

**ΑΚΑΔΗΜΙΑ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ**

**ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΘΕΜΑ : ΣΠΗΛΛΙΩΣΗ ΣΤΙΣ ΕΛΙΚΕΣ ΠΛΟΙΟΥ . ΕΜΦΑΝΙΣΗ  
ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΚΑΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΟΥ .**



**ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ : ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ**

**ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΓΚΟΤΖΑΜΑΝΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ**

**ΝΕΑ ΜΗΧΑΝΙΩΝΑ**

**2014**

**ΑΚΑΔΗΜΙΑ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ**

**ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΘΕΜΑ : ΣΠΗΛΛΙΩΣΗ ΣΤΙΣ ΕΛΙΚΕΣ ΠΛΟΙΟΥ . ΕΜΦΑΝΙΣΗ  
ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΚΑΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΟΥ .**

**ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ : ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ**

**ΑΜ : 4661**

**ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΠΑΡΑΔΟΣΗΣ :**

Βεβαιώνεται η ολοκλήρωση της παραπάνω πτυχιακής εργασίας

Ο καθηγητής

Γκοτζαμάνης Γεώργιος

## Περίληψη

Σκοπός της εργασίας είναι η συνοπτική καταγραφή των στοιχείων που χρειάζονται για να μελετηθεί το φαινόμενο της σπηλαίωσης σε έλικες πλοίων. Κατά τη κίνηση της έλικας, είναι δυνατόν κάτω από ορισμένες συνθήκες να σχηματιστούν φυσαλίδες ατμών μέσα στην μάζα του υγρού που παρασύρει. Η δημιουργία των φυσαλίδων αυτών έχει αρνητικές επιπτώσεις στη λειτουργία αλλά και την αξιοπιστία της έλικας. Οι φυσαλίδες αυτές σχηματίζονται όταν σε μια περιοχή η στατική πίεση τείνει τοπικά να γίνει μικρότερη από την πίεση ατμοποίησης του υγρού, οπότε αυτό ατμοποιείται και αναπτύσσεται ένας θύλακας ατμοποιημένου υγρού(ατμού). Η κατάρρευση της φυσαλίδας υπό τις αναφερόμενες συνθήκες αποτελεί και το φαινόμενο της σπηλαίωσης. Συμπτώματα της σπηλαίωσης είναι ο θόρυβος που προκαλείται μέσω της κατάρρευσης των φυσαλίδων και οι κραδασμοί από τις διαδοχικές αυξομειώσεις στην πίεση του υγρού . Η σπηλαίωση τείνει στη φθορά των μεταλλικών επιφανειών της έλικας . Όπου με το πέρασμα του χρόνου η φθορά αυτή (διάβρωση) επεκτείνεται με τελικό αποτέλεσμα την καταστροφή της έλικας . Βέβαια με την κατάλληλη συντήρηση και επισκευή καθώς και την σωστή τήρηση των μέτρων αποφυγής του φαινομένου της σπηλαίωσης , η καταστροφή της έλικας θα αργήσει να γίνει .

## **Abstract**

The purpose of this paper is to summarize the information needed to study the phenomenon of cavitation in boat propellers. During the movement of the propeller, it is possible under certain conditions to form vapor bubbles in the liquid mass entrained. The creation of these bubbles has negative effects on the functioning and reliability of the helix. These bubbles are formed in a region where the local static pressure tends to become lower than the pressure of vaporization of the liquid, so it is vaporized and the vaporized developed a pocket of fluid (steam). The collapse of the bubble is the phenomenon of cavitation. Symptoms of cavitation noise are caused by the collapse of the bubbles and the vibrations of the successive variations in fluid pressure. The cavitation tends to damage the metal surfaces of the helix. By the passage of time such erosion (corrosion) expands and ultimately destruction of the helix. Of course, with proper maintenance and repair, and the proper observance of the measures to avoid the phenomenon of cavitation, the destruction of the helix will be late.

## Πρόλογος

Η εργασία αναφέρεται στην σπηλαίωση των ελίκων στην οποία περιλαμβάνει το φαινόμενο της εμφάνισης και της αντιμετώπισης της. Σκοπός της πτυχιακής είναι : η επεξήγηση όσο περισσότερων λεπτομερειών γίνεται, για τη δημιουργία των φυσαλίδων και τις ιδιότητές τους. Θα διασαφηνιστεί εξ' ολοκλήρου ο ορισμός της λέξης "σπηλαίωση", ενώ θα γίνει και ανάλυση των χαρακτηριστικών του συγκεκριμένου προβλήματος. Καθώς θα γίνει και η λεπτομερής αναφορά των μελών – χαρακτηριστικών και τον ρόλο της προπέλας ως προς την κίνηση του πλοίου. Επίσης θα γίνει αναφορά στην εμφάνιση και στους τρόπους αποφυγής του φαινομένου καθώς και στην επισκευή αυτών.

# Κεφάλαιο 1

## Δημιουργία φυσαλίδων

### 1.1 Η δημιουργία των μικροφυσαλίδων

Η δημιουργία και η ανάπτυξη των φυσαλίδων παίζει σημαντικό ρόλο σε διάφορους τομείς της τεχνολογίας, όπως στα πολυμερή (παρασκευή πολυμερικών αφρών) και στην επεξεργασία του γυαλιού, στους διαχωρισμούς με επίπλευση, στις αντλίες και στα υδραυλικά συστήματα ανάκτησης ενέργειας. Η μελέτη της δημιουργίας και της δυναμικής των φυσαλίδων είναι σημαντική σε βιομηχανικές εφαρμογές όπως οι αντλίες θερμότητας, οι εναλλάκτες θερμότητας, τα συστήματα ψύξης, η ψύξη μικροεπεξεργαστών και η επεξεργασία των υλικών. Επιπλέον είναι σημαντική στη Γεωλογία κατά τη διάρκεια της εκρηκτικής απαέρωσης του μάγματος των ηφαιστείων.

Η δημιουργία των φυσαλίδων και η δυναμική της ανάπτυξής τους είναι επίσης σημαντική και για την τεχνολογία των τροφίμων (παρασκευή ανθρακούχων αναψυκτικών και κρασιού) και για την ανθρώπινη φυσιολογία, όπου μπορούν να δημιουργηθούν φυσαλίδες αζώτου στο κυκλοφορικό σύστημα των δυτών, των αστροναυτών ή ακόμα και των επιβατών αεροπλάνου κατά τη διάρκεια σοβαρών περιστατικών αποσυμπίεσης. Τέλος, η δημιουργία και η δυναμική των φυσαλίδων είναι σημαντική για τη μελέτη φυσικών φαινομένων όπως η πυρηνογέννεση και ο βρασμός.

Η ανάπτυξη των φυσαλίδων που διέπεται από μεταφορά μάζας, μπορεί να προκληθεί από ένα κορεσμένο διάλυμα, είτε με ελάττωση της πίεσης (αποσυμπίεση), είτε με αύξηση της θερμοκρασίας.



**Εικόνα 1:** Φυσαλίδες

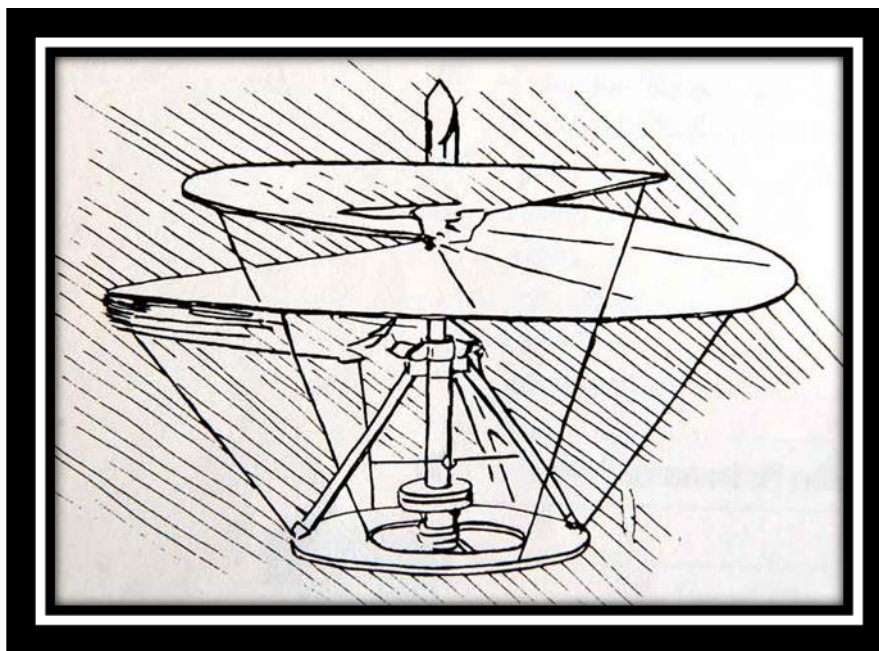
## Κεφάλαιο 2

### Προπέλα (ιστορικό – περιγραφή – ορισμοί)

#### 2.1 Ιστορικό της προπέλας

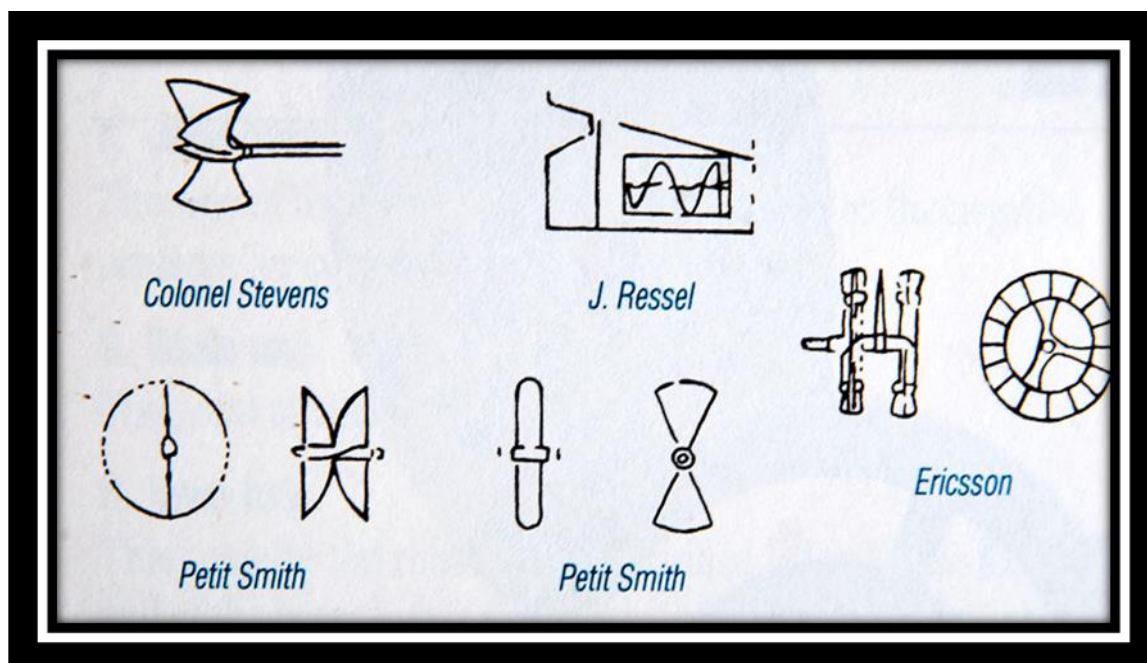
Η ιστορία της προπέλας δεν είναι καινούργια. Ο πρώτος «κοχλίας-αντλία», αναφέρεται ότι χρησιμοποιήθηκε από τους Αιγυπτίους το 945 π.Χ., με σκοπό ν' αντλείται νερό από το Νείλο για αρδευτικούς σκοπούς. Λίγο αργότερα, ο Αρχιμήδης (287-212 π.Χ.) είχε πλησιάσει περισσότερο στην εφαρμογή της έλικας στη ναυτική χρήση, με την επινοήση ενός συστήματος με κοχλία, το οποίο έδιωχνε τα νερά που εισέβαλαν στο κύτος του πλοίου. Αυτή η εφεύρεση του Αρχιμήδη θεωρείται ο προπομπός της προπέλας.

