



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΣΚΕΥΩΝ  
ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ  
ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΡΩΣΗΣ**

**ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ Ε. ΘΥΜΑΡΑΣ**



**Επιβλέπων:**  
**ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Θ. ΧΟΥΝΤΑΛΑΣ**  
**Καθηγητής Ε.Μ.Π.**

**Αθήνα Φεβρουάριος 2016**



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΣΚΕΥΩΝ  
ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ  
ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΡΩΣΗΣ

ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ Ε. ΘΥΜΑΡΑΣ



Επιβλέπων:  
ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Θ. ΧΟΥΝΤΑΛΑΣ  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα Φεβρουάριος 2016

*Υπογραφή*

.....

Θυμαράς Ε. Αθανάσιος

Διπλωματούχος Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Copyright © Αθανάσιος Ε. Θυμαράς, 2016 - All rights reserved

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας διπλωματικής εργασίας, εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, για εκπαιδευτική ή ερευνητική φύση, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις, τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα που περιέχονται στην παρούσα εργασία εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

# ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έγινε με σκοπό την διερεύνηση και αξιολόγηση των συσκευών εξοικονόμησης ενέργειας (Energy Saving Devices) που σχετίζονται με το σύστημα πρόωσης και ειδικότερα με την έλικα του πλοίου. Ο στόχος της χρήσης των συσκευών αυτών είναι η εξοικονόμηση καυσίμου και η μείωση των απωλειών ισχύος του πλοίου. Αυτό επιτυγχάνεται με την βελτίωση του προωθητικού βαθμού απόδοσης η οποία με την σειρά της προκαλείται από την μείωση των υδροδυναμικών απωλειών. Η συγκεκριμένη εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών για την απόκτηση του τίτλου του Μηχανολόγου Μηχανικού.

Από την θέση αυτή θα ήθελα να εκφράσω ολόψυχα της ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή μου κύριο Δημήτριο Χουντάλα για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου αναθέτοντάς μου την διπλωματική εργασία, για τον ενδιαφέρον, την καθοδήγηση και την υποστήριξη που μου παρείχε καθ' όλη την διάρκεια της μέχρι την διεκπεραίωσή της.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους του καθηγητές της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για τις γνώσεις που μου παρείχαν κατά την υλοποίηση των σπουδών μου.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, τους φίλους και συνάδελφούς μου για την στήριξη και βοήθεια τους μέχρι την ολοκλήρωση των σπουδών μου.



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>Κεφάλαιο 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>13</b>
<b>Κεφάλαιο 2. ΟΡΙΣΜΟΙ ΠΛΟΙΩΝ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΓΑΣΤΡΑΣ.....</b>	<b>15</b>
2.1 Τύποι πλοίων.....	15
2.2 Περιγραφή μορφών γάστρας.....	16
2.3 Δυναμική ρευστών.....	17
2.4 Αντίσταση πλοίου.....	19
2.5 Αντίσταση τριβής.....	20
2.6 Αντίσταση ανέμου.....	20
2.7 Υπόλοιποι παράγοντες αντίστασης (αντίσταση κυματισμού – αντίσταση δινών).....	21
<b>Κεφάλαιο 3. ΕΛΙΚΕΣ ΚΑΙ ΠΡΩΣΗ ΠΛΟΙΟΥ.....</b>	<b>23</b>
3.1 Τύποι ελίκων.....	23
3.2 Συνθήκες ροής γύρω από την έλικα.....	24
3.3 Βαθμοί απόδοσης.....	26
3.4 Γεωμετρία έλικας.....	29
3.4.1. Διάμετρος της έλικας.....	30
3.4.2 Αριθμός πτερυγίων της έλικας.....	31
3.4.3 Επιλογή του λόγου εκτεταμένης επιφάνειας.....	32
3.4.4 Λόγος βήματος προς διάμετρο $p/d$ .....	32
3.4.5 Συντελεστές έλικας $J, K_T, K_Q$ .....	32
3.5 Συνθήκες λειτουργίας της έλικας.....	33
3.5.1 Ολίσθηση.....	33
3.5.2 Ο νόμος της έλικας.....	35
3.5.3 Μεγάλα κύματα.....	36
3.5.4 Η απόδοση της έλικας σε αυξημένη αντίσταση πλοίου.....	38
3.5.5 Παράμετροι αυξημένης φόρτισης της έλικας.....	40
<b>Κεφάλαιο 4. ΠΕΔΙΟ ΡΥΘΜΙΣΕΩΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ.....</b>	<b>43</b>
4.1 Πρόωση και σημεία λειτουργίας της μηχανής.....	43
4.1.1 Σημείο σχεδιάσεως έλικας.....	45
4.1.2 Ρυπασμένη γάστρα.....	45
4.1.3 Περιθώριο θάλασσας του διαγράμματος φόρτισης της μηχανής....	45

4.1.4 Σημείο συνεχούς λειτουργίας.....	45
4.1.5 Ισχύς συνεχούς λειτουργίας σε κατάσταση υπηρεσίας.....	46
4.1.6 Συντελεστής λειτουργίας με μειωμένη φόρτιση.....	46
4.1.7 Περιθώριο μηχανής .....	46
4.1.8 Προδιαγεγραμμένη μέγιστη συνεχής ισχύς .....	46
4.2 Πεδίο ρυθμίσεως λειτουργίας της μηχανής .....	47
4.3 Διάγραμμα φόρτισης.....	48
4.3.1 Γενική περιγραφή και χρήση του διαγράμματος φόρτισης.....	48
4.3.2 Όρια για συνεχή λειτουργία της μηχανής.....	49
4.4 Λειτουργία σε παραγμένη θάλασσα με μεγάλα κύματα.....	50
<b>Κεφάλαιο 5. ΗΜΙΚΥΚΛΙΚΟΙ ΔΑΚΤΥΛΙΟΙ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ</b>	<b>51</b>
5.1 Βασικές αρχές συσκευών εξοικονόμησης ενέργειας.....	53
5.2 Σχεδιασμός δακτυλίου .....	54
5.2.1 Βασικές αρχές της εξοικονόμησης ενέργειας.....	54
5.2.2 Σχεδιαστική φιλοσοφία του δακτυλίου .....	56
5.3 Έλεγχος της επίδρασης της εξοικονόμησης ενέργειας.....	58
5.3.1 Προωθητική δοκιμή απόδοσης.....	58
5.3.2 Επίδραση εξοικονόμησης ενέργειας του δακτυλίου.....	58
5.3.3 Βελτίωση της μορφής του ημικυκλικού δακτυλίου .....	60
5.4 Μελέτη για την κατασκευαστική αντοχή .....	61
<b>Κεφάλαιο 6. ΔΑΚΤΥΛΙΟΣ ΤΥΠΟΥ-1 .....</b>	<b>63</b>
6.1 Περιγραφή του δακτυλίου τύπου-1 .....	63
6.2 Τοποθέτηση του δακτυλίου τύπου-1.....	67
6.3 Πλήρης κλίμακα των δοκιμαστικών αποτελεσμάτων.....	67
6.4 Παρατηρήσεις στη σπηλαίωση και στην συμπεριφορά ταλάντωσης.....	69
6.5 Αποτελέσματα.....	70
6.5.1 Αποτελέσματα δοκιμών αυτοδύναμης πρόωσης.....	70
6.5.2 Αποτελέσματα δοκιμής σπηλαίωσης.....	71
6.5.3 Αποτελέσματα δοκιμής ελιγμών .....	72
6.6 Επίδραση στα απόνερα επιτυγχάνοντας βελτιώσεις.....	72
6.7 Η χρησιμότητα της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής στον δακτύλιο τύπου-1.....	74
<b>Κεφάλαιο 7. ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΕΛΙΚΑΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΠΡΟΣΘΕΤΩΝ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ ΚΕΦΑΛΗΣ .....</b>	<b>77</b>
7.1 Παραδοσιακή μέθοδος σχεδιασμού της έλικας και των πρόσθετων πτερυγίων κεφαλής.....	77



7.1.1 Βέλτιστη επιλογή των αποτελεσμάτων της δοκιμής μοντέλου .....	79
7.1.2 Θεωρητική σχεδιαστική μέθοδος .....	79
7.2 Ολοκληρωμένη σχεδιαστική μέθοδος σχεδιασμού της έλικας και των πρόσθετων πτερυγίων κεφαλής .....	80
7.3 Σχεδιασμός συστήματος και επικύρωσης δοκιμής μοντέλου .....	82
7.3.1 Σχεδιασμός συστήματος .....	82
7.3.2 Επικύρωση δοκιμής μοντέλου .....	83
7.4 Αποτελέσματα ανάλυσης .....	86
<b>Κεφάλαιο 8. ΔΑΚΤΥΛΙΟΣ ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗΣ ΡΟΗΣ.....</b>	<b>89</b>
8.1 Περιγραφή του δακτυλίου εξισορρόπησης ροής .....	89
8.2 Ισχύς από ομοιογενές πεδίο απόνευρων .....	92
8.3 Κατασκευή και τοποθέτηση .....	93
8.4 Εξοικονόμηση καυσίμων.....	94
8.5 Μείωση του CO <sub>2</sub> .....	95
8.6 Μείωση των ταλαντώσεων.....	95
<b>Κεφάλαιο 9. ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ...</b>	<b>97</b>
<b>Κεφάλαιο 10. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>105</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>107</b>



# ΥΠΟΜΝΗΜΑ

$L_{WL}$  : μήκος ισάλου (σχεδίασης)

$L_{PP}$  : μήκος μεταξύ καθέτων

$B_{WL}$  : πλάτος ισάλου

$D_A$  : βύθισμα πρυμναίας καθέτου

$D_F$  : βύθισμα πρωραίας καθέτου

$D$  : μέσο βύθισμα

$A_M$  : εμβαδόν μέσης τομής (του βυθισμένου τμήματος)

$S$  : βρεχόμενη επιφάνεια

$S_1$  : η  $S$  μαζί με την βρεχόμενη επιφάνεια των παρελκομένων

$\nabla$  : όγκος εκτοπίσματος

$LCB$  : η απόσταση του κέντρου άνωσης από τον μέσο νομέα

$V_A$  : αξονική ταχύτητα εισερχόμενης ροής στην έλικα (Ταχύτητα Προχώρησης)

$w.r$  : ακτίνα

$U_A$  : πρόσθετη ταχύτητα στην αξονική διεύθυνση

$U_T$  : πρόσθετη ταχύτητα στην ακτινική διεύθυνση

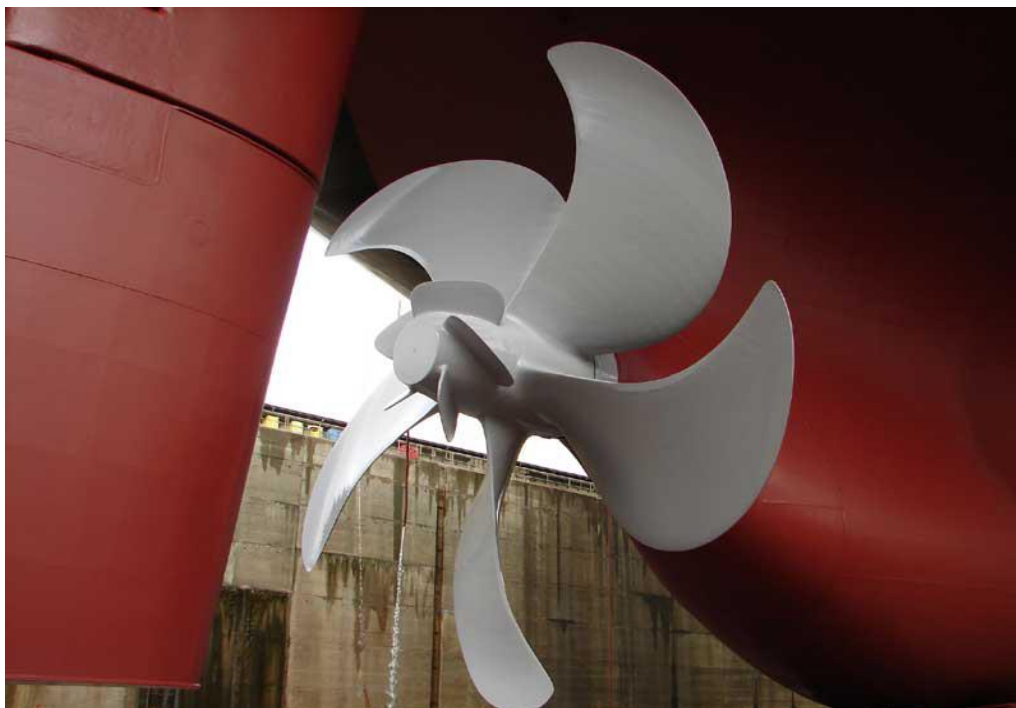
$W$  : συνισταμένη ταχύτητα εισερχόμενης ροής

$\alpha$  : γωνία πρόσπτωσης της ροής

Συσκευές Εξοικονόμησης Ενέργειας:



Δακτύλιος τύπου-1



Έλικα με πρόσθετα πτερύγια κεφαλής



Δακτύλιος Εξισορρόπησης Ροής



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μείωση της κατανάλωσης καυσίμου των ναυτικών κινητήρων αποτελεί ένα παράγοντα ιδιαίτερου επιχειρηματικού ενδιαφέροντος ιδιαίτερα υπό την πίεση των σημερινών οικονομικών συνθηκών. Μεταξύ των μέτρων τα οποία είναι σε θέση να συμβάλουν αποτελεσματικά στη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου είναι η εγκατάσταση μιας συσκευής εξοικονόμησης ενέργειας (Energy Saving Device-ESD), στην περιοχή της έλικας με στόχο τη βελτίωση του συνολικού προωθητικού βαθμού απόδοσης.

Συσκευές εξοικονόμησης ενέργειας που έχουν σαν σκοπό τη βελτίωση της απόδοσης πρόωσης βρίσκονται ήδη σε χρήση περισσότερο από 100 χρόνια. Μια από τις περισσότερο συνηθισμένες κατηγορίες συσκευών που χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση των συνθηκών της ροής προς την έλικα του πλοίου είναι αυτές τύπου «δακτυλίου». Οι πιο χαρακτηριστικές είναι οι συσκευές που βασίζονται σε μια ιδέα του Van Lammeren [1949] οι οποίες είναι ο «Δακτύλιος Εξισορρόπησης Ροής» καθώς και ο «Δακτύλιος Επιτάχυνσης Ροής».

