

**ΑΚΑΔΗΜΙΑ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ  
Α.Ε.Ν ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΟΥΛΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ**

**ΘΕΜΑ: “ΤΡΟΠΟΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΤΩΝ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΣΠΗΛΑΙΩΣΗΣ  
ΣΤΗΝ ΕΛΙΚΑ ”**

**ΤΟΥ ΣΠΟΥΔΑΣΤΗ: ΝΙΚΟΛΑΙΔΗ ΔΑΜΙΑΝΟΥ  
Α.Γ.Μ: : 3584**

**Ημερομηνία ανάληψης της εργασίας: 09/05/2017**

**Ημερομηνία παράδοσης της εργασίας:**

<b>A/A</b>	<b>Όνοματεπώνυμο</b>	<b>Ειδικότητα</b>	<b>Αξιολόγηση</b>	<b>Υπογραφή</b>
<b>1</b>	<b>ΤΣΟΥΛΗΣ ΝΙΚ. ΔΙΕΥΘΥΝΤΗΣ</b>	<b>ΠΛΟΙΑΡΧΟΣ</b>		
<b>2</b>				
<b>3</b>				
<b>ΤΕΛΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ</b>				

**Ο ΔΙΕΥΘΥΝΤΗΣ ΣΧΟΛΗΣ: ΤΣΟΥΛΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ**

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>Πρόλογος</b> .....	3
<b>Κεφάλαιο 1:Αίτια και μορφές σπηλαιώσης</b> .....	4
1.1 Αρχή της σπηλαιώσης.....	4
1.2 Ταχύτητα αντικειμένου.....	5
1.3 Σχεδίαση έλικας.....	5
1.4 Σκάφος.....	6
1.5 Η επιρροή του χώρου.....	7
1.6 Τα στάδια της σπηλαιώσης ειδικότερα.....	7
1.7 Μορφές σπηλαιώσης.....	9
<b>Κεφάλαιο 2 : Αποτελέσματα της σπηλαιώσης και χαρακτηριστικά της</b> .....	10
2.1Ταχύτητα εμφάνισης και αποτελέσματα.....	10
2.2 Χαρακτηριστικά εμφάνισης του φαινομένου.....	11
2.3 Θεώρημα Bernoulli.....	13
2.4 Βαθμός κινδύνου της σπηλαιώσης.....	14
2.5 Θέσεις εκδήλωσης του φαινομένου.....	14
2.6 Κρίσιμο ύψος σπηλαιώσης (NPSH).....	15
2.7 Ο μηχανισμός επίδρασης των φουσαλίδων.....	15
2.8 Διάβρωση της έλικας λόγω σπηλαιώσης.....	16
<b>Κεφάλαιο 3 : Εντοπισμός του προβλήματος και τρόποι αντιμετώπισης του φαινομένου</b> .....	17
3.1 Επιθεώρηση έλικας.....	17
3.2 Μέτρα προφύλαξης.....	19
3.3 Συντήρηση ελίκων.....	20
3.4 Συνθήκες αποφυγής σπηλαιώσης.....	21
3.5 Σωστή επιλογής έλικας.....	23
3.6 Μείωση του κινδύνου από σπηλαιώση.....	26
3.7 Γυάλισμα έλικας.....	27
<b>Κεφάλαιο 4: Η οικονομική διάσταση του προβλήματος της σπηλαιώσης</b> .....	27
4.1 Κόστος συντήρησης της έλικας.....	27
4.2 Μείωση ταχύτητας.....	28
<b>Επίλογος – Συμπεράσματα</b> .....	29
<b>Βιβλιογραφία</b> .....	31

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα Πτυχιακή εργασία με τίτλο «Σπηλαίωση στις ελικες των πλοίων και τρόποι αντιμετώπισης» εκπονήθηκε στα πλαίσια της ολοκλήρωσης των προϋποθέσεων, για τη λήψη του πτυχίου μου από την Ακαδημία Εμπορικού Ναυτικού, με έδρα την Νέα Μηχανιώνα ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ.

Η σπηλαίωση είναι πιο γνωστή σε πολλούς από εμάς σαν πρόβλημα των ελίκων και των τιμονιών, των διαφόρων πλοίων και σκαφών, αλλά κυρίως σαν πρόβλημα των ταχύπλοων σκαφών. Όταν ένα αντικείμενο κινείται μέσα στο νερό με αυξημένη ταχύτητα, η πίεση που κρατάει το νερό σ' επαφή με τα πλάγια και το πίσω μέρος του σώματος προοδευτικά μειώνεται, δηλαδή δημιουργείται ένα κενό όπου η πίεση είναι μειωμένη. Όταν η πίεση μειωθεί πολύ, το νερό αρχίζει να βράζει και μέσα σε αυτό δημιουργούνται φυσαλίδες ατμού. Ο βρασμός και οι φυσαλίδες διατηρούνται όσο διατηρείται το κενό και η χαμηλή πίεση. Όταν όμως μειωθεί η ταχύτητα με την οποία κινείται το αντικείμενο, τότε η πίεση θα αυξηθεί, το κενό θα υποχωρήσει και ένα ρεύμα από φυσαλίδες ατμού (που περιέχουν και οξυγόνο) θα κινηθεί προς την περιοχή υψηλότερης πίεσης, δηλαδή προς τις επιφάνειες του αντικειμένου, όπου και θα συμπυκνωθούν πάλι σε νερό. Κατά τη συμπύκνωση τους οι φυσαλίδες θα αποδεδευσούν την ενέργεια που χρειάστηκε για να δημιουργηθούν, με τη μορφή μεγάλης ποσότητας θερμότητας, καίγοντας και διαβρώνοντας την επιφάνεια του αντικειμένου («καύση σπηλαίωσης») στα σημεία όπου αυτές υγροποιούνται.

Το φαινόμενο της σπηλαίωσης παίζει σημαντικό ρόλο στην ναυτιλία λόγω των οικονομικών επιρροών που έχει σχετικά με την συντήρηση των πλοίων καθώς επίσης και το ότι χρησιμοποιούνται συγκεκριμένα υλικά για την κατασκευή των ελίκων προκειμένου να αποφευχθεί η δημιουργία της σπηλαίωσης.

Σκοπός μου κατά τη διάρκεια της συγγραφής, δεν ήταν μόνο η ορθή και όσο το δυνατόν πληρέστερη ανάλυση του θέματος. Έγινε προσπάθεια, έτσι ώστε το περιεχόμενο της εργασίας να είναι κατανοητό και σαφές, γι'αυτό η ανάλυση του θέματος έγινε με χρήση πληθώρας παραδειγμάτων, γραφημάτων και κατατοπιστικού φωτογραφικού υλικού.

Για την εργασία χρησιμοποιήθηκαν πηγές από το διαδίκτυο, άρθρα τεχνικών περιοδικών καθώς επίσης σχετικά βιβλία που θίγουν το ζήτημα της σπηλαίωσης, όπως καταγράφηκαν και στην βιβλιογραφία λεπτομερέστερα.

## Κεφάλαιο 1: Αίτια και μορφές σπηλαιώσης

### 1.1 Αρχή της σπηλαιώσης

Ένας από τους πιο συνήθεις λόγους για την παρουσία σπηλαιώσης είναι η μεγάλη ταχύτητα κίνησης των αντικειμένων που βρίσκονται μέσα στο νερό όπως για παράδειγμα οι τροχοί της περιστροφικής αντλίας, οι τουρμπίνες νερού και οι προπέλες. Σύμφωνα με την αρχή του Bernoulli, όταν η στατική πίεση ενός ρευστού είναι μειωμένη, τόσο υψηλότερη είναι η ταχύτητα του. Όταν η στατική πίεση του υγρού πέφτει χαμηλότερα της πίεσης του ατμού τότε δημιουργούνται φυσαλίδες ατμού. Η στήλη του υγρού κόβεται με αποτέλεσμα να δημιουργούνται φυσαλίδες μέσα στο υγρό. Με επανειλημμένα αυξανόμενη πίεση ο ατμός συμπυκνώνεται και οι φυσαλίδες μαζί με την ταχύτητα του ήχου καταρρέουν υπό τη συνοδεία θορύβου. Συγχρόνως παρουσιάζονται ακραίες τιμές πίεσης και θερμοκρασίας.

Η αιτία της σπηλαιώσης οφείλεται κυρίως σε τοπικές μειώσεις πίεσης σε διάφορα σημεία μιας αντλίας όπως περιβλήματα, δακτύλιοι κλπ.

Λοιπές αιτίες είναι είτε η αύξηση της θερμοκρασίας του ρευστού, η μείωση της πίεσης από την είσοδο της αντλίας, το μεγάλο γεωδαιτικό ύψος αναρρόφησης είτε η μείωση του ύψους τροφοδοσίας.

Ισχυρές διακυμάνσεις πίεσης που προξενούν σπηλαιώση, μπορούν επίσης να προκληθούν από υπερήχους.

Η σπηλαιώση προκαλείται επίσης από γρήγορη βύθιση ενός σώματος στο νερό.

Οι φυσαλίδες που προκαλούνται από την τήξη υγρών και εν μέρη ξεφουσκώνουν, δεν θεωρείται σπηλαιώση διότι δεν προκαλείται από αυξομειώσεις θερμοκρασίας, αλλά από διακυμάνσεις θερμοκρασίας.



Εικόνα 1.1: προπέλα που προκαλεί σπηλαιώση ( Wikipedia )

Επιπλέον η σπηλαίωση ευνοείται από τις μεγάλες ταχύτητες περιστροφής, δηλαδή από το μεγάλο αριθμό στροφών, και το φαινόμενο παρουσιάστηκε όντως στις πολύστροφες έλικες των στροβιλοκίνητων πλοίων, όπου και παρατηρήθηκε αύξηση της ολίσθησης, η οποία δεν μπορούσε να αντιμετωπιστεί με αύξηση των στροφών και όπου οι έλικες παρουσίασαν κατόπιν τη χαρακτηριστική διάβρωση. Η διάβρωση αυτή, η οποία έχει την μορφή σπηλαίων, είναι το κύριο γνώρισμα της περιοχής και της έκτασης του πτερυγίου, στο οποίο γίνεται η σπηλαίωση. Ο Bauer δίνει την τιμή των 55-75 μέτρων ανά δευτερόλεπτο για την περιφερειακή ταχύτητα της έλικας, ως όριο πάνω από το οποίο είναι πιθανό να παρουσιαστεί το φαινόμενο της σπηλαίωσης.

