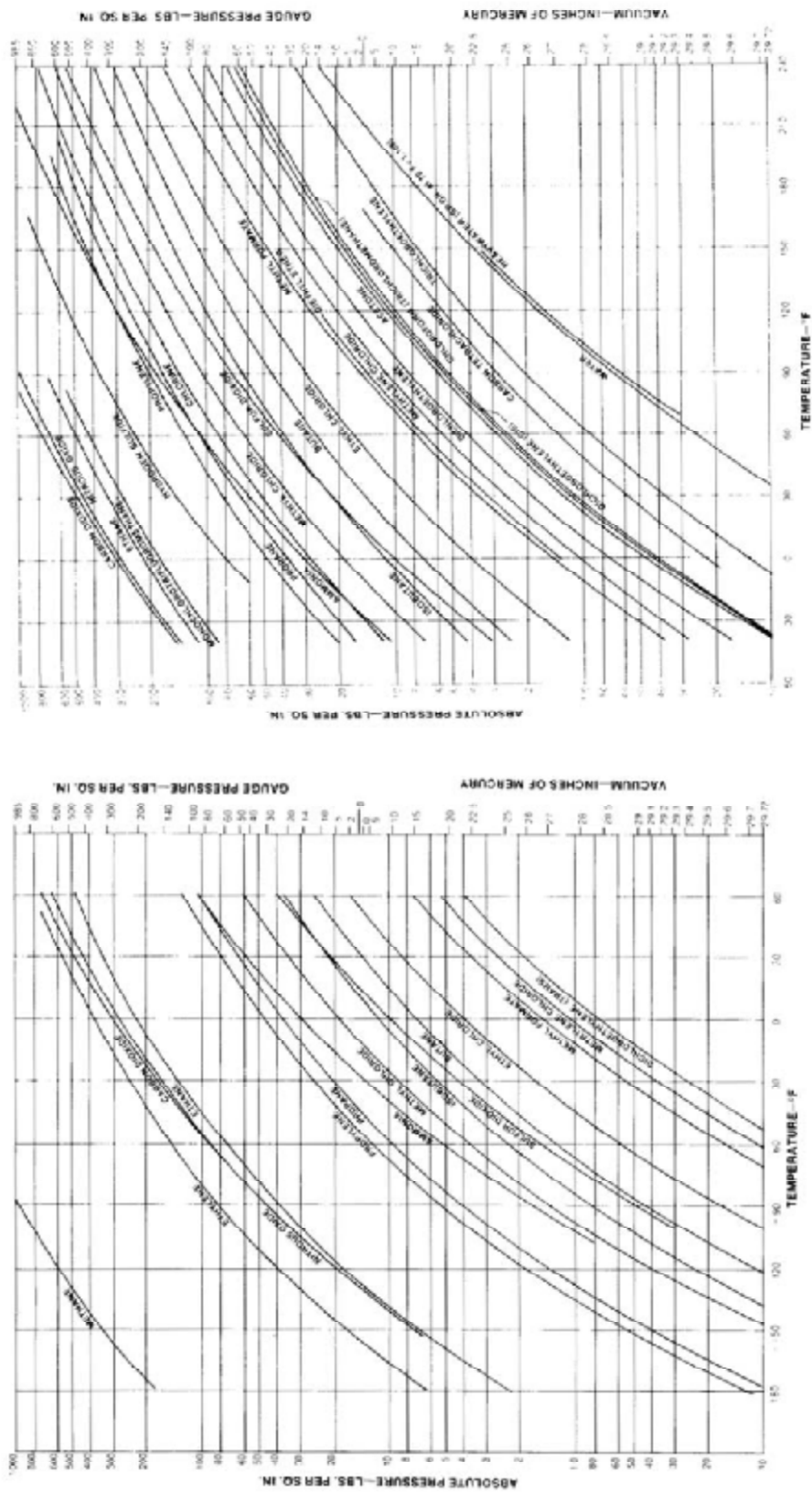
Επιπλέον το NPSHr στην πραγματικότητα, θα τείνει να αυξηθεί με την μείωση της παροχής. Συνεπώς είναι απαραίτητη η ύπαρξη μιας καμπύλης η οποία να περιλαμβάνει το NPSHr και δίδεται από τον κατασκευαστή αλλά και το NPSHa στις συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας (Σχήμα 3.4).



Σχήμα 3.4

Μεταβολή των NPSHa και NPSHr με την παροχή

Είναι γεγονός ότι είναι πολύ λίγες οι εφαρμογές στις οποίες μια αντλία χρησιμοποιείται για να αντλήσει καθαρό νερό. Τις περισσότερες φορές η αντλία καλείται να μεταφέρει ένα μίγμα διαφόρων συστατικών (όπως ακατέργαστο πετρέλαιο, βενζίνη η ακόμα και σύνθετες χρωμα). Είναι λογικό λοιπόν ότι πρέπει να αντιμετωπίσουμε ένα μεγάλο εύρος τάσεων ατμών ή αλλιώς σημείων βρασμού το οποίο εξαρτάται από την κατά όγκο σύσταση του μίγματος στο κάθε συστατικό. Στο παρακάτω **Σχήμα 3.5** φαίνονται οι πιέσεις (τάσεις) ατμών για διάφορα ρευστά συναρτήσει της θερμοκρασίας τους.



Σχήμα 3.5
Πιέσεις (τάσεις) ατμών για διάφορα ρευστά συναρτήσει
της θερμοκρασίας τους

3.2.1. Το NPSH_a ως κριτήριο της σπηλαιώσης

Σε μια φυγοκεντρική αντλία οι πλέον πιθανές περιοχές ανάπτυξης της σπηλαιώσης είναι αυτές στις οποίες η στατική πίεση είναι ήδη χαμηλή οπότε με περαιτέρω μείωση της, λόγω υδροδυναμικών φαινομένων επιτάχυνσης της ροής, ενδέχεται αυτή να μειωθεί κάτω από την πίεση ατμοποίησης P_s . Άρα στην περίπτωση των φυγοκεντρικών αντλιών η πιθανή περιοχή ανάπτυξης της σπηλαιώσης είναι η διατομή εισόδου της πτερωτής. Έστω ότι εκεί επικρατεί η χαμηλότερη πίεση P_A . Για να αποφευχθεί σπηλαιώση πρέπει η $P_A > P_s$. Έτσι ορίζεται μια ελάχιστη τιμή του ύψους αναρρόφησης, **το διαθέσιμο καθαρό θετικό ύψος αναρρόφησης H_H** , γνωστό και ως NPSH_a για την αντλία με την παρακάτω σχέση (3.1).

$$NPSH_a = H_H = \frac{P_A - P_s}{\rho g} + \frac{C_A^2}{2g} \pm Z_i - \Delta h_f \quad (3.1)$$

Όπου: C_A : η ταχύτητα αναρρόφησης από τη δεξαμενή

Z_i : η υψομετρική διαφορά μεταξύ δεξαμενής και εισόδου της αντλίας ($-Z_i$ αν η αντλία είναι τοποθετημένη ψηλότερα από την ελεύθερη επιφάνεια του υγρού, suction lift, $+Z_i$ αν η αντλία είναι χαμηλότερα από την ελεύθερη επιφάνεια του υγρού, positive suction)

Δh_f : οι απώλειες τριβών

Με βάση το N.P.S.H.a μιας αντλίας μπορούμε να βρούμε και το **μέγιστο ύψος αναρρόφησης h_{Amax}** της αντλίας σε μια εγκατάσταση. Δηλαδή, ανάλογα με την εγκατάσταση στην οποία προσαρμόστηκε η αντλία προκύπτει και ένα διαφορετικό μέγιστο ύψος αναρρόφησης h_{Amax} το οποίο εξαρτάται από τις υδραυλικές απώλειες της εγκατάστασης στην αναρρόφηση Δh_{fA} και ορίζεται από τη παρακάτω σχέση (3.2).

$$h_{Amax} = \frac{P_1}{\rho g} - \frac{P_s}{\rho g} + \frac{C_1^2}{2g} - Z_i - \Delta h_{fA} \quad (3.2)$$

Συνήθως θεωρείται ότι ο όρος των ταχυτήτων είναι μηδέν οπότε και παραλείπεται στη σχέση (3.2) η οποία απλοποιείται στην εξής σχέση:

$$h_{Amax} = \frac{P_1 - P_s}{\rho g} - Z_i - \Delta h_{fA} \quad (3.3)$$

3.3. Τα διάφορα είδη σπηλαιώσης – Προέλευση των φυσαλίδων

Όπως αναφέραμε και παραπάνω, η σπηλαιώση μπορεί να είναι διαφόρων τύπων. Οι διάφοροι τύποι σπηλαιώσης διαφέρουν μεταξύ τους λόγω της προέλευσης των φυσαλίδων που την προκαλούν ή ακόμη και λόγω των μηχανισμών που λαμβάνουν μέρος και έχουν σαν αποτέλεσμα αυτή.

Γενικά, οι φυσαλίδες που περιέχονται μέσα σε ένα υγρό είναι δύο τύπων, *φυσαλίδες ατμού* ή *φυσαλίδες αερίου*:

1. Οι *φυσαλίδες ατμού* που σχηματίζονται λόγω της εξάτμισης ενός υπό άντληση υγρού. Η συνθήκη σπηλαιώσης που προκαλείται από το σχηματισμό και την κατάρρευση των φυσαλίδων ατμού, αναφέρεται συνήθως ως "*Vaporous Cavitation*".
2. Οι *φυσαλίδες αερίου* σχηματίζονται λόγω της παρουσίας διαλυμένων αερίων (γενικά αέρα αλλά μπορεί να είναι οποιοδήποτε αέριο στο σύστημα) στο αντλούμενο υγρό. Η συνθήκη σπηλαιώσης που προκαλείται από το σχηματισμό και την κατάρρευση των φυσαλίδων αερίου αναφέρεται συνήθως ως "*Gaseous Cavitation*".

Και οι δύο τύποι φυσαλίδων δημιουργούνται σε ένα σημείο μέσα στην αντλία όπου η τοπική στατική πίεση είναι μικρότερη από την πίεση ατμοποίησης του υγρού (*Vaporous Cavitation*) ή την πίεση κορεσμού του αερίου (*Gaseous Cavitation*). Ειδικότερα:

Vaporous cavitation: είναι ο συνηθέστερος λόγος σπηλαιώσης που εντοπίζεται σε εγκαταστάσεις διαδικασίας. Γενικά εμφανίζεται λόγω της ανεπάρκειας του διαθέσιμου καθαρού θετικού ύψους αναρρόφησης (NPSHa) ή λόγω του φαινομένου της εσωτερικής επανακυκλοφορίας. Γενικά η σπηλαιώση αυτού του τύπου, εκδηλώνεται υπό μορφή μειωμένης απόδοσης αντλιών, υπερβολικό θόρυβο, δονήσεις και φθορά των μερών της αντλίας. Η έκταση της ζημίας που προκαλεί η σπηλαιώση, κυμαίνεται από ένα μικρό ποσοστό διάβρωσης μετά από τα χρόνια λειτουργία ως και πλήρους καταστροφή της αντλίας σε μια σχετικά μικρή χρονική περίοδο.

Gaseous cavitation: εμφανίζεται όταν κάποιο αέριο (συνηθέστερα ο αέρας) εισάγεται μέσα σε μια φυγοκεντρική αντλία μαζί με το υγρό. Μια φυγοκεντρική αντλία μπορεί να χειριστεί τον αέρα σε ποσοστό 1/2 % του όγκου. Εάν το ποσοστό αέρα αυξηθεί σε ποσοστό 6 %, εμφανίζεται σπηλαιώση στην αντλία. Η συνθήκη σπηλαιώσης αναφέρεται επίσης ως "Air binding". Σπάνια, προκαλεί ζημία στο στροφέιο ή το περίβλημα (κέλυφος) της αντλίας. Η κύρια συνέπεια της *Gaseous cavitation* είναι η πτώση παροχής.

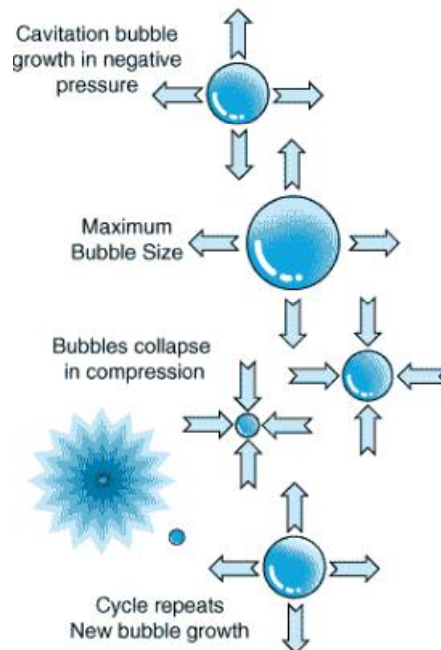
Είναι κατανοητό ότι, προκειμένου να προσδιοριστεί ο τύπος της σπηλαιώσης, αρχικά πρέπει να κατανοηθεί ο μηχανισμός της δημιουργίας αυτού του φαινομένου, δηλ. πώς η σπηλαιώση εμφανίζεται. Επίσης θα πρέπει να αναφερθεί ότι, εάν δεν διευκρινίζεται, με τον όρο σπηλαιώση ή αλλιώς κλασική σπηλαιώση θα εννοούμε την "Vaporous cavitation".

Ας αναλύσουμε όμως πιο μακροσκοπικά την έννοια της φυσαλίδας, δηλαδή τον κύριο λόγο εμφάνισης του φαινομένου της σπηλαιώσης.

3.4. Ο μηχανισμός επίδρασης των φυσαλίδων

Οι φυσαλίδες σχηματίζονται στις περιοχές ενός ρέοντος υγρού, όπου η τοπική πίεση είναι κοντά στα επίπεδα της τάσης ατμού του υγρού. Σχηματίζονται και καταρρέουν σε σύντομο χρονικό διάστημα, μετρούμενο σε *microseconds*. Κατά την διάρκεια της εξέλιξης τους, προκαλούνται τοπικές παροδικές υψηλές πιέσεις και αστάθειες της ροής. Στις αντλίες αυτό οδηγεί σε αύξηση των επιπέδων θορύβου, δονήσεις και βλάβες επιφανειών της αντλίας οι οποίες συνοδεύονται από μεγάλη απώλεια υλικού. Οι μηχανισμοί έναρξης και κατάρρευσης των φυσαλίδων, συζητούνται παρακάτω βάσει κάποιων συμβατικών και εμπειρικών κανόνων. Το παρακάτω **Σχήμα 3.6** περιγράφει τον κύκλο ζωής μιας φυσαλίδας ατμού.

Cavitation and Implosion



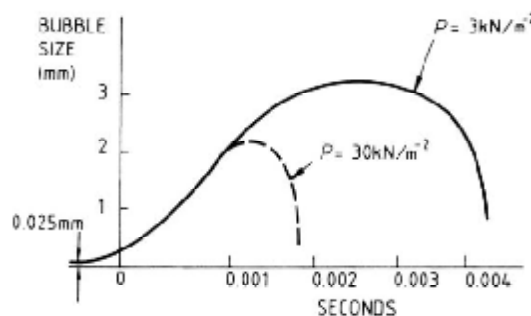
Σχήμα 3.6

Σχηματική αναπαράσταση του κύκλου ζωής μιας φυσαλίδας.

3.4.1. Δημιουργία και κατάρρευση φυσαλίδων

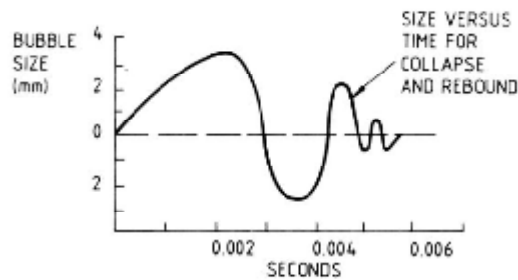
Θεωρητικά, οι κοιλότητες (σπηλαίες), δημιουργούνται, όταν το επίπεδο της τοπικής πίεσης του υγρού, είναι ίσο με την τάση ατμού στις συγκεκριμένες τοπικές συνθήκες. Στην πραγματικότητα, οι φυσαλίδες σχηματίζονται σε υψηλότερα επίπεδα πίεσης, που οφείλεται εν μέρει στην παρουσία κάποιων πολύ μικρών φυσαλίδων ή σωματιδίων καταλοίπων τριβών που ενεργούν σαν έναυσμα του φαινομένου.

Το **Σχήμα 3.7** είναι βασισμένο στην εργασία που έγινε από τον Worster (1956) ο οποίος χρησιμοποίησε τις θεωρητικές εξισώσεις που δημοσιεύθηκαν πρώτα από τον Rayleigh (1917) για να προβλέψει τον κύκλο ζωής μιας υπάρχουσας μικρής φυσαλίδας καθώς αυξάνεται και έπειτα καταρρέει.



Σχήμα 3.7

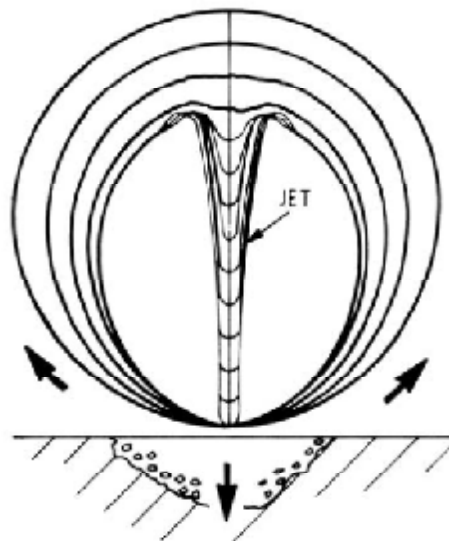
Το ιστορικό εξέλιξης μιας φυσαλίδας για δυο διαφορετικές πιέσεις κατάρρευσης (based on work by Worster, 1956)



Σχήμα 3.8

*Η τάση προς κατάρρευση και επανασηματισμού μιας φυσαλίδας
(based on work by Knapp and Hollander, 1970)*

Το **Σχήμα 3.7** περιγράφει τον σύντομο κύκλο ζωής, και το **Σχήμα 3.8** καταδεικνύει την κατάρρευση και το επανασηματισμό φυσαλίδων που παρατηρήθηκαν κατά την μελέτη της μηχανικής της συμπεριφοράς κοιλοτήτων (σπηλαίων). Για μια λεπτομερέστερη περιγραφή, θα μπορούσαμε ν' ανατρέξουμε στη μονογραφία του Knapp et al (1970), Lush (1987a και β), Durrer (1986) και άλλων για καλύτερη κατανόηση. Ο Lush (1987b) και Durrer (1986) μεταξύ των άλλων, πρότειναν ότι η μελέτη του φαινομένου της διάβρωσης λόγω σπηλαίωσης, μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας την έννοια του μοντέλου «micro-jet» (**Σχήμα 3.9**). Εξετάζοντας τη συμπεριφορά μιας φυσαλίδας κοντά σε μια επιφάνεια, το micro-jet κινείται με ταχύτητες επάνω από 400 m/sec .



Σχήμα 3.9

*Το μοντέλο «micro-jet» σχηματίζεται με την κατάρρευση μιας φυσαλίδας.
(Lush (1987 b), courtesy of the Institution of Mechanical Engineers)*

Έχει υπολογιστεί ότι αυτό το φαινόμενο, μπορεί να προκαλέσει στιγμιαία αύξηση των πιέσεων μέχρι και 6000 atm κατά την κατάρρευση των φυσαλίδων, και αύξηση των τοπικών θερμοκρασιών των μετάλλων μέχρι 10,000 °C. Αυτές οι τιμές έχουν χρησιμοποιηθεί για να εξηγηθεί η χαρακτηριστική διάβρωση και οξείδωση στην περιοχή όπου έχουμε κατάρρευση φυσαλίδας, που δημιουργήθηκε λόγω σπηλαίωσης. Υποστηρίζεται ότι αρχικά η επιφάνεια των μετάλλων σκληραίνει και ότι η τοπική υψηλή

θερμοκρασία έχει επιπτώσεις στο υλικό ακριβώς κάτω από την επιφάνεια 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 αντίσταση στη φθορά είναι ανάλογη με τη σκληρότητα της επιφάνειας.

3.5. Τα βήματα της σπηλαίωσης ειδικότερα

Ο μηχανισμός της σπηλαίωσης σε διαδοχικά βήματα φαίνεται από το παρακάτω σχεδιάγραμμα:



Αναλυτικότερα, τα στάδια της σπηλαίωσης είναι:

Στάδιο 1: Σχηματισμός Φυσαλίδων στο εσωτερικό του υγρού.

Οι φυσαλίδες σχηματίζονται μέσα στο υγρό όταν αυτό ατμοποιείται δηλ. κατά την αλλαγή φάσης του από υγρό σε ατμό.

Στάδιο 2: Ανάπτυξη – Μεγέθυνση Φυσαλίδων.

Αν οι συνθήκες λειτουργίας παραμένουν σταθερές, νέες φυσαλίδες συνεχίζουν να σχηματίζονται και οι παλαιές φυσαλίδες να 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 (vane trailing edge). Λόγω της περιστροφής του στροφείου, οι φυσαλίδες αποκτούν πολύ υψηλές ταχύτητες και τελικώς φθάνουν σε περιοχές υψηλής πίεσης μέσα στο στροφείο όπου αρχίζουν να καταρρέουν. Ο κύκλος ζωής μιας φυσαλίδας έχει υπολογιστεί ότι είναι της τάξεως των 0,003 δευτερολέπτων.

Στάδιο 3: Κατάρρευση των Φυσαλίδων

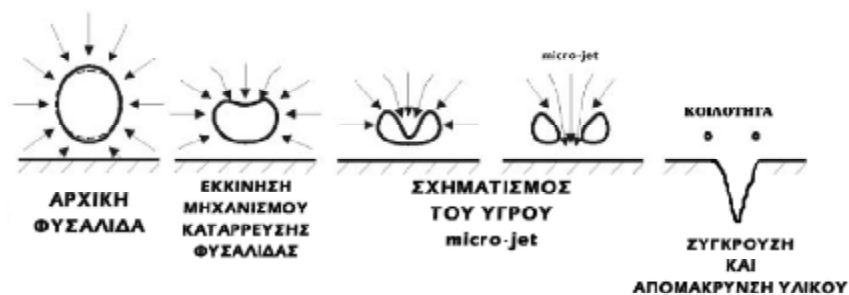
Καθώς οι φυσαλίδες ατμού κινούνται κατά μήκος των πτερυγίων του στροφείου, η πίεση γύρω από τις φυσαλίδες αρχίζει να αυξάνεται έως ότου φθάσει σε ένα σημείο όπου η πίεση έξω από τη φυσαλίδα τείνει να γίνει μεγαλύτερη από την πίεση μέσα στη φυσαλίδα. Έτσι, στο σημείο αυτό, όπου η στατική πίεση τείνει να αυξηθεί πάνω από την πίεση ατμοποίησης, η μάζα του ατμού συμπιέζεται. Η μετάβαση από την φάση του ατμού στην υγρή φάση δεν γίνεται στιγμιαία και για αυτό παρατηρείται μια μεταβατική περιοχή στην οποία συνυπάρχουν και οι δυο φάσεις. Η φυσαλίδα στη συνέχεια καταρρέει. Η διαδικασία δεν είναι έκρηξη προς τα έξω αλλά μάλλον μια κατάρρευση-έκρηξη προς το εσωτερικό της. Εκατοντάδες φυσαλίδες καταρρέουν περίπου στο ίδιο σημείο κάθε πτερυγίου του στροφείου. Λόγω ακριβώς της μεγάλης διαφοράς στην πυκνότητα μεταξύ της υγρής φάσης ρ_V και της φάσης ατμού ρ_A , (Για

το νερό σε θερμοκρασία μικρότερη των 100°C είναι $\rho_V/\rho_A > 900$), το φαινόμενο της επαναυγροποίησης συνοδεύεται τοπικά από σημαντική αύξηση της στατικής πίεσης κρουστικής μορφής. Η αύξηση της κρουστικής μορφής στατικής πίεσης εξηγείται ποιοτικά από το ότι κατά την επαναυγροποίηση μιας φυσαλίδας ατμού, ο όγκος υγρού που αντιστοιχεί στην μάζα του ατμού είναι πολύ μικρός.