Αργότερα, το 15ο αιώνα, ο Λεονάρντο Ντα Βίντσι σχεδίασε περιστροφικά ελικοειδή συστήματα, όπου το «ελικόπτερό» του πλησίαζε πολύ στην ιδέα της ναυτικής προπέλας. Ωστόσο, αν και η βασική γνώση υπήρχε, η ουσιαστική εφαρμογή άρχισε με την ανακάλυψη της δύναμης του ατμού. Αν και τα πρώτα ατμόπλοια κινήθηκαν με τους τεράστιους τροχούς στις μάντες τους, την εφεύρεση του Αρχιμήδη σε σκάφος είχαν καταφέρει να προσαρμόσουν από το 1661 οι Toogood & Hays. Αυτή η εφαρμογή έμοιαζε περισσότερο με το σύστημα που σήμερα ονομάζουμε water jet, αλλά και μέχρι τα τέλη του 19ου αιώνα το σύστημα πρόωσης με προπέλα ήταν δευτερεύουσας σημασίας στο πλοίο, αφού ο αέρας θεωρείτο ακόμα η βασική δύναμη της κίνησής του.



**Εικόνα 2:** Σχέδιο της «αερόβιδας» του Λεονάρντο Ντα Βίντσι.

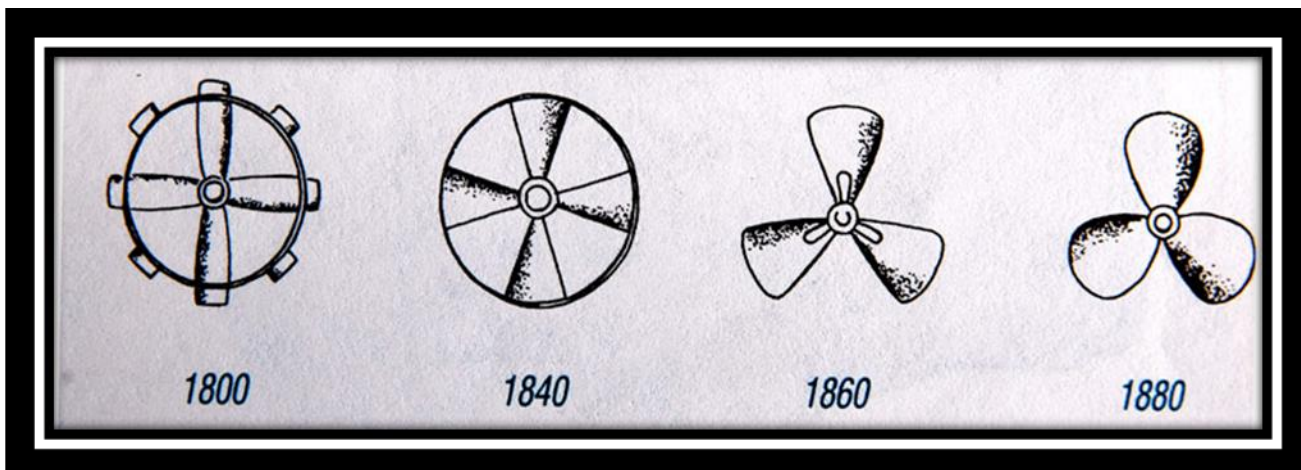
Ο 20ος αιώνας είναι η εποχή της εφαρμογής και της εξέλιξης των προπελικών συστημάτων, όμως -τι ειρωνεία- οι τελευταίοι που το κατάλαβαν αυτό ήταν οι δικοί μας θαλασσοκράτορες, οι Γαλαξιδιώτες, οι οποίοι έπρεπε να περάσει σχεδόν ο μισός εικοστός αιώνας μέχρι να αποφασίσουν να «παροπλίσουν» τα ένδοξα ιστιοφόρα τους, αρνούμενοι να υποκλιθούν στη μηχανοκίνηση στη θάλασσα, θάβοντας γύρω στο 1950 μαζί με τα σκάφη τους και τη μεγάλη ναυτική τους ιστορία. Σήμερα, χάρη στο ενδιαφέρον κάποιων ρομαντικών, έχει δημιουργηθεί το Ναυτικό Μουσείο στο Γαλαξίδι, όπου ο επισκέπτης έχει τη δυνατότητα να «ταξιδέψει» σε μία ένδοξη ναυτική ιστορία, όχι και τόσο μακρινή.



**Εικόνα 3:** Οι προπέλες των πρώτων εφευρετών

Παρόλο, λοιπόν, που υπήρχαν οι βάσεις αυτής της «βίδας», του νερού αλλά και του αέρα, η ανακάλυψη της έλικας χρεώνεται στους Petit Smith και John Ericsson. Και οι δυο τους το 1836 κατάφεραν (έστω και με τροποποιήσεις στην παλιά ιδέα) να πλησιάσουν πολύ στη σημερινή μορφή της προπέλας. Με πολλές δοκιμές αλλά και αρκετά συχνά τυχαία, η προπέλα άρχισε να δείχνει τη μεγάλη αξία της. Κι αυτό ήταν τόσο έντονο, που το 1839 ο ναυπηγός I.K. Brunel άλλαξε τη σχεδίαση του Great Britain, ενός σιδερένιου πλοίου που βρισκόταν υπό κατασκευή, αντικαθιστώντας το σύστημα της ώσης από τροχούς στις μπάντες με έλικα στην πρύμη. Το τελικό αποτέλεσμα ήταν μια μεγάλη έκπληξη, ακόμα και για τους ίδιους τους κατασκευαστές του πλοίου, αφού με τον ατμοκινητήρα των 1500 ίππων η ταχύτητα έφτασε τους 11 κόμβους. Ωστόσο, πέρασαν αρκετά χρόνια μέχρι να αποδεχτούν και οι ναυτικοί το νέο σύστημα της κίνησης στη θάλασσα και να το θεωρήσουν ως το πιο ασφαλές.

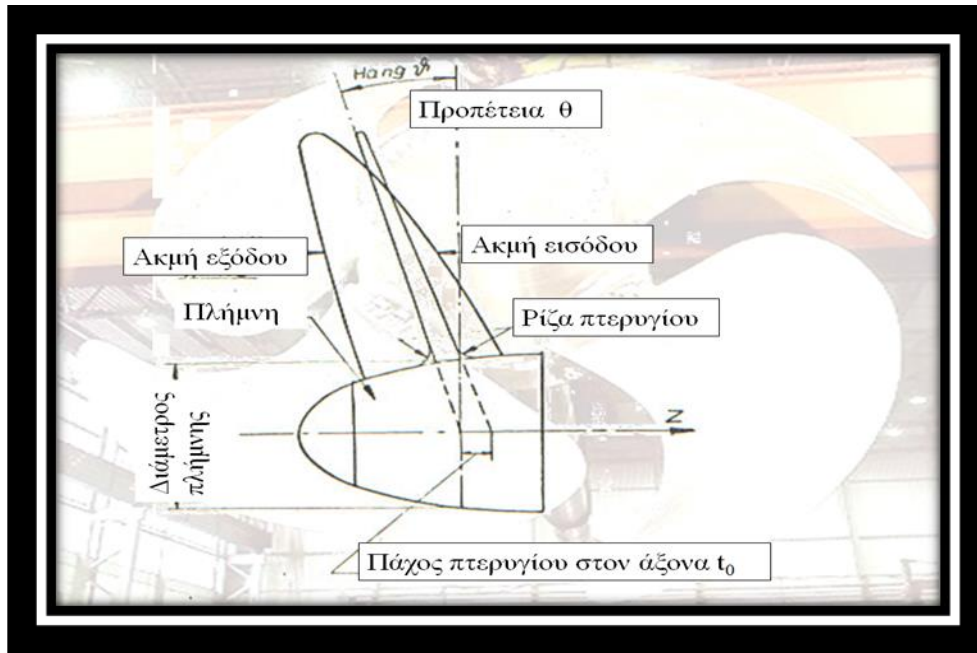




**Εικόνα 4:** Η εξέλιξη της προπέλας τον 19<sup>ο</sup> αιώνα

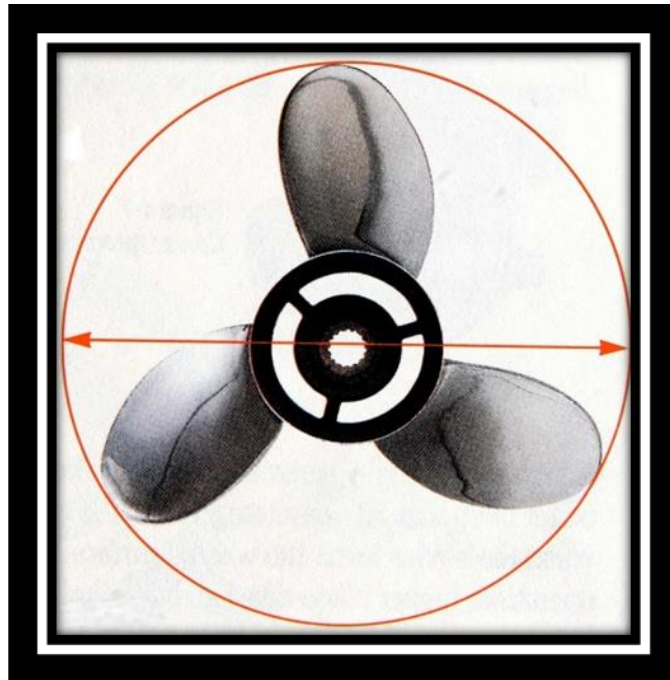
Αν και η αρχή του Αρχιμήδη, σχετικά με την ελικοειδή κίνηση, σε διάφορες προτάσεις και παραλλαγές ήταν γνωστή, οι εφαρμογές στην κίνηση του μηχανοκίνητου πλοίου και η τελική μορφή αυτού του τύπου μετάδοσης της κίνησης και πρόωσης, δηλαδή το εξάρτημα που αναγνωρίζουμε μέχρι σήμερα σαν προπέλα, δόθηκε από τον George Rennie. Ο Rennie συνδύασε τις διάφορες ιδέες σχετικά με την αύξηση του «βήματος», το πολύσφηνο και τη διάμετρο της προπέλας, καταλήγοντας στην προπέλα που ο ίδιος ονόμασε «Conodial Propeller», την οποία πατεντάρισε το 1839. Πριν την είσοδο του 20ου αιώνα οι τροχοί εξαφανίζονταν σταδιακά από τις μπάντες των μηχανοκίνητων πλοίων, και την πρόωσή τους στην υδάτινη επιφάνεια αναλάμβανε «ο κοχλίας του Αρχιμήδη». Ο 20ός αιώνας είναι η εποχή που η τεχνολογία και η επιστήμη αφοσιώνονται στην εξέλιξη της προπέλας, στοχεύοντας στην αποδοτικότητα, στην αξιοπιστία, στη μέγιστη απόδοση και στη μείωση του χαμένου έργου.

## 2.2 Τα βασικά χαρακτηριστικά - μέρη των προπελών μέρη (περιγραφή-ορισμοί)



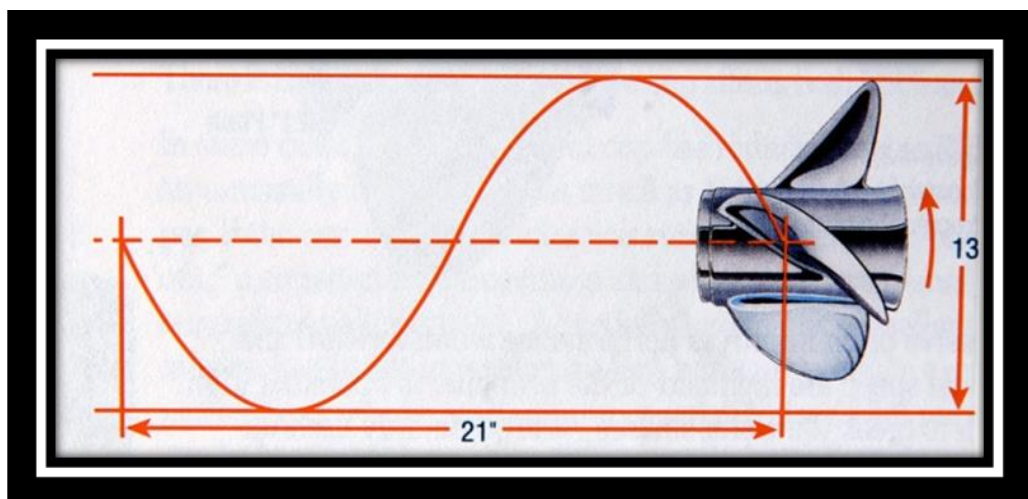
Εικόνες 5-6 : Βασικά μέρη-χαρακτηριστικά της προπέλας .

