



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών

«Ναυτική και θαλάσσια τεχνολογία και επιστήμη»

«Μελέτη του φαινομένου της σπηλαίωσης σε
φυγοκεντρική αντλία»

“Cavitation”

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Σέμψη Λάμπρου

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

Δημήτριος Ε. Παπαντώνης

ΑΘΗΝΑ 2007

«Μελέτη του φαινομένου της σπηλαίωσης σε
φυγοκεντρική αντλία»

“Cavitation”

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Σέμψη Λάμπρου

Στους γονείς μου, τον αδερφό μου και...

σε όσους με στήριξαν...

για την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας...

* Πίνακας Περιεχομένων *

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

<u>1.1</u>	<u>Ιστορική ανασκόπηση και σημερινές εφαρμογές</u>	05
------------	--	----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΝΤΛΙΩΝ

<u>2.1</u>	<u>Γενικά χαρακτηριστικά στροβιλομηχανών</u>	08
<u>2.2</u>	<u>Χαρακτηριστικά μεγέθη αντλιών</u>	10
2.2.1	Ύψος αναρρόφησης, καταθλίψεως & ολικό ύψος	10
2.2.2	Παροχή	12
<u>2.2.3</u>	<u>Απαιτούμενη ισχύς</u>	12
<u>2.2.4</u>	<u>Βαθμός αποδόσεως</u>	13
2.2.4.1	Υδραυλικός βαθμός απόδοσης	14
2.2.4.2	Ογκομετρικός βαθμός απόδοσης	15
2.2.4.3	Μηχανικός βαθμός απόδοσης	16
2.2.4.4	Ολικός βαθμός απόδοσης	16
<u>2.3</u>	<u>Νόμοι ομοιότητας φυγοκεντρικών αντλιών</u>	17
<u>2.4</u>	<u>Καμπύλες λειτουργίας των δυναμικών αντλιών</u>	18
2.4.1	Υπολογισμός χαρακτηριστικής καμπύλης αντλίας	18
2.4.2	Χαρακτηριστική καμπύλη ύψους-παροχής	19
<u>2.5</u>	<u>Χαρακτηριστική καμπύλη εγκατάστασης - σωληνογραμμής</u>	20
<u>2.6</u>	<u>Καθορισμός του σημείου λειτουργίας αντλητικής εγκατάστασης</u>	22
<u>2.7</u>	<u>Διαμόρφωση αντλιών</u>	26
2.7.1	Τα εξαρτήματα της αντλίας	26
2.7.2	Το περίβλημα (σπειροειδές κέλυφος)	28
2.7.3	Η πτερωτή της αντλίας	30
2.7.4	Τριςδιάστατα κατασκευαστικά σχέδια αντλιών	32

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : Το φαινόμενο της σπηλαίωσης στις αντλίες

<u>3.1</u>	<u>Η σπηλαίωση γενικά</u>	35
<u>3.2</u>	<u>Καθαρό θετικό ύψος αναρρόφησης (NPSHa διαθέσιμο / NPSHr απαιτούμενο)</u>	36
3.2.1	Το NPSHa ως κριτήριο της σπηλαίωσης	40
<u>3.3</u>	<u>Τα διάφορα είδη σπηλαίωσης - Προέλευση των φυσαλίδων</u>	40
<u>3.4</u>	<u>Ο μηχανισμός επίδρασης των φυσαλίδων</u>	42
3.4.1	Δημιουργία και κατάρρευση των φυσαλίδων	43
<u>3.5</u>	<u>Τα βήματα της σπηλαίωσης ειδικότερα</u>	45
<u>3.6</u>	<u>Τα είδη της σπηλαίωσης τύπου “Vaporous”</u>	47
3.6.1	Σπηλαίωση κλασσικού τύπου	47
3.6.2	Σπηλαίωση λόγω επανακυκλοφορίας	48

<u>3.7 Η σπηλαίωση τύπου “Gaseous”</u>	51
<u>3.7.1 Επιπτώσεις του Ελεύθερου Αέρα εντός του Αντλούμενου Υγρού</u>	51
<u>3.7.2 Πηγές του ελεύθερου αέρα</u>	52
<u>3.7.3 Σχήμα του στροφείου και δυνατότητες χειρισμού του αέρος</u>	52
<u>3.7.4 Η επίδραση αέρος ή αερίου που συνοπορεύεται στο υγρό</u>	55
<u>3.7.5 Αντληση μίγματος υγρού – αερίου</u>	56
<u>3.7.6 Γενικότερη επίδραση αέρα ή κάποιων αερίων του αντλούμενου υγρού στα χαρακτηριστικά λειτουργίας της αντλίας</u>	59
<u>3.8 Θέσεις του πτερυγίου όπου εκδηλώνεται η σπηλαίωση</u>	61
<u>3.9 Συγνοί λόγοι δημιουργίας σπηλαίωσης</u>	63
<u>3.10 Γενικά συμπτώματα σπηλαίωσης</u>	63

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : Φυγοκεντρικές αντλίες – σπηλαίωσης –Ερευνητικές δραστηριότητες

4.1	Περίληψη	67
4.2	ΒΑΣΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ – ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ	67
4.2.1	<u>Διακριτοποίηση σε μη-δομημένο Καρτεσιανό πλέγμα.</u>	67
4.2.2	<u>Επίλυση σε πολύπλοκες γεωμετρίες</u>	69
4.2.3	<u>Μοντέλο σπηλαίωσης</u>	70
4.3	ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ	71
4.3.1	<u>Βελτίωση υδροδυναμικής σχεδίασης</u>	71
4.4	Πειραματικές Δραστηριότητες	73
4.5	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΡΟΗΣ ΣΕ ΦΥΓΟΚΕΝΤΡΙΚΕΣ ΑΝΤΛΙΕΣ	74
4.5.1	<u>Φυσικομαθηματική προσομοίωση και επίλυση</u>	74
4.5.1	<u>Αποτελέσματα-Συμπεράσματα</u>	75

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	76
---------------------	----

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Αν σε κάποιο σημείο της αντλίας μειωθεί η πίεση κάτω από την πίεση ατμοποίησης, τότε δημιουργούνται στην θέση εκείνη φυσαλίδες ατμού. Αυτές οι μικρές φυσαλίδες συμπυκνώνονται πάλι, αλλά με κρουστικό τρόπο και δημιουργούν πολύ μεγάλα πιεστικά κύματα (μερικές εκατοντάδες bar). Αυτό το φαινόμενο καλείται δημιουργία κοίλων χώρων ή σπηλαίωση Σχήμα (3.6.1).

Η σπηλαίωση φαίνεται από την μείωση της παροχής, διότι οι φυσαλίδες ατμού μειώνουν την διατομή. Ελαττώνεται έτσι η ικανότητα και ο βαθμός αποδόσεως. Αυτή η πραγματικότητα εφαρμόζεται, εκτός της οπτικής παρατηρήσεως, και στις δοκιμές με υποδείγματα αντλιών. Δεν ελαττώνεται μόνον ο βαθμός αποδόσεως, αλλά εμφανίζεται και ένας μεταλλικός θόρυβος και μια ταχεία καταστροφή του υλικού. Οι καταστροφές δεν εμφανίζονται στην θέση δημιουργίας των φυσαλίδων (αγωγός αναρροφήσεως) , αλλά πιο πέρα στο εσωτερικό της περωτής, σε θέση υψηλότερης πίεσεως, όπου συμπυκνώνονται οι φυσαλίδες. Μια ισχυρότερη σπηλαίωση μπορεί να προχωρήσει έως την σταθερή στεφάνη περυγίων, πέρα από την περωτή, και να προκαλέσει μεγαλύτερες καταστροφές. Πρέπει, λοιπόν, στο σχεδιασμό να κρατήσει κανείς μια απόσταση ασφαλείας από το υπολογισμένο ύψος αναρροφήσεως, για να μην εμφανισθεί η σπηλαίωση.

Αν οι αποκλίσεις είναι μεγαλύτερες από το αρχικά σχεδιασμένο σημείο, δηλαδή σε μερικό φορτίο ή σε υπερφόρτιση, τότε είναι δύσκολο να αποφύγει κανείς την δημιουργία φυσαλίδων ατμού στην πίσω πλευρά των περυγίων.

Κεφάλαιο

1

Εισαγωγικά στοιχεία

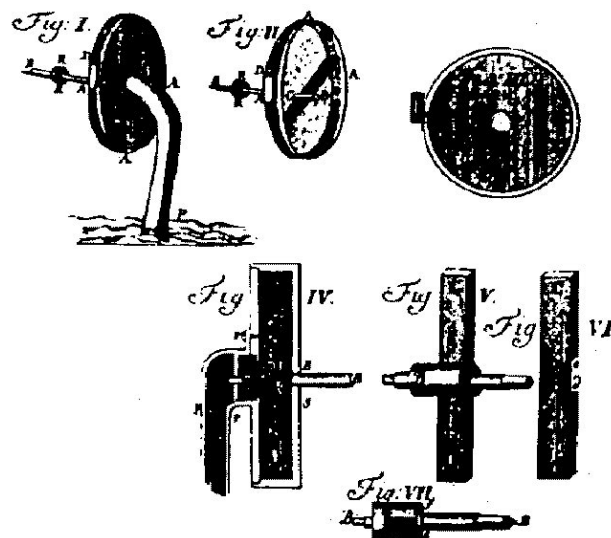
1.1 Ιστορική ανασκόπηση και σημερινές εφαρμογές

Οι αντλίες χρησιμοποιούνται για την μετακίνηση των υγρών. Η μετακίνηση πραγματοποιείται με μεταφορά ενέργειας στο υγρό, η οποία προσδίνεται στην αντλία από τον κινητήρα. Η μετάδοση ενέργειας στα υγρά μέσω της αντλίας σκοπό έχει συνήθως την ανύψωση αυτών από μια στάθμη σε άλλη που έχει μεγαλύτερο ύψος .

Οι αντλίες για την άντληση του νερού επινοήθηκαν πριν από τις κινητήριες μηχανές. Τα βασικά εξαρτήματα των αντλιών αυτών ήταν δοχεία, τα οποία βυθίζονταν μέσα στο νερό και μετά ανυψωνόταν με τη βοήθεια απλών μηχανών. Η επινοήση του ανυψωτικού τροχού πρέπει να θεωρηθεί σαν ένα σημαντικό βήμα προόδου στην άντληση του νερού για άρδευση. Στην περιφέρεια ενός μεγάλου τροχού ήσαν τοποθετημένα δοχεία, που βυθίζονταν στο νερό, γέμιζαν και καθώς ο τροχός περιστρεφόταν, ανέρχονταν και άδειαζαν μέσα στο αυλάκι αρδεύσεως. Ως ενέργεια για την περιστροφή του τροχού χρησιμοποιήθηκε η ανθρώπινη ή ζωική δύναμη και η δύναμη του ανέμου. Αργότερα ο ανυψωτικός τροχός μετατράπηκε σε «αυτοκινούμενο» με την προσθήκη πτερυγίων στην περιφέρειά του. Καθώς το νερό των ποταμών έρεε, ωθούσε τα πτερύγια και ο τροχός περιστρεφόταν για την ανύψωση των δοχείων. Άλλες διατάξεις για άντληση του νερού ήσαν ο κοχλίας, η αλυσίδα με βύσματα και η χειροκίνητη παλινδρομική αντλία (τουλούμπα).

Εφευρέτης της φυγοκέντρου αντλίας θεωρείται ο Γάλλος Denis Papin, που το 1687 περιέγραψε ένα τύπο αντλίας (**Σχήμα 1.1**), της οποίας η αρχή λειτουργίας ήταν η ίδια με τις σημερινές φυγόκεντρους αντλίες. Στο πειραματικό μοντέλο αυτό η πτερωτή είχε δύο πλήρως ακτινικά πτερύγια. Το 1705 κατασκεύασε ο ίδιος το μοντέλο της πρώτη φυγοκέντρου αντλίας για άντληση νερού. Στο μοντέλο αυτό η πτερωτή είχε περισσότερα πτερύγια και κέλυφος. Το βασικό πρόβλημα εκείνης της εποχής ήταν η αποφυγή εισχώρησης αέρα στο εσωτερικό της αντλίας που διέκοπτε τη

λειτουργία της. Ένα άλλο σημαντικό τεχνολογικό πρόβλημα ήταν το γεγονός ότι οι φυγοκεντρικές αντλίες απαιτούσαν σχετικά μεγάλες ταχύτητες περιστροφής στη 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 επόμενο βήμα στην εξέλιξη των φυγοκεντρικών αντλιών σημειώνεται στο 1839 στις Η.Π.Α. οπότε ο W. D. Andrews πρόσθεσε σπειροειδές κέλυφος γύρω από την φυγοκεντρική περρωτή. Η αντλία αξονικής ροής με περρωτή τύπου έλικας παρουσιάστηκε από τον J. Skeys το 1875. Αργότερα κατασκευάστηκαν και άλλες φυγόκεντροι αντλίες με μικρές βελτιώσεις, αλλά ο βαθμός αποδόσεώς τους ήταν πολύ μικρός.



Σχήμα1.1

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

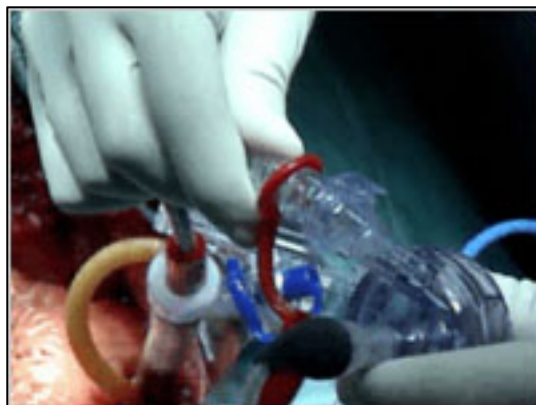
Το 1875 ο Osborne Reynolds κατασκεύασε την πρώτη στροβιλοαντλία (turbine pump), που είχε σημαντικά αυξημένη απόδοση. Ο ίδιος τότε παρουσίασε και τον διαχύτη με περύγια. Από το 1840 άρχισαν να χρησιμοποιούνται οι ατμομηχανές για την κίνηση των αντλιών όταν ο H.Worthington κατασκεύασε μία παλινδρομική 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.

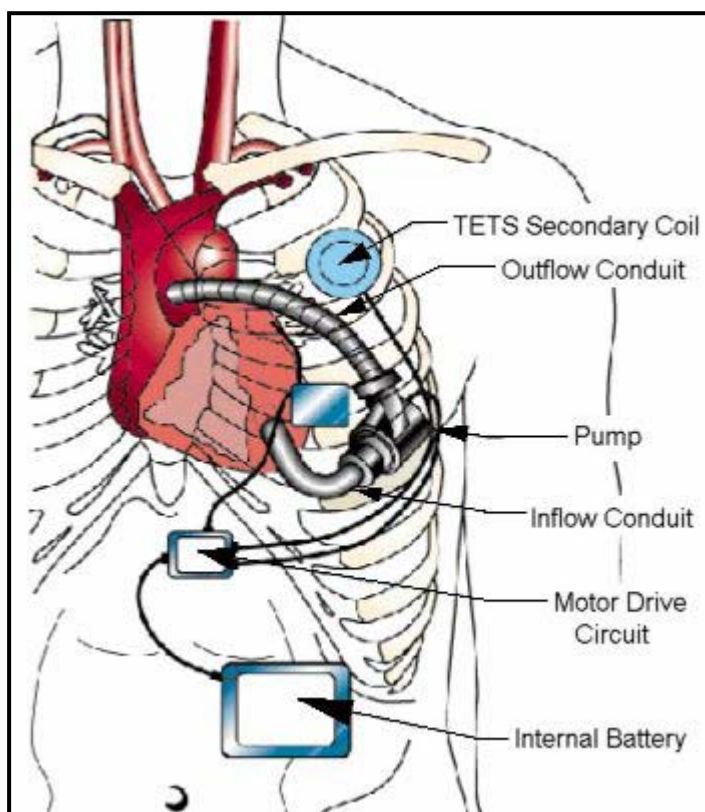
Γενικά η χρήση των αντλιών είναι ευρύτατη: Στα εργοστάσια είναι συνήθως εγκαταστημένες πολλές αντλίες για διάφορες χρήσεις (άντληση νερού από φρεάτια, κυκλοφορία νερού ψύξεως, τροφοδότηση καυστήρων πετρελαίου, τροφοδότηση ατμολεβητών κ.α. Στα αυτοκίνητα οι αντλίες χρησιμοποιούνται για την τροφοδοσία 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 1.2**, **1.3** και **1.4**) φαίνεται μια φυγοκεντρική αντλία που έχει αναπτυχθεί από την εταιρεία A-Med Systems Inc και χρησιμοποιείται για ιατρικούς σκοπούς.



Σχήμα1.2
*Φυγοκεντρική αντλία που αναπτύχθηκε
από την A-Med Systems Inc
για ιατρικές εφαρμογές*



Σχήμα1.3
*Φυγοκεντρική αντλία που αναπτύχθηκε
 από την A-Med Systems Inc
 για ιατρικές εφαρμογές*



Σχήμα1.4
*Καλλιτεχνική απεικόνιση όπου φαίνεται η χρήση
 φυγοκεντρικής αντλίας για ανακυκλοφορία του αίματος.
 Εφαρμογή στον τομέα της ιατρικής.*

Γενικά χαρακτηριστικά αντλιών

2.1 Γενικά χαρακτηριστικά στροβιλομηχανών

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

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

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

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

Η μετατροπή της ενέργειας του ρευστού σε μηχανική ή το αντίστροφο, λαμβάνει χώρα σε ένα στρεφόμενο τμήμα της μηχανής το οποίο ορίζεται ως πτερωτή.

Ένα βασικό χαρακτηριστικό των στροβιλομηχανών είναι ότι στη μετατροπή της ενέργειας του ρευστού σε μηχανική ενέργεια ή το αντίστροφο σημαντικό ρόλο παίζει η ενέργεια του ρευστού μορφής κινητικής ενέργειας. Για το λόγο αυτό οι στροβιλομηχανές ασυμπίεστου ρευστού χαρακτηρίζονται ως «ρευστοδυναμικές».

Οι στροβιλομηχανές διακρίνονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με την κατεύθυνση ροής της ενέργειας: τις εργοστροβιλομηχανές και τις κινητήριες στροβιλομηχανές. Στις πρώτες επιτυγχάνεται μετατροπή της μηχανικής ενέργειας, που προσδίδεται από ένα κινητήρα στη στρεφόμενη άτρακτο, σε ενέργεια που μεταφέρεται στο ρευστό. Άρα στις εργοστροβιλομηχανές η ροπή που αναπτύσσεται στο στρεφόμενο τμήμα της μηχανής, την πτερωτή, είναι ανθιστάμενη και για να στρέφεται το σύστημα με σταθερή γωνιακή ταχύτητα ω , σε rad / sec , θα πρέπει η ανθιστάμενη ροπή να είναι ίση με την κινητήρια του συνδεδεμένου κινητήρα.. Στις εργοστροβιλομηχανές κατατάσσονται οι αντλίες, οι ανεμιστήρες, οι φυσητήρες, οι στροβιλοσυμπιεστές. Αντίθετα στις κινητήριες μηχανές ή τους στροβίλους επιτυγχάνεται το αντίστροφο: αφαιρείται ενέργεια από το διερχόμενο ρευστό η οποία μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια.. Άρα στις κινητήριες στροβιλομηχανές η ροπή που αναπτύσσεται στην άτρακτο είναι κινητήρια και για να στρέφεται το σύστημα με σταθερή γωνιακή ταχύτητα ω θα πρέπει να συνδέεται η άτρακτος με μηχανή που απορροφά τη μηχανική ενέργεια προβάλλοντας ροπή αντιστάσεως, π.χ. με μία ηλεκτρική γεννήτρια.

Μια τρίτη κατηγορία των στροβιλομηχανών που είναι συνδυασμός των δυο παραπάνω κατηγοριών αποτελούν οι υδροδυναμικοί συμπλέκτες, οι ρευστοδυναμικοί μετατροπείς ροπής και οι υδραυλικές πέδες.

Σύμφωνα με τα προηγούμενα στις στροβιλομηχανές δεν κατατάσσονται οι υδραυλικές μηχανές μετατόπισης (π.χ. γραναζωτές αντλίες και οι εμβολοφόροι συμπιεστές) για δύο λόγους: η παροχή του διερχόμενου ρευστού δεν είναι συνεχής ενώ στην λειτουργία τους η κινητική ενέργεια του ρευστού δεν παίζει κανένα ρόλο.

Ενώ στις αντλίες, φυγοκεντρικές και αξονικές, η ενέργεια που προσδίδεται στο υγρό είναι επιθυμητό να είναι κύρια υπό μορφή δυναμικής ενέργειας, δηλ στατικής πίεσης, στους ανεμιστήρες είναι επιθυμητή η πρόσδοση ενέργειας στο ρευστό κύρια υπό μορφή κινητικής ενέργειας, δηλ επιδιώκεται η επιτάχυνση του ρευστού υπό σταθερή στατική πίεση, την ατμοσφαιρική. Οι έλικες, ναυτικές και αεροπορικές, μπορούν να καταταγούν στις υδροδυναμικές μηχανές. Στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε μόνο με τις αντλίες .

2.2 Χαρακτηριστικά μεγέθη αντλιών

Η απόδοση μιας αντλίας χαρακτηρίζεται από τις ποσότητες: (1) *Ύψος αναρρόφησης, καταθλίψεως, ολικό ύψος*. (2) *Παροχή*. (3) *Απαιτούμενη ισχύς για την λειτουργία της αντλίας & (4) Βαθμός αποδόσεως*.

2.2.1 Ύψος αναρρόφησης, καταθλίψεως & ολικό ύψος

Στην γενική περίπτωση η διακίνηση υγρών μέσω σωλήνωσης από μια δεξαμενή, τη δεξαμενή αναρρόφησης, προς μια άλλη, τη δεξαμενή κατάθλιψης, που βρίσκεται σε μεγαλύτερη στάθμη και στην οποία επικρατεί μεγαλύτερη στατική πίεση από την δεξαμενή αναρρόφησης. Άρα το υγρό στην δεξαμενή κατάθλιψης έχει μεγαλύτερη ολική ενέργεια ανά μονάδα μάζας. Η ενέργεια αυτή προσδίδεται στο υγρό από αντλία η οποία πρέπει επιπλέον να καλύψει την απώλεια ενέργειας που λαμβάνει χώρα κατά την διακίνηση του υγρού μέσω της σωλήνωσης. Η εγκατάσταση που περιλαμβάνει την αντλία, τις σωληνώσεις από την δεξαμενή αναρρόφησης μέχρι τη δεξαμενή κατάθλιψης, το χώρο αναρρόφησης και κατάθλιψης και τα σχετικά εξαρτήματα (που σχετίζονται με την ασφάλεια, λειτουργίας και συντήρησης) ονομάζεται αντλητική εγκατάσταση.