## 1.2 Ταχύτητα αντικειμένου

Ένας από τους πιο συχνούς λόγους εμφάνισης της σπηλαίωσης είναι η μεγάλη ταχύτητα κίνησης εντός του νερού η οποία δημιουργεί ένα κενό όπου η πίεση μειώνεται. Όταν η πίεση μειωθεί σε μεγάλο βαθμό, το νερό αρχίζει να βράζει με αποτέλεσμα την δημιουργία των φυσαλίδων. Όσο το κενό αυτό και η πίεση συνεχίζουν να υπάρχουν, συνεχίζει και η ύπαρξη των φυσαλίδων. Με την μείωση της ταχύτητας του αντικειμένου, η πίεση αυξάνεται και το κενό υποχωρεί με αποτέλεσμα ένα ρεύμα φυσαλίδων ατμού να κινείται προς μια περιοχή υψηλότερης πίεσης, δηλαδή προς την επιφάνεια του αντικειμένου, όπου θα συμπυκνωθούν πάλι σε νερό. Κατά την συμπύκνωση αυτή οι φυσαλίδες θα απελευθερώσουν το ποσό ενέργειας που χρειάστηκαν για να δημιουργηθούν με την μορφή μεγάλης ποσότητας θερμότητας, καίγοντας και δημιουργώντας διάβρωση της επιφάνειας του αντικειμένου στα σημεία υγροποίησης.

## 1.3 Σχεδίαση έλικας

Αιτία σπηλαίωσης ή αρχή σπηλαίωσης μπορεί να είναι αμυχές στην οδηγό ακμή των πτερυγίων της έλικας, οξείες γωνίες της οδηγού ακμής, το υπερβολικό γύρισμα (cup) της ακολουθούσας ακμής, τραχείες ή όχι αρκετά λείες επιφάνειες των πτερυγίων ή άλλων τμημάτων της έλικας. Πτερύγια στραβά ή παραμορφωμένα από κτυπήματα συνήθως προκαλούν εκτεταμένη σπηλαίωση. Το ίδιο μπορεί να συμβεί και με τη χρήση μιας έλικας ακατάλληλης για το σκάφος και τη μηχανή. Π.χ. μιας έλικας με διάμετρο πολύ

μικρότερη από την κανονική ή και με πολύ μεγάλο βήμα ή έλικας με πολύ μεγαλύτερη επιφάνεια πτερυγίων σε σχέση με αυτήν που πραγματικά απαιτείται. Σπηλαιώση μπορεί να έχουμε και με μια έλικα κακοσχεδιασμένη, με κακό φινίρισμα, με διαφορές στο σχήμα και το πάχος των πτερυγίων ή από υπερβολικό πάχος των πτερυγίων της. Η σπηλαιώση στις έλικες αλουμινίου είναι πιο συνηθισμένη, ιδιαίτερα στις υψηλές ταχύτητες επειδή τα πτερύγια τους έχουν πάχος μεγαλύτερο από το επιθυμητό, που είναι όμως αναγκαίο για να υπάρχει η απαιτούμενη αντοχή. Για τις ταχύτητες αυτές, αλλά και γενικά, η χρήση ανοξειδωτων ή ορειχάλκινων ελίκων είναι προτιμότερη γιατί έχουν πολύ λεπτότερα πτερύγια. Σύμφωνα με τα παραπάνω είναι λογικό να περιμένουμε φαινόμενα σπηλαιώσης και από μια έλικα που δεν είναι καθαρή αλλά έχει σκεπαστεί από χορτάρι ή στρείδι, όσο λίγο και αν είναι αυτό.



**Εικόνα 1.3:** προπέλα καλυμμένη από στρείδια ( [www.shutterstock.com](http://www.shutterstock.com) )

## 1.4 Σκάφος

Αιτία σπηλαιώσης μπορεί να είναι το ίδιο το σκάφος, εάν η γάστρα του δεν είναι κατάλληλα σχεδιασμένη για το είδος της μηχανής που θα το κινήσει. Εάν π.χ. σε σκάφος με καρένα τοποθετηθεί μια εξωλέμβια ή έσω – εξωλέμβια μηχανή και η ρεβέρσα της βρίσκεται στην προέκταση της καρένας, είναι βέβαιο πως από κάποια ταχύτητα και μετά θα έχουμε σπηλαιώση, εξαιτίας των κενών που δημιουργεί η καρένα στην έλικα. Το ίδιο μπορεί να συμβεί και με ένα σκάφος με εσωλέμβια μηχανή όταν η γάστρα του δεν είναι κατάλληλα σχεδιασμένη και το ρεύμα νερού προς την έλικα δεν είναι ομαλό και δημιουργούνται κενά. Ακόμη και με καλοσχεδιασμένο σκάφος με τέλεια εγκατάσταση μηχανής μπορεί να έχουμε προβλήματα σπηλαιώσης στην έλικα, εάν η γάστρα του έχει

υποστεί παραμορφώσεις ή έχει κτυπήματα. Βέβαια, δεν υπάρχει αμφιβολία πως σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις, αν η γάστρα του σκάφους δεν είναι καθαρή και λεία γιατί έχει πιάσει χορτάρι ή στρείδια, θα έχουμε οπωσδήποτε ανώμαλη ροή νερού και κενά προς την έλικα που ευνοούν τη σπηλαιώση.

## 1.5 Η επιρροή του χώρου

Η σπηλαιώση είναι στην πραγματικότητα πολύ πιο εύκολη στην παραγωγή σε κλειστό περιβάλλον από ό, τι σε μια ανοιχτή κατάσταση, όπως σε μια προπέλα ή έναν άξονα. Σε μια κλειστή περιοχή, υπάρχει πολύ μικρότερος όγκος υγρού για να συμπίεσουμε τις φυσαλίδες κενού που σχηματίζονται. Η σπηλαιώση μέσα στις αντλίες είναι η κύρια αιτία αποτυχίας. Η πολύ γρήγορη περιστροφή μιας φυγοκεντρικής αντλίας αναγκάζει το υγρό σε ένα θάλαμο αντλίας να βράσει από έλλειψη πίεσης.

## 1.6 Τα στάδια της σπηλαιώσης ειδικότερα.

Αναλυτικότερα τα στάδια της σπηλαιώσης είναι:

Στάδιο 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.

Στάδιο 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.

Στάδιο 3: Κατάρρευση των φυσαλίδων. Καθώς οι φυσαλίδες ατμού κινούνται κατά μήκος των πτερυγίων του στροφείου, η πίεση γύρω από τις φυσαλίδες αρχίζει να αυξάνεται έως ότου 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 επανυγροποιηθεί 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 53 περίπου στο ίδιο σημείο κάθε πτερυγίου του στροφείου. Λόγω ακριβώς της μεγάλης διαφοράς στην πυκνότητα μεταξύ της υγρής φάσης  $\rho_Y$  και της φάσης ατμού  $\rho_A$ , (Για το νερό σε θερμοκρασία μικρότερη των  $100^\circ\text{C}$  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 σπηλαιώσης στην αντλία.



## 1.7 Μορφές σπηλαιώσης

Οι βασικές μορφές σπηλαιώσης χωρίζονται σε:

Ψευδο-σπηλαιώση - Pseudo-cavitation: Έχει να κάνει με τη μεταβολή του μεγέθους των φυσαλίδων αέριας φάσης που υπάρχουν εντός του υγρού, εξαιτίας της μεταβολής της πίεσης. Η κύρια συνέπεια της σπηλαιώσης λόγω φυσαλίδων αερίου είναι η πτώση παροχής. Είναι κατανοητό ότι προκειμένου να προσδιοριστεί το είδος της σπηλαιώσης, αρχικά θα πρέπει να κατανοηθεί ο μηχανισμός της δημιουργίας και της κατάρρευσης των φυσαλίδων, όπως αναλύεται διεξοδικά στο επόμενο κεφάλαιο. Επίσης θα πρέπει να αναφερθεί ότι, αν δεν διευκρινίζεται διαφορετικά, με τον όρο σπηλαιώση θα εννοούμε τη σπηλαιώση λόγω φυσαλίδων ατμού.

Ατμώδης σπηλαιώση - Vaporous cavitation. Κατά τη διάρκεια του συγκεκριμένου φαινομένου, η πίεση που επικρατεί στο υγρό είναι χαμηλότερη της πίεσης ατμοποίησης, με αποτέλεσμα ποσότητα του υγρού να ατμοποιείται. Η ατμοποίηση οδηγεί συνήθως σε δυναμικά φαινόμενα, ιδιαίτερα όταν ακολουθείται από επανυγροποίηση του ρευστού. Το φαινόμενο της επανυγροποίησης συνοδεύεται τοπικά από φαινόμενα κρουστικής μορφής. Η έκταση της ζημιάς που προκαλεί η σπηλαιώση, κυμαίνεται από ένα μικρό ποσοστό διάβρωσης μετά από χρόνια λειτουργίας ως και πλήρη καταστροφή σε μεγάλη χρονική περίοδο.

Εμφάνιση φύλλου σπηλαιώσης – sheet cavitation η οποία χαρακτηρίζεται από μια περιοχή ατμού η οποία παραμένει στην ίδια θέση της λεπίδας της έλικας. Με αυτόν τον τρόπο φαίνεται ενσωματωμένη στο φύλλο του μετάλλου της έλικας. Η επιφάνεια αυτής της μορφής μπορεί να είναι πολύ γυαλιστερή και συχνά δεν χαρακτηρίζεται από διαφάνεια. Η σπηλαιώση φύλλου εμφανίζεται όταν η πίεση στην άκρη της έλικας είναι ισχυρά χαμηλή.

Εμφάνιση φυσσαλίδων σπηλαίωσης - bubble cavitation οι οποίες εμφανίζονται αμέσως μετά την πίεση που έχει μεταδοθεί μέσω του υγρού.