1. **Διάμετρος** της έλικας είναι η διάμετρος του κύκλου που περιγράφουν τα άκρα των πτερυγίων της (blade tips).



Εικόνα 7: Διάμετρος της έλικας.

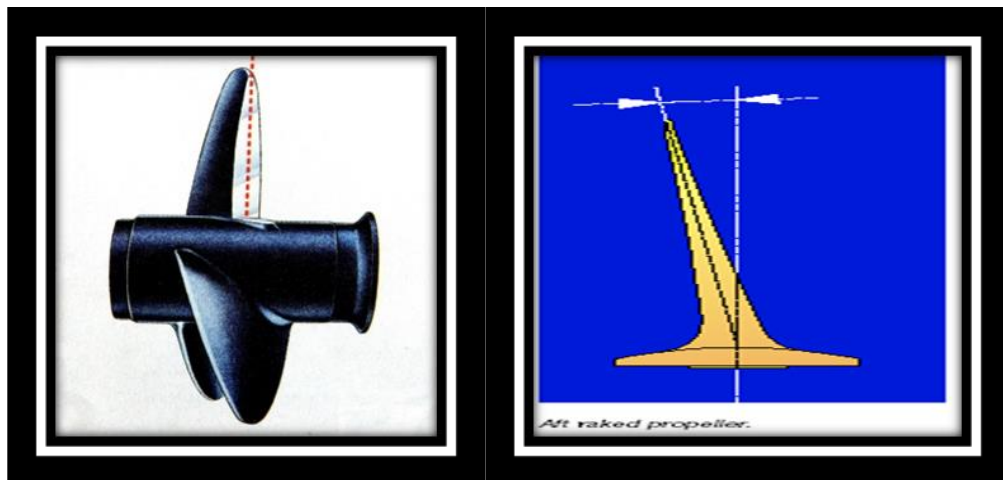
2. **Βήμα** είναι η αξονική απόσταση (μετρημένη σε ίντσες), που διανύει η προπέλα σε μία πλήρη περιστροφή της.



Εικόνα 8: Βήμα της έλικας.

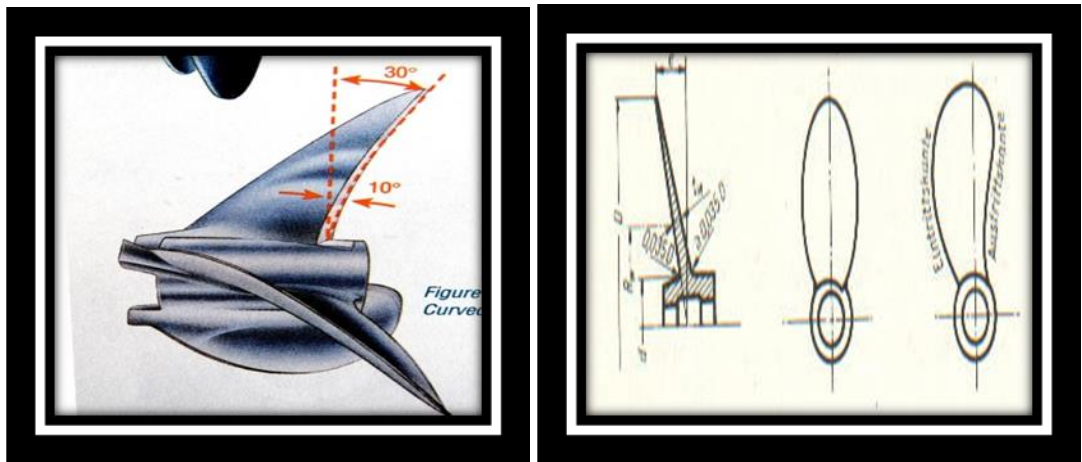
3. **Η προπέτεια («rake»)** αναφέρεται σε μοίρες και προσδιορίζει τη γωνία τοποθέτησης του πτερυγίου πάνω στον κορμό. Η κλίση των πτερυγίων προς τα πίσω αποβλέπει στην καλύτερη λειτουργία της έλικας αυξάνοντας την απόσταση μεταξύ

της κορυφής των πτερυγίων και του πλοίου. Κατ' αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται μείωση των παλμικών πιέσεων στο περίβλημα του πλοίου (κραδασμοί) μείωση του συντελεστή ρόφησης  $w$ .



**Εικόνα 9:** Έλικά με rake 0 μοιρών-15 μοιρών.

4. Όταν η οπίσθια κόψη του πτερυγίου στο τελείωμά της σχηματίζει μία μικρή «κούρμπα», λέγεται ότι αυτή η προπέλα έχει λοξότητα ή αλλιώς cup. Χαρακτηρίζεται η έντονη καμπυλότητα της ακμής εισόδου. Επιτυγχάνεται το μη ταυτόχρονο πέρασμα όλων των σημείων της ακμής μπροστά από το ποδόσταμο όπου εμφανίζονται οι μεγαλύτερες δυνάμεις καταπόνησης του πτερυγίου. Συχνά το λένε «κουπάρισμα». Είναι η μικρή κούρμπα ή χείλος, που σχηματίζεται στην οπίσθια κόψη (trailing edge) του πτερυγίου. Αυτή η μικρή λεπτομέρεια επιτρέπει στην προπέλα να «δαγκώνει» καλύτερα το νερό. Θεωρητικά, οι προπέλες που διαθέτουν «cup» μπορούν να αποδώσουν σαν να έχουν μεγαλύτερο βήμα, από μισή μέχρι και μία ίντσα.



Εικόνα 10 : Κουρμαριστό πτερόγιο.

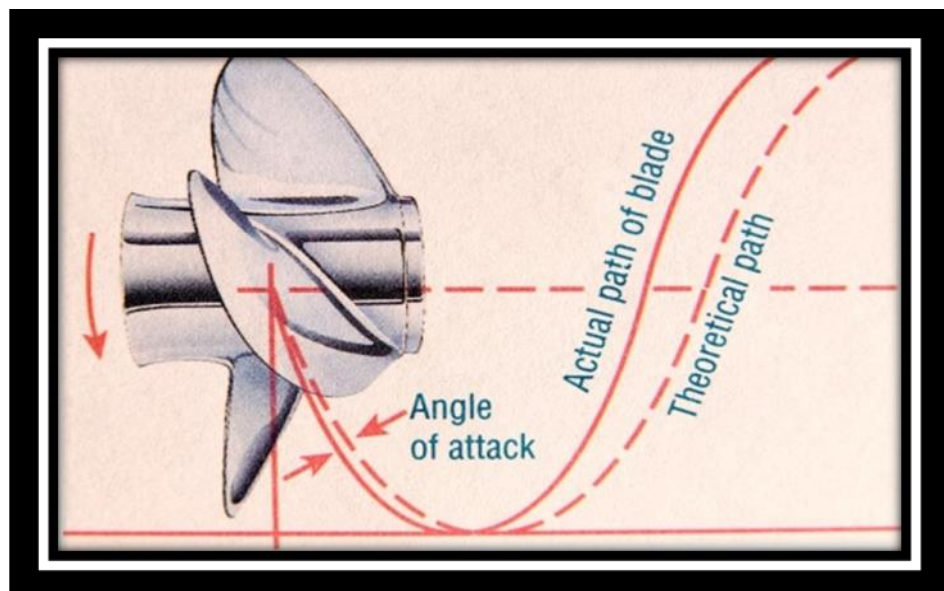
5. Ολίσθηση της προπέλας ονομάζουμε τη διαφορά της πραγματικής ταχύτητας από τη θεωρητική.

- Συντελεστής φαινομενικής ολίσθησης :

$$S_A = 1 - (V / p \cdot n) \quad (V = \text{απόλυτη ταχύτητα πλοίου})$$

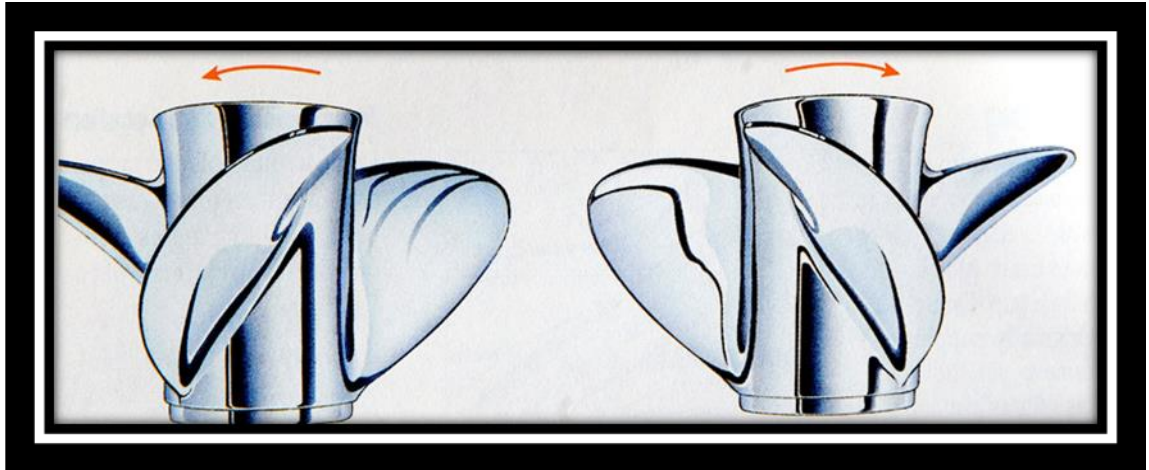
- Συντελεστής πραγματικής ολίσθησης :

$$S_R = 1 - (V_A / p \cdot n) \quad (V_A = \text{σχετική ταχύτητα ροής στην έλικα.})$$



Εικόνα 11: Χείλος προσβολής ,πραγματική και θεωρητική διαδρομή πτερυγίου.

- 6. Φορά της προπέλας.** Οι προπέλες χαρακτηρίζονται δεξιόστροφες (RH = Right Handed ή Clockwise) όταν στρέφονται κατά τη φορά των δεικτών του ρολογιού και αντίστοιχα αριστερόστροφες (LH = Left Handed ή Anti-clockwise). Τη φορά τη χαρακτηρίζουμε, παρατηρώντας τους ελικοφόρους άξονες από την πρύμη.



Εικόνα 12 : Δεξιόστροφη και αριστερόστροφη προπέλα.

**7. Αριθμός Πτερυγίων (Number of Blades)**

Ιδανικά, μια μονόπτερη προπέλα θα ήταν η πιο αποδοτική, αν μπορούσε να λυθεί το θέμα των έντονων κραδασμών. Έτσι για να επιτευχθεί ένα αποδεκτό επίπεδο κραδασμών, η λύση μπορεί να θεωρηθεί μια προπέλα 2 πτερυγίων. Καθώς προστίθενται πτερύγια, η απόδοση μειώνεται, αλλά το ίδιο συμβαίνει και με τους κραδασμούς. Οι περισσότερες προπέλες κατασκευάζονται με 3 πτερύγια, συμβιβάζοντας τους κραδασμούς, το μέγεθος, την απόδοση και το κόστος. Η διαφορά στην απόδοση μεταξύ μιας 2-πτερης και μιας 3-πτερης προπέλας, θεωρείται λιγότερο σημαντική από την διαφορά στο επίπεδο κραδασμών. Σχεδόν όλες οι αγωνιστικές προπέλες είναι πλέον 3-πτερες ή 4-πτερες.