Στο **Σχήμα 2.1** δίνεται σχηματικά απλή αντλητική εγκατάσταση στην οποία η αντλία αντλεί υγρό από την δεξαμενή αναρρόφησης A και το καταθλίβει στην δεξαμενή κατάθλιψης K . Έστω z_A και z_K η στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας 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 **Σχήμα 2.1** και οι δύο δεξαμενές αναρρόφησης και κατάθλιψης, βρίσκονται υπό την αυτή 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 διατομή εισόδου στην περωτή 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:

$$h_A = z_a - z_A \quad (2.2)$$

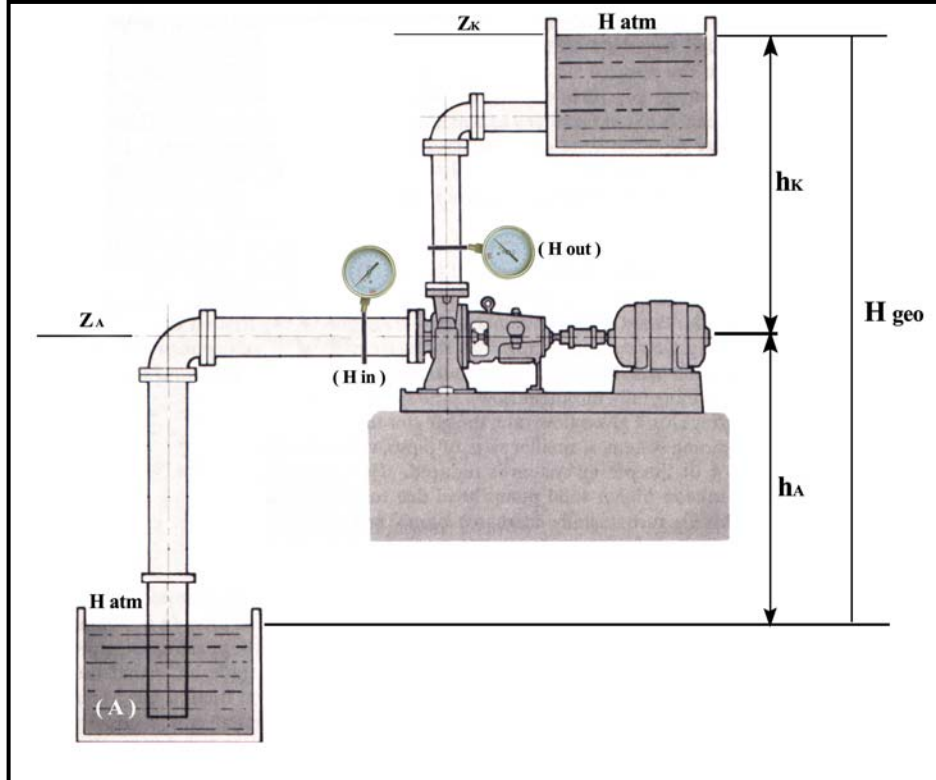
Το h_A θα είναι θετικό εάν $z_a > z_A$, δηλ όταν η στάθμη της αντλίας είναι μεγαλύτερη από την στάθμη της δεξαμενής αναρρόφησης.

Ως γεωμετρικό ύψος κατάθλιψης h_K ορίζεται η υψομετρική διαφορά:

$$h_K = z_K - z_a \quad (2.3)$$

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

$$H_{geo} = z_K - z_a = h_A - h_K \quad (2.4)$$



Σχήμα 2.1
Σχηματική διάταξη απλής αντλητικής εγκατάστασης

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.

2.2.2 Παροχή

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

β) *Κανονική παροχή (Optimum)* (Q_n) είναι η αποδιδόμενη παροχή 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 εσωτερικών διαρροών:

$$Q_\varepsilon = Q + Q_\delta \quad (2.5)$$

Στον τύπο (2.5), όπου Q_δ είναι ο όγκος των εσωτερικών διαρροών (το Q_δ είναι πολύ μικρό σε σύγκριση με το Q).

2.2.3 Απαιτούμενη ισχύς

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

$$N_a = n_k \cdot N_k \quad (2.6)$$

όπου : n_k = βαθμός αποδόσεως του κινητήρα.

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

$$N_\varepsilon = \gamma \cdot Q_\varepsilon \cdot H_\varepsilon + N_f \quad (2.7)$$

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.):

$$N_\varepsilon = N_a - N_{mf} \quad (2.8)$$

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

$$N = \gamma \cdot Q \cdot H_0 \quad (kp \cdot m / s) \quad (2.9)$$

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 $N \cdot m / s$ ή *Watts* ($1 kp = 9,81N$).

Επειδή : $1 HP = 75 kp \cdot m / s = 0,736 KW$ η εξίσωση (2.9) γράφεται:

$$N = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_0}{75} HP \quad (2.10)$$

$$N = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_0}{102} KW \quad (2.11)$$

2.2.4 Βαθμός αποδόσεως

Η ροή του ρευστού δια μέσω της αντλίας, όπως και για οποιαδήποτε στροβιλομηχανή, συνοδεύεται από την ανάπτυξη απωλειών στις οποίες αντιστοιχεί η διαφορά ισχύος $(N - N_i)$, δηλαδή της ισχύος N την οποία προσδίδει ο κινητήρας σε σχέση με την N_i που παραλαμβάνει το ρευστό. Οι απώλειες αυτές διακρίνονται σε τρεις τύπους, τις υδραυλικές, τις ογκομετρικές και τις μηχανικές.

2.2.4.1 Υδραυλικός βαθμός απόδοσης

Το ολικό ύψος της αντλίας H (**μανομετρικό**) ορίζεται ως $H = H_{out}^t - H_{in}^t$ και εκφράζει την ανά 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 $\delta h_{f_{in \rightarrow out}}$, για τις οποίες θα μιλήσουμε και στην παράγραφο 4.2 οι οποίες αναλύονται σε αυτές που αναπτύσσονται :

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

Προφανώς θα ισχύει :

$$\delta h_{f_{in \rightarrow out}} = \delta h_{f_{in \rightarrow 1}} + \delta h_{f_{1 \rightarrow 2}} + \delta h_{f_{2 \rightarrow out}} \quad (2.12)$$

Από την εφαρμογή της σχέσης Bernoulli μεταξύ των διατομών *in* και (1) αφενός και των (2) και *out* αφ' ετέρου προκύπτει ότι :

$$H'_{in} = H'_1 - \delta h_{f_{in} \rightarrow 1} \quad (2.13)$$

$$H'_{out} = H'_2 - \delta h_{f_{2 \rightarrow out}} \quad (2.14)$$

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

$$H_u = H'_2 - H'_1 + \delta h_{1 \rightarrow 2} \quad (2.15)$$

Αφαιρώντας κατά μέλη τις σχέσεις (2.13) και (2.14) και λαμβάνοντας υπόψη τη σχέση (2.15), προκύπτει η παρακάτω σχέση (2.16):

$$H = H'_{out} - H'_{in} = H'_2 - H'_1 - (\delta h_{f_{in} \rightarrow 1} + \delta h_{f_{2 \rightarrow out}}) = H_u - (\delta h_{f_{in} \rightarrow 1} + \delta h_{f_{1 \rightarrow 2}} + \delta h_{f_{2 \rightarrow out}}) \quad (2.16)$$

η οποία τελικά δίνει την σχέση: $H = H_u - \delta h_{f_{in} \rightarrow out} \quad (2.17)$

Σύμφωνα με τη σχέση (2.17) η ανά μονάδα μάζας ενέργεια H την οποία παραλαμβάνει το υγρό από τη διατομή εισόδου μέχρι τη διατομή εξόδου της αντλίας είναι ίση προς την ενέργεια H_u (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 δια 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 :

$$n_h = H / H_u \quad (2.18)$$

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

$$\delta h_{fin-out} = \delta h_T + \delta h_a \quad (2.19)$$

2.2.4.2 Ογκομετρικός βαθμός απόδοσης

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

Η στρεφόμενη περωτή περιβάλλεται από το ακίνητο κέλυφος της αντλίας και το οποίο εξασφαλίζει την στεγανότητα της αντλίας με τον εξωτερικό χώρο. Στη διατομή εξόδου της περωτής 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 Bernoulli 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 περωτής και του σταθερού κελύφους και η οποία συμβολίζεται με δQ . Η παροχή αυτή δQ εισέρχεται και πάλι στην περωτή και παραλαμβάνει από αυτήν ενέργεια την οποία καταναλώνει στη συνεχή αυτή ανακυκλοφορία. Από την αρχή της συνέχειας θα είναι προφανώς :

$$Q_u = Q + \delta Q \quad (2.20)$$

Ως ογκομετρικός βαθμός απόδοσης της αντλίας ορίζεται ο λόγος :

$$n_Q = \frac{Q}{Q_u} = 1 - \left(\frac{\delta Q}{Q_u} \right) \quad (2.21)$$

2.2.4.3 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 απώλειες τριβής των στρεφομένων μερών της αντλίας και το υπόλοιπο N_u , η περιφερειακή ισχύς της περωτής, διατίθεται στη περωτή ώστε να μετατραπεί σε υδραυλική ενέργεια του διακινούμενου ρευστού. Άρα :

$$N = N_m + N_u \quad (2.22)$$

Ο μηχανικός βαθμός απόδοσης n_m ορίζεται ως ο λόγος :

$$n_m = \frac{N_u}{N} \quad (2.23)$$

2.2.4.4 Ολικός βαθμός απόδοσης

Ο ολικός βαθμός απόδοσης της αντλίας ορίζεται ως ο λόγος :

$$n = \frac{N_i}{N} = \rho \cdot g \cdot H \cdot \frac{Q}{N} \quad (2.24)$$

$$\text{ή} \quad N = \rho \cdot g \cdot H \cdot \frac{Q}{n} \quad (2.25)$$

λαμβάνοντας υπόψη τις σχέσεις ορισμού (2.18), (2.21) και (2.23) των βαθμών απόδοσης υδραυλικού n_h , ογκομετρικού n_Q και μηχανικού n_m θα είναι :

$$N = \frac{N_u}{n_m} = \frac{\gamma \cdot H_u \cdot Q_u}{n_m} = \frac{\gamma \cdot H \cdot Q}{(n_h \cdot n_Q \cdot n_m)} \quad (2.26)$$

Από τις σχέσεις (2.25) και (2.26) προκύπτει ότι :

$$n = n_m \cdot n_h \cdot n_Q \quad (2.27)$$

Δηλαδή ο ολικός βαθμός απόδοσης είναι το γινόμενο των τριών βαθμών απόδοσης, υδραυλικού n_h , ογκομετρικού n_Q και μηχανικού n_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 η τιμή των n_Q και n_m είναι πολύ υψηλή με αποτέλεσμα η τιμή του ολικού βαθμού απόδοσης να διαμορφώνεται κύρια από τη τιμή του υδραυλικού βαθμού απόδοσης οπότε το μέγιστο του ολικού βαθμού απόδοσης (για σταθερή ταχύτητα περιστροφής) να συμπίπτει, με πολύ καλή προσέγγιση με το σημείο λειτουργίας όπου γίνεται μέγιστος ο υδραυλικός βαθμός απόδοσης.

2.3 Νόμοι ομοιότητας φυγοκεντρικών αντλιών

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

Έστω φυγοκεντρική 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 τόση ώστε :

$$\frac{Q'}{Q} = \frac{n}{n'} \quad \text{ή} \quad n' = \left(\frac{Q'}{Q} \right) \cdot n \quad (2.28)$$

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

$$\frac{H'}{H} = \left(\frac{n}{n'} \right)^2 \quad \text{ή} \quad H' = \left(\frac{n}{n'} \right)^2 \cdot H \quad (2.29)$$

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

$$\frac{N'}{N} = \left(\frac{n}{n'} \right)^3 \quad \text{ή} \quad N' = \left(\frac{n}{n'} \right)^3 \cdot N \quad (2.30)$$

2.4 Καμπύλες λειτουργίας των δυναμικών αντλιών.

2.4.1 Υπολογισμός χαρακτηριστικής καμπύλης αντλίας.

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

Όταν όμως η αντλία τοποθετηθεί να εργάζεται 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 «βάνα» 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.

2.4.2 Χαρακτηριστική καμπύλη ύψους-παροχής

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

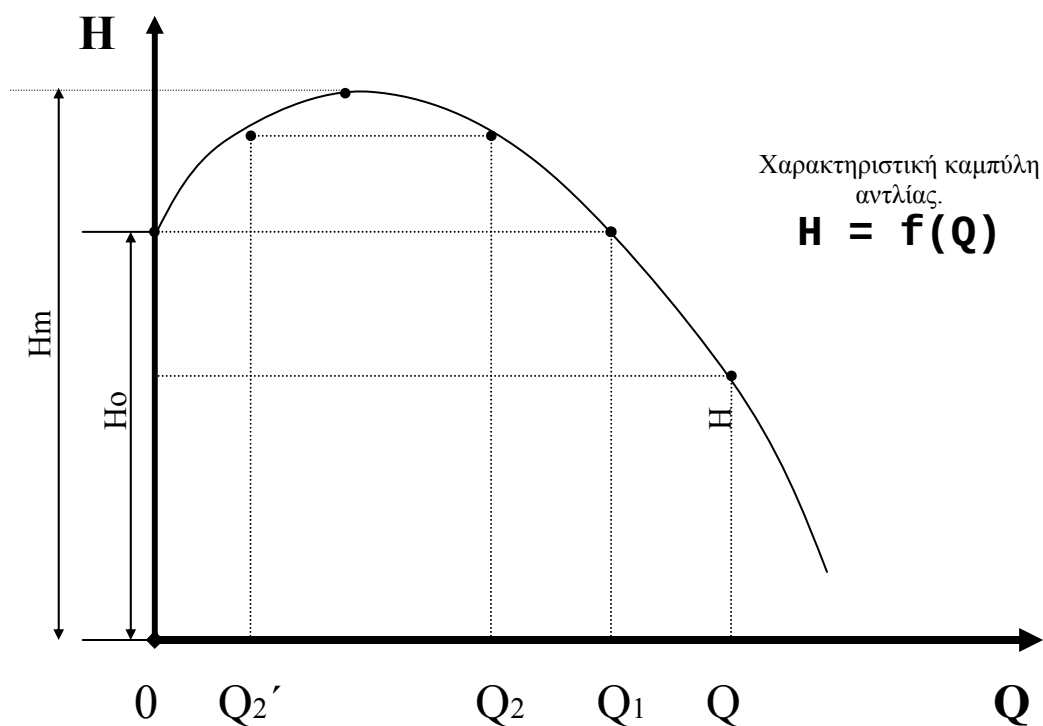
Αν κλείσουμε τελείως την δικλείδα στο στόμιο κατάθλιψης της αντλίας, η πίεση που ασκείται στο σημείο εκείνο παίρνει μια οριακή τιμή H_0 που προσεγγίζει το μανομετρικό ύψος της αντλίας. Το μανομετρικό αυτό ύψος της αντλίας (H_0), όταν η αντλία λειτουργεί με κλειστή βάνα (με παροχή $Q = 0$) ονομάζεται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

Αν μειωθεί λίγο το μανομετρικό ύψος, η παροχή παίρνει μια μεγάλη τιμή (Q_1) 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 Q_1 , ($Q > Q_1$) 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 Q_1 και αυξήσουμε λίγο το μανομετρικό ύψος, 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 Q_1 . Η τιμή Q_2 του σχήματος είναι μικρότερη από την τιμή Q_1 . Αλλά στην περιοχή αυτή της καμπύλης $H = f(Q)$ παρατηρούμε ότι το μανομετρικό δίνει δύο τιμές παροχής Q_2 και Q_2' έτσι υπάρχει κίνδυνος η παροχή να πέσει απότομα από την τιμή της Q_2 στη τιμή της Q_2' ή να γίνει μηδέν.

Πράγματι αυτό συμβαίνει όταν λειτουργεί η αντλία 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 (παράγραφος 3.1), 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 $H = f(Q)$.



Σχήμα 2.2
Χαρακτηριστική καμπύλη αντλίας (ύψους-παροχής).

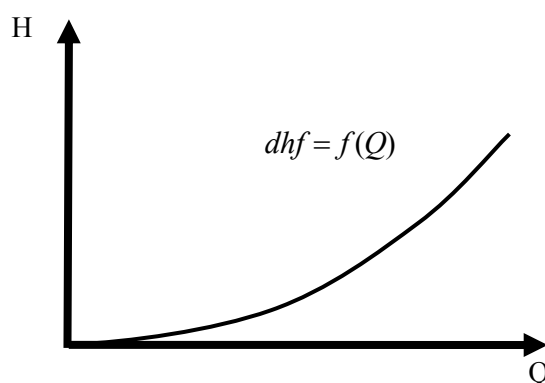
2.5 Χαρακτηριστική καμπύλη εγκατάστασης - σωληνογραμμής.

Στη σχέση (2.28) των νόμων ομοιότητας των αντλιών (παράγραφος 2.3)

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2, \text{ αν αντικατασταθεί ο λόγος } \frac{n_1}{n_2} \text{ με το ίσο του } \frac{Q_1}{Q_2} \text{ τότε προκύπτει η}$$

νέα σχέση $\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{Q_1}{Q_2} \right)^2$ που σημαίνει 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 dhf που είναι η μεταβολή των απωλειών φορτίου λόγω απωλειών στους σωλήνες, συναρτήσει της παροχής, απεικονίζει καμπύλη της μορφής του **Σχήματος 2.3** :

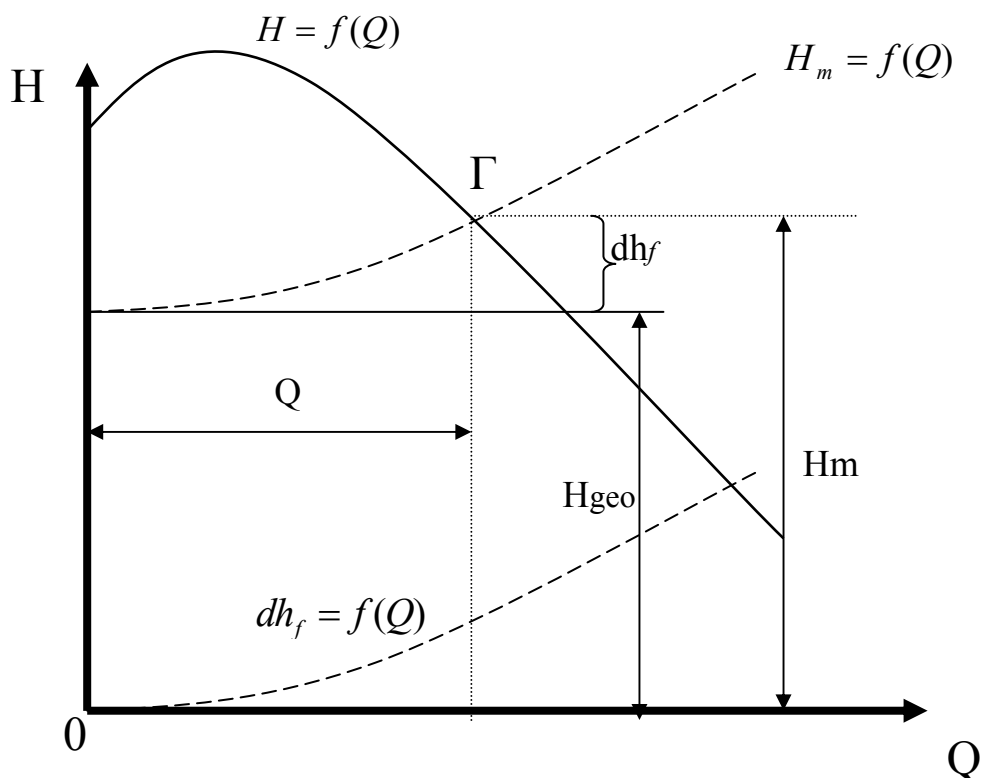


Σχήμα 2.3
Χαρακτηριστική καμπύλη εγκατάστασης (σωληνώσεως)

Η καμπύλη $dhf = f(Q)$ 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 ισχύει ότι $H_{geo} = C$ (C =σταθερό) ή αλλιώς $dH_{geo} = 0$,
2. Το ύψος απωλειών λόγω τριβών h_f που μεταβάλλεται (dh_f) σύμφωνα με την παρακάτω 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 $H_m = f(Q)$.

2.6 Καθορισμός του σημείου λειτουργίας αντλητικής εγκατάστασης

Διακίνηση υγρού μεταξύ δεξαμενών ελεύθερης επιφάνειας: 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 :

$$H_{out}^t = H_K + z_a + c_K^2 / 2g = H_{atm} + z_K + \delta h_{fK} \quad (2.31)$$

$$H_{in}^t = H_A + z_a + c_A^2 / 2g = H_{atm} + z_A - \delta h_{fA} \quad (2.32)$$

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 :

$$H = H_{out}^t - H_{in}^t = H_{geo} + (\delta h_{fK} + \delta h_{fA}) = H_{geo} + \delta h_{fAK} \quad (2.33)$$

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 (2.33) 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 υγρό, 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_{AK} .