Εμφάνιση γραμμών δίνης – vortex lines cavitation. Οι γραμμές είναι σημαντικές για τις έλικες των πλοίων διότι η πίεση στον πυρήνα είναι χαμηλή και έτσι μπορεί να προκύψει σπηλαίωση . Αυτή η μορφή σπηλαίωσης δεν οδηγεί σε διάβρωση όταν δεν είναι σε υπερβολικό βαθμό, αλλά δημιουργεί μεγάλο θόρυβο, που ο θόρυβος στα πολεμικά πλοία χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό τους από εχθρικά σκάφη

Αέριος σπηλαίωση - Gaseous cavitation: Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται σε περιοχές όπου η πίεση του ρευστού είναι χαμηλότερη από την πίεση του περιβάλλοντος, έτσι ώστε να μπαίνει αέρας από το περιβάλλον προς τη συγκεκριμένη περιοχή. Ακόμα, το φαινόμενο μπορεί να εμφανιστεί σε περίπτωση που αέριο το οποίο έχει ήδη αναμιχθεί με το υγρό συγκεντρώνεται σε περιοχές που η πίεση του υγρού είναι χαμηλότερη από την πίεση κορεσμού. Συνήθως, η ποσότητα διαλυμένου αερίου μέσα σε ορυκτέλαιο δεν υπερβαίνει το 15% κ.ο. (Gropner & Etsion, 2001).

## Κεφάλαιο 2 : Αποτελέσματα της σπηλαίωσης και χαρακτηριστικά της

### 2.1 Ταχύτητα εμφάνισης και αποτελέσματα

Η σπηλαίωση συνήθως απαιτεί μεγάλο χρονικό διάστημα για την δημιουργία της μέχρι να μπορούμε να την διακρίνουμε ορατά. Η περίοδος αυτή μπορεί να κυμαίνεται από

μήνες μέχρι χρόνια ανάλογα από το είδος μετάλλου και το διαβρωτικό υλικό. Από τη στιγμή όμως που θα αρχίσει η διάτρηση του μετάλλου (μέσω του φαινομένου της σπηλαιώσης), αυτή γίνεται ολοένα και αυξανόμενη. Η δημιουργία φυσαλίδων υπό την σπηλαιώση δημιουργούν υψηλές τοπικές πιέσεις έως και 1000 bar. Αυτές οι πιέσεις με την σειρά τους αυξάνουν τα κύματα πίεσης που προσκρούουν το σκάφος, τα οποία προκαλούν συνήθως δυνατούς θορύβους και δονήσεις. Ο ήχος που δημιουργείται είναι τόσο δυνατός και μεταλλικός όπου μπορεί να ξεγελάσει με την εντύπωση ότι παρασύρεται κάποιο μεταλλικό αντικείμενο κάτω από την προπέλα και χτυπά την επένδυση του πλοίου. Σε περίπτωση όπου οι φυσαλίδες ενεργούν κοντά ή επάνω στην επιφάνεια του πτερυγίου, το υλικό της επιφάνειας υπόκειται σε τοπική κόπωση. Πρώτα αλλάζει το χρώμα της επιφάνειας, μετά δημιουργούνται βούλες και στην συνέχεια δημιουργείται πορώδης υφή. Η διάβρωση αυτή συνοδεύεται και από χημική διάβρωση η οποία αν συνεχιστεί και προχωρήσει σε βάθος θα δημιουργηθεί σπογγώδη υφή. Αν προσβληθούν μεγάλες περιοχές πτερυγίων από το φαινόμενο υπάρχει μεγάλη πιθανότητα στην πτώση της απόδοσης της προπέλας .

## 2.2 Χαρακτηριστικά εμφάνισης του φαινομένου

### 1) Θόρυβος :

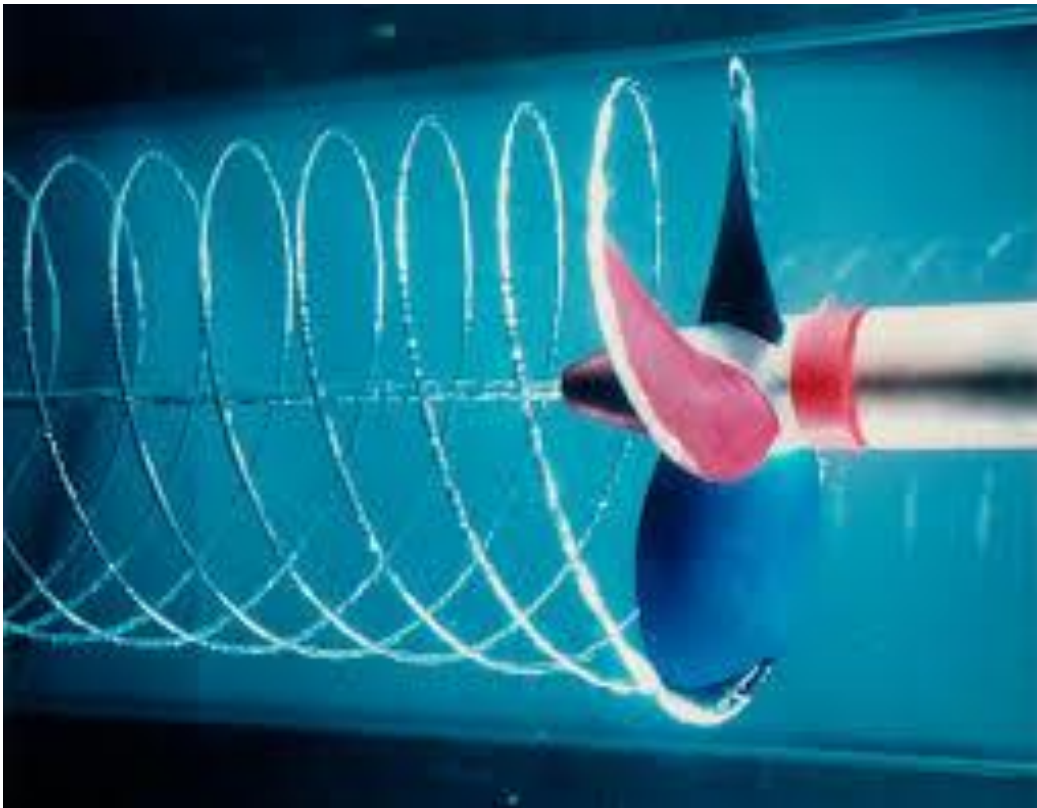
α. Κτύποι μικρής εμβέλειας οφείλονται στην επί μέρους δημιουργίας στροβιλισμών λόγω των μεταβολών πίεσης και ταχύτητας ροής στην έλικα έχοντας υπόψη και την θερμοκρασία νερού.

β. Συριγμοί , σε υψηλές στροφές , οφείλονται σε συντονισμό των πτερυγίων λόγω αρχομένης σπηλαιώσης στην ακμή εισόδου η στροβιλισμών στην ακμή εξόδου καθώς και στον συντονισμό εξαρτημάτων του άξονα.

γ. Έντονοι κτύποι που οφείλονται στην εμφάνιση σπηλαιώσης οφείλονται στην διαμόρφωση του πυρμναίου τμήματος .

## 2.Τραγούδισμα:

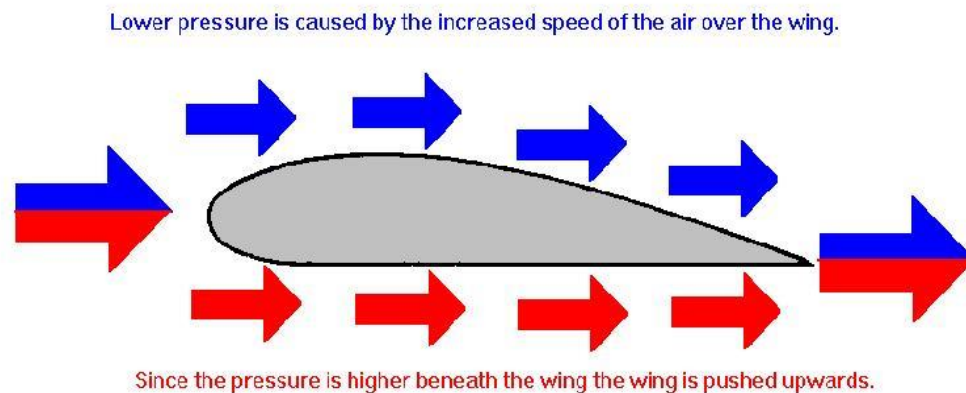
Τα πτερύγια της προπέλας μπορεί να εκπέμψουν έναν υψηλής συχνότητας ήχο, πριν την έναρξη του φαινομένου της σπηλαιώσης, το οποίο λέγεται τραγούδισμα και οφείλεται στην ελαστική δόνηση του υλικού που διεγείρεται από τον συντονισμό της ροής των δινών από τις ακμές εισόδου των πτερυγίων.



Εικόνα 2.2: σπηλαιώση έλικας (<http://www.iea.gen.tr/1116-2/>)

## 2.3 Θεώρημα Bernoulli

Όταν η πίεση σε ένα σημείο του περυγίου, λόγω της αυξημένης ταχύτητας της ροής, γίνει μικρότερη από την πίεση ατμοποίησης του νερού, δημιουργούνται φυσαλίδες αέρα και ατμού. Οι φυσαλίδες αυτές προχωρούν κατά μήκος του περυγίου και εισέρχονται σε πεδίο υψηλότερης πίεσης όπου συμπιέζονται και συμπυκνώνονται απότομα με αποτέλεσμα να εξασκούνται στην επιφάνεια του περυγίου μηχανικές πιέσεις που φτάνουν έως και 20000 bar. Είναι φανερό ότι όταν η ταχύτητα της ροής σε κάποια περιοχή λαμβάνει πολύ μεγάλες τιμές, τότε η πίεση λαμβάνει πολύ μικρές τιμές ακόμα και αρνητικές. Ειδικότερα σε ροές νερού με υψηλές ταχύτητες εμφανίζονται στιγμιαίως πιέσεις χαμηλές, έτσι ώστε τοπικά και στιγμιαίως η πίεση να γίνει μικρότερη από την πίεση (τάση) ατμών, οπότε στιγμιαία μεταπίπτει το νερό από την υγρή φάση σε αέρια και δημιουργούνται τοπικά μικρές φυσαλίδες. Οι φυσαλίδες αυτές μεταφερόμενες σε περιοχές με μεγαλύτερη πίεση μεταπίπτουν στιγμιαίως σε υγρή φάση, απελευθερώνοντας τοπικά κρουστικές πιέσεις (στιγμιαίες) πολύ μεγάλου μεγέθους που καταστρέφουν τα στερεά όρια της ροής, από οποιοδήποτε υλικό και αν είναι φτιαγμένα.



