

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ 03: ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΣΠΗΛΛΑΙΩΣΗΣ



ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟ ΕΤΟΣ 201_ -201_

1 Σκοπός

Σκοπός της Εργαστηριακής Άσκησης είναι η μελέτη του φαινομένου της σπηλαιώσης που αποτελεί ένα σημαντικό πρόβλημα των ρευστοδυναμικών μηχανών.

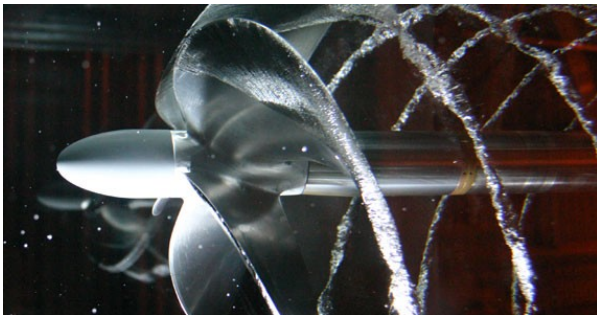
Πιο αναλυτικά αντικείμενο της Εργαστηριακής Άσκησης είναι

1. η σταδιακή ανάλυση του φαινομένου και η μέριμνα που πρέπει να λαμβάνεται ώστε να αποφεύγεται η σπηλαιώση σε δεδομένο υγρό για δεδομένη παροχή,
2. η μελέτη του ρόλου που διαδραματίζει το αποκαλούμενο “απαιτούμενο καθαρό θετικό ύψος ενέργειας” (**Net Positive Suction Head required - NPSH_r**) καθώς και ο τρόπος υπολογισμού του.

2. Θεωρητικό Μέρος.

Στα πτερύγια των υδροδυναμικών μηχανών όπως και στα πτερύγια των προπελών πλοίων (Σχήμα 3.1) μπορεί κάτω από ορισμένες συνθήκες (που εξαρτώνται από τη γεωμετρία των πτερυγίων, την ταχύτητα περιστροφής, τη θερμοκρασία του υγρού, την πίεση των ατμών του υγρού, την εξωτερική πίεση) να εμφανισθεί το φαινόμενο της σπηλαιώσης.

Όταν ένα υγρό διέρχεται με μεγάλες ταχύτητες (σύμφωνα με την εξίσωση *Bernoulli* αν για οποιοδήποτε λόγο αυξηθεί η ταχύτητα ροής του υγρού, θα έχουμε αντίστοιχη μείωση της πίεσης) από μια υδροδυναμική μηχανή, είναι δυνατόν (υπό ορισμένες συνθήκες) να σχηματιστούν φυσαλίδες ατμών (βράζει) μέσα στην κινούμενη μάζα με δυσμενή επίδραση στη λειτουργία της μηχανής. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως **σπηλαιώση**, (*cavitation*). Η σπηλαιώση ειδικότερα σε μια υδραντλία αρχίζει να εμφανίζεται όταν «η απόλυτη στατική πίεση στην αναρρόφησή της γίνει (περίπου) ίση ή μικρότερη από τη μέγιστη τάση των υδρατμών (πίεση κορεσμένου ατμού)». Τότε δημιουργούνται φυσαλίδες ατμού, από το ίδιο το νερό, οι οποίες παρασυρόμενες σε περιοχές μεγαλύτερης πίεσης συνθλίβονται με κρότο. Για το λόγο αυτό, το φαινόμενο της σπηλαιώσης σε μια αντλία συνδέεται με κραδασμούς και θόρυβο. Όταν δε οι φυσαλίδες αυτές συνθλίβονται πάνω στις επιφάνειες της μηχανής προκαλούν διαβρώσεις και καταπονήσεις σε τμήματα του στροφείου.



Σχήμα 3.1: Σχηματισμός φυσαλίδων σπηλαιώσης σε προπέλα

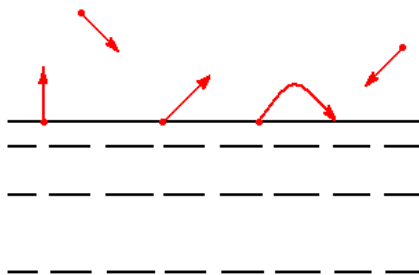
Γενικά οι **προϋποθέσεις** για την εμφάνιση της σπηλαιώσης είναι οι εξής:

- Η μικρή πίεση σε σύγκριση με τη μέγιστη τάση των ατμών (κορεσμού) του υγρού που αντλείται. Έτσι, παρ' όλο ότι οι αντλίες αυξάνουν την πίεση στην κατάθλιψη οπότε δύσκολα εμφανίζεται εκεί σπηλαιώση, στην αναρρόφηση η εξωτερική πίεση (ιδιαίτερα αν η αντλία εργάζεται αντλώντας υγρό από χαμηλότερη στάθμη ή το ύψος αναρροφήσεως είναι μεγάλο ή το στόμιο εισόδου στο σωλήνα αναρροφήσεως βρίσκεται σε μικρή απόσταση από την επιφάνεια του υγρού) μπορεί εύκολα να πέσει κάτω από την τιμή της πίεσης ατμών του υγρού στη θερμοκρασία λειτουργίας. Το φαινόμενο της σπηλαιώσης είναι δυνατόν να αναπτυχθεί σε όλες τις ροές υγρών και ιδιαίτερα στις περιοχές όπου αναπτύσσονται υψηλές τιμές της ταχύτητας της ροής, όπως στις υδροδυναμικές μηχανές (αντλίες και υδροστρόβιλοι), σε βάνες κατά το μερικό κλείσιμο, σε εξαρτήματα όπως διακλαδώσεις κ.λπ. Φυσικά, όσο μικρότερη είναι η μέση στατική πίεση της ροής λόγω της υδροστατικής πίεσης και μόνον (δηλαδή σε σημεία με υψηλή στάθμη ως προς τη στάθμη αναφοράς) τόσο πιο εύκολη είναι η ανάπτυξη σπηλαιώσης καθώς μικρή πτώση της στατικής πίεσης, που οφείλεται σε τοπική αύξηση της ταχύτητας της ροής

(σε μετατροπή μέρους της ολικής ενέργειας του υγρού σε κινητική ενέργεια σύμφωνα με την εξίσωση *Bernoulli*), να είναι πιθανώς αρκετή για διαμόρφωση συνθηκών σπηλαιώσης.

- Όταν η παροχή είναι μεγαλύτερη από την κανονική, η σπηλαιώση εμφανίζεται ευκολότερα γιατί αυξάνεται η ταχύτητα ροής με αντίστοιχη πτώση της πίεσης.
- Από κινηματική άποψη το σχήμα των γραμμών ροής επηρεάζει την εμφάνιση της σπηλαιώσης. Απότομη αλλαγή της διεύθυνσης ροής, απότομη διεύρυνση των διόδων ροής μέσα στην αντλία ή κακές συνθήκες εισόδου του υγρού στην πτερωτή είναι δυνατό να προκαλέσουν σπηλαιώση.

Μόρια ενός υγρού τα οποία εγκαταλείπουν την ελεύθερη επιφάνειά του, σχηματίζουν ένα νέφος ατμών το οποίο καλύπτει την επιφάνεια του υγρού. Το νέφος αυτό αυξάνεται ή ελαττώνεται ανάλογα με τη διεύθυνση της ταχύτητας του καθαρού αριθμού των μορίων που διασχίζουν τη διαχωριστική επιφάνεια, (Σχήμα 3.2). Η πίεση του νέφους αυτού καλείται **πίεση (τάση) ατμών υγρού**.