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

$$\delta h_{fAK} = \sum \lambda_i \frac{l_i}{d_i} \frac{c_i^2}{2g} + \sum \zeta_K \frac{c_K^2}{2g} \quad (2.34)$$

Στην σχέση (2.34), ο πρώτος όρος εκφράζει τις γραμμικές απώλειες στα διάφορα τμήματα i 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 ως γνωστόν συνάρτηση της σχετικής τραχύτητας του αγωγού και του αριθμού Reynolds ($Re_i = c_i \cdot d_i / \nu$) 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. Ο κρίσιμος αριθμός Reynolds βάση του οποίου μπορεί να χαρακτηριστεί μια ροή στρωτή ή τυρβώδης είναι $Re_{cr} \approx 2320$. Για $Re_{cr} > 2320$, η ροή θεωρείται τυρβώδης ενώ για $Re_{cr} < 2320$, η ροή θεωρείται στρωτή. 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 :

$$Q = c_i \cdot A_i = c_K \cdot A_K \quad (2.35)$$

στην οποία με A συμβολίζεται η διατομή των τμημάτων της σωλήνωσης και των εξαρτημάτων της. Άρα η σχέση (2.34) εκφράζεται ως :

$$\Delta h_{fAK} = \left[\sum \lambda_i \frac{l_i}{d_i} \cdot \frac{1}{2gA_i^2} + \sum \zeta_K \frac{1}{2gA_K^2} \right] \cdot Q^2 = \zeta_{AK} \cdot Q^2 \quad (2.36)$$

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 :

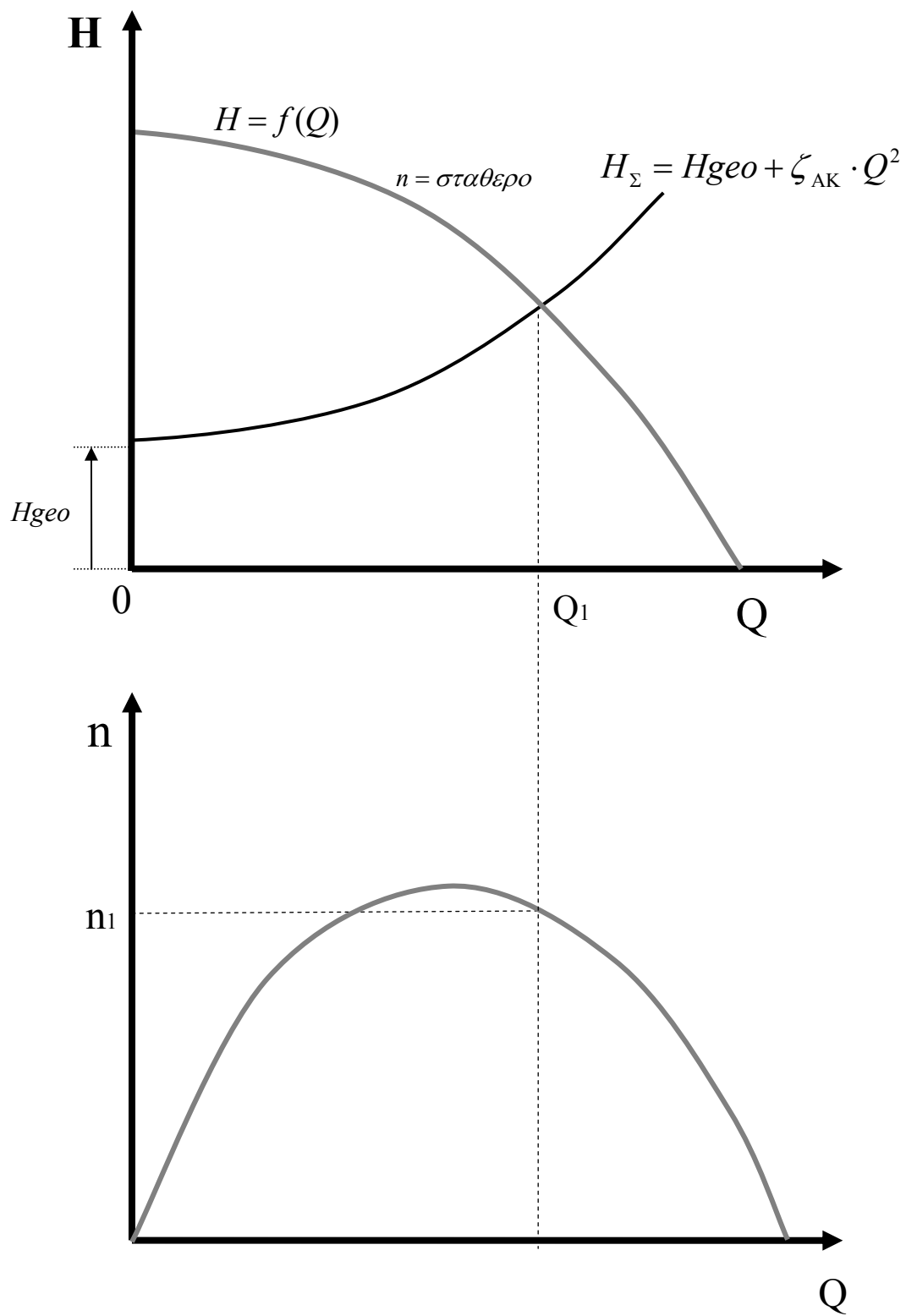
$$H = H_\Sigma = H_{geo} + \zeta_{AK} \cdot Q^2 \quad (2.37)$$

Η σχέση (2.37) 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_Σ είναι ίση προς την

ενέργεια H_{geo} κατά την οποία αυξάνεται η ανά μονάδα μάζας ενέργεια 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 $H_{\Sigma} = f(Q)$. 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 $H_{\Sigma} = f(Q)$ της σωλήνωσης (**Σχήμα 2.5.α**) οπότε ικανοποιείται η σχέση (2.33).

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 την αντλία, όπως εκφράζεται από τη χαρακτηριστική λειτουργίας της (H_m, Q) . Από τη χαρακτηριστική του ολικού βαθμού απόδοσης (η, 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 :

$$N = \frac{Y * H_m * Q}{\eta} \quad (2.38)$$



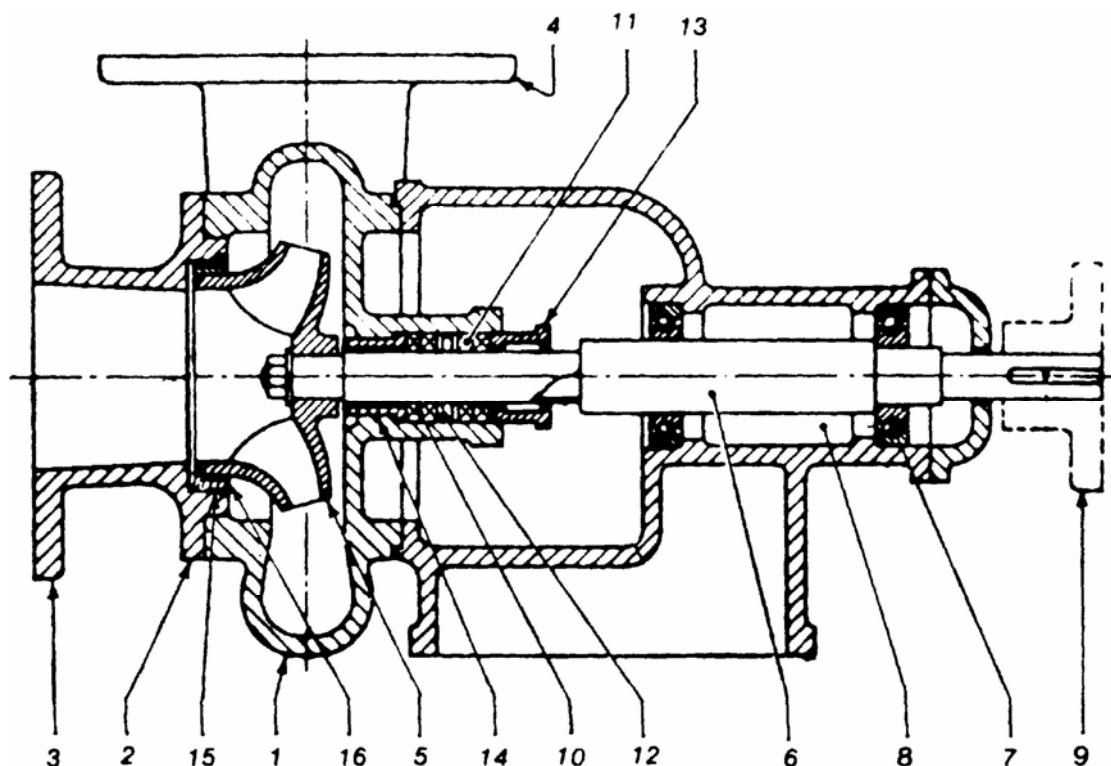
Σχήματα 2.5.α και 2.5.β
Εύρεση του σημείου λειτουργίας αντλητικής εγκατάστασης.

2.7 Διαμόρφωση αντλιών

2.7.1 Τα εξαρτήματα της αντλίας.

Ο αριθμός των εξαρτημάτων, η διάταξη τους και η εξωτερική εμφάνιση μιας αντλίας εξαρτώνται από την προτίμηση του κατασκευαστή και από τις ειδικές συνθήκες εργασίας για τις οποίες έχει κατασκευαστεί. Κάθε αντλία πρέπει να συνοδεύεται από βιβλίο οδηγιών για την τοποθέτηση, το χειρισμό και τη συντήρηση της. Στο ίδιο βιβλίο πρέπει να υπάρχει σχέδιο της αντλίας και κατάλογος των εξαρτημάτων.

Τα βασικά εξαρτήματα μιας τυπικής φυγοκέντρου αντλίας (**Σχήμα 2.6**) είναι το σπειροειδές περίβλημα (θάλαμος, σαλίγκαρος), το *κάλυμμα* με το στόμιο εισόδου του υγρού και τη φλάντζα για τη σύνδεση του σωλήνα αναρροφήσεως, η *χοάνη καταθλίψεως* (έξοδος του υγρού) με τη φλάντζα για τη σύνδεση του σωλήνα καταθλίψεως και ο *άξονας* της αντλίας που δίνει την κίνηση στην *περωτή* 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 δακτύλιους 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 δούμε στην περιγραφή της περωτής υπάρχει πάντοτε διαφορά πίεσεως μεταξύ του στομίου εισόδου του υγρού και του εσωτερικού της περωτής. Η διαφορά πίεσεως προκαλεί διαρροή του υγρού από το διάκενο μεταξύ της περιστρεφόμενης περωτής και του καλύμματος. Για τη μείωση της διαρροής αυτής τοποθετούνται δακτύλιοι στεγανώσεως στα χείλη επαφής της περωτής και του καλύμματος.



Σχήμα 2.6

Σχηματικό διάγραμμα μονοβάθμιας φυγοκέντρον αντλίας.

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

- 1) Σπειροειδές περίβλημα (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.

2.7.2 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.

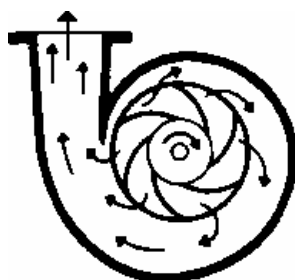


Σχήμα 2.7

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.

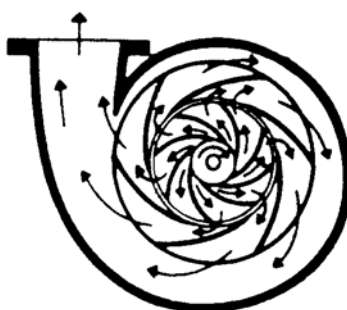
Το σχήμα του περιβλήματος είναι σπειροειδές (**Σχήμα 2.8**) και η περωτή τοποθετείται έτσι ώστε το υγρό, το οποίο φεύγει από την περωτή υπό την επίδραση της φυγοκέντρου δύναμεως και ωθείται προς τη χοάνη καταθλίψεως, να κινείται σε αγωγό με διάμετρο συνεχώς αυξανόμενη. Η προοδευτική αύξηση της διατομής του αγωγού του περιβλήματος είναι τέτοια ώστε η παροχή ανά μονάδα επιφανείας 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 ελάττωση αυτή της ταχύτητας του υγρού μετά την έξοδο από την περωτή της αντλίας είναι απαραίτητη, διότι αν το υγρό οδηγηθεί στο σωλήνα καταθλίψεως με την ταχύτητα που έχει κατά την έξοδο από την περωτή, 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 περωτή σχηματίζονται δίοδοι με προοδευτικά αυξανόμενη διατομή προσθέτοντας μια σειρά μη κινουμένων πτερυγίων. Καθώς το υγρό διέρχεται μέσα από τις διόδους που σχηματίζουν τα πτερύγια διαχύσεως, αλλάζει η διεύθυνση κινήσεως του με παράλληλη μείωση της ταχύτητας, ενώ η πίεση αυξάνεται προτού 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 ενώ 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 κοχλίου και η διατομή του σχεδόν σταθερή. Η βελτίωση όμως του βαθμού αποδόσεως 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 επιζητείται 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 κοχλίου υπολογίζεται έτσι ώστε, η ταχύτητα ροής σε αυτό να κυμαίνεται μεταξύ 2- 3,5 m/sec . Η σύνδεση με το σωλήνα καταθλίψεως επιτυγχάνεται μέσω φλάντζας η οποία τοποθετείτε στο στόμιο καταθλίψεως. Η διάμετρος του στομίου καταθλίψεως d_k πρέπει να αντιστοιχεί στην εσωτερική διάμετρος του σωλήνα καταθλίψεως.

2.7.3 Η πτερωτή της αντλίας

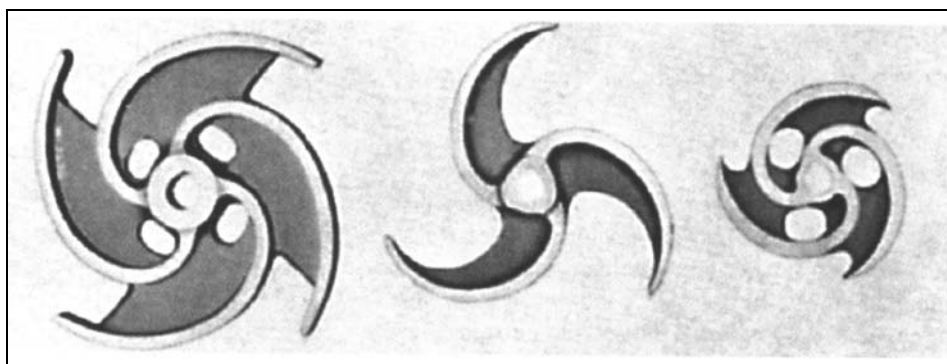
Υπάρχουν τρία βασικά είδη πτερωτών τα οποία είναι τα εξής :

- **Αντλίες με κλειστά πτερύγια:** Ο δρομέας στις 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.



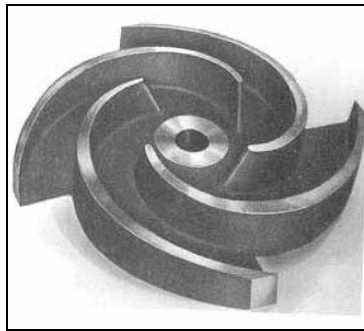
Σχήμα 2.9
Πτερύγιο κλειστού τύπου

- **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 2.10
Πτερύγιο ανοικτού τύπου

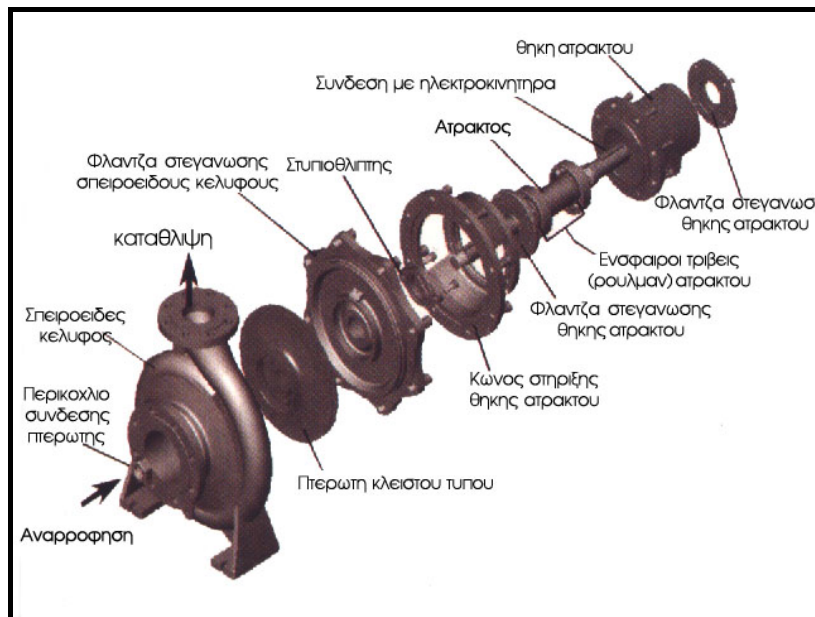
- **Αντλίες με ημίκλειστα πτερύγια:** Η περωτή του ημίκλειστου τύπου αποτελείται από ένα δίσκο. Τα καμπυλωτά πτερύγια είναι τοποθετημένα στην μία πλευρά του δίσκου και από το μέρος της αναρρόφησης του νερού. Μειονέκτημα των αντλιών αυτών βρίσκεται στο ότι δεν πληρούν στεγανότητα μεταξύ πτερυγίων και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



Σχήμα 2.11
Πτερύγιο ημίκλειστου τύπου

2.7.4 Τρισδιάστατα κατασκευαστικά σχέδια αντλιών.

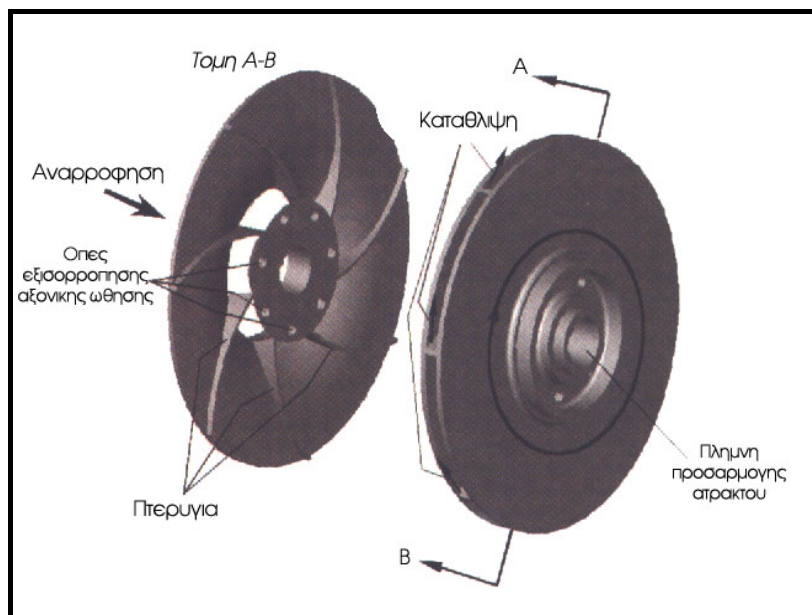
Παρακάτω παραθέτονται κάποια τρισδιάστατα κατασκευαστικά σχέδια συναρμολόγησης αντλίας στα οποία φαίνονται αναλυτικά όλα τα επιμέρους τμήματα της, με την ονομασία τους.



Σχήμα 2.12

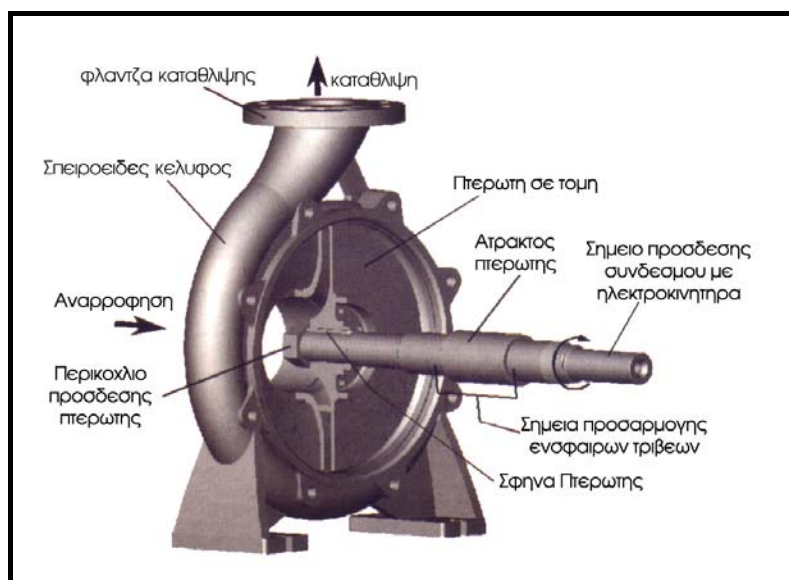
Η γενική διάταξη των επιμέρους εξαρτημάτων, τυπικής φυγοκεντρικής αντλίας. Περιλαμβάνει :

- (α) το σπειροειδές κέλυφος.
- (β) την πτερωτή.
- (γ) την άτρακτο.
- (δ) τη θήκη με τους τριβείς της ατράκτου.
- (ε) τα εξαρτήματα σύνδεσης του συγκροτήματος της θήκης της ατράκτου με την πτερωτή και το σπειροειδές κέλυφος.
- (στ) το στυπιοθλίπτη.



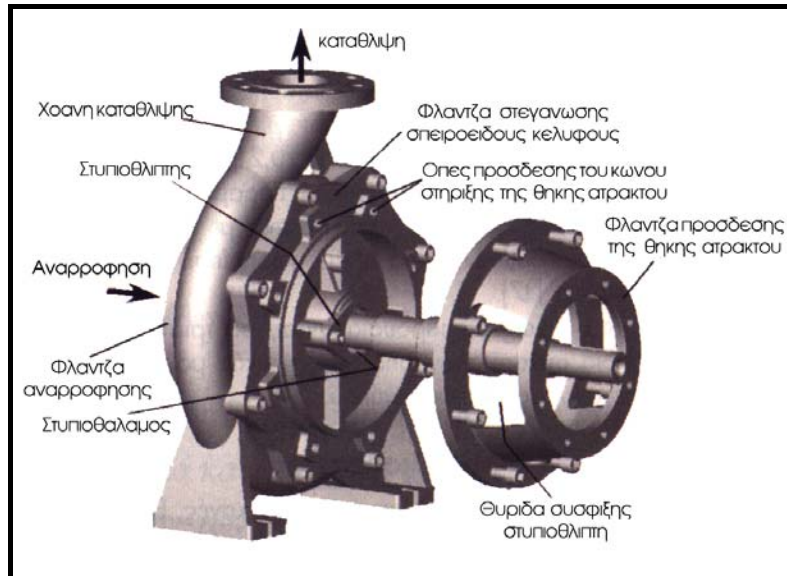
Σχήμα 2.13

Πτερωτή κλειστού τύπου φυγοκεντρικής αντλίας. Η πτερωτή μπορεί να είναι και ανοικτού ή ημίκλειστου τύπου και συνήθως φέρει αξονικές οπές τόσο για τη ζυγοστάθμισή της όσο και την εξισορρόπηση της αξονικής ώθησης της άτρακτου. Τα πτερύγια έχουν αντίθετη κλίση από τη φορά περιστροφής της πτερωτής, ώστε να ωθείται το ρευστό προς τη χοάνη κατάθλιψής.