Εικόνα 2.3 :Θεώρημα (<http://library.thinkquest.org/2819/graphics/bernoull.jpg>)

## 2.4 Βαθμός κινδύνου της σπηλαίωσης.

Ένα βασικό χαρακτηριστικό της σπηλαίωσης είναι ο βαθμός του κινδύνου της καθώς μπορεί να διαφέρει από περίπτωση σε περίπτωση. Προκειμένου να είμαστε σε θέση να γνωρίζουμε τον κίνδυνο της σπηλαίωσης θα πρέπει να υπολογισθεί ο αριθμός σπηλαίωσης ( $\sigma$ ), ο οποίος δίνεται από τον τύπο:

$$\sigma = 2(p_0 - p_v) / pV$$

όπου :

$p_0$  = η απόλυτη πίεση του νερού στο στερεό όριο

$pV$  = η πίεση ατμών του υγρού

$p$  = η πυκνότητα του νερού

$V$  = η τοπική ταχύτητα

Η πίεση ατμών εξαρτάται από την θερμοκρασία. Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η αντιστοιχία θερμοκρασίας και πίεσης.

Θερμοκρασία	5	10	15	20	25
Πίεση	0.87	1.23	1.70	2.33	3.16

## 2.5 Θέσεις εκδήλωσης του φαινομένου

Στις έλικες, οι περιοχές που διατρέχουν μεγαλύτερο κίνδυνο σπηλαίωσης είναι το πίσω μέρος των πτερυγίων. Στις περιοχές αυτές η πίεση έχει την μικρότερη τιμή λόγω της απότομης αύξησης της ταχύτητας της ροής του υγρού. Συχνά η σπηλαίωση εμφανίζεται και μεταξύ των πτερυγίων. Τέλος, στις περιπτώσεις που η έκταση της σπηλαίωσης είναι μεγάλης έκτασης αυτό μπορεί να οδηγήσει στην φθορά των άκρων των πτερυγίων στην έξοδο και των πτερυγίων διάχυσης.

## 2.6 Κρίσιμο ύψος σπηλαίωσης (NPSH)

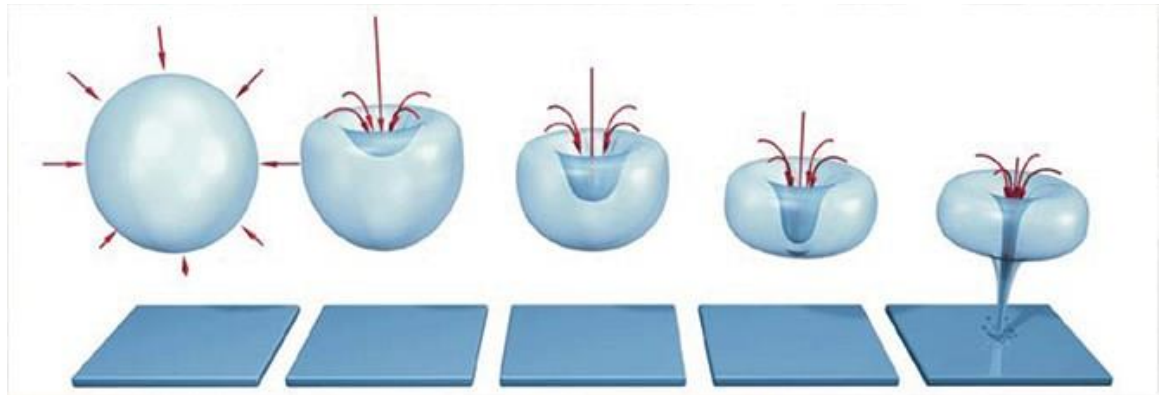
Στις περιπτώσεις που αναπτυχθούν θύλακες σπηλαίωσης στα πτερύγια αλλάζει αμέσως η γεωμετρία της ροής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μειώνεται σε σημαντικό βαθμό το διάκενο μεταξύ δύο διαδοχικών πτερυγίων από το οποίο διακινείται η παροχή  $Q$ . Άρα για τη διακίνηση της ίδιας παροχής όπως οι συνθήκες χωρίς σπηλαίωση, οι ταχύτητες της ροής αυξάνονται σημαντικά στην περιοχή αυτή, το ίδιο και οι υδραυλικές απώλειες με αποτέλεσμα τη μείωση του ολικού ύψους και του ολικού βαθμού απόδοσης.

Στην πράξη, ακριβώς η έναρξη της πτώσης του βαθμού απόδοσης σε σχέση με τη λειτουργία χωρίς σπηλαίωση, μπορεί να θεωρηθεί ως έναρξη του φαινομένου. Επειδή όμως το κριτήριο αυτό καθορίζεται ως το σημείο λειτουργίας στο οποίο η πτώση του ολικού ύψους ως προς αυτό της λειτουργίας χωρίς σπηλαίωση, γίνεται ίση προς 3% για μικρού μεγέθους αντλίες ή 1% για αντλίες μεγάλου μεγέθους. Η τιμή λοιπόν του NPSH (κρίσιμο ύψος σπηλαίωσης) θα είναι ίση με την τιμή του μεγέθους του διαθέσιμου θετικού ύψους για το σημείο λειτουργίας που ορίζεται συμβατικά ως το σημείο λειτουργίας με σπηλαίωση.

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

## 2.7 Ο μηχανισμός επίδρασης των φυσαλίδων

Οι φυσαλίδες σχηματίζονται στις περιοχές ενός ρέοντος υγρού, όπου η τοπική πίεση είναι κοντά στα επίπεδα της τάσης αμού 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.



Εικόνα 2.7 : Δημιουργία και κατάρρευση φυσαλίδων (<http://eswt.net/cavitation>)

## 2.8 Διάβρωση της έλικας λόγω σπηλαιώσης

Η δημιουργία φυσαλίδων ατμών στο ρευστό είναι μια πολύ γρήγορη διαδικασία. Όταν η φούσκα κινείται σε μια ζώνη χαμηλότερης πίεσης στο ρευστό, επεκτείνεται γρήγορα ενώ η πίεση μέσα παραμένει πολύ κοντά στην πίεση του ατμού. Όταν αυτή η κοιλότητα γεμίζει ατμούς αντιμετωπίζει μια ζώνη υψηλής πίεσης στο ρευστό (π.χ. λόγω μεταβαλλόμενου πεδίου ενεργοποίησης), η φούσκα μειώνεται σε μέγεθος ενώ η εσωτερική πίεση παραμένει ίδια. Μετά από ορισμένη περίοδο η φυσαλίδα γίνεται πολύ μικρή και η επιφανειακή τάση γίνεται μεγάλη με αποτέλεσμα την κατάρρευση της. Όταν αυτό συμβαίνει κοντά στην επιφάνεια της λεπίδας, η επιφάνεια μπορεί να υποστεί βλάβη ή αλλιώς διάβρωση που είναι μια μηχανική βλάβη. Ο μηχανισμός διάβρωσης μπορεί να οφείλεται σε:

- Εφέ μικρού πίδακα
- Κύμα κλονισμού
- Επαναφορά των φυσαλίδων
- Σύμπτυξη μικρών φυσαλίδων



## Κεφάλαιο 3 : Εντοπισμός του προβλήματος και τρόποι αντιμετώπισης του φαινομένου

### 3.1 Επιθεώρηση έλικας

Ένας τρόπος με τον οποίο μπορούμε να εντοπίσουμε την σπηλαίωση είναι μέσω των επιθεωρήσεων της έλικας. Οι περισσότερες έλικες κατασκευάζονται από κάποιο κράμα χαλκού με την διαδικασία της χύτευσης και στη συνέχεια διαμορφώνονται με κατεργασίες αφαιρέσεως υλικού. Υπάρχουν τρία είδη κραμάτων:

- Νικέλιο – αλουμίνιο – μπρούτζος
- Μαγγάνιο – αλουμίνιο – μπρούτζος
- Ειδικός ορείχαλκος

Το νικέλιο (Ni) είναι αργυρόλευκο και κάτω από τους 385 βαθμούς ελαφρώς μαγνητικό μέταλλο. Είναι σκληρό όπως ο σίδηρος ή και σκληρότερο. Επίσης είναι ελατό, ανθεκτικότερο του σιδήρου και αμετάβλητο στον αέρα ως συμπαγές. Στιλβωμένο αποκτά ισχυρή λάμψη.

Το αργίλιο ή αλουμίνιο (Aluminium) είναι το χημικό στοιχείο με σύμβολο Al και είναι ένα αργυρόλευκο μέταλλο. Το μεταλλικό αλουμίνιο έχει (φαινομενικά) μεγάλη ικανότητα στο να αντιστέκεται στη διάβρωση. Αυτό στην ουσία συμβαίνει γιατί με την έκθεση του μετάλλου στην ατμόσφαιρα σχηματίζει στιγμιαία ένα λεπτό επιφανειακό, μη ορατό, στρώμα οξειδίου, που εμποδίζει τη βαθύτερη διάβρωσή του (φαινόμενο της παθητικοποίησης).

Το κρατέρωμα (κοινώς μπρούντζος ή μπρούτζος) είναι κράμα χαλκού - κασσίτερου, με καφεκόκκινο χρώμα.

Το χημικό στοιχείο Μαγγάνιο ( Manganum ) μπορεί να βρεθεί σε ελεύθερη μορφή στη φύση (συνήθως σε συνδυασμό με το σίδηρο) και σε πολλά μεταλλεύματα. Ως ελεύθερο

στοιχείο, το μαγγάνιο είναι μέταλλο και έχει σημαντική βιομηχανική χρήση, όταν είναι σε κράματα, ειδικά στο ανοξείδωτο ατσάλι.