**8. Το πάχος των πτερυγίων.**

Τα πτερύγια δεν έχουν το ίδιο πάχος σε όλη την επιφάνειά τους. Το μεγαλύτερο πάχος το έχουν στη βάση τους στην ένωση με τον κορμό και λεπταίνουν προς τις άκρες.

**9. Η περιφέρεια του πτερυγίου (blade Contour).**

Περιφέρεια ονομάζουμε το σχήμα των πτερυγίων, όπως τα κοιτάζουμε «ανφάς» από μπροστά ή από πίσω. Τα πτερύγια μπορεί να είναι ίσια ή λοξά. Τα περισσότερο λοξά πτερύγια, στις προπέλες επιφανείας παρουσιάζουν μειωμένο κραδασμό, όταν η προπέλα εισέρχεται πάλι στο νερό μετά από ξενέρισμα.

**10. Ανεπτυγμένη επιφάνεια των πτερυγίων** (AE) είναι το σύνολο των πραγματικών επιφανειών ώσης, δηλαδή των πρυμίων ελικοειδών επιφανειών όλων των πτερυγίων χωρίς την πλήμνη.

**11. Πλήμνη** (κέντρο) μιας έλικας είναι μια σταθερή κεντρική επιφάνεια, επικάλυμμα του άξονα της έλικας, στην οποία είναι προσαρμοσμένα τα πτερύγιά της.

**12. Άκρον του πτερυγίου (Blade tip).** Είναι η άκρη του πτερυγίου, το σημείο όπου μετριέται η διάμετρος της προπέλας και το σημείο που συναντώνται η οπίσθια με την εμπρόσθια κόψη.

**13. Εμπρόσθια ακμή (Leading edge)** Είναι το μέρος του πτερυγίου που «βλέπει» στην πρύμη του σκάφους και η επιφάνειά του θα κόψει πρώτη την επιφάνεια του νερού κατά την περιστροφή της προπέλας. Ξεκινάει από τον κορμό και καταλήγει στο άκρον του πτερυγίου.

**14. Οπίσθια ακμή (Trailing edge).** Είναι το μέρος του πτερυγίου που «βλέπει» πίσω, και από την επιφάνεια του οποίου το νερό θα «εγκαταλείψει» την προπέλα. Ξεκινάει από την άκρη του πτερυγίου και καταλήγει στον κορμό, πολύ κοντά στο «δακτύλιο διάχυσης» (στις προπέλες με πέρασμα των καυσαερίων δια μέσου του κορμού τους).

**15. Επιφάνεια πτερυγίου** (blade face). Είναι η εξωτερική πλευρά του πτερυγίου, η οποία αναφέρεται και σαν η πλευρά εξάσκησης «θετικής» πίεσης.

**16. Πλάτη πτερυγίου** (Blade back) Είναι η πίσω πλευρά του πτερυγίου, αυτή που βλέπει στην πρύμη η οποία αναφέρεται και σαν η πλευρά εξάσκησης «αρνητικής» πίεσης (αναρρόφησης).

**17. Ρίζα της λεπίδας** (blade root) είναι το σημείο στο οποίο το πτερύγιο «δένει» με τον κορμό.



Εικόνα 13 : Προπέλα.



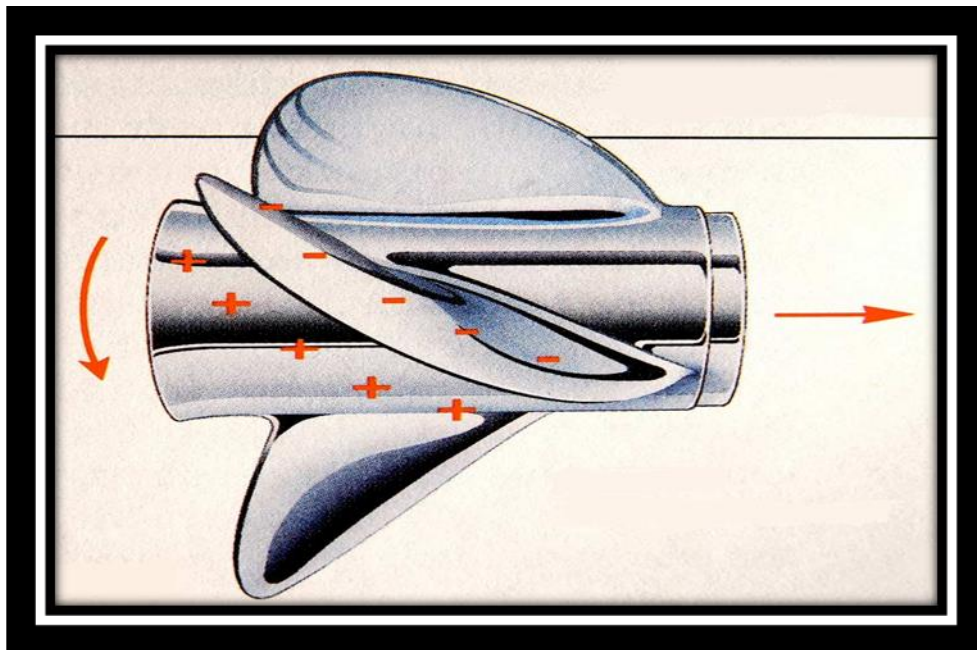
## Κεφάλαιο 3

### Έργο και αλληλεπίδραση της έλικας σε σχέση με το πλοίο

#### 3.1 Έργο της προπέλας

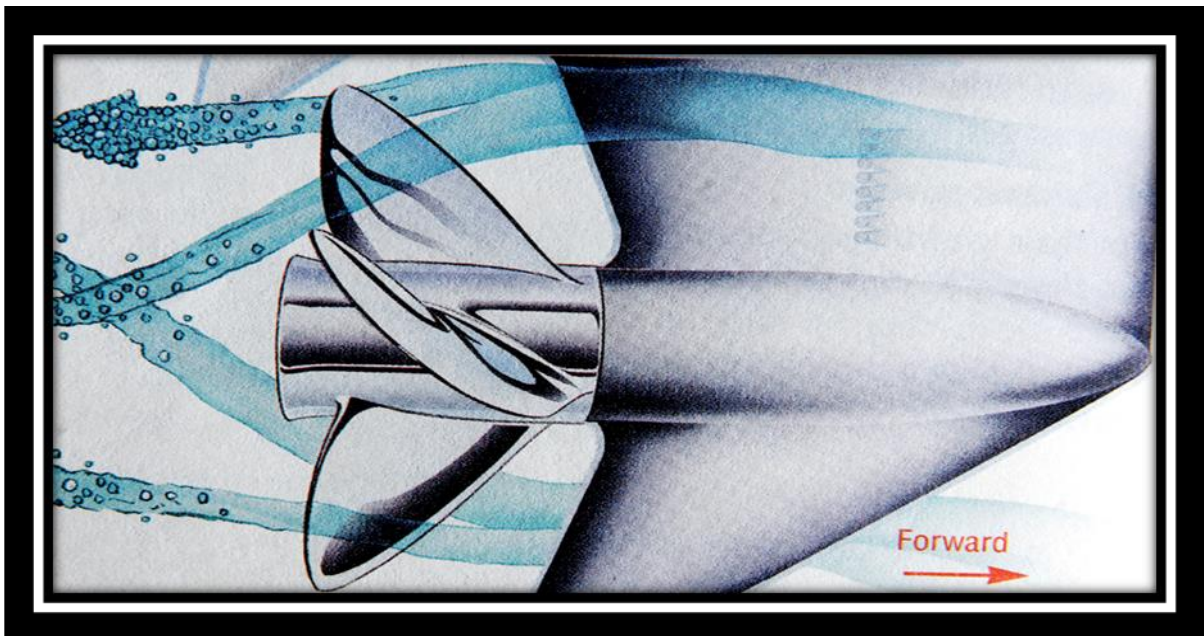
Περιστρέφοντας μια προπέλα σύμφωνα με την κίνηση των δεικτών του ρολογιού παρατηρούμε την εμπρόσθια κόψη των πτερυγίων (leading edge) να προηγείται. Αυτή είναι η δεξιόστροφη προπέλα. Μ' αυτή την κίνησή της τα πτερύγια σπρώχνουν το νερό κάτω και πίσω, κάτι σαν την κίνηση που κάνει ο κολυμβητής, που σπρώχνει το νερό με την παλάμη του για να προχωρήσει μπροστά. Την ίδια στιγμή μία άλλη ποσότητα νερού πρέπει να «ορμήσει» στην επιφάνεια του πτερυγίου, για να καταλάβει τη θέση του προηγούμενου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία διαφορετικής πίεσης μεταξύ των δύο πλευρών των πτερυγίων :

- α) Μία θετική πίεση, ή φαινόμενο «σπρωξίματος» στην κάτω πλευρά του πτερυγίου και
- β) Μία αρνητική πίεση, ή φαινόμενο «τραβήγματος» στην πάνω πλευρά του πτερυγίου.



Εικόνα 14: Οι θετικές και αρνητικές πιέσεις που δημιουργούν την ώση.

Αυτό, σε μία πλήρη περιστροφή της προπέλας, συμβαίνει συγχρόνως σε όλα τα πτερύγια. Έτσι, γίνεται αντιληπτό, ότι το έργο της προπέλας είναι συγχρόνως «τράβηγμα» και «σπρώξιμο». Αυτό που συμβαίνει, λοιπόν, κατά την περιστροφή της προπέλας είναι να ρουφιάται νερό από μπροστά και να εκτοξεύεται από πίσω, σχηματίζοντας ένα φανταστικό τούνελ, το οποίο είναι λίγο μεγαλύτερο από τη διάμετρο της προπέλας. Καθώς η προπέλα αυξάνει τις στροφές της, η ροή του νερού επιταχύνεται μέσα από αυτήν δημιουργώντας ένα ρεύμα νερού με μεγαλύτερη ταχύτητα πίσω από την προπέλα. Αυτό το ρεύμα κινείται σ' ένα νοητό υδάτινο τούνελ, το οποίο είναι μικρότερο από την πραγματική διάμετρο της προπέλας. Αυτό το έργο του «τραβήγματος» νερού από μπροστά και του ταυτόχρονου «σπρωξίματος» προς τα πίσω με μία μεγαλύτερη ταχύτητα, προσθέτει ορμητικότητα στο νερό. Αυτή η αλλαγή σε ορμή ή σε επιτάχυνση του νερού, είναι η δύναμη που ονομάζουμε ώση (thrust).



**Εικόνα 15:** Ανάπτυξη της ώσης

### 3.2 Αλληλεπίδραση μεταξύ πλοίου και προπέλας

Η αλληλεπίδραση μεταξύ πλοίου και προπέλας λειτουργεί με βάση τα ακόλουθα σημεία :

- Η γάστρα μεταφέρει μαζί της μια συγκεκριμένη μάζα νερού. Αυτό σημαίνει ότι η μέση ταχύτητα του νερού που εκδιώκεται ( σπρώχνεται ) από την έλικα δεν είναι πλέον ίση με την ταχύτητα που προωθείται η προπέλα μέσα στο θεωρητικά ακίνητο νερό.
- Η ταχύτητα του νερού που εκδιώκεται από την έλικα μεταβάλλεται σε μέτρο και σε διεύθυνση.
- Η προπέλα προκαλεί μεταβολή των τοπικών πιέσεων στο νερό , αυτές οι πιέσεις με τη σειρά τους θα αντιδράσουν πάνω στην γάστρα , οδηγώντας σε μια μη αμελητέα αύξηση της αντίστασης.