Σε εκτεταμένη χρήση βρίσκεται και η χρήση πτερύγων σε διάφορες διατάξεις πριν την έλικα για τη μείωση των απωλειών λόγω συστροφής της ροής. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν το σύστημα πτερυγίων, το σύστημα προ στροβιλισμού (Pre Swirl System – PSS) και το σύστημα πτερυγίων που δημιουργούν ώση (Thrust Fin System - TFS) το οποίο είναι τοποθετημένο στο πηδάλιο. Εξάλλου μια πολύ γνωστή λύση στην μείωση των απωλειών από τις δίνες πλήμνης που δημιουργούνται στην έλικα είναι η τοποθέτηση πτερυγίων στην κεφαλή της έλικας πρόωσης (σύστημα Propeller Boss Cap Fins - PBCF). Τέλος η έλικα τύπου Kappel χρησιμοποιεί ένα ειδικό ακροπτερύγιο ενσωματωμένο στα πτερύγια της έλικας για να μειώσει τις απώλειες της δίνης στην άκρη της.

Είναι σαφές λοιπόν ότι υπάρχουν πολλές συσκευές εξοικονόμησης ενέργειας στην αγορά, το καθένα με εκτεταμένη τεχνογνωσία και με την εμπειρία της κάθε εταιρείας που βασίζονται μέσα από δοκιμές μοντέλων που έχουν πραγματοποιηθεί στις συσκευές αυτές και κύριος στόχος τους είναι η μείωση στις απώλειες ροής.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας με τίτλο 'Περιγραφή και διερεύνηση λειτουργίας συσκευών εξοικονόμησης ενέργειας με εφαρμογή στο σύστημα πρόωσης' είναι η γενική ανασκόπηση των συσκευών εξοικονόμησης ενέργειας και αποτελείται από 10 κεφάλαια.

Στο κεφάλαιο 2 αναφέρονται οι τύποι πλοίων και η αντίσταση τους που είναι σημαντικός παράγοντας για την πρόωση των πλοίων.

Στο κεφάλαιο 3 γίνεται αναφορά για όλα όσα πρέπει να γνωρίζουμε για την πρόωση των πλοίων. Συγκεκριμένα οι τύποι των ελίκων που χρησιμοποιούνται, οι συνθήκες ροής γύρω από την έλικα, η γεωμετρία της και οι συνθήκες λειτουργίας της.

Στο κεφάλαιο 4 αναλύεται το πεδίο ρυθμίσεως λειτουργίας μηχανής και το διάγραμμα φόρτισης της.

Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται οι ημικυκλικοί δακτύλιοι εξοικονόμησης ενέργειας με τις βασικές αρχές τους, τον σχεδιασμό του αγωγού, τον έλεγχο της επίδρασης της εξοικονόμησης ενέργειας και την κατασκευαστική αντοχή τους.

Στο κεφάλαιο 6 έχουμε την περιγραφή της αρχής λειτουργίας του δακτυλίου τύπου-1 όπου αναγράφονται παρατηρήσεις σε σχέση με τη σπηλαίωση που δημιουργείται στην έλικα και στην συμπεριφορά ταλαντώσεων στα πλοία από αποτελέσματα δοκιμών και την επίδραση του δακτυλίου αυτού στην μείωση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου.

Στο κεφάλαιο 7 περιγράφεται η σχεδιαστική μέθοδος της έλικας και των πρόσθετων πτερυγίων κεφαλής, ο σχεδιασμός συστήματος και η επικύρωση δοκιμής μοντέλου, και τα αποτελέσματα ανάλυσης.

Στο κεφάλαιο 8 περιγράφεται η αρχή λειτουργίας των «Δακτυλίων Εξισορρόπησης Ροής - WED», η κατασκευή και τοποθέτησή τους, η εξοικονόμηση καυσίμων που επιτυγχάνεται από την χρήση τους και την μείωση ταλαντώσεων που μπορούμε να πετύχουμε εγκαθιστώντας στα πλοία έναν τέτοιου τύπου δακτύλιο.

Στο κεφάλαιο 9 πραγματοποιείται αξιολόγηση των συσκευών αυτών αναλύοντας μετρήσεις και διαγράμματα που προκύπτουν από πραγματικά παραδείγματα.

Τέλος στο κεφάλαιο 10 όπου είναι και το τελευταίο συνοψίζονται τα συμπεράσματα για την παρούσα διπλωματική εργασία.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

# ΟΡΙΣΜΟΙ ΠΛΟΙΩΝ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΓΑΣΤΡΑΣ

### 2.1 ΤΥΠΟΙ ΠΛΟΙΩΝ

Τα πλοία χωρίζονται σε διάφορες κατηγορίες, κλάσεις και τύπους, ανάλογα με την φύση του φορτίου τους, και μερικές φορές ανάλογα με τον τρόπο που το φορτίο φορτώνεται και ξεφορτώνεται σε αυτά.

Μερικοί από τους τύπους αυτούς φαίνονται στον πίνακα 2.1.

Category	Class	Type	Abbreviation
Tanker	Oil Tanker	Crude (oil) Carrier	CC
		Very Large Crude Carrier	VLCC
		Ultra Large Crude Carrier	ULCC
		Product Tanker	
	Gas Tanker	Liquefied Natural Gas Carrier	LNG
Chemical Tanker	OBO	Liquefied Petroleum Gas Carrier	LPG
		Oil/Bulk/Ore Carrier	OBO
Bulk Carrier	Bulk Carrier		
Container Ship	Container Ship	Container Carrier	
		Roll On–Roll Off	Ro-Ro
General Cargo Ship	General Cargo Coaster		
Reefer	Reefer	Refrigerated Cargo Vessel	
Passenger Ship	Ferry		
	Cruise Vessel		

Πίνακας 2.1: Παραδείγματα τύπων πλοίων

Οι τρεις μεγαλύτερες κατηγορίες πλοίων είναι τα πλοία εμπορευματοκιβωτίων (Container ships), τα πλοία φορτίου χύδην (Bulk carriers, για μεταφορά αγαθών χύδην, όπως ορυκτά, κάρβουνο, δημητριακά, κ.λπ.) και τα δεξαμενόπλοια (Tankers), τα οποία με την σειρά τους μπορούν να ταξινομηθούν σε ειδικότερες κλάσεις και τύπους. Έτσι τα δεξαμενόπλοια που το φορτίο τους είναι καύσιμα μπορούν να χωρισθούν σε δεξαμενόπλοια πετρελαίου, δεξαμενόπλοια αερίου και χημικά δεξαμενόπλοια, αλλά υπάρχουν επίσης και συνδυασμοί, για παράδειγμα δεξαμενόπλοια πετρελαίου/χημικών.

Ο πίνακας 2.1 δίνει μόνο μία γενική ταξινόμηση. Στην πραγματικότητα, υπάρχουν πολλοί άλλοι συνδυασμοί, όπως για παράδειγμα τα πολλαπλών δυνατοτήτων φορτίων και εμπορευματοκιβωτίων (Multi-purpose bulk container carrier).

## 2.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΡΦΩΝ ΓΑΣΤΡΑΣ

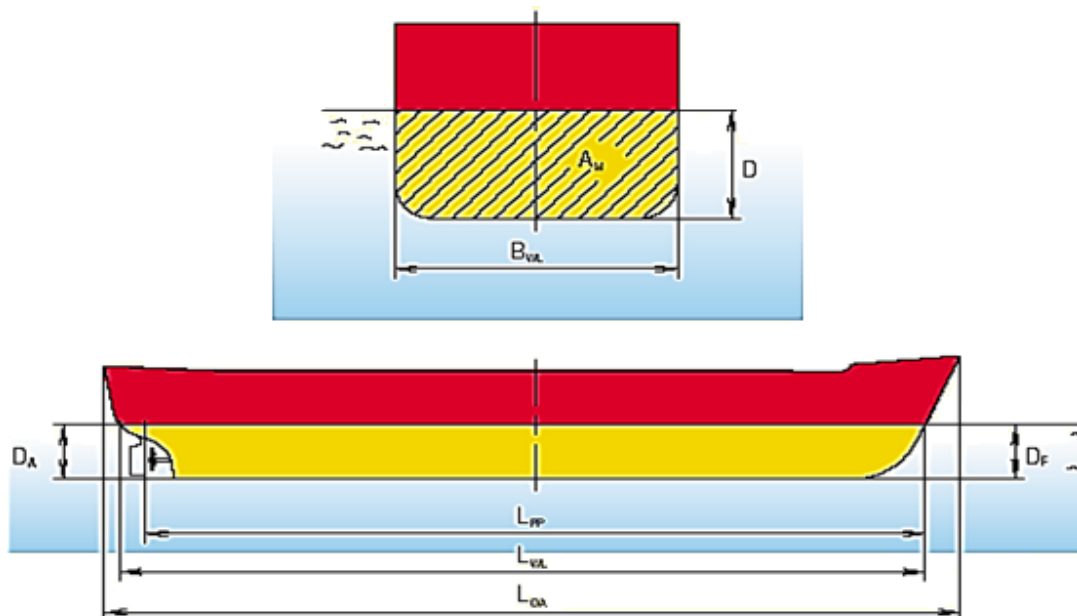
Το τμήμα του πλοίου που επηρεάζει τις απαιτήσεις πρόωσής του είναι το τμήμα της γάστρας του πλοίου που βρίσκεται κάτω από την ίσαλο γραμμή. Οι διαστάσεις που στην συνέχεια περιγράφουν την μορφή της γάστρας αναφέρονται στο βύθισμα σχεδιάσεως, το οποίο είναι μικρότερο ή ίσο με το βύθισμα που αντιστοιχεί στο ύψος εξάλλων (απόσταση της κουπαστής από την ίσαλο, όταν το πλοίο είναι φορτωμένο).

Η επιλογή του βυθίσματος σχεδιάσεως εξαρτάται από το μέγεθος του φορτίου, δηλαδή εάν το πλοίο κατά την κανονική λειτουργία του θα είναι ελαφρά ή βαριά φορτωμένο. Το συνολικό μήκος του πλοίου (length overall),  $L_{OA}$ , κανονικά δεν παίζει κανένα ρόλο όταν υπολογίζεται η υδροδυναμική αντίσταση. Οι παράγοντες που χρησιμοποιούνται είναι το μήκος της ισάλου γραμμής (waterline length),  $L_{WL}$ , και το μήκος μεταξύ καθέτων (length between perpendiculars),  $L_{PP}$ . Οι διαστάσεις αυτές φαίνονται στο σχήμα 2.1.

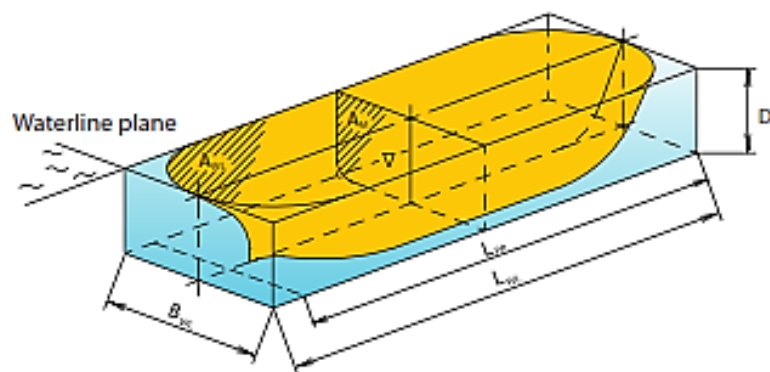
Το μήκος μεταξύ καθέτων είναι το μήκος μεταξύ της προωραίας καθέτου, δηλαδή, συνήθως μιας κατακόρυφης ευθείας που περνά από το σημείο που η πλώρα τέμνει την ίσαλο γραμμή, και της πρυμναίας καθέτου, που συνήθως συμπίπτει με τον άξονα του πηδαλίου. Γενικά το μήκος αυτό είναι ελαφρά μικρότερο από το μήκος της ισάλου γραμμής και συνήθως εκφράζεται ως:

$$L_{PP} = 0.97 \times L_{WL} \quad (2.1)$$

Το βύθισμα του πλοίου  $D$  ορίζεται ως η κατακόρυφη απόσταση από την ίσαλο μέχρι το σημείο της γάστρας όπου είναι βαθύτερα στο νερό όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1: Κύριες Διαστάσεις πλοίων



Σχήμα 2.2: Συντελεστές μορφής πλοίων

**Αδιάστατα μεγέθη (Συντελεστές και λόγοι):**

$L_{WL} / B$  : λόγος μήκους-πλάτους (2.2)

$B / D$  : λόγος πλάτους - βυθίσματος (2.3)

$L_{WL} / \nabla^{1/3}$  : λόγος μήκους - εκτοπίσματος (length-displacement ratio or slenderness ratio) (2.4)

$\nabla / L_{WL}^3$  : λόγος εκτοπίσματος-μήκους (2.5)

$LCB / L_{PP}$  : λόγος απόστασης του κέντρου άνωσης από τον μέσο νομέα προς το μήκος του πλοίου (2.6)

$C_{B,WL} = \frac{\nabla}{L_{WL} \times B_{WL} \times D}$  : συντελεστής γάστρας (2.7)

$C_{WL} = \frac{A_{WL}}{L_{WL} \times B_{WL}}$  : συντελεστής ίσαλου επιφάνειας (2.8)

$C_M = \frac{A_M}{B_{WL} \times D}$  : συντελεστής μέσης τομής (2.9)

$C_P = \frac{\nabla}{A_M \times L_{WL}} = \frac{\nabla}{C_M \times B_{WL} \times D \times L_{WL}} = \frac{C_B}{C_M}$  : πρισματικός συντελεστής (2.10)

Όπως φαίνεται, ο  $C_P$  δεν είναι ένας ανεξάρτητος συντελεστής μορφής αλλά εξαρτάται αποκλειστικά από τον συντελεστή γάστρας  $C_B$ , και τον συντελεστή μέσης τομής  $C_M$ .