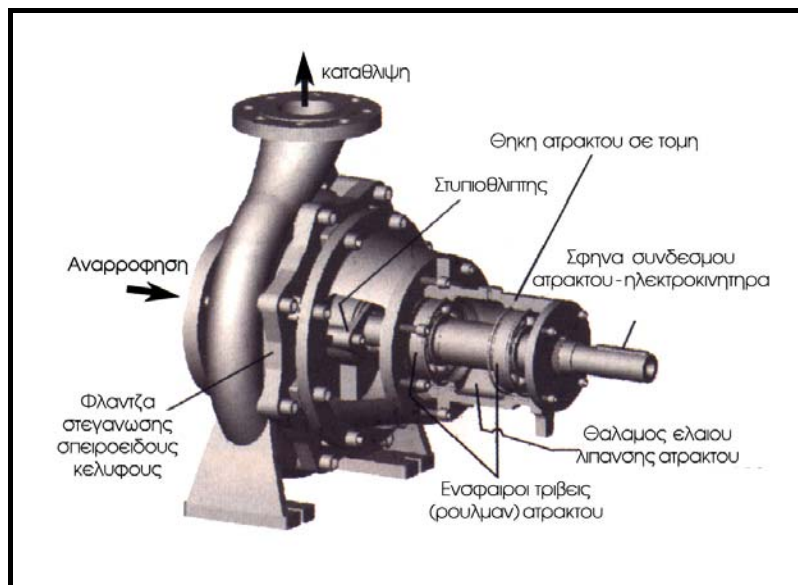
Σχήμα 2.14

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



Σχήμα 2.15

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 στεγάνωσης του σπειροειδούς κελύφους ωθώντας τη σαλαμάστρα προς την άτρακτο.



Σχήμα 2.16

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

Το φαινόμενο της σπηλαίωσης στις αντλίες

3.1 Η σπηλαίωση γενικά

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

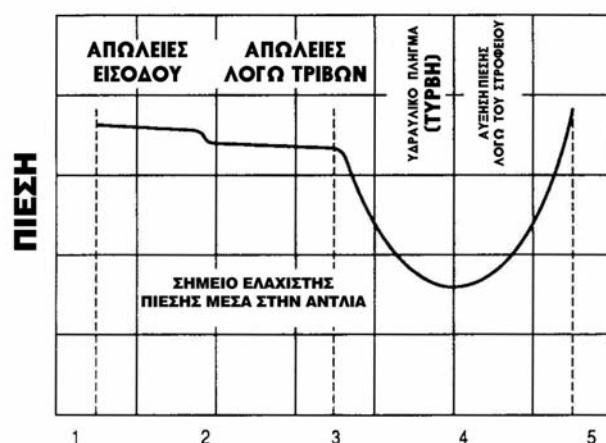
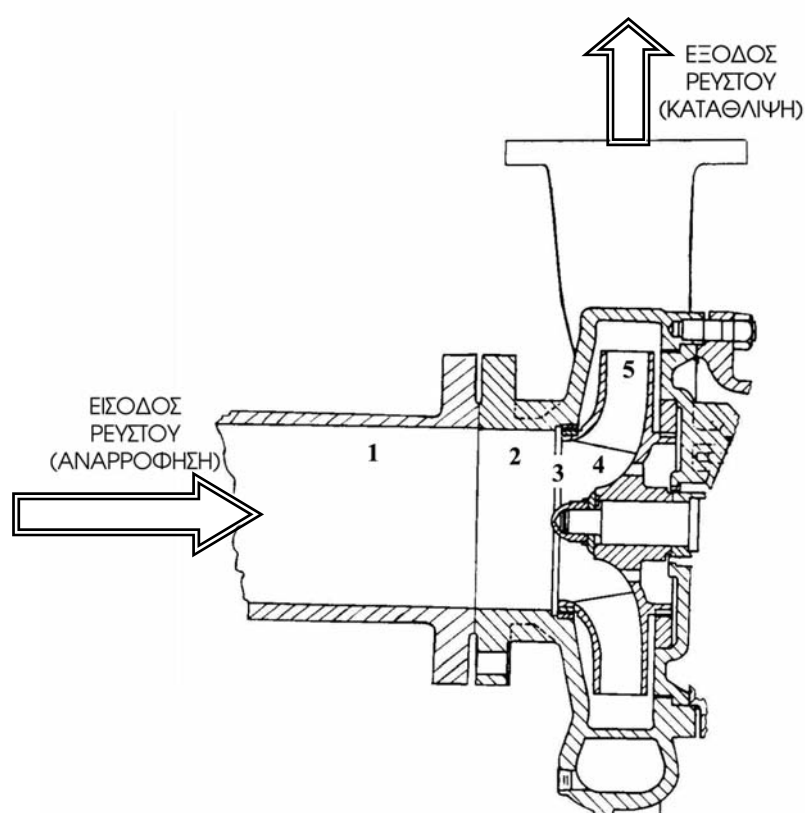
Μια ξαφνική αύξηση της τοπικής ταχύτητας του αντλούμενου υγρού προκαλεί πτώση της τοπικής πίεσης, μερικές φορές κάτω από την πίεση ατμοποίησης του υγρού. Το αποτέλεσμα είναι η ατμοποίηση του υγρού και η ανάπτυξη ενός θύλακα η «σπηλαίας ατμού» ατμού δηλ. ατμοποιημένου υγρού και φυσαλίδων. Όμως, η πίεση 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 μιας (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 σπηλαίωση τέτοιου τύπου θα μας απασχολήσει ιδιαίτερα σε παρακάτω παραγράφους.

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 από την φλάντζα της αντλίας, αλλά και καθώς ρέει μέσα σε αυτήν και συναντά το στροφείο, εμφανίζεται πτώση της πίεσης του. Το ποσοστό της πτώσης πίεσης είναι συνάρτηση πολλών παραγόντων, περιλαμβανομένου και την γεωμετρία του σχεδιασμού, την ταχύτητα περιστροφής, τις απώλειες λόγω τριβών αλλά και τις 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 εξατμηση του υγρού ή αλλιώς το φαινόμενο της σπηλαίωσης.

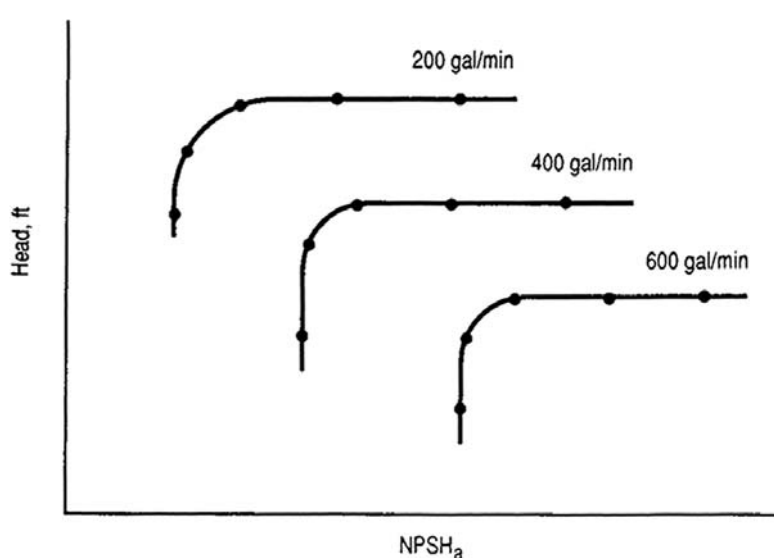


Σχήμα 3.1
Πτώση πίεσης του ρευστού κατά την κίνηση του μέσα στην αντλία

Το ελάχιστο μανομετρικό που απαιτείται ώστε να αποφευχθεί η σπηλαίωση 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 διάφορα 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 αναρροφήσεις» ή «Net Positive Suction Head *available*» (NPSH_a).

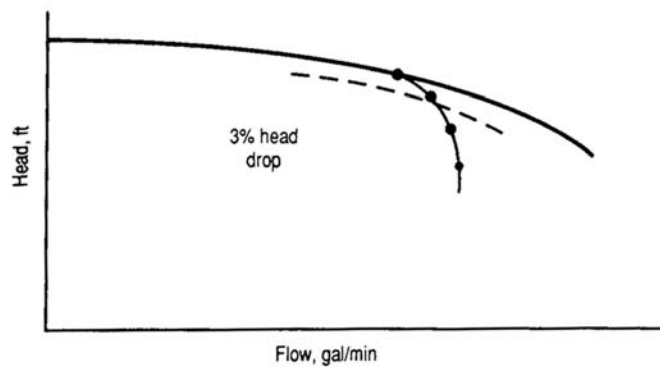
Οι κατασκευαστές αντλιών καθορίζουν το NPSH_r κάποιου σχεδιασμού στροφείου διεξάγοντας κάποια test χρησιμοποιώντας ως αντλούμενο υγρό το νερό. Αυτά τα test γίνονται συνήθως μια φορά για κάθε σχέδιο στροφείου και όχι σε κάθε ξεχωριστή αντλία.

Ο κύριος σκοπός όλων αυτών των test είναι να καθορίσουμε τις απαιτήσεις σε NPSH, για διάφορες παροχές για ένα δεδομένο συνδυασμό σχέδιο στροφείου-κελύφους και να σχεδιάσουμε καμπύλες του NPSH_r σε συνάρτηση της παροχής (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 σπηλαίωσης, 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 σπηλαίωση σε κάποια μεγαλύτερη παροχή πριν παρατηρηθεί πτώση στην απόδοση της αντλίας.



Σχήμα 3.2

Καμπύλες μανομετρικού συνάρτησει του NPSH_a για διάφορες παροχές

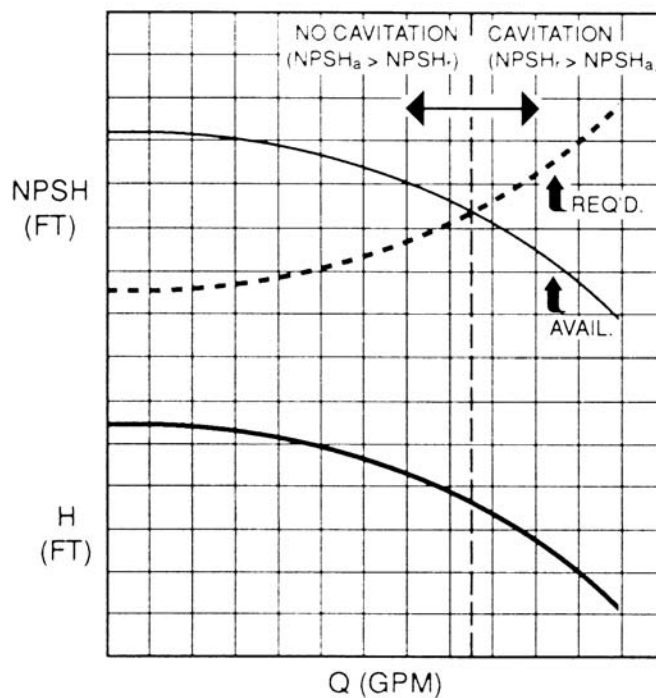


Σχήμα 3.3

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 στροφείο του ίδιου σχεδιασμού. Αυτή η διάφορα οφείλεται στις διαφορές στην επιφάνεια στο μάτι του στροφείου, περιλαμβάνοντας επίσης τις γωνίες των περύγιων, την κατεργασία επιφανειών και τις διόδους από τις οποίες περνάει το ρευστό. Επίσης στις διαφορές στην επιφάνεια του ακροφυσίου αναρρόφησης, εισόδου του ρευστού.

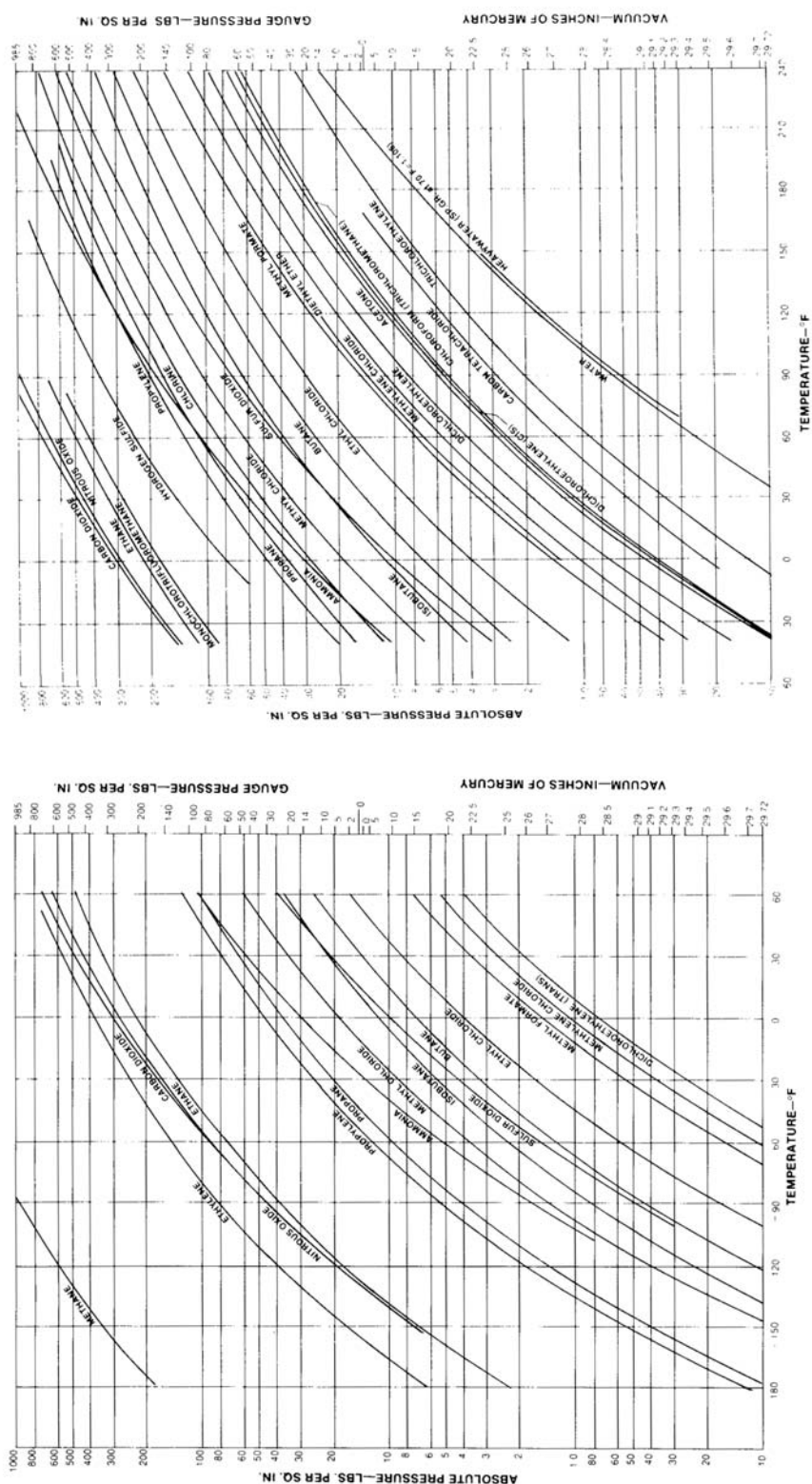
Επιπλέον το NPSHr στην πραγματικότητα, θα τείνει να αυξηθεί με την μείωση της παροχής. Συνεπώς είναι απαραίτητη η ύπαρξη μιας καμπύλης η οποία να περιλαμβάνει το NPSHr και δίδεται από τον κατασκευαστή αλλά και το NPSHa στις συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας (Σχήμα 3.4).



Σχήμα 3.4

Μεταβολή των NPSHa και NPSHr με την παροχή

Είναι γεγονός ότι είναι πολύ λίγες οι εφαρμογές στις οποίες η 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 σύνηθες χρώμα). 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 NPSHa 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 περωτής. 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 καθαρό θετικό ύψος αναρρόφησης** H_H το οποίο αναφέραμε στην παράγραφο 3.2, γνωστό και ως NPSHa για την αντλία με την παρακάτω σχέση (4.1).

$$NPSH = H_H = \left(\frac{P_A - P_s}{\rho \cdot g} + \frac{C_A^2}{2 \cdot g} \right) \quad (3.1)$$

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

$$h_{A\max} = \left(\frac{P_1 - P_s}{\rho \cdot g} + \frac{C_1^2}{g} - \Delta h_{fA} - H_H \right) \quad (3.2)$$

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 σπηλαίωσης 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 σπηλαίωσης 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 σπηλαίωσης που εντοπίζεται σε εγκαταστάσεις διαδικασίας. Γενικά εμφανίζεται λόγω της ανεπάρκειας του διαθέσιμου καθαρού θετικού ύψους αναρρόφησης (NPSHa) ή λόγω του φαινομένου της εσωτερικής επανακυκλοφορίας (παράγραφος 3.6.2). Γενικά η σπηλαίωση 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 σπηλαίωση, κυμαίνεται από ένα μικρό ποσοστό διάβρωσης μετά από τα χρόνια λειτουργία ως και πλήρης καταστροφή της αντλίας σε μια σχετικά μικρή χρονική περίοδο.

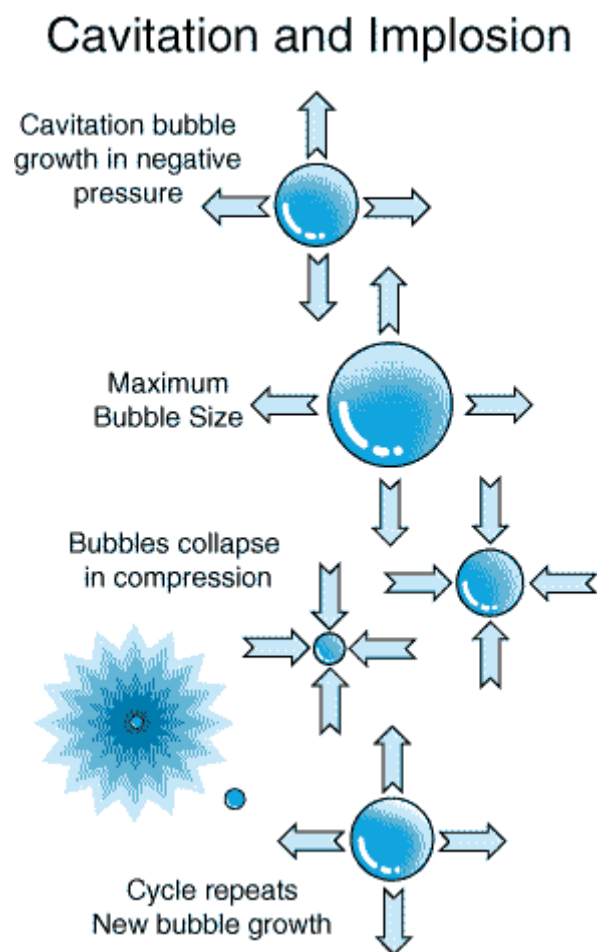
Gaseous cavitation: εμφανίζεται όταν κάποιο αέριο (ο συνηθέστερα αέρας) εισάγεται μέσα σε μια φυγοκεντρική αντλία μαζί με το υγρό. Μια φυγοκεντρική αντλία μπορεί να χειριστεί τον αέρα σε ποσοστό $\frac{1}{2} \%$ του όγκου. Εάν το ποσοστό αέρα αυξηθεί σε ποσοστό 6 %, εμφανίζεται σπηλαίωση στην αντλία. Η συνθήκη σπηλαίωσης αναφέρεται επίσης ως “Air binding”. Σπάνια, προκαλεί ζημία στο στροφείο 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 σπηλαίωσης, αρχικά πρέπει να κατανοηθεί ο μηχανισμός της δημιουργίας αυτού του φαινομένου, δηλ. πώς η σπηλαίωση εμφανίζεται. Επίσης θα πρέπει να αναφερθεί ότι, εάν δεν διευκρινίζεται, με τον όρο σπηλαίωση ή αλλιώς κλασσική σπηλαίωση θα εννοούμε την “Vaporous cavitation”.

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

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 βάση κάποιων συμβατικών και εμπειρικών κανόνων. Το παρακάτω **Σχήμα 3.6** περιγράφει τον κύκλο ζωής μιας φυσαλίδας ατμού.



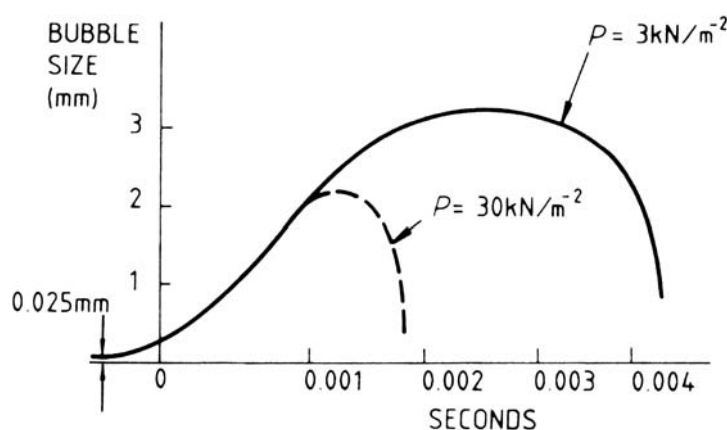
Σχήμα 3.6

Σχηματική αναπαράσταση του κύκλου ζωής μιας φυσαλίδας.

3.4.1 Δημιουργία και κατάρρευση των φυσαλίδων

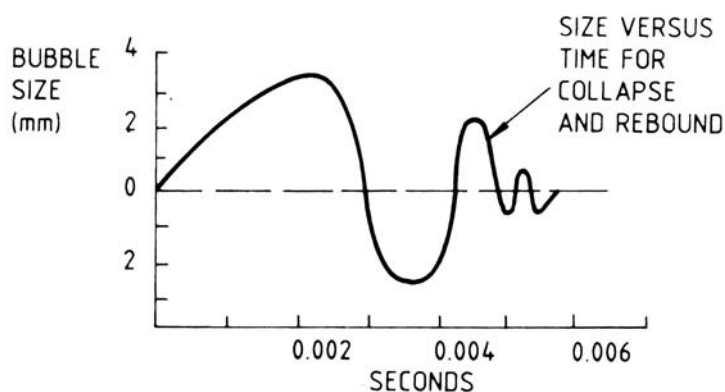
Θεωρητικά, οι κοιλότητες (σπηλαίες), δημιουργούνται, όταν το επίπεδο της τοπικής πίεσης του υγρού, είναι ίσο με την τάση ατμού στις συγκεκριμένες τοπικές συνθήκες. Στην πραγματικότητα, οι φυσαλίδες σχηματίζονται σε υψηλότερα επίπεδα πίεσης, που οφείλεται εν μέρει στην παρουσία κάποιων πολύ μικρών φυσαλίδων ή σωματιδίων κατάλοιπων τριβών που ενεργούν σαν έναυσμα του φαινομένου. Μια πολύ λεπτομερής επεξεργασία της διαδικασίας θα βρεθεί στη μονογραφία του Knapp et al (1970), τις οποίες, μια πολύ συνοπτική περίληψη θα δοθεί παρακάτω.