**Εικόνα 15** : Απόνερα πλοίου.

## Κεφάλαιο 4

### Σπηλαιώση (φαινόμενο-είδη-ανάλυση-εμφάνιση)

#### 4.1 Το φαινόμενο σπηλαιώσης (Ορισμός και είδη σπηλαιώσης )

##### 4.1.1 Α)Το φαινόμενο της σπηλαιώσης(γενικά)

Η σπηλαιώση είναι ένα φαινόμενο που μπορεί να συμβεί στο νερό ( ή σε οποιοδήποτε άλλο υγρό) υποκείμενο σε αύξηση της ταχύτητας του. Σύμφωνα με τον νόμο του Bernoulli η αύξηση της ταχύτητας προκαλεί πτώση στην πίεση.

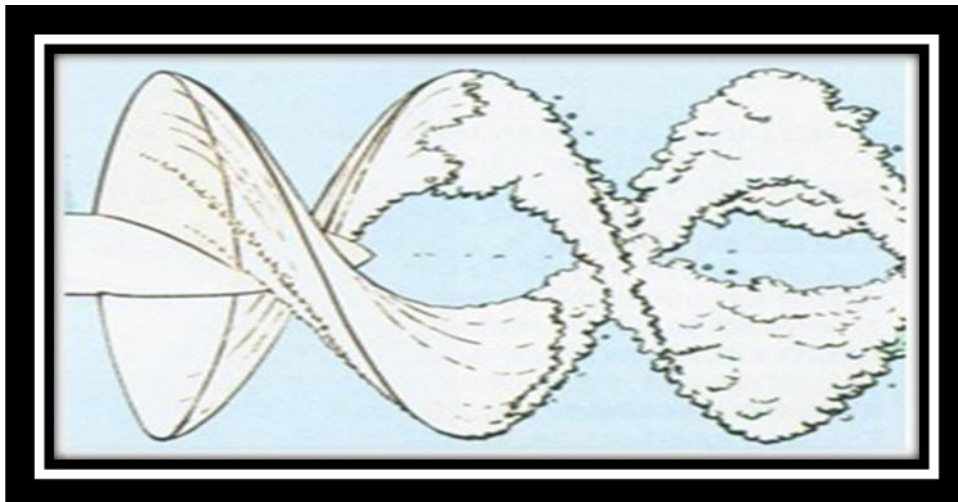
Άρα σε μία αρκετά μεγάλη αύξηση της ταχύτητας η πίεση μπορεί να γίνει τόσο μικρή ώστε το σημείο βρασμού να πέσει στην θερμοκρασία του θαλασσινού νερού. Πράγμα που σημαίνει ότι κατά το φαινόμενο αυτό τα πτερύγια της προπέλας εργάζονται εντός ενός αφρώδους μίγματος με μικρότερη πυκνότητα με αποτέλεσμα την αύξηση της ολίσθησης και την μείωση της απόδοσης.



Εικόνα 16 : ένδειξη σπηλαιώσης

### **4.1.1 Β) Ορισμός της σπηλαίωσης**

Το φαινόμενο της σπηλαίωσης αναπτύσσεται όταν σε μια περιοχή η στατική πίεση τείνει τοπικά να γίνει μικρότερη από την πίεση ατμοποίησης του υγρού, οπότε αυτό ατμοποιείται και αναπτύσσεται ένας θύλακας ατμοποιημένου υγρού(ατμού).

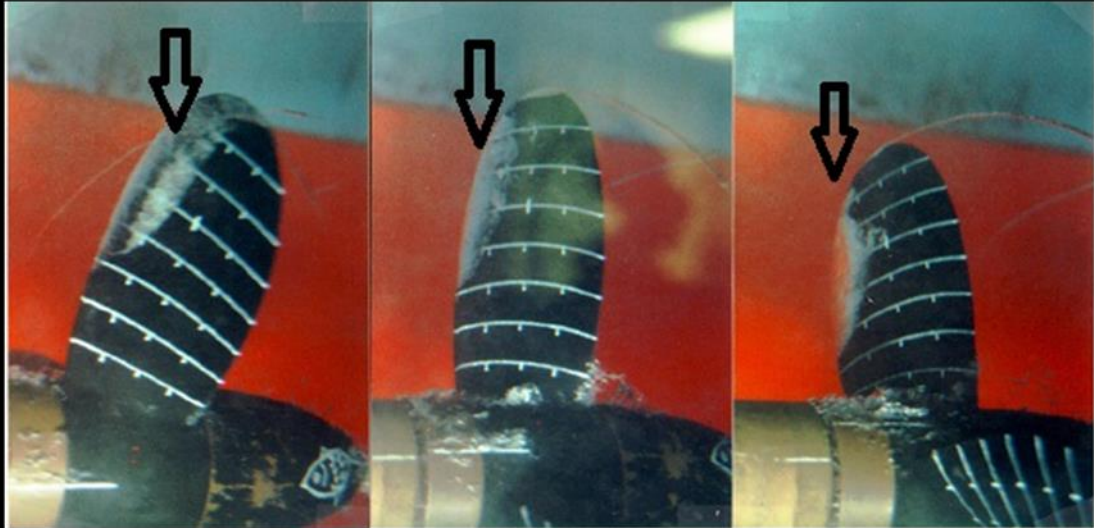


**Εικόνα 17:** Σχηματική παράσταση του φαινομένου της σπηλαίωσης.

### **4.1.1 Γ) Εξήγηση φαινομένου από το Θεώρημα του Bernoulli**

Όταν η πίεση σε ένα σημείο του πτερυγίου, 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 πτερυγίου και εισέρχονται σε πεδίο υψηλότερης πίεσης όπου συμπιέζονται και συμπυκνώνονται απότομα με αποτέλεσμα να εξασκούνται στην επιφάνεια του πτερυγίου 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 18 :** Σημεία εμφάνισης σπηλαιώσης

## **4.2 Είδη σπηλαιώσης**

Η σπηλαιώση μπορεί να είναι διαφόρων τύπων. Οι διάφοροι τύποι σπηλαιώσης διαφέρουν μεταξύ τους λόγω της προέλευσης των φυσαλίδων που την προκαλούν ή ακόμα και λόγω των μηχανισμών που λαμβάνουν μέρος και την προκαλούν. Οι φυσαλίδες που περιέχονται μέσα σε ένα υγρό είναι δύο τύπων: φυσαλίδες ατμού ή φυσαλίδες αερίου.

### **4.2.1 Σπηλαιώση λόγω φυσαλίδων ατμού (vaporous cavitation)**

Οι φυσαλίδες ατμού σχηματίζονται λόγω της εξάτμισης ενός υγρού. Η συνθήκη σπηλαιώσης που προκαλείται από το σχηματισμό και την κατάρρευση των φυσαλίδων ατμού, αναφέρεται συνήθως ως σπηλαιώση λόγω φυσαλίδων ατμού. Η σπηλαιώση λόγω φυσαλίδων ατμού αναπτύσσεται όταν σε μια περιοχή της ροής, η τοπική στατική πίεση γίνει μικρότερη από την πίεση ατμοποίησης του υγρού. Στη συνέχεια, οι φυσαλίδες ατμού παρασύρονται σε περιοχή που επικρατεί μεγάλη στατική πίεση, λόγω της φυγόκεντρης δύναμης. Στην περιοχή αυτή η μάζα του ατμού επανυγροποιείται. 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.

#### **4.2.2 Σπηλαιώση λόγω φυσαλίδων αερίου (gaseous cavitation)**

Οι φυσαλίδες αερίου σχηματίζονται λόγω της παρουσίας διαλυμένων αερίων (γενικά αέρα αλλά μπορεί να είναι οποιοδήποτε αέριο στο σύστημα) στο υγρό. Η συνθήκη σπηλαιώσης που προκαλείται από το σχηματισμό και την κατάρρευση των φυσαλίδων αερίου αναφέρεται συνήθως ως σπηλαιώση λόγω φυσαλίδων αερίου. Η σπηλαιώση λόγω φυσαλίδων αερίου εμφανίζεται όταν κάποιο αέριο (συνηθέστερα ο αέρας) εισάγεται μαζί με το υγρό (κυρίως για αντλίες). Αυτό το είδος της σπηλαιώσης σπάνια προκαλεί ζημιά. 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.

#### **4.3 Δημιουργία σπηλαιώσης**

Οι φυσαλίδες σχηματίζονται στις περιοχές ενός ρέοντος υγρού, όπου η τοπική πίεση είναι μικρότερη από την πίεση ατμοποίησης του υγρού. Σχηματίζονται και καταρρέουν σε σύντομο χρονικό διάστημα, μετρούμενο σε μικροδευτερόλεπτα. Ο κύκλος ζωής μιας φυσαλίδας ατμού αποτελείται από τη δημιουργία της, την αύξηση του μεγέθους της και τέλος την κατάρρευσή της.

Αναλυτικότερα τα στάδια της σπηλαιώσης είναι:

##### ***Στάδιο 1: Δημιουργία της φυσαλίδας στο εσωτερικό του υγρού***

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

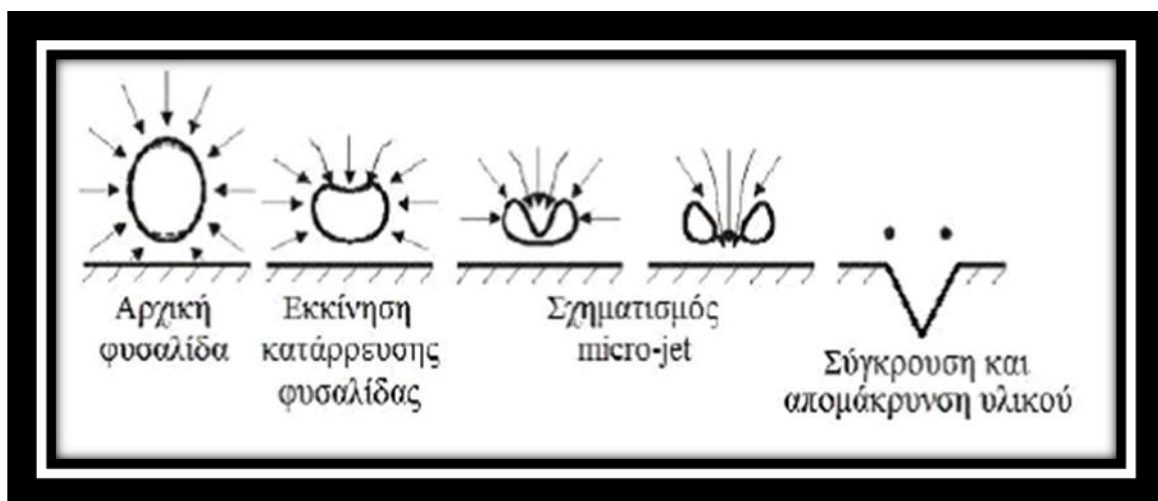
##### ***Στάδιο 2: Αύξηση του μεγέθους της φυσαλίδας***

Στη συνέχεια οι φυσαλίδες αρχίζουν να αυξάνονται σε μέγεθος και παρασέρνονται από το υγρό καθώς αυτό ρέει προς την έξοδό του κατά μήκος των πτερυγίων μέχρι το χείλος εκφυγής.

### Στάδιο 3: Κατάρρευση της φυσαλίδας

Λόγω της περιστροφής της έλικας, οι φυσαλίδες αποκτούν πολύ υψηλές ταχύτητες. Καθώς οι φυσαλίδες ατμού κινούνται κατά μήκος των πτερυγίων της έλικας, η πίεση γύρω από τη φυσαλίδα αρχίζει να αυξάνεται έως ότου επιτυγχάνεται ένα σημείο όπου η πίεση έξω από τη φυσαλίδα είναι μεγαλύτερη από την πίεση μέσα στη φυσαλίδα. 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 τη φάση του ατμού στην υγρή φάση δεν γίνεται στιγμιαία και γι' αυτό παρατηρείται μια μεταβατική περιοχή στην οποία συνυπάρχουν και οι δύο φάσεις. Η διαδικασία της κατάρρευσης δεν είναι έκρηξη προς τα έξω αλλά κατάρρευση-έκρηξη προς το εσωτερικό της φυσαλίδας. Λόγω ακριβώς της μεγάλης διαφοράς στην πυκνότητα μεταξύ της υγρής φάσης και της φάσης του ατμού, το φαινόμενο της επανυγροποίησης συνοδεύεται τοπικά από σημαντική αύξηση της στατικής πίεσης κρουστικής μορφής. Η αύξηση αυτή εξηγείται ποιοτικά από το ότι κατά την επανυγροποίηση μιας φυσαλίδας ατμού, ο όγκος υγρού που αντιστοιχεί στη μάζα του ατμού είναι πολύ μικρός.