## 2.3 ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΡΕΥΣΤΩΝ

Η ισχύς που απαιτείται για την πρόωση του πλοίου στο νερό εξαρτάται από την αντίσταση που προβάλλουν το νερό και ο αέρας, την απόδοση του προωστήριου συστήματος που έχει επιλεγεί και την αλληλεπίδραση μεταξύ τους. Επομένως τα ρευστά που μας απασχολούν είναι το νερό και ο αέρας. Η αντίσταση του αέρα αντιμετωπίζεται ως μια ξεχωριστή δύναμη αντίστασης. Το

νερό έχει κάποιες συγκεκριμένες φυσικές ιδιότητες, που είναι της ίδιας τάξης μεγέθους για το νερό στο οποίο γίνονται τα πειράματα και το νερό στο οποίο κινείται το πλοίο.

Αυτές είναι:

- πυκνότητα,  $\rho$
- επιφανειακή τάση,  $\sigma$
- συνεκτικότητα,  $\mu$
- πίεση ατμοποίησης,  $p_v$
- πίεση περιβάλλοντος στο άπειρο,  $p_\infty$
- ταχύτητα του ήχου στο νερό,  $a$

Άλλοι παράγοντες που επιδρούν είναι:

- το βρεχόμενο μήκος  $L$  για τους υπολογισμούς της αντίστασης
- διάμετρος της έλικας,  $D$
- ταχύτητα,  $V$
- στροφές της έλικας,  $n$
- αντίσταση,  $R$
- ώση,  $T$
- ροπή,  $Q$
- επιτάχυνση της βαρύτητας,  $g$

Εφαρμόζοντας τη διαστατική ανάλυση στο πρόβλημα της πρόωσης του πλοίου, μπορεί ναδειχτεί ότι:

$$\frac{R}{\rho \times V^2 \times L^2} = F \left\{ \frac{V \times L \times \rho}{\mu}, \frac{V}{\sqrt{(g \times L)}}, \frac{V}{a}, \frac{\sigma}{g \times \rho \times L^2}, \frac{p_\infty - p_v}{\rho \times V^2} \right\}$$

$$\frac{T}{\rho \times n^2 \times D^4} \text{ και } \frac{Q}{\rho \times n^2 \times D^5} = F \left\{ \frac{V}{n \times D}, \frac{V \times D \times \rho}{\mu}, \frac{V^2}{g \times D}, \frac{\sigma}{g \times \rho \times L^2}, \frac{p_\infty - p_v}{\rho \times V^2} \right\}$$

όπου,

$$\frac{R}{\rho \times V^2 \times L^2} \text{ είναι ο συντελεστής αντίστασης}$$

$$\frac{V \times L \times \rho}{\mu} \text{ ή } \frac{V \times D \times \rho}{\mu} \text{ ονομάζεται ο αριθμός Reynolds}$$

$$\frac{V}{\sqrt{(g \times L)}} \text{ είναι ο αριθμός Froude}$$

$$\frac{V}{a} \text{ είναι ο αριθμός Mach}$$

$$\frac{\sigma}{g \times \rho \times L^2} \text{ είναι ο αριθμός Weber}$$

$$\frac{p_\infty - p_v}{\rho \times V^2} \text{ είναι ο αριθμός σπηλαίωσης}$$

$$\frac{T}{\rho \times n^2 \times D^4} = K_T \text{ συντελεστής ώσης}$$

$$\frac{Q}{\rho \times n^2 \times D^5} = K_Q \text{ συντελεστής ροπής}$$

## 2.4 ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΠΛΟΙΟΥ

Για την κίνηση του ένα πλοίο πρέπει να υπερνικήσει την αντίσταση, δηλαδή την δύναμη που δρα αντίθετα από την ώση. Ο υπολογισμός της αντίστασης παίζει ένα σημαντικό ρόλο στην επιλογή της έλικας και στην επιλογή της Κύριας Μηχανής. Γενικά η αντίσταση ενός πλοίου επηρεάζεται κυρίως από την ταχύτητά του, το εκτόπισμά του και την μορφή της γάστρας του. Η συνολική αντίσταση  $R_T$ , αποτελείται από πολλές συνιστώσες αντιστάσεις  $R$ , που μπορούν να ταξινομηθούν σε κυρίως ομάδες.

Αυτές είναι:

1. Αντίσταση Τριβής
2. Υπόλοιπη Αντίσταση (Αντίσταση Κυματισμού – Αντίσταση Δινών)
3. Αντίσταση Ανέμου

Η σχετική επιρροή της αντίστασης τριβής και της υπόλοιπης αντίστασης εξαρτάται από το μέγεθος του τμήματος της γάστρας κάτω από την ίσαλο, ενώ η επιρροή της αντίστασης του αέρα εξαρτάται από το μέγεθος του τμήματος του πλοίου επάνω από την ίσαλο. Έτσι η αντίσταση του αέρα θα έχει επιπτώσεις σε πλοία εμπορευματοκιβωτίων (container ship) τα οποία στις περισσότερες περιπτώσεις μεταφέρουν ένα σημαντικό αριθμό κιβωτίων στο κατάστρωμα.

Νερό ταχύτητας  $V$  και πυκνότητας  $\rho$  έχει μία δυναμική πίεση ίση με :

$$p = \frac{1}{2} \times \rho \times V^2 \text{ (Νόμος του Bernoulli) (2.11)}$$

Έτσι όταν το νερό σταματήσει πάνω σε ένα ακίνητο σώμα, λόγω της δυναμικής πίεσης που αναπτύσσεται πάνω στην επιφάνεια του σώματος, θα εξασκηθεί μία δύναμη επάνω στο σώμα από το νερό.

Η σχέση αυτή χρησιμοποιείται ως βάση όταν υπολογίζονται ή μετρούνται οι διάφορες αντιστάσεις  $R$  της γάστρας του πλοίου μέσω αδιάστατων συντελεστών αντίστασης  $C$ . Έτσι οι  $C$  σχετίζονται με την δύναμη αναφοράς  $K$ , που ορίζεται ως η δύναμη, που η δυναμική πίεση νερού με ταχύτητα ίση με τη ταχύτητα του πλοίου  $V$  ασκεί σε μία επιφάνεια, που είναι ίση με την βρεχόμενη επιφάνεια της γάστρας  $A_S$ . Η επιφάνεια του πηδαλίου περιλαμβάνεται επίσης στην βρεχόμενη επιφάνεια. Έτσι, λοιπόν, τα γενικά δεδομένα για υπολογισμούς αντίστασης είναι:

$$\text{Δύναμη αναφοράς : } K = \frac{1}{2} \times \rho \times V^2 \times A_S \text{ (2.12)}$$

$$\text{και διάφορες αντιστάσεις : } R = C \times K \text{ (2.13)}$$

## 2.5 ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΤΡΙΒΗΣ

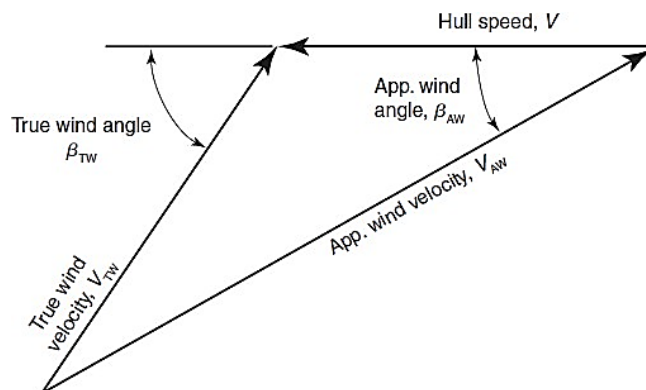
Η αντίσταση τριβής  $R_F$ , της γάστρας εξαρτάται από το μέγεθος της βρεχόμενης επιφάνειας της γάστρας  $A_S$  και από τον ειδικό συντελεστή αντίστασης τριβής  $C_F$ . Η τριβή αυξάνεται με την ρύπανση της γάστρας με την πάροδο του χρόνου από θαλάσσιους οργανισμούς, όστρακα, φύκια, κ.λπ.

Μια προσπάθεια να αποφευχθεί η ρύπανση της γάστρας γίνεται με την χρήση των αντιρρυπαντικών χρωμάτων. Πρόκειται για ειδικά χρώματα γάστρας που μειώνουν την πιθανότητα ανάπτυξης οργανισμών στα ύφαλα του πλοίου. Τα χρώματα που περιέχουν TBT ως βασικό βιοκτόνο συστατικό, που είναι πολύ τοξικό, είχαν επικρατήσει στην αγορά για δεκαετίες. Όμως η απαγόρευση του TBT που εκδόθηκε από τον IMO και αφορούσε τις νέες κατασκευές μετά την 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου 2003 και η ολική απαγόρευση μετά την 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου 2008, θα επιβάλουν την χρήση νέων εναλλακτικών χρωμάτων, πιθανόν βασισμένων στον χαλκό, (και ίσως λιγότερο αποτελεσματικών). Όταν το πλοίο ωθείται μέσα στο νερό, η αντίσταση τριβής αυξάνεται με ρυθμό που είναι περίπου ίσος με το τετράγωνο της ταχύτητας του πλοίου. Η αντίσταση τριβής αντιπροσωπεύει ένα σημαντικό μέρος της αντίστασης του πλοίου, μερικές φορές κάπου 70-90% της συνολικής αντίστασης του πλοίου για αργά πλοία (φορτίου χύδην και δεξαμενόπλοια) και άλλες φορές λιγότερο από 40% για γρήγορα πλοία (εμπορευματοκιβωτίων – container - επιβατηγά). Η αντίσταση τριβής βρίσκεται ως ακολούθως:

$$R_F = C_F \times K \quad (2.14)$$

## 2.6 ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΑΝΕΜΟΥ

Η αντίσταση του αέρα σε ήρεμο νερό θεωρητικά είναι ανάλογη με το τετράγωνο της ταχύτητας του πλοίου και επίσης ανάλογη με την μετωπική επιφάνεια του πλοίου πάνω από την ίσαλο. Η αντίσταση του αέρα κανονικά αντιπροσωπεύει περίπου το 2% της συνολικής αντίστασης. Όταν ένα πλοίο που πλέει σε ήρεμη θάλασσα χωρίς άνεμο 'αισθάνεται' μια αντίσταση αέρα. Η αντίσταση αυτή εξαρτάται από τον 'φαινόμενο άνεμο' που σε αυτή την περίπτωση ισούται με την ταχύτητα του πλοίου και από την επιφάνεια της υπερκατασκευής. Όταν φυσά επιπλέον άνεμος τότε η αντίσταση αέρα εξαρτάται από την 'φαινόμενη' (ως προς το πλοίο) ταχύτητα του ανέμου που διαμορφώνεται σύμφωνα με το σχήμα 2.3 (apparent wind velocity).



Σχήμα 2.3: Πραγματικός και φαινόμενος άνεμος

Όμως η διεύθυνση του ανέμου και η ταχύτητα του δεν είναι ποτέ σταθερά και ειδικά σε μια καταιγίδα μπορεί να σημειωθούν πολλές σημαντικές διακυμάνσεις, και συνήθως τα υποθέτουμε σταθερά για την επίλυση των σχετικών προβλημάτων. Ακόμη όμως και σε σταθερές συνθήκες ανέμου η ταχύτητα του διαφέρει ανάλογα με το ύψος του.

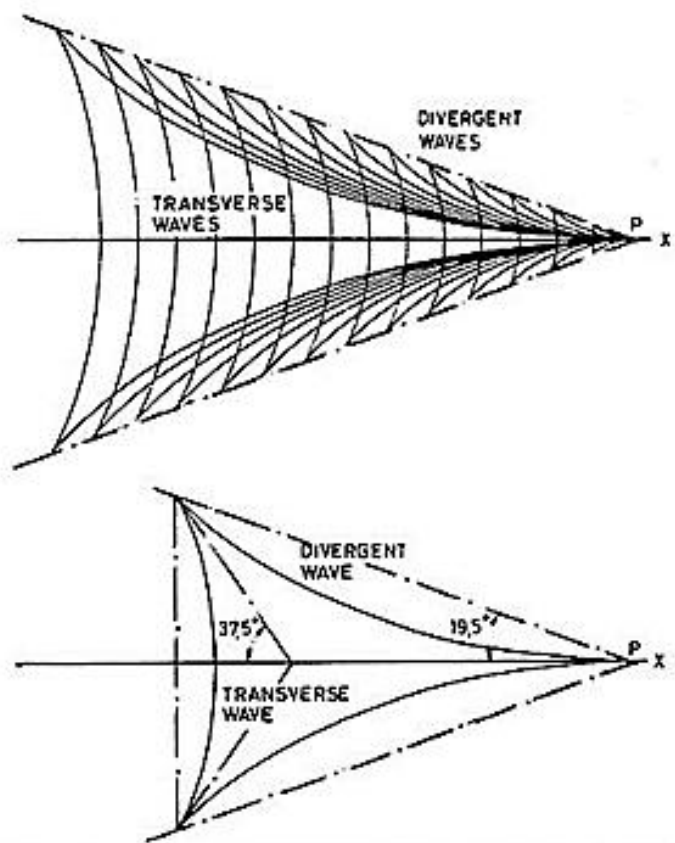
## 2.7 ΥΠΟΛΟΙΠΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ (ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥ – ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΔΙΝΩΝ)

Η αντίσταση κυματισμού αφορά την απώλεια ενέργειας που προκύπτει λόγω της δημιουργίας κυμάτων από το σκάφος κατά την διάρκεια της προώσεώς του μέσα στο νερό, ενώ η αντίσταση των δινών αφορά την απώλεια λόγω αποκολλήσεως της ροής που δημιουργεί δίνες, ειδικά στην πρύμνη του σκάφους.