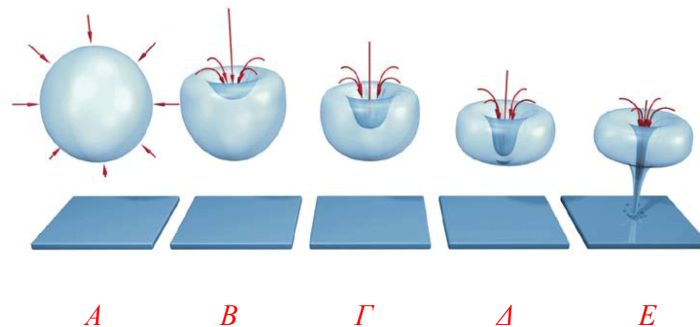
Σχήμα 3.2: Κινήσεις μορίων νέφους ατμών που καλύπτει την επιφάνεια του υγρού

Οι φυσαλίδες σχηματίζονται και καταρρέουν σε σύντομο χρονικό διάστημα, της τάξης των μs. Κατά τη διάρκεια της εξέλιξης τους προκαλούνται τοπικές παροδικές υψηλές πιέσεις και αστάθειες της ροής. Στις αντλίες αυτό οδηγεί σε δημιουργία θορύβου, δονήσεων και βλαβών των επιφανειών της αντλίας, οι οποίες οδηγούν σε απώλεια του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένες. Η εξέλιξη του μηχανισμού της σπηλαιώσης έχει ως εξής, (Σχήμα 3.3):

- **Σχηματισμός φυσαλίδων στο εσωτερικό του υγρού.** Οι φυσαλίδες σχηματίζονται μέσα στο υγρό όταν αυτό ατμοποιείται, δηλαδή κατά την αλλαγή φάσης από υγρό σε ατμό.
- **Ανάπτυξη-μεγέθυνση φυσαλίδων.** Οι φυσαλίδες αυτές εμποδίζουν στη συνέχεια την ομαλή πορεία της ροής πάνω στο περυσίο, δημιουργώντας με το μπλοκάρισμα αυτό επιτάχυνση της ροής, πράγμα που φέρνει καινούργια πτώση στη στατική πίεση και επομένως νέες φυσαλίδες. Αν οι συνθήκες λειτουργίας παραμένουν σταθερές, νέες φυσαλίδες συνεχίζουν να σχηματίζονται και οι παλιές φυσαλίδες να αυξάνονται σε μέγεθος. Οι φυσαλίδες παρασύρονται από το υγρό καθώς αυτό ρέει από το «μάτι» του στροφείου προς το άκρο εξόδου του στροφείου κατά μήκος του περυσίου 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 νερού μέσα στο στροφείο, όπου αρχίζουν να καταρρέουν. Ο κύκλος ζωής μιας φυσαλίδας έχει υπολογιστεί ότι είναι της τάξεως των 0.003s.
- **Κατάρρευση των φυσαλίδων.** Καθώς οι φυσαλίδες ατμού κινούνται κατά μήκος των περυσίων του στροφείου, η πίεση γύρω από τις φυσαλίδες αρχίζει να αυξάνεται έως ότου φθάσει σ' ένα σημείο όπου η πίεση έξω από τη φυσαλίδα τείνει να γίνει μεγαλύτερη από την πίεση μέσα στη φυσαλίδα. Η μετάβαση από τη 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 στη συνέχεια καταρρέει. Η διαδικασία δεν είναι έκρηξη προς τα έξω αλλά μάλλον μια κατάρρευση-έκρηξη προς το εσωτερικό της. Εκατοντάδες φυσαλίδες καταρρέουν περίπου στο ίδιο σημείο κάθε περυσίου του στροφείου. Λόγω ακριβώς της μεγάλης διαφοράς στην πυκνότητα μεταξύ της υγρής φάσης ρ_{liquid} και της φάσης ατμού ρ_{steam} (για το νερό σε θερμοκρασία μικρότερη των 100°C είναι $\rho_{\text{liquid}}/\rho_{\text{steam}} > 900$), 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 στη μάζα του ατμού είναι πολύ μικρός.
- **Επανυγροποίηση της φυσαλίδας.** Με την επανυγροποίηση της φυσαλίδας σχηματίζεται ένα κενό που τείνει να καταληφθεί με ορμή από το περιβάλλοντα υγρό το οποίο επιταχύνεται γρήγορα υπό τη μορφή υγρού *micro-jet* για να γεμίσει το κενό που δημιουργήθηκε. Τότε, το *micro-jet* διαρρηγνύει τη φυσαλίδα με δύναμη που δρα σα

σφυρηλάτηση. Η ταχύτητά 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. Επειδή δε η μετάπτωση από αέρια σε υγρή μορφή γίνεται ξαφνικά, η όλη διαδικασία είναι αδιαβατική με αποτέλεσμα τη γένεση υψηλών τοπικά θερμοκρασιών που υποβοηθούν τη μηχανική καταστροφή του υλικού εξασθενώντας σταδιακά την οποιαδήποτε αντοχή και συνοχή του.

Οι τοπικές πιέσεις λόγω σπηλαιώσης μπορούν να φθάσουν μέχρι εκατοντάδες ατμόσφαιρες. Έχουν αναφερθεί πιέσεις κατάρρευσης φυσαλίδων μεγαλύτερες από 1GPa, ενώ η συχνότητα είναι αρκετά υψηλή, της τάξης μέχρι και αρκετά kHz. Αυτό το τοπικά έντονο φαινόμενο της σφυρηλάτησης μπορεί να δημιουργήσει κοιλότητες στο στροφείο και αλλού.



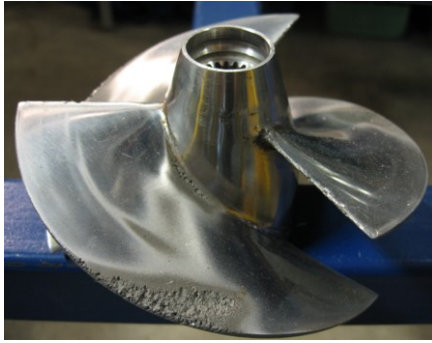
Σχήμα 3.3: Κατάρρευση φυσαλίδας πάνω σε συμπαγές τοίχωμα: *A.* αρχική *B.* εκκίνηση μηχανισμού κατάρρευσης φυσαλίδας *Γ., Δ.* σχηματισμός του υγρού micro-jet *E.* σύγκρουση και απομάκρυνση υλικού (δημιουργία κοιλότητας)

Η σπηλαιώση συνήθως συμβαίνει στην πλευρά της αναρρόφησης της αντλίας. Σπανιότερα μπορεί να παρατηρηθεί και στην κατάθλιψη σε σημεία «αποκόλλησης» της ροής. Στις φυγοκεντρικές αντλίες η σπηλαιώση δημιουργείται συχνότατα στην εσωτερική πλευρά των πτερυγίων κοντά στην είσοδο της πτερωτής, στα σημεία όπου το υγρό ρέει δια μέσου διακένων στεγανότητας, ή όταν κάνει απότομες στροφές με αποτέλεσμα να «αποκολλάται» η ροή από τις επιφάνειες του μετάλλου. 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. Στις αντλίες μικτής και αξονικής ροής, όπου τα πτερύγια είναι πάντοτε ανοικτού τύπου (Σχήμα 11.17Α *Θεωρίας*), η σπηλαιώση εκδηλώνεται στο χείλος εισόδου του υγρού στα πτερύγια, στα άκρα των πτερυγίων προς τα τοιχώματα του περιβλήματος και στο χείλος εισόδου του υγρού στα πτερύγια διαχύσεως.