Επομένως με την επανυγροποίηση της φυσαλίδας σχηματίζεται ένα κενό που τείνει να καταληφθεί με ορμή από το περιβάλλον 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 σαν σφυρηλάτηση, όπως φαίνεται στο σχήμα. 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 μεγάλη τοπική αύξηση της στατικής πίεσης. (Lush,1987)



Εικόνα 19 : Στάδια κατάρρευσης φυσαλίδα.



#### **4.4 Ανάλυση του φαινομένου της σπηλαιώσης**

Με τον όρο σπηλαιώση (cavitations) χαρακτηρίζεται το φαινόμενο στο οποίο κοντά στα πτερύγια της προπέλας σχηματίζονται μέσα στο νερό κενοί χώροι, οι οποίοι με αυτόν τον τρόπο διακόπτουν την συνέχεια της ροής του νερού προς την προπέλα. Τα πτερύγια δηλαδή της έλικας δεν εργάζονται τότε σε μία συμπαγή μάζα νερού, αλλά μέσα σε ένα μίγμα μάλλον αφρώδες και με μικρότερη επομένως πυκνότητα, με αποτέλεσμα την αύξηση της ολίσθησης και την μείωση της απόδοσης. Ένα επιπλέον αποτέλεσμα της σπηλαιώσης αυτής είναι η βαθιά τοπική διάβρωση του μετάλλου των πτερυγίων. Ο σχηματισμός των κενών χώρων, δηλαδή η σπηλαιώση οφείλεται, σύμφωνα με τις θεωρητικές και πειραματικές έρευνες που έχουν γίνει, στο ότι σε ορισμένα σημεία των πτερυγίων και σε ορισμένη ταχύτητα περιστροφής τους, η αύξηση της ταχύτητας των μορίων του νερού είναι τέτοια, ώστε η αντίστοιχη απόλυτη πίεση τους, δηλαδή η περιλαμβανόμενα εκτός της ατμοσφαιρικής πίεσης και της υδροστατικής πίεσης της υπερκείμενης στήλης του νερού, να μειώνεται μέχρι το μηδέν, δηλαδή να αγγίζει το τέλειο κενό. Σε αυτήν την απόλυτη πίεση το νερό, ως γνωστό εξατμίζεται και δημιουργείται ο κενός χώρος και η διακοπή της συνέχειας της ροής του υδάτινου ρεύματος, η οποία συνεχίζεται και όταν εξακολουθούν να υπάρχουν αυτές οι συνθήκες ταχύτητας και πίεσης. Με άλλα λόγια, το νερό παύει εν μέρει να βρίσκεται σε επαφή με το ταχέως περιστρεφόμενο πτερύγιο. Η σπηλαιώση επομένως 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 σπηλαιώση. Ο



**Εικόνα 20 :** Φαινόμενο σπηλαιώσης

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 σπηλαιώσης.

## 4.5 Εμφάνιση φαινομένου σπηλαιώσης

Η εμφάνιση του φαινομένου της σπηλαιώσης εξαρτάται από τον «αριθμό σπηλαιώσης» του υγρού  $\sigma$ .

- $\sigma = (p_0 - p_e) / (\frac{1}{2} \rho \cdot V^2)$
- $\sigma_\chi = (p_\chi - p_0) / (\frac{1}{2} \rho \cdot V^2)$
- $\sigma_\chi < \sigma$
  
- $p_0$  = ατμοσφαιρική πίεση
- $P_e$  = πίεση «ατμοποίησης» του νερού (εξαρτώμενη από θερμοκρασία, περιεκτικότητα άλατος και αέρα)
- $p_\chi$  = πίεση στο σημείο  $\chi$  του πτερυγίου. (συνήθως στο 0,7r)

Το φαινόμενο της σπηλαιώσης εμφανίζεται κυρίως :

- όταν η έλικα έχει μεγάλη περιφερειακή ταχύτητα
- όταν η έλικα είναι υπερφορτωμένη (μεγάλη γωνία ως προς την ροή )
- όταν το προφίλ του πτερυγίου δεν είναι το πρόβον.

Άρα θα πρέπει να γίνεται προσεκτική επιλογή έλικας έτσι ώστε να μην εμφανίζεται το φαινόμενο της σπηλαιώσης.

Η επαλήθευση αυτού πρέπει να γίνει άμεσα γιατί σε αντίθετη περίπτωση αρκεί ένας μικρός χρόνος λειτουργίας για να προκαλέσει ανεπανόρθωτες βλάβες.

Εμφανίζεται επίσης:

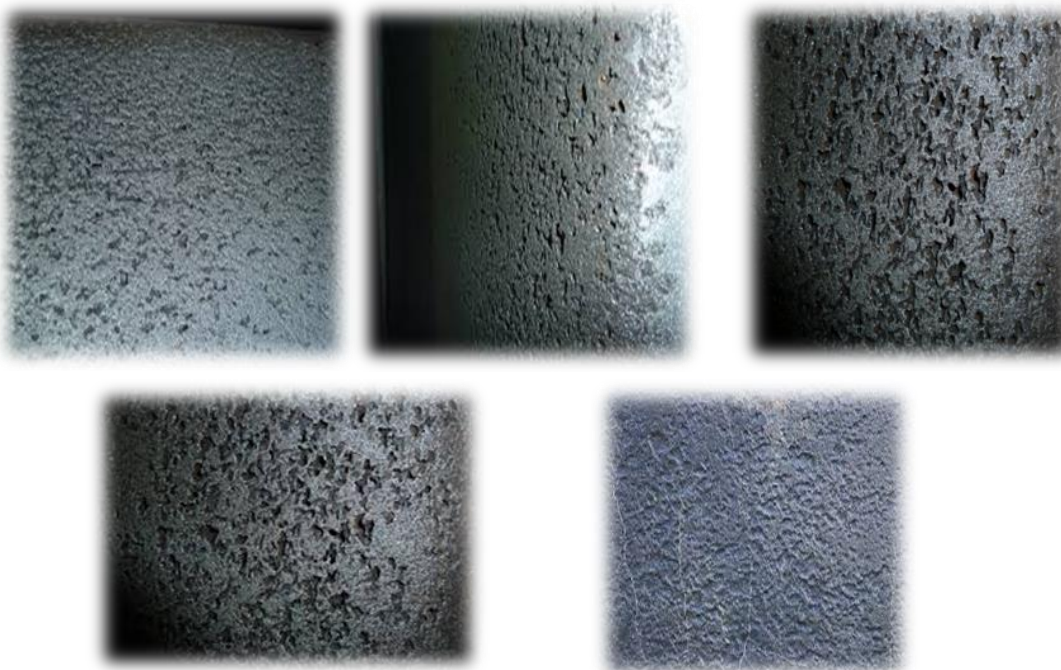
- όταν λειτουργήσει για μεγάλο χρονικό διάστημα υπερφορτωμένη (αυξημένη αντίσταση λόγω ρύπανσης της γάστρας , αντίθετο άνεμο , κυματισμό)
- όταν δεν λειτουργεί εξολοκλήρου βυθισμένη
- όταν έχει διαβρωθεί η επιφάνεια των πτερυγίων κυρίως λόγω μακράς παραμονής στο λιμάνι.
- όταν λειτουργεί σε ζεστά νερά .

Η εμφάνιση του φαινομένου της σπηλαιώσης, εκτός της διάβρωσης της επιφάνειας των πτερυγίων, προκαλεί θορύβους, κραδασμούς καθώς και σπάσιμο πτερυγίων. Εμφάνιση φυσαλίδων

έχουμε επίσης και σε απότομη αναπόδιση ή αύξηση στροφών χωρίς όμως να εμφανίζονται φαινόμενα σπηλαιώσης στα πτερύγια. Έχουμε όμως μεγάλη πτώση του βαθμού απόδοσης. Η σπηλαιώση προκαλεί την αποτυχία –κατάπτωση -αστοχία των υλικών λόγω διάτρησης καθώς και μικρό ποσοστό απώλειας βάρους. Είναι δύσκολο να εντοπιστεί διότι έχει μικρό μέγεθος και επειδή συχνά καλύπτεται από διαβρωτικά παράγωγα. Επίσης είναι δύσκολο να μετρήσουμε ποσοτικά και να συγκρίνουμε το εύρος της σπηλαιώσης λόγω των διαφορετικών βαθών και τον αριθμό κοιλωμάτων. Είναι επίσης δύσκολο να προβλεφθεί από την πραγματοποίηση εργαστηριακών πειραμάτων. Μερικές φορές οι σπηλαιώδεις απαιτούν αρκετό χρονικό διάστημα ώστε να εμφανιστούν και να μπορούν να επισκευαστούν.

Η σπηλαιώση παρουσιάζεται κυρίως στα άκρα των πτερυγίων λόγω της περιφερειακής ταχύτητας εξαιτίας της μεγαλύτερης ακτίνας που απέχουν. Επίσης εμφάνιση του φαινομένου γίνεται και στην επιφάνεια ώσεως (πρυμναία) καθώς και στη πρωραία επιφάνεια.

Η παρουσίαση σπηλαιώσης στην επιφάνεια ώσεως δηλαδή προς το μέρος της ακμής εξόδου επιδρά αρνητικά μεν αλλά σε μικρό ποσοστό δε στο θέμα βαθμού αποδόσεως αλλά προκαλεί σημαντική μηχανική διάβρωση. Όσο αναφορά για την παρουσίαση σπηλαιώσης στην επιφάνεια αναρροφήσεως δηλαδή προς το μήκος της ακμής εισόδου η επίδραση στο βαθμό απόδοσης γίνεται αισθητή και παρατηρείται σοβαρή διάβρωση.



**Εικόνες 21-25 :**Επιφάνειες που έχουν υποστεί σπηλαιώση.

Η καταστροφή μιας προπέλας γίνεται με την κατ'εξακολούθηση εμφάνιση της σπηλαιώσης και συνεχή απομάκρυνση μετάλλου από τα πτερύγια της προπέλας. Η λεία επιφάνεια της προπέλας είναι επιθυμητή γιατί καθυστερεί την εμφάνιση σπηλαιώσης αλλά δεν είναι εφικτή για μεγάλο χρονικό διάστημα.

## 4.6 Αποτελέσματα της σπηλαιώσης-ταχύτητα εμφάνισης της και χαρακτηριστικά της εμφάνισης του φαινομένου

### 4.6.1 Ταχύτητα εμφάνισης και αποτέλεσμα της σπηλαιώσης

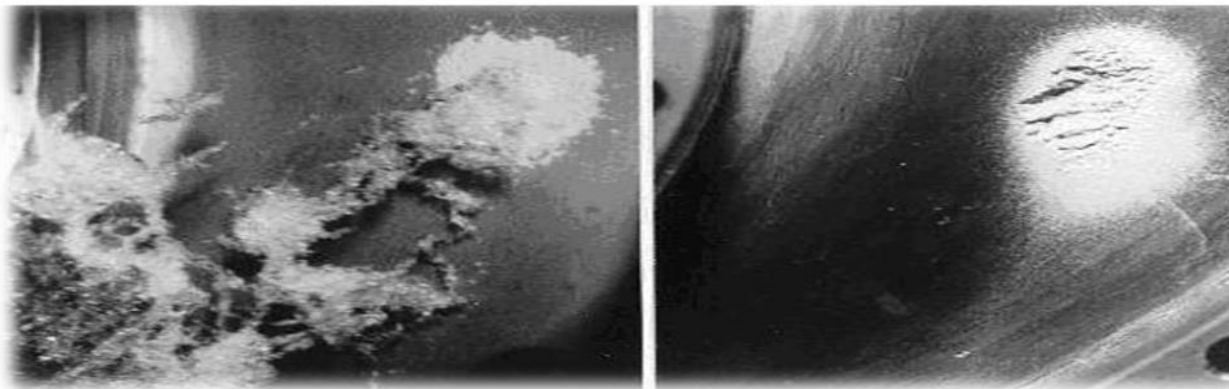
Η σπηλαιώση συνήθως απαιτεί μεγάλο χρονικό διάστημα για την δημιουργία της μέχρι να μπορούμε να την διακρίνουμε ορατά. Η περίοδος αυτή μπορεί να κυμαίνεται από μήνες μέχρι χρόνια ανάλογα από το είδος μετάλλου και το διαβρωτικό υλικό.