Η αντίσταση κυματισμού σε χαμηλές ταχύτητες είναι ανάλογη με το τετράγωνο της ταχύτητας αλλά αυξάνει πολύ γρηγορότερα σε υψηλότερες ταχύτητες. Θεωρητικά αυτό σημαίνει ότι τίθεται ένα φράγμα ταχύτητας, έτσι ώστε επιπλέον αύξηση της ωστικής ισχύος του πλοίου δεν έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερη ταχύτητα, καθώς όλη η ενέργεια θα μετατρέπεται σε ενέργεια κυματισμού. Η υπόλοιπη αντίσταση κανονικά αντιπροσωπεύει το 10-25% της συνολικής αντίστασης για αργά πλοία και έως 40-60% για ταχεία. Τα πλοία δημιουργούν κυματισμούς που η ένταση τους εξαρτάται από τον αριθμό Froude. Οι κυματισμοί απαιτούν ενέργεια για να δημιουργηθούν. Η ενέργεια δαπανάται από την προωστήρια εγκατάσταση του πλοίου. Το σύστημα κυματισμών κινείται μαζί με το πλοίο. Έτσι για έναν παρατηρητή πάνω στο πλοίο τα κύματα φαίνονται να είναι στατικά/ακίνητα. Πρέπει να σημειωθεί ότι το ρηχό νερό μπορεί να έχει επίσης μεγάλη επίπτωση στην υπόλοιπη αντίσταση, καθώς το εκτοπιζόμενο νερό κάτω από το πλοίο έχει μεγαλύτερη δυσκολία να κινηθεί προς τα πίσω. Η διαδικασία για τον υπολογισμό του συντελεστή υπόλοιπης αντίστασης  $C_R$  εκφράζεται ως ακολούθως:

$$R_R = C_R \times K \quad (2.15)$$

Αν και αρχικά μπορεί να θεωρηθεί ότι η αντικατάσταση του πλοίου από ένα μοναδικό σημείο πίεσης είναι πολύ απλοποιημένη, θα πρέπει να γίνει μια προσέγγιση που ισχύει μακριά από το σώμα όπου τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά δεν είναι 'ορατά' (δηλαδή από μαθηματική άποψη η επίδραση τους οδηγεί σε διαταραχές υψηλότερης τάξης οι οποίες μπορεί ασυμπτωτικά να αμεληθούν). Ο Kelvin κατόρθωσε να φτάσει στο μοντέλο του χρησιμοποιώντας μια γενική τεχνική της ασυμπτωτικής ανάλυσης, που ονομάζεται μέθοδος της σταθερής φάσης (stationary phase), την οποία ανέπτυξε ακριβώς για το πρόβλημα της αντίστασης κυματισμού. Η μέθοδος επιτρέπει την προσεγγιστική εκτίμηση ορισμένων ολοκληρωμάτων συναρτήσεων που ταλαντώνονται πολύ γρήγορα και παράγει δύο συστήματα κυματισμών: ένα που είναι μέσα στις δύο ευθείες που προαναφέρθηκαν σε προηγούμενη ενότητα (σχήμα 2.4) και ένα που είναι έξω από αυτές. Η διαταραχή των εσωτερικών κυματισμών μειώνεται με την απόσταση από το πλοίο με τον νόμο  $O 1/\sqrt{R}$ , όπου  $R$  είναι η ακτινική απόσταση από το πλοίο ενώ η διαταραχή των εξωτερικών κυματισμών μειώνεται με τον νόμο  $O (1/R)$  και μπορεί να αμεληθεί για μεγάλα  $R$ .



Σχήμα 2.4: Σύστημα κυματισμών του Kelvin



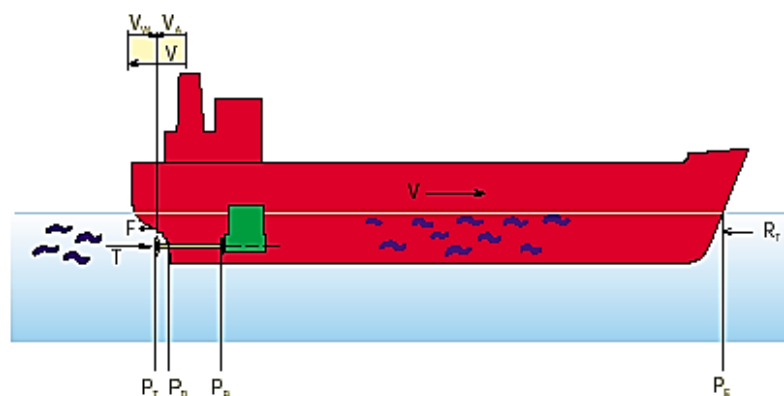
# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

## ΕΛΙΚΕΣ ΚΑΙ ΠΡΩΩΣΗ ΠΛΟΙΟΥ

### 3.1 ΤΥΠΟΙ ΕΛΙΚΩΝ

Το παραδοσιακό εξάρτημα που χρησιμοποιείται για την κίνηση ενός πλοίου είναι η έλικα, μερικές φορές δύο και σε σπανιότερες περιπτώσεις περισσότερες από δύο. Η απαιτούμενη ώση της έλικας για την κίνηση του πλοίου με ταχύτητα  $V$  κανονικά είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη αντίσταση ρυμουλκήσεως  $R_T$  και τα αίτια που έχουν σχέση με την ροή όπως και κάποια περισσότερα που θα δούμε στο κεφάλαιο αυτό. Στο σχήμα 3.1, παρουσιάζονται όλες οι σχετικές παράμετροι ταχύτητας, δύναμης, ισχύος και απόδοσης.

<u>Velocities</u>	<u>Power</u>
Ship's Speed : $V$ Arriving water velocity to propeller (Speed of advance of propeller) : $V_A$ Effective wake velocity : $V_w = V - V_A$ Wake fraction coefficient : $w = \frac{V - V_A}{V}$	Effective (Towing) power : $P_E = R_T \times V$ Thrust power delivered by the propeller to water : $P_T = \frac{P_E}{\eta_H}$ Power delivered to propeller : $P_D = \frac{P_T}{\eta_B}$ Brake power of main engine : $P_B = \frac{P_D}{\eta_S}$
<u>Forces</u>	<u>Efficiencies</u>
Towing resistance : $R_T$ Thrust force : $T$ Thrust deduction fraction : $F = \frac{T - R_T}{T}$ Thrust deduction coefficient : $t = \frac{T - R_T}{T}$	Hull efficiency : $\eta_H = \frac{1-t}{1-w}$ Relative rotative efficiency : $\eta_R$ Propeller efficiency – open water : $\eta_0$ Propeller efficiency – behind hull : $\eta_B = \eta_0 - \eta_R$ Propulsive efficiency : $\eta_D = \eta_H \times \eta_B$ Shaft efficiency : $\eta_S$ Total efficiency : $\eta_{tot} = \eta_H \times \eta_0 \times \eta_R \times \eta_S$



Σχήμα 3.1: Η πρόωση του πλοίου – θεωρία

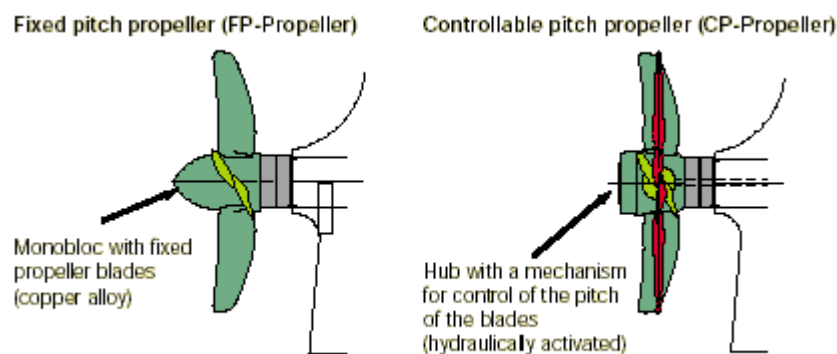
Οι έλικες μπορεί να χωριστούν στις δύο ακόλουθες κατηγορίες, σχήμα 3.2:

1. Έλικες σταθερού βήματος [Fixed Pitch Propeller (FPP)]
2. Έλικες μεταβλητού βήματος [Controllable Pitch Propeller (CPP)]

Οι έλικες σταθερού βήματος είναι ενιαία χυτά κομμάτια και συνήθως κατασκευάζονται από κράμα χαλκού. Η θέση των πτερυγίων, και συνεπώς το βήμα της έλικας, είναι ίση και σταθερή για όλα, με ένα δεδομένο βήμα που δεν μπορεί να αλλάξει κατά την λειτουργία. Αυτό σημαίνει ότι όταν η έλικα λειτουργεί σε συνθήκες, για παράδειγμα άσχημου καιρού, οι καμπύλες απόδοσης της έλικας, δηλαδή ο συνδυασμός ισχύος και ταχύτητας ( $r/min$ ), θα αλλάζουν ακολουθώντας τους φυσικούς νόμους, και η πραγματική καμπύλη της έλικας δεν μπορεί να μεταβληθεί από το πλήρωμά. Τα περισσότερα πλοία που δεν χρειάζονται ειδικές καλές ελιγκτικές ικανότητες είναι εφοδιασμένα με έλικες σταθερού βήματος.

Οι έλικες μεταβλητού βήματος έχουν μεγαλύτερη πλήμνη σε σχέση με τις έλικες σταθερού βήματος, επειδή η πλήμνη πρέπει να έχει αρκετό χώρο για τον υδραυλικό μηχανισμό ελέγχου της γωνίας (βήματος) των πτερυγίων. Οι έλικες μεταβλητού βήματος είναι σχετικά ακριβές, ίσως 3 με 4 φορές ακριβότερες σε σχέση με τις έλικες σταθερού βήματος. Επιπλέον, λόγω της μεγαλύτερης πλήμνης, η απόδοση της έλικας είναι ελαφρώς χαμηλότερη.

Οι έλικες μεταβλητού βήματος συνήθως χρησιμοποιούνται στα κρουαζιερόπλοια και στα ferries που απαιτούν υψηλές ελεγκτικές ικανότητες. Για τα συνηθισμένα πλοία, όπως τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, φορτίου χύδην και τα δεξαμενόπλοια, που πλέουν για μεγάλα χρονικά διαστήματα σε κανονική θάλασσα και με δεδομένη ταχύτητα, θα ήταν γενικά αντισυμβατικό να εγκατασταθούν έλικες μεταβλητού βήματος αντί για σταθερού. Επίσης, μια έλικα μεταβλητού βήματος είναι πιο περίπλοκη και συνοδεύεται από υψηλότερο ρίσκο εμφάνισης προβλημάτων κατά την λειτουργία.



Σχήμα 3.2: Τύποι ελίκων

### 3.2 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΡΟΗΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΛΙΚΑ

Οι συνθήκες ροής γύρω από την έλικα προσδιορίζονται μέσω δύο συντελεστών, από τον συντελεστή ομόρρου  $w$  και τον συντελεστή μείωση ώσης  $t$ . Επομένως όταν το πλοίο κινείται, η τριβή της γάστρας θα δημιουργήσει μία λεγόμενη ζώνη τριβής ή οριακό στρώμα νερού γύρω από

την γάστρα. Στην ζώνη αυτή, η ταχύτητα του νερού στην επιφάνεια της γάστρας είναι ίση με αυτή του πλοίου, αλλά μειώνεται με την απόσταση από την επιφάνεια της γάστρας. Σε μία ορισμένη απόσταση από την γάστρα και, εξ' ορισμού, ίση με την απόσταση της εξωτερικής επιφάνειας της ζώνης τριβής, η ταχύτητα του νερού, σε σχέση με την περιβάλλουσα υδάτινη μάζα είναι ίση με μηδέν. Το πάχος της ζώνης τριβής αυξάνει με την απόστασή του από το πρωραίο τμήμα της γάστρας. Η ζώνη τριβής είναι, λοιπόν, παχύτερη στο πρωμναίο άκρο της γάστρας και το πάχος της είναι σχεδόν ανάλογο με το μήκος του πλοίου. Αυτό σημαίνει ότι θα υπάρχει κάποια ταχύτητα του ομόρρου που προκαλείται από την τριβή κατά μήκος των πλευρών της γάστρας. Επιπλέον, το εκτοπιζόμενο νερό από το πλοίο θα προκαλέσει επίσης κύματα τόσο προς την πλώρα όσο και την πρύμνη. Όλα αυτά σημαίνουν ότι η έλικα πίσω από την γάστρα θα λειτουργεί σε ένα πεδίο ομόρρου.

Συνεπώς, το νερό στην έλικα θα έχει μία πραγματική ταχύτητα ομόρρου  $V_W$ , που έχει την ίδια κατεύθυνση όπως και η ταχύτητα του πλοίου  $V$ , κυρίως λόγω του ομόρρου τριβής. Αυτό σημαίνει ότι η ταχύτητα με την οποία φθάνει το νερό στην έλικα  $V_A$  (ίση με την ταχύτητα προχώρησης της έλικας), εκφραζόμενη ως μέση ταχύτητα στον δίσκο της έλικας, είναι κατά  $V_W$  χαμηλότερη από την ταχύτητα του πλοίου  $V$ .

Η πραγματική ταχύτητα του ομόρρου στην έλικα είναι, συνεπώς, ίση με  $V_W = V - V_A$  και μπορεί να εκφραστεί σε αδιάστατη μορφή μέσω του συντελεστή ποσοστού του ομόρρου  $w$ . Ο συντελεστής ποσοστού ομόρρου  $w$  που δίνεται από τον Taylor ορίζεται ως:

$$w = \frac{V_W}{V} = \frac{V - V_A}{V} \quad (3.1)$$

Η τιμή του συντελεστή ποσοστού ομόρρου εξαρτάται από το σχήμα της γάστρας αλλά επίσης και από την θέση της έλικας και το μέγεθος της και επηρεάζει σημαντικά την απόδοσή της.

Γενικά, ένας υψηλός συντελεστής ποσοστού ομόρρου αυξάνει τον κίνδυνο για σπηλαιώση της έλικας, γιατί κάτω απ' αυτές τις συνθήκες η κατανομή της ταχύτητας του νερού γύρω από την έλικα είναι γενικά ανομοιογενής.