Ο ορείχαλκος είναι κράμα χαλκού – ψευδαργύρου με κιτρινόχρυσο χρώμα.

Και τα τρία αυτά κράματα μπορούν εύκολα να χυθούν και να επεξεργαστούν κι αυτό σημαίνει πως όταν υπάρχει πρόβλημα στην έλικα και πρέπει να γίνει κάποια συντήρηση ή κάποια επιδιόρθωση ζημιάς, υπάρχουν αυξημένες πιθανότητες να υπάρξουν τα επιθυμητά αποτελέσματα.

Η επιθεώρηση μιας έλικας πρέπει να γίνεται τόσο κατά την κατασκευή της όσο και κατά τη διάρκεια της ζωής και λειτουργίας αυτής. Στην πρώτη περίπτωση, η επιθεώρηση γίνεται σε σχετικά ελεγχόμενες συνθήκες ενώ στην δεύτερη περίπτωση η επιθεώρηση πραγματοποιείτε από ιδικά εκπαιδευμένους δύτες. Και οι δύο τύποι ελέγχου είναι σημαντικοί ο πρώτος για την εξασφάλιση του σωστού σχεδιασμού της προπέλας και ο δεύτερος για την εξέταση της καλής κατάστασης της προπέλας.

Μετά την επιθεώρηση, σημαντική θέση κατέχει η συντήρηση μιας έλικας στην οποία ιδιαίτερο ρόλο παίζει ο έλεγχος. Πιο συγκεκριμένα στη διαδικασία αυτή περιλαμβάνονται:

- Έλεγχος πτερυγίου έλικας: Όταν μια έλικα προορίζεται για συντήρηση, το πρώτο πράγμα που πρέπει να γίνεται είναι να καθαρίζονται τα πτερύγια από τη φλάντζα ως την άκρη και να εξετάζονται ρωγμές στις επιφάνειες.
- Μηχανικός έλεγχος πτερυγίου έλικας: Η επιθεώρηση και συντήρηση του μηχανικού τμήματος επιτελείται από εξειδικευμένο προσωπικό σε συνεργασία με το τμήμα κατασκευής για την αποφυγή αστοχιών.
- Ίσιωμα επιφάνειας πτερυγίου με θερμότητα: Σε περιπτώσεις όπου διαπιστώνονται ρωγμές, χρησιμοποιείται θερμότητα για λείανση της επιφάνειας του μετάλλου και μετέπειτα ψύξη αυτού για επιστροφή του σε, προσεγγιστικά, ικανοποιητικά επίπεδα.

- Ενδιάμεσοι έλεγχοι: Πολλές φορές πραγματοποιούνται μετρήσιμοι έλεγχοι στο περύγιο της έλικας κατά τη διαδικασία της συντήρησης, οι οποίες καταγράφονται ώστε να προσδιορίζεται η διαδικασία που ακολουθείται και κατά πόσο είναι εύστοχη ή άστοχη την κάθε φορά.
- Τελικός έλεγχος: Πριν την αποστολή και παράδοση της έλικας, η συντήρησή της περιλαμβάνει τον τελικό έλεγχο από το νηογνώμονα, ο οποίος ελέγχει και εγκρίνει την κατάσταση των πτερυγίων.

### 3.2 Μέτρα προφύλαξης

Υπάρχουν πολλά μέτρα που μπορούν να παρθούν προκειμένου να μειωθούν οι πιθανότητες εμφάνισης της σπηλαίωσης. Αυτά είναι:

- Βαφή: Η έλικα δεν πρέπει να βάφεται διότι επιδεινώνεται το φαινόμενο της σπηλαίωσης. Η τοπική καταστροφή του χρώματος μπορεί να σταθεί αφορμή για σπηλαίωση.
- Ταχύτητα : Το κάθε σκάφος πρέπει να γνωρίζει την τιμή της ταχύτητας λειτουργίας πάνω από την οποία εμφανίζεται σπηλαίωση και να μην την υπερβαίνει.
- Ώση : Η ώση δεν πρέπει να αυξάνεται απότομα διότι μεγάλη ώση σε συνδυασμό με χαμηλές ταχύτητες σκάφους μπορεί να προκαλέσουν σπηλαίωση

- Βήμα : Στις έλικες μεταβλητού βήματος η αλλαγή του βήματος θα πρέπει να γίνεται ομαλά και όχι απότομα, προς αποφυγή απότομης αύξησης της ώσης.
- Βύθισμα : : Όσο μικρότερο είναι το βύθισμα, τόσο πιθανότερο είναι να εμφανιστεί σπηλαίωση.

### 3.3 Συντήρηση ελίκων

Η επισκευή και συντήρηση μιας έλικας είναι υψίστης σημασίας ειδικότερα εάν κατά τη διάρκεια της ζωής της έχει προσφέρει αξιόπιστα τις υπηρεσίες της για τις ανάγκες του πλοίου. Πρέπει να γίνει κατανοητό όμως, ότι βλάβες και ζημιές στην έλικα μπορούν να προκύψουν ανά πάσα στιγμή αν και τις περισσότερες φορές μεγάλη σημασία για την εμφάνιση βλαβών έχει ο χρόνος συνδυαστικά με μια σειρά άλλων αιτιών. Για την σωστή συντήρηση των ελίκων ενός σκάφους, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα παρακάτω:

Τα βασικά στοιχεία προγράμματος διατήρησης και συντήρησης του σκάφους.

- Η κατανόηση των αιτιών της φθοράς στο θαλάσσιο περιβάλλον.
- Η ορθή σχεδίαση με σκοπό την επαρκή συντήρηση.
- Η επιλογή των κατάλληλων υλικών και μέτρων συντήρησης και η δημιουργία κινήτρων για τη χρησιμοποίηση νέων βελτιωμένων υλικών και διαδικασιών συντήρησης
- Η συντήρηση στα μέρη ενός πλοίου διακρίνεται σε δύο κατηγορίες: στην υποχρεωτική και στην προληπτική. Ακολούθως, παρουσιάζονται διαδικασίες που ακολουθούνται στην έλικα αναφορικά με την συντήρηση.

### 3.4 Συνθήκες αποφυγής σπηλαιώσης

Το ανεπιθύμητο αυτό φαινόμενο της σπηλαιώσης δημιουργείται, όταν σε μία θέση της ροής η στατική πίεση του υγρού γίνεται μικρότερη από την πίεση ατμοποίησης του υγρού, με αποτέλεσμα αυτό να ατμοποιείται, και να παρουσιάζεται στη ροή δεύτερη φάση, που αποτελείται από φυσαλίδες κορεσμένου ατμού. Οι φυσαλίδες αυτές, όταν βρεθούν σε περιοχές υψηλότερης πίεσης, συμπυκνώνονται ταχύτατα και η υγρή φάση που δημιουργείται πάλι προσκρούει με μεγάλη ταχύτητα στις μεταλλικές επιφάνειες των ορίων της περιοχής ανάπτυξης του φαινομένου και δημιουργεί κοιλότητες παραμόρφωσης και αφαίρεσης υλικού. Η συνεχής ανάπτυξη του φαινομένου έχει ως συνέπεια την καταστροφή της μηχανής.

Το φαινόμενο της σπηλαιώσης είναι δυνατόν να εμφανισθεί σε όλες τις ροές υγρών, σε θέσεις του υδραυλικού δικτύου, όπου αναπτύσσονται μεγάλες τιμές της ταχύτητας της ροής με παράλληλη πτώση της στατικής πίεσης, σύμφωνα με το νόμο της ενέργειας. Τέτοιες θέσεις χαμηλής πίεσης στα δίκτυα, που συνορεύουν με στερεά όρια, συναντώνται κυρίως στις ρευστοδυναμικές μηχανές (αντλίες και υδροστρόβιλοι) αλλά και σε ειδικά τεμάχια των υδραυλικών κυκλωμάτων, όπως διακόπτες σε συνθήκες στραγγαλισμού της ροής. Υπάρχουν ορισμένες θέσεις της ροής, οι οποίες είναι πολύ ευαίσθητες στην εμφάνιση σπηλαιώσης. Μια κλασική θέση είναι η περιοχή που συνορεύει με την αναρρόφηση της φυγοκεντρικής ή της αξονικής υδραντλίας. Στη θέση αυτή το νερό εισρέει στην αντλία και, όσο πιο χαμηλά είναι η στάθμη άντλησης τόσο πιο χαμηλά πέφτει η στατική πίεση πριν την είσοδο του νερού στην αντλία και ακόμη πιο χαμηλά στην περιοχή αναρρόφησης της περωτής. Το θεωρητικό οριακό ύψος άντλησης είναι περί τα 10m στήλης νερού, που ισοδυναμεί με στατική πίεση 1bar στο επίπεδο της στάθμης άντλησης.

Στη γειτονιά των οριακών αυτών καταστάσεων στην αναρρόφηση της αντλίας επικρατεί εξαιρετικά χαμηλή πίεση και ικανοποιούνται οι συνθήκες για την εξάτμιση του νερού και την εμφάνιση της σπηλαιώσης. Δεδομένου ότι το νερό, διερχόμενο από την περωτή, μεταβαίνει σε περιοχές υψηλότερης στατικής πίεσης οι φυσαλίδες του υδρατμού συμπυκνώνονται. Η μικρότερου όγκου υγρή φάση, που δημιουργείται, καταλαμβάνει πολύ μικρότερο όγκο από τις φυσαλίδες. Το κενό, που δημιουργείται, τείνει να καταληφθεί ταχύτατα από το περιβάλλον ρευστό. Το νερό επιταχύνεται καταλαμβάνοντας το κενό και επιβραδύνεται απότομα μετά την κατάληψη όλου του κενού χώρου. Η επιβράδυνση αυτή έχει ως συνέπεια την ανάπτυξη μεγάλης κρουστικής δύναμης, σύμφωνα με το νόμο της ορμής. Η κρουστική δύναμη αναπτύσσεται σε πολύ μικρή επιφάνεια ( $1600 \text{ kp/cm}^2$ [1]) και με μεγάλη συχνότητα. Η σύγκρουση της υγρής φάσης που δημιουργείται με τα μεταλλικά στοιχεία της περωτής αλλά και

του περιβλήματος έχει καταστροφικές συνέπειες για αυτά και για τις λειτουργικές συνθήκες της αντλίας.