Στάδιο 4: Επαναυγροποίηση της Φυσαλίδας.

Με την επαναυγροποίηση της φυσαλίδας σχηματίζεται ένα κενό που τείνει να καταληφθεί με ορμή από το περιβάλλοντα υγρό το οποίο επιταχύνεται γρήγορα υπό την μορφή υγρού *micro-jet* για να γεμίσει το κενό που δημιουργήθηκε. Τότε, το *micro-jet* διαρρηγνύει τη φυσαλίδα με δύναμη που δρα σαν σφυρηλάτηση. Η ταχύτητα του μηδενίζεται όταν ολόκληρος ο όγκος της πρώην φυσαλίδας καταληφθεί από το περιβάλλον υγρό. Η απότομη αυτή επιβράδυνση των υγρών στοιχείων αντιστοιχεί σύμφωνα με το θεώρημα της ορμής σε υπερβολική τοπική αύξηση της στατικής του πίεσης .

Οι τοπικές πιέσεις λόγω σπηλαίωσης μπορούν να φθάσουν μέχρι εκατοντάδες ατμόσφαιρες. Έχουν αναφερθεί πιέσεις κατάρρευσης φυσαλίδων μεγαλύτερες από 1 GPa. Αυτό το τοπικά έντονο φαινόμενο της σφυρηλάτησης, μπορεί να δημιουργήσει κοιλότητες στο στροφέιο. Μετά την κατάρρευση της φυσαλίδας, εκπέμπεται ηχητικό κύμα που πηγάζει από το σημείο της κατάρρευσης. Αυτό το ηχητικό κύμα αποτελεί ένδειξη της σπηλαίωσης στην αντλία (Σχήμα 2.10).



Σχήμα 3.10

Κατάρρευση φυσαλίδας πάνω σε συμπαγή τοίχωμα.
Η εμφάνιση του «*micro-jet*» με την κατάρρευση μιας φυσαλίδας.

3.6. Τα είδη της σπηλαίωσης τύπου “Varorous”

Η σπηλαίωση τύπου “*Varorous*”, μπορεί να διαχωριστεί σε ακόμη δυο είδη σπηλαίωσης τα οποία θα περιγράψουμε παρακάτω:

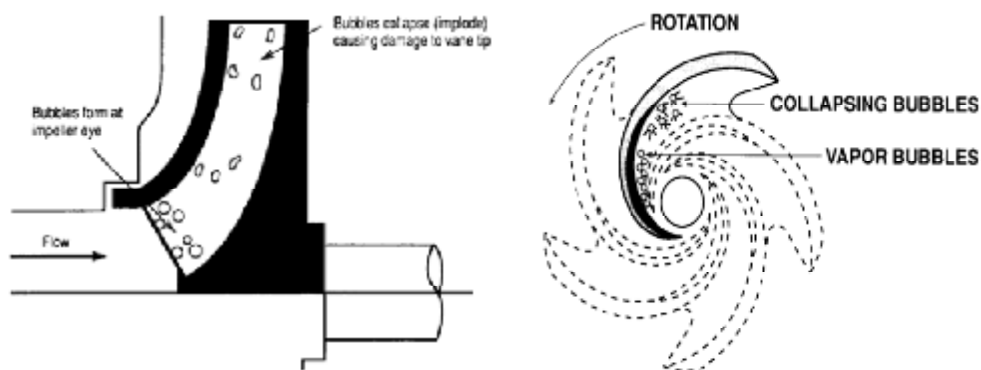
- Σπηλαίωση κλασσικού τύπου.
- Σπηλαίωση λόγω επανακυκλοφορίας.

3.6.1. Σπηλαίωση κλασσικού τύπου

Είναι ο τύπος της σπηλαίωσης που περιγράφηκε παραπάνω. Αναπτύσσεται όταν σε μια περιοχή της ροής όπου η στατική πίεση τείνει τοπικά να γίνει μικρότερη από την πίεση ατμοποίησης του υγρού, όποτε αυτό ατμοποιείται και αναπτύσσεται ένας θύλακας ατμού, η «σπηλαία ατμού» δηλ.

ατμοποιημένου υγρού. Σε περιοχή όπου η στατική πίεση τείνει να αυξηθεί πάνω από την πίεση ατμοποίησης η μάζα του ατμού επανυγροποιείται. Το φαινόμενο της επανυγροποίησης συνοδεύεται τοπικά από φαινόμενα κρουστικής μορφής.

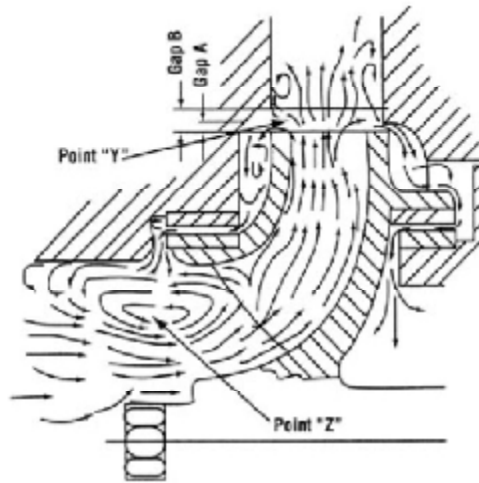
Ειδικότερα, καθώς το στροφέιο παράγει έργο στο υγρό, δημιουργούνται διαφορές πιέσεων. Για να μεταδοθεί η ισχύς, μια διαφορά πιέσεως πρέπει να υπάρχει μεταξύ των επιφανειών προσβολής και εκφυγής των πτερυγίων. Διαφορές πιέσεων σημαίνει ότι η πίεση είναι χαμηλότερη σε ορισμένες περιοχές της αντλίας από ό,τι σε άλλες. Υπό ορισμένες συνθήκες, η πίεση σε ορισμένες περιοχές της αντλίας μπορεί να πέσει χαμηλότερα από την πίεση των ατμών του υγρού, δημιουργώντας έτσι συνθήκες σπηλαίωσης (**Σχήμα 3.11**). Ο κυριότερος λόγος εμφάνισης αυτού του τύπου σπηλαίωσης μπορεί να είναι λόγω σημαντικών απωλειών στην σωληνογραμμή του δικτύου



Σχήμα 3.11
Εμφάνιση του φαινομένου
της κλασσικής σπηλαίωσης.

3.6.2. Σπηλαίωση λόγω επανακυκλοφορίας

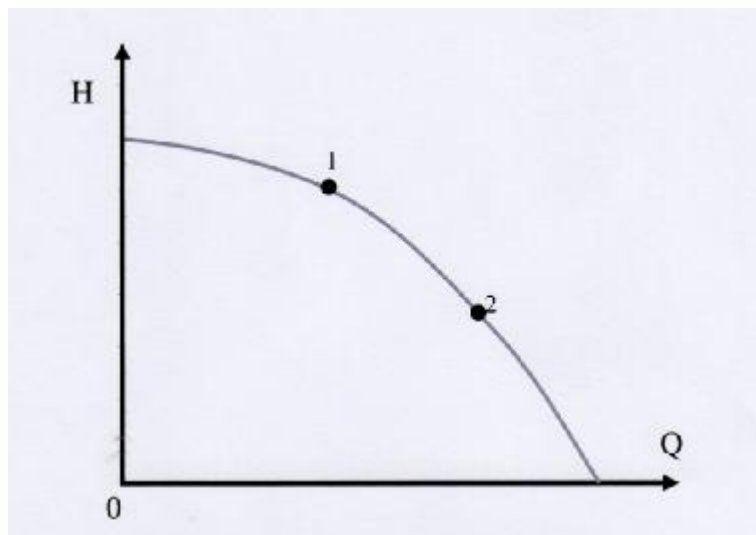
Η σπηλαίωση λόγω επανακυκλοφορίας (αποκαλούμενη επίσης και *rotating stall* ή και *separation*) είναι ένας όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει το σχηματισμό θυλάκων ατμού. Αυτός ο τύπος σπηλαίωσης είναι λιγότερο γνωστός και κατανοητός από την κλασσική σπηλαίωση, αν και πιθανά είναι ο πιο συχνός. Συχνότερα, προκαλείται από την επανακυκλοφορία στην αναρρόφηση (όπως παρουσιάζεται στο σημείο "Z" στο **Σχήμα 3.12**).



Σχήμα 3.12

Σχηματισμός στροβίλων λόγω επανακυκλοφορίας στο "μάτι" του στροφείου και στα άκρα των πτερυγίων

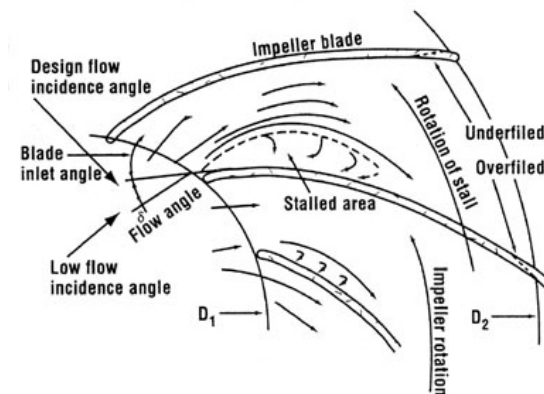
Όταν η αντλία δουλεύει πάνω στην χαρακτηριστική της καμπύλη π.χ. από το σημείο 2 στο σημείο 1 (**Σχήμα 3.13**), ρεύματα λόγω περιδίνησης, αρχίζουν να σχηματίζονται στο "μάτι" του στροφείου. Η εμφάνιση των ρευμάτων αυτών εξηγείται ως εξής : Στιγμιαία, δεν υπάρχει καμία μείωση της παροχής, μέσα στην αντλία όπως είναι αναμενόμενο σύμφωνα με το **Σχήμα 3.13** όπου για το δεδομένο σημείο 1 αυτής της καμπύλης του σχήματος όπου $Q_1 < Q_2$. Αυτό σημαίνει ότι η ταχύτητα του ρευστού, μέσα στις διόδους του στροφείου, θα πρέπει να έχει αυξηθεί. Ο λόγος αυτής της αύξησης είναι τα ρεύματα περιδίνησης στο "μάτι" του στροφείου, όπου έχουν μειώσει αποτελεσματικά το μέγεθος της ροής (ή αλλιώς την παροχή) που γίνεται διαμέσου των καναλιών, αλλά και έχουν αυξήσει την ταχύτητα του υγρού στην δεδομένη παροχή 1.



Σχήμα 3.13

Χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας φυγοκεντρικής αντλίας.

Όταν η ταχύτητα του υγρού αυξάνεται, η πτώση πίεσης λόγω της τριβής πρέπει επίσης να αυξηθεί. Εάν η πτώση είναι αρκετά μεγάλη ώστε να προκληθεί πτώση της πίεσης κάτω από την πίεση ατμού του υγρού, θα δημιουργηθεί στην αντλία κλασική σπηλαιώση λόγω της αρχικής εμφάνισης σπηλαιώσης λόγω επανακυκλοφορίας. Μια άλλη συνέπεια του φαινομένου της επανακυκλοφορίας είναι ότι καθώς το ρευστό ρέει πάνω σε ένα πτερύγιο του στροφέιου, η πίεση κοντά στην επιφάνεια του είναι χαμηλή, και η ροή τείνει να αποκολληθεί. (Σχήμα 3.14).



Σχήμα 3.14

Εμφάνιση του φαινομένου της αποκόλλησης στο μάτι του στροφέιου λόγω αλλαγών στην γωνία πρόσπτωσης της ροής.

Αυτή η περιοχή αποκόλλησης εμφανίζεται όταν η γωνία πρόσπτωσης (δηλ. η διαφορά μεταξύ της γωνίας ροής (flow angle) και της γωνίας εισόδου του πτερύγιου του στροφέιου της αντλίας (ump impeller vane inlet angle)) αυξηθεί επάνω από μια συγκεκριμένη κρίσιμη τιμή. Η περιοχή αποκόλλησης τελικά εξαφανίζεται αλλά ανασχηματίζεται καθώς η περιστροφή συνεχίζεται. Η περιοχή αυτή, περιέχει ατμό που περιβάλλεται από ένα τυρβώδες ρέοντα υγρό σε μια πίεση υψηλότερη από την πίεση ατμού. Αυτή η αποκολλημένη περιοχή θα γεμίσει έπειτα με υγρό από το κινούμενο ρεύμα. Ο θύλακας ατμού καταρρέει, προκαλώντας ζημιά στην επιφάνεια πτερυγίων του στροφέιου. Αυτό μπορεί να επαναληφθεί μέχρι 200 έως 300 φορές ανά δευτερόλεπτο.

Σύμφωνα με μια σημείωση στο API 610 "Centrifugal Pumps for Petroleum, Heavy Duty Chemical, and Gas Industry Services" θεωρείται ευρέως ότι μόνο οι αντλίες υψηλής ενέργειας επιρεάζονται από τη σπηλαιώση λόγω επανακυκλοφορίας. Εντούτοις, ένα στροφέιο που κατασκευάζεται από χυτοσίδηρο ή χαλκό μπορεί να διαβρωθεί έντονα σε πολύ χαμηλότερα ενεργειακά επίπεδα.

Αποτελεί συχνό φαινόμενο, οι περισσότερες αντλίες να λειτουργήσουν είτε σε συνεχή, είτε σε διακοπτόμενη αναρρόφηση αλλά και είτε να εμφανίσουν το φαινόμενο της επανακυκλοφορίας στην κατάθλιψη (ειδικότερα εκείνες που σχεδιάζονται για υψηλές (>11,000), ειδικές ταχύτητες. Η ειδική ταχύτητα αναρρόφησης είναι ένας ενδεικτικός αριθμός που υπολογίζεται από την ταχύτητα περιστροφής μιας αντλίας, από την παροχή και το μανομετρικό στο μέγιστο σημείο αποδοτικότητας της. Η εσωτερική κυκλοφορία στο στροφέιο εμφανίζεται συνήθως με θόρυβο όμοιο με αυτόν της κλασικής σπηλαιώσης και με φθορά διάβρωσης.

Αυτή η ζημιά επηρεάζεται από την ταχύτητα εισόδου στο ακροπτερύγιο του στροφέιου (impeller inlet tip speed), το μέγεθος που συμβαίνει η επανακυκλοφορία, το όριο NPSH, τα χαρακτηριστικά του αντλούμενου ρευστού, το ενεργειακό επίπεδο της αντλίας και τα υλικά της κατασκευής, δηλ. από

παράγοντες που δεν μπορούν να υπολογιστούν εύκολα. Σχεδιάζοντας την αντλία για χαμηλές ειδικές ταχύτητες αναρρόφησης και περιορίζοντας το εύρος λειτουργίας παροχών επάνω από το σημείο επανακυκλοφορίας μπορεί να βοηθήσει τους τελικούς χρήστες να αποφύγουν πολλά από αυτά τα προβλήματα. Η αύξηση του μανομετρικού αναρρόφησης μπορεί να οδηγήσει σε κάποια βελτίωση του προβλήματος της επανακυκλοφορίας και της προκληθείσας σπηλαιώσης αλλά και να αυξήσει την πιθανότητα της σύγχυσης της με την κλασική σπηλαιώση. Είναι σημαντικό όμως, να διαγνωστεί ακριβώς και αυτή γιατί τα τελικά αποτελέσματά της μπορούν να είναι πιο καταστρεπτικά από εκείνα της κλασικής σπηλαιώσης. Σημειώνεται ότι η σπηλαιώση λόγω επανακυκλοφορίας εμφανίζεται πιο συχνά από ότι μπορεί να αναμένεται.

Τα υπερβολικά κενά λόγω φθοράς των δαχτυλιδιών μπορούν να μειώσουν την τάση για σχηματισμό της κλασικής σπηλαιώσης αλλά και της σπηλαιώσης λόγω επανακυκλοφορίας. Καθώς η αυξανόμενη διαρροή στο σημείο "Z" του **Σχήματος 3.12**, διαταράσσει την ιδανική ροή προς το "μάτι" του στροφείου, η τάση σχηματισμού θυλάκων και φυσαλίδων αυξάνεται. Ένας διπλασιασμός των κενών φθοράς των δαχτυλιδιών μπορεί να αυξήσει το NPSHr ενός δεδομένου τύπου στροφείου τουλάχιστον κατά 40% με 45%, το οποίο θα βοηθήσει να κατασταλούν αυτές τις τάσεις.

3.7. Η σπηλαιώση τύπου "Gaseous"

Κατά τη σπηλαιώση αυτού του τύπου, οι φυσαλίδες αερίου σχηματίζονται λόγω της παρουσίας διαλυμένων αερίων (γενικά αέρα αλλά μπορεί να είναι οποιοδήποτε αέριο στο σύστημα) στο αντλούμενο υγρό. Στις επόμενες παραγράφους θα προσπαθήσουμε να περιγράψουμε που εμφανίζεται αυτό το φαινόμενο και τις επιπτώσεις του.

3.7.1. Επιπτώσεις του Ελεύθερου Αέρα εντός του Αντλούμενου Υγρού

Γενικά, η παρουσία ελεύθερου αέρα (ή άλλου είδους αερίου) εντός του αντλούμενου υγρού πάντα επηρεάζει αρνητικά την απόδοση της φυγοκεντρικής αντλίας. Μια αρνητική πλευρά της παρουσίας ελεύθερου αέρα μπορεί να παρατηρηθεί κατά την "αρχική της πλήρωση". Όμως, ακόμη και όταν μια αντλία έχει υποστεί "σωστή αρχική πλήρωση", ελεύθερος αέρας μπορεί να εμφανισθεί κατά τη λειτουργία της και να υποβιβάσει την απόδοση της αντλίας.

Όταν μείγμα υγρού και αέρος εισέρχεται σε στροφείο, οι φυγοκεντρικές δυνάμεις που δημιουργούνται από τα περιστρεφόμενα πτερύγια εκδιώκουν (σπρώχνουν) το βαρύτερο υγρό εξωτερικά και έτσι παγιδεύεται ο αέρας στο κέντρο της αντλίας. Υπό ορισμένες συνθήκες, είναι τόσο πολύς ο αέρας που μπορεί να συγκεντρωθεί στον ομφαλό του στροφείου, ώστε υπάρχει πιθανότητα να διαχωρίσει το υγρό στη γραμμή αναρρόφησης τελείως από το υγρό στις εξωτερικές ακτίνες του στροφείου. Αυτό, φυσικά, διασπά την άντληση. Οποτεδήποτε τέτοια διάσπαση συμβαίνει κατά την διαδικασία της άντλησης, εξαρτάται από την πηγή του αέρα που εισέρχεται στην αντλία, την ταχύτητα ροής του εισερχόμενου αέρα την θερμοκρασία και την πίεση στον ομφαλό του στροφείου.

3.7.2. Πηγές του ελεύθερου αέρα

Οι πιο συνήθεις πηγές ελεύθερου αέρα είναι οι ακόλουθες:

1. Αέρας εισέρχεται σε μια χαμηλής -πίεσεως περιοχή του συστήματος άντλησης δια μέσω μιας τρύπας, ρωγμής ή άλλης διακοπής στην περιοχή μεταξύ χαμηλής πίεσης και ατμοσφαιρικού αέρα.
2. Αέρας (ή αέριο) μπορεί να υπάρχει διαλυμένος εντός του αντλούμενου υγρού. Η διαλυτότητα των αερίων στα υγρά ελαττώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας του υγρού και με τη μείωση της πίεσεως. Συνεπώς, ο αέρας είναι ικανός να ξεχωρίσει από το διάλυμα κατά τη φάση εισόδου στον ομφαλό του στροφείου ,όπου συνήθως η πίεση είναι μικρότερη.
3. Φυσαλίδες αέρος μπορεί να εμφανισθούν στο νερό που περιέχει σαπισμένα ή οργανικά ένζυμα. Επίσης, μπορεί να προκληθούν με χημικές κατεργασίες που συνεχίζουν να λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια της άντλησης από την αντλία.

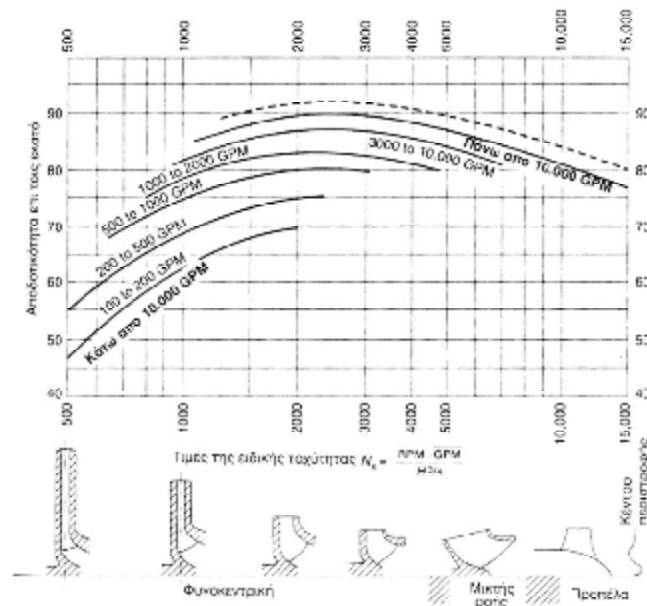
Πριν από την δημιουργία κενού αέρος, ο αέρας συνήθως εμφανίζεται στο υγρό υπό τη μορφή φυσαλίδων. Όταν οι φυσαλίδες είναι σχετικά μικρές και παραμένουν για μικρό χρονικό διάστημα, η αντλία χειρίζεται το μείγμα ως υγρό με μικρότερο ειδικό βάρος. Οι δείκτες πιέσεων (μανόμετρα) δείχνουν χαμηλότερες πιέσεις, καιτοι η αντλία αναπτύσσει το ίδιο πιεζομετρικό ύψος, όπως στην περίπτωση του καθαρού υγρού.

3.7.3. Σχήμα του στροφείου και δυνατότητες χειρισμού του αέρος

Το **Σχήμα 3.15** δείχνει την απόδοση μιας αντλίας 6 in. (διατομή αναρρόφησης) η οποία έχει ειδική ταχύτητα 2270 RPM (Αμερικάνικες Μονάδες) και χειρίζεται ένα μείγμα από αέρα και νερό. Τα ποσοστά που εμφανίζονται πλησίον κάθε καμπύλης υποδηλώνουν το ογκομετρικό ποσοστό του περιεχομένου σε ελεύθερο αέρα εντός του υγρού. Όταν το ογκομετρικό ποσοστό αυξήθηκε πάνω από 10%, η αντλία έχασε την αρχική της πλήρωση και σταμάτησε να παρέχει υγρό.