Ένας δακτύλιος τύπου WED, προκαλεί αύξηση της αξονικής ταχύτητας του ρευστού και ομοιόμορφη κατανομή της ταχύτητας στον δίσκο της έλικας. Με την αύξηση της ταχύτητας της ροής προς την έλικα (ταχύτητα προχώρησης), για σταθερή γωνιακή ταχύτητα  $\omega$  αυτής, επιτυγχάνεται αύξηση του βαθμού απόδοσης της έλικας  $\eta_B$  μέσω μείωσης της γωνίας πρόσπτωσης  $\alpha$  της ροής στο πτερύγιο της έλικας, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.3.

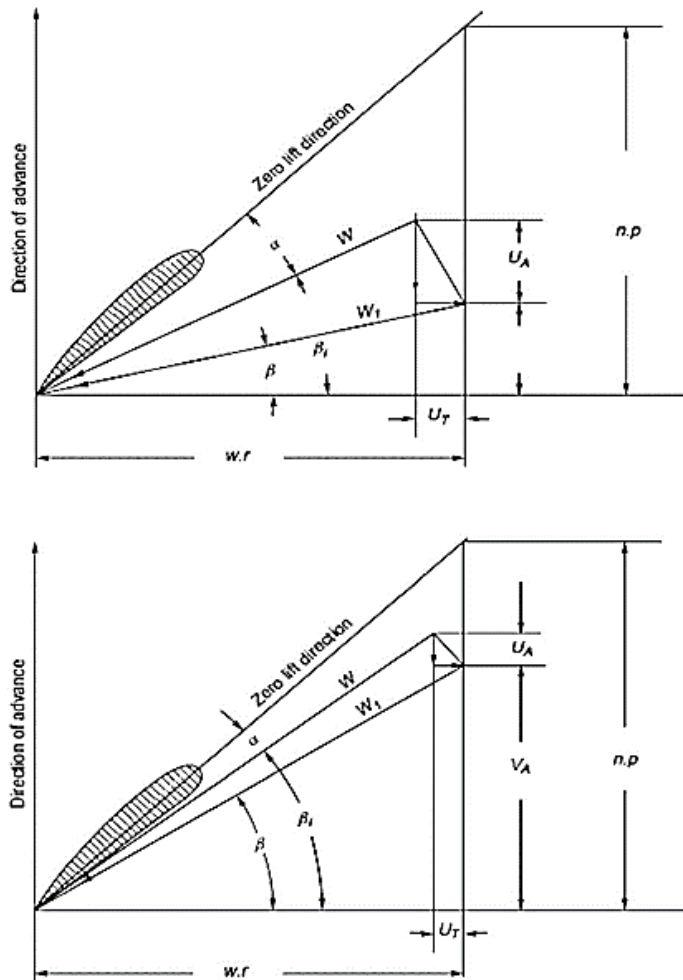
Η περιστροφή της έλικας προκαλεί την αναρρόφηση του νερού που βρίσκεται μπροστά της πίσω προς την έλικα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μία επιπλέον αντίσταση στην γάστρα που συνήθως ονομάζεται "αύξηση αντίστασης" (augment of resistance) ή, σε σχέση με την συνολική απαιτούμενη δύναμη ώσης  $T$  στην έλικα, "ποσοστό μείωσης ώσης"  $F$ . Αυτό σημαίνει ότι η ώση  $T$  στην έλικα πρέπει να υπερνικήσει και την αντίσταση του πλοίου  $R_T$  και αυτή την "απώλεια ώσης"  $F$ .

Το ποσοστό μείωσης ώσης  $F$  μπορεί να εκφραστεί σε αδιάστατη μορφή από τον συντελεστή μείωσης ώσης  $t$ , που ορίζεται ως:

$$t = \frac{F}{T} = \frac{T - R_T}{T} \quad (3.2)$$

Γενικά το μέγεθος του συντελεστή μείωσης ώσης  $t$  αυξάνει όταν ο συντελεστής ποσοστού ομόρρου  $w$  αυξάνει. Επίσης σημαντική επίδραση έχει το σχήμα της γάστρας γιατί κάτω από κάποιες ορισμένες συνθήκες μπορεί να μειώσει το  $t$ .

Τέλος ο συντελεστής αυτός παίρνει τιμές από  $0,12 \div 0,30$  για πλοία με μία έλικα, αφού πλοία με υψηλό συντελεστή γάστρας έχουν και υψηλό συντελεστή μείωσης ώσης, ενώ για πλοία με δύο έλικες ο  $t$  θα είναι πολύ μικρότερος καθώς αυτές αναρροφούν πιο μακριά από τη γάστρα.



Σχήμα 3.3: Διαφοροποίηση γωνίας πρόσπτωσης του ρευστού στο πτερύγιο για μικρή (πάνω) και για μεγάλη (κάτω) ταχύτητα προχώρησης  $V_A$

### 3.3 ΒΑΘΜΟΙ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

Στην ενότητα αυτή θα αναφερθούμε στους διάφορους βαθμούς απόδοσης που χρησιμοποιούνται ώστε να υπολογιστεί ο ολικός βαθμός απόδοσης.

Έτσι έχουμε τον βαθμό απόδοσης γάστρας  $\eta_H$  όπου είναι ο λόγος μεταξύ της ισχύος ρυμουλκήσεως  $P_E = R_T \times V$  και της ισχύος ώσης που η έλικα προσδίδει στο νερό  $P_T = T \times V_A$ , δηλαδή:

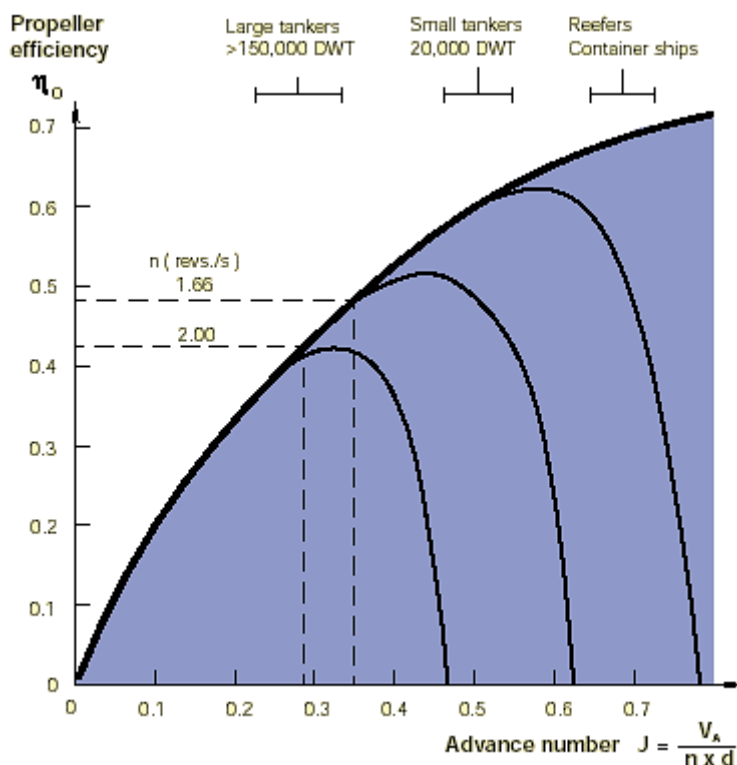
$$\eta_H = \frac{P_E}{P_T} - \frac{P_T \times V}{T \times V_A} - \frac{\frac{R_T}{V}}{\frac{V_A}{V}} = \frac{1-t}{1-w} \quad (3.3)$$

Για πλοία με μία έλικα ο βαθμός απόδοσης γάστρας παίρνει τιμές από 1,1÷1,4, με την υψηλή τιμή να αναφέρεται σε πλοία με υψηλό συντελεστή γάστρας, ενώ για πλοία με δύο έλικες και συμβατική πρύμνη ο βαθμός απόδοσης γάστρας παίρνει τιμές από 0,95÷1,05, όπου πάλι η υψηλή τιμή αναφέρεται σε πλοία με υψηλό συντελεστή γάστρας.

Επιπλέον έχουμε τον βαθμό απόδοσης έλικας  $\eta_0$  όπου σχετίζεται με ελεύθερη ροή, δηλαδή όταν η έλικα λειτουργεί σε ομοιογενές πεδίο ομόρρου χωρίς γάστρα μπροστά της. Ο βαθμός απόδοσης της έλικας εξαρτάται, ιδιαίτερα, από την ταχύτητα προχωρήσεως  $V_A$ , την ώση  $T$ , τον ρυθμό περιστροφής  $n$ , την διάμετρο  $d$  και, επιπλέον, από την σχεδίαση της έλικας, δηλαδή, τον αριθμό των πτερυγίων, τον λόγο εκτεταμένης επιφανείας, και την σχέση βήμα / διάμετρο. Ο βαθμός απόδοσης έλικας  $\eta_0$ , μπορεί να ποικίλει περίπου μεταξύ 0.35 ÷ 0.75, με την υψηλή τιμή να ισχύει για έλικες με υψηλή ταχύτητα προχώρησης  $V_A$ . Το σχήμα 3.4 δείχνει τον βαθμό αποδόσεως της έλικας  $\eta_H$  που μπορεί να επιτευχθεί συναρτήσει της ταχύτητας προχώρησης  $V_A$ , που σε αδιάστατη μορφή δίνεται ως:

$$J = \frac{V_A}{n \times d} \quad (3.4)$$

όπου  $J$  είναι ο συντελεστής προχώρησης της έλικας.



Σχήμα 3.4: Λαμβανόμενος βαθμός απόδοσης έλικας – ελεύθερη ροή

Επίσης έχουμε τον βαθμό απόδοσης σχετικής περιστροφής  $\eta_R$ . Η πραγματική ροή του νερού που ρέει προς την έλικα πίσω από την γάστρα δεν είναι ούτε σταθερή ούτε σε ορθή γωνία προς τον δίσκο της έλικας, αλλά είναι ένα είδος περιστροφικής ροής. Συνεπώς, σε σχέση με την λειτουργία της έλικας σε ελεύθερη ροή, ο βαθμός απόδοσης της έλικας επηρεάζεται από τον συντελεστή  $\eta_R$  - που ονομάζεται βαθμός απόδοσης της σχετικής περιστροφής. Σε πλοία με μία έλικα, ο βαθμός απόδοσης σχετικής περιστροφής είναι γύρω στο  $1.0 \div 1.07$ , με άλλα λόγια, η περιστροφή του νερού έχει ευεργετικό αποτέλεσμα. Ο βαθμός απόδοσης σχετικής περιστροφής σε ένα πλοίο με συμβατικό σχήμα γάστρας και δύο έλικες θα είναι κανονικά μικρότερος, περίπου 0.98.

Επιπροσθέτως έχουμε τον βαθμό απόδοσης της έλικας  $\eta_B$  που λειτουργεί πίσω από το πλοίο. Ο λόγος της ισχύος ώσης  $P_T$ , που η έλικα προσδίδει στο νερό και της ισχύος  $P_D$ , που προσδίδεται στην έλικα, δηλαδή, ο βαθμός απόδοσης της έλικας  $\eta_B$ , για μία έλικα, που λειτουργεί πίσω από το πλοίο ορίζεται ως :

$$\eta_B = \frac{P_T}{P_D} = \eta_0 - \eta_R \quad (3.5)$$

Στην συνέχεια έχουμε τον προωθητικό βαθμό απόδοσης  $\eta_D$  και είναι ίσος με τον λόγο ισχύος ρυμουλκήσεως  $P_E$  προς την απαιτούμενη ισχύ που προσδίδεται στην έλικα  $P_D$ , δηλαδή :

$$\eta_D = \frac{P_E}{P_D} = \frac{P_E}{P_T} \times \frac{P_T}{P_D} = \eta_H \times \eta_B = \eta_H \times \eta_0 \times \eta_R \quad (3.6)$$

Ακολούθως έχουμε τον βαθμό απόδοσης άξονα  $\eta_S$  όπου εξαρτάται από την ευθυγράμμιση και την λίπανση των εδράνων του άξονα και του μειωτήρα εάν υπάρχει. Ο βαθμός απόδοσης του άξονα είναι ίσος με τον λόγο της ισχύος  $P_D$  που προσδίδεται στην έλικα και της ισχύος πύδης  $P_B$  που παράγει η Κύρια Μηχανή, δηλαδή:

$$\eta_S = \frac{P_D}{P_B} \quad (3.7)$$

Ο βαθμός απόδοσης του άξονα είναι κανονικά περίπου 0,985, αλλά μπορεί να μεταβάλλεται από  $0,96 \div 0,995$ .

Τέλος λοιπόν ο ολικός βαθμός απόδοσης  $\eta_{tot}$  είναι ίσος με τον λόγο ισχύος ρυμουλκήσεως  $P_E$  προς την απαιτούμενη ισχύ πύδης  $P_B$  που παράγεται από την Κύρια Μηχανή, δηλαδή:

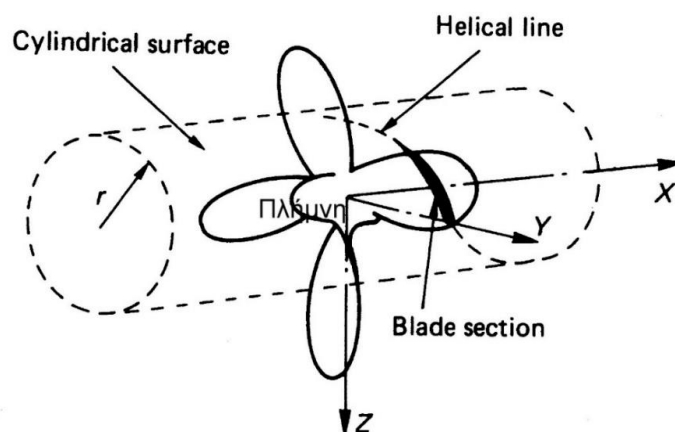
$$\eta_{tot} = \frac{P_E}{P_B} = \frac{P_E}{P_D} \times \frac{P_D}{P_B} = \eta_D \times \eta_S = \eta_H \times \eta_0 \times \eta_R \times \eta_S \quad (3.8)$$

### 3.4 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΕΛΙΚΑΣ

Η έλικα αποτελεί το πιο διαδεδομένο σύστημα πρόωσης τα τελευταία 150 χρόνια, αποτελεί δε κοινό στοιχείο της εμπειρίας του καθενός μας. Έτσι, αν και όπως κάθε τρισδιάστατο γεωμετρικό σώμα χρειάζεται για να περιγραφεί άπειρους βαθμούς ελευθερίας (τόσους όσα τα γεωμετρικά σημεία που την περιγράφουν), διαθέτει ‘κανονικότητες’ που μας επιτρέπουν την ‘μείωση της πληροφορίας’ που απαιτείται για την περιγραφή της γεωμετρίας της. Σύμφωνα με την παραδοσιακή διαδικασία, η γεωμετρία της έλικας μπορεί να ‘χτιστεί’ χρησιμοποιώντας τη γεωμετρία δύο απλούστερων γεωμετρικών οντοτήτων:

1. Της ‘ελικοειδούς γραμμής’ (helical line), με την βοήθεια της οποίας ‘χτίζεται’ η ‘ελικοειδής επιφάνεια αναφοράς’, που είναι επιφάνεια ‘στη γειτονιά’ της πραγματικής τρισδιάστατης γεωμετρίας του πτερυγίου.