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 .



**Εικόνα 26 :** Επιφάνεια αρχικού σταδίου εμφάνισης σπηλαιώσης.

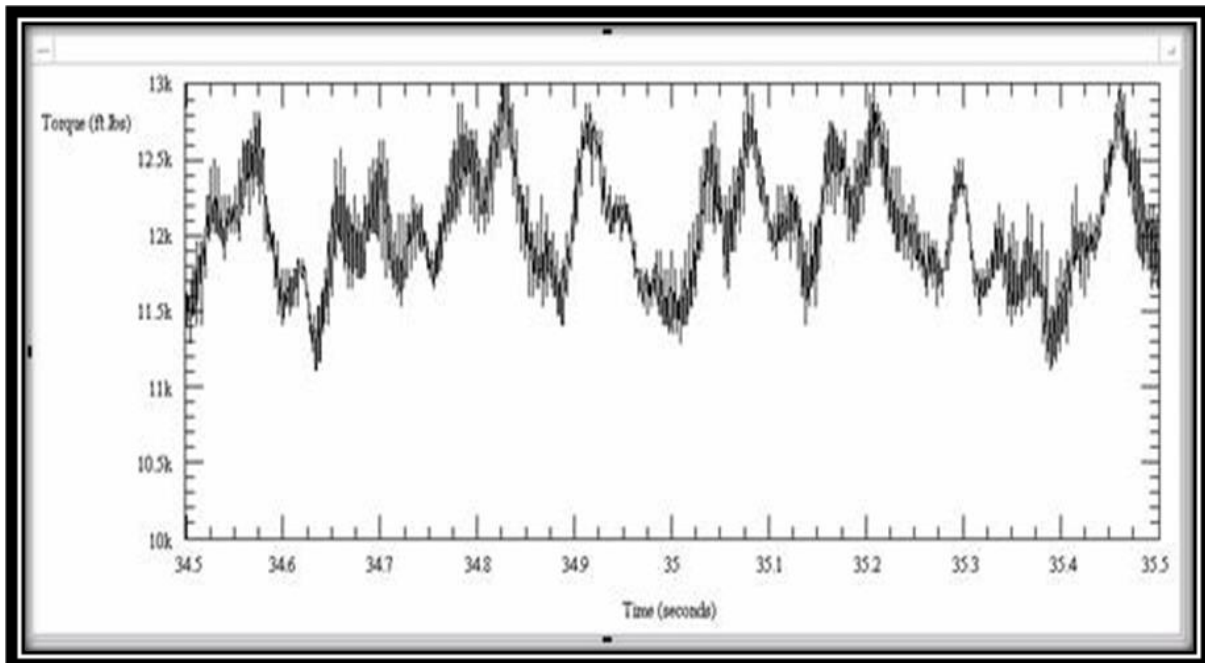
## 4.6.2 Χαρακτηριστικά εμφάνισης φαινομένου

### 4.6.2 Α) Θόρυβοι

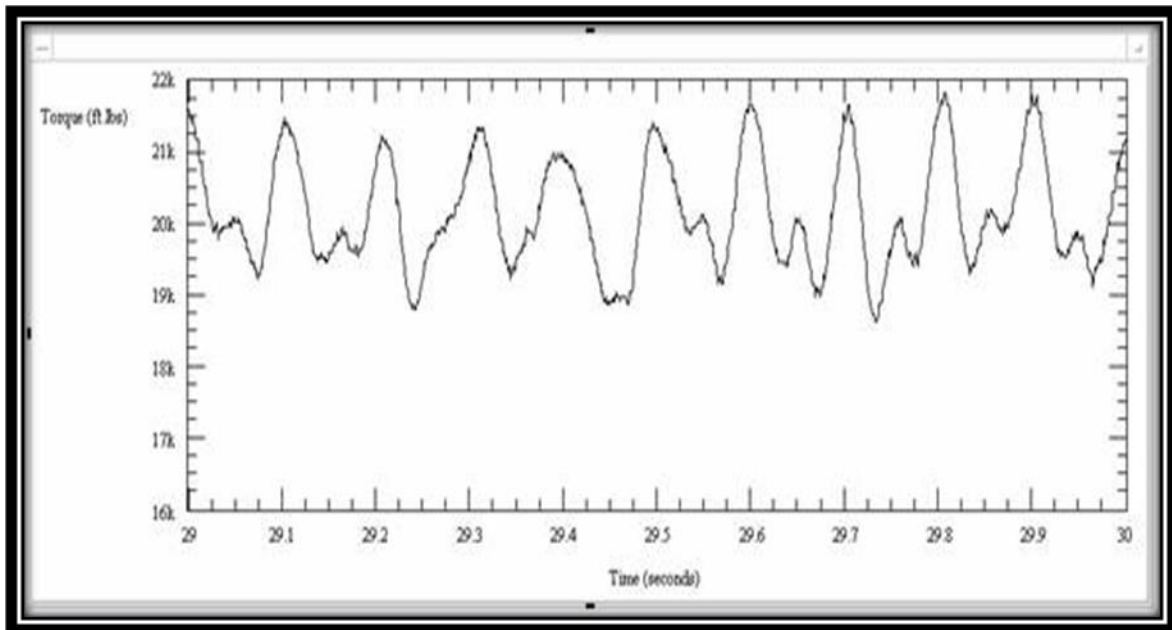
1. Κτύποι μικρής εμβέλειας οφείλονται στην επί μέρους δημιουργία στροβιλισμών λόγω των μεταβολών πίεσης και ταχύτητας ροής στην έλικα έχοντας υπόψη και την θερμοκρασία νερού.
2. Συριγμοί , σε υψηλές στροφές , οφείλονται σε συντονισμό των πτερυγίων λόγω αρχομένης σπηλαίωσης στην ακμή εισόδου η στροβιλισμών στην ακμή εξόδου καθώς και στον συντονισμό εξαρτημάτων του άξονα.
3. Έντονοι κτύποι που οφείλονται στην εμφάνιση σπηλαίωσης οφείλονται στην διαμόρφωση του πρυμναίου τμήματος .

### 4.6.2 Β) Τραγούδισμα

Τα πτερύγια της προπέλας μπορεί να εκπέμπουν έναν υψηλής συχνότητας ήχο, πριν την έναρξη του φαινομένου της σπηλαίωσης, 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 27:** High Frequency Vibration Present (250 to 300 Hz) – Noise from Propeller Singing (υψηλής συχνότητας δόνηση - θόρυβος από προπέλα)



**Εικόνα 28 :** No High Frequency Vibration– No Noise (χαμηλή συχνότητα δόνησης-χωρίς θόρυβο προπέλας).

## Κεφάλαιο 5

### Επιθεώρηση – προστασία έλικας (μέτρα αποφυγής φαινομένου)

#### 5.1 Γενικά υλικά κατασκευής προπέλας

Οι περισσότερες προπέλες κατασκευάζονται από κάποιο κράμα χαλκού. Υπάρχουν τρία είδη κραμάτων :

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

Αυτά τα κράματα είναι εύκολο να χυθούν και να επεξεργαστούν . Μπορούν να χυθούν σε λεπτές στρώσεις έτσι ώστε με σωστή λείανση να έχουμε το πιο επιθυμητό αποτέλεσμα. Επίσης τα υλικά αυτά είναι πιο εύκολα στην επισκευή τους .

Ο πολύ ελαστικός μπρούτζος (αυτός που περιέχει νικέλιο ) είναι φθηνότερος μεν αλλά η αντοχή του, το όριο ελαστικότητας, η σκληρότητα και το όριο κόπωσης είναι μειωμένα γεγονός που οδηγεί στην κατασκευή παχύτερου πτερυγίου ή πιο σκληρού μπρούτζου (αυτός που περιέχει μαγγάνιο). Ο ανοξειδωτος χάλυβας απ'την άλλη πλευρά είναι δύσκολο να χυθεί σε μεγάλα καλούπια και γι αυτό η χρήση του γίνεται σε μικρές προπέλες.

Ο μπρούτζος έχει υψηλότερο όριο κόπωσης από τον ανοξειδωτο χάλυβα εξαιτίας της μεγαλύτερης σκληρότητας του χάλυβα. Η αντίσταση στην διάβρωση σπηλαίωσης δεν διαφέρει και πολύ ανάμεσα τους διότι ο χάλυβας έχει υψηλή σκληρότητα στην επιφάνεια του ενώ ο χαλκός είναι πιο ανθεκτικός στην μηχανική διάβρωση.



## 5.2 Επιθεώρηση έλικας και αντιμετώπιση βλαβών

Η επιθεώρηση έλικας κατά τον δεξαμενισμό είναι σημαντικό να παρέχει λεπτομερείς πληροφορίες για το είδος και τη θέση της διάβρωσης καθώς και την έκταση αυτής. Επομένως θα πρέπει να αναγράφεται :

- Η ακτινική θέση της διάβρωσης
- Η θέση της σύμφωνα με την διεύθυνση της χορδής.
- Η θέση της ζημιάς
- Η έκταση της διαβρωμένης περιοχής
- Το χρώμα και η υφή της διάβρωσης
- Το μέγιστο βαθμό ζημιάς.
- Ύπαρξη διάβρωσης σε όλα τα πτερύγια ; Παρόμοια διαμόρφωση σε όλα ;
- Ύπαρξη χτυπημάτων – βαθουλωμάτων στην ακμή εισόδου ;
- Ανωμαλίες επιφανείας πτερυγίου ;
- Μη καθαρές επιφάνειες πτερυγίων;
- Ύπαρξη ρωγμών ή φαγωμάτων στη περιοχή των πτερυγίων ;

Αντιμετώπιση βλαβών:

- Μη καθαρές επιφάνειες πτερυγίων (διαβρωμένες ή με επικαθίσεις) πρέπει οπωσδήποτε να καθαρίζονται.
- Φαγώματα μέχρι 1 χιλιοστό διορθώνονται με επί τόπου τρόχισμα και γυάλισμα.
- Επιφάνειες που εμφανίζουν διάβρωση λόγω σπηλαιώσης πρέπει να αφαιρούνται και να γεμίζονται (συνιστάται αυτό να γίνεται από τον κατασκευαστή λόγω καλύτερης γνώσης των κραμάτων αλλά και πιθανής απαίτησης επεξεργασιών χαλάρωσης του υλικού).
- Μικρές ρωγμές ή παραμορφώσεις των ακμών των πτερυγίων οδηγούν πάντα σε εμφάνιση σπηλαιώσης και πρέπει να επιδιορθώνονται.
- Και οι μικρότερες ρωγμές μπορούν, λόγω της εμφάνισης κορυφών τάσης, να προκαλέσουν στο πτερύγιο σπασίματα.
- Οι επιδιορθώσεις στην περιοχή μέχρι 0,6R συνιστάται να γίνονται από τον κατασκευαστή.
- Μία πρόσκαιρη αντιμετώπιση είναι το άνοιγμα οπών διαμέτρου 10-12 mm στις αρχές των ρωγμών. Οι οπές πρέπει να κλίνονται με ξύλο ώστε να αποφευχθεί η εξίσωση της

πίεσης μεταξύ των επιφανειών πίεσης και ρόφησης κάτι που οδηγεί στην εμφάνιση φαινομένων σπηλαίωσης.