Μετά την κατάρρευση της φυσαλίδας, εκπέμπεται ηχητικό κύμα που πηγάζει από το σημείο της κατάρρευσης. Αυτό το ηχητικό κύμα αποτελεί ένδειξη της σπηλαιώσης στην αντλία.

Συμπερασματικά, οι **συνέπειες** του φαινομένου της σπηλαιώσης κατά σειρά σοβαρότητας είναι:

- Υλική καταστροφή της επιφάνειας των πτερυγίων (λόγω γένεσης κρουστικών κυμάτων υψηλής πίεσης), (Σχήμα 3.4).
- Υποβιβασμός του μανομετρικού ύψους, της παροχής όγκου και επομένως του βαθμού απόδοσης της αντλίας (λόγω ανωμαλίας στη ροή).
- Θόρυβος. Προκαλείται από την πρόσκρουση του υγρού στις μεταλλικές επιφάνειες κατά την απότομη συμπύκνωση των φυσαλίδων.
- Κραδασμοί της αντλίας. Προκαλούνται από τις ταλαντώσεις των τμημάτων στα οποία προσκρούει το υγρό.
- Αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας της αντλίας (από την επανυγροποίηση των φυσαλίδων).



Σχήμα 3.4: Δημιουργία κοιλοτήτων και τελικά απώλειες υλικού στα πτερύγια στροφείων

Στις φυγόκεντρες αντλίες με μικρή ειδική ταχύτητα ($n_s < 30$) η πτώση των χαρακτηριστικών καμπύλων είναι πιο έντονη. Στις αντλίες αξονικής ροής με ειδική ταχύτητα $50 < n_s < 100$ η πτώση των χαρακτηριστικών καμπύλων αρχίζει πριν από την πλήρη εκδήλωση της σπηλαιώσης.

Δοκιμές που έγιναν σε χημικώς καθαρά υγρά έδειξαν ότι μπορούν να ανταπεξέλθουν σε μεγάλες τάσεις εφελκυσμού, της τάξης εκατοντάδων kp/cm^2 , πράγμα που αντιβαίνει στην πρόβλεψη σχηματισμού σπηλαιώσης, όταν η πίεση μειώνεται μέχρι την τάση ατμών. Επειδή στα υγρά του εμπορίου ή των τεχνικών εφαρμογών εμφανίζεται συνήθως απότομος βρασμός, όταν η πίεση φθάνει την τάση ατμών, έχει γίνει γενικά παραδεκτό ότι υπάρχουν πυρήνες γύρω από τους οποίους σχηματίζονται και αναπτύσσονται οι φυσαλίδες ατμών. Η φύση των πυρήνων αυτών δεν έχει πλήρως κατανοηθεί, αλλά πιθανόν να είναι μικροσκοπικά σωματίδια σκόνης ή άλλων ακαθαρσιών που υπάρχουν σε μεγάλο ποσοστό στα υγρά που συνήθως χρησιμοποιούνται.

Μερικές φορές τα καταστρεπτικά αποτελέσματα της σπηλαιώσης εντείνονται από επιπρόσθετα φαινόμενα ηλεκτροχημικών διαβρώσεων ή από την ύπαρξη διαθρωτικών ουσιών (οξυγόνο ή οξέα) στο υγρό. Αυτό εξηγείται από το ότι οι σημαντικές υπερπίεσεις δρουν καταλυτικά στην χημική δράση. Επίσης, όταν αρχίσει η επιφανειακή διάβρωση της στερεής επιφάνειας, το φαινόμενο της σπηλαιώσης γίνεται όλο και πιο έντονο για δύο λόγους: αυξάνεται η πραγματική επιφάνεια του υλικού που είναι εκτεθειμένη στην δράση των υπερπίεσεων ενώ παράλληλα οι επιφανειακές ανωμαλίες προκαλούν μεγαλύτερες τοπικές υπερταχύσεις και άρα πτώση της στατικής πίεσης, δηλαδή εντονότερη τοπική ανάπτυξη της σπηλαιώσης.

Η αναγνώριση των συμπτωμάτων της σπηλαιώσης, και η σωστή διάγνωση του τύπου της σπηλαιώσης, μπορούν να βοηθήσουν στην αποτροπή μιας σοβαρής αστοχίας των πτερυγίων του στροφείου μιας ρευστοδυναμικής μηχανής.

Η σπηλαιώση είναι διαφορετικό φαινόμενο από τη **σπηλαιώση αερίου** (*gas cavitation*), η οποία οφείλεται στα διάφορα αέρια που είναι διαλυμένα στο υγρό, τα οποία εκλύονται και σχηματίζουν φυσαλίδες αερίων όταν ελαττώνεται η πίεση. Σ' αυτήν την περίπτωση η πίεση δε χρειάζεται να πέσει κάτω της πίεσης ατμών. Η σπηλαιώση αερίου οδηγεί σε πτώση του ολικού μανομετρικού ύψους και της απόδοσης της αντλίας, αλλά δεν είναι τόσο επικίνδυνη (όσο η σπηλαιώση) όσον αφορά την καταστροφή του υλικού. Αυτό οφείλεται στη συμπιεστότητα των αερίων της φυσαλίδας στη φάση της επαναδιάλυσης της στο υγρό και στην απόσβεση των κρούσεων που η συμπιεστότητα συνεπάγεται. Επίσης, η σπηλαιώση με το φαινόμενο της **μηχανικής διάβρωσης** (*erosion*) που οφείλεται στη μηχανική προσβολή της επιφάνειας του υλικού από το υγρό ιδιαίτερα όταν το υγρό περιέχει στερεά σωματίδια ή τεμάχια. Η μηχανική διάβρωση αυξάνεται με το τετράγωνο ή τον κύβο της σχετικής ταχύτητας μεταξύ του υγρού και του υλικού της αντλίας και ανάλογα με τη συγκέντρωση και τη σκληρότητα των στερεών στο αντλούμενο υγρό.

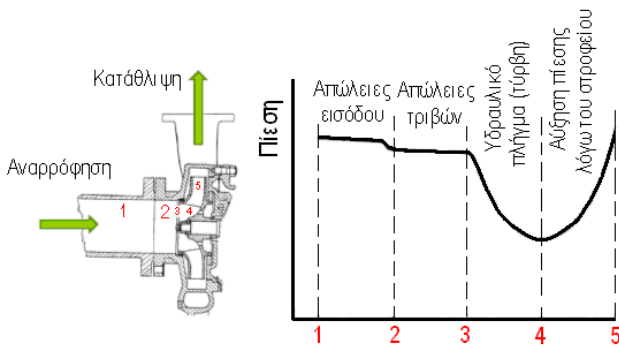
11.4.3.2 Συνθήκες Εμφάνισης Σπηλαιώσης

Στη διεθνή πρακτική υπάρχουν δύο επικρατέστεροι **τρόποι /κριτήρια** που χρησιμοποιούνται για τη διαπίστωση πότε θα εμφανιστεί σε μία υδροδυναμική μηχανή το φαινόμενο της σπηλαιώσης. Συγκεκριμένα στις

αντλίες χρησιμοποιείται κυρίως το κριτήριο που βασίζεται στο λεγόμενο **καθαρό θετικό ύψος αναρρόφησης**, (*Net Positive Suction Head, NPSH*) και σπανιότερα η **παράμετρος Thoma** ή **παράμετρος σπηλαιώσης**. Η παράμετρος σπηλαιώσης χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο στους υδροστροβίλους.