2. Της ‘δυσδιάστατης’ υδροτομής, η οποία αποτελεί την απαραίτητη ‘διαταραχή’ της ‘ελικοειδούς επιφάνειας αναφοράς’ προκειμένου να παραχθεί το πτερύγιο της έλικας.



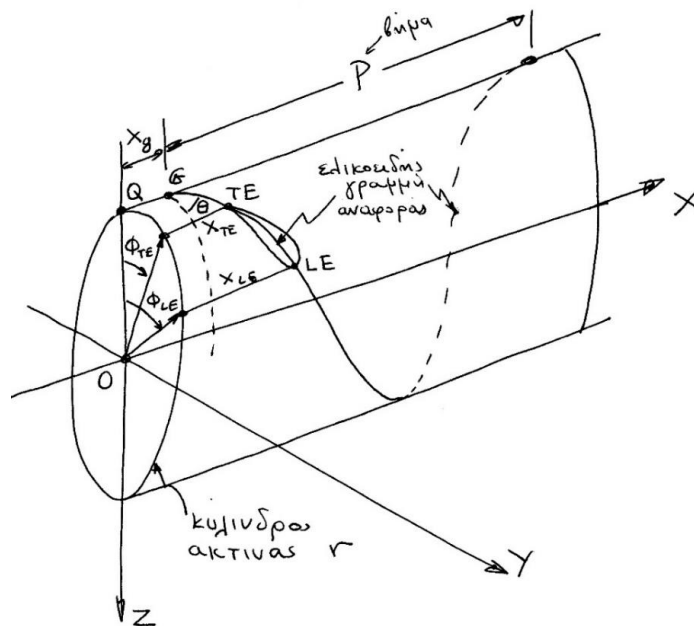
Σχήμα 3.5: Τετράπτερη έλικα και η πλήμνη της



Σχήμα 3.6: Σύγχρονη τετράπτερη έλικα με μεγάλη πλευρική απόκλιση (highly skewed) ρυθμιζόμενου βήματος (controllable pitch)

Στο σχήμα 3.5 φαίνεται το σύστημα συντεταγμένων κατά ITTC, η τομή του πτερυγίου (blade section) στην ακτίνα  $r$  και η ελικοειδής γραμμή (helical line) αναφοράς της τομής του πτερυγίου. Στο σχήμα αυτό απεικονίζεται το σύστημα συντεταγμένων  $(x, y, z)$ , με τον άξονα των  $x$  να συμπίπτει με τον άξονα έλικας και φορά προς την πλώρη του πλοίου, τον άξονα των  $y$  οριζόντιο και τον άξονα των  $z$  κατακόρυφο προς τα κάτω (δεξιόστροφο σύστημα). Στο ίδιο σχήμα καθώς και στο σχήμα 3.6 φαίνεται έλικα με τέσσερα πτερύγια καθώς και η 'πλήμνη-της' (στερεό σώμα κυλινδρικής μορφής που εδράζονται τα πτερύγια). Στο σχήμα 3.5 φαίνεται κύλινδρος ακτίνας  $r$ , ομοαξονικός με την έλικα, ο οποίος τέμνει το πτερύγιο της έλικας σε σχήμα που ονομάζουμε τομή του πτερυγίου (blade section). Η τομή του πτερυγίου έχει το σχήμα της 'υδροτομής', το οποίο, ως γνωστόν, ευνοεί την ανάπτυξη σημαντικής 'άνωσης' με μικρή 'αντίσταση'. Τα χείλη 'πρόσπτωσης' (LE – Leading Edge) και 'εκφυγής' (TE – Trailing Edge) της τομής του πτερυγίου ορίζουν μονοσήμαντα την γεωμετρία μίας 'ελικοειδούς γραμμής' (helical line) βήματος  $P$  και γωνίας βήματος  $\theta$ , που στη συνέχεια θα ονομάζουμε 'ελικοειδή γραμμή αναφοράς', σχήμα 3.7. Το βήμα  $P$  και η γωνία βήματος  $\theta$  συνδέονται (κατά τα γνωστά) με τη σχέση:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{P}{2 \times \pi \times r} \quad (3.9)$$



Σχήμα 3.7: Ορισμός της ελικοειδούς γραμμής αναφοράς από τα χείλη πρόσπτωσης (LE) και εκφυγής (TE) της τομής του πτερυγίου στην ακτίνα  $r$ . Ορισμός του βήματος  $P$  και της γωνίας βήματος  $\theta$  της ελικοειδούς γραμμής αναφοράς.

### 3.4.1 ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΤΗΣ ΕΛΙΚΑΣ

Η διάμετρος της έλικας είναι η διάμετρος του κύκλου που περιγράφουν τα άκρα των πτερυγίων της (blade tips). Η διάμετρος επιλέγεται, πρώτιστα, από το ύψος των στροφών ανά λεπτό που θα περιστρέφεται η έλικα, σε συνδυασμό



με την ισχύ που θα μεταφέρεται σ' αυτήν μέσω του άξονα και των γραναζιών. Ακόμα, η κλίση της έλικας στις διάφορες συνθήκες πλεύσης καθώς και η ταχύτητα που θ' αναπτύσσει το σκάφος παίζουν ουσιαστικό ρόλο στον ορισμό της διαμέτρου. Σε μία σειρά ομοειδών ελίκων η διάμετρος, συνήθως, είναι μεγαλύτερη όταν η προπέλα προορίζεται για σκάφη που αναπτύσσουν μικρότερες ταχύτητες και μικραίνει όταν προορίζεται για σκάφη που είναι πιο γρήγορα. Όταν όλα τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά της προπέλας παραμένουν σταθερά, η διάμετρος αυξάνεται καθώς αυξάνεται και η ιπποδύναμη του κινητήρα. Επίσης, η διάμετρος αυξάνεται όταν οι στροφές ανά λεπτό της προπέλας μειώνονται (κινητήρας με μικρότερο ύψος στροφών, ή ρεβέρσα με μεγαλύτερη μείωση), αλλά και όταν αυξάνεται η επιφάνεια των πτερυγίων της. Για τη επίτευξη του υψηλότερου βαθμού αποδόσεως προώσεως  $\eta_D$ , θα προτιμηθεί κανονικά η μεγαλύτερη δυνατή διάμετρος έλικας  $d$ . Όμως το πρυμναίο τμήμα της γάστρας μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με τον τύπο του πλοίου και την σχεδίαση του, και η απαραίτητη ανοχή μεταξύ του άκρου των πτερυγίων της έλικας και της γάστρας θα εξαρτάται από τον τύπο της έλικας. Ο περιορισμός του μεγέθους της έλικας δεν έχει τόση σημασία για πλοία εμπορευματοκιβωτίων, καθώς αυτά σπάνια πλέουν σε κατάσταση ερματισμού. Όλοι οι παραπάνω παράγοντες σημαίνουν ότι ένας ακριβής λόγος διάμετρος έλικας/βύθισμα σχεδιάσεως  $d/D$  δεν μπορεί να δοθεί, αλλά σαν εμπειρικό κανόνα μπορεί να χρησιμοποιήσει κανείς τις παρακάτω αναφερόμενες προσεγγίσεις και το γεγονός ότι μία μεγάλη διάμετρος  $d$  θα έχει κανονικά ως αποτέλεσμα έναν χαμηλό ρυθμό περιστροφής  $n$ .

Πλοίο φορτίου χύδην και δεξαμενόπλοιο :  $d/D < \text{περίπου } 0.65$

Πλοίο εμπορευματοκιβωτίων (container) :  $d/D < \text{περίπου } 0.74$

Τέλος για λόγους αντοχής και παραγωγής, η διάμετρος της έλικας γενικά δεν θα ξεπερνά τα 10m και δεν θα απορροφά ισχύ μεγαλύτερη από 90000KW.

### 3.4.2 ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ ΤΗΣ ΕΛΙΚΑΣ

Ο αριθμός πτερυγίων  $z$  επιλέγεται με σκοπό να αποφευχθεί ο συντονισμός μεταξύ της συχνότητας πτερυγίου ( $= z \times n$ ) και διαφόρων κατασκευαστικών στοιχείων. Επίσης επιλέγεται έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθούν φαινόμενα δυναμικής καταπόνησης του συστήματος άξονα (μελέτη στρεπτικών ταλαντώσεων συστήματος άξονα – torsional vibration study). Έλικες μπορούν να κατασκευασθούν με 2,3,4,5, ή 6 πτερύγια. Όσο λιγότερος ο αριθμός των πτερυγίων, τόσο μεγαλύτερος ο βαθμός αποδόσεως της έλικας. Όμως για λόγους αντοχής, έλικες που θα υποστούν ισχυρά φορτία δεν μπορούν να κατασκευασθούν μόνο με δύο ή τρία πτερύγια. Έλικες με δύο πτερύγια χρησιμοποιούνται σε μικρά σκάφη και με 4, 5 και 6 πτερύγια σε μεγάλα πλοία. Τα πλοία που χρησιμοποιούν τις 2-Χ μηχανές της πρόωσης είναι κατά κανόνα μεγάλοι μεγέθους και έχουν έλικες με 4 πτερύγια. Πλοία με σχετικά μεγάλες απαιτήσεις ισχύος και έλικες που λειτουργούν με υψηλή φόρτιση, για παράδειγμα, πλοία εμπορευματοκιβωτίων μπορεί να χρειάζονται έλικες με 5 ή 6 πτερύγια. Για λόγους ταλαντώσεων, έλικες με ορισμένο αριθμό πτερυγίων μπορεί να αποφεύγονται σε ειδικές περιπτώσεις ώστε να μην υπάρχει διέγερση φυσικών συχνοτήτων στην γάστρα ή στην υπερκατασκευή του πλοίου.

### 3.4.3 ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΟΥ ΛΟΓΟΥ ΕΚΤΕΤΑΜΕΝΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ

Ο λόγος εκτεταμένης επιφάνειας επιλέγεται έτσι, ώστε:

1. Να μειωθεί η έκταση της σπηλαίωσης (η αύξηση της επιφάνειας του πτερυγίου οδηγεί σε μείωση της σπηλαίωσης).
2. Να αυξηθεί ο βαθμός απόδοσης (η αύξηση του λόγου εκτεταμένης επιφάνειας οδηγεί σε μικρή μείωση του βαθμού απόδοσης που σχετίζεται με απώλειες συνεκτικότητας).

Τονίζεται ότι οι προηγούμενες δύο απαιτήσεις είναι αντικρουόμενες!

Ένας χρήσιμος τύπος για μια αρχική εκτίμηση του λόγου είναι ο τύπος του Keller:

$$\frac{A_E}{A_0} = \frac{(1,3 + 0,3 z) \times T}{(p_0 - p_v) \times D^2} + k \quad (3.10)$$

Επιπλέον ο λόγος εκτεταμένης επιφάνειας της έλικας (expanded blade area ratio) ορίζεται από τη σχέση:

$$\frac{A_E}{A_0} = \frac{z \times E}{\frac{\pi \times D^2}{4}} \quad (3.11)$$

Όπου  $A_0$  το εμβαδόν του δίσκου της έλικας ( $A_0 = \frac{\pi \times D^2}{4}$ ,  $D$  η διάμετρος της έλικας).

Ο συντελεστής επιφάνειας ορίζει την ανεπτυγμένη επιφάνεια της έλικας σε σχέση με την επιφάνεια του δίσκου της. Ένας συντελεστής 0.55 θεωρείται ότι είναι καλός. Ο συντελεστής εκτεταμένης επιφάνειας παραδοσιακών τετραπτέρυγων ελίκων έχει μικρή σημασία, καθώς μία υψηλότερη τιμή θα οδηγήσει απλώς σε αυξημένη αντίσταση στην ίδια την έλικα και, έτσι, θα έχει μικρή επίπτωση στο τελικό αποτέλεσμα.

### 3.4.4 ΛΟΓΟΣ ΒΗΜΑΤΟΣ ΠΡΟΣ ΔΙΑΜΕΤΡΟ P/D

Ο λόγος βήματος προς διάμετρο  $p/d$  είναι πολύ σημαντικός για τις διαστάσεις της έλικας, σχήμα 3.8. Το βήμα  $p$ , είναι η απόσταση που η έλικα "βιδώνεται" προς τα μπροστά μέσα στο νερό ανά περιστροφή υπό την προϋπόθεση ότι δεν υπάρχει ολίσθηση. Καθώς το βήμα μπορεί να ποικίλει κατά μήκος της ακτίνας του πτερυγίου, ο λόγος αυτός συνήθως αναφέρεται στο βήμα στα  $0,7r$ , όπου  $r = d/2$  είναι η ακτίνα της έλικας. Για να επιτευχθεί ο καλύτερος βαθμός απόδοσης πρόωσης για δεδομένη διάμετρο της έλικας, πρέπει να βρεθεί ένας βέλτιστος λόγος βήματος προς διάμετρο, ο οποίος πάλι αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο ρυθμό περιστροφής σχεδιάσεως. Αν χρειάζεται ένας χαμηλότερος ρυθμός περιστροφής σχεδιάσεως, ο λόγος βήματος προς την διάμετρο πρέπει να αυξηθεί και αντίστροφα, κάτι που θα έχει κόστος αποδόσεως.