Με μια γενικότερη θεώρηση στα υδραυλικά δίκτυα, σύμφωνα με το νόμο της ενέργειας, αν αυξηθεί η ταχύτητα ροής του υγρού, θα μειωθεί η πίεση στο σημείο αυτό του δικτύου. Σε σημεία του δικτύου, όπου η στατική πίεση  $P$  φθάνει στα όρια της πίεσης ατμοποίησης  $P_s$ , δημιουργούνται συνθήκες ατμοποίησης. Όταν οι φυσαλίδες ατμού, που δημιουργούνται, μεταφερθούν σε περιοχή της ροής, στην οποία επικρατεί υψηλότερη πίεση, συμπυκνώνονται με μεγάλη ταχύτητα (σε πολύ μικρό χρόνο), αυξάνεται τοπικά η πίεση και δημιουργούνται συνθήκες πρόσκρουσης του υγρού, με μορφή δέσμης ή κρουστικού κύματος, στις μεταλλικές επιφάνειες της ρευστοδυναμικής μηχανής. Οι κρούσεις αυτές καταπονούν τα μεταλλικά υλικά με έναν ιδιαίτερο τρόπο.

Η σπηλαίωση είναι μηχανική διάβρωση των μεταλλικών επιφανειών. Οι μηχανισμοί παραμόρφωσης και αστοχίας των μετάλλων και των κραμάτων τους στην επαναλαμβανόμενη κρουστική καταπόνηση επηρεάζονται έντονα από την κρυσταλλική δομή τους και από την ικανότητα απορρόφησης της ενέργειας της κρουστικής φόρτισης χωρίς μακροσκοπική παραμόρφωση. Στα πολυφασικά κράματα το είδος και η διασπορά μιας φάσης ευνοεί, ή όχι, το μηχανισμό της σπηλαίωσης. Η διάβρωση από σπηλαίωση αρχίζει στα όρια των κρυσταλλικών κόκκων και τα καρβίδια είναι οι κόκκοι που φθείρονται πρώτα. Υψηλή αντοχή στη σπηλαίωση παρουσιάζεται σε μέταλλα με μεγάλη σκληρότητα σε συνδυασμό με μεγάλη ολκιμότητα και υψηλή εφελκυστική αντοχή. Όσο η δομή των χρησιμοποιούμενων υλικών είναι ομοιόμορφη και ανθεκτική στη δυναμική καταπόνηση και την μηχανική διάβρωση (για παράδειγμα ορείχαλκος ή ανοξείδωτος χάλυβας ωστενιτικής κρυσταλλικής δομής) τόσο πιο ανθεκτικά είναι αυτά στις καταπονήσεις της σπηλαίωσης. Το αλουμίνιο και οι μαρτενσιτικοί χάλυβες δεν έχουν καλή συμπεριφορά στη σπηλαίωση.

Η συνθήκη αποφυγής της εμφάνισης του φαινομένου της σπηλαίωσης, σε οποιοδήποτε σημείο κάθε ροής, είναι: Η απόλυτη πίεση πρέπει να είναι μεγαλύτερη της πίεσης των κορεσμένων ατμών για τη θερμοκρασία στην οποία ευρίσκεται το ρευστό. Τα συμπτώματα που εμφανίζουν οι ρευστοδυναμικές μηχανές, που βρίσκονται σε συνθήκες σπηλαίωσης, είναι θόρυβος, κραδασμοί, φθορά των μεταλλικών επιφανειών και απότομη απώλεια των λειτουργικών χαρακτηριστικών τους (μανομετρικό ύψος, παροχή). Ειδικά για τα αντλητικά συγκροτήματα, για να καθορισθούν οι συνθήκες αποφυγής σπηλαίωσης, ορίζεται μια παράμετρος που ονομάζεται καθαρό θετικό διαθέσιμο ύψος αναρρόφησης (NPSHa). Η παράμετρος αυτή υπολογίζεται κατά τη διάρκεια σχεδιασμού του αντλητικού συγκροτήματος ή προσδιορίζεται πειραματικά κατά τη δοκιμαστική λειτουργία του.

### 3.5 Σωστή επιλογής έλικας

Η σπηλαιώση ξεκινάει συνήθως από την οδηγό ακμή της έλικας και επεκτείνεται στην πίσω επιφάνεια των πτερυγίων της (επιφάνεια ώσης ή υψηλής πίεσης), καθώς και στη βάση των πτερυγίων κοντά στον αφαλό της. Μπορεί όμως να επεκταθεί και στον αφαλό και στην εμπρός επιφάνεια (επιφάνεια αναρρόφησης ή χαμηλής πίεσης) και να έχουμε «εκτεταμένη σπηλαιώση». Όταν υπάρχει σπηλαιώση, γίνεται εύκολα αντιληπτή. Αρχικά η ταχύτητα του σκάφους μειώνεται με αύξηση των στροφών της μηχανής ή με την αύξηση των στροφών της μηχανής η ταχύτητα του σκάφους δεν αυξάνεται ανάλογα, ενώ ακούγεται και έντονος θόρυβος στην έλικα που συνοδεύεται από ισχυρούς κραδασμούς. Το πρόβλημα της σπηλαιώσης είναι πολύ σοβαρό, διότι πέρα από μια σημαντική μείωση της απόδοσής της έλικας και αύξηση της κατανάλωσης, σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να πάρει ακόμη και καταστροφικές διαστάσεις. Υπάρχουν περιπτώσεις που σε έλικες, μετά από λίγες μόνον ώρες λειτουργίας, έχουν αποκοπεί ολόκληρα πτερύγια από έντονη σπηλαιώση στη βάση τους, έχουν στραβώσει άξονες ή έχουν υποστεί βλάβη οι ρεβέρσες.

Αν θέλουμε λοιπόν να αποφύγουμε φαινόμενα σπηλαιώσης στο σκάφος μας είναι απαραίτητο, όχι μόνο να προσέξουμε ιδιαίτερα στην επιλογή της έλικας μας αλλά επίσης να φροντίζουμε τη γάστρα του, τον ελικοφόρο άξονα και τις βάσεις του ή τη ρεβέρσα και γενικά όλον τον εξοπλισμό που βρίσκεται μέσα στο νερό και συμμετέχει στην προώθηση του σκάφους. Όλα πρέπει να είναι σε άριστη κατάσταση, καθαρά και λεία, απαλλαγμένα από παραμορφώσεις ή κτυπήματα και ιδιαίτερα η ίδια η έλικα. Μην ξεχνάμε ακόμη πως μια μικρή διάβρωση της επιφάνειας της έλικας για οποιοδήποτε λόγο ή μικρές αμυχές, μπορεί να γίνουν αιτία μιας μικρής σε έκταση σπηλαιώσης στην αρχή, που δεν θα είναι άμεσα αντιληπτή, η οποία όμως στη συνέχεια μπορεί να πάρει εκτεταμένες διαστάσεις με όλες τις αρνητικές συνέπειες που προαναφέραμε.

Όπως είπαμε και στα προηγούμενα κεφάλαια, σημαντικό ρόλο για την αποφυγή του φαινομένου της σπηλαιώσης παίζει ο σωστός συνδυασμός προπέλας με πλοίο. Γενικά για ένα σκάφος εκτοπίσματος, μια τρίφτερη προπέλα με ένα  $F_a / F$  περίπου 0,51 είναι αρκετή. Περισσότερα ή μεγαλύτερα πτερύγια δεν προσθέτουν τίποτα παραπάνω στην επίδοση του σκάφους. Σε ένα ιστιοφόρο, μια δίπτερη προπέλα θα ήταν αρκετή για λόγους περιορισμού της αντίστασης, αλλά μια τρίφτερη θα περιόριζε τους κραδασμούς (σχ. 9). Για ένα σκάφος ημικτοπίσματος, συνήθως επιλέγουμε τρίφτερες ή τετράφτερες προπέλες με ένα  $F_a / F$  περίπου 0,54. Για σκάφη πλαναρίσματος διαλέγουμε οπωσδήποτε τετράφτερες με  $F_a / F$  από 0,54 μέχρι 0,74.

Πεντάφτερες προπέλες συναντάμε μόνο σε σκάφη πλαναρίσματος. Ένα σκάφος για να πλανάρει γρήγορα χρειάζεται προπέλες με μεγάλο βήμα. Αυτό όμως θα πρέπει να βρίσκεται μέσα στα επιτρεπτά όρια, γιατί αφού το σκάφος πλανάρει, το μεγάλο βήμα της

προπέλας του περιορίζει την απόδοση σε ταχύτητα. Τα σκάφη υψηλών επιδόσεων σε ταχύτητα, όπως τα container ships, έχουν προπέλες μικρού βήματος. Αυτός είναι ο λόγος, που οι σύγχρονες προπέλες διαθέτουν χαμηλό βήμα κοντά στον αφαλό, που αυξάνεται προς τις άκρες των πτερυγίων. Ποια όμως είναι τα στοιχεία, που χρειαζόμαστε για να υπολογίσουμε την προπέλα μας;

1. Η ισχύς της μηχανής σε kW ή hp.
2. Οι στροφές της μηχανής RPM.
3. Η σχέση του μειωτήρα (σχέση μετάδοσης της ρεβέρσας).
4. Η μέγιστη ταχύτητα του σκάφους μας. Μερικά καθοριστικά στοιχεία για την καλή απόδοση μιας προπέλας είναι και τα παρακάτω:

α. Για να αποφύγουμε τους κραδασμούς, η απόσταση των πτερυγίων από το πάνω και κάτω τμήμα του κλωβού θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 10% της διαμέτρου της προπέλας.