Σ' ένα υγρό από την είσοδο του από τη φλάντζα της αντλίας, αλλά και καθώς ρέει μέσα σε αυτήν και συναντά το στροφέιο, εμφανίζεται πτώση της πίεσης του, (Σχήμα 3.5). Το ποσοστό της πτώσης πίεσης είναι συνάρτηση πολλών παραγόντων, συμπεριλαμβανομένων, της γεωμετρίας του σχεδιασμού, της ταχύτητας περιστροφής, των απωλειών λόγω τριβών αλλά και των υδραυλικών απωλειών (λόγω τύρβης).

Εάν αυτή η πίεση σε κάποιο σημείο μέσα στην αντλία πέσει κάτω από την πίεση ατμών του αντλούμενου υγρού στη δεδομένη θερμοκρασία, θα εμφανιστεί εξάτμιση του υγρού ή αλλιώς το φαινόμενο της σπηλαιώσης. Η σπηλαιώση εμφανίζεται αρχικά στην αναρρόφηση της αντλίας και οφείλεται στην κατασκευή της αντλίας στο σημείο αυτό και κυρίως στην πρώτη αύξηση της ταχύτητας του υγρού με αντίστοιχη μείωση της πίεσης.



Σχήμα 3.5: Πτώση πίεσης του υγρού κατά την κίνησή του μέσα στην αντλία

Για το λόγο αυτό εξετάζεται η διαθέσιμη ενέργεια στην αναρρόφηση της αντλίας για να εκτιμηθεί η πιθανότητα έναρξης της σπηλαιώσης. Το ελάχιστο μανομετρικό που απαιτείται ώστε να αποφευχθεί η σπηλαιώση σε ένα δεδομένο υγρό σε μια δεδομένη παροχή καλείται **απαιτούμενο καθαρό θετικό ύψος αναρρόφησης**, (*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 αναρρόφησης**, (*Net Positive Suction Head available, NPSH_a*).

Για να αποφευχθεί η σπηλαιώση, ή τουλάχιστο να κρατηθεί σ' ένα αποδεκτό επίπεδο, πρέπει η πίεση του υγρού μπροστά από το στροφέιο να είναι μεγαλύτερη από την πίεση ατμών ($P_{\text{vapor}} = P_v$) του υγρού κατά ένα συγκεκριμένο ποσό:

$$P_{o,s} - P_v \geq (P_{o,s} - P_v)_{\min} \quad (3-1)$$

όπου $P_{o,s}$ η ολική πίεση του υγρού στο σημείο αναφοράς S που θεωρείται το κέντρο του στομίου αναρρόφησης (*suction*) της αντλίας. Διαιρώντας τη σχέση (3-1) με ρg πηγαίνουμε από μεγέθη πίεσης σε (μανομετρικά) ύψη:

$$\frac{P_{o,s} - P_v}{\rho g} \geq \left(\frac{P_{o,s} - P_v}{\rho g} \right)_{\min} \quad (3-2)$$

Το αριστερό μέλος της σχέσης (3-2) ονομάζεται καθαρό θετικό ύψος αναρρόφησης, διαθέσιμο (*Net Positive Suction Head available, NPSH_a*) και το δεξιό καθαρό θετικό ύψος αναρρόφησης, απαιτούμενο (*Net Positive Suction Head required, NPSH_r*), οπότε η σχέση (3-2), γράφεται:

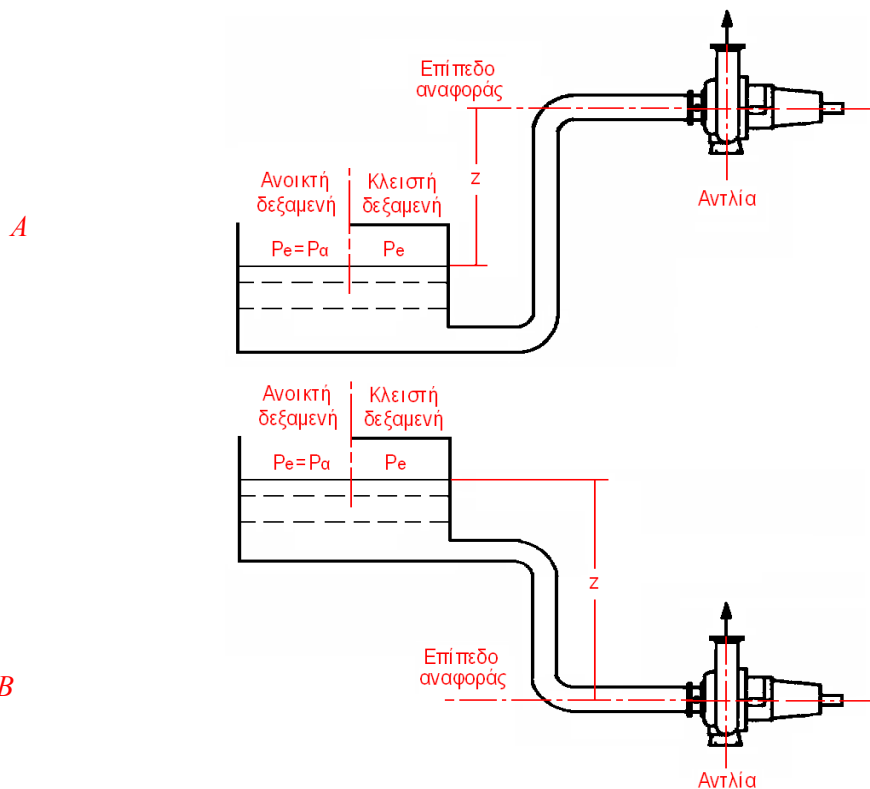
$$NPSH_a \geq NPSH_r \quad (m) \quad (3-3)$$

Η σχέση αυτή αποτελεί τη **συνθήκη μη σπηλαιώσης**, δηλαδή ένα σημείο λειτουργίας μιας φυγοκεντρικής αντλίας μπορεί να ληφθεί ως σημείο απρόσκοπτης λειτουργίας μόνο αν ισχύει η σχέση (3-3) γι' αυτό το σημείο. Έτσι όπως ορίστηκε το $NPSH_a$ αντιλαμβανόμαστε ότι **αναφέρεται στην εγκατάσταση (σύστημα)**. Μπορούμε λοιπόν να το εκφράσουμε συναρτήσει των συνθηκών που επικρατούν στην επιφάνεια του υγρού στη δεξαμενή αναρρόφησης. Ανάλογα τη σχετική θέση της αντλίας ως προς την ελεύθερη επιφάνεια της δεξαμενής αναρρόφησης διακρίνουμε τις περιπτώσεις:

1. Ανύψωση στην αναρρόφηση (suction lift), (Σχήμα 3.6A). Εάν η αντλία είναι τοποθετημένη ψηλότερα από την ελεύθερη επιφάνεια του υγρού, τότε το $NPSH_a$ δίνεται από τη σχέση:

$$NPSH_a = \frac{P_{o,e} - P_v}{\rho g} + \frac{\bar{V}_e^2}{2g} - \Delta h_f - z \quad (m) \quad (3-4)$$

- το μέγεθος $P_{o,e}$ είναι η ολική (απόλυτη) πίεση στην ελεύθερη επιφάνεια της δεξαμενής (η οποία εάν είναι ανοικτή ισχύει: $P_{o,e} = P_a$),
- ο όρος Δh_f αντιπροσωπεύει τις απώλειες τριβών (γι' αυτό και το αρνητικό πρόσημο) ύψους στον κλάδο της αναρρόφησης (σωλήνες, βάνες κ.λπ.),
- το μέγεθος z είναι η υψομετρική διαφορά από την ελεύθερη επιφάνεια της δεξαμενής έως το κέντρο της διατομής εισόδου της αντλίας,
- ο όρος $\bar{V}_e^2/2g$ μπορεί να παραληφθεί γιατί η ταχύτητα \bar{V}_e στη δεξαμενή είναι αμελητέα .