### 3.4.5 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΕΛΙΚΑΣ J, $K_T$ ΚΑΙ $K_Q$

Ορισμένοι αδιάστατοι συντελεστές έλικας για να μελετήσουμε την θεωρία της έλικας έχουν εισαχθεί σε σχέση με την διάμετρο  $d$ , τον ρυθμό

περιστροφής  $n$  και την πυκνότητα μάζας του νερού  $\rho$ . Οι τρεις πιο σημαντικοί απ' αυτούς είναι:

Ο συντελεστής προσχώρησης  $J$  είναι μια αδιάστατη έκφραση της ταχύτητας της προσχώρησης  $V_A$ , και ορίζεται ως:

$$J = \frac{V_A}{n \times d} \quad (3.12)$$

Η δύναμη ώσης  $T$  εκφράζεται αδιάστατα με την βοήθεια του συντελεστή ώσης  $K_T$ , δηλαδή:

$$K_T = \frac{T}{\rho \times n^2 \times d^4} \quad (3.13)$$

Η ροπή της έλικας εκφράζεται από τον τύπο:

$$Q = \frac{P_D}{2\pi \times n} \quad (3.14)$$

Και εκφράζεται αδιάστατα με τον συντελεστή ροπής  $K_Q$ , δηλαδή:

$$K_Q = \frac{Q}{\rho \times n^2 \times d^5} \quad (3.15)$$

Άρα για την απόδοση της έλικας  $\eta_0$  όπως βλέπουμε στο σχήμα 3.1, μπορεί να υπολογιστεί με την βοήθεια των παραπάνω συντελεστών και ορίζεται ως:

$$\eta_0 = \frac{P_T}{P_D} = \frac{T \times V_A}{Q \times 2\pi \times n} = \frac{K_T}{K_Q} \times \frac{J}{2\pi} \quad (3.16)$$

Με την βοήθεια ειδικών και πολύ πολύπλοκων διαγραμμάτων της έλικας, που περιέχουν μεταξύ άλλων καμπύλες των  $J$ ,  $K_T$  και  $K_Q$ , είναι δυνατό να βρεθούν και να υπολογιστούν οι διαστάσεις της έλικας, ο βαθμός απόδοσης, η ώση, η ισχύς, κ.λπ.

## 3.5 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΕΛΙΚΑΣ

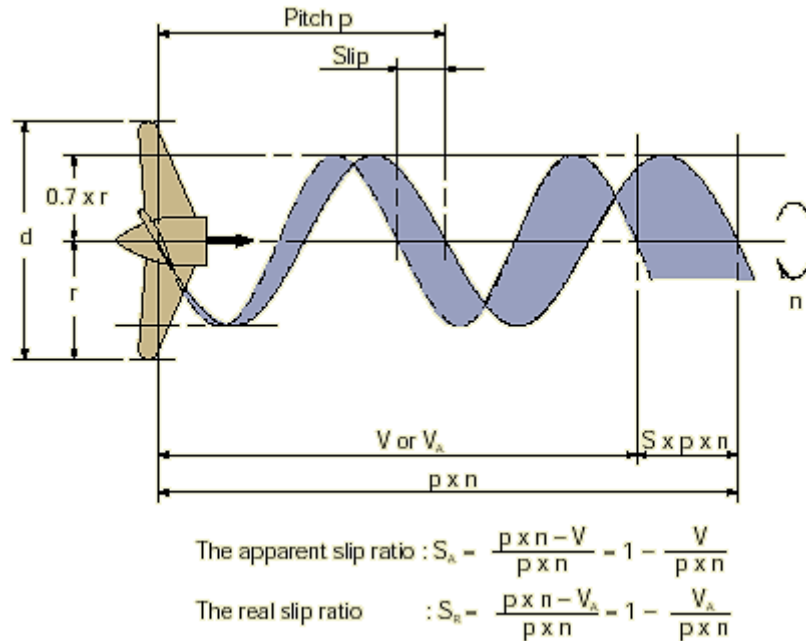
### 3.5.1 ΟΛΙΣΙΘΗΣΗ

Η ολίσθηση της έλικας του πλοίου είναι ένα φαινόμενο που σχετίζεται με συνθήκες λειτουργίας και παράγοντες που επηρεάζουν την έλικα.

Γενικά η έλικα λειτουργεί μέσα σε ένα ρευστό. Αν το ρευστό αυτό δεν υποχωρούσε κατά την λειτουργία της έλικας (δηλαδή, εάν το νερό δεν επιταχυνόταν προς τα πίσω), η έλικα θα προχωρούσε μπροστά με ταχύτητα:

$$V_T = p \times n \quad (3.17)$$

όπου  $n$  είναι ο ρυθμός περιστροφής της έλικας και  $V_T$  θεωρούμε μπροστά από την έλικα ότι το ρευστό είναι ακίνητο, σχήμα 3.8.



Σχήμα 3.8: Κίνηση της έλικας πλοίου, με βήμα p και λόγο ολίσθησης S

Όμως επειδή το ρευστό είναι νερό και πράγματι επιταχύνεται προς τα πίσω, και η πραγματική ταχύτητα της έλικας μειώνεται και γίνεται ίση με την ταχύτητα του πλοίου V. Έτσι η φαινόμενη ολίσθηση μπορεί να εκφραστεί ως  $p \times n - V$ . Επίσης έχουμε και την ταχύτητα  $V_A$ , όπου είναι η ταχύτητα προχώρησης μιας έλικας, δηλαδή μας δίνει την σχετική ταχύτητα του πλοίου σε σχέση με την ταχύτητα του νερού του οποίου πλέει. Επομένως ο φαινόμενος λόγος ολίσθησης  $S_A$ , που είναι αδιάστατος ορίζεται ως:

$$S_A = \frac{V_T - V}{V_T} = 1 - \frac{V}{V_T} \quad (3.18)$$

Ο φαινόμενος λόγος ολίσθησης  $S_A$  δίδει μία αποτύπωση των φορτίων, που ασκούνται στην έλικα κάτω από διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας. Ο φαινόμενος λόγος ολίσθησης αυξάνεται όταν το σκάφος πλέει αντίθετα με τον άνεμο ή τα κύματα, σε ρηγά νερά, όταν η γάστρα είναι ρυπασμένη, και όταν το σκάφος επιταχύνει. Ο πραγματικός λόγος ολίσθησης θα είναι μεγαλύτερος από τον φαινόμενο, γιατί η πραγματική ταχύτητα προχώρησης  $V_A$  της έλικας είναι μικρότερη από την ταχύτητα του πλοίου V.

Ο πραγματικός λόγος ολίσθησης  $S_R$ , που δίδει μία πιο αληθινή εικόνα λειτουργία της έλικας, είναι:

$$S_R = 1 - \frac{V_A}{p \times n} = 1 - \frac{V \times (1 - w)}{p \times n} \quad (3.19)$$

Ο φαινόμενος λόγος ολίσθησης και ο πραγματικός λόγος ολίσθησης δίνονται ως ποσοστό επί τις εκατό και είναι πάντα θετικοί. Ο πραγματικός είναι φανερό ότι είναι πολύ μεγαλύτερος από τον φαινόμενο λόγο ενώ δίνει μια πιο αληθινή εικόνα της λειτουργίας της έλικας.

### 3.5.2 Ο ΝΟΜΟΣ ΤΗΣ ΕΛΙΚΑΣ

Όπως αναφέραμε σε προηγούμενο κεφάλαιο, η αντίσταση  $R$  για πλοία χαμηλής ταχύτητας είναι ανάλογη προς το τετράγωνο της ταχύτητας του πλοίου  $V$ , δηλαδή:

$$R = c \times V^2 \quad (3.20)$$

όπου  $c$  είναι μια σταθερά.

Η απαιτούμενη ισχύς  $P$  είναι ανάλογη προς την τρίτη δύναμη της ταχύτητας  $V$ , συνεπώς:

$$P = R \times V = c \times V^3 \quad (3.21)$$

Για ένα πλοίο με μία έλικα σταθερού βήματος, δηλαδή για μία έλικα της οποίας το βήμα δεν είναι δυνατό να μεταβληθεί, η ταχύτητα  $V$  θα είναι ανάλογη προς τον ρυθμό περιστροφής  $n$ , που εκφράζει ακριβώς τον νόμο της έλικας, που διατυπώνεται ως εξής: "η αναγκαία ισχύς που απορροφάται από την έλικα είναι ανάλογη με την τρίτη δύναμή του ρυθμού περιστροφής της." Άρα:

$$P = c \times n^3 \quad (3.22)$$

Από πραγματικές μετρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί για μια δεδομένη κατάσταση καιρού έδειξαν ότι η σχέση μεταξύ ισχύος και στροφών μηχανής είναι αρκετά λογική, αν και η σχέση ισχύος και ταχύτητας πλοίου συχνά εμφανίζεται με μια δύναμη μεγαλύτερη του τρία. Πιο συγκεκριμένα μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τις εξής σχέσεις:

1. Για πλοία υψηλών ταχυτήτων όπως πλοία εμπορευματοκιβωτίων:

$$P = c \times V^{4.5} \quad (3.23)$$

2. Για πλοία μεσαίου μεγέθους και ταχύτητας όπως ψυγεία, RoRo κ.λπ.:

$$P = c \times V^4 \quad (3.24)$$

3. Για πλοία χαμηλής ταχύτητας, όπως δεξαμενόπλοια πλοία φορτίου χύδην κ.λπ.:

$$P = c \times V^{3.5} \quad (3.25)$$

Φυσικά τον νόμο της έλικας μπορούμε να τον χρησιμοποιήσουμε για όμοιες λειτουργίες του πλοίου. Ένα παράδειγμα είναι όταν η γάστρα του πλοίου έχει ρυπανθεί μετά από κάποιο χρόνο λειτουργίας και συνεπώς έχει γίνει πιο τραχεία, το πεδίο του ομόρρου θα είναι διαφορετικό από αυτό ενός πλοίου με ομαλή (καθαρή) γάστρα όπως ήταν στις δοκιμές παραλαβής του. Ένα πλοίο με ρυπασμένη γάστρα θα αντιμετωπίζει επομένως αυξημένη αντίσταση και θα έχει ως αποτέλεσμα υψηλή φόρτιση της έλικας, δηλαδή για την ίδια ισχύ στην έλικα ο ρυθμός περιστροφής θα είναι χαμηλότερος. Ο νόμος της έλικας ισχύει για μία άλλη "υψηλότερη" καμπύλη έλικας από αυτή που ισχύει για μια καθαρή γάστρα.

Αντίστοιχα οι ίδιες κατ' αναλογία συνθήκες ισχύουν και όταν το πλοίο ταξιδεύει με άσχημο καιρό αντίθετα στο ρεύμα, σε ένα δυνατό άνεμο ή μεγάλα

κύματα, όπου ειδικά η αντίσταση κυματισμού μπορεί να οδηγήσει την έλικα να λειτουργεί με υψηλότερη φόρτιση από ότι σε ήρεμο καιρό. Από την άλλη μεριά, εάν το πλοίο πλέει στην κατάσταση ερματισμού, δηλαδή με χαμηλότερο εκτόπισμα, ο νόμος της έλικας ισχύει για μία "χαμηλότερη" καμπύλη έλικας, δηλαδή για την ίδια ισχύ έλικας ο ρυθμός περιστροφής της έλικας είναι υψηλότερος.

Ο νόμος της έλικας για πλοία με έλικα σταθερού βήματος χρησιμοποιείται κυρίως σε λειτουργία με μερική φόρτιση. Έτσι χρησιμοποιείται επίσης και στο διάγραμμα φόρτισης και στο πεδίο λειτουργίας των κινητήρων Diesel, για να προσδιορίσει τις καμπύλες λειτουργίας της μηχανής για καθαρή και ρυπασμένη γάστρα, κ.λπ. Αυτά τα διαγράμματα θα τα μελετήσουμε εκτενέστερα σε επόμενη ενότητα.

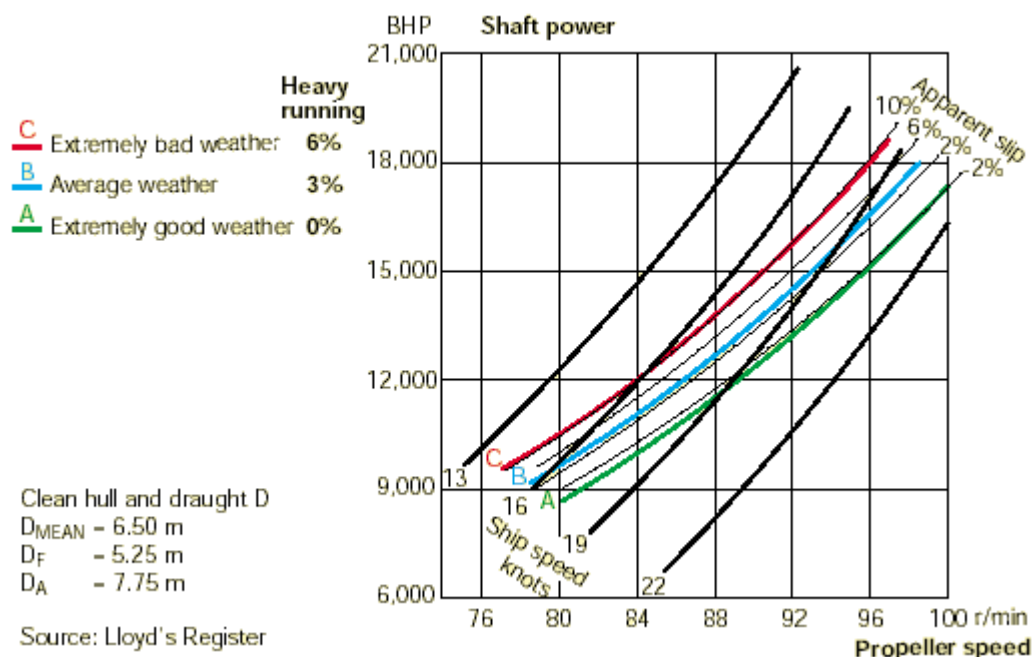
Είναι αξιοσημείωτο όμως ότι και κάτω από κάποια ορισμένη ταχύτητα, που ονομάζεται ταχύτητα ελιγμών η ικανότητα του πηδαλίου να στρέφει το πλοίο δεν είναι ικανοποιητική, λόγω πολύ χαμηλής ταχύτητας του νερού που φθάνει στο πηδάλιο. Είναι μάλλον δύσκολο να δώσει κανείς με ακρίβεια μία τιμή στην ταχύτητα ελιγμών, καθώς η ταχύτητα του νερού που φθάνει στο πηδάλιο εξαρτάται από τον ομόρρο της έλικας. Συχνά αναφέρεται μία ταχύτητα ελιγμών της τάξης των 3.5 - 4.5 κόμβων. Σύμφωνα με τον νόμο της έλικας, μία αντίστοιχα χαμηλή ισχύ προώσεως θα χρειαστεί, αλλά φυσικά, αυτή θα είναι υψηλότερη για λειτουργία με άσχημο καιρό με αυξημένη αντίσταση του πλοίου.