Παρόμοιες δοκιμές έγιναν με αντλία που είχε ειδική ταχύτητα περίπου 600. Σ' αυτή την περίπτωση, η αντλία έχασε την αρχική πλήρωσή της, σε ογκομετρικό ποσοστό αέρος 6%.

Αυτές οι δοκιμές τονίζουν τη σημασία της γεωμετρίας του στροφείου επί των δυνατοτήτων χειρισμού αέρος μιας φυγοκεντρικής αντλίας. Στο **Σχήμα 3.15**, βλέπουμε ότι μια αντλία που έχει ειδική ταχύτητα 600, έχει σχετικά μικρής διαμέτρου ομφαλό και είναι πολύ στενός. Ένας μικρός όγκος αέρος μπορεί να σταματήσει τελείως τη ροή υγρού σε μια τέτοια αντλία.



Σχήμα 3.15

Επίδραση της ειδικής ταχύτητας, της γεωμετρίας του στροφείου και της ταχύτητας ροής επί της αποδοτικότητας

Επιπρόσθετα, η απόσταση μεταξύ της ακτίνας του άκρου εισαγωγής και εξαγωγής είναι σχετικά μεγάλη. Αυτό δίδει στις φυγοκεντρικές δυνάμεις που αναπτύσσονται από τα πτερύγια, αρκετό χρόνο για να διαχωρίσουν τον αέρα από το υγρό.

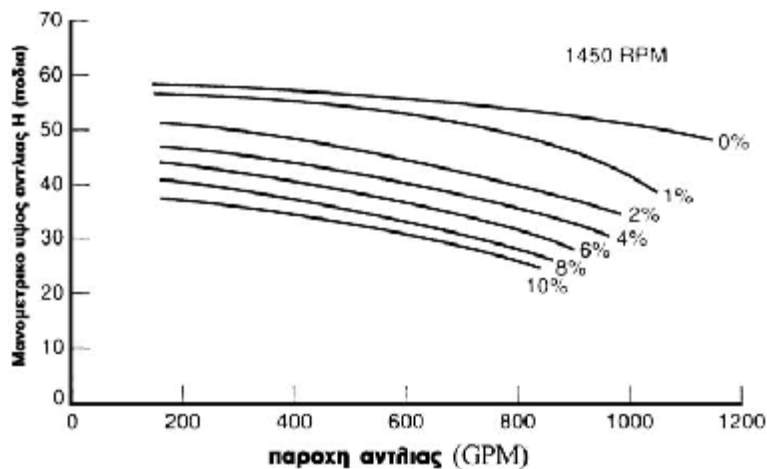
Κατ' αντίθεση, μια αντλία με ειδική ταχύτητα 2270 έχει αρκετά μεγαλύτερη διάμετρο ομφαλού και το στροφέιο της είναι χαρακτηριστικά πλατύτερο. Σε μια τέτοια αντλία, ένας χαρακτηριστικά μεγαλύτερος όγκος αερίου χρειάζεται για να σταματήσει τη ροή του νερού.

Η απόσταση μεταξύ της ακτίνας του άκρου εισαγωγής και εξαγωγής του στροφείου είναι επίσης χαρακτηριστικά μικρότερη. Έτσι, τα πτερύγια του στροφείου εμπλέκονται με το υγρό για μικρότερο χρονικό διάστημα.

Γενικά η δυνατότητα χειρισμού αέρος υπό ενός στροφείου μειώνεται με την ειδική ταχύτητά τους. Για παράδειγμα, ένα στροφέιο αξονικής ροής είναι ικανό να χειρισθεί μίγμα υγρού -αέρος, εφόσον ικανή ποσότητα υγρού υπάρχει εντός των πτερυγίων του στροφείου.

Τα στοιχεία που παρουσιάστηκαν στο **Σχήμα 3.16** και άλλες εκδόσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο για επίδειξη των επιπτώσεων από την παρουσία ελεύθερου αέρα μέσα στο υπό άντληση υγρό.

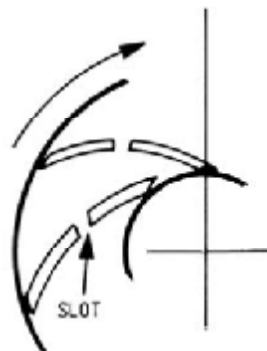
Σε πολλές περιπτώσεις, ειδικά όταν αέρας εισέρχεται στην αντλία υπό μορφή διαλύματος, τα αποτελέσματα εξαρτώνται πολύ από την θερμοκρασία και την πίεση του υγρού. Παρά τις εν λόγω δυσκολίες, είναι μερικές φορές χρήσιμο να επιτρέπουμε το μικρό ποσό από ελεύθερο αέρα να εισέλθει εντός του υπό άντληση υγρού. Για παράδειγμα, όταν μια αντλία υφίσταται κακομεταχείριση λόγω σπηλαίωσης, μια μικρή ποσότητα από αέρα δημιουργεί ένα προστατευτικό φαινόμενο, έτσι ώστε να μειωθεί η σφοδρότητα του ξεσπάσματος των φυσαλίδων που εκρήγνυνται.



Σχήμα 3.16

Η επίδραση του ελεύθερου αέρα του υγρού ,επί της απόδοσης μιας αντλίας 6 in. που έχει ειδική ταχύτητα 2270 RPM (στροφές το λεπτό), GPM (Γαλόνια ανά λεπτό).

Σύμφωνα με τον Furukawa (1988 & 1991), εάν τα “περάσματα” μεταξύ των πτερυγίων του στροφείου είναι πολύ μακρύτερα, επιτυγχάνεται καλύτερος χειρισμός του αερίου. Ο Furukawa (1988 & 1991) με την εργασία του όπου, χρησιμοποιώντας στροφείο με πτέρυγες διαδοχικά διατεταγμένες ή αλλιώς πτέρυγες με σχισμές (Σχήμα 3.17) κατάφερε να μειώσει αυτή την υποβάθμιση του μανομετρικού. Θα αναφέρουμε ότι έρευνες πάνω σε αυτό το θέμα, έγιναν από τους Kosmowski (1983), Murakami & Minemura (1974 ..1980) Hughes και Gordon (1986) και άλλους.



Σχήμα 3.17

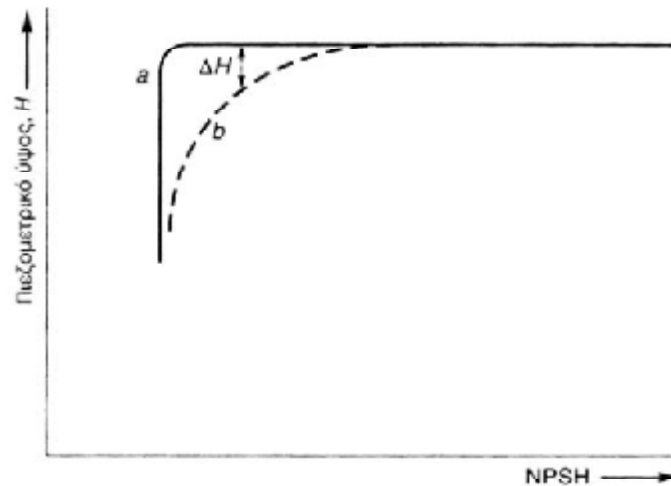
Στροφείο με σχισμές.

Σχεδιασμός με σκοπό την καλύτερη μεταχείριση του όγκου του αερίου που μπορεί να μεταφέρεται σε μια φυγοκεντρική αντλία.

3.7.4. Η επίδραση αέρος ή αερίου που συνοπορεύεται στο υγρό

Όταν η γραμμή αναρρόφησης δεν είναι αεροστεγής και η εσωτερική πίεση είναι χαμηλότερη της ατμοσφαιρικής πίεσης, αέρας εισέρχεται στην αντλία. Ο ρυθμός που αυτό συμβαίνει αυξάνεται με τη μείωση του διαθέσιμου καθαρού θετικού μανομετρικού (NPSH available). Αυξημένη διαρροή αέρος,

αυξάνει την πτώση ΔH του πιεζομετρικού ύψους που αναπτύχθηκε από την αντλία (Σχήμα 3.18). Κατά συνέπεια, το σχήμα της καμπύλης H- NPSH αλλάζει από α σε b.



Σχήμα 3.18
Η επίδραση του αέρος στην καμπύλη H- NPSH.

Αέρας στο υγρό που εισέρχεται στο στροφέιο θα φράξει τελείως τις διόδους, νωρίτερα από ό,τι σε γραμμή αναρρόφησης τελείως αεροστεγή.

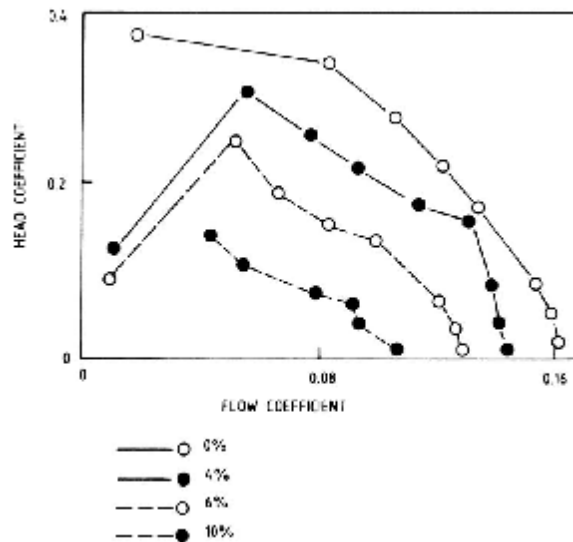
Αν και πάντα ελαττώνει το πιεζομετρικό ύψος που αναπτύσσεται από την αντλία, η παρουσία αέρα μπορεί να έχει ευεργετικές επιδράσεις στην παρουσία σπηλαιώσης. Όταν μια αντλία λειτουργεί υπό σπηλαιώση, μικρά ποσά αέρος ενεργούν ως μέσον ανακοπής - ανακούφισης, που ελαττώνουν τη μηχανική επίδραση των φυσαλίδων που εκρήγνυνται. Αυτό ελαττώνει την ζημιά που προκαλείται στα εξαρτήματα της αντλίας από σπηλαιώση. Επίσης ελαττώνει το θόρυβο και τις ταλαντώσεις. Ακόμα, ελεγχόμενες ποσότητες αέρος μερικές φορές οδηγούνται με πρόσθεση μέσα στην αντλία, η οποία πρέπει να, λειτουργήσει υπό συνθήκες σπηλαιώσης. Αυτό, όμως γίνεται μόνο σε ακραίες περιπτώσεις, όταν δεν υπάρχει άλλη εναλλακτική λύση.

Παρόμοιες επιδράσεις θα συμβούν όταν το αντλούμενο υγρό περιέχει διαλυμένο αέρα. Η διαλυτικότητα κάθε αερίου στο υγρό ελαττώνεται με ελαττωμένη πίεση. Χαμηλή διαθέσιμη, λοιπόν, NPSH απελευθερώνει μια αρκετή ποσότητα αερίων που είναι διαλυμένα στο υγρό στις χαμηλής πίεσεως ζώνες, της γραμμής αναρρόφησης και στροφέιου. Οι επιδράσεις είναι παρόμοιες με την διαρροή αέρος.

3.7.5. Άντληση μίγματος υγρού-αερίου

Με την παράκτια εξερεύνηση πετρελαίου και τις πετρελαιοπηγές, εμφανίστηκε άμεσα, ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην άντληση υγρών με υψηλή περιεκτικότητα σε αέριο, όπως και ενδιαφέρον έχει υπάρξει και παλιότερα στα αντλητικά συστήματα που εφοδιάζουν τους αεροστρόβιλους αεροσκαφών. Τα προβλήματα εγκαταστάσεων γεώτρησης πετρελαίου είναι αυστηρά πολυφασικά αλλά το ουσιαστικό πρόβλημα είναι ότι καθώς η περιεκτικότητα σε αέριο αυξάνεται το μονομετρικό

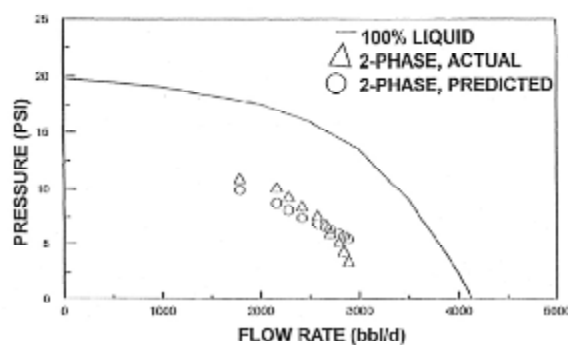
υποβιβάζεται, όταν χρησιμοποιείται ένας συνηθισμένος σχεδιασμός φυγοκεντρικής αντλίας, όπως διευκρινίζεται στο **Σχήμα 3.19**.



Σχήμα 3.19

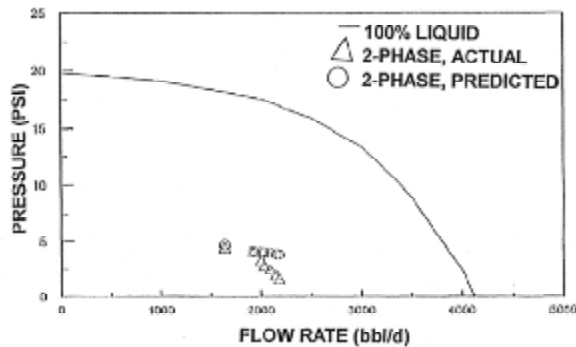
Σύγκριση της επίδρασης διαφόρων ποσοτών αέρα (από 0% έως 10% του συνολικού όγκου), στην χαρακτηριστική καμπύλη μανομετρικού-παροχής μιας αντλίας συμβατικού τύπου.

Στα **Σχήματα 3.20, 3.21 & 3.22** παρακάτω, φαίνονται και κάποια άλλα παραδείγματα της επίδρασης εισερχομένων αερίων στην χαρακτηριστική καμπύλη κάποιας φυγοκεντρικής αντλίας με κωδικό C-72, συγκεκριμένης γεωμετρίας. Τα παραδείγματα αυτά προέρχονται από μια πειραματική και θεωρητική μελέτη που είχε γίνει από τους Dr. Rajesh Sachdeva, Dr. D. Doty and Dr. Z. Schmidt με θέμα την διερεύνηση του φαινομένου της πολυφασικής ροής σε φυγοκεντρικές αντλίες, ειδικότερα κατά την άντληση πετρελαίου.



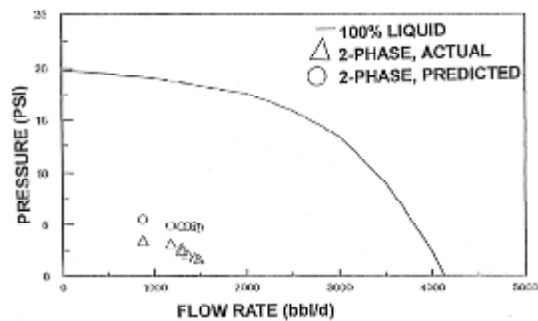
Dynamic Model Prediction (C-72): Pin = 300 psig, 19.83% gas

Σχήμα 3.20



Dynamic Model Prediction (C-72): Pin = 220 psig, 29.75% gas

Σχήμα 3.21



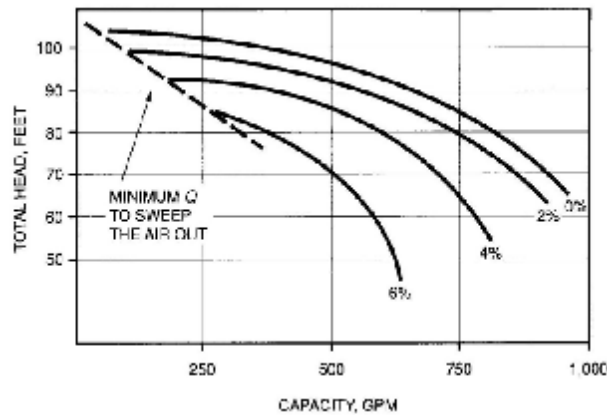
Dynamic Model Prediction (C-72): Pin = 410 psig, 49.58% gas

Σχήμα 3.22

3.7.6. Γενικότερη επίδραση αέρα ή κάποιων αερίων του αντλούμενου υγρού στα χαρακτηριστικά λειτουργίας της αντλίας

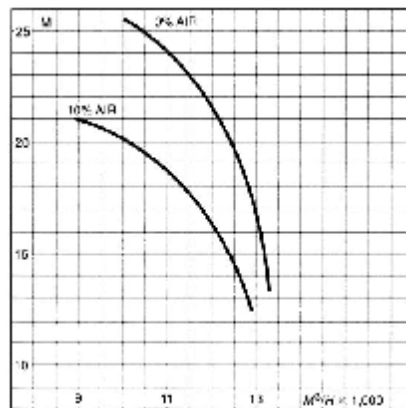
Στην περίπτωση που περισσότερο από το 1% του όγκου του αντλούμενου υγρού, είναι αέρας ή διάφορα αέρια, η χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας επηρεάζεται πολύ σημαντικά όπως μπορεί κανείς να διαπιστώσει από το παρακάτω **Σχήμα 3.23**. Καθώς το ποσοστό αυξάνεται, αυτό το δυσάρεστο αποτέλεσμα γίνεται όλο και πιο δραστικό, μέχρι στο ποσοστό του 6% του όγκου (για την συγκεκριμένη αντλία στην οποία αναφέρεται το **Σχήμα 3.23**) όπου φτάνουμε σε μια κατάσταση στην οποία η αντλία παύει να αποδίδει ικανοποιητικά.

Η παρουσία του αέρα ή των διαφόρων αερίων που μπορεί να βρίσκονται μέσα στο αντλούμενο υγρό δημιουργεί ένα αρκετά περίπλοκο φαινόμενο το οποίο αυτή την στιγμή δεν μπορεί να περιγραφεί από μια ακριβή μαθηματική σχέση η οποία θα μπορούσε να εφαρμοστεί ανεμπόδιστα σε οποιαδήποτε αντλία. Στο **Σχήμα 3.24**, επίσης μπορούμε να δούμε ένα άλλο παράδειγμα επίδρασης της παρουσίας αέρα στην απόδοση της αντλίας. Η επιδείνωση σε αυτή την περίπτωση φαίνεται να είναι λιγότερο σφοδρή από ότι στην περίπτωση του **Σχήματος 3.23**. Ο λόγος για αυτή την διαφορά είναι η επίδραση ενός μεγάλου αριθμού μεταβλητών στην γεωμετρική διαμόρφωση του στροφείου και του κελύφους για τις οποίες αναφερθήκαμε στην παράγραφο 3.7.3 και οι οποίες παίζουν ένα σημαντικό ρόλο στην έκταση της σφοδρότητας του φαινομένου. Αλλά η ακριβής σχέση μεταξύ σχεδιασμού και απόδοσης σε αυτή την περίπτωση ακόμη παραμένει άγνωστη.



Σχήμα 3.23

Επίδραση διαφόρων ποσοστών εισερχόμενου αέρα στην χαρακτηριστική καμπύλη φυγοκεντρικής αντλίας.

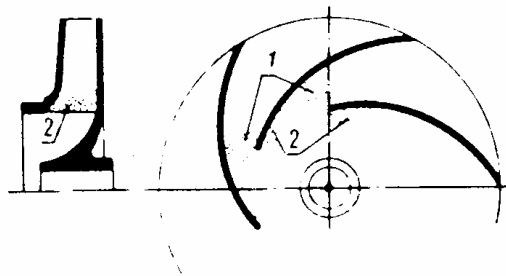


Σχήμα 3.24

Παράδειγμα επίδρασης εισερχόμενου αέρα στην απόδοση φυγοκεντρικής αντλίας.

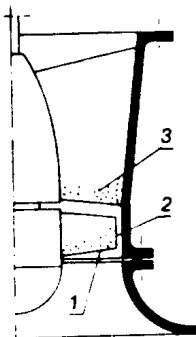
3.8. Θέσεις του πτερυγίου όπου εκδηλώνεται η σπηλαιώση

Στις φυγόκεντρες αντλίες οι περιοχές όπου υπάρχει κίνδυνος εκδήλωσης της κλασσικής σπηλαιώσης, είναι η πίσω μη ορατή πλευρά των πτερυγίων, κοντά στο χείλος εισόδου του υγρού (**Σχήμα 3.25 & Σχήμα 3.26**). Στις περιοχές αυτές η πίεση έχει τη μικρότερη τιμή λόγω της απότομης αύξησης της ταχύτητας ροής του υγρού. Επίσης η σπηλαιώση εμφανίζεται συχνά μεταξύ των πτερυγίων (**Σχήμα 3.25**). Όταν η σπηλαιώση είναι μεγάλης έκτασης μπορεί να φθαρούν, τα άκρα των πτερυγίων στην έξοδο, τα πτερύγια διαχύσεως και ο αγωγός του σπειροειδούς περιβλήματος. Σε κάποιες περιπτώσεις η σπηλαιώση, εκτείνεται από τα άκρα του πτερύγιου έως τα 2/3 του μήκους τους, πριν από το σημείο στο οποίο εκρήγνυνται οι φουσαλίδες.



Σχήμα 3.25

Εμφάνιση της σπηλαιώσεως σε φυγόκεντρο αντλία



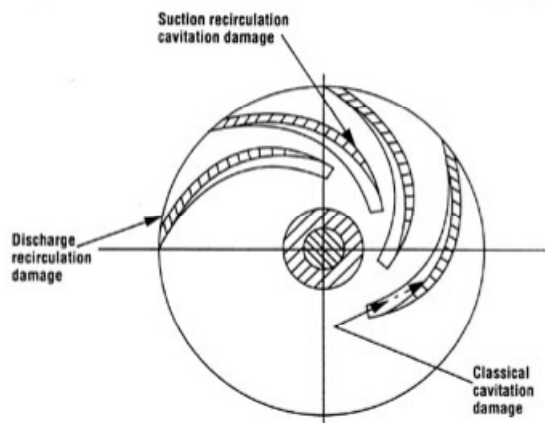
Σχήμα 3.26

Εμφάνιση της σπηλαιώσεως σε αντλία αξονικής ροής

Στην περίπτωση που η σπηλαιώση εμφανίζεται λόγω επανακυκλοφορίας, πρέπει να σημειώσουμε ότι η φθορά θα συμβεί στην αντίθετη πλευρά του πτερυγίου από αυτήν που εμφανίζεται η κλασσική σπηλαιώση (**Σχήμα 3.27**). Στην περίπτωση ανακυκλοφορίας στο άκρο του πτερυγίου η φθορά θα έχει εμφανιστεί στο ορατό άκρο εισόδου του πτερυγίου, πολύ κοντά στο κέλυφος στο σημείο Υ στο **Σχήμα 3.12**.