- Χυτές έλικες (ειδικός ορείχαλκος) εμφανίζουν (ανεξαρτήτως χρήσης) γήρανση μετά από 10 – 12 χρόνια και παρουσιάζουν ρωγμές που αν συγκολληθούν προκαλούν νέες.
- Η εμφάνιση παραμορφώσεων στις άκρες των πτερυγίων (συνήθως αποτέλεσμα κτυπημάτων) προκαλεί μείωση του βαθμού απόδοσης της έλικας αλλά και εμφάνιση σπηλαίωσης και ως εκ τούτου πρέπει να αντιμετωπίζονται αμέσως. Επειδή αυτές οι παραμορφώσεις συνδέονται συχνά με μεταβολή του βήματος του πτερυγίου ενδείκνυται η αφαίρεση και ο λεπτομερής έλεγχος της έλικας.
- Κατά την επιδιόρθωση απαγορεύεται η χρήση σφυριών και επιβάλλεται η αργή και ομοιόμορφη θέρμανση του υλικού καθώς και αργή ψύξη του μετά την επεξεργασία.
- Σε περίπτωση αποκοπής τμήματος του πτερυγίου (συνήθως αποτέλεσμα ρωγμών που δεν έχουν γίνει αντιληπτές) ενδείκνυται η αφαίρεση (με βοήθεια ενός πατρών) ίδιου τμήματος από το απέναντι πτερύγιο.
- Κατά την εξάρμωση ή συναρμολόγηση της έλικας επιβάλλεται η προστασία των ακμών των πτερυγίων.
- Τυχόν συγκολλήσεις (μη επιτρεπτές) κοντά στη ρίζα οδηγούν σε εμφάνιση ρωγμών και ουσιαστικά στην απώλεια της έλικας.
- Μεγάλη και οικονομική βοήθεια σε επιδιόρθωση έλικας (κυρίως φαγώματα λόγω σπηλαίωσης) δίνουν οι συνθετικές ρητίνες.

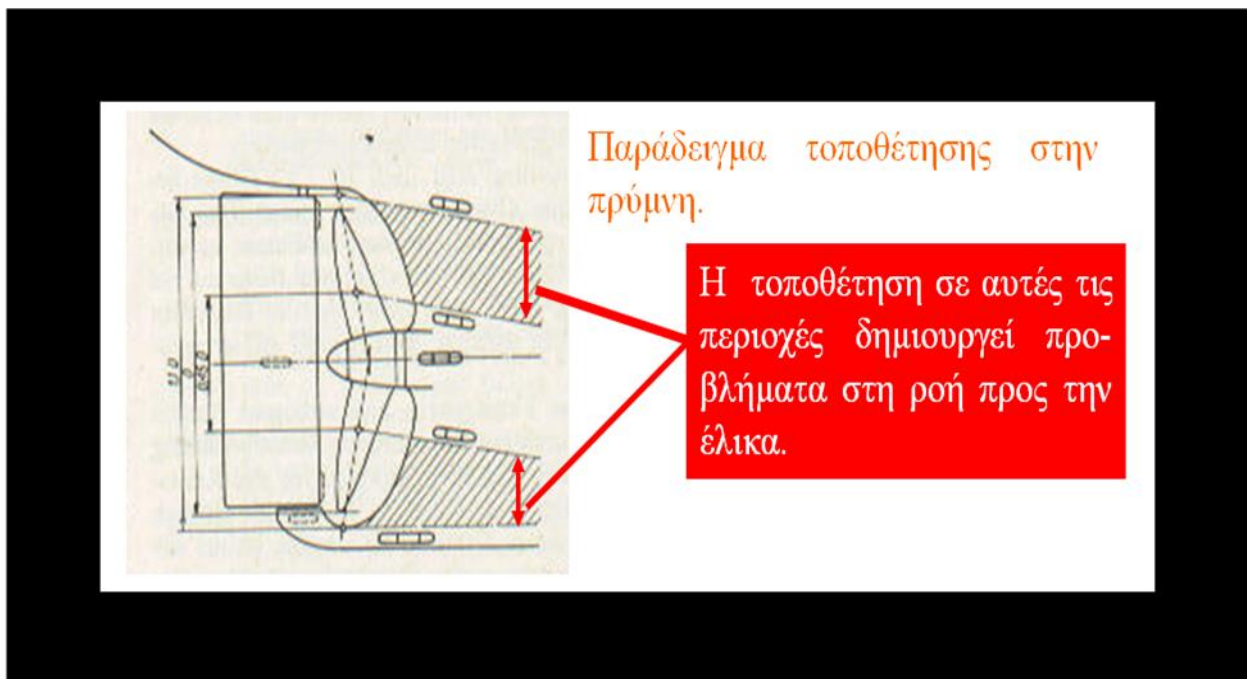


Εικόνα 29 : Επιθεώρηση έλικας πλοίου

### 5.3 Διάβρωση και προστασία

Η έλικα, όπως και το πλοίο, πρέπει να προστατεύεται από την διάβρωση. Στην έλικα ακόμα και η ελάχιστη διάβρωση προκαλεί φαινόμενα σπηλαίωσης 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.



**Εικόνα 30 :** Παράδειγμα τοποθέτησης ανόδων ψευδαργύρου.

## **5.4 Άλλοι μέθοδοι αποφυγής σπηλαιώσης**

Κάποιες από τις μεθόδους μείωσης του φαινομένου της σπηλαιώσης ή τουλάχιστον της μείωσης της εξάπλωσης του είναι :

- 1) Ανύψωση της ακμής εισόδου το πτερυγίου (τροποποίηση)
- 2) Ελάττωση της γωνίας βήματος προς την άκρη του πτερυγίου (μπορεί όμως να έχει αρνητική επίδραση στην απόδοση)
- 3) Χρήση πολύ λοξού πτερυγίου (η ακμή εισόδου εισέρχεται στα απόνερα σταδιακά καθώς διαφεύγει και η ακμή εξόδου.
- 4) Σωστή χρήση στροφών ανάλογα με την διάσταση της έλικας. (η περιφερειακή ταχύτητα στο άκρο των πτερυγίων δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 60 μέτρα ανα sec )
- 5) Χρήση ανθεκτικών στη διάβρωση κραμάτων όπως ορείχαλκος μαγγανίου.
- 6) Χρήση μεταλλικών επικαλύψεων (πχ. Ψευδάργυρος , χαλκός , χρώμιο , χρυσό ) μέσω ψεκασμού ή εμβάπτισης του κομματιού.

## Επίλογος – Συμπεράσματα

Ένα από τα πιο σοβαρά προβλήματα που απασχολούν μόνιμα τους κατασκευαστές των ελίκων αλλά και τους τεχνικούς που θα μας υποδείξουν ποια έλικα είναι η πιο κατάλληλη για το σκάφος μας, είναι η σπηλαιώση (cavitation). Και αυτό επειδή έχει σοβαρές αρνητικές συνέπειες στη λειτουργία της έλικας και την απόδοση, καθώς και στην ομαλή λειτουργία της μηχανής και του πλοίου. 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.

Αν θέλουμε λοιπόν 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.

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.

## Βιβλιογραφία

1. <http://archive.in.gr/Reviews/imagegallery.asp?lngReviewID=12770&lngChapterID=13419&lngItemID=107651>
2. [http://www.anexigita.com/2012/01/blog-post\\_3815.html](http://www.anexigita.com/2012/01/blog-post_3815.html)
3. [http://www.tsourosmarine.gr/products\\_gr.asp?prodid=2336](http://www.tsourosmarine.gr/products_gr.asp?prodid=2336)
4. <http://www.ortsa.gr/τα-σκάφη-και-τα-μυστικά-τους/οι-προπέλες-και-τα-μυστικά-τους/>
5. <http://www.ribandsea.com/boats/technical/114-2009-05-18-16-15-50.html>
6. <http://jkon.aeromodelling.gr/ninter-106b.htm>
7. <http://www.ortsa.gr/μηχανές-θαλάσσης/το-πρόβλημα-της-σπηλαίωσης/>
8. <http://el.wikipedia.org/wiki/Σπηλαίωση>
9. [https://www.google.gr/search?q=cavitation&client=opera&hs=Tki&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ei=8Z6UU463MornygPc6oDwAQ&sqi=2&ved=0CAYQ\\_AUoAQ&biw=1366&bih=660#q=propeller+cavitation+damage&tbn=isch](https://www.google.gr/search?q=cavitation&client=opera&hs=Tki&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ei=8Z6UU463MornygPc6oDwAQ&sqi=2&ved=0CAYQ_AUoAQ&biw=1366&bih=660#q=propeller+cavitation+damage&tbn=isch)
10. [https://www.google.gr/search?q=cavitation&client=opera&hs=Tki&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ei=8Z6UU463MornygPc6oDwAQ&sqi=2&ved=0CAYQ\\_AUoAQ&biw=1366&bih=660#q=propeller+cavitation&tbn=isch](https://www.google.gr/search?q=cavitation&client=opera&hs=Tki&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ei=8Z6UU463MornygPc6oDwAQ&sqi=2&ved=0CAYQ_AUoAQ&biw=1366&bih=660#q=propeller+cavitation&tbn=isch)
11. [https://www.google.gr/search?q=cavitation&client=opera&hs=Tki&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ei=8Z6UU463MornygPc6oDwAQ&sqi=2&ved=0CAYQ\\_AUoAQ&biw=1366&bih=660#q=ship+propeller&tbn=isch](https://www.google.gr/search?q=cavitation&client=opera&hs=Tki&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ei=8Z6UU463MornygPc6oDwAQ&sqi=2&ved=0CAYQ_AUoAQ&biw=1366&bih=660#q=ship+propeller&tbn=isch)
12. PDF <<Cavitation>> - (Μεταπτυχιακή εργασία Σέμψης Λάμπρος - ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ)
13. PDF <<Βασικές αρχές πρόωσης πλοίου>> - (Εργαστήριο Ναυτικής Μηχανολογίας - ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ)
14. Power Point <<Πρόωση>> (Γ. Γκοτζαμάνης –Ναυπηγός Μηχανολόγος Μηχανικός)

## Περιεχόμενα

<b>Περίληψη</b> .....	3
<b>Abstract</b> .....	4
<b>Πρόλογος</b> .....	5
<b>Κεφάλαιο 1 : Δημιουργία φουσαλίδων</b> .....	6
1.1 Η δημιουργία των μικροφουσαλίδων .....	6
<b>Κεφάλαιο 2: Προπέλα (ιστορικό – περιγραφή – ορισμοί)</b> .....	7
2.1 Ιστορικό της προπέλας .....	7
2.2 Τα βασικά χαρακτηριστικά - μέρη των προπελών μέρη (περιγραφή-ορισμοί) .....	10
<b>Κεφάλαιο 3: Έργο και αλληλεπίδραση της έλικας σε σχέση με το πλοίο</b> .....	17
3.1 Έργο της προπέλας.....	17
3.2 Αλληλεπίδραση μεταξύ πλοίου και προπέλας.....	19
<b>Κεφάλαιο 4 : Σπηλαίωση (φαινόμενο-είδη-ανάλυση-εμφάνιση)</b> .....	20
4.1 Το φαινόμενο σπηλαίωσης (Ορισμός και είδη σπηλαίωσης).....	20
4.2 Είδη σπηλαίωσης.....	22
4.3 Δημιουργία σπηλαίωσης .....	23
4.4 Ανάλυση του φαινομένου της σπηλαίωσης.....	25
4.5 Εμφάνιση φαινομένου σπηλαίωσης.....	26
4.6 Αποτελέσματα της σπηλαίωσης-ταχύτητα εμφάνισης της και χαρακτηριστικά της εμφάνισης του φαινομένου .....	29
<b>Κεφάλαιο 5 :Επιθεώρηση – προστασία έλικας (μέτρα αποφυγής φαινομένου)</b> .....	32
5.1 Γενικά υλικά κατασκευής προπέλας.....	32
5.2 Επιθεώρηση έλικας και αντιμετώπιση βλαβών.....	33
5.3 Διάβρωση και προστασία.....	36



5.4 Άλλοι μέθοδοι αποφυγής σπηλαίωσης.....	37
<b>Επίλογος - Συμπεράσματα.....</b>	<b>38</b>
<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>39</b>