### 3.5.3 ΜΕΓΑΛΑ ΚΥΜΑΤΑ

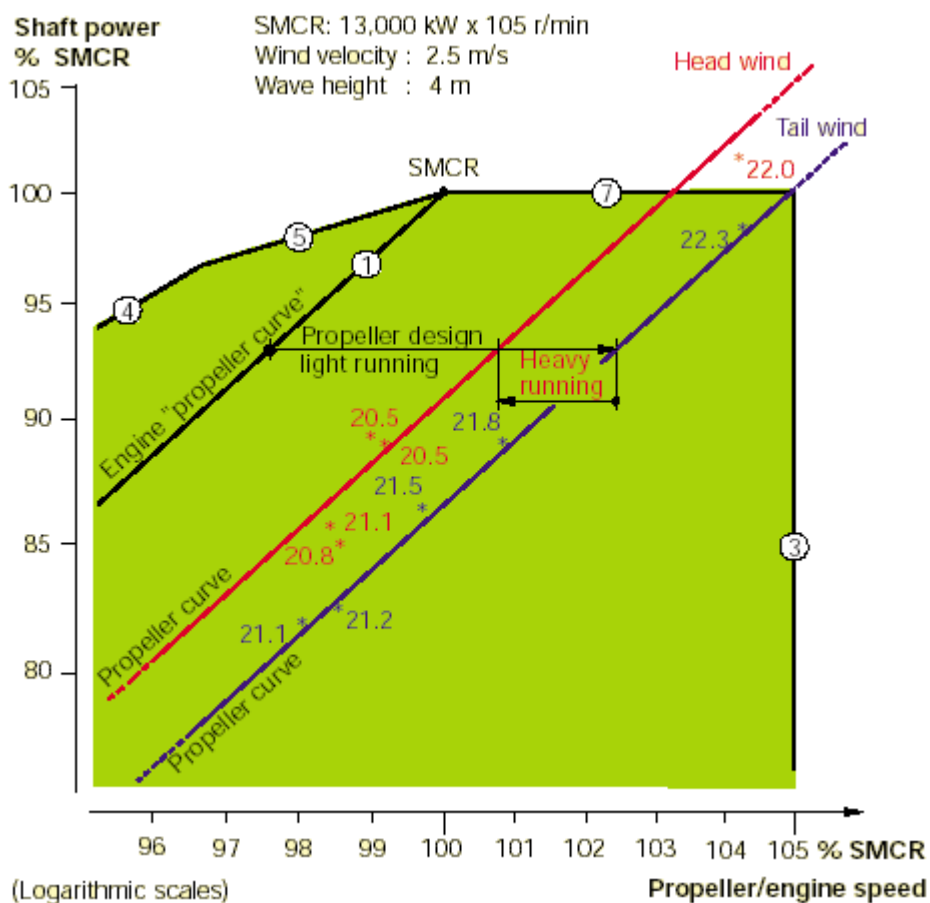
Κατά την πλεύση με άσχημο καιρό αντίθετα στο ρεύμα, με υψηλή αντίσταση κυματισμού, η έλικα μπορεί να λειτουργεί με 7-8% επιπλέον φόρτιση από ότι με καλό καιρό, δηλαδή για την ίδια ισχύ έλικας, ο ρυθμός περιστροφής να είναι 7-8% χαμηλότερος. Ένα παράδειγμα με ένα μικρό πλοίο εμπορευματοκιβωτίων φαίνεται στο σχήμα 3.9. Τα δεδομένα λειτουργίας μετρήθηκαν για την περίοδο ενός έτους και περιλαμβάνουν μόνο την επίδραση των καιρικών συνθηκών! Τα μετρημένα σημεία λειτουργίας έχουν κατηγοριοποιηθεί σε τρεις μέσες καταστάσεις καιρού και δείχνουν μια επιπλέον μέση φόρτιση 6%, αν και στην πράξη, σε πλεύση με αντίθετα μεγάλα κύματα, η επιπλέον φόρτιση βρέθηκε να είναι ακόμη μεγαλύτερη.

Με σκοπό την αποφυγή της σφυρόκρουσης (slamming) του πλοίου, και συνεπώς τις ζημιές στην πλώρα και υπερτάχυνση (racing) της έλικας αν ξενερίζει, η ταχύτητα του πλοίου μειώνεται από τον καπετάνιο.

Ένα άλλο παράδειγμα φαίνεται στο σχήμα 3.10 και αναφέρεται σε ένα πλοίο ψυγείο κατά την διάρκεια δοκιμών θαλάσσης. Αν και η ταχύτητα του ανέμου είναι σχετικά χαμηλή, μόλις 2.5 m/s, και το ύψος του κύματος είναι 4 μέτρα, οι μετρήσεις δείχνουν μια επιπλέον φόρτιση 1.5 % για πλεύση με μετωπικούς ανέμους σε σχέση με την πλεύση με ούριο άνεμο.



Σχήμα 3.9: Λειτουργικά δεδομένα ενός μοντελικού μικρού πλοίου εμπορευματοκιβωτίων κατά την διάρκεια ενός έτους



Σχήμα 3.10: Σχέση ισχύος περιστροφικής ταχύτητας έλικας και ταχύτητας πλοίου κατά την διάρκεια δοκιμών θαλάσσης πλοίου ψυγείου

### 3.5.4 Η ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΗΣ ΕΛΙΚΑΣ ΣΕ ΑΥΞΗΜΕΝΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΠΛΟΙΟΥ

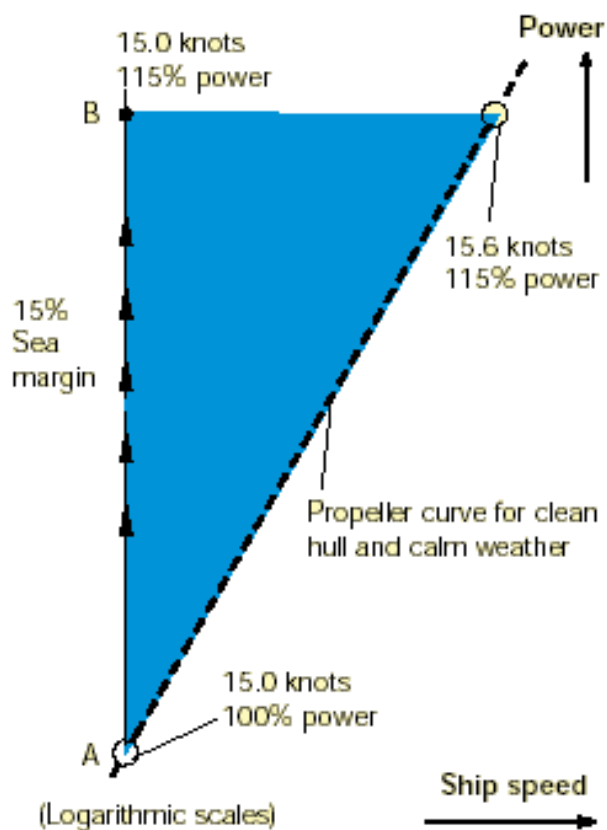
Η διαφορά μεταξύ των καμπυλών έλικας βαριάς και ελαφριάς λειτουργίας μπορεί να εξηγηθεί από ένα παράδειγμα ενός πλοίου που χρησιμοποιεί το 100% της ισχύος πρόωσης και ταξιδεύει με 15 κόμβους σε συνθήκες καθαρής γάστρας και ήρεμου καιρού. Με 15% επιπλέον ισχύ, η αντίστοιχη ταχύτητα πλοίου μπορεί να αυξηθεί από 15 σε 15.6 κόμβους.

Με συνθήκες ήρεμου καιρού, μπορούμε να προσθέσουμε ένα επιπλέον περιθώριο ισχύος, που ονομάζεται περιθώριο θάλασσας, το οποίο συνήθως επιλέγεται να είναι 15%. Αυτό το περιθώριο ισχύος αφορά την επιπλέον αντίσταση που έχει το πλοίο λόγω συνθηκών καιρού. Ωστόσο, σε συνθήκες πολύ άσχημου καιρού, η επίδραση στην αντίσταση μπορεί να είναι πολύ μεγαλύτερη.

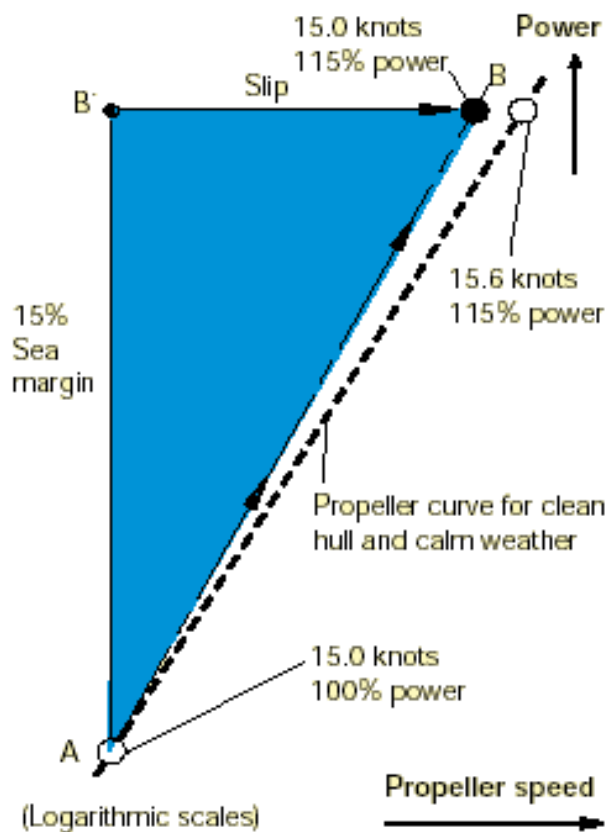
Στο σχήμα 3.11 παρουσιάζεται η ισχύς πρόωσης ως συνάρτηση της ταχύτητας του πλοίου. Όταν η αντίσταση του πλοίου αυξάνει σε ένα επίπεδο στο οποίο απαιτείται 15% επιπλέον ισχύ για να διατηρηθεί η ταχύτητα των 15 κόμβων, το σημείο λειτουργίας A θα μετακινηθεί προς το B. Στο σχήμα 3.12 παρουσιάζεται η ισχύς πρόωσης ως συνάρτηση της περιστροφικής ταχύτητας της έλικας. Ως μια πρώτη εκτίμηση, συχνά θεωρείται ότι το σημείο A θα μετακινηθεί προς το B', αφού μια αμετάβλητη ταχύτητα έλικας σημαίνει, με αμετάβλητο βήμα, ότι η έλικα θα προχωρήσει μέσα στο νερό με αμετάβλητη ταχύτητα.

Όμως η έλικα θα εμφανίζει μια ολίσθηση που θα αυξάνεται με την αυξανόμενη ώση που προκαλείται από την αυξανόμενη αντίσταση γάστρας. Έτσι το σημείο A θα κινηθεί προς το σημείο B το οποίο στην πραγματικότητα είναι πολύ κοντά στην καμπύλη έλικας που περνάει από το A. Το σημείο B θα τοποθετηθεί τώρα σε μια καμπύλη έλικας που είναι ελαφρώς πιο βαριά συγκρινόμενη με την καμπύλη καθαρής γάστρας και ήρεμου καιρού. Μερικές φορές, για παράδειγμα όταν η γάστρα του πλοίου είναι ρυπασμένη και το πλοίο ταξιδεύει με κακό καιρό και μετωπικούς ανέμους, η αύξηση της αντίστασης μπορεί να είναι πολύ μεγαλύτερη και έτσι η αύξηση της απαιτούμενης ισχύος μπορεί να είναι της τάξης του 100% ή και ακόμα μεγαλύτερη. Ένα παράδειγμα φαίνεται στο σχήμα 3.13. Σε αυτό το παράδειγμα, όπου το 100% της ισχύος θα δώσει μια ταχύτητα πλοίου 15 κόμβων, σημείο A, μια ταχύτητα πλοίου, για παράδειγμα, 12.3 κόμβων σε κατάσταση καθαρής γάστρας και ήρεμου νερού, σημείο C, θα απαιτεί περίπου 50% ισχύος πρόωσης, αλλά σε συνθήκες άσχημου καιρού, είναι δυνατόν να αποκτήσει ταχύτητα 12.3 κόμβων μόνο με το 100% της ισχύος πρόωσης, δηλαδή για 100% ισχύ πηγαίνει από το A στο D. Το σημείο λειτουργίας D μπορεί να τοποθετηθεί σχετικά μακριά στα αριστερά του σημείου A (πολύ βαριά λειτουργία). Μια τέτοια κατάσταση θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη όταν επιλέγεται κινητήρας για δεδομένη έλικα. Μια λοξή έλικα είναι πιο ευαίσθητη σε βαριά λειτουργία σε σχέση με μια συνηθισμένη έλικα, επειδή η έλικα απορροφά μεγαλύτερη ροπή σε συνθήκες βαριάς λειτουργίας. Για μια έλικα σε δακτύλιο ισχύει το αντίστροφο.