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

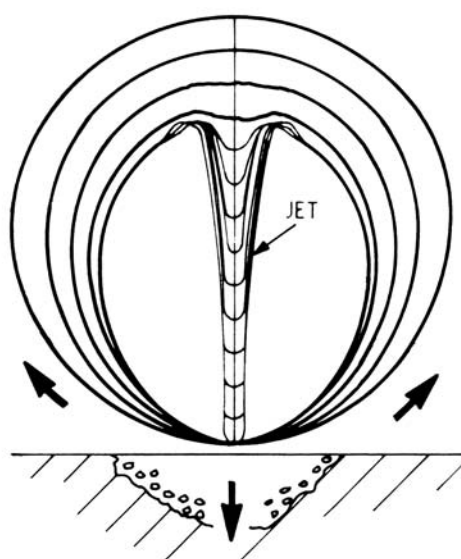
Το ιστορικό εξέλιξης μιας φυσαλίδας για δυο διαφορετικές πιέσεις κατάρρευσης (based on work by Worster (1956))



Σχήμα 3.8

Η τάση προς κατάρρευση και επανασχηματισμού 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 επανασχηματισμό φυσαλίδων που παρατηρήθηκαν κατά την μελέτη της μηχανικής της συμπεριφοράς κοιλοτήτων (σπηλαίων). Για μια λεπτομερέστερη περιγραφή, ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει 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 συσχετίζεται με τη σκληρότητα επιφάνειας.

3.5 Τα βήματα της σπηλαιώσης ειδικότερα

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

Σχηματισμός φυσαλίδων στο εσωτερικό του υγρού



Ανάπτυξη – μεγέθυνση φυσαλίδων



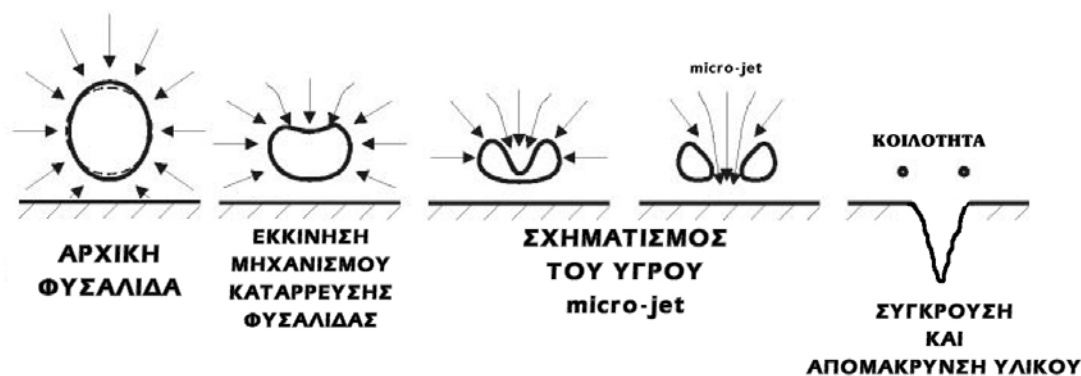
Κατάρρευση φυσαλίδων

Αναλυτικότερα, τα βήματα της σπηλαιώσης είναι :

- **Βήμα 1:** Σχηματισμός των φυσαλίδων στο εσωτερικό του υγρού.
Οι φυσαλίδες σχηματίζονται μέσα στο υγρό όταν αυτό ατμοποιείται δηλ. κατά την αλλαγή φάσης του από υγρό σε ατμό.
- **Βήμα 2:** Ανάπτυξη – μεγέθυνση φυσαλίδων.
Εκτός αν δεν υπάρχει καμία αλλαγή στις συνθήκες λειτουργίας, νέες φυσαλίδες συνεχίζουν να σχηματίζονται και οι παλαιές φυσαλίδες να αυξάνονται σε μέγεθος. Οι φυσαλίδες παρασέρνονται 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.
- **Βήμα 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 επιτυγχάνεται ένα σημείο όπου η πίεση έξω από τη φυσαλίδα είναι μεγαλύτερη από την πίεση μέσα στη φυσαλίδα. Έτσι, στο σημείο αυτό, όπου η στατική πίεση τείνει να αυξηθεί πάνω από την πίεση ατμοποίησης θα πρέπει να επαναυγροποιηθεί η μάζα του ατμού. Η μετάβαση από την φάση του ατμού στην υγρή φάση δεν γίνεται στιγμιαία και γι'αυτό παρατηρείται μια μεταβατική περιοχή στην οποία συνυπάρχουν και οι δυο φάσεις. Η φυσαλίδα 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_Y και της φάσης ατμού ρ_A , (Για το νερό σε θερμοκρασία μικρότερη των 100°C είναι $\rho_Y/\rho_A > 900$), το φαινόμενο της επανυγροποίησης συνοδεύεται τοπικά από σημαντική αύξηση της στατικής πίεσης κρουστικής μορφής. Η αύξηση της κρουστικής μορφής στατικής πίεσης εξηγείται ποιοτικά από το ότι κατά την επανυγροποίηση μιας φυσαλίδας ατμού, ο όγκος υγρού που αντιστοιχεί στην μάζα του ατμού είναι πολύ μικρός. Άρα με την επανυγροποίηση 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.

Έχουν αναφερθεί πιέσεις κατάρρευσης φυσαλίδων μεγαλύτερες από 1 GPa. Αυτό το τοπικά έντονο φαινόμενο της σφυρηλάτησης, μπορεί να δημιουργήσει κοιλότητες στο στροφείο. 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 3.10

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

****Σημείωση :**

Πρέπει να σημειωθεί ότι αυτά που περιγράψαμε στις παραγράφους 3.4, 3.4.1, και 3.5 αναφέρονται σε σπηλαίωση τύπου “Vaporous” όπου έχουμε σχηματισμό φυσαλίδων λόγω ατμοποίησης. Για την περίπτωση της σπηλαίωσης τύπου “Gaseous”, ισχύουν οι μηχανισμοί που περιγράφουμε στις ίδιες παραγράφους, με την μόνη διάφορα ότι δεν έχουμε σχηματισμό φυσαλίδων μέσα στο υγρό λόγω βρασμού. Σε επόμενη παράγραφο, θα περιγράψει η σπηλαίωση του τύπου “Gaseous”, όπως και όλοι οι τύποι της σπηλαίωσης.

3.6 Τα είδη της σπηλαιώσης τύπου “Vaporous”

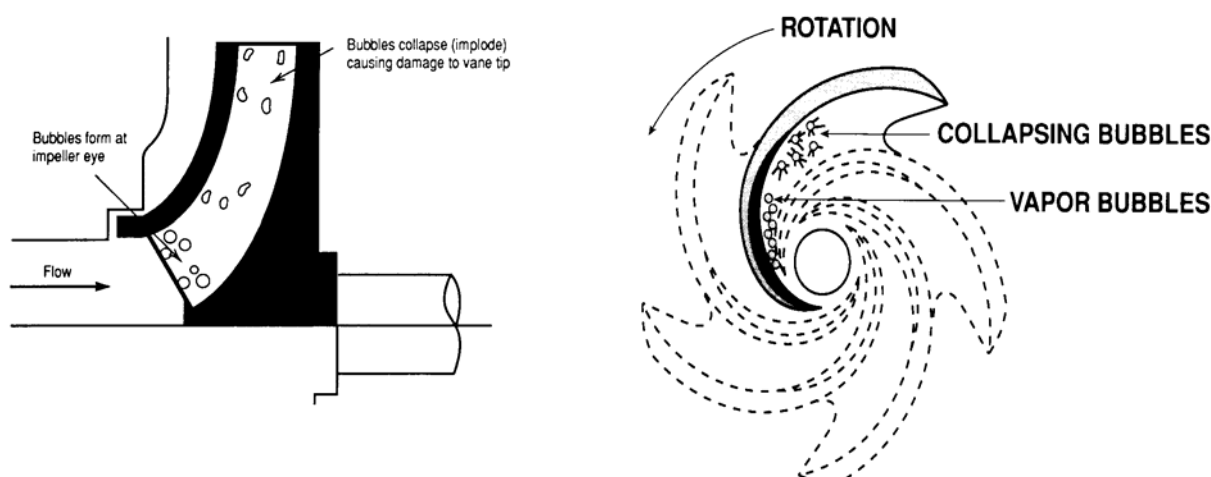
Η σπηλαιώση τύπου “Vaporous” που αναφέραμε στην παράγραφο 3.2, μπορεί να διαχωριστεί σε ακόμη δυο είδη σπηλαιώσης τα οποία θα περιγράψουμε παρακάτω:

- Σπηλαιώση κλασσικού τύπου.
- Σπηλαιώση λόγω επανακυκλοφορίας.

3.6.1 Σπηλαιώση κλασσικού τύπου

Είναι ο τύπος της σπηλαιώσης που περιγράφουμε στις παραγράφους 3.4 και 3.5. 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 η «σπηλαία ατμού» 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.

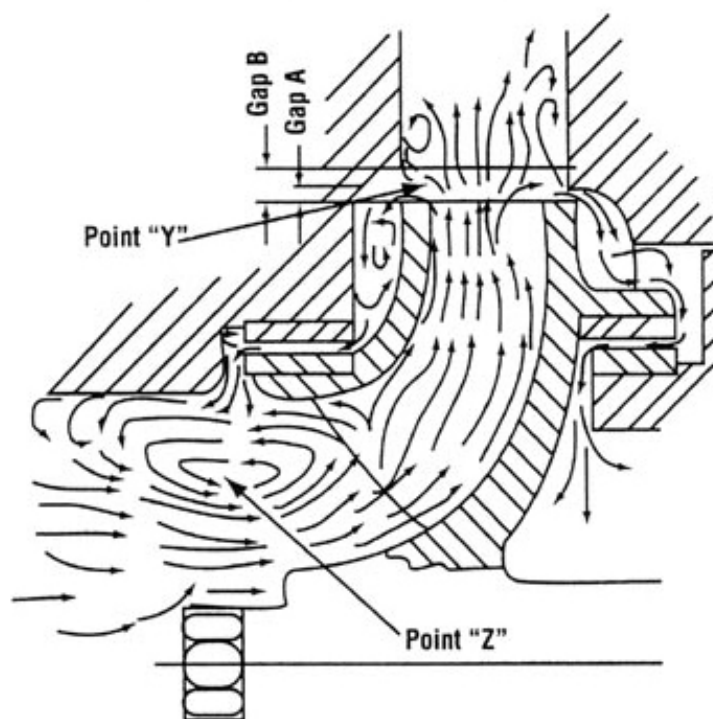
Ειδικότερα, καθώς το στροφείο παράγει έργο στο υγρό, δημιουργούνται διαφορές πιέσεων. Για να μεταδοθεί η ισχύς, μια διαφορά πίεσεως πρέπει να υπάρχει μεταξύ των επιφανειών προσβολής και εκφυγής των πτερυγίων. Διαφορές πιέσεων σημαίνει ότι η πίεση είναι χαμηλότερη σε ορισμένες περιοχές της αντλίας από 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 σπηλαιώσης (Σχήμα 4.11). Ο κυριότερος λόγος εμφάνισης αυτού του τύπου σπηλαιώσης μπορεί να είναι λόγω σημαντικών απωλειών στην σωληνογραμμή του δικτύου.



Σχήμα 3.11
Εμφάνιση του φαινομένου
της κλασσικής σπηλαιώσης.

3.6.2 Σπηλαίωση λόγω επανακυκλοφορίας

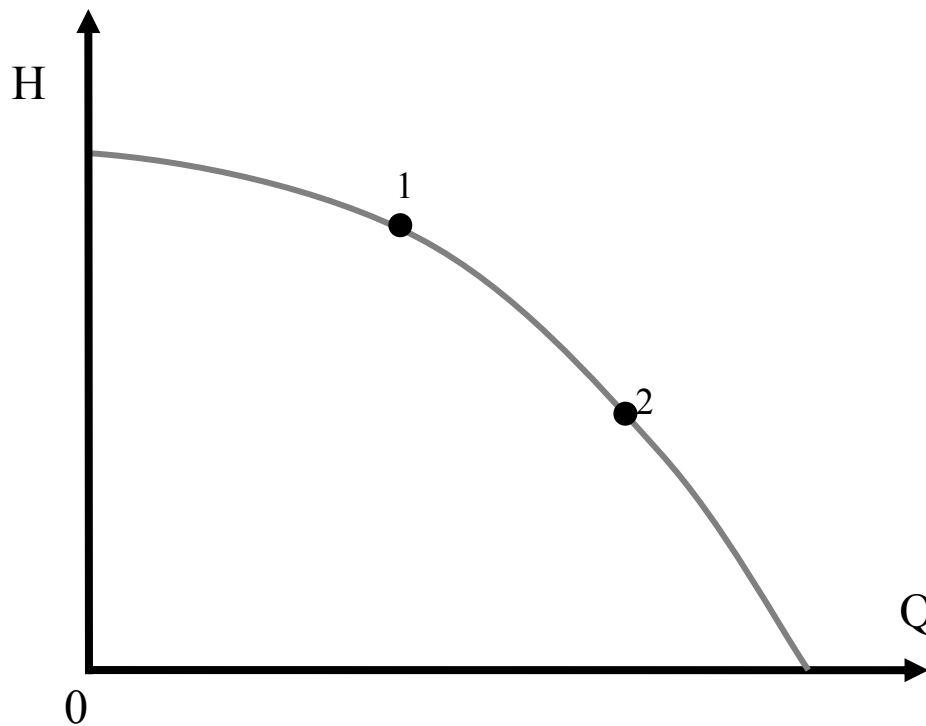
Η σπηλαίωση λόγω επανακυκλοφορίας (αποκαλούμενη επίσης και rotating stall ή και separation) είναι ένας όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει το σχηματισμό θυλάκων ατμού. Αυτός ο τύπος σπηλαίωσης είναι λιγότερο γνωστός και κατανοητός από την κλασσική σπηλαίωση, αν και πιθανά είναι ο πιο συχνός. Συχνότερα, 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.

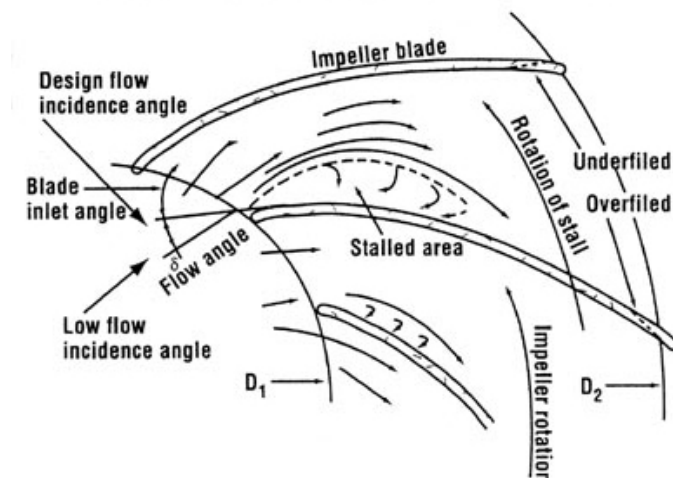
Όταν η αντλία δουλεύει πάνω στην χαρακτηριστική της καμπύλη π.χ. από το σημείο 2 στο σημείο 1 (*Σχήμα 3.13*), ρεύματα λόγω περιδίνησης, αρχίζουν να σχηματίζονται στο “μάτι” του στροφείου. Η εμφάνιση των ρευμάτων αυτών εξηγείται ως εξής : Στιγμιαία, δεν υπάρχει καμία μείωση της παροχής, μέσα στην αντλία όπως είναι αναμενόμενο σύμφωνα με το *Σχήμα 4.13* 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 κλασσική σπηλαίωση λόγω της αρχικής εμφάνισης σπηλαίωσης λόγω επανακυκλοφορίας. Μια άλλη συνέπεια του φαινομένου της επανακυκλοφορίας είναι ότι καθώς το ρευστό ρέει πάνω σε ένα πτερύγιο του στροφείου, 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 στροφείου 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 πτερυγίου του στροφείου της αντλίας (pump 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 ζημία στην επιφάνεια πτερυγίων του στροφείου. 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 επηρεάζονται από τη σπηλαιώση λόγω επανακυκλοφορίας. Εντούτοις, ένα στροφείο που κατασκευάζεται από χυτοσιδήρου 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 και από την παροχή και το μανομετρικό στο μέγιστο σημείο αποδοτικότητας της. Η εσωτερική κυκλοφορία στο στροφείο εμφανίζεται συνήθως με θόρυβο όμοιο σε αυτόν της κλασσικής σπηλαιώσης και με φθορά διάβρωσης.

Αυτή η ζημία επηρεάζεται από την ταχύτητα εισόδου ακροπτερυγίου του στροφείου (impeller inlet tip speed), το μέγεθος που συμβαίνει η επανακυκλοφορία, από 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 προσκληθείσας σπηλαιώσης αλλά και να αυξήσει την πιθανότητα της σύγχυσης της με την κλασσική σπηλαιώση. Είναι σημαντικό όμως, να διαγνωστεί ακριβώς και αυτή γιατί τα τελικά αποτελέσματά της μπορούν να είναι πιο καταστρεπτικά από εκείνα της κλασσικής 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 κλασσικής σπηλαίωσης αλλά και της σπηλαίωσης 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 σπηλαίωση τύπου “Gaseous”

Κατά τη σπηλαίωση 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 και της θερμοκρασίας και πίεσεως 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 ενδείκτες πίεσεων (μανόμετρα) δείχνουν χαμηλότερες πιέσεις, καίτοι η αντλία αναπτύσσει το ίδιο πιεζομετρικό ύψος, όπως στην περίπτωση του καθαρού υγρού.

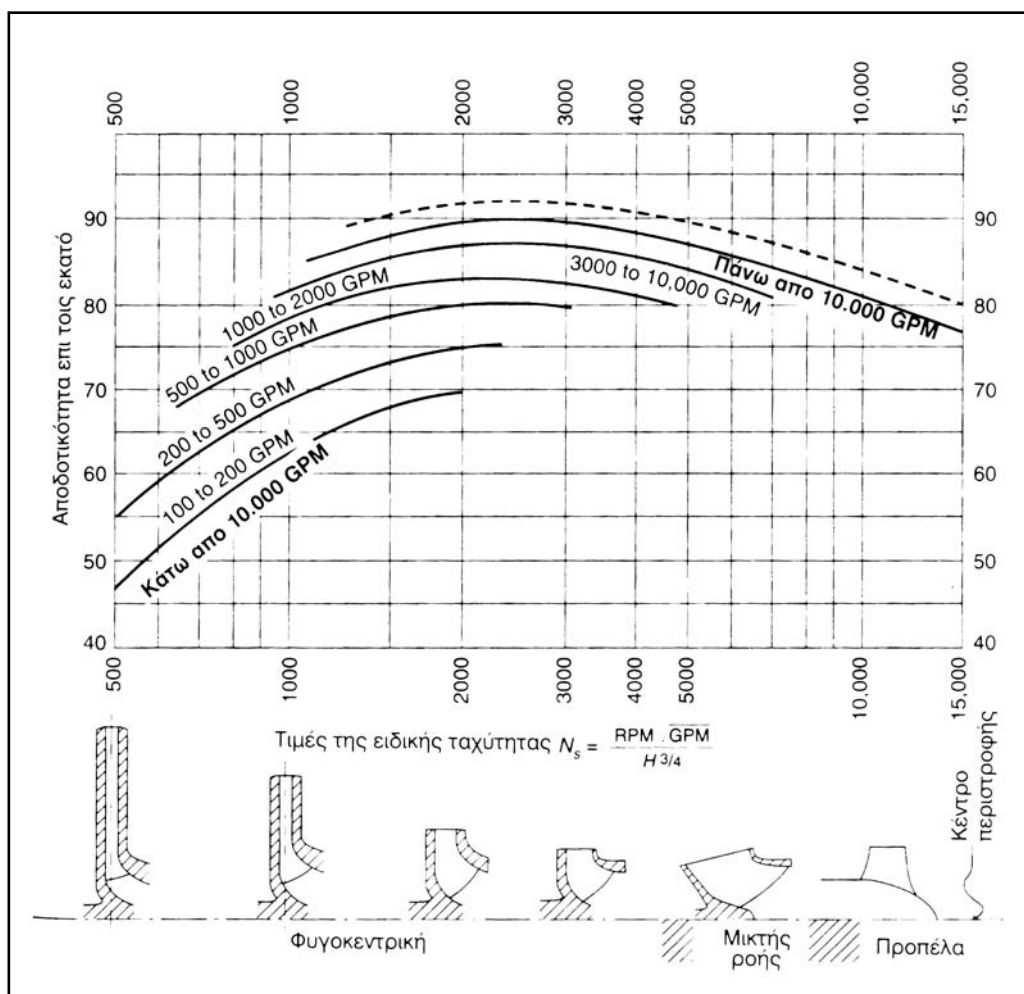
3.7.3 Σχήμα του στροφείου και δυνατότητες χειρισμού του αέρος

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 υπεράνω του 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



Σχήμα 3.15

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

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.

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 στροφείο της είναι χαρακτηριστικά πλατύτερο. Σε μια

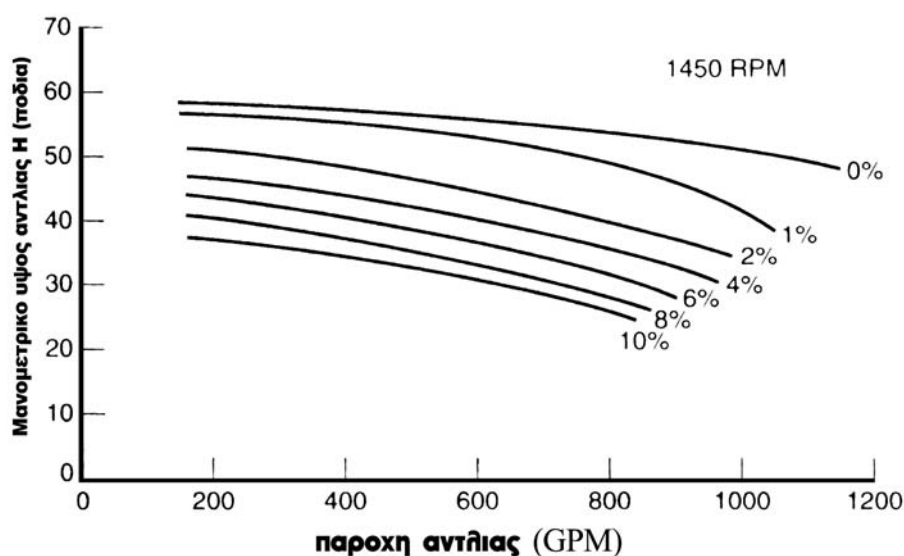
τέτοια αντλία, ένας χαρακτηριστικά μεγαλύτερος όγκος αέρος χρειάζεται για να σταματήσει τη ροή του αέρος.