Σχήμα 3.6: $NPSH_a$: A. με ανύψωση στην απορρόφηση B. με θετική αναρρόφηση

2. Θετική αναρρόφηση (positive suction), (Σχήμα 3.6B). Εάν η αντλία είναι χαμηλότερα από την ελεύθερη επιφάνεια του υγρού, τότε το $NPSH_a$ δίνεται από τη σχέση:

$$\text{NPSH}_a = \frac{P_{o,e} - P_v}{\rho g} + \frac{\vec{V}_e^2}{2g} - \Delta h_f + z \quad (\text{m}) \quad (3-5)$$

Παρατήρηση: Εάν το υγρό είναι το νερό ($\rho = 1,000\text{kg/m}^3$) και θέσουμε $P_{o,e} = P_a = 1\text{atm}$ $g \approx 10\text{m/s}^2$, και $\vec{V}_e = 0$, τότε οι σχέσεις (3-4) και (3-5) απλοποιούνται στις εξής:

$$(3-4) \Rightarrow \text{NPSH}_a = 10 - \Delta h_f - z \quad (3-6) \quad (3-5) \Rightarrow \text{NPSH}_a = 10 - \Delta h_f + z \quad (3-7)$$

Το NPSH_r ορίζεται όπως και το NPSH_a , αλλά **αναφέρεται στην αντλία** και αποτελεί ελάχιστη αποδεκτή τιμή. Εκφράζεται σε μέτρα και είναι συνάρτηση της παροχής $\dot{V} \equiv Q$ της αντλίας. Συνήθως, αυξάνεται καθώς αυξάνεται η παροχή, (Σχήμα 3.7Γ). Κατά κανόνα, η καμπύλη $Q\text{-NPSH}_r$ δίνεται από τους κατασκευαστές της αντλίας μαζί με τις άλλες χαρακτηριστικές καμπύλες ($Q\text{-H}$ και $Q\text{-}\eta$, $Q\text{-N}$), (Σχήμα 3.7)

Οι κατασκευαστές καταλήγουν στην τιμή του NPSH_r μετά από δοκιμές και βάσει της εμπειρίας τους στηριζόμενοι σε ορισμένα κριτήρια «εμφάνισης σπηλαιώσης», όπως:

- η πτώση του ολικού ύψους H κατά 30%,
- η αύξηση του επιπέδου θορύβου (λόγω σπηλαιώσης) πάνω από ένα καθορισμένο όριο,
- η εμφάνιση ορατών φυσαλίδων ατμού του υγρού μεγαλύτερων από ένα όριο (π.χ. $>5\text{mm}$).
- η απόσπαση υλικού της αντλίας με ρυθμό μεγαλύτερο από κάποιο συγκεκριμένο όριο.

Στις δοκιμές αυτές οι κατασκευαστές αντλιών χρησιμοποιούν ως αντλούμενο υγρό το νερό ενώ γίνονται συνήθως μια φορά για κάθε τύπο στροφείου και όχι για κάθε ξεχωριστή αντλία. Ο κύριος σκοπός όλων αυτών των δοκιμών είναι να καθοριστούν οι απαιτήσεις σε NPSH_r , για διάφορες παροχές για ένα δεδομένο συνδυασμό στροφείου-κελύφους και να σχεδιαστούν καμπύλες του NPSH_r ως συνάρτηση της παροχής, (Σχήμα 3.7Γ).

Συχνά οι κατασκευαστές υποδεικνύουν ένα **περιθώριο ασφαλείας (cavitation margin) 0.5m** κατά τη μελέτη επιλογής της αντλίας για τις τιμές του NPSH_r , οπότε στην πράξη πολλές φορές χρησιμοποιούμε αντί της ανισότητας (3-3) την ανισότητα:

$$\text{NPSH}_a \geq \text{NPSH}_r + 0.5 \quad (3-8)$$

Λύνοντας τη σχέση (3-4) ως προς z και λαμβάνοντας υπόψη και τη συνθήκη μη σπηλαιώσης (3-3), προκύπτει:

$$z \geq \frac{P_{o,e} - P_v}{\rho g} + \frac{\vec{V}_e^2}{2g} - \Delta h_f - \text{NPSH}_r \quad (3-9)$$

Από τη σχέση (3-9) προκύπτει το μέγιστο επιτρεπόμενο ύψος απορρόφησης z_{\max} , εάν θεωρήσουμε επιπλέον ότι $\vec{V}_e = 0$:

$$z_{\max} = \frac{P_{o,e} - P_v}{\rho g} - \Delta h_f - \text{NPSH}_r \quad (3-10)$$

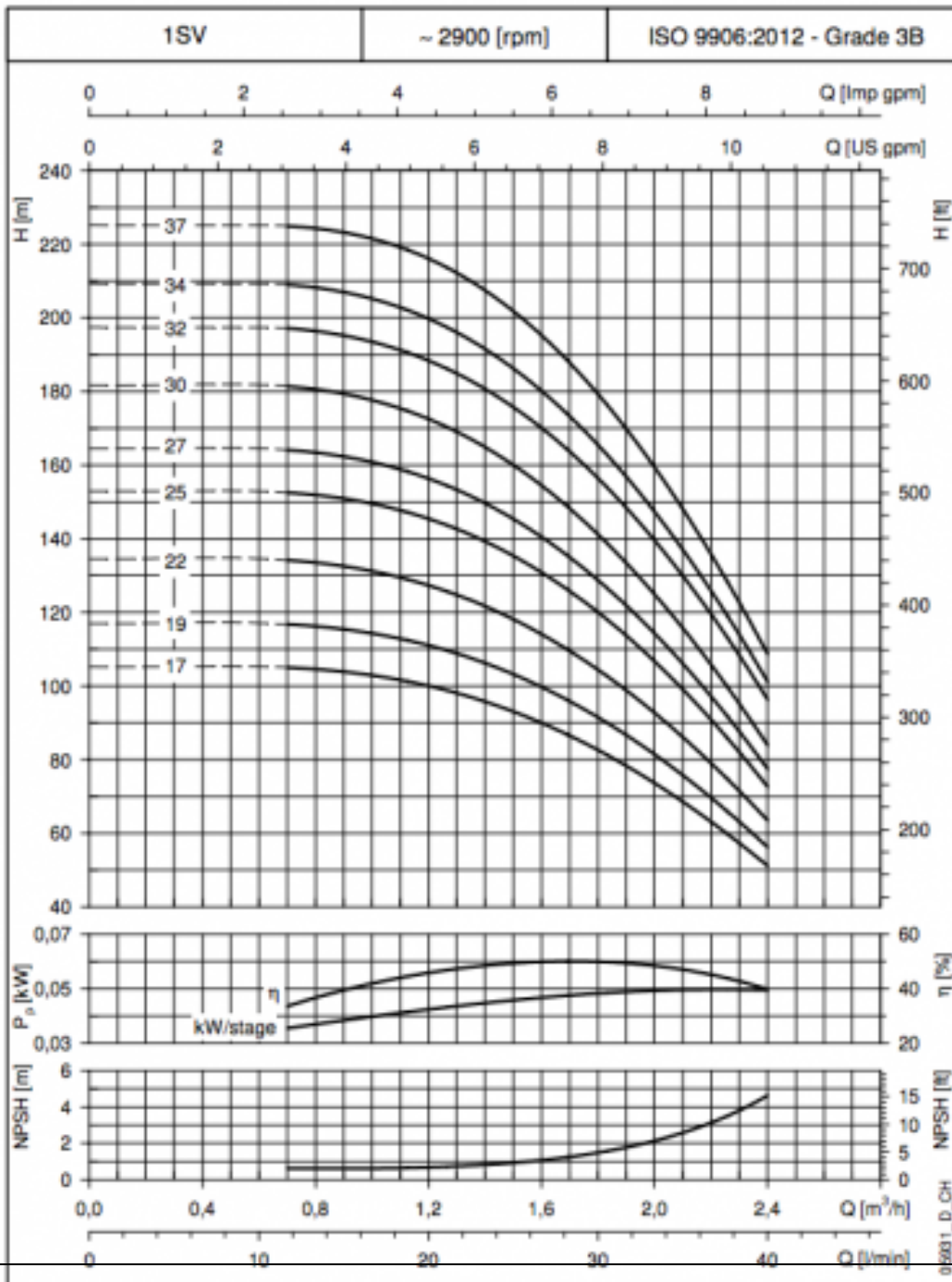
Παρατήρηση: Εάν η σχέση (3-10) δώσει αρνητικό αποτέλεσμα, τότε αυτό σημαίνει ότι οι υπάρχουσες συνθήκες είναι τέτοιες, ώστε η αντλία δεν μπορεί να εργασθεί με ανύψωση στην αναρρόφηση (Σχήμα 3.6Α), αλλά απαιτεί

θετική αναρρόφηση (Σχήμα 3.6B) με ελάχιστο ύψος $Z_{\min} = -Z_{\max}$. Αυτό συμβαίνει συχνά όταν η θερμοκρασία του αντλούμενου υγρού είναι υψηλή, οπότε η πίεση (κορεσμού) ατμών P_v είναι μεγάλη. Πρέπει συνεπώς οι υπολογισμοί να βασίζονται στη μέγιστη θερμοκρασία που μπορεί να υπάρξει με κατάλληλα πάντοτε περιθώρια ασφαλείας.

Παρατήρηση: Ένας άλλος παράγοντας που πρέπει να προσέχουμε κατά τον υπολογισμό του Z_{\max} είναι το υψόμετρο του τόπου της αντλητικής εγκατάστασης, γιατί απ' αυτό εξαρτάται η ατμοσφαιρική πίεση P_a . Γενικά, η P_a ελαττώνεται κατά $\approx 0.1 \text{ bar}$ για κάθε 1,000m υψόμετρο πάνω από τη στάθμη της θάλασσας.

A

B



Γ

Σχήμα 3.7: Χαρακτηριστικές καμπύλες αντλίας (δεδομένες από τον κατασκευαστή)

A. $Q - H$ B. $Q - N$ και $Q - \eta$ Γ. $NPSH_r - Q$

11.4.3.3 Τρόποι Αποφυγής της Σπηλαιώσης

Σε υδραυλικές μηχανές, ιδιαίτερα αντλίες υψηλών επιδόσεων και υδροστρόβιλους, είναι αδύνατο, ότι και να κάνουμε, να αποφύγουμε τη σπηλαιώση αν θέλουμε να έχουμε μεγάλο βαθμό απόδοσης. Όμως υπάρχουν δύο τρόποι μείωσης της έντασης ή ακόμα και αποφυγής του φαινομένου της σπηλαιώσης ή των συνεπειών του. Ο πρώτος βασίζεται στη χρήση υλικών ή επιστρώσεων υψηλής αντοχής σε μηχανικές καταπονήσεις, ενώ ο δεύτερος στη κατάλληλη σχεδίαση των μερών της αντλίας και στην επιλογή των χαρακτηριστικών λειτουργίας της για την αποφυγή των χαμηλών πιέσεων, ώστε να περιορίζεται -κατά το δυνατόν- η δημιουργία ευνοϊκών συνθηκών εμφάνισης της σπηλαιώσης.

Επιλογή κατάλληλων υλικών

Γενικά, ψαθυρά και ανομοιογενή υλικά όπως ο χυτοσίδηρος, είναι πολύ ευάλωτα σε σπηλαιώση. Σε αντλίες χαμηλής πίεσης από χυτοσίδηρο οι περιοχές που έχουν υποστεί βλάβη από σπηλαιώση φαίνονται σπογγώδεις. Σε φυγοκεντρικές αντλίες υψηλής πίεσης με μέρη από χάλυβα κατασκευών η καταστροφή από σπηλαιώση έχει τη μορφή κοιλοτήτων ή αυλακώσεων με λεία επιφάνεια. Το χρονικό διάστημα που μπορεί μια αντλία μπορεί να λειτουργήσει σε συνθήκες σπηλαιώσης εξαρτάται από το υλικό που είναι κατασκευασμένα τα τμήματα που εκτίθενται σε σπηλαιώση.

Η αντοχή των μετάλλων στη σπηλαιώση εξαρτάται από τη χημική τους σύνθεση, την κρυσταλλική δομή τους, το βαθμό επιφανειακής κατεργασίας και τις τυχόν επιστρώσεις. Όσο η δομή του υλικού είναι συμπαγέστερη και οι κόκκοι του έχουν μεγαλύτερη ελαστικότητα και αντοχή σε κόπωση (*fatigue strength*), τόσο ανθεκτικότερο σε φθορά από σπηλαιώση είναι το υλικό. Εάν επιπλέον, το υλικό διαθέτει και αντοχή σε ηλεκτροχημική διάβρωση είναι ακόμη καλύτερα.

Συνήθως η αντοχή των υλικών σε σπηλαιώση μετράται από την απώλεια μάζας όπως προκύπτει από ζύγισμα πλακιδίου που υπόκειται σε σπηλαιώση επί ένα χρονικό διάστημα σε ειδική συσκευή. Εάν ο κλασσικός χυτοσίδηρος (GG-25) βαθμολογηθεί με δείκτη 1 που εκφράζει την απώλεια μάζας λόγω σπηλαιώσης, τα υπόλοιπα συνήθη υλικά χαρακτηρίζονται από τους ενδεικτικούς δείκτες που αναγράφονται στον Πίνακα 3.1:

Πίνακας 3.1: Δείκτες φθοράς υλικών λόγω σπηλαιώσης

A/A	Υλικό	Δείκτης
← αύξηση αντοχής	Χυτοσίδηρος, (GG-25)	1
	Χυτοχάλυβας, (GS-C25)	0.8
	Ορείχαλκος (ή μπρούντζος), (G-CuSn10)	0.5
	Χυτός χρωμοχάλυβας G-X20Cr14	0.2
	Αλουμινιούχος ορείχαλκος (G-AIBz10Fe)	0.1
	Χρωμονικελιούχος χάλυβας (G-X6CrNi189)	0.05

Ο ανοξειδωτος χρωμονικελιούχος χάλυβας (Σχήμα 3.8) είναι κατά 20 φορές πιο ανθεκτικός στη φθορά από σπηλαιώση από ότι ο κοινός χυτοσίδηρος GG-25. Αντίθετα, ο (περλιτικός φαιός) χυτοσίδηρος χρησιμοποιείται κυρίως για την κατασκευή μη ισχυρά καταπονούμενων, με την προϋπόθεση ότι όταν δεν συντρέχουν άλλοι απαγορευτικοί παράγοντες (όπως το βάρος ή η αντοχή σε διάβρωση, σπηλαιώση κ.λπ.) κυρίως λόγω του μικρού κόστους σε συνδυασμό με τις πολύ καλές μηχανικές και μηχανουργικές ιδιότητες καθώς και τις ιδιότητες χύτευσης. Πρέπει όμως να μην ξεχνούμε, ότι δεν υπάρχουν υλικά απόλυτης αντοχής σε σπηλαιώση. Ακόμη και τα καλύτερα υλικά καταστρέφονται από τη σπηλαιώση νωρίτερα ή αργότερα.

Σχεδίαση και λειτουργία

Η σπηλαιώση αποφεύγεται με ομαλή διαμόρφωση των διόδων ροής, σωστές αεροτομές πτερυγίων και περιορισμένες ταχύτητες του υγρού στη διέλευσή του μέσα από την αντλία. Αλλά το κυριότερο μέτρο αποφυγής της

σπηλαιώσης είναι η εξασφάλιση κατάλληλης ελάχιστης πίεσης στην πλευρά της αναρρόφησης της αντλίας, όπου υπάρχουν και οι χαμηλότερες πιέσεις και όπου εμφανίζεται αρχικά η σπηλαιώση.



Σχήμα 3.8: Στροφείο κατασκευασμένο από ανοξείδωτο χρωμιονικελιούχο χάλυβα

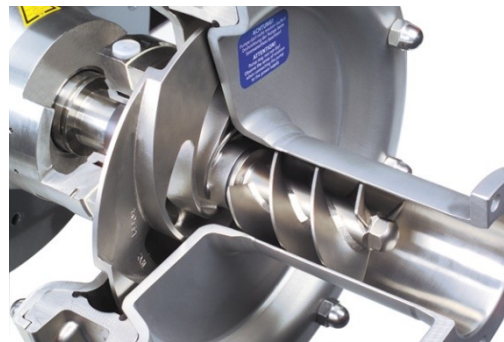
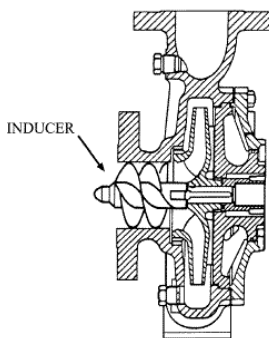
Μείωση του $NPSH_r$ μέσω μείωσης στροφών περιστροφής

Στην Παράγραφο 11.4.3.1 αναφέρθηκε ότι η πιθανότητα εμφάνισης της σπηλαιώσης μειώνεται όσο μικρότερες είναι οι ταχύτητες διέλευσης του υγρού μέσα από την αντλία. Αυτό σημαίνει ότι, όσο μειώνεται η περιστροφική ταχύτητα (n) της αντλίας τόσο μικρότερο γίνεται το $NPSH_r$. Ακόμη, το $NPSH_r$ αυξάνεται καθώς αυξάνεται η ειδική ταχύτητα n_s για ένα συγκεκριμένο ολικό ύψος H . Αντίθετα, το μέγιστο επιτρεπτό ύψος αναρρόφησης z_{max} μειώνεται καθώς αυξάνεται η ειδική ταχύτητα n_s για συγκεκριμένο ολικό ύψος H . Αυτά προκύπτουν από τη μελέτη των σχέσεων (11-55) και (3-3) και της Παραγράφου 11.4.4 **Θεωρίας**.

Είναι προφανές, ότι μία αντλία διπλής εισόδου [Παράγραφος 11.16 **Θεωρίας**] θα έχει μικρότερο $NPSH_r$ από μία αντλία απλής εισόδου με την ίδια παροχή και ύψος, γιατί η παροχή Q μοιράζεται εξίσου στις δύο πλευρές του στροφείου, άρα οι ταχύτητες διέλευσης είναι μικρότερες, στην αντλία διπλής εισόδου.

Μείωση του $NPSH_r$ μέσω χρήσης βοηθητικής αντλίας ή επαγωγέα

Σε ειδικές περιπτώσεις είναι δυνατό να ελαττωθεί το $NPSH_r$ μιας αντλίας στο 50-60% της αρχικής του τιμής με την τοποθέτηση ενός επαγωγέα (*inducer*) μπροστά από το στροφείο. (Σχήμα 3.9).

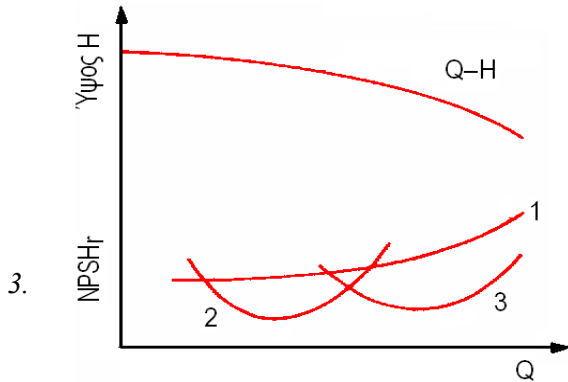


Σχήμα 3.9: Στροφείο με επαγωγέα

Τέτοιες ειδικές περιπτώσεις έχουμε όταν:

- απαιτείται η επέκταση μιας εγκατάστασης, οπότε το $NPSH_a$ γίνεται ανεπαρκές,
- όταν οικονομικοί λόγοι εμποδίζουν την αύξηση του $NPSH_a$ με ανύψωση της δεξαμενής αναρρόφησης,
- όταν οικονομικοί λόγοι δεν επιτρέπουν την εγκατάσταση μιας πιο αργόστροφης, μεγαλύτερου μεγέθους αντλίας με μικρότερο $NPSH_r$, κ.λπ.

Ουσιαστικά, ο επαγωγέας είναι μια μικρή προωθητική αντλία με αξονική πτερωτή που ανυψώνει την πίεση στην αναρρόφηση του κύριου στροφείου έτσι ώστε η πίεση να μην πέφτει ποτέ κάτω από την πίεση ατμών του υγρού, οπότε δεν εμφανίζεται σπηλαιώση. Ο επαγωγέας συμμετέχει στη δημιουργία του ολικού ύψους H της αντλίας κατά ένα μικρό ποσοστό ($< 5\%$). Έτσι, αν και ο βαθμός απόδοσης του επαγωγέα είναι χαμηλότερος από το βαθμό απόδοσης του κύριου στροφείου, ο συνολικός βαθμός απόδοσης της αντλίας δε μειώνεται αισθητά. Υπάρχουν διάφοροι τύποι επαγωγέων και πρέπει να σημειωθεί ότι η μείωση του $NPSH_r$ που προκαλεί ο επαγωγέας δεν ισχύει για ολόκληρη την περιοχή παροχών της αντλίας αλλά μόνο για συγκεκριμένη περιοχή ανάλογα με τον τύπο του επαγωγέα, (Σχήμα 3.10).



Σχήμα 3.10: $NPSH_r$: 1. χωρίς επαγωγέα, 2. με επαγωγέα τύπου A, με επαγωγέα τύπου B

Μείωση του $NPSH_r$ μέσω χρήσης πολυβάθμιας αντλίας

Στην περίπτωση πολυβάθμιας αντλίας ο έλεγχος σπηλαιώσης θα πρέπει να γίνει για την πρώτη βαθμίδα καθώς σε αυτή η στατική πίεση είναι χαμηλή και υπάρχει κίνδυνος εμφάνισης σπηλαιώσης.

Η **σωστή τοποθέτηση αντλίας** σε αντλητική εγκατάσταση ώστε να μην εμφανίζεται σπηλαιώση γίνεται ως εξής: η αντλητική εγκατάσταση είναι δεδομένη, οπότε αρχικά καθορίζεται το σημείο λειτουργίας της, δηλαδή η παροχή της Q . Από την εφαρμογή της συνθήκης μη σπηλαιώσης προκύπτει μέγιστο επιτρεπόμενο ύψος απορρόφησης z_{max} . Επομένως, όσο μεγαλύτερες είναι οι απώλειες της σωληνογραμμής αναρρόφησης (Δh_f), τόσο δυσκολότερη είναι η ικανοποίηση της συνθήκης μη σπηλαιώσης, δηλαδή ή περιορίζεται το εύρος λειτουργίας της αντλίας ή θα πρέπει αυτή να τοποθετηθεί σε μικρότερο Δz άρα να πλησιάσει την ελεύθερη επιφάνεια της δεξαμενής αναρρόφησης. Για το λόγο αυτό η σωληνογραμμή αναρρόφησης επιδιώκεται να είναι όσο το δυνατό μικρότερη σε μήκος (τοποθέτηση της αντλίας κοντά στην δεξαμενή αναρρόφησης) και μεγάλης διαμέτρου (συνήθως η σωλήνωση αναρρόφησης είναι μεγαλύτερη τη σωλήνωση κατάθλιψης κατά μία ονομαστική διάμετρο). Για τον ίδιο λόγο σωληνογραμμή αναρρόφησης δεν πρέπει να περιλαμβάνει πολλά εξαρτήματα και η βάνα αναρρόφησης να είναι πάντοτε πλήρως ανοικτή ώστε οι αντίστοιχες υδραυλικές απώλειες να είναι ελάχιστες.

Παρατήρηση: Το φαινόμενο της σπηλαιώσης μπορεί να παρατηρηθεί και στις αντλίες θετικής μετατόπισης όπως οι παλινδρομικές στα σημεία που επικρατούν πιέσεις κάτω από την πίεση κορεσμένων ατμών του υγρού, [Παράγραφος 11.5 **Θεωρίας**].

3. Το $NPSH_a$ ως κριτήριο της σπηλαιώσης.

Σε μια φυγοκεντρική αντλία οι πλέον πιθανές περιοχές ανάπτυξης της σπηλαιώσης είναι αυτές στις οποίες η στατική πίεση είναι ήδη χαμηλή οπότε με περαιτέρω μείωση της, λόγω υδροδυναμικών φαινομένων επιτάχυνσης της ροής, ενδέχεται αυτή να μειωθεί κάτω από την πίεση ατμοποίησης. Άρα **στην περίπτωση των φυγοκεντρικών αντλιών η πιθανή περιοχή ανάπτυξης της σπηλαιώσης είναι η διατομή εισόδου της πτερωτής.**

Θεωρώντας ότι στη διατομή εισόδου της πτερωτής επικρατεί η χαμηλότερη πίεση P_A θα πρέπει για να αποφευχθεί σπηλαίωση η πίεση αυτή να είναι μεγαλύτερη της πίεσης ατμών του υγρού δηλ. θα πρέπει $P_A > P_S$.

Έτσι ορίζεται μια ελάχιστη τιμή του ύψους αναρρόφησης, **το καθαρό θετικό ύψος αναρρόφησης**, γνωστό και ως **NPSH για την αντλία** με την παρακάτω σχέση:

$$NPSH = \frac{P_0}{\rho g} - \frac{P_S}{\rho g} = H_0 - H_S = (H_{atm} + H_{head}) - H_S \quad (1)$$

Όπου P_0 : η χαμηλότερη απόλυτη πίεση,

P_S : η πίεση ατμών,

H_0 : το απόλυτο ύψος,

H_S : το ύψος υδρατμών,

H_{atm} : το ύψος ατμοσφαιρικής πίεσης,

H_{head} : το μανομετρικό ύψος,

Διατηρώντας τους όρους της ταχύτητας

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

Όπου P_A : η πίεση στην ελεύθερη επιφάνεια της δεξαμενής,

P_S : η πίεση ατμών, στην είσοδο της αντλίας

C_A : η ταχύτητα αναρρόφησης από τη δεξαμενή,

Z_i : η υψομετρική διαφορά μεταξύ δεξαμενής και εισόδου της αντλίας,

Δh_f : οι απώλειες τριβών.

Η σχέση (2) δίνει δηλ. το απαιτούμενο μανομετρικό της αντλίας έτσι ώστε το ρευστό να διατηρείται υγρό και να προφυλάσσεται από φαινόμενα σπηλαίωσης ή βρασμού. Η είσοδος – αναρρόφηση της αντλίας είναι το σημείο χαμηλότερης πίεσης όπου θα πρωτοεμφανιστεί σπηλαίωση. Όταν δίνεται το καθαρό θετικό ύψος αναρρόφησης (NPSH), από τις καμπύλες λειτουργίας μιας αντλίας θα πρέπει να επιβεβαιώνεται ότι το δεύτερο μέλος της (2) είναι ίσο ή μεγαλύτερο της τιμής του NPSH, προκειμένου να αποφεύγεται η σπηλαίωση.

Με βάση το NPSH 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_f .

$$h_{A,max} = \frac{P_1}{\rho g} - \frac{P_S}{\rho g} + \frac{C_1^2}{2g} - Z_i - \Delta h_{fA} \quad (3)$$

Συνήθως θεωρείται ότι ο όρος των ταχυτήτων είναι μηδέν οπότε και παραλείπεται στη σχέση (3) η οποία

απλοποιείται σε

$$h_{A,\max} = \frac{P_1 - P_S}{\rho g} - Z_i - \Delta h_{fA} \quad (4)$$

Βιβλιογραφία

1. Σέμψης Λάμπρος Μεταπτυχιακή Εργασία «Μελέτη του φαινομένου σπηλαίωσης σε φυγοκεντρική αντλία» Ε.Μ.Π, Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Ναυτική και Θαλάσσια Τεχνολογία και Επιστήμη ΑΘΗΝΑ 2007,
2. Γιανναδάκης Α. Διαλέξεις μαθημάτων «ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ» Πάτρα 2009,
3. Γιαννάκης Ι., Κρουστάλλη Α., Σημειώσεις Εργαστηρίου ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ 2009,
4. White M. Frank, (Univ.of Rhode Island) Fluid Mechanics 4th edition, McGraw-Hill 1991.
5. Ε.Μ.Π., Τμήμα Μηχανολόγων, Τομέας Ρευστών, ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ, Εργαστηριακή Άσκηση στο μάθημα Υδροδυναμικών Μηχανών I http://courseware.mech.ntua.gr/ml25036/texts/ergasthriakh_askhsh.pdf
6. Κατσαπράκης Α. Δημήτρης Σημειώσεις “Βασικά Μεγέθη Αντλιών” Υδροδυναμικές Μηχανές Εργαστήριο Αιολικής Ενέργειας ΤΕΙ Κρήτης. <http://www.tm.teicrete.gr/Shmeiwseis.aspx>
7. Πολυζάκης Α., «ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ» Πτολεμαΐδα 2016