β. Απαραίτητο για την απόδοση της προπέλας είναι να φτάνει σε αυτήν αρκετή ποσότητα νερού με καθαρή ροή χωρίς δίνες. Όπως είναι φυσικό, τοποθετούμε τσίγκους για την προστασία του άξονα και της προπέλας, φροντίζουμε όμως να τους τοποθετούμε σε σημεία που δεν επηρεάζουν την ομαλή ροή του νερού προς την προπέλα. Επίσης δεν θα πρέπει να τοποθετούμε τσίγκους στο πηδάλιο, γιατί επηρεάζουν δραστικά τη ροή του νερού από την προπέλα, δημιουργούν επιπλέον αντίσταση τριβής και μπορεί να προκαλέσουν κραδασμούς.

γ. Υπάρχει η άποψη πως κάποια μεγαλύτερη επιφάνεια πτερυγίων καθώς και περισσότερα φτερά κάνουν την προπέλα πιο αποδοτική, πράγμα όμως που δεν είναι σωστό. Στην πραγματικότητα η προπέλα χάνει πολύ από την επίδοσή της, αφού μια μεγαλύτερη επιφάνεια πτερυγίων προκαλεί μεγαλύτερη αντίσταση.

δ. Οι προπέλες, όπως και τα σκάφη, πρέπει να καθαρίζονται από τη στρείδια και τη μαλούπα, που πιάνουν παραμένοντας στο νερό. Όταν οι προπέλες δεν καθαρίζονται συχνά και παραμένουν βρόμικες, χάνουν πολύ από την απόδοσή τους, προβάλλουν μεγαλύτερη αντίσταση τριβής και φυσικά μειώνουν την ταχύτητα του σκάφους.

ε. Χαμηλές στροφές στην προπέλα προσφέρουν καλύτερες επιδόσεις και λιγότερους κραδασμούς. Οι σύγχρονες μηχανές θαλάσσης μπορεί να φτάσουν τις 5.000 στροφές, γι' αυτό είναι απαραίτητη η προσθήκη μειωτήρα, που θα περιορίσει τις στροφές της μηχανής σε αποδεκτά επίπεδα για την προπέλα.



στ. Οι προπέλες πρόωσης είναι σχεδιασμένες για να δίνουν πλήρη απόδοση στο πρόσω. Στο ανάποδα η απόδοσή τους φτάνει μόνο το 40% μέχρι 50%, γι' αυτό και δεν είναι κατάλληλες για bow thrusters.

ζ. Το πλεονέκτημα των δύο προπελών σε αντίθεση με τη μια είναι ότι κάνουν το σκάφος πιο ασφαλές σε περίπτωση κάποιας μηχανικής βλάβης και βέβαια κάνουν τη μανούβρα πιο εύκολη. Αντίθετα, το μειονέκτημα είναι ότι οι δύο μηχανές σημαίνουν δύο φορές το πρόβλημα της μιας και φυσικά είναι ακριβότερες από μια. Άλλη μια παράμετρος, που θα πρέπει να γνωρίζουμε είναι ότι δύο μηχανές έχουν κατά 10% μέχρι 15% χαμηλότερη απόδοση από μια μηχανή με συνολική ισχύ αυτή και των δύο μηχανών μαζί.

η. Μια κακώς υπολογισμένη προπέλα για παράδειγμα με μεγαλύτερο από το απαιτούμενο βήμα, μπορεί να δημιουργήσει το φαινόμενο της σπηλαίωσης. Η σπηλαίωση παρουσιάζεται όταν η χαμηλή πίεση από την πλωριά πλευρά που γίνεται η αναρρόφηση της ροής δεν είναι αρκετή, προκαλώντας φυσαλίδες αέρα που μπορεί να προξενήσουν ζημιά στην προπέλα.

Η σπηλαίωση παρουσιάζεται, όταν μικρές προπέλες στρέφονται με μεγαλύτερη από το κανονικό ταχύτητα ή όταν τα φτερά είναι πιο στενά από το απαιτούμενο πλάτος, άρα και με ανεπαρκή επιφάνεια πτερυγίων. Προπέλες κακώς τοποθετημένες, χωρίς ομαλή ροή νερού προς και από τα φτερά τους μπορεί να παρουσιάσουν σπηλαίωση, ακόμα και αν η επιφάνεια των φτερών είναι στα σωστά όρια. Επίσης, αν η άκρη των πτερυγίων βρίσκεται πολύ κοντά στην επιφάνεια του νερού, μπορεί αυτά να «τραβήξουν» αέρα με αποτέλεσμα, εκτός από την κακή απόδοση να παρουσιαστεί και το φαινόμενο της σπηλαίωσης. Η σπηλαίωση μπορεί να αντιμετωπιστεί μόνο με πολύ προσεκτικό υπολογισμό της έλικας και βέβαια τον περιορισμό των στροφών ανάλογα με τις διαστάσεις και με βάση πάντα στοιχεία από πειραματικές έρευνες. Η εξέλιξη της προπέλας δεν είναι ραγδαία όπως θα περιμέναμε. Ακόμα και σήμερα, η συμβατική προπέλα έχει υποστεί πολύ λίγες αλλαγές και βελτιώσεις. Η εξέλιξη έγκειται σε διαφοροποιήσεις, όπως αυτές που έχουν οι προπέλες επιφανείας. Αυτό όμως είναι ένα ξεχωριστό θέμα που θα δούμε σύντομα σε κάποιο άλλο θέμα μας, που θα είναι οι εναλλακτικές μορφές πρόωσης.

Η αλληλεπίδραση μεταξύ του πλοίου και της προπέλας γίνεται με τους παρακάτω τρόπους:

A) Η γάστρα λόγω της ταχύτητας και του όγκου της παρασύρει μια συγκεκριμένη μάζα νερού. Το αποτέλεσμα είναι η ταχύτητα του νερού που

σπρώχνεται από την έλικα να μην είναι ίση με την ταχύτητα που προωθείται η προπέλα μέσα σε θεωρητικά ακίνητο νερό.

Β) Η ταχύτητα του νερού που εκδιώκεται από την έλικα μεταβάλλεται σε μέτρο και σε διεύθυνση.

Γ) Η προπέλα ως γνωστόν μεταβάλλει την πίεση του νερού με αποτέλεσμα αυτή η πίεση να επιδρά πάνω στη έλικα, οδηγώντας σε μια σημαντική αύξηση της αντίστασης.

### 3.6 Μείωση του κινδύνου από σπηλαιώση

Ο τρόπος με τον οποίο μειώνεται σημαντικά ο κίνδυνος από σπηλαιώση είναι η ύπαρξη ή η εισαγωγή αέρα στην μάζα του νερού. Όταν υπάρχει αέρας στη ροή του νερού, τότε το μείγμα νερό - αέρας παρουσιάζει χαρακτηριστικά συμπίεστικότητας και αυτό αποσβένει τις υψηλές τιμές πίεσεως, που προκαλούνται από τη θραύση των φυσαλίδων της σπηλαιώσης.

Εργαστηριακές έρευνες απέδειξαν, ότι αν υπάρχει αέρας σε ποσοστό 1 έως 2%, τότε μειώνεται σημαντικά η διάβρωση του σκυροδέματος λόγω σπηλαιώσης, και όταν το ποσοστό αυτό έφθανε το 5 έως 7%, τότε πρακτικά η διάβρωση του σκυροδέματος εξαφανίζονταν.

Η ύπαρξη αέρα μέσα στη μάζα του νερού οφείλεται είτε στην είσοδο αέρα από την ελεύθερη επιφάνεια του νερού λόγω τύρβης είτε στη μεθοδευμένη εισαγωγή αέρα με διάφορες διατάξεις, που είναι γνωστές σαν αεριστήρες (aerators).

### 3.7 Γυάλισμα έλικας

Η τραχιά έλικα έχει ως συνέπεια την απώλεια ισχύος, που μπορεί να φτάσει έως και 6% καθώς και την αύξηση της κατανάλωσης καύσιμου. Το υποβρύχιο γυάλισμα έλικας (underwater propeller polishing) και η συντήρηση των επιφανειών της, είναι ζωτικής σημασίας για την εξοικονόμηση ενέργειας και τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του πλοίου. Οι έλικες μετατρέπουν τη μηχανική ενέργεια στον ελικοφόρο άξονα σε κινητική ενέργεια του νερού. Τα πτερύγια της έλικας λειτουργούν σαν αεροτομή. Η ανάπτυξη της ώθησης που δημιουργούν, είναι αποτέλεσμα της ροής που δημιουργείται γύρω από το πτερύγιο. Καθώς η έλικα γυρίζει τα πτερύγια δημιουργούν μια διαφορά πίεσης στο νερό, που ωθεί το πλοίο εμπρός ή πίσω, ανάλογα με τον τρόπο που γυρίζει η έλικα, όπως επίσης ανάλογα με το βήμα των πτερυγίων. Υπάρχουν έλικες με σταθερό βήμα και άλλες με μεταβλητό. Ένα σημαντικό πρόβλημα στη ναυτιλία είναι η αύξηση της τραχύτητας στην προπέλα του πλοίου που προκαλεί η σπηλαιώση, καθώς αυξάνεται η κατανάλωση καύσιμου και η εκπομπή αέριων ρύπων στο περιβάλλον και προκαλούνται σημαντικές απώλειες στο σύστημα πρόωσης

## Κεφάλαιο 4: Η οικονομική διάσταση του προβλήματος της σπηλαιώσης.

### 4.1 Κόστος συντήρησης της έλικας

Είναι γνωστό ότι η συντήρηση μιας έλικας δεν είναι εύκολη υπόθεση. Η συντήρηση γίνεται από εταιρείες και έμπειρους μηχανικούς και ο βαθμός δυσκολίας εξαρτάται από το μέγεθος και το υλικό κατασκευής της. Είναι αποδεκτό, ότι μπορούν να εμφανιστούν δυσκολίες στην διαδικασία συντήρησης που σχετίζονται με το κόστος συντήρησης που περιλαμβάνει την αγορά ανταλλακτικών και τις δαπάνες εργασίες του προσωπικού, τις εγκαταστάσεις και τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται για την συντήρηση, τη μεταφορά της έλικας, το προσωπικό και την τεχνογνωσία που διαθέτει και το υγρό στοιχείο (για περιπτώσεις που η συντήρηση γίνεται υποβρύχια). Σε όλες τις περιπτώσεις, τα

προβλήματα και οι δυσκολίες συντήρησης αφορούν κυρίως σε μεγάλα πλοία που φέρουν μεγάλες έλικες. Σε αυτές τις περιπτώσεις μπορεί να γίνεται περισσότερος λόγος για δυσκολίες, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι η συντήρηση μικρών πλοίων γίνεται με απόλυτη ευκολία.