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. Συνεπώς, η αντλία που παρουσιάστηκε στο **Σχήμα 4.15** ήταν ικανή να χειρισθεί έως 10% του εισελθόντος αέρος, πριν χάσει την αρχική της πλήρωση.

Γενικά η δυνατότητα χειρισμού αέρος υπό ενός στροφείου μειώνεται με την ειδική ταχύτητά τους. Για παράδειγμα, ένα στροφείο 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.

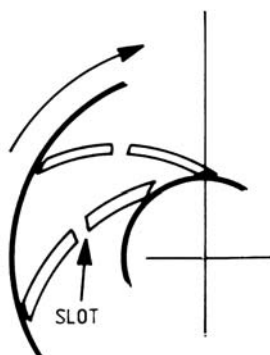
Σε πολλές περιπτώσεις, ειδικά όταν αέρας εισέρχεται στην αντλία υπό μορφή διαλύματος, τα αποτελέσματα εξαρτώνται πολύ από την θερμοκρασία και την πίεση του υγρού. Παρά τις εν λόγω δυσκολίες, είναι μερικές φορές χρήσιμο να επιτρέπουμε το μικρό ποσό από ελεύθερο αέρα να εισέλθει εντός του υπό άντληση υγρού. 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 στροφέιο 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.



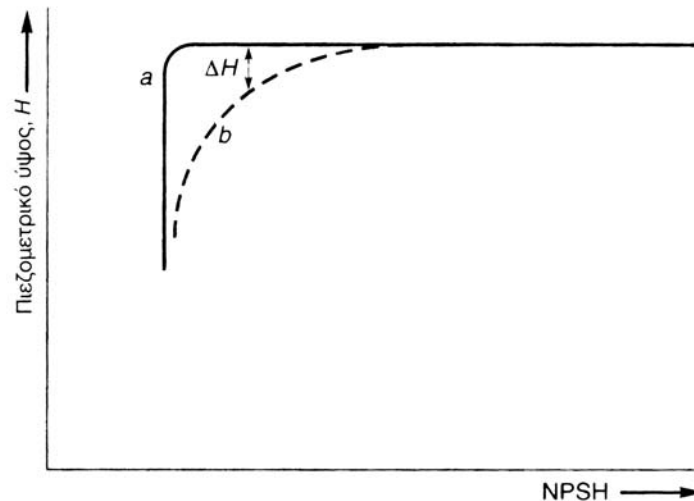
Σχήμα 3.17

Στροφέιο 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 στροφείο θα φράξει τελείως τις διόδους, νωρίτερα από ό,τι σε γραμμή αναρρόφησης τελείως αεροστεγή.

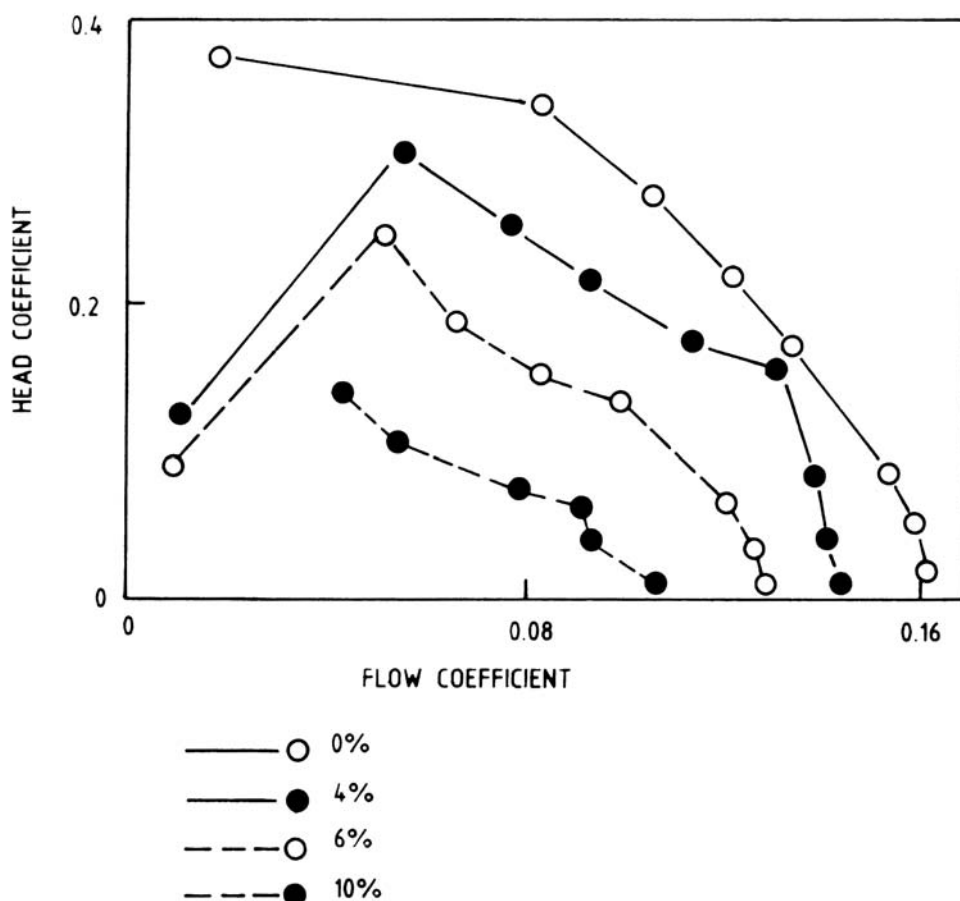
Αν και πάντα ελαττώνει το πιεζομετρικό ύψος που αναπτύσσεται από την αντλία, η παρουσία αέρος μπορεί να έχει ευεργετικές επιδράσεις στην παρουσία σπηλαίωσης. Όταν μια αντλία λειτουργεί υπό σπηλαίωση, μικρά ποσά αέρος ενεργούν ως μέσον ανακοπής - ανακούφισης, που ελαττώνουν τη μηχανική επίδραση των φυσαλίδων που εκρήγνυνται. Αυτό ελαττώνει την ζημιά που προκαλείται στα εξαρτήματα της αντλίας από σπηλαίωση. 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 σπηλαίωσης. 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 χαμηλές πιέσεως ζώνες, της γραμμής αναρρόφησης και στροφείου. 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

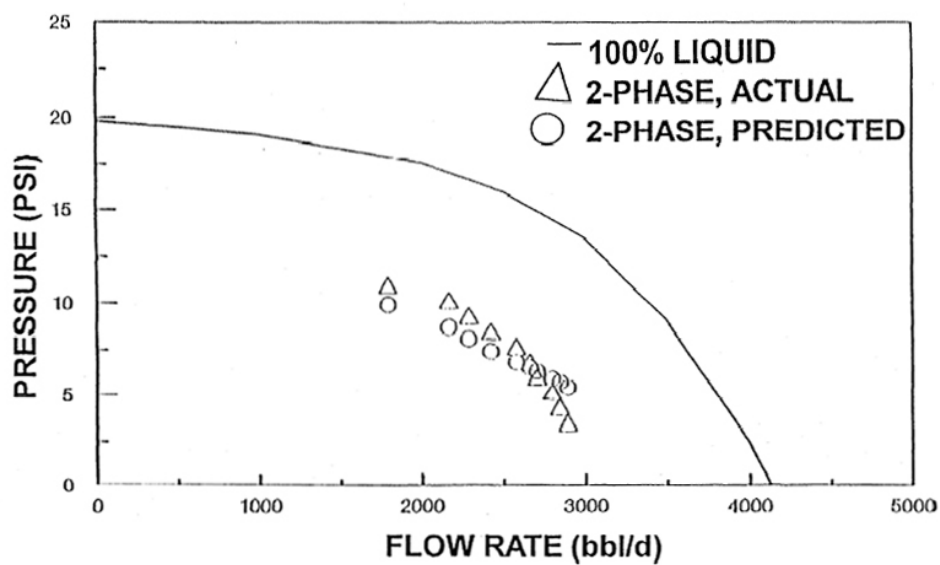
εφοδιάζουν τους αεροστροβίλους αεροσκαφών. Τα προβλήματα εγκαταστάσεων γεώτρησης πετρελαίου είναι αυστηρά πολυφασικά αλλά το ουσιαστικό πρόβλημα είναι ότι καθώς η περιεκτικότητα σε αέριο αυξάνεται το μανομετρικό υποβιβάζεται, όταν χρησιμοποιείται ένας συνηθισμένος σχεδιασμός φυγοκεντρικής αντλίας, όπως διευκρινίζεται στο **Σχήμα 3.19**



Σχήμα 3.19

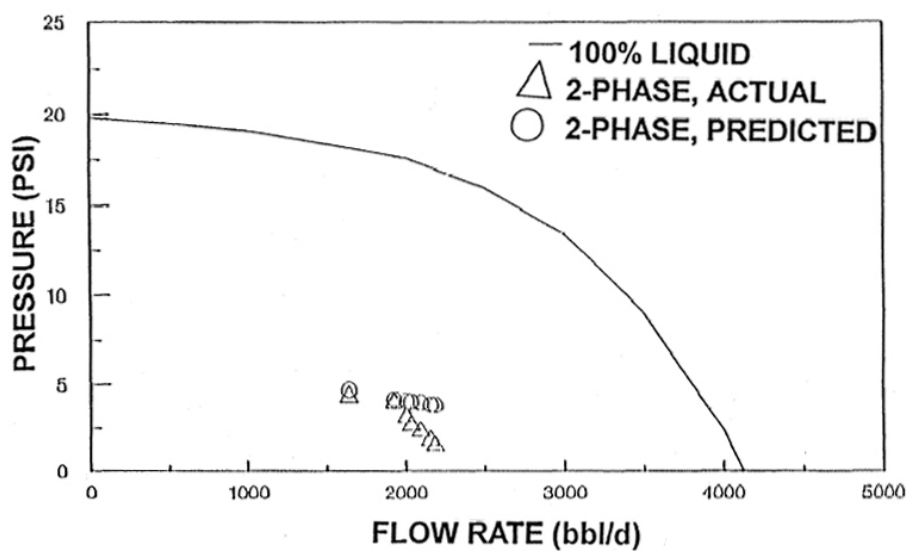
Σύγκριση της επίδρασης διαφόρων ποσοστών αέρα (από 0% έως 10% του συνολικού όγκου), στην χαρακτηριστική καμπύλη μανομετρικού-παροχής μιας αντλίας συμβατικού τύπου.

Στα παρακάτω **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.



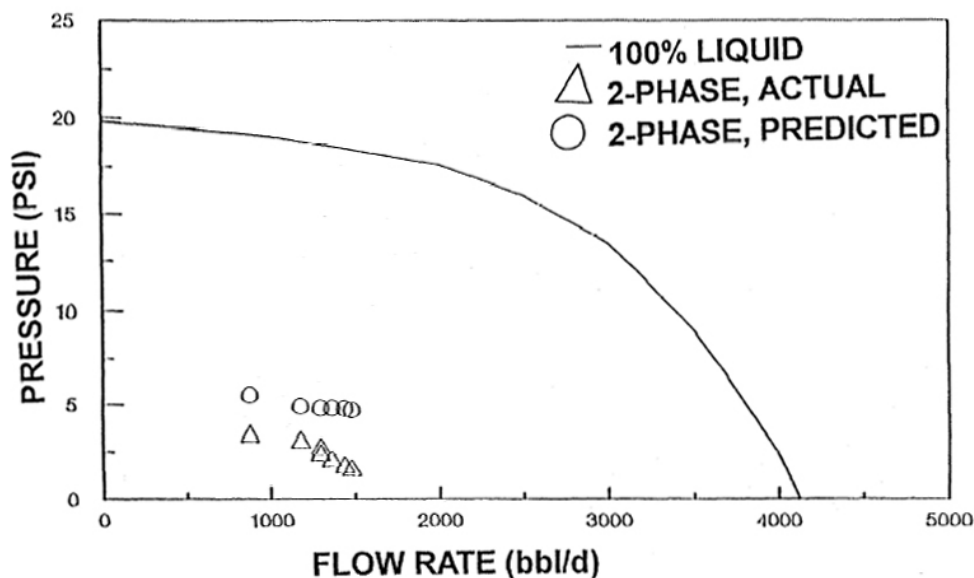
Dynamic Model Prediction (C-72): Pin = 300 psig, 19.83% gas

Σχήμα 3.20



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

Σχήμα 3.21



Dynamic Model Prediction (C-72): $P_{in} = 410$ psig, 49.58% gas

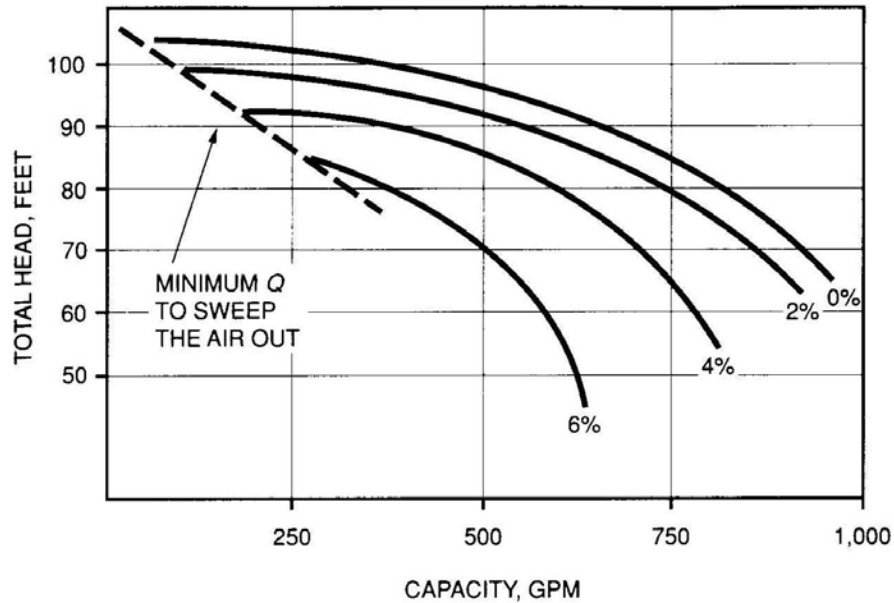
Σχήμα 3.22

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.

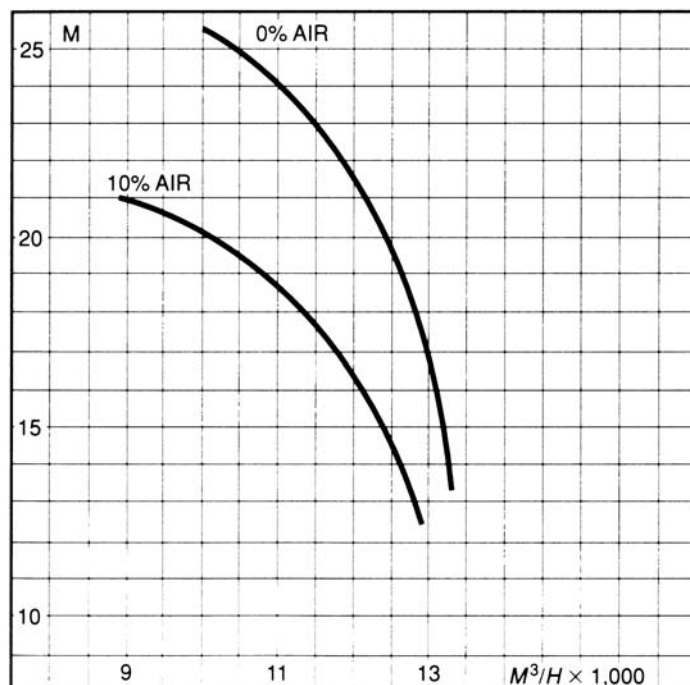
Η παρουσία του αέρα ή των διαφόρων αερίων που μπορεί να βρίσκονται μέσα στο αντλούμενο υγρό δημιουργεί ένα αρκετά περίπλοκο φαινόμενο το οποίο αυτή την στιγμή δεν μπορεί να περιγραφεί από μια ακριβής μαθηματική σχέση η οποία θα μπορούσε να εφαρμοστεί ανεμπόδιστα σε οποιαδήποτε αντλία. Στο **Σχήμα 3.24**, 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 διάφορα είναι η επίδραση ενός μεγάλου αριθμού μεταβλητών στην γεωμετρική διαμόρφωση του στροφείου και του κελύφους για τις οποίες αναφερθήκαμε στην παράγραφο 4.7.3 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.



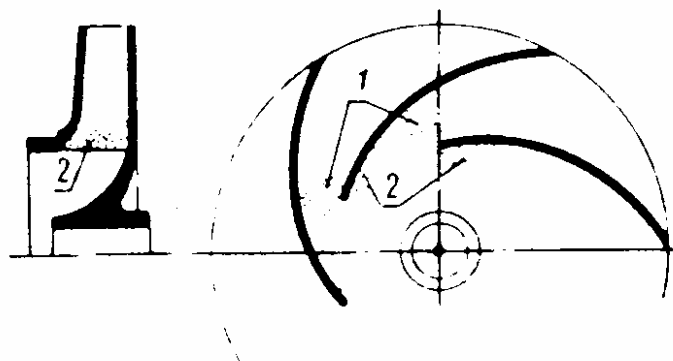
Σχήμα 3.24

Παράδειγμα επίδρασης εισερχόμενου αέρα στην απόδοση φυγοκεντρικής αντλίας.

3.8 Θέσεις του πτερυγίου όπου εκδηλώνεται η σπηλαιώση

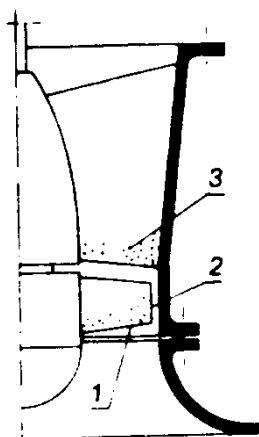
Στις φυγόκεντρους αντλίες οι περιοχές όπου υπάρχει κίνδυνος εκδηλώσεως της κλασσικής σπηλαιώσεως είναι η πίσω μη ορατή πλευρά των πτερυγίων κοντά στο χείλος εισόδου του υγρού (*Σχήμα 3.25 & Σχήμα 3.26*). Στις περιοχές αυτές η πίεση έχει τη μικρότερη τιμή λόγω της απότομης αυξήσεως της ταχύτητας ροής του υγρού. Επίσης η σπηλαιώση εμφανίζεται συχνά μεταξύ των πτερυγίων (*Σχήμα 3.25*). Όταν η σπηλαιώση είναι μεγάλης εκτάσεως μπορεί να φθαρούν και 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 το 2/3 του μήκους τους, πριν από το σημείο στο οποίο εκρήγνυται οι φυσαλίδες.

Στις αντλίες μικτής και αξονικής ροής όπου τα πτερύγια είναι πάντοτε ανοικτού τύπου (*Σχήμα 3.26*) η σπηλαιώση εκδηλώνεται. (1) στο χείλος εισόδου του υγρού στα πτερύγια, (2) στα άκρα των πτερυγίων προς τα τοιχώματα του περιβλήματος και (3) στο χείλος εισόδου του υγρού στα πτερύγια διαχύσεως.



Σχήμα 3.25

Εμφάνιση της σπηλαιώσεως σε φυγόκεντρο αντλία



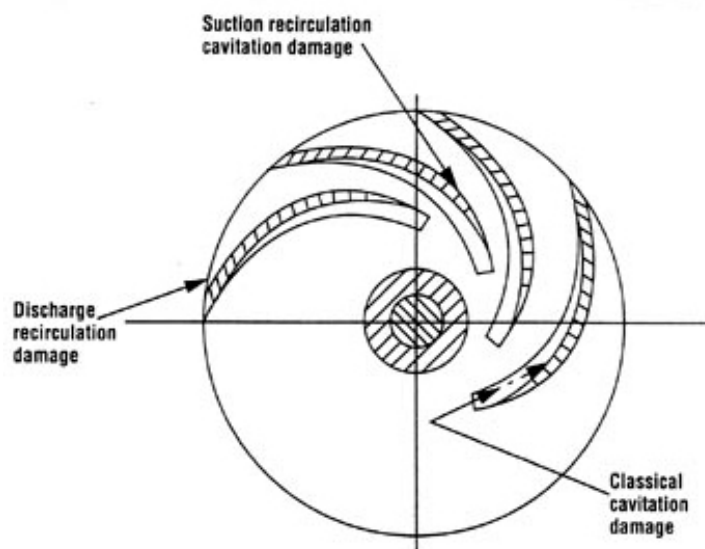
Σχήμα 3.26

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, δονήσεις και διακυμάνσεις πίεσης. Αυτά τα συμπτώματα μοιάζουν με αυτά της κλασσικής σπηλαιώσης, και έτσι η επανακυκλοφορία συχνά διαγιγνώσκεται λανθασμένα σαν κλασσική μορφή σπηλαιώσης.

Καθώς η ροή προς “μάτι” του στροφείου επιστρέφει πίσω στον εαυτό της, ένας σφοδρός στροβιλισμός θα πραγματοποιηθεί. Αυτές οι δίνες μπορούν να περάσουν ακόμη και μέσω των υγρών καναλιών του στροφείου 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 στροφείο, λόγω της κλασσικής σπηλαιώσης και της σπηλαιώσης λόγω επανακυκλοφορίας.

3.9 Συχνοί λόγοι δημιουργίας σπηλαιώσεως

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

α) Η μικρή στατική πίεση σε σύγκριση με τη μεγίστη 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 σπηλαιώσεως επειδή μικρή πτώση της στατικής πίεσης που οφείλεται στην κινητική ενέργεια του υγρού αρκεί για την διαμόρφωση συνθηκών σπηλαιώσεως.

β) Όταν η παροχή είναι μεγαλύτερη από την κανονική η σπηλαιώση εμφανίζεται ευκολότερα γιατί αυξάνεται η ταχύτητα ροής με αντίστοιχη πτώση της πιέσεως.