Αυτή η συνεχής ανακύκλωση του υγρού οδηγεί σε δημιουργία θορύβου, δονήσεων και διακυμάνσεις πίεσης. Αυτά τα συμπτώματα μοιάζουν με αυτά της κλασσικής σπηλαιώσεως, και έτσι η επανακυκλοφορία συχνά θεωρείται λανθασμένα σαν κλασσική μορφή σπηλαιώσεως.

Καθώς η ροή προς "μάτι" του στροφέιου επιστρέφει πίσω στον εαυτό της, ένας σφοδρός στροβιλισμός θα πραγματοποιηθεί. Αυτές οι δίνες μπορούν να περάσουν ακόμη και μέσω των υγρών καναλιών του στροφέιου για να αρχίσουν μια επανακυκλοφορία στην κατάθλιψη, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3.12** στο σημείο "Υ". Στην περίπτωση αυτή, η θέση όπου εκδηλώνεται η σπηλαιώση λόγω της επανακυκλοφορίας στην κατάθλιψη φαίνεται επίσης στο **Σχήμα 3.27**. Όσο πιο μακριά λειτουργεί η αντλία από το μέγιστο σημείο αποδοτικότητάς της (Best Efficiency Point or BEP), τόσο μεγαλύτερο το ποσό στροβιλισμού.



Σχήμα 3.27

Περιοχές φθοράς στο στροφέιο, λόγω της κλασσικής σπηλαιώσης και της σπηλαιώσης λόγω επανακυκλοφορίας.

3.9. Συχνοί λόγοι δημιουργίας σπηλαιώσης

Γενικώς οι προϋποθέσεις για την εμφάνιση της σπηλαιώσης είναι οι εξής:

- a) Η μικρή στατική πίεση σε σύγκριση με τη μέγιστη τάση των ατμών του υγρού που αντλείται. Αυτό συμβαίνει όταν το ύψος αναρροφήσεως είναι μεγάλο ή το στόμιο εισόδου στο σωλήνα αναρροφήσεως βρίσκεται σε μικρή απόσταση από την επιφάνεια του υγρού. Όσο μικρότερη είναι η στατική πίεση της ροής λόγω της υδροστατικής πίεσης και μόνον (δηλαδή σε σημεία με μεγάλη στάθμη ως προς την στάθμη αναφοράς) τόσο πιο εύκολα είναι η ανάπτυξη της σπηλαιώσης επειδή μικρή πτώση της στατικής πίεσης που οφείλεται στην κινητική ενέργεια του υγρού αρκεί για την διαμόρφωση συνθηκών σπηλαιώσης.
- b) Όταν η παροχή είναι μεγαλύτερη από την κανονική, η σπηλαιώση εμφανίζεται ευκολότερα γιατί αυξάνεται η ταχύτητα ροής με αντίστοιχη πτώση της πίεσεως.
- c) Από κινηματική άποψη το σχήμα των γραμμών ροής επηρεάζει την εμφάνιση της σπηλαιώσης. Απότομη αλλαγή της διεύθυνσεως ροής, απότομη διεύρυνση των διόδων ροής μέσα στην αντλία κακές συνθήκες εισόδου του υγρού στην πτερωτή είναι δυνατό να προκαλέσουν μεγάλες απώλειες και σπηλαιώση.

3.10. Γενικά συμπτώματα σπηλαιώσης

1. **Θόρυβος:**
Προκαλείται από την πρόσκρουση του υγρού στις μεταλλικές επιφάνειες κατά την απότομη συμπύκνωση των φυσαλίδων.
2. **Κραδασμοί της αντλίας**
Είναι φανερό ότι οι διαδοχικές αυξομειώσεις της πίεσεως του υγρού προκαλούν κραδασμούς, που μεταφέρονται σε όλα τα εξαρτήματα της αντλίας ακόμη και στη βάση στηρίξεώς της. Οι

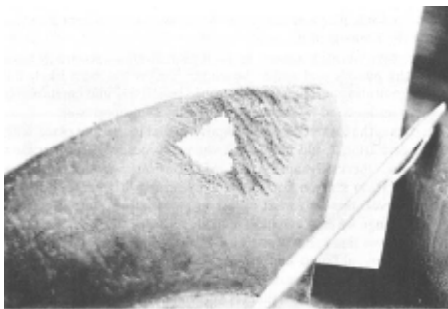
κραδασμοί αυτοί προκαλούνται από τις ταλαντώσεις των τμημάτων στα οποία προσκρούει το υγρό. Όσο μεγαλύτερη είναι η αντλία τόσο πιο έντονοι είναι οι θόρυβοι και οι κραδασμοί.

3. Φθορά των μεταλλικών επιφανειών

Πολλές φορές έχει μεγάλη έκταση ιδίως όταν το υγρό περιέχει διαβρωτικές ουσίες (οξυγόνο ή οξέα). Η φθορά που προέρχεται από τη σπηλαιώση διαφέρει μακροσκοπικά από τις συνήθεις διαβρώσεις των μετάλλων γιατί 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 λειάνσεως της επιφάνειάς τους. Από πειραματικά αποτελέσματα (Schroter, 1953) διαπιστώθηκε ότι τα διάφορα υλικά έχουν διαφορετικό βαθμό αντοχής στη σπηλαιώση. Η κατάταξή τους κατά σειρά αυξανόμενης ανθεκτικότητας είναι:

- Μόλυβδος
- Χυτοσίδηρος
- Ορείχαλκος
- Αλουμίνιο με Άνθρακα
- Ανοξείδωτο Ατσάλι

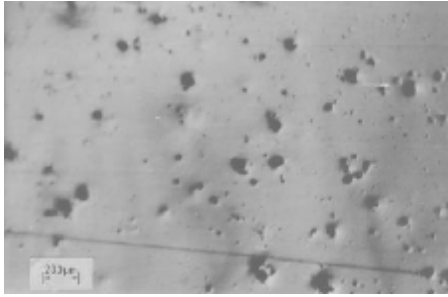
Στις παρακάτω εικόνες μπορούμε να διακρίνουμε τις συνέπειες του φαινομένου της σπηλαιώσης στην επιφάνεια των στροφείων :



Σχήμα 3.28



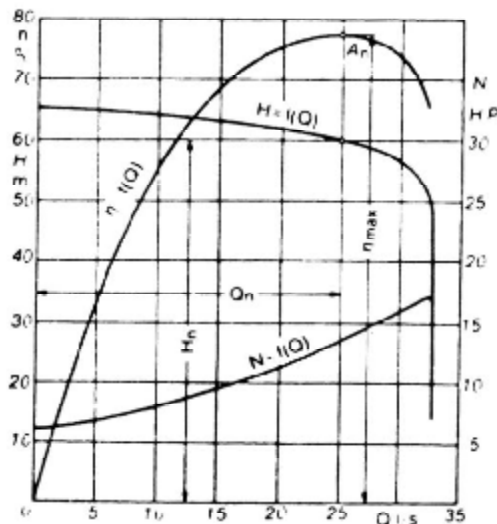
Σχήμα 3.29



Σχήμα 3.30

4. Απότομη πτώση των χαρακτηριστικών καμπυλών

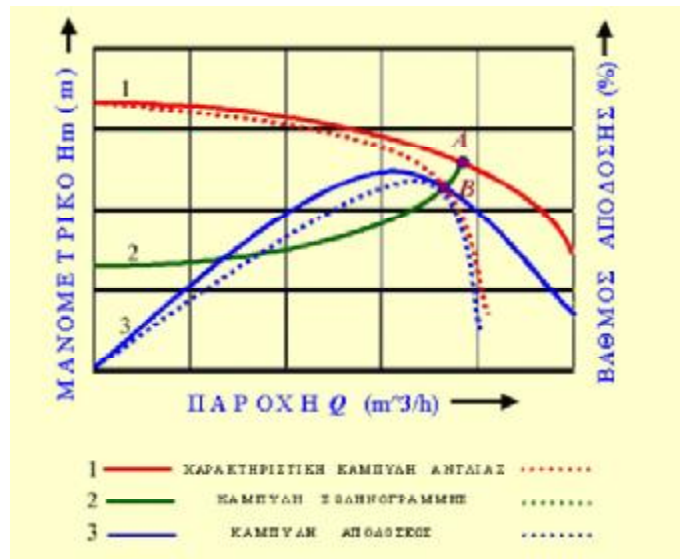
Γενικά οφείλεται στο ότι στη ζώνη σπηλαιώσης αυξάνονται οι τριβές και οι υδραυλικές απώλειες. Εξαρτάται από διάφορους παράγοντες και κυρίως από την ειδική ταχύτητα της αντλίας. Στις φυγόκεντρες αντλίες με μικρή ειδική ταχύτητα (< 30) η πτώση των χαρακτηριστικών καμπυλών είναι πιο έντονη. Στο **Σχήμα 3.31**, η σπηλαιώση εκδηλώνεται σε παροχή 32,5lit/s.



Σχήμα 3.31

Χαρακτηριστικές καμπύλες μονοβάθμιας φυγοκέντρου αντλίας, όπου εκδηλώνεται σπηλαιώση

Στο παρακάτω **Σχήμα 3.32** φαίνεται ένα επίσης γενικό παράδειγμα των επιπτώσεων του φαινομένου της σπηλαιώσης σε φυγόκεντρική αντλία. Με συνεχείς γραμμές εμφανίζονται οι καμπύλες πριν την σπηλαιώση ενώ με διακεκομμένες μετά την εμφάνιση του φαινομένου της σπηλαιώσης.



Σχήμα 3.32

Χαρακτηριστικές καμπύλες μονοβάθμιας φυγοκέντρου αντλίας, όπου εκδηλώνεται σπηλαιώση

Ενότητα 4 Προσαρμογή πειραματικής διάταξης στο εργαστήριο

Η πειραματική διάταξη που ήταν διαθέσιμη δεν ήταν έτοιμη για χρήση για την πειραματική διαδικασία. Κάποιοι από τους σωλήνες ήταν ραγισμένοι, τα μεταλλικά στηρίγματα των σωλήνων δεν είχαν «μαξιλαράκια» για την απορρόφηση κρουστικών δυνάμεων, έλλειψη μετρητικών οργάνων κ.α.



- Το πρώτο βήμα ήταν η αποσυναρμολόγηση της πειραματικής διάταξης για την αντικατάσταση των ελαττωματικών εξαρτημάτων, όπως οι ακριλικοί σωλήνες.





- Λόγω των κραδασμών που θα δημιουργηθούν κατά την λειτουργία της πειραματικής διάταξης, υπήρχε φόβος ότι τα μεταλλικά στηρίγματα θα προκαλέσουν ρωγμές στους σωλήνες, για τον λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε λάστιχο που ενσωματώθηκε στα στηρίγματα.

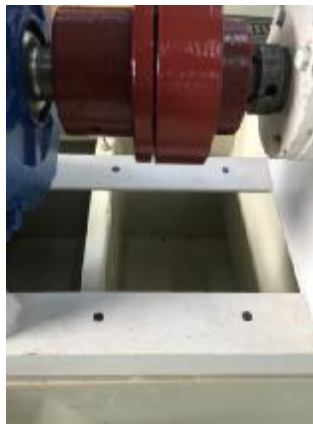


- Το επόμενο βήμα ήταν το κάλυμμα του κόμπλερ που συνδέει την αντλία με τον κινητήρα.





- Για να βιδωθεί το κάλυμμα στην βάση της πειραματικής διάταξης χρειάστηκε να τρυπηθεί η βάση.



- Με την χρήση βιδών M8x25mm, παξιμαδιών M8 και ροδελών M8 στερεώθηκε το κάλυμμα του κόμπλερ επάνω στην πειραματική διάταξη.



- Η επόμενη εργασία ήταν η αφαίρεση των ραγισμένων ακρυλικών σωλήνων από τις PVC γωνίες και συμπλέγματα χρησιμοποιώντας διαλυτικό.



- Με την χρήση ειδικού συγκολλητικού, για την αποφυγή απωλειών, οι νέοι σωλήνες ενσωματώθηκαν στις PVC γωνίες.





- Αφού το ειδικό συγκολλητικό είχε στεγνώσει, οι σωλήνες τοποθετήθηκαν στην πειραματική διάταξη.
- Μετά την ολοκλήρωση των σωληνώσεων, σειρά είχε η κατασκευή πίνακα για τον έλεγχο των στροφών της αντλίας.
- Αρχικά κατασκευάστηκε βάση για τον πίνακα.
 1. Βρέθηκαν τα κομμάτια της βάσης:

I. Το «πόδι»



II. Ο «κορμός»



III. Και η «πλάτη» που ο πίνακας θα στηρίζεται



2. Το επόμενο βήμα ήταν το τρύπημα του «ποδιού» και η ενσωμάτωση πριτσινιών M10 για να στηριχτεί ο κορμός και από κάτω για να τοποθετηθούν στηρίγματα.



3. Για να έχουμε καλύτερη σταθερότητα στο σύστημα συγκολλήθηκαν στον «κορμό» επιπλέον στηρίγματα.



4. Το επόμενο βήμα ήταν η ενσωμάτωση της «πλάτης» στον «κορμό».



5. Ένωση «κορμού» με «πόδι».



- Έπειτα καλωδιώθηκε ο κινητήρας με καλώδιο 4Χ2.5 OLFEX-110CY (3m):



- Η κατασκευή του πίνακα ακολούθησε:

1. Αρχικά η προετοιμασία του «κουτιού» του πίνακα.



- i. Τρύπημα του «κουτιού» στα κατάλληλα σημεία για την εισαγωγή των καλωδίων.



- ii. Τρύπημα εμπρός όψης του «κουτιού» και ενσωμάτωση του ποτενσιόμετρου, του χειριστηρίου του πίνακα και των λαμπτήρων.



2. Βάση στήριξης εξαρτημάτων πίνακα.



i. Ενσωμάτωση εξαρτημάτων στη βάση και καλωδίωση τους.



3. Τοποθέτηση εξαρτημάτων στο «κουτί» του πίνακα.



4. Σύνδεση ποτενσιόμετρου, χειριστηρίου του πίνακα και των λαμπτήρων με τα εξαρτήματα του πίνακα.



5. Ενσωματώθηκε προσωρινή τριφασική μπρίζα για να γίνει έλεγχος της σωστής λειτουργίας του πίνακα, ο πίνακας λειτουργούσε σωστά.

- Ενσωμάτωση της τριφασικής βιομηχανικής μπρίζας στον «κορμό» της βάσης.



- Βίδωμα πίνακα στη βάση.



- Παρατηρήθηκε ότι η θέση της τριφασικής βιομηχανικής μπρίζας πάνω στον «κορμό» δεν βολεύει με την καλωδίωση, άρα αποφασίστηκε να τοποθετηθεί στην δεξιά πλευρά του «κουτιού» του πίνακα.

1. Τοποθέτηση της βάσης της τριφασικής βιομηχανικής μπρίζας στην πλάγια πλευρά του «κουτιού».



2. Τρύπημα πλευράς για την εισχώρηση καλωδίου και ενσωμάτωση σπιράλ για αποφυγή θραύσης του καλωδίου.



3. Ενσωμάτωση της τριφασικής βιομηχανικής μπρίζας στη βάση της μετά την καλωδίωσή της με τον πίνακα.



4. Τέλος ενσωματώθηκε τριφασική βιομηχανική αρσενική μπρίζα στον πίνακα ώστε ο πίνακας να τροφοδοτείται με ρεύμα.



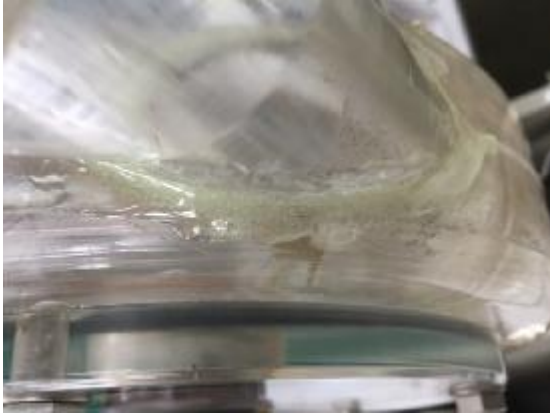
- Το επόμενο βήμα ήταν η σύνδεση του πίνακα με την πειραματική διάταξη και ενεργοποίηση της για έλεγχο σωστής λειτουργίας. Κατά την λειτουργία της αντλίας διαπιστώθηκε ότι έχουμε απώλειες νερού στην έξοδό της.



- Για να αποφευχθεί η απώλεια νερού χρειάστηκε να χρησιμοποιηθεί εποξειδική κόλλα για την στεγανοποίηση του σημείου που είχαμε την απώλεια.



- Αφού στερεοποιήθηκε η κόλλα ενεργοποιήθηκε ξανά η πειραματική διάταξη για να ελεγχθεί αν υπάρχουν ακόμα απώλειες νερού. Η στεγανοποίηση ήταν επιτυχής.



- Το επόμενο βήμα ήταν η ενσωμάτωση κενόμετρου και μανόμετρου στην είσοδο και έξοδο της αντλίας, αντίστοιχα, για την εύρεση των πιέσεων στην είσοδο και έξοδο της αντλίας.



- Το επόμενο εξάρτημα που χρειάζεται να ενσωματωθεί είναι το παροχόμετρο.



- Λόγω των προδιαγραφών του παροχόμετρου για να ληφθούν σωστές μετρήσεις, χρειάστηκε να αναπτύξουμε την σωλήνωση στην έξοδο της αντλίας.



- Για την λειτουργία του παροχόμετρου και την καταγραφή των μετρήσεων χρειάστηκε να κατασκευαστεί ένας νέος πίνακας,



- Με αυτές τις τελευταίες αναβαθμίσεις η πειραματική διάταξη είναι έτοιμη για την καταγραφή των μετρήσεων του πειράματος.

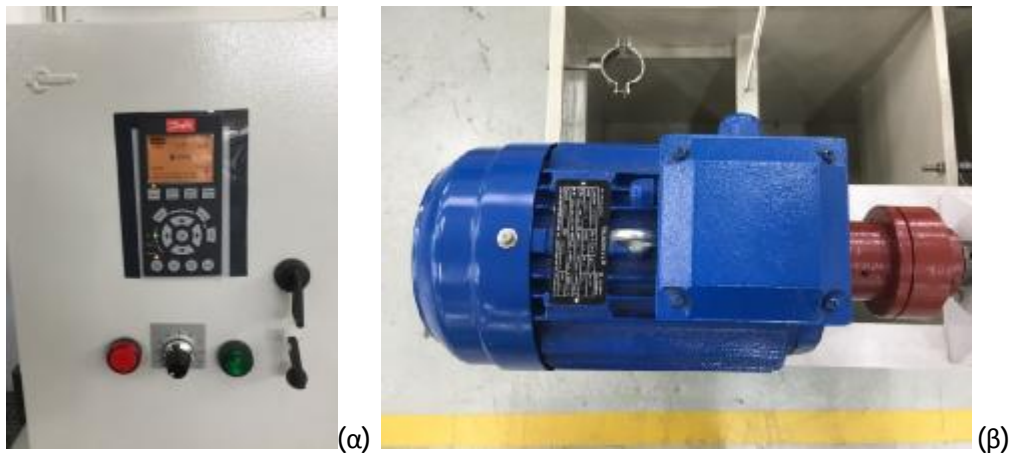


Ενότητα 5 Πειραματική διαδικασία και μετρήσεις

Σε αυτή την ενότητα θα δούμε την λειτουργία της πειραματικής διάταξης και τις πειραματικές τιμές που πάρθηκαν.

5.1 Λειτουργία της πειραματικής διάταξης

Χρησιμοποιώντας τον γενικό πίνακα (Σχήμα 5.1(α)) της πειραματικής διάταξης μπορούμε να ελέγξουμε την ταχύτητα περιστροφής της αντλίας αλλάζοντας την τιμή των Hz που προσφέρεται στον ηλεκτροκινητήρα (Σχήμα 5.1(β)) που περιστρέφει την αντλία.



(α)

(β)

Σχήμα 5.1

(α): ο πίνακας (β): ο ηλεκτροκινητήρας

Η τιμή που μπορούμε να δώσουμε σε Hz κυμαίνεται από 20 έως 50 Hz.

Χρησιμοποιώντας στροφόμετρο (Σχήμα 5.2) σε συνδυασμό με τον πίνακα μπορέσαμε να βρούμε τις τιμές των ταχυτήτων που αντιστοιχούν στην ανάλογες τιμές Hz, όπως φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα.



Σχήμα 5.2

Το στροφόμετρο

Hz	n (rpm)
20	1168
25	1458
30	1746
35	2039
40	2337
45	2635
50	2937

Πίνακας 5.1

Η διαδρομή του νερού μας ξεκινάει με την είσοδο του στον σωλήνα και συνεχίζει έως την πρώτη βάννα της πειραματικής μας διάταξης, (**Σχήμα 5.3**).



(α)



(β)

Σχήμα 5.3

(α): η αρχή της σωλήνωσης (β): η βαννα.1

Έπειτα το υγρό μας, λίγο πριν εισέλθει στην αντλία, περνάει από το κενόμετρο της πειραματικής διάταξης, δίνοντας μας την πίεση εισόδου (P_{in}) σε bar, (**Σχήμα 5.4**).



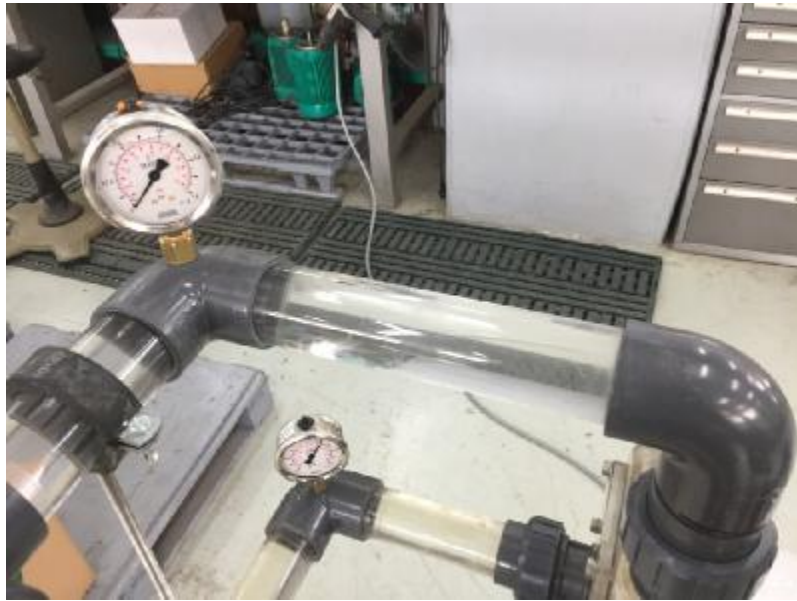
Σχήμα 5.4
Το κενόμετρο της πειραματικής διάταξης

Αφού το νερό περάσει από το κενόμετρο εισέρχεται στην αντλία, (Σχήμα 5.5).



Σχήμα 5.5
Η αντλία της πειραματικής διάταξης

Με την έξοδο από την αντλία το υγρό μας συναντά το μανόμετρο του πειράματος δίνοντας μας έτσι την πίεση στην έξοδο (Pout) της αντλίας σε bar, (Σχήμα 5.6).



Σχήμα 5.6

Η έξοδος της αντλίας και το μανόμετρο της πειραματικής διάταξης

Το νερό συνεχίζει την διαδρομή του μέσα από την σωλήνωση μέχρι που συναντά το παροχόμετρο, το οποίο μας δίνει την παροχή (Q) που διαπερνάει την σωλήνωση σε L/min μέσω ψηφιακού πίνακα, (Σχήμα 5.7).



(α)

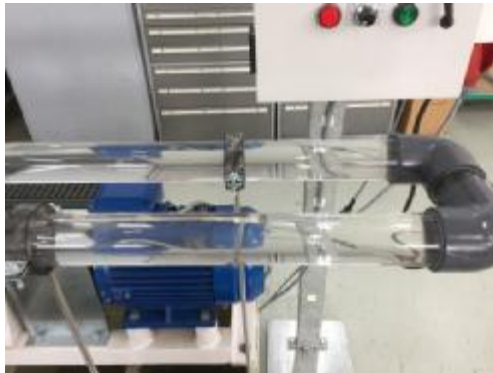


(β)

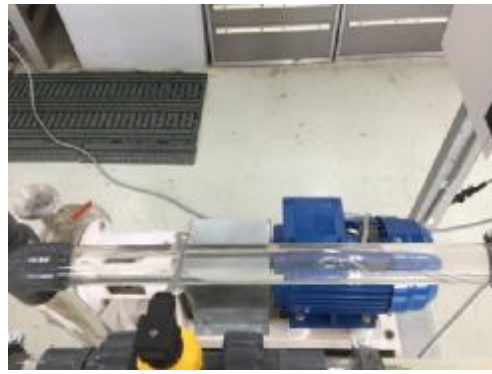
Σχήμα 5.7

(α): το παροχόμετρο (β): ο ψηφιακός πίνακας

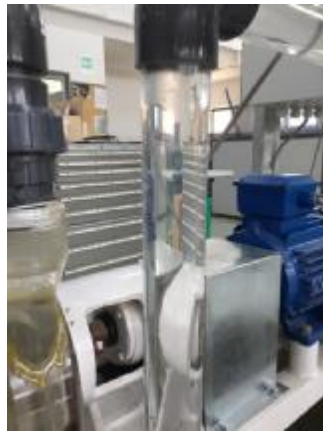
Τέλος, πριν το νερό φτάσει στην δεξαμενή κατάθλιψης περνάει μέσα από σωλήνωση και από την βάννα 2, (Σχήμα 5.8).



(α)



(β)



(γ)



(δ)

Σχήμα 5.8

(α),(β),(γ): η σωλήνωση μετά το παροχόμετρο (δ): η βανα.2

Κατά την αρχική λειτουργία της πειραματικής διάταξης, με βάνα 1 και 2 100% ανοιχτές, παρατηρήθηκε ότι εμφανίζονται φυσαλίδες σπηλαιώσης μέσα στην αντλία και στις σωληνώσεις. Ο λόγος για την ύπαρξη των φυσαλίδων είναι ότι ο όγκος υγρού που απαιτεί η αντλία για την σωστή λειτουργία της είναι μεγαλύτερος από τον όγκο που δέχεται στην είσοδο.

5.2 Οι πειραματικές μετρήσεις

Οι αρχικές πειραματικές μετρήσεις πάρθηκαν με αλλαγή της περιστροφικής ταχύτητας της αντλίας και αλλαγή του ποσοστού ανοίγματος των βανών 1 και 2.

Στα πειράματα μας έχουμε την πίεση σε bar, για να μπορέσουμε να την μετατρέψουμε σε μανομετρικό ύψος (m) χρησιμοποιούμε την παρακάτω σχέση:

$$H[m] = \Delta P[\text{bar}] * 10 = (P'_{out} - P'_{in}) * 10 \quad (5.1)$$

Όπου: $P'_{out} = 1[\text{bar}] + P_{out}$ (5.2) και $P'_{in} = 1[\text{bar}] + P_{in}$ (5.3)

Όπου: P_{out} : οι μετρήσεις στην έξοδο της αντλίας με το μανόμετρο και P_{in} : οι μετρήσεις στην είσοδο της αντλίας με το κενόμετρο.

Αν αντικαταστήσουμε τις 5.2 και 5.3 στην 5.1 τότε θα έχουμε:

$$H[m] = \Delta P[\text{bar}] * 10 = (1 + P_{out} - 1 - P_{in}) * 10 = (P_{out} - P_{in}) * 10 \quad (5.4)$$

Την παροχή την λαμβάνουμε σε L/min, για να το μετατρέψουμε σε m³/h χρησιμοποιούμε την παρακάτω σχέση:

$$Q[L/min] = Q * \frac{60}{1000} [m^3/h] \quad (5.5)$$

Το στατικό (ή γεωμετρικό) ύψος H_{geo} της πειραματικής μας διάταξης είναι:

$$H_{geo} = 8.2[cm] \quad (5.6)$$

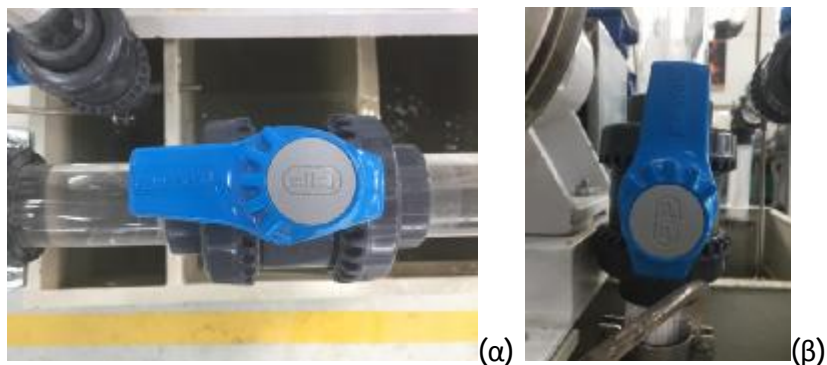
Η θερμοκρασία στην οποία έγινε το πείραμα ήταν $\Theta=25^\circ\text{C}$.

Παρακάτω ακολουθούν οι μετρήσεις μας ανάλογα την πειραματική περίπτωση.

5.2.1 Μετρήσεις με μεταβαλλόμενη ταχύτητα και σταθερό ποσοστό ανοίγματος των βανών 1 και 2

Στις παρακάτω πειραματικές περιπτώσεις κρατάμε το ποσοστό ανοίγματος των βανών σταθερό και μεταβάλλουμε την ταχύτητα περιστροφής της αντλίας.

5.2.1.1 Μετρήσεις με βάνα 1 και βάνα 2 100% ανοιχτές

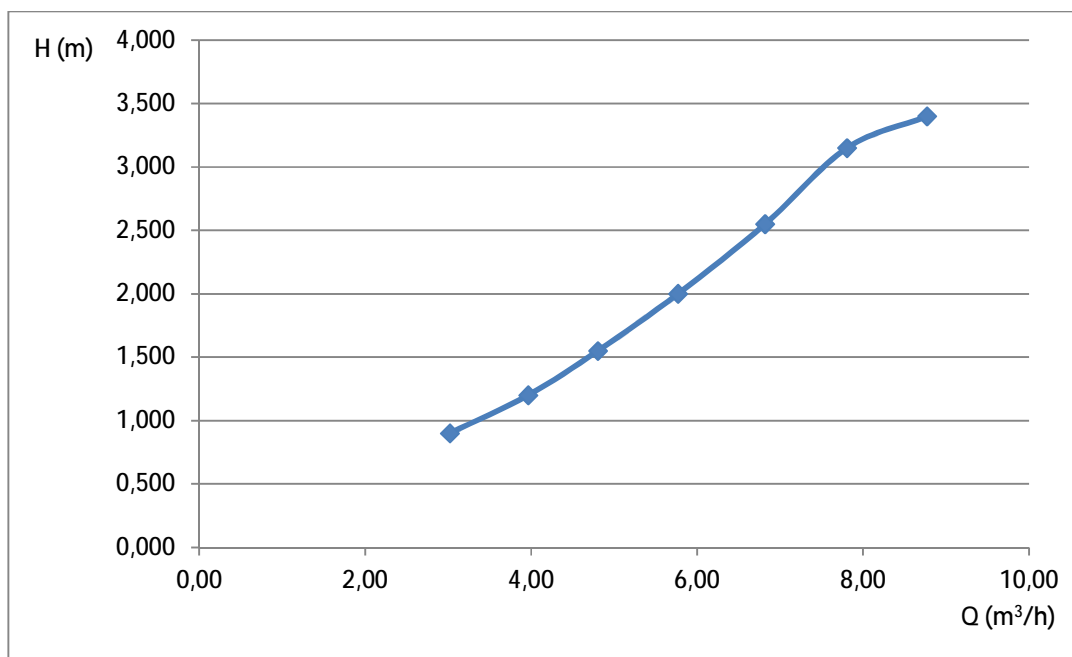


Σχήμα 5.9

(α): βάνα 1 100% (β): η βάνα.2 100%

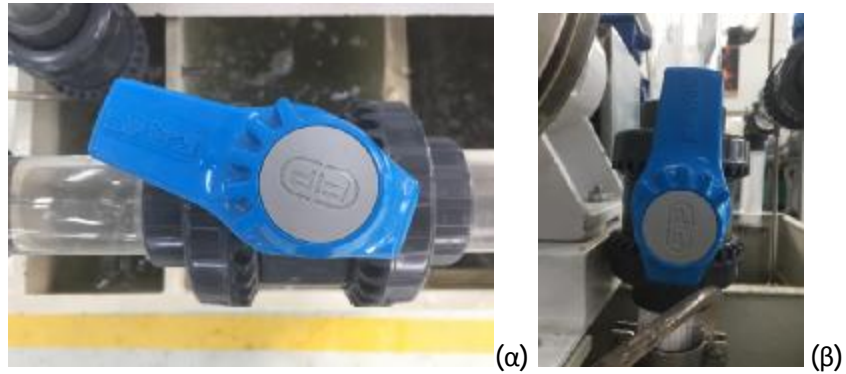
Hz	n (rpm)	Pin (bar)	H (m)	Q (L/min)	Q (m ³ /h)
20	1168	-0.090	0.900	50.36	3.02
25	1458	-0.120	1.200	66.09	3.97
30	1746	-0.155	1.550	80.08	4.80
35	2039	-0.200	2.000	96.17	5.77
40	2337	-0.255	2.550	113.66	6.82
45	2635	-0.315	3.150	130.10	7.81
50	2937	-0.340	3.400	146.18	8.77

Πίνακας 5.2



Διάγραμμα 5.1

5.2.1.2 Μετρήσεις με βάνα 1 75% και βάνα 2 100% ανοιχτές

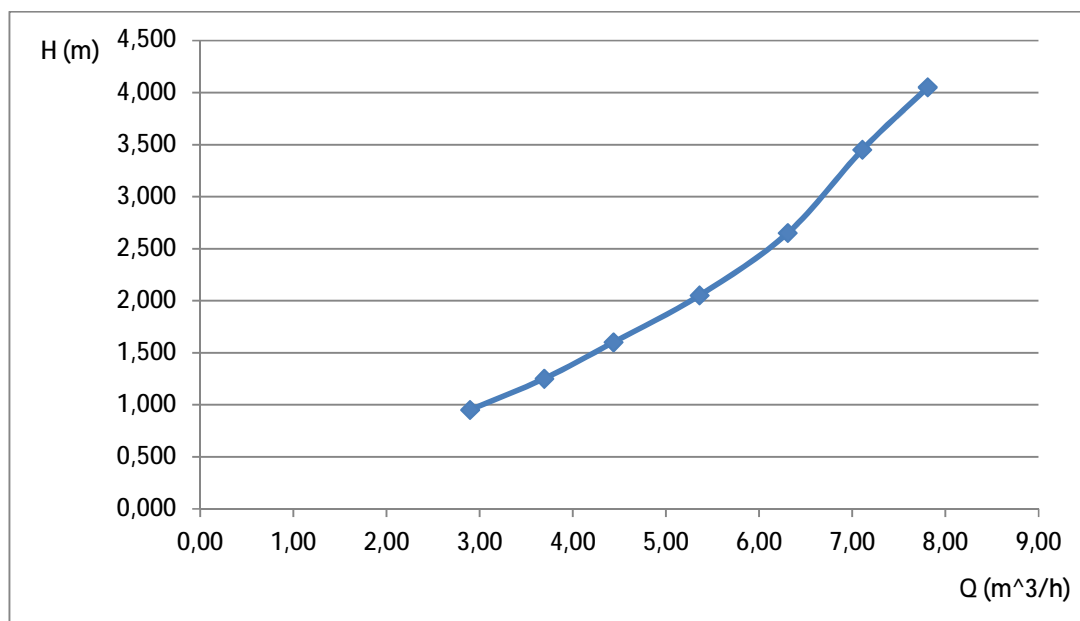


Σχήμα 5.10

(α): Βάνα 1: 75% (β): Βάνα 2: 100%

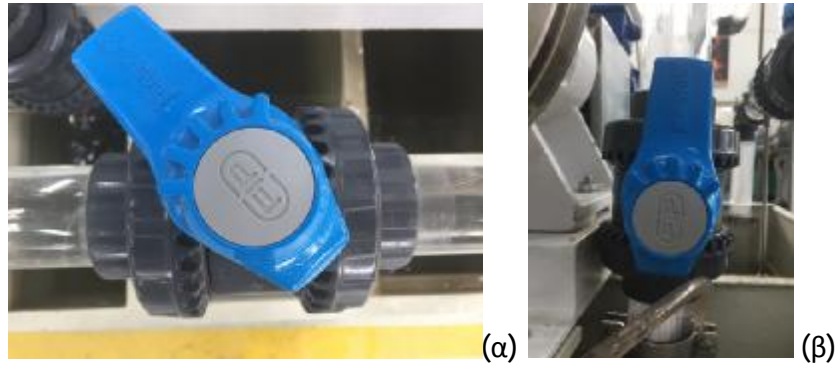
Hz	n (rpm)	Pin (bar)	H (m)	Q (L/min)	Q (m ³ /h)
20	1168	-0.095	0.950	48.26	2.90
25	1458	-0.125	1.250	61.55	3.69
30	1746	-0.160	1.600	73.94	4.44
35	2039	-0.205	2.050	89.32	5.36
40	2337	-0.265	2.650	105.11	6.31
45	2635	-0.345	3.450	118.45	7.11
50	2937	-0.405	4.050	130.14	7.81

Πίνακας 5.3



Διάγραμμα 5.2

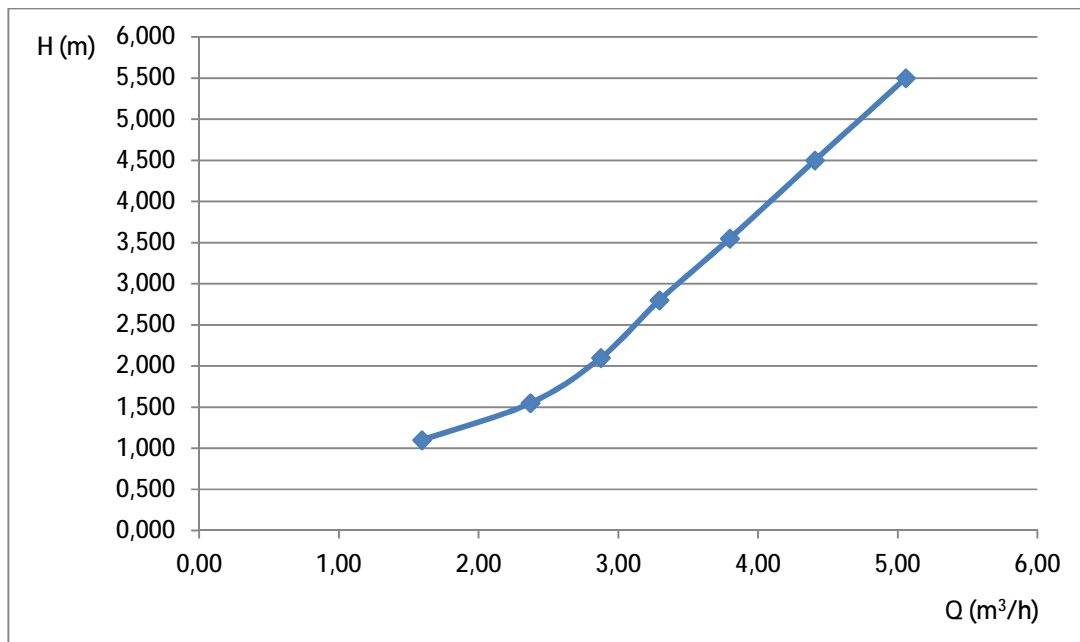
5.2.1.3 Μετρήσεις με βάνα 1 50% και βάνα 2 100% ανοιχτές



Σχήμα 5.11

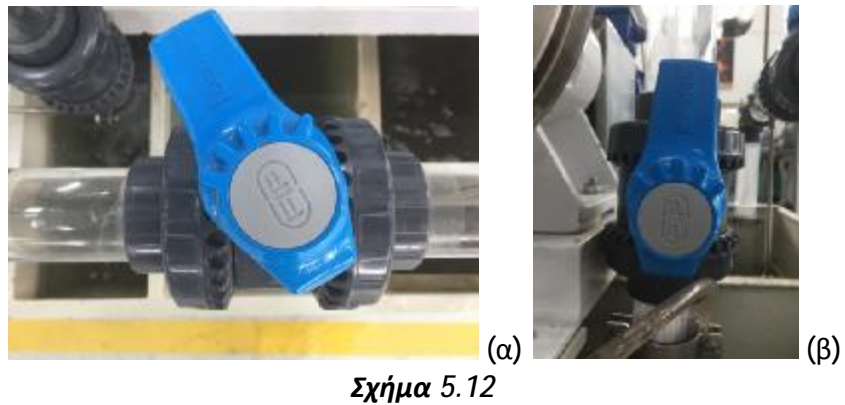
Hz	n (rpm)	Pin (bar)	H (m)	Q (L/min)	Q (m ³ /h)
20	1168	-0.110	1.100	26.57	1.59
25	1458	-0.155	1.550	39.51	2.37
30	1746	-0.210	2.100	47.91	2.87
35	2039	-0.280	2.800	54.90	3.29
40	2337	-0.355	3.550	63.30	3.80
45	2635	-0.450	4.500	73.44	4.41
50	2937	-0.550	5.500	84.28	5.06

Πίνακας 5.4



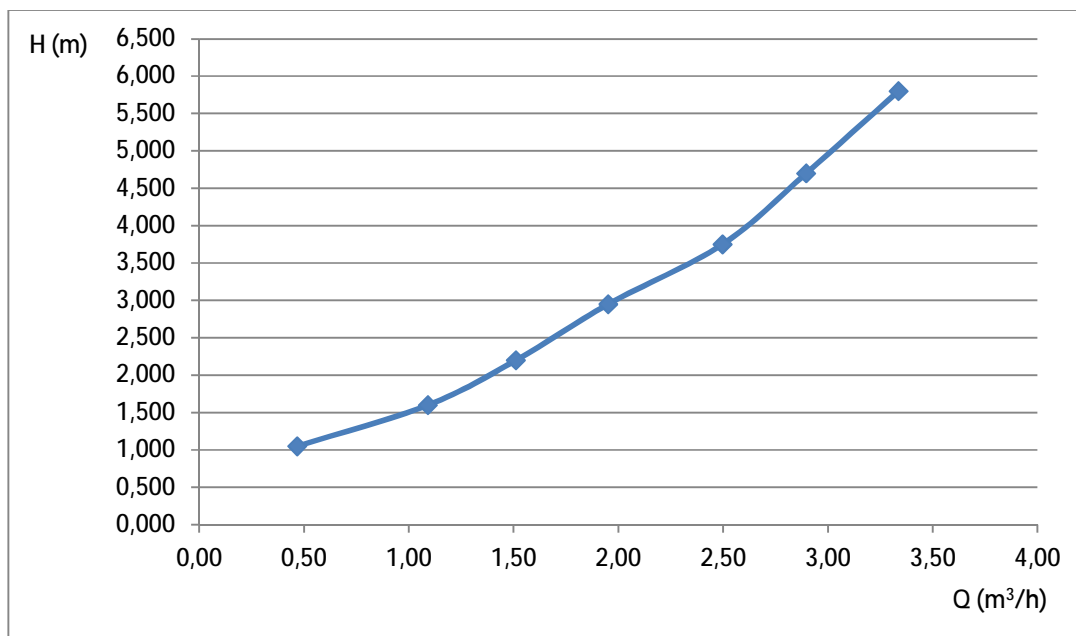
Διάγραμμα 5.3

5.2.1.4 Μετρήσεις με βάνα 1 25% και βάνα 2 100% ανοιχτές



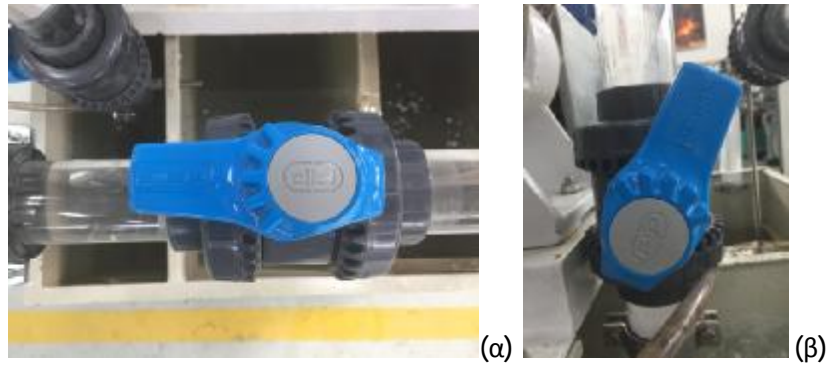
Hz	n (rpm)	Pin (bar)	H (m)	Q (L/min)	Q (m ³ /h)
20	1168	-0.105	1.050	7.79	0.47
25	1458	-0.160	1.600	18.18	1.09
30	1746	-0.220	2.200	25.18	1.51
35	2039	-0.295	2.950	32.52	1.95
40	2337	-0.375	3.750	41.61	2.50
45	2635	-0.470	4.700	48.26	2.90
50	2937	-0.580	5.800	55.60	3.34

Πίνακας 5.5



Διάγραμμα 5.4

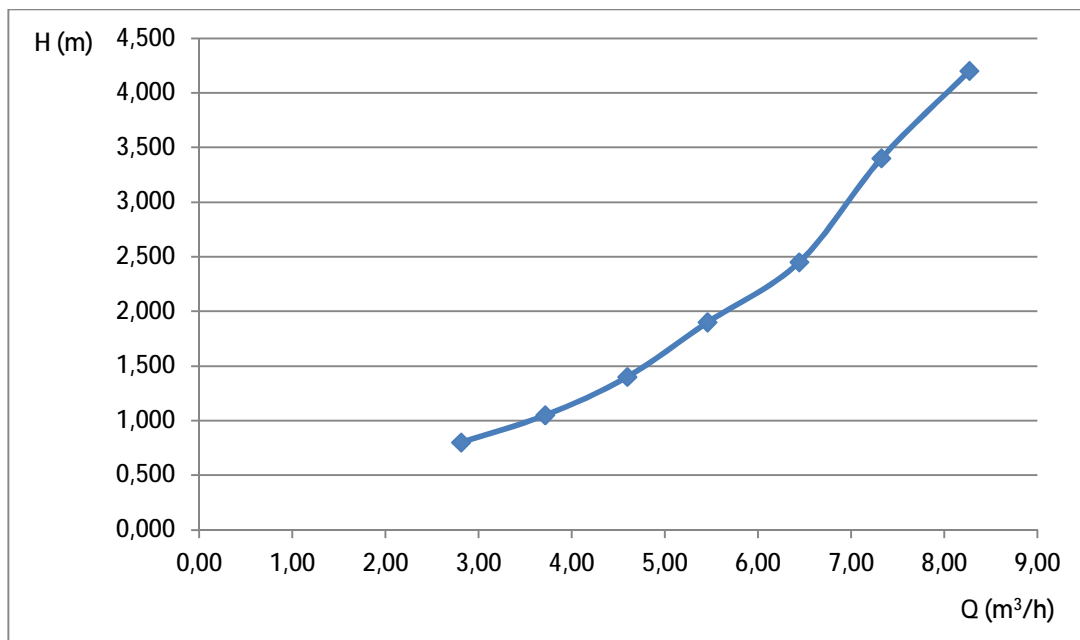
5.2.1.5 Μετρήσεις με βάνα 1 100% και βάνα 2 75% ανοιχτές



Σχήμα 5.13

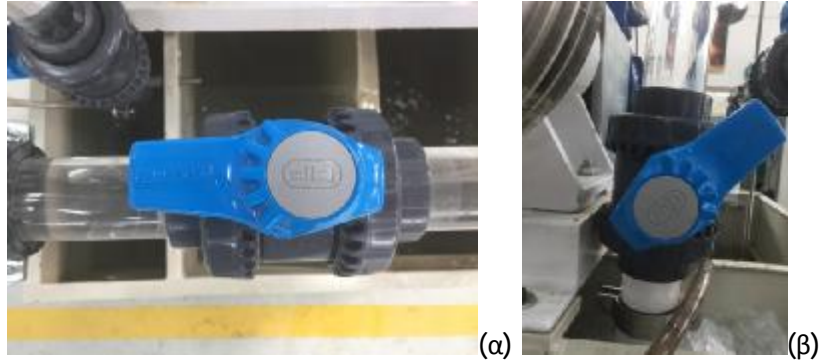
Hz	n (rpm)	Pin (bar)	Pout (bar)	H (m)	Q (L/min)	Q (m ³ /h)
20	1168	-0.080	0.000	0.800	46.86	2.81
25	1458	-0.105	0.000	1.050	61.90	3.71
30	1746	-0.140	0.000	1.400	76.59	4.60
35	2039	-0.190	0.000	1.900	90.93	5.46
40	2337	-0.235	0.010	2.450	107.36	6.44
45	2635	-0.290	0.050	3.400	122.05	7.32
50	2937	-0.350	0.070	4.200	137.79	8.27

Πίνακας 5.6



Διάγραμμα 5.5

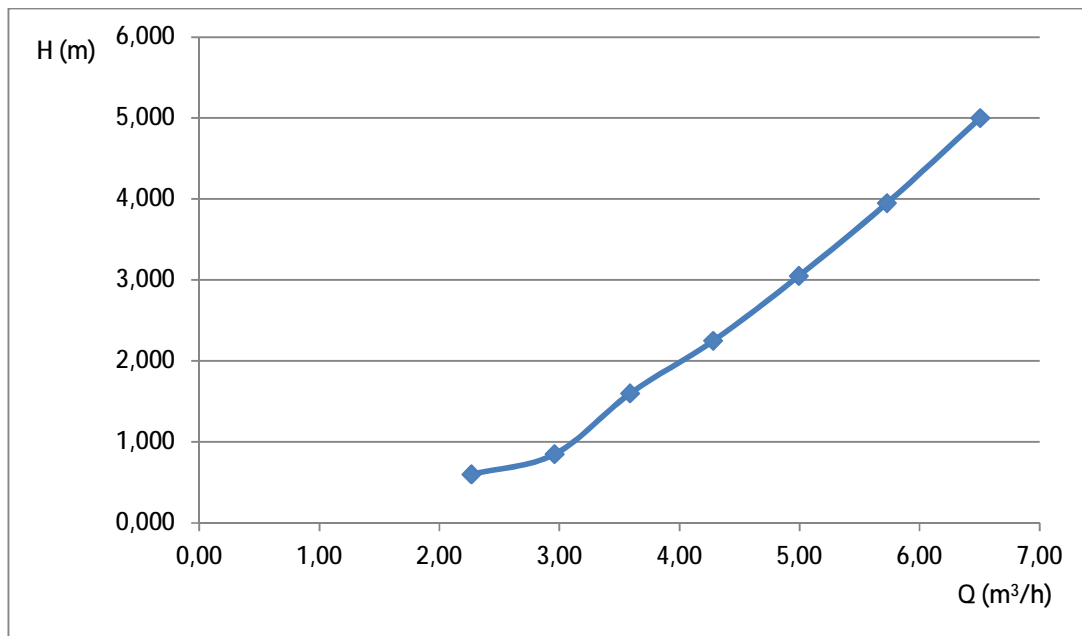
5.2.1.6 Μετρήσεις με βάνα 1 100% και βάνα 2 50% ανοιχτές



Σχήμα 5.14

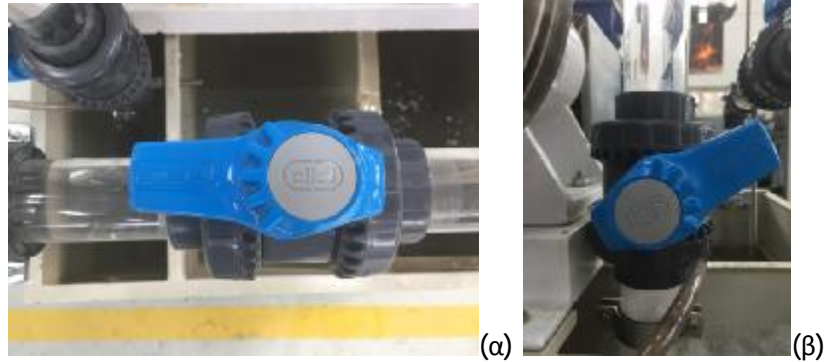
Hz	n (rpm)	Pin (bar)	Pout (bar)	H (m)	Q (L/min)	Q (m ³ /h)
20	1168	-0.060	0.000	0.600	37.77	2.27
25	1458	-0.080	0.005	0.850	49.31	2.96
30	1746	-0.100	0.060	1.600	59.80	3.59
35	2039	-0.125	0.100	2.250	71.34	4.28
40	2337	-0.155	0.150	3.050	83.23	4.99
45	2635	-0.195	0.200	3.950	95.47	5.73
50	2937	-0.240	0.260	5.000	108.41	6.50

Πίνακας 5.7



Διάγραμμα 5.6

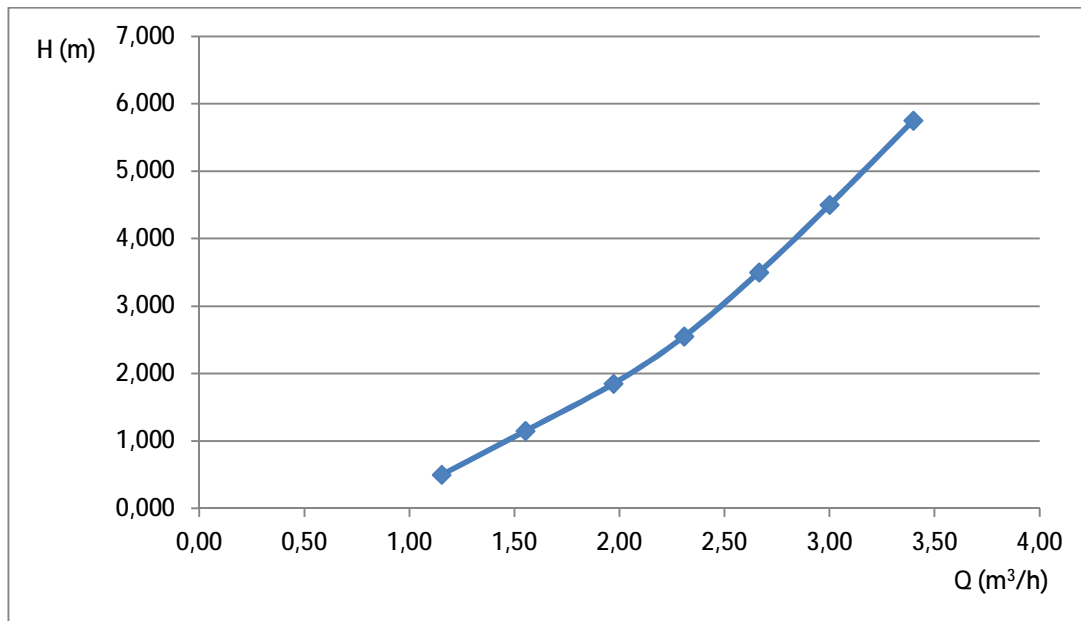
5.2.1.7 Μετρήσεις με βάνα 1 100% και βάνα 2 25% ανοιχτές



Σχήμα 5.15

Hz	n (rpm)	Pin (bar)	Pout (bar)	H (m)	Q (L/min)	Q (m ³ /h)
20	1168	-0.050	0.000	0.500	19.23	1.15
25	1458	-0.050	0.065	1.150	25.88	1.55
30	1746	-0.055	0.130	1.850	32.87	1.97
35	2039	-0.060	0.195	2.550	38.47	2.31
40	2337	-0.075	0.275	3.500	44.41	2.66
45	2635	-0.080	0.370	4.500	50.01	3.00
50	2937	-0.095	0.480	5.750	56.65	3.40

Πίνακας 5.8



Διάγραμμα 5.7

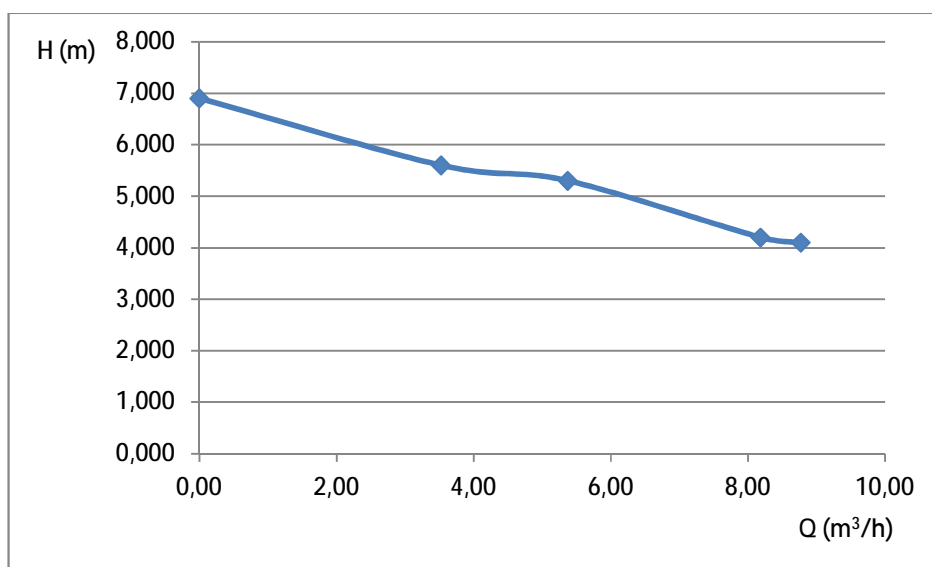
5.2.2 Μετρήσεις με σταθερή ταχύτητα και μεταβαλλόμενο άνοιγμα της βάνας 2

Στις παρακάτω πειραματικές περιπτώσεις κρατάμε την ταχύτητα περιστροφής της αντλίας σταθερή και μεταβάλλουμε το ποσοστό ανοίγματος της βάνας 2 από 0% έως 100%

5.2.2.1 Ταχύτητα $n=2937$

άνοιγμα βάνας	H (m)	Q (m ³ /h)
0%	6.900	0.00
25%	5.600	3.53
50%	5.300	5.37
75%	4.200	8.18
100%	4.100	8.77

Πίνακας 5.9

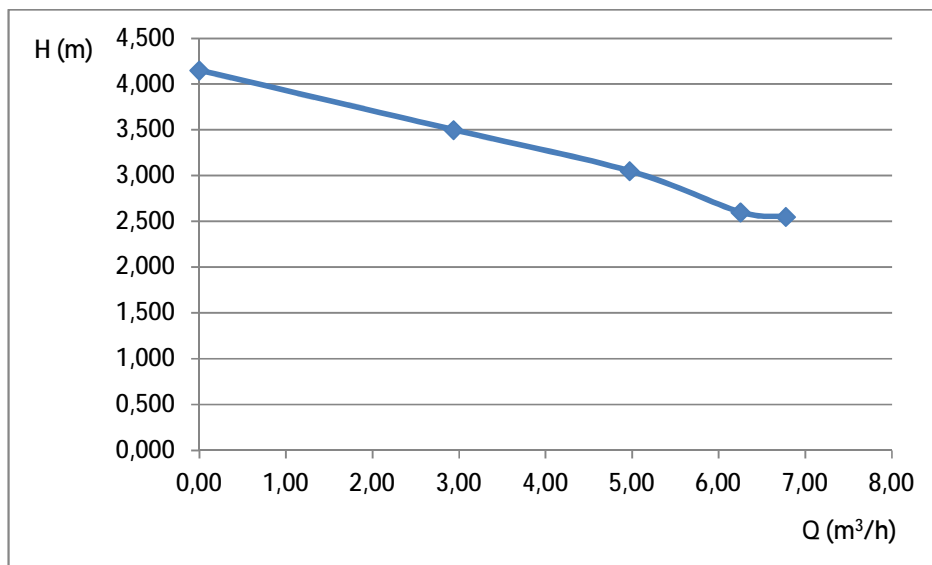


Διάγραμμα 5.7

5.2.2.2 Ταχύτητα $n=2337$

άνοιγμα βάνας	H (m)	Q (m ³ /h)
0%	4.150	0.00
25%	3.500	2.94
50%	3.050	4.97
75%	2.600	6.25
100%	2.550	6.78

Πίνακας 5.10

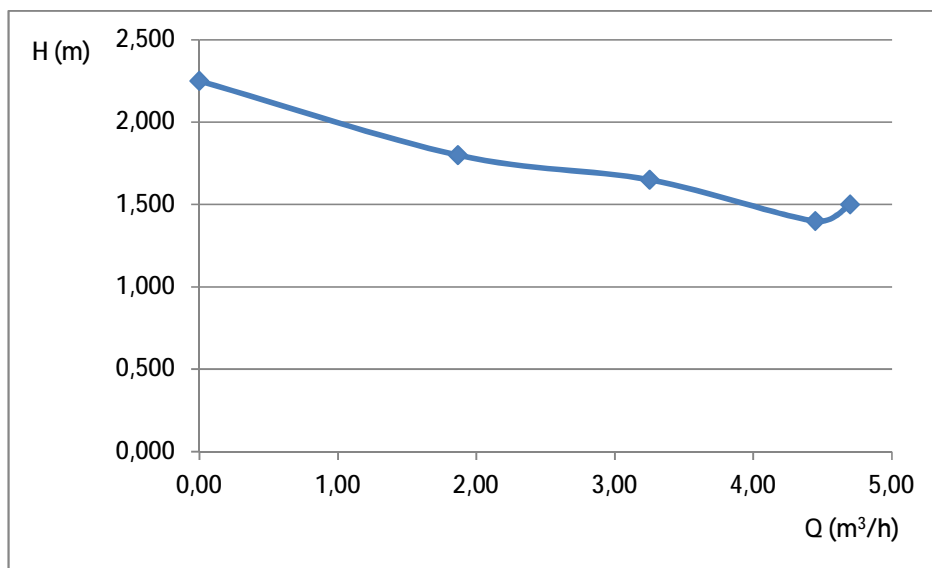


Διάγραμμα 5.8

5.2.2.3 Ταχύτητα $n=1746$

άνοιγμα βάνας	H (m)	Q (m ³ /h)
0%	2.250	0.00
25%	1.800	1.87
50%	1.650	3.25
75%	1.400	4.45
100%	1.500	4.70

Πίνακας 5.11

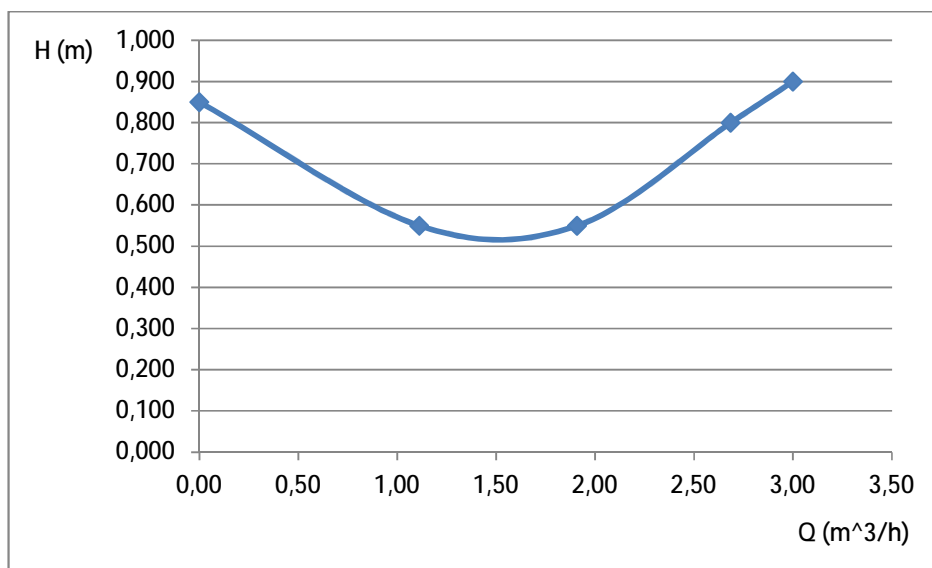


Διάγραμμα 5.9

5.2.2.4 Ταχύτητα $n=1168$

άνοιγμα βάννας	H (m)	Q (m ³ /h)
0%	0.850	0.00
25%	0.550	1.11
50%	0.550	1.91
75%	0.800	2.69
100%	0.900	3.00

Πίνακας 5.12



Διάγραμμα 5.10

5.3 Απώλειες

Οι απώλειες της πειραματικής διάταξης, ονομαζόμενες και πτώση πίεσης, υπολογίζονται παρακάτω.

5.3.1 Απώλειες λόγω των βανών

Για να βρεθεί η πτώση πίεσης που οφείλεται στις βάνες θα χρησιμοποιηθεί η ακόλουθη εξίσωση:

$$\Delta P_{\beta} = K * \frac{\rho * V^2}{2} \quad (5.7)$$

Όπου: **K**: ο συντελεστής αντίστασης της βάνας.

ρ : η πυκνότητα του νερού **1000 [Kgr/m³]**.

V: η ταχύτητα σε διατομή σωλήνα.

Οι δύο βάνες που έχουμε στην διάταξη μας είναι και οι δύο **Σφαιροειδείς** (globe valve), άρα ο συντελεστής **K** των βανών θα μας δίνεται από τον ακόλουθο πίνακα:

ποσοστό ανοίγματος βάνας	τιμή συντελεστή αντίστασης K
100%	9
75%	13
50%	36
25%	112

Πίνακας 5.13

(http://www.eng.auth.gr/~chemtech/foititika/eisxt/ergastirio/04_trives.pdf)

Για την εύρεση της πτώσης πίεσης χρειαζόμαστε και την ταχύτητα του ρευστού, αφού έχουμε την παροχή μπορούμε να βρούμε την ταχύτητα με τον παρακάτω τύπο:

$$V[m/s] = Q[m^3/h]/(A * 3600) \quad (5.8)$$

Όπου: **A**: το εμβαδόν επιφάνειας της διατομής του σωλήνα.

Η διάμετρος του σωλήνα είναι $D = 5cm$, αφαιρώντας το τοίχωμα του σωλήνα που είναι ίσο με $0.32cm$ μας μένει η πραγματική εσωτερική διάμετρος που είναι ίση με $d = 4.36cm$.

$$\text{Άρα το } A \text{ θα είναι: } A = \pi * \frac{d^2}{4} = 3.14 * \frac{4.36^2}{4} = 14.92cm^2 \text{ ή } 0.001492m^2 \quad (5.9)$$

Χρησιμοποιώντας τις 5.5 και 5.6 μπορούμε τώρα να βρούμε τις ταχύτητες για όλες τις περιπτώσεις για τις οποίες πήραμε μετρήσεις, όπως φαίνεται στους ακόλουθους πίνακες.

	β.1 100%	β.2 100%	β.1 75%	β.2 100%	β.1 50%	β.2 100%	β.1 25%	β.2 100%
Hz	Q (m ³ /h)	V (m/s)	Q (m ³ /h)	V (m/s)	Q (m ³ /h)	V (m/s)	Q (m ³ /h)	V (m/s)
20	3.02	0.563	2.90	0.539	1.59	0.297	0.47	0.087
25	3.97	0.738	3.69	0.688	2.37	0.441	1.09	0.203
30	4.80	0.895	4.44	0.826	2.87	0.535	1.51	0.281
35	5.77	1.074	5.36	0.998	3.29	0.613	1.95	0.363
40	6.82	1.270	6.31	1.174	3.80	0.707	2.50	0.465
45	7.81	1.453	7.11	1.323	4.41	0.820	2.90	0.539
50	8.77	1.633	7.81	1.454	5.06	0.941	3.34	0.621

Πίνακας 5.14α

	β.1 100%	β.2 75%	β.1 100%	β.2 50%	β.1 100%	β.2 25%
Hz	Q (m ³ /h)	V (m/s)	Q (m ³ /h)	V (m/s)	Q (m ³ /h)	V (m/s)
20	2.81	0.523	2.27	0.422	1.15	0.215
25	3.71	0.691	2.96	0.551	1.55	0.289
30	4.60	0.856	3.59	0.668	1.97	0.367
35	5.46	1.016	4.28	0.797	2.31	0.430
40	6.44	1.199	4.99	0.930	2.66	0.496
45	7.32	1.363	5.73	1.066	3.00	0.559
50	8.27	1.539	6.50	1.211	3.40	0.633

Πίνακας 5.14β

Μέσω των πινάκων 5.13, 5.14α και 5.14β και της εξίσωσης 5.4 μπορούν τώρα να βρεθούν οι απώλειες και των δύο βανών για κάθε πειραματική περίπτωση.

	β.1 100% β.2 100%	β.1 75% β.2 100%	β.1 50% β.2 100%	β.1 25% β.2 100%
Hz	ΔΡβ (Pa)	ΔΡβ (Pa)	ΔΡβ (Pa)	ΔΡβ (Pa)
20	2848.22	3196.89	1982.10	458.13
25	4905.39	5200.06	4382.85	2495.19
30	7201.96	7504.32	6444.58	4786.59
35	10386.80	10950.90	8462.27	7983.92
40	14508.34	15164.94	11249.93	13071.06
45	19008.90	19258.51	15142.85	17582.87
50	23998.18	23247.39	19943.04	23338.06

Πίνακας 5.15α

	β.1 100% β.2 75%	β.1 100% β.2 50%	β.1 100% β.2 25%
Hz	ΔΡβ (Pa)	ΔΡβ (Pa)	ΔΡβ (Pa)
20	3014.10	4005.31	2791.73
25	5259.37	6826.72	5056.43
30	8051.87	10040.25	8156.70
35	11349.24	14289.22	11172.74
40	15821.13	19449.22	14889.39
45	20446.93	25590.35	18881.17
50	26060.81	32997.50	24227.86

Πίνακας 5.15β

5.3.2 Απώλειες λόγω των σωλήνων

Για την εύρεση της πτώσης πίεσης που οφείλεται στους σωλήνες της διάταξης θα χρησιμοποιηθεί η ακόλουθη εξίσωση:

$$\Delta P_{\sigma} = f * \frac{L}{d} * \frac{\rho * V^2}{2} \quad (5.10)$$

Όπου: f : ο συντελεστής τριβής.

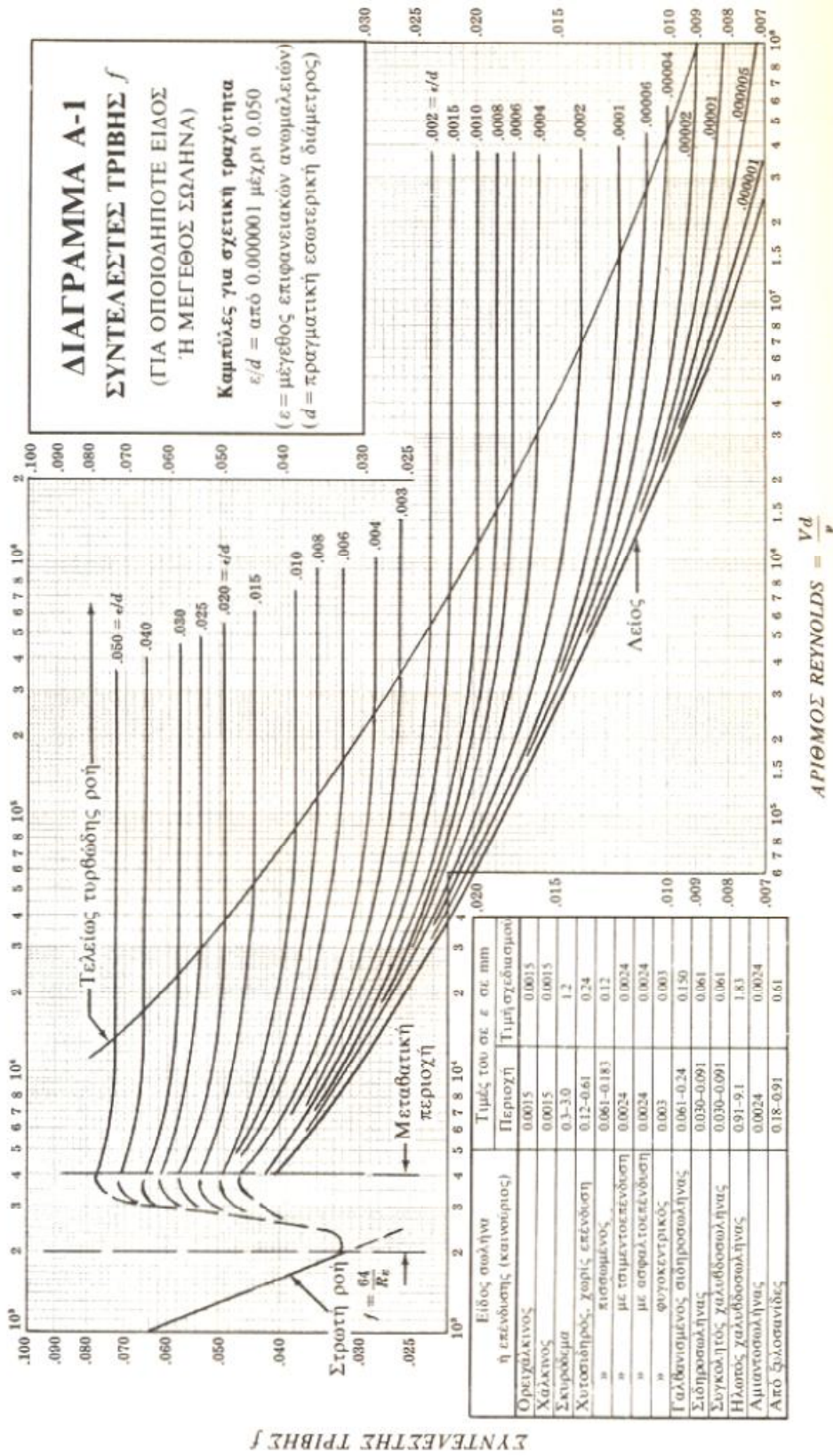
L : το ολικό μήκος σωλήνα.

d : η πραγματική εσωτερική διάμετρος.

V : η ταχύτητα σε διατομή σωλήνα.

ρ : η πυκνότητα του νερού **1000**[Kgr/m³].

Για να βρεθεί ο συντελεστής f χρειάζεται να χρησιμοποιηθεί το Διάγραμμα Moody.



Σχήμα 5.16
Διάγραμμα Moody

Από το σχήμα 5.16 βλέπουμε ότι για να βρεθεί ο συντελεστής τριβής πρέπει να βρεθεί και ο αριθμός Reynolds (Re).

Για να βρούμε τον αριθμό Re χρησιμοποιούμε την παρακάτω εξίσωση:

$$Re = \frac{V*d}{\nu} \quad (5.11)$$

Όπου: V: η ταχύτητα σε διατομή σωλήνα.

d: η πραγματική εσωτερική διάμετρος.

ν : ο λόγος ιξώδους και πυκνότητας $\frac{\mu}{\rho}$.

Γνωρίζουμε ότι το ιξώδες του νερού στους 25°C είναι ίσο με $\mu = 0.8903 [mPa * s]$ και η πυκνότητα $\rho = 1000 \left[\frac{Kgr}{m^3} \right]$, επομένως ο λόγος τους θα είναι:

$$\nu = 0.8903 * 10^{-6} \left[\frac{m^2}{s} \right] \quad (5.12)$$

Με την χρήση των εξισώσεων 5.7 και 5.8 και τους πίνακες 5.14α και 5.14β μπορούμε να βρούμε τον αριθμό Re για όλες της περίπτωσης. 10^4

	β.1 100% β.2 100%	β.1 75% β.2 100%	β.1 50% β.2 100%	β.1 25% β.2 100%	β.1 100% β.2 75%	β.1 100% β.2 50%	β.1 100% β.2 25%
Hz	Re	Re	Re	Re	Re	Re	Re
20	2.755E+04	2.640E+04	1.454E+04	4.262E+03	2.563E+04	2.066E+04	1.052E+04
25	3.615E+04	3.367E+04	2.161E+04	9.945E+03	3.386E+04	2.698E+04	1.416E+04
30	4.381E+04	4.045E+04	2.621E+04	1.377E+04	4.190E+04	3.271E+04	1.798E+04
35	5.261E+04	4.886E+04	3.003E+04	1.779E+04	4.974E+04	3.903E+04	2.105E+04
40	6.218E+04	5.750E+04	3.463E+04	2.276E+04	5.873E+04	4.553E+04	2.429E+04
45	7.117E+04	6.480E+04	4.018E+04	2.640E+04	6.677E+04	5.223E+04	2.736E+04
50	7.997E+04	7.119E+04	4.611E+04	3.042E+04	7.538E+04	5.931E+04	3.099E+04

Πίνακας 5.16

Χρησιμοποιώντας τον πίνακα 5.16 σε συνδυασμό με το σχήμα 5.16 βλέπουμε ότι σε κάποιες από τις περιπτώσεις μας ο Re βρίσκεται μέσα στα όρια της στρωτής ροής, ενώ σε άλλες βρίσκεται στα όρια της μεταβατικής περιοχής ή και στην τελείως τυρβώδη ροή.

Όταν έχουμε στρωτή ροή χρησιμοποιούμε την εξίσωση $f = \frac{64}{Re}$, ενώ στην τυρβώδη χρησιμοποιούμε τον λόγο $\frac{\varepsilon}{d}$ για να βρούμε ποιιά γραμμή του διαγράμματος Moody θα χρησιμοποιήσουμε, όπου ε το μέγεθος επιφανειακών ανωμαλιών (τραχύτητα) του υλικού και d η πραγματική εσωτερική διάμετρος.

Στην περίπτωση των σωλήνων έχουμε υλικό fiberglass με:

$\varepsilon = 0.005mm$ (<http://www.engineeringtoolbox.com>) και $d = 43.6mm$, άρα θα έχουμε:

$$\frac{\varepsilon}{d} = \frac{0.005}{43.6} = 0.0001$$

Στον παρακάτω πίνακα έχουμε τις τιμές του συντελεστή τριβής f για τους σωλήνες fiberglass ανάλογα με την πειραματική περίπτωση.

	β.1 100% β.2 100%	β.1 75% β.2 100%	β.1 50% β.2 100%	β.1 25% β.2 100%	β.1 100% β.2 75%	β.1 100% β.2 50%	β.1 100% β.2 25%
Hz	f	f	f	f	f	f	f
20	4.000E-02	3.650E-02	4.403E-03	1.502E-02	3.650E-02	3.200E-02	6.084E-03
25	4.600E-02	4.400E-02	3.200E-02	6.435E-03	4.500E-02	3.950E-02	4.520E-03
30	3.950E-02	4.000E-02	3.600E-02	4.646E-03	4.000E-02	4.300E-02	3.559E-03
35	3.700E-02	3.750E-02	4.200E-02	3.597E-03	3.750E-02	4.700E-02	3.200E-02
40	3.450E-02	3.500E-02	4.550E-02	3.200E-02	3.600E-02	3.900E-02	3.350E-02
45	3.350E-02	3.400E-02	4.050E-02	3.650E-02	3.350E-02	3.650E-02	3.950E-02
50	3.200E-02	3.250E-02	3.850E-02	4.300E-02	3.300E-02	3.500E-02	4.250E-02

Πίνακας 5.17

Τώρα που έχουμε τις τιμές του συντελεστή f μπορούμε να βρούμε την πτώση πίεσης που οφείλεται στους σωλήνες με την χρήση της εξίσωσης 5.7.

Λόγω της διαφορετικής διαμέτρου της εγκατάστασης του παροχόμετρου $d' = 3.2cm$, σε αντίθεση με την υπόλοιπη διάταξη με $d = 4.36cm$, η πτώση πίεσης που οφείλεται σε αυτό θα υπολογιστεί ξεχωριστά και έπειτα θα προστεθεί στο σύνολο των απωλειών σωλήνωσης, το μήκος της εγκατάστασης είναι $L' = 180mm$ ή $0,18m$.

Το συνολικό μήκος σωλήνωσης στην πειραματική διάταξη είναι $L = 4277\text{mm}$ ή 4.277m .

	β.1 100% β.2 100%	β.1 75% β.2 100%	β.1 50% β.2 100%	β.1 25% β.2 100%	β.1 100% β.2 75%	β.1 100% β.2 50%	β.1 100% β.2 25%
Hz	ΔP_{σ} (Pa)	ΔP_{σ} (Pa)	ΔP_{σ} (Pa)	ΔP_{σ} (Pa)	ΔP_{σ} (Pa)	ΔP_{σ} (Pa)	ΔP_{σ} (Pa)
20	656.49	550.13	20.12	5.90	336.96	295.42	14.56
25	1300.25	1078.72	323.27	13.76	1115.81	621.53	19.59
30	1639.24	1415.20	534.75	19.06	1518.46	995.10	24.89
35	2214.52	1936.09	819.20	24.62	2006.52	1547.97	306.47
40	2884.25	2502.38	1179.82	35.84	2685.25	1748.33	427.57
45	3669.42	3087.07	1413.57	55.03	3229.37	2152.90	639.31
50	4425.11	3562.07	1769.73	86.02	4054.59	2661.98	882.65

Πίνακας 5.18

5.3.3 Απώλειες λόγω των γωνιών

Στην πειραματική διάταξη μας έχουμε στο σύνολο εννέα γωνίες, γνωρίζουμε ότι οι γωνίες που έχουμε είναι τύπου 90° κλειστή απότομη και με την χρήση του παρακάτω πίνακα μπορούμε να βρούμε τον λόγο $\frac{L}{D}$ που χρειαζόμαστε.

Εξάρτημα	Ισοδύναμο μήκος (L/d)
Γωνία 45° τυποποιημένη	15
Γωνία 90° κλειστή τυποποιημένη	32
Γωνία 90° κλειστή απότομη	60
Rc/D=0.5	36
Rc /D=1	16.5
Rc /D=2	10
Rc /D=4	10
Rc /D=8	14.5

Πίνακας 5.19

(http://www.eng.auth.gr/~chemtech/foititika/eisxt/ergastirio/04_trives.pdf)

Άρα το $\frac{L}{D} = 60$ (5.13)

Χρησιμοποιώντας τώρα τύπο 5.7 και το 5.9 βρίσκουμε τον τύπο για τις απώλειες που οφείλονται στις εννέα γωνίες της διάταξης:

$$\Delta P_{\gamma} = f * 60 * \frac{\rho * V^2}{2} \quad (5.14)$$

Σε αυτή την περίπτωση το υλικό μας είναι PVC, άρα το μέγεθος επιφανειακών ανωμαλιών ϵ του υλικού είναι: $\epsilon = 0.0015\text{mm}$. (<http://www.engineeringtoolbox.com>)

Άρα σε αυτή την περίπτωση θα έχουμε:

$$\frac{\varepsilon}{d} = \frac{0.0015}{43.6} = 0.00003$$

Χρησιμοποιώντας το διάγραμμα Moody βλέπουμε ότι για τις τιμές του Re που έχουμε βρει θα ισχύουν οι τιμές του πίνακα 5.17 για το συντελεστή τριβής f .

Άρα θα έχουμε:

	β.1 100% β.2 100%	β.1 75% β.2 100%	β.1 50% β.2 100%	β.1 25% β.2 100%	β.1 100% β.2 75%	β.1 100% β.2 50%	β.1 100% β.2 25%
Hz	ΔP_v (Pa)	ΔP_v (Pa)	ΔP_v (Pa)	ΔP_v (Pa)	ΔP_v (Pa)	ΔP_v (Pa)	ΔP_v (Pa)
20	3417.87	2864.12	104.73	30.71	1754.33	1538.04	75.80
25	6769.44	5616.07	1683.01	71.66	3686.43	3235.87	102.01
30	8534.32	7367.88	2784.06	99.25	4819.32	5180.77	129.56
35	11529.34	10079.81	4264.99	128.18	6430.15	8059.12	1595.58
40	15016.13	13028.06	6142.46	1866.68	8402.06	9102.23	2226.02
45	19103.94	16072.10	7359.43	2864.12	10287.32	11208.57	3328.39
50	23038.25	18545.07	9213.69	4478.59	13067.01	13858.95	4595.28

Πίνακας 5.20

Τώρα μπορούμε να βρούμε την ολική πτώση πίεσης ($\Delta P_{ολ}$) για κάθε πειραματική περίπτωση προσθέτοντας τα ΔP_β , ΔP_σ και ΔP_v , όπως φαίνεται στον πίνακα 5.21 παρακάτω.

	β.1 100% β.2 100%	β.1 75% β.2 100%	β.1 50% β.2 100%	β.1 25% β.2 100%	β.1 100% β.2 75%	β.1 100% β.2 50%	β.1 100% β.2 25%
Hz	$\Delta P_{ολ}$ (Pa)	$\Delta P_{ολ}$ (Pa)	$\Delta P_{ολ}$ (Pa)	$\Delta P_{ολ}$ (Pa)	$\Delta P_{ολ}$ (Pa)	$\Delta P_{ολ}$ (Pa)	$\Delta P_{ολ}$ (Pa)
20	6922.58	6611.14	2106.94	494.73	5105.39	5838.77	2882.09
25	12975.09	11894.85	6389.13	2580.61	10061.62	10684.13	5178.03
30	17375.52	16287.40	9763.39	4904.91	14389.65	16216.13	8311.15
35	24130.66	22966.81	13546.46	8136.72	19785.91	23896.31	13074.79
40	32408.71	30695.38	18572.21	15296.28	26908.45	30299.78	17542.98
45	41782.26	38417.68	23915.85	20997.12	33963.62	38951.83	22848.87
50	51461.54	45354.54	30926.46	28676.89	43182.42	49518.43	29705.79

Πίνακας 5.21

5.4 Αριθμός $NPSH_a$

Για να βρεθεί ο αριθμός $NPSH_a$ κάθε πειραματικής περίπτωσης χρησιμοποιούμε την εξίσωση 3.1

$$NPSH_a = H_H = \frac{P_A - P_S}{\rho g} + \frac{C_A^2}{2g} - Z_i - \Delta h_f \text{ (για αναρρόφηση με ανύψωση, suction lift).}$$

Μετρώντας την απόσταση της επιφάνειας της δεξαμενής αναρρόφησης και την είσοδο της αντλίας, βρήκαμε ότι $Z_i = 0.423m$.

Το (Δh_f) μπορεί να βρεθεί μέσω του πίνακα 5.15 και της παρακάτω σχέσης:

$$1 [Pa] = 10^{-5} [bar] = 10^{-5} * (10 [m]) = 10^{-4} [m] \quad (5.15)$$

Άρα ο πίνακας 5.21 θα γίνει:

	β.1 100% β.2 100%	β.1 75% β.2 100%	β.1 50% β.2 100%	β.1 25% β.2 100%	β.1 100% β.2 75%	β.1 100% β.2 50%	β.1 100% β.2 25%
Hz	Δh_f (m)	Δh_f (m)	Δh_f (m)	Δh_f (m)	Δh_f (m)	Δh_f (m)	Δh_f (m)
20	0.692	0.661	0.211	0.049	0.511	0.584	0.288
25	1.298	1.189	0.639	0.258	1.006	1.068	0.518
30	1.738	1.629	0.976	0.490	1.439	1.622	0.831
35	2.413	2.297	1.355	0.814	1.979	2.390	1.307
40	3.241	3.070	1.857	1.530	2.691	3.030	1.754
45	4.178	3.842	2.392	2.100	3.396	3.895	2.285
50	5.146	4.535	3.093	2.868	4.318	4.952	2.971

Πίνακας 5.22

Η ταχύτητα αναρρόφησης από τη δεξαμενή C_A για κάθε πειραματική περίπτωση βρίσκεται στους πίνακες 5.14α και 5.14β που υπολογίσαμε παραπάνω.

Η πίεση ατμοποίησης (P_S) του νερού ανάλογα την θερμοκρασία είναι οι εξής:

θερμοκρασία νερού σε °C	πίεση ατμού (m)
10	0.125
15	0.174
20	0.238
25	0.323
30	0.432
40	0.752
50	1.258
60	2.031
70	3.177
80	4.859
90	7.149

Πίνακας 5.22 (παρουσίαση Wilo)

Αφού τα πειράματα έγιναν σε θερμοκρασία 25 °C θα έχουμε $P_S = 0.323 [m]$.

Ως P_A έχουμε ορίσει την πίεση εισόδου της αντλίας, επόμενως θα χρησιμοποιήσουμε τις τιμές του $P'in$ για κάθε πειραματική περίπτωση, όπως φαίνεται στους πίνακες 5.23α και 5.23β.

Hz	β.1 100% β.2 100%		β.1 75% β.2 100%		β.1 50% β.2 100%		β.1 25% β.2 100%	
	P'in (bar)	H(m)	P'in (bar)	H(m)	P'in (bar)	H(m)	P'in (bar)	H(m)
20	0.910	9.100	0.905	9.050	0.890	8.900	0.895	8.950
25	0.880	8.800	0.875	8.750	0.845	8.450	0.840	8.400
30	0.845	8.450	0.840	8.400	0.790	7.900	0.780	7.800
35	0.800	8.000	0.795	7.950	0.720	7.200	0.705	7.050
40	0.745	7.450	0.735	7.350	0.645	6.450	0.625	6.250
45	0.685	6.850	0.655	6.550	0.550	5.500	0.530	5.300
50	0.660	6.600	0.595	5.950	0.450	4.500	0.420	4.200

Πίνακας 5.23α

Hz	β.1 100% β.2 75%		β.1 100% β.2 50%		β.1 100% β.2 25%	
	P'in (bar)	H(m)	P'in (bar)	H(m)	P'in (bar)	H(m)
20	0.920	9.200	0.940	9.400	0.950	9.500
25	0.895	8.950	0.920	9.200	0.950	9.500
30	0.860	8.600	0.900	9.000	0.945	9.450
35	0.810	8.100	0.875	8.750	0.940	9.400
40	0.765	7.650	0.845	8.450	0.925	9.250
45	0.710	7.100	0.805	8.050	0.920	9.200
50	0.650	6.500	0.760	7.600	0.905	9.050

Πίνακας 5.23β

Αφού όλοι οι παράγοντες είναι σε [m] η εξίσωση 3.1 ξαναγράφεται ως εξής:

$$NPSH_a = H_H = P_A - P_S + \frac{c_A^2}{2g} - Z_i - \Delta h_f \quad (5.16)$$

Με την χρήση της εξίσωσης 5.12 βρίσκουμε τον αριθμό $NPSH_a$ για κάθε πειραματική περίπτωση:

Hz	β.1 100% β.2 100%	β.1 75% β.2 100%	β.1 50% β.2 100%	β.1 25% β.2 100%
	$NPSH_a$	$NPSH_a$	$NPSH_a$	$NPSH_a$
20	7.678	7.658	7.948	8.155
25	6.784	6.839	7.075	7.398
30	6.007	6.060	6.192	6.568
35	4.900	4.958	5.119	5.497
40	3.545	3.605	3.872	3.985
45	2.033	2.051	2.397	2.469
50	0.844	0.776	0.707	0.606

Πίνακας 5.24α

	β.1 100% β.2 75%	β.1 100% β.2 50%	β.1 100% β.2 25%
Hz	NPSH	NPSH	NPSH
20	7.957	8.079	8.468
25	7.222	7.401	8.240
30	6.452	6.655	7.880
35	5.428	5.647	7.356
40	4.286	4.718	6.762
45	3.052	3.467	6.185
50	1.557	1.977	5.354

Πίνακας 5.24β

Γνωρίζουμε από τον κατασκευαστή της αντλίας ότι το $NPSH_R$ είναι ίσο με 2.7m, και για την αποφυγή σπηλαίωσης πρέπει να ισχύει ότι: $\frac{NPSH_a}{NPSH_R} \geq 1.3$

Με τον παρακάτω πίνακα βλέπουμε ποιες περιπτώσεις ακολουθούν τον παραπάνω λόγο.

	β.1 100% β.2 100%	β.1 75% β.2 100%	β.1 50% β.2 100%	β.1 25% β.2 100%
Hz	$\frac{NPSH_a}{NPSH_R}$	$\frac{NPSH_a}{NPSH_R}$	$\frac{NPSH_a}{NPSH_R}$	$\frac{NPSH_a}{NPSH_R}$
20	2.84	2.84	2.94	3.02
25	2.51	2.53	2.62	2.74
30	2.22	2.24	2.29	2.43
35	1.81	1.84	1.90	2.04
40	1.31	1.34	1.43	1.48
45	0.75	0.76	0.89	0.91
50	0.31	0.29	0.26	0.22

Πίνακας 5.25α

	β.1 100% β.2 75%	β.1 100% β.2 50%	β.1 100% β.2 25%
Hz	$\frac{NPSH_a}{NPSH_R}$	$\frac{NPSH_a}{NPSH_R}$	$\frac{NPSH_a}{NPSH_R}$
20	2.95	2.99	3.14
25	2.67	2.74	3.05
30	2.39	2.46	2.92
35	2.01	2.09	2.72
40	1.59	1.75	2.50
45	1.13	1.28	2.29
50	0.58	0.73	1.98

Πίνακας 5.25β

5.5 Παρατηρήσεις/Συμπεράσματα

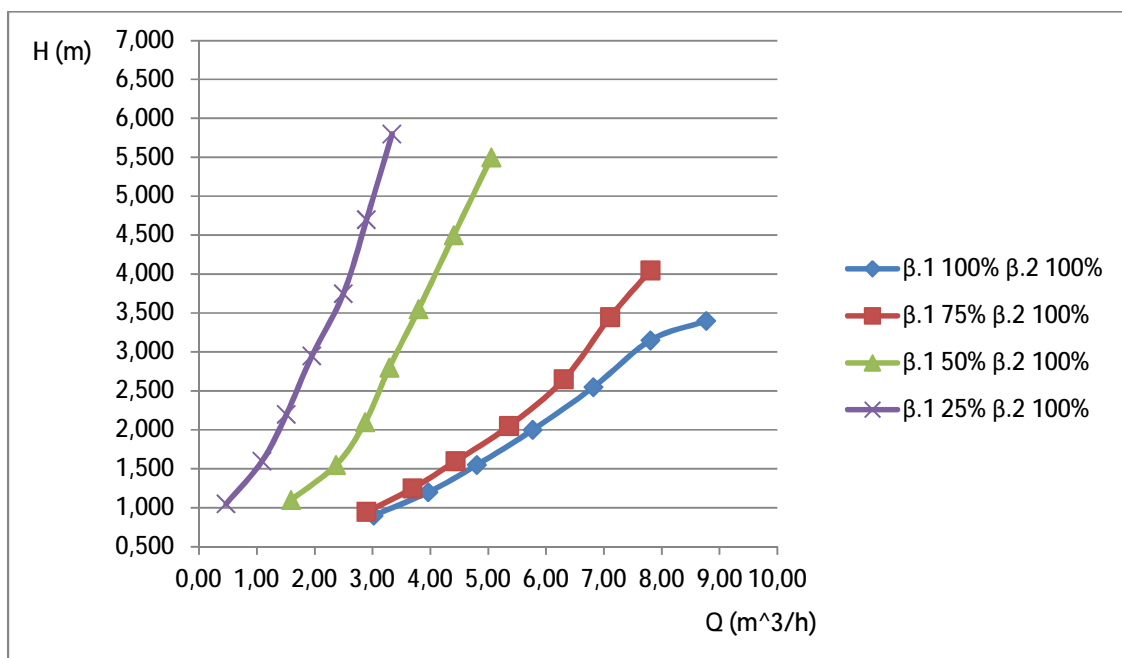
Στις περιπτώσεις 5.2.1.1, 5.2.1.2, 5.2.1.3, 5.2.1.4 παρατηρήθηκε ότι η τιμή της πίεσης εξόδου που μας δίνει το μανόμετρο είναι $P_{out} = 0$, άρα σε αυτές τις περιπτώσεις στην έξοδο έχουμε πίεση ίση με 1 bar.

Κατά την λειτουργία της πειραματικής διάταξης στην περίπτωση 5.2.1.1 παρατηρήθηκε ότι στα άκρα της περρωτής της αντλίας εμφανίζεται σπηλαιώση. Έπειτα, όσο περισσότερο στραγγαλίζαμε την είσοδο της αντλίας μειώνοντας το άνοιγμα της βάνας 1, τόσο οι φυσαλίδες αέρα που εμφανίζονταν στην αντλία έτειναν προς το κέντρο της περρωτής της αντλίας.

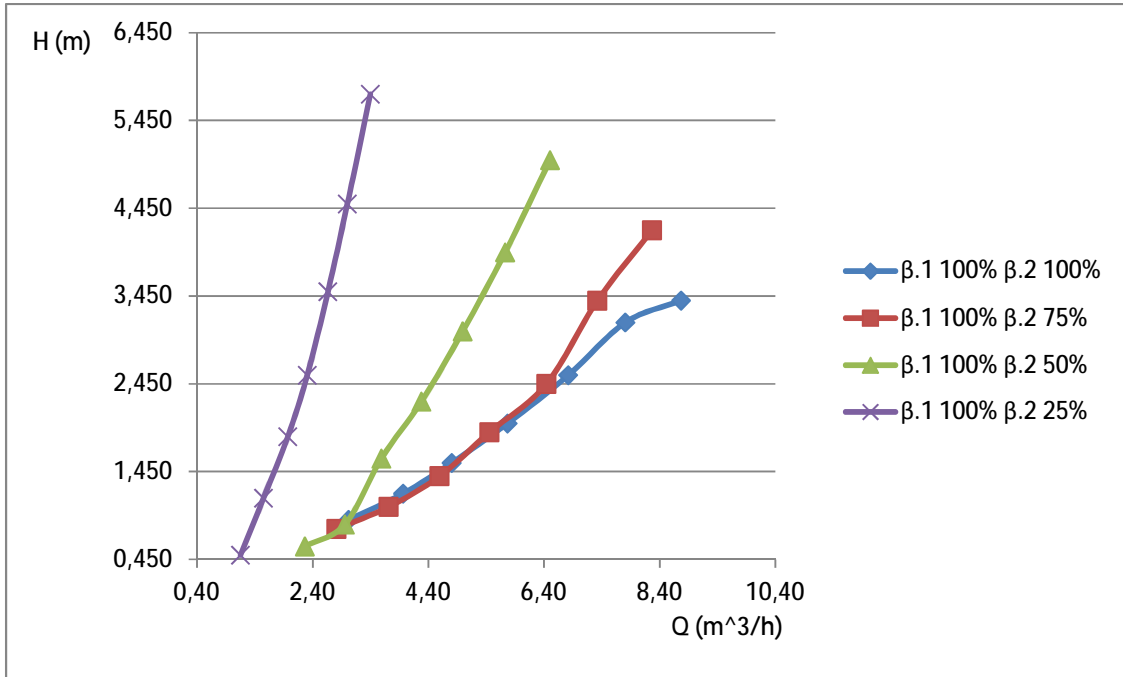
Με τον στραγγαλισμό της εισόδου κατά ένα ποσοστό παρατηρήθηκε επίσης ότι η τιμή της πίεσης εισόδου (P_{in}) αυξάνεται, ενώ η τιμή της παροχής μειώνεται. Αν τώρα αφήσουμε ελεύθερη την βάνα 1 και στραγγαλίσουμε την έξοδο της αντλίας μειώνοντας το άνοιγμα της βάνας 2 κατά το ίδιο ποσοστό που είχαμε στραγγαλίσει την βάνα 1 πιο πριν, παρατηρείται ότι η τιμή της πίεσης εισόδου (P_{in}) μειώνεται ενώ η τιμή πίεσης εξόδου (P_{out}) γίνεται μεγαλύτερη από το μηδέν.

Κατά την μείωση των στροφών της αντλίας παρατηρήθηκε ότι οι φυσαλίδες σπηλαιώσης σε όποιες κατάσταση είχε εμφανιστεί μειώθηκαν.

Από τα διαγράμματα μεταβαλλόμενης ταχύτητας φαίνεται ότι όσο περισσότερο στραγγαλίζουμε μία από τις βάνες η πίεση αυξάνεται και η παροχή μειώνεται, όπως φαίνεται και πιο αναλυτικά στα διαγράμματα 5.8α και 5.8β.

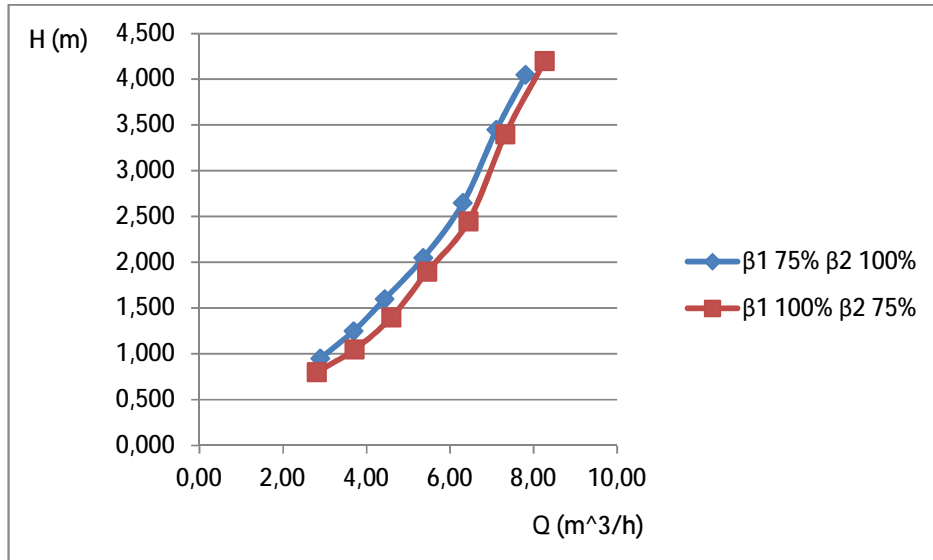


Διάγραμμα 5.11α

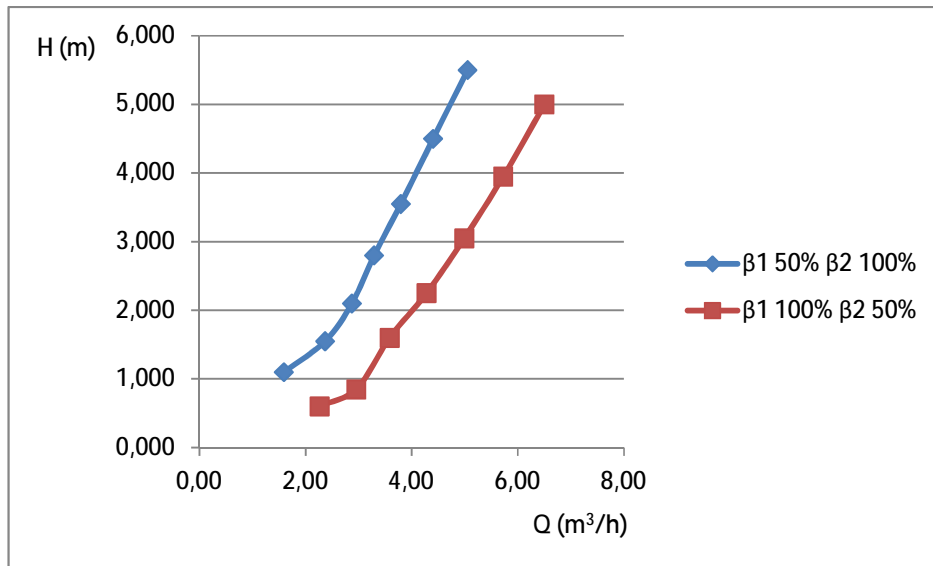


Διάγραμμα 5.116

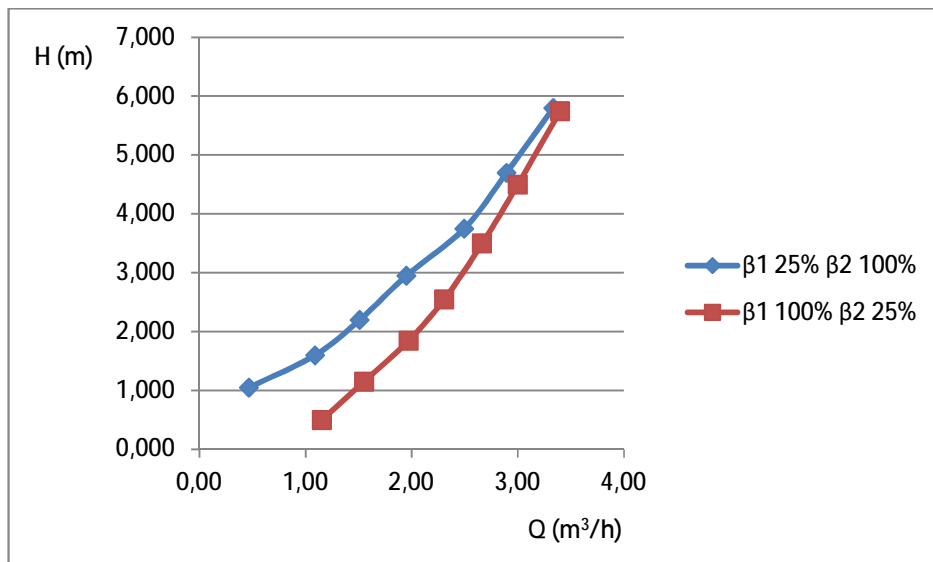
Συγκρίνοντας τα διαγράμματα μεταβαλλόμενης ταχύτητας που έχουν ίδιο ποσοστό ανοίγματος των βανών 1 και 2 θα έχουμε τα εξής διαγράμματα:



Διάγραμμα 5.12α



Διάγραμμα 5.12β



Διάγραμμα 5.12γ

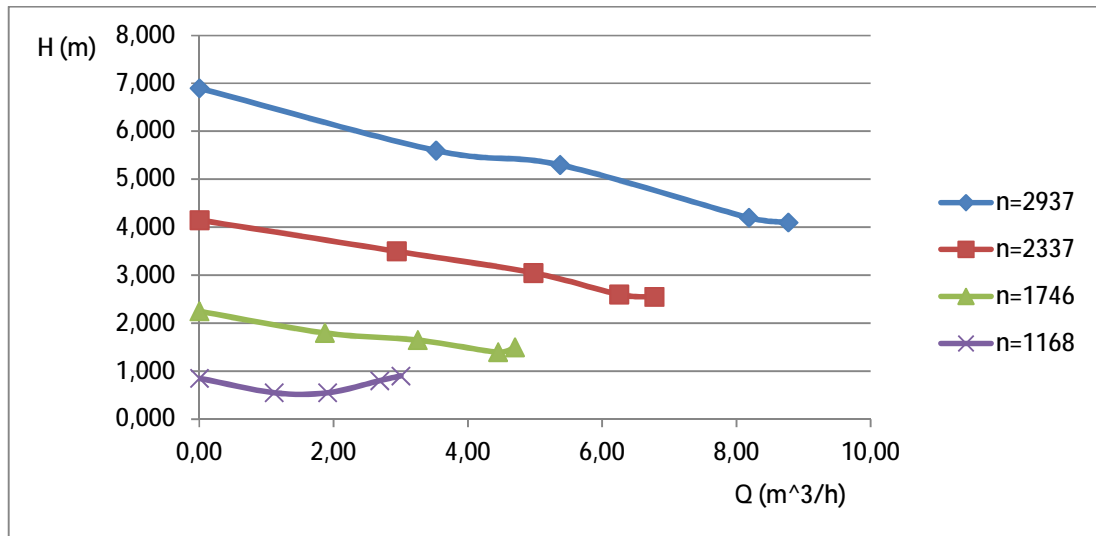
Από τα παραπάνω διαγράμματα βλέπουμε ότι:

-Στο διάγραμμα 5.12α οι δύο περιπτώσεις έχουν παρόμοια σχέση μεταξύ του μανομετρικού ύψους και της παροχής.

-Στο διάγραμμα 5.12β παρατηρείται ότι η μείωση του ανοίγματος της βάνας 2 μας δίνει για τις ίδιες ταχύτητες μικρότερο μανομετρικό ύψος, αλλά μεγαλύτερη παροχή.

-Στο διάγραμμα 5.12γ βλέπουμε ότι, παρόλο που η περίπτωση μείωσης του ανοίγματος της βάνας 2 σε χαμηλές ταχύτητες έχει μικρότερο μανομετρικό ύψος και μεγαλύτερη τιμή παροχής, όσο αυξάνουμε την ταχύτητα τόσο μειώνεται η διαφορά των δύο περιπτώσεων.

Αν συγκρίνουμε τα διαγράμματα με σταθερές ταχύτητες θα έχουμε το εξής:



Διάγραμμα 5.13

Από το διάγραμμα 5.12 βλέπουμε ότι καθώς μειώνεται η περιστροφική ταχύτητα της αντλίας, μειώνεται και η πτώση της πίεσης συνάρτηση της παροχής.

Με την βοήθεια των πινάκων 5.25α και 5.25β μπορούμε να δούμε ότι μόνο μερικές από τις περιπτώσεις που έχουμε μας δίνει τις κατάλληλες συνθήκες για την αποφυγή σπηλαιώσης.

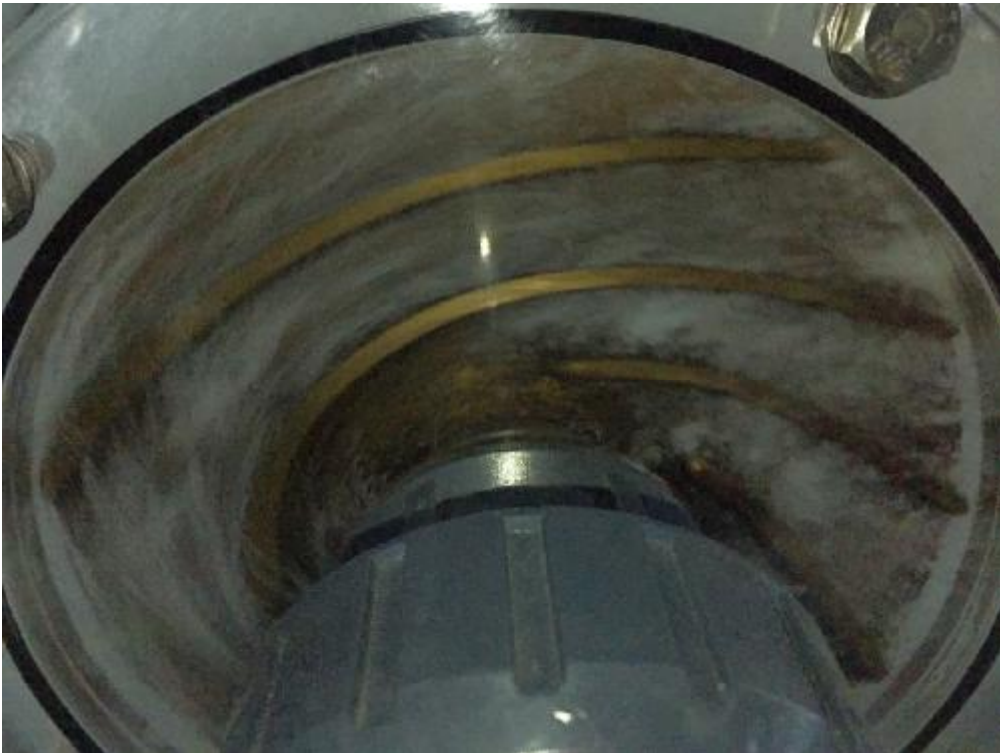
Περνώντας τις περιπτώσεις 20Hz και 50Hz για β.1 50% και β.2 100% όπου ισχύει ότι:

για 20Hz: $\frac{NPSH_a}{NPSH_R} = 2.94 > 1.3$ και για 50Hz: $\frac{NPSH_a}{NPSH_R} = 0.26 < 1.3$.

Παρατηρήσαμε ότι στην περίπτωση με 50Hz είχαμε εμφάνιση σπηλαιώσης, όπως φαίνεται και στις παρακάτω εικόνες.



Σχήμα 5.17α
Περίπτωση 20Hz



Σχήμα 5.17β
Περίπτωση 50Hz

Τελικώς, από τις πειραματικές μετρήσεις που πάρθηκαν και τα διαγράμματα που προέκυψαν παρατηρήσαμε ότι με την αλλαγή της περιστροφικής ταχύτητας της αντλίας και του ποσοστού ανοίγματος των βανών εισόδου και εξόδου,ίδαμε ότι μπορούμε να επηρεάσουμε τη δημιουργία σπηλαίωσης στο σύστημα ανάλογα με προκαθορισμένες παράμετρους του πειράματος, δηλαδή μπορούμε να την δημιουργήσουμε, να αυξήσουμε την δράση της, να την μειώσουμε και να την εξαλείψουμε κατά το δοκούν.

Βιβλιογραφία

1. ΠΑΠΑΝΙΚΑΣ Γ. Δ.: “ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΚΑΙ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ”, Εκδ. Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα 1998.
2. Karrassik J. Igor, Terry Mc Guire: “Centrifugal Pumps – *Second Edition*”, CHAPMAN & HALL INTERNATIONAL THOMSON PUBLISHING, United States Of America 1998.
3. Karrassik J. Igor: “Centrifugal Pump Clinic”, MARCEL DEKKER INC, New York 1989.
4. ΑΚΡΙΤΙΔΗΣ Β. ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ : “Αντλίες (τύποι, επιλογή, λειτουργία, εγκατάσταση) ”, Εκδόσεις Γιαχούδη – Γιαπούλη, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 1985.
5. YEDIDIAH SAM: “Φυγοκεντρικές Αντλίες - Οδηγίες για το χρηστή ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΛΥΣΕΙΣ”, Εκδόσεις ΙΩΝ, ΑΘΗΝΑ 1999.
6. DUFOUR W. JOHN & NELSON E. WILLIAM: “CENTRIFUGAL PUMP SOURCEBOOK”, Mc GRAW-HILL INC, NEW YORK-ST LOUIS, SAN FRANCISCO 1993.
7. VOLK W. MICHAEL: “PUMP CHARACTERISTICS AND APPLICATIONS”, MERCEL DEKKER Inc, New York 1996.
8. Turton K. R.: “ROTODYNAMIC PUMP DESIGN”, *Cambridge University Press* 1994.
9. ΤΑΣΙΟΥΛΑΣ Δ. – ΚΟΤΟΜΠΟΛΗΣ Π.: “ΑΡΔΕΥΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ εκδοση ‘β’”, Οργανισμός Εκδόσεων Διδακτικών Βιβλίων, Αθήνα 1987.
10. Mukesh Sahdev, Associate Content Writer: “Centrifugal Pumps: Basics Concepts of Operation, Maintenance, and Troubleshooting, Part II & Part I” Presented at The Chemical Engineers’ Resource Page, www.cheresources.com
11. Dr. Sachdeva Rajesh, Dr. Doty D. and Dr. Schmidt Z.: “MULTIPHASE FLOW THROUGH CENTRIFUGAL PUMPS”
12. Μηνιαία Τεχνική Επιθεώρηση: “Κατασκευαστικές λεπτομέρειες φυγοκεντρικών αντλιών”, Τεύχος 121, Απρίλιος 2002
13. Nelson E. W. P.E.: “Understanding Pump Cavitation”, Published in: *Chemical Processing*, Date published: 1/2/1999
14. Εργαστήριο Ρευστοδυναμικών Μηχανών, τμήμα μηχανολογίας Τ.Ε.Ι. πάτρας: Άσκηση 3 ‘Φαινόμενο Σπηλαίωσης’
15. Πολυτεχνική Σχολή Α.Π.Θ. Ενότητα 4: ‘Τριβές σε Σωλήνες και Εξαρτήματα’