Η συντήρηση μιας έλικας όμως είναι σημαντική γιατί με τον τρόπο αυτό μπορούν να αποφευχθούν οικονομικές σπατάλες. Μια φθορά ή μια ζημιά σε μια έλικα, λόγω ελλιπούς συντήρησης, επιβαρύνει τον ιδιοκτήτη του πλοίου οικονομικά. Το κόστος μιας ζημιάς διαφέρει από περίπτωση σε περίπτωση όμως η επιβάρυνση είναι δεδομένη. Μέσα από τη διαδικασία επισκευής μιας ζημιάς, γίνεται σπατάλη χρόνου, ο οποίος, για κάποιους, μπορεί να είναι σημαντικός. Για παράδειγμα, ένα εμπορικό πλοίο που μεταφέρει αγαθά, αν υποστεί μια τέτοια ζημιά σε ένα λιμάνι, στα μέσα μιας διαδρομής του, τότε οι οικονομικές συνέπειες που απορρέουν γίνονται εύκολα αντιληπτές. Η συντήρηση της έλικας περιλαμβάνει επιμέρους διαδικασίες επίβλεψης στα μέρη αυτής και σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να είναι ελλιπή ή λανθασμένη. Για αυτό ακριβώς το λόγο, απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή, ενδιαφέρον και ενασχόληση από έμπειρους μηχανικούς

Γενικότερα οι επισκευές και συντηρήσεις διακρίνονται σε αυτές που επιβάλλονται από την τεχνική υπηρεσία της εταιρείας, τον πλοίαρχο και τον Α' μηχανικό, καθώς και αυτές που ορίζει ο κατασκευαστής. Οι συντηρήσεις και επισκευές που επιβάλλονται από τους νηογνώμονες με επιθεωρήσεις είναι:

1. Ειδική επιθεώρηση σκάφους ( special survey of hull) κάθε πέντε χρόνια
2. Ειδική επιθεώρηση μηχανικού και ηλεκτρολογικού εξοπλισμού (special survey of machinery and electrical equipment) κάθε πέντε χρόνια
3. Ετήσια επιθεώρηση σκάφους, επιθεώρηση δεξαμενισμού ( dry docking survey)
4. Επιθεώρηση τελικού άξονα (tail shaft inspection) κάθε πέντε χρόνια.

## 4.2 Μείωση ταχύτητας

Η έννοια της ταχύτητας είναι πάρα πολύ βασική καθώς επηρεάζει το κόστος της μεταφοράς σε μεγάλο βαθμό. Μπορούμε να πούμε ότι οι υψηλές ταχύτητες κινήσεως ενός πλοίου επιτρέπουν περισσότερα ταξίδια ετησίως, άρα και περισσότερους ναύλους. Όμως οι υψηλές ταχύτητες καταναλώνουν εν γενεί, πολύ περισσότερα καύσιμα. Για τον

λόγο αυτό θα πρέπει πάντα να γίνεται συσχέτιση ταχύτητας και καταναλώσεως καυσίμων, ώστε να βρεθεί η καλύτερη δυνατή αναλογία, η οποία καλείται υπηρεσιακή ταχύτητα του πλοίου.

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενα κεφάλαια η σπηλαιώση μπορεί να διαβρώσει την έλικα ενός πλοίου ακόμα και να καταστρέψει ένα μέρος αυτής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της απόδοσης της έλικας σε σημαντικό βαθμό και κατά συνέπεια μείωση της ταχύτητας, χωρίς αυτό να είναι επιθυμητό από τους διαχειριστές του πλοίου. Η μείωση της ταχύτητας οδηγεί οικονομικές δυσχέρειες λόγω μείωσης του χρόνου ταξιδιού. Η μείωση της ταχύτητας που προκαλείται από την σπηλαιώση δεν έχει καμία σχέση με την εσκεμμένη μείωση ταχύτητας για εξοικονόμηση καυσίμων (slow steaming), αλλά σχετίζεται με μείωση της απόδοσης της έλικας και ελαττωματικής λειτουργίας του συστήματος πρόωσης.

Η έλικα, όπως και το πλοίο, πρέπει να προστατεύεται από την διάβρωση. Στην έλικα ακόμα και η ελάχιστη διάβρωση προκαλεί φαινόμενα σπηλαιώσης και περαιτέρω διάβρωση λόγω αυτής. Η προστασία της έλικας επιτυγχάνεται με τοποθέτηση ανόδων ψευδαργύρου σε κατάλληλα μέρη του πλοίου. Τέτοια είναι σημεία κοντά στην έλικα που εμφανίζουν όμως μικρή αντίσταση διέλευσης του ρεύματος.

Στις έλικες, οι περιοχές που διατρέχουν μεγαλύτερο κίνδυνο σπηλαιώσης είναι το πίσω μέρος των πτερυγίων. Στις περιοχές αυτές η πίεση έχει την μικρότερη τιμή λόγω της απότομης αύξησης της ταχύτητας της ροής του υγρού. Συχνά η σπηλαιώση εμφανίζεται και μεταξύ των πτερυγίων. Τέλος, στις περιπτώσεις που η έκταση της σπηλαιώσης είναι μεγάλης έκτασης αυτό μπορεί να οδηγήσει στην φθορά των άκρων των πτερυγίων στην έξοδο και των πτερυγίων διάχυσης.

## Επίλογος – Συμπεράσματα

Η σπηλαιώση αποτελεί ένα από τα πιο σοβαρά προβλήματα που απασχολούν τους κατασκευαστές των ελικών αλλά και τους τεχνικούς που ασχολούνται με τον κατάλληλο συνδυασμό έλικας και πλοίου.

Προκειμένου να αποφύγουμε φαινόμενα σπηλαιώσης στο πλοίο μας είναι απαραίτητο, όχι μόνο να προσέξουμε ιδιαίτερα στην επιλογή της έλικας μας αλλά επίσης να φροντίζουμε τη γάστρα του, τον ελικοφόρο άξονα και τις βάσεις του και γενικά όλο τον

εξοπλισμό που συμμετέχει στην προώθηση του πλοίου. Όλα πρέπει να είναι σε άριστη κατάσταση, καθαρά και λεία, απαλλαγμένα από παραμορφώσεις ή κτυπήματα. Θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη σημασία στην σωστή χρήση της έλικας από τους ναυτικούς, χρησιμοποιώντας την σωστή ταχύτητα ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν και το βάθος στο οποίο λειτουργεί η έλικα.

Τέλος, το κόστος συντήρησης της έλικας μπορεί να οδηγήσει σε μια βραχυπρόθεσμη εξοικονόμηση χρημάτων, σε αντίθεση με την καταστροφή της έλικας η οποία μπορεί να ζημιώσει κατά πολύ περισσότερο την εταιρεία.

## Βιβλιογραφία

1. <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A3%CF%80%CE%B7%CE%BB%CE%B1%CE%AF%CF%89%CF%83%CE%B7>
2. [http://www.marin.nl/upload/c8a4d7fd-5c0e-4927-abe7-a584e005c853\\_Computational\\_analysis\\_of\\_sheet\\_cavitation\\_and\\_propeller-ship\\_interaction\\_-\\_RINA\\_CFD2008.pdf](http://www.marin.nl/upload/c8a4d7fd-5c0e-4927-abe7-a584e005c853_Computational_analysis_of_sheet_cavitation_and_propeller-ship_interaction_-_RINA_CFD2008.pdf)
3. <https://www.mechlectures.com/cavitation-causes-prevention/>
4. [http://160.75.46.2/staff/emin/Lectures/Ship\\_Hydro/SHIP%20HYDRODYNAMIC\\_S\\_LECTURE\\_NOTES\\_PART\\_6\\_CAVITATION.pdf](http://160.75.46.2/staff/emin/Lectures/Ship_Hydro/SHIP%20HYDRODYNAMIC_S_LECTURE_NOTES_PART_6_CAVITATION.pdf)
5. <http://www.e-polytexneio.gr/viewtopic.php?f=259&t=5488&p=115561&hilit=%CE%83%CF%80%CE%B7%CE%BB%CE%B1%CE%AF%CF%89%CF%83%CE%B7#p115561>
6. [https://repository.kallipos.gr/pdfviewer/web/viewer.html?file=/bitstream/11419/1112/1/9569\\_%CE%A4%CE%A3%CE%99%CE%A1%CE%99%CE%9A%CE%9F%CE%93%CE%9B%CE%9F%CE%A5.pdf](https://repository.kallipos.gr/pdfviewer/web/viewer.html?file=/bitstream/11419/1112/1/9569_%CE%A4%CE%A3%CE%99%CE%A1%CE%99%CE%9A%CE%9F%CE%93%CE%9B%CE%9F%CE%A5.pdf)
7. <http://www.ortsa.gr/%CF%84%CE%BF-%CF%80%CF%81%CF%8C%CE%B2%CE%BB%CE%B7%CE%BC%CE%B1-%CF%84%CE%B7%CF%82-%CF%83%CF%80%CE%B7%CE%BB%CE%B1%CE%AF%CF%89%CF%83%CE%B7%CF%82/>
8. RINA conference “MARINE CFD2008”, 26-27 March 2008, Southampton, UK.
9. ΝΑΥΤΙΚΗ ΤΕΧΝΗ Φαμηλωνίδης Γ. 1989
10. Επιθεώρηση, συντήρηση και επισκευή της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου, Καρύδης Πέτρος Α.
11. Πρόωση πλοίου, τόμος Β’- Αναλυτική σχεδίαση ελίκων. Γεράσιμος Πολίτης-Γεώργιος Τζαμπίρας
12. <https://www.efoplistis.gr/currentissue0618.php>
13. Οικονομική εκμετάλλευση πλοίου, έκδοση Β’ – Ευαγγέλου Α. Σαμπράκου, Ιωάννη Γ. Γιαννοπούλου