γ) Από κινηματική άποψη το σχήμα των γραμμών ροής επηρεάζει την εμφάνιση της σπηλαιώσεως. Απότομη αλλαγή της διευθύνσεως ροής, απότομη διεύρυνση των διόδων ροής μέσα στην αντλία κακές συνθήκες εισόδου του υγρού στην περωτή είναι δυνατό να προκαλέσουν μεγάλες απώλειες και σπηλαιώση.

3.10 Γενικά συμπτώματα σπηλαιώσεως

1. Θόρυβος

2.

Προκαλείται από την πρόσκρουση του υγρού στις μεταλλικές επιφάνειες κατά την απότομη συμπύκνωση των φυσαλίδων.

3. Κραδασμοί της αντλίας.

4.

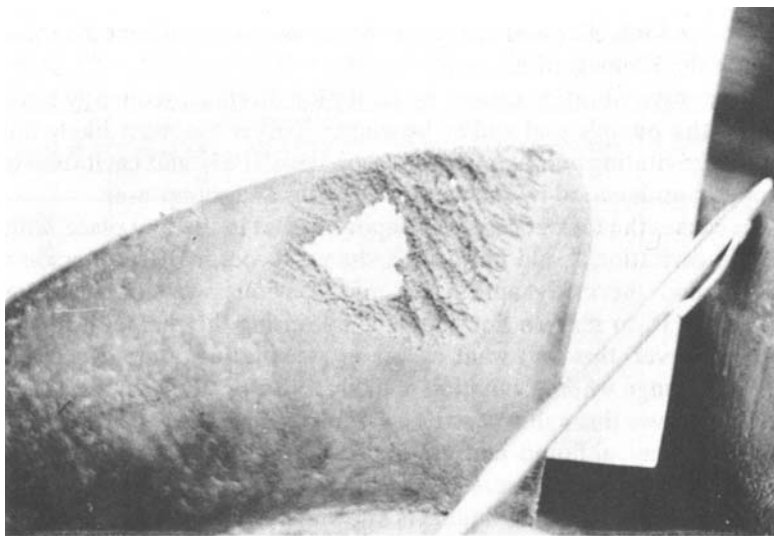
Είναι φανερό ότι οι διαδοχικές αυξομειώσεις της πιέσεως του υγρού προκαλούν κραδασμούς, που μεταφέρονται σε όλα τα εξαρτήματα της αντλίας ακόμη και στη βάση στηρίξεώς της. Οι κραδασμοί αυτοί προκαλούνται από τις ταλαντώσεις των τμημάτων στα οποία προσκρούει το υγρό. Όσο μεγαλύτερη είναι η αντλία τόσο πιο έντονοι είναι οι θόρυβοι και οι κραδασμοί.

5. 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 σπηλαίωση 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 σπηλαίωση 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 σπηλαίωση. Η κατάταξή τους κατά σειρά αυξανόμενης ανθεκτικότητας είναι:

- Μόλυβδος
- Χυτοσίδηρος
- Ορείχαλκος
- Αλουμίνιο με άνθρακα
- Ανοξείδωτο ατσάλι

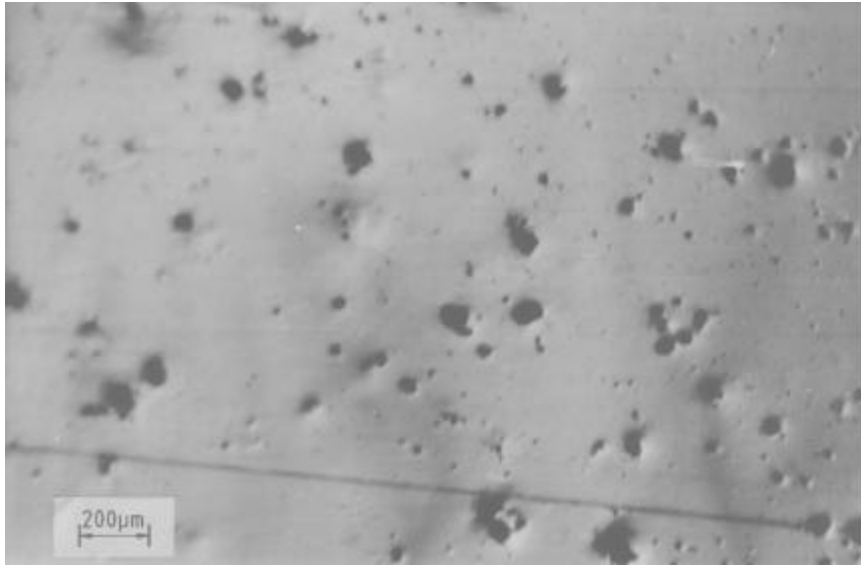
Στις παρακάτω εικόνες μπορούμε να διακρίνουμε τις συνέπειες του φαινομένου της σπηλαίωσης στην επιφάνεια των στροφείων :



Σχήμα 3.28



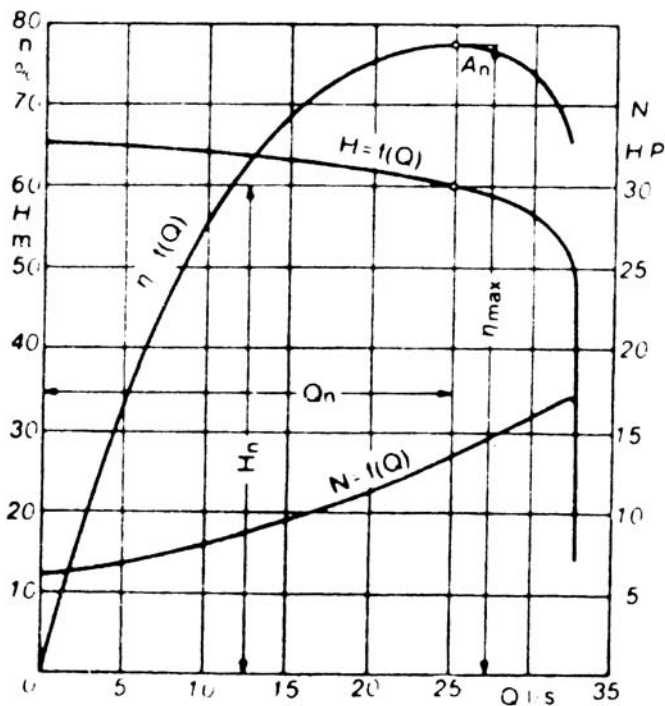
Σχήμα 3.29



Σχήμα 3.30

6. Απότομη πτώση των χαρακτηριστικών καμπυλών.

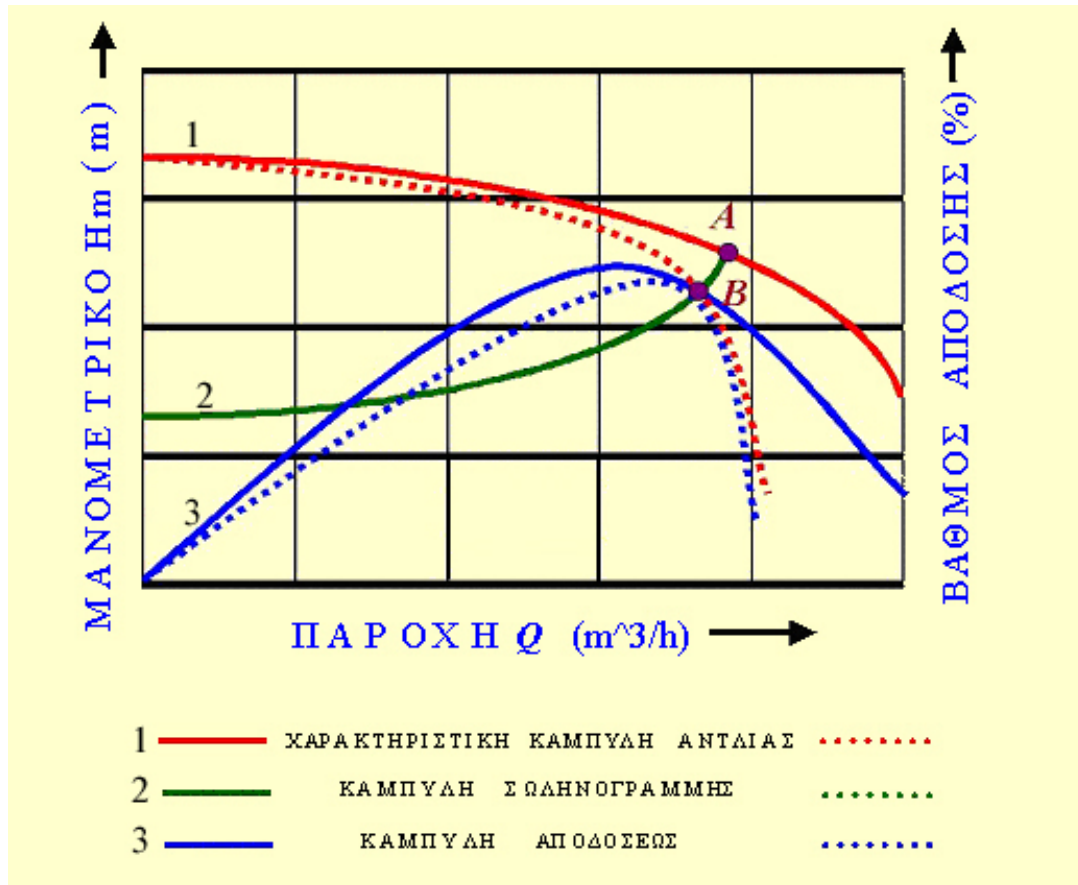
Γενικά οφείλεται στο ότι στη ζώνη σπηλαιώσεως αυξάνονται οι τριβές και οι υδραυλικές απώλειες. Εξαρτάται από διάφορους παράγοντες και κυρίως από την ειδική ταχύτητα της αντλίας. Στις φυγόκεντρες αντλίες με μικρή ειδική ταχύτητα ($n_{sq} < 30$) η πτώση των χαρακτηριστικών καμπυλών είναι πιο έντονη. Στο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



Σχήμα 3.31
Χαρακτηριστικές καμπύλες
μονοβάθμιας φυγόκεντρου αντλίας,
όπου εκδηλώνεται σπηλαίωση

Στο παρακάτω **Σχήμα 3.32** φαίνεται ένα επίσης γενικό παράδειγμα των επιπτώσεων του φαινομένου της

σπηλαίωσης σε φυγοκεντρική αντλία. Με συνεχείς γραμμές εμφανίζονται οι καμπύλες πριν την σπηλαίωση ενώ με διακεκομμένες μετά την εμφάνιση του φαινομένου της σπηλαίωσης.



Σχήμα 3.32
Χαρακτηριστικές καμπύλες
μονοβάθμιας φυγοκέντρου αντλίας,
όπου εκδηλώνεται σπηλαίωση

Φυγοκεντρικές αντλίες - σπηλαίωση, ερευνητικές δραστηριότητες

4.1 ΠΕΡΙΛΗΨΗ

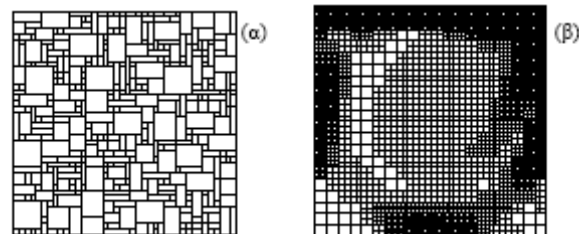
Οι σημαντικότερες ερευνητικές δραστηριότητες στο Εργαστήριο Υδροδυναμικών Μηχανών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π. κατά την τελευταία 2ετία συνοψίζονται στο παρόν άρθρο. Οι δραστηριότητες αυτές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις βασικούς τομείς. Ο πρώτος αφορά βασική έρευνα και ανάπτυξη εξελιγμένων υπολογιστικών τεχνικών και αλγορίθμων για τη μοντελοποίηση του ροϊκού πεδίου σε υδροδυναμικές μηχανές (αντλίες – υδροστρόβιλοι) και σε υδροδυναμικά στοιχεία (βάνες, σωληνώσεις κλπ), καθώς και για την προσομοίωση σημαντικών φαινομένων, όπως η σπηλαίωση και η παρουσία στερεών σωματιδίων. Ο δεύτερος τομέας αναφέρεται στην αριθμητική βελτιστοποίηση σχεδιασμού, που αφορά είτε τις γεωμετρικές παραμέτρους συγκεκριμένων υδροδυναμικών στοιχείων (π.χ. πτερυγίων), είτε τα δομικά στοιχεία κατασκευής και εξοπλισμού σύνθετων υδροδυναμικών εγκαταστάσεων, όπως υδροηλεκτρικών έργων. Τέλος, στον τρίτο τομέα περιλαμβάνονται μετρητικές δραστηριότητες στο Εργαστήριο, καθώς και η κατασκευή μιας νέας πειραματικής εγκατάστασης για τη μελέτη της ροϊκής συμπεριφοράς πτερωτών φυγοκεντρικών αντλιών. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται σύντομες περιγραφές και αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα από εργασίες στους παραπάνω ερευνητικούς τομείς.

4.2 ΒΑΣΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ – ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ

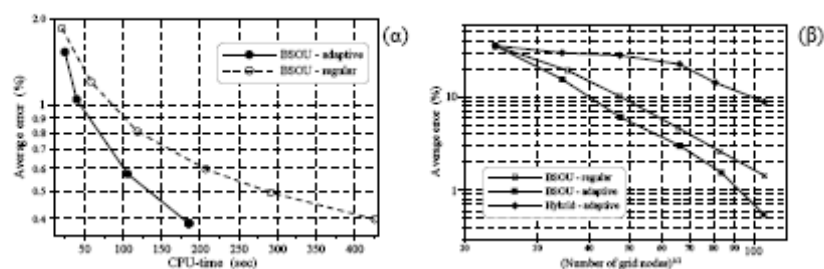
4.2.1. Διακριτοποίηση σε μη-δομημένο Καρτεσιανό πλέγμα.

Αναπτύχθηκε μια νέα αριθμητική τεχνική διακριτοποίησης των όρων συναγωγής των εξισώσεων μεταφοράς, η οποία επιτρέπει την εφαρμογή της μεθόδου όγκων ελέγχου

σε μη-δομημένα, ομόθετα, Καρτεσιανά πλέγματα (Anagnostopoulos, 2003). Σε ένα μη-δομημένο ή τοπικά πυκνωμένο πλέγμα (Σχ. 4.1), το σφάλμα αποκοπής κατά τη διακριτοποίηση είναι πρώτης τάξης τοπικά, όταν η τοπολογία δεν είναι ομοιόμορφη και χρησιμοποιείται ένα απλό σχήμα διαφορών. Η ακρίβεια μπορεί να βελτιωθεί εάν χρησιμοποιηθεί ένας σύνθετος κανόνας διαφορίσης, που εμπλέκει τιμές από περισσότερα κελιά. Ένας τέτοιος κανόνας προέκυψε εισάγοντας, αντί για φανταστικά σημεία, τις υπολογισμένες τιμές των μεταβλητών στις επιφάνειες των κελιών, οδηγώντας σε μια ενιαία, γενική μορφή των διακριτοποιημένων όρων συναγωγής, ανεξαρτήτως πλεγματικής τοπολογίας. Επιπλέον, η νέα μέθοδος καθιστά δυνατή τη χρησιμοποίηση τιμών και από πιο απομακρυσμένα υπολογιστικά κελιά, και επομένως την εφαρμογή σχετικών σχημάτων διακριτοποίησης δεύτερης τάξης (π.χ. BSOU, QUICK).



Σχήμα 4.1. Ενδεικτικές μορφές μη-δομημένου πλέγματος σε τετραγωνική κοιλότητα: α) τυχαίο πλέγμα και β) ρυθμιζόμενη πυκνωση με κριτήριο την κλίση των ταχυτήτων.



Σχήμα 4.2. Βελτίωση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων: α) για εφαπτομενική οδήγηση σε τετραγωνική κοιλότητα, $Re=1000$ και β) για απότομη διεύρυνση, $Re=800$.

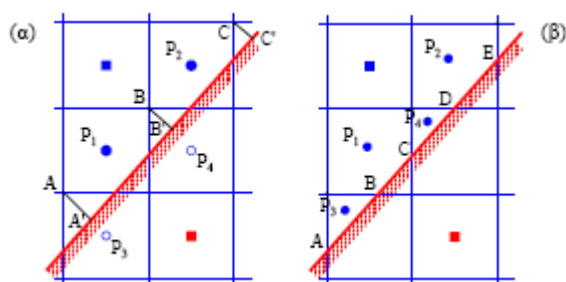
Συνδυάζοντας τα πλεονεκτήματα της ρυθμιζόμενης πυκνωσης πλεγματικών γραμμών και των σχημάτων διακριτοποίησης

δεύτερης τάξης, η νέα μεθοδολογία παράγει ακριβέστερα αποτελέσματα από όσο κάθε μία από τις τεχνικές αυτές από μόνη της, για ίδιο υπολογιστικό κόστος (Σχ. 4.2).

4.2.2 Επίλυση σε πολύπλοκες γεωμετρίες

Οι γραμμές των Καρτεσιανών πλεγμάτων δεν ταυτίζονται με τα όρια του υπολογιστικού χώρου όταν η γεωμετρία είναι πολύπλοκη, πράγμα που αποτελεί και το βασικό μειονέκτημα αυτών των πλεγμάτων. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος είχε αναπτυχθεί στο παρελθόν μια πρωτότυπη μέθοδος των ‘μερικώς μπλοκαρισμένων κελιών’, η οποία εφαρμόστηκε επιτυχώς σε μια σειρά προβλημάτων (π.χ. Anagnostopoulos et. al, 2001). Πρόσφατα, η μέθοδος αυτή τροποποιήθηκε και βελτιώθηκε, αυξάνοντας την ακρίβεια των αποτελεσμάτων κοντά σε κεκλιμένες (ως προς το πλέγμα) επιφάνειες κατά μία σχεδόν τάξη μεγέθους (από πρώτη σε σχεδόν δεύτερη).

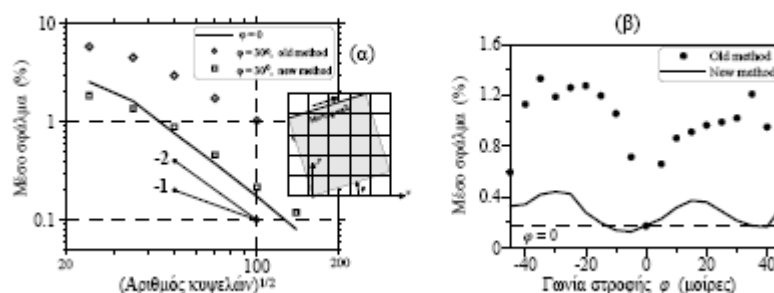
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3, τα κελιά P1 έως και P4 περιέχουν και ρευστό και στερεό τμήμα. Με την παλαιότερη μεθοδολογία (Σχ. 4.3α) επιλύονται κανονικά μόνο τα κελιά P1 και P2, που είναι ελεύθερα πάνω από 50%, ενώ στα P3 και P4 υπολογίζεται μόνο η ροή μάζας και μια ‘φανταστική’ πίεση, χρησιμοποιώντας μια τεχνική πορώδους μέσου. Στην νέα μεθοδολογία (Σχ. 4.3β) αντιμετωπίζονται κατά τον ίδιο τρόπο όλα τα μερικώς μπλοκαρισμένα κελιά, τοποθετώντας τις μεταβλητές στο κέντρο βάρους του ελεύθερου τμήματός τους και υπολογίζοντας κατάλληλα τις κλίσεις των ταχυτήτων με ακρίβεια δεύτερης τάξης.



Σχήμα 4.3. Μεταχείριση μερικώς μπλοκαρισμένων υπολογιστικών κελιών.

Οι κλίσεις αυτές, καθώς και όλα τα απαιτούμενα γεωμετρικά μεγέθη, υπολογίζονται με κατάλληλο προεπεξεργαστή. Έτσι, αφού ορισθούν τα γεωμετρικά όρια του υπολογιστικού χώρου, η διαδικασία κατασκευής του πλέγματος εκτελείται άμεσα και πλήρως αυτοματοποιημένα. Επιπλέον, μπορεί εύκολα να συνδυαστεί και

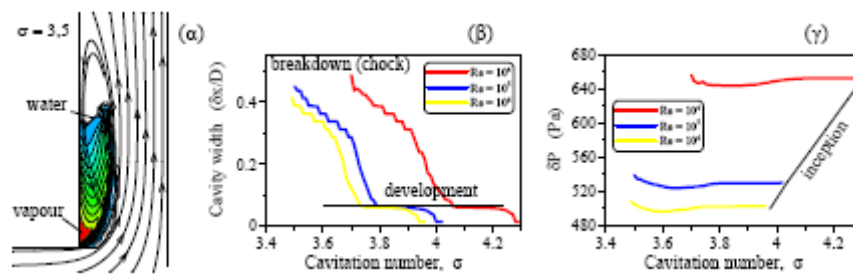
με την τεχνική τοπικής ή ρυθμιζόμενης πύκνωσης πλέγματος, όπως θα δειχθεί στη συνέχεια. Ένα ακόμη πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι λειτουργεί πολύ ομαλά στην περίπτωση κινούμενων ορίων (Anagnostopoulos and Mathioulakis, 2004a), καθώς δεν απαιτείται τροποποίηση του πλέγματος ούτε απόδοση τιμών των μεταβλητών σε νέα κελιά που αποκαλύπτονται απότομα, όπως συμβαίνει με άλλες αντίστοιχες μεθόδους (π.χ. cell-cut)



Σχήμα 4.4

4.2.3 Μοντέλο σπηλαίωσης

Όταν η στατική πίεση του υγρού μέσα σε μια αντλία ή σε έναν υδροστρόβιλο γίνει τοπικά μικρότερη από την πίεση ατμοποίησης (τάση ατμών), τότε εμφανίζεται το φαινόμενο της σπηλαίωσης, δηλαδή συμβαίνει τοπική εξάτμιση του υγρού. Η σπηλαίωση αποτελεί μια σημαντική παράμετρο τόσο στον σχεδιασμό όσο και στη λειτουργία των υδροδυναμικών μηχανών, καθώς μπορεί να προκαλέσει σημαντική διάβρωση, αλλά και θόρυβο, ταλαντώσεις και πτώση της απόδοσης. Για την αριθμητική προσομοίωση αυτού του φυσικού μηχανισμού αναπτύχθηκε ένα μοντέλο διφασικής ροής (υγρού-ατμού), με το οποίο επιλύεται μαζί με τις ομογενείς εξισώσεις Navier-Stokes και μια εξίσωση διατήρησης για το ποσοστό όγκο του υγρού στο διφασικό μίγμα (volume fraction). Στην εξίσωση αυτή εισάγονται κατάλληλοι όροι πηγής για τη συναλλαγή μάζας μεταξύ των δύο φάσεων (εξάτμιση – επαναυγροποίηση), που είναι συνάρτηση των τοπικών συγκεντρώσεων και πιέσεων. Η ενδεχόμενη επίδραση φαινομένων συμπιεστότητας, λόγω μειωμένης ταχύτητας του ήχου σε ομογενή μίγματα, έχει βρεθεί ότι δεν επηρεάζει σημαντικά τα δυναμικά χαρακτηριστικά της ροής, έτσι δεν μοντελοποιείται, και η πυκνότητα κάθε φάσης λαμβάνεται σταθερή.



Σχήμα 4.5. Ανάπτυξη σπηλαιώσης σε γωνία 90° : α) θύλακας διαφασικού μείγματος για $Re=10$, β) εξέλιξη πάχους θύλακα και γ) μεταβολή συνολικής απώλειας πίεσης.

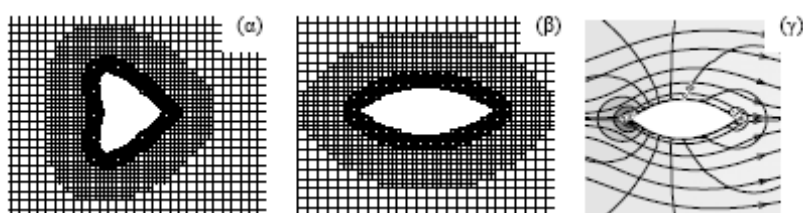
Στο Σχήμα 4.5 παρουσιάζονται αποτελέσματα από μια πρώτη εφαρμογή του μοντέλου σε ανάπτυξη σπηλαιώσης σε οξεία γωνία 90° . Ο αριθμός σπηλαιώσης (διαφορά πίεσης αναφοράς και τάσης ατμών, προς κινητική ενέργεια αναφοράς) μειώνεται προοδευτικά, αυξάνοντας τεχνητά την τιμή της τάσης ατμών, ώστε να μελετηθεί η εξέλιξη του μηχανισμού. Η έναρξη της σπηλαιώσης γίνεται στην εσωτερική γωνία και εξαρτάται από την τιμή του αριθμού Re . Στη συνέχεια, μετά από μια περίοδο καθυστέρησης, η περιοχή σπηλαιώσης αρχίζει να διογκώνεται μέσα στη ζώνη ανακυκλοφορίας, και κάτω από ορισμένο όριο επέρχεται απότομη εξάτμιση σε όλη τη διατομή και έμφραξη της ροής (chocking). Ενδιαφέρουσα είναι η μικρή μείωση των συνολικών απωλειών πίεσης κατά τη φάση της ανάπτυξης της φυσαλίδας (Σχ. 4.5γ), η οποία έχει παρατηρηθεί και πειραματικά, και, όπως επιβεβαιώθηκε υπολογιστικά, εμφανίζεται μέσα στη ζώνη ανακυκλοφορίας, επειδή οι δυνάμεις τριβής (ιξώδεις) είναι μικρότερες στο διαφασικό μίγμα από όσο στην υγρή φάση.

4.3 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

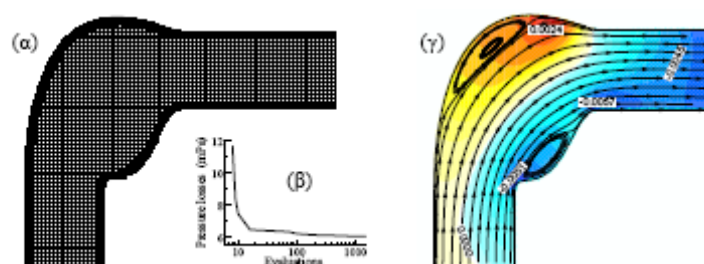
4.3.1. Βελτίωση υδροδυναμικής σχεδίασης

Η υλοποίηση της διαδικασίας αντίστροφης σχεδίασης ενός στοιχείου ή τμήματος μιας υδροδυναμικής μηχανής ή μιας σωλήνωσης προϋποθέτει τη συνεργασία ενός ισχυρού υπολογιστικού κώδικα επίλυσης της ροής και ενός αλγορίθμου αριθμητικής βελτιστοποίησης υψηλού ρυθμού σύγκλισης. Επειδή για την εύρεση του βέλτιστου σχεδιασμού απαιτείται σημαντικός αριθμός διαδοχικών επιλύσεων του πεδίου ροής, εκτός από την ταχύτητα, ο κώδικας επίλυσης πρέπει να εξασφαλίζει την αυτόματη κατασκευή πλέγματος σε κάθε νέα τροποποίηση της γεωμετρίας που δοκιμάζεται, χωρίς την παρέμβαση του χρήστη. Η χρήση μη-δομημένων Καρτεσιανών πλεγμάτων, μαζί με μια τεχνική επίλυσης πολύπλοκης γεωμετρίας, όπως αυτή που παρουσιάστηκε προηγουμένως, ικανοποιεί αυτές τις απαιτήσεις. Επιπλέον, η εφαρμογή της τεχνικής ρυθμιζόμενης πύκνωσης του πλέγματος επιλεκτικά και μόνο

σε περιοχές που αυτό είναι απαραίτητο (π.χ. κοντά σε στερεά όρια) μπορεί να εξοικονομήσει σημαντικό υπολογιστικό χρόνο ανά επίλυση, για δεδομένη ακρίβεια αποτελεσμάτων.



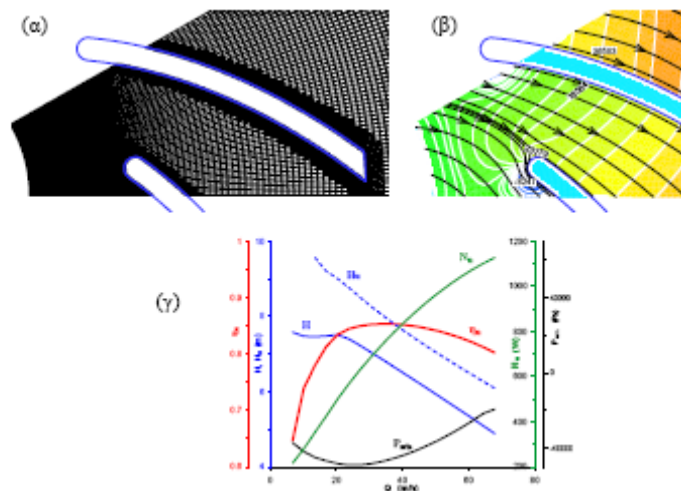
Σχήμα 4.6. Ελαχιστοποίηση υδροδυναμικής αντίστασης σώματος ορισμένου όγκου: α) πλέγμα σε μη-βέλτιστη γεωμετρία, β) πλέγμα τελικής γεωμετρίας και γ) τελικό πεδίο ροής και πιέσεων.



Σχήμα 4.7. Ελαχιστοποίηση απωλειών πίεσης σε γωνία 90° : α) βέλτιστη γεωμετρία και πλέγμα, β) ρυθμός σύγκλισης του αλγορίθμου βελτιστοποίησης και γ) πεδίο ροής και πιέσεων.

Οι εξελιγμένες αυτές αριθμητικές τεχνικές, συνδυάστηκαν με σχήματα διακριτοποίησης δεύτερης τάξης (Central Differences και BSOU) και με έναν επιλύτη συζυγών κλίσεων (preconditioned Bi-CG) για την ανάπτυξη ενός νέου, ισχυρού υπολογιστικού κώδικα. Για την περιγραφή και παραμετροποίηση της γεωμετρίας του υπολογιστικού χώρου ενσωματώθηκε η δυνατότητα χρήσης πολυωνύμων Bezier, αρχικά για 2διάστατα πεδία. Τέλος, εφαρμόστηκε ένας νέος αλγόριθμος αριθμητικής βελτιστοποίησης, που χρησιμοποιεί στοχαστικές τεχνικές και εξελικτικούς (γενετικούς)

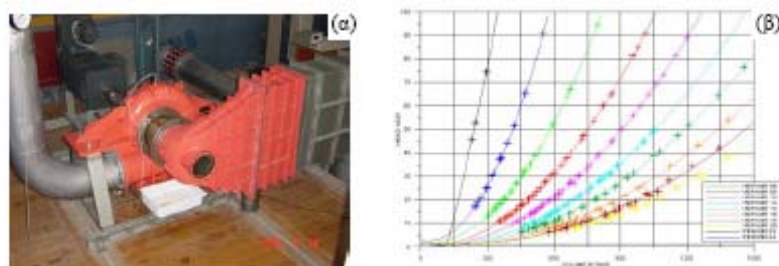
αλγορίθμους, ο οποίος αναπτύχθηκε στο Εργ. Θερμικών Στροβιλομηχανών του ΕΜΠ (Giannakoglou, 2002). Στα Σχήματα 4.6, 4.7 και 4.8 παρουσιάζονται ορισμένες πρόσφατες και τρέχουσες εφαρμογές της ολοκληρωμένης μεθοδολογίας σε 2διάστατα προβλήματα.



Σχήμα 4.8. Μελέτη επίδρασης σχεδιασμού πτερωτής αντλίας: α) πλέγμα σε ενδεικτική γεωμετρία, β) πεδίο ροής για 950 RPM και γ) αντίστοιχες χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας.

4.4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΕΣ

Έγιναν λεπτομερείς μετρήσεις σε μοντέλο υδροστροβίλου Francis με ρυθμιστικά πτερύγια, που εγκαταστάθηκε πρόσφατα στο Εργαστήριο (Σχ. 4.9α), με σκοπό τη χάραξη των χαρακτηριστικών καμπυλών λειτουργίας του για διάφορες στροφές (Σχ. 4.9β) και τον προσδιορισμό της ταχύτητας φυγής. Πρωταρχικό μέλημα αποτέλεσε η τήρηση των διεθνών κανονισμών για μετρήσεις υδραυλικής συμπεριφοράς μοντέλων υδροδυναμικών μηχανών (IEC995/TC-4), ενώ έγινε προσεκτική βαθμονόμηση όλων των μετρητικών οργάνων και ανάλυση των σφαλμάτων. Τέλος, παρατηρήθηκε η ανάπτυξη διαφόρων τύπων σπηλαίωσης στην έξοδο του



Σχήμα 4.9. α) Μοντέλο υδροστροβίλου Francis. β) Καμπύλες ύψους – παροχής στις 1000 RPM.



Σχήμα 4.10. Πειραματική διάταξη για τη μελέτη της ροής σε φυγοκεντρικές πτερωτές.

Επίσης, σχεδιάστηκε και μόλις ολοκληρώθηκε η κατασκευή στο Εργαστήριο μιας νέας πειραματικής διάταξης, η οποία θα επιτρέψει τη διενέργεια λεπτομερών μετρήσεων και μελέτης της υδροδυναμικής συμπεριφοράς πτερωτών φυγοκεντρικών αντλιών (Σχ. 4.10). Το κάλυμμα του μοντέλου είναι από plexiglas ώστε να επιτρέπει την οπτική παρατήρηση της ροής, καθώς και τη διεξαγωγή μετρήσεων με LDV και PIV. Στη διάταξη μπορούν να τοποθετηθούν πτερωτές διαφορετικού σχεδιασμού και μεγέθους, με διάμετρο έως 40 cm, καθώς και να προσαρμοσθεί εσωτερικά σπειροειδής ή άλλης μορφής κέλυφος, ενώ υπάρχει δυνατότητα συνεχούς μεταβολής στροφών. Η νέα διάταξη θα δώσει επίσης τη δυνατότητα διερεύνησης του μηχανισμού της σπηλαίωσης.

4.5 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΡΟΗΣ ΣΕ ΦΥΓΟΚΕΝΤΡΙΚΕΣ ΑΝΤΛΙΕΣ

4.5.1 Φυσικομαθηματική προσομοίωση και επίλυση

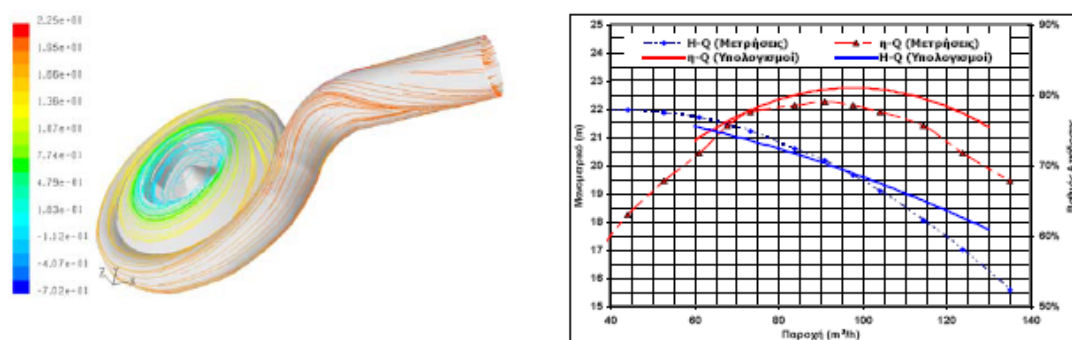
Η προσομοίωση της ροής στις φυγοκεντρικές αντλίες είναι δύσκολη λόγω της περιστροφής αλλά και της σύνθετης τρισδιάστατης γεωμετρίας του στροφέιου και του κελύφους. Η ροή παρουσιάζει ασταθή συμπεριφορά, ειδικά σε συνθήκες λειτουργίας εκτός του σημείου μέγιστου βαθμού απόδοσης. Μέσω της προσέγγισης CFD, οι ροές στα στροφέια των αντλιών, μπορούν να προβλεφθούν καλά, έτσι ώστε να επιταχυνθεί η διαδικασία σχεδιασμού τους. Στόχος της παρούσης ερευνητικής δραστηριότητας είναι η προσομοίωση του ροϊκού πεδίου στη βιομηχανική αντλία Norma 80-250 της εταιρείας Δράκος-Πολέμης Α.Ε. με χρήση του εμπορικού κώδικα Fluent[®].

Η δημιουργία του υπολογιστικού πλέγματος στην επιλεγμένη αντλία γίνεται με τη βοήθεια του λογισμικού Gambit[®]. Το υπολογιστικό πεδίο υποδιαιρείται σε δύο επιμέρους ζώνες. Σ' αυτήν με τα περιστρεφόμενα μέρη της αντλίας, και σε εκείνη με τα σταθερά εξαρτήματα. Η πρώτη ζώνη δομείται με 114.908 ενώ η δεύτερη με 204.326 τετράεδρα στοιχεία. Οι δύο αυτές περιοχές συνδέονται μεταξύ τους με μία διεπιφάνεια (interface).

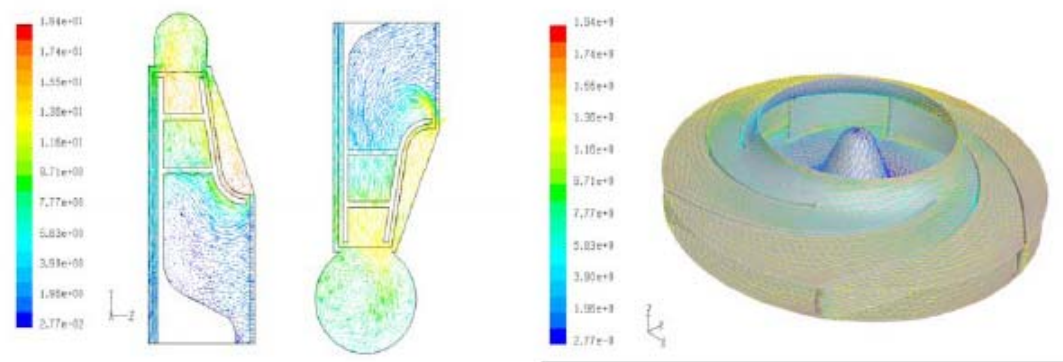
Ο κώδικας Fluent[®] επιλύει τις εξισώσεις Navier-Stokes για τρισδιάστατη μη συμπιεστή ροή, περιλαμβάνοντας τόσο τις κεντρομόλες δυνάμεις που αναπτύσσονται στο στροφέιο, όσο και τις χρονικές μεταβολές. Χρησιμοποιείται το τυποποιημένο (standard) μοντέλο τύρβης k-ε με κατάλληλες συναρτήσεις τοιχώματος (wall-functions). Οι χρονικές μεταβολές διακριτοποιούνται με πεπλεγμένο σχήμα δεύτερης τάξης, ενώ οι χωρικές με σχήμα ανάντη διαφορών δευτέρου βαθμού όσον αφορά τους όρους συναγωγής και με σχήμα κεντρικών διαφορών προκειμένου για τους όρους της διάχυσης. Τέλος η σύζευξη ταχύτητας-χρόνου επιλύεται με τον αλγόριθμο SIMPLE.

4.5.2 Αποτελέσματα-Συμπεράσματα

Η προσομοίωση της λειτουργίας της αντλίας γίνεται σχεδόν σε όλο το εύρος παροχών της, όπου ο βαθμός απόδοσής της παρουσιάζει αποδεκτές τιμές. Στα σχήματα 4.11, 4.12 και 4.13 φαίνονται χαρακτηριστικές εικόνες του πεδίου ροής, για παροχή $80 \text{ m}^3/\text{h}$ στις 1450 rpm. Τέλος, στο σχήμα 4.14 φαίνονται οι υπολογισμένες χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας της αντλίας σε άμεση σύγκριση με τις αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις. Από την προσομοίωση του ροϊκού πεδίου στην επιλεγμένη βιομηχανική αντλία βεβαιώνεται ποιοτικά η μεταβολή των ροϊκών παραμέτρων στο εσωτερικό της και πιστοποιούνται οι επιδόσεις της από την καλή συμφωνία των υπολογισμών με τις πειραματικές μετρήσεις. Η υπό εξέλιξη ερευνητική προσπάθεια επικεντρώνεται στην εφαρμογή και άλλων μοντέλων καθώς επίσης στη μελέτη του διφασικού πεδίου ροής σε φυγόκεντρες αντλίες.



Σχήμα 4.11: Τροχίες με αποτύπωση της μεταβολής της στατικής πίεσης. Σχήμα 4.12: Χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας φυγόκεντρικής αντλίας Norma/80/250.



Σχήμα 4.13: Κατανομή μεσημβρινών ταχυτήτων. Σχήμα 4.14: Κατανομή απόλυτων ταχυτήτων στο stroφείο.

Συμπεράσματα

Από τις χαρακτηριστικές καμπυλές της αντλίας σε διφασική ροή που παρουσιάζονται προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα :

Είναι εμφανές ότι για τις διάφορες στροφές λειτουργίας της αντλίας η εισαγωγή του αέρα επιδρά προκαλώντας μια γενική μεταβολή των χαρακτηριστικών καμπύλων της αντλίας οι οποίες έχουν χαραχθεί πριν την επίδραση του αέρα. Ειδικότερα :

Από τις καμπύλες λειτουργίας που προέκυψαν υπό την παρουσία αέρα παροχής παρατηρούμε ότι η επίδραση του αέρα δεν είναι τόσο έντονη ειδικά στις χαμηλότερες στροφές λειτουργίας (πχ 1800 έως 2200 RPM). Στις υψηλότερες στροφές όμως (2450 RPM), η επίδραση του αέρα προκύπτει πιο έντονη προκαλώντας μια πτώση των χαρακτηριστικών καμπυλών της αντλίας. Από την σύγκριση των καμπυλών πριν και μετά την εισαγωγή, προκύπτει ότι ο αέρας προκαλεί έντονη πτώση των χαρακτηριστικών καμπυλών της αντλίας. Ειδικότερα, με την αύξηση των στροφών το φαινόμενο είναι εντονότερο με μεγαλύτερη πτώση των καμπυλών λειτουργίας της αντλίας.

Το μέλλον των φυγόκεντρων αντλιών θα κυριαρχείται από τα ακόλουθα δύο χαρακτηριστικά : (ι) την τάση να χρησιμοποιούμε αντλίες υψηλότερων ταχυτήτων (ιι) τη συλλογική συγχώνευση πολλών κατασκευαστών αντλιών. Οι εξελίξεις στους τομείς των μηχανών των πυραύλων και στις αντλίες νερού των σταθμών ισχύος ήταν τέτοιες ώστε να συμπεριλάβουν αντλίες υψηλών ταχυτήτων. Μεγάλες διεθνείς εταιρίες στους τομείς των αντλιών άρχισαν να αναδύονται στην αγορά ύστερα από μία μακρά περίοδο αναδιοργάνωσης. Κατά το διάστημα της ευρύτατης διάδοσης των αντλιών υψηλών ταχυτήτων, αυτή η διάδοση έλαβε χώρα εξαιτίας της χρήσης ηλεκτρικών μηχανών /μειωτήρες και στροβίλους ατμού σαν πρωταρχική κίνηση. Η προβλεπόμενη χρήση ηλεκτρικών μηχανών μεταβλητής συχνότητας και υψηλών ταχυτήτων δεν έγινε κάτι το σύνηθες. Σήμερα με τις αμυντικές και διαστημικές επιδιώξεις και στόχους να έχουν στο μεγαλύτερο μέρος επιτευχθεί και την γενική τάση να απομακρυνόμαστε από ηλεκτρικούς σταθμούς που βασίζονται σε ατμό υψηλής πίεσης, η οικονομική υποστήριξη από το 1990 και μετά έχει εκλήψει. Τα οργανωμένα σχέδια τα οποία απαιτούν την χρήση αντλιών υψηλών ταχυτήτων και ενέργειας έχουν εξαφανιστεί. Αυτό το οποίο μπορεί να διαφανεί, είναι ότι όπως στον δέκατο έβδομο και δέκατο όγδοο αιώνα, η εξέλιξη στις φυγόκεντρες αντλίες έχει εισέλθει σε μία αδρανή περίοδο.

* 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 χρήστη 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. Δ. Γ. Παπανίκας, Καθηγητής και Δ. Π. Μάργαρης Επίκ. Καθηγητής- 4η Επιστημονική ΡΟΗ 2004 Συνάντηση Μηχανικής Ρευστών ΕΜΠ, Αθήνα 26 Νοεμβρίου 2004
15. Ι. Αναγνωστόπουλος, Δ. Παπαντώνης - 4η Επιστημονική ΡΟΗ 2004 Συνάντηση Μηχανικής Ρευστών ΕΜΠ, Αθήνα 26 Νοεμβρίου 2004

□ □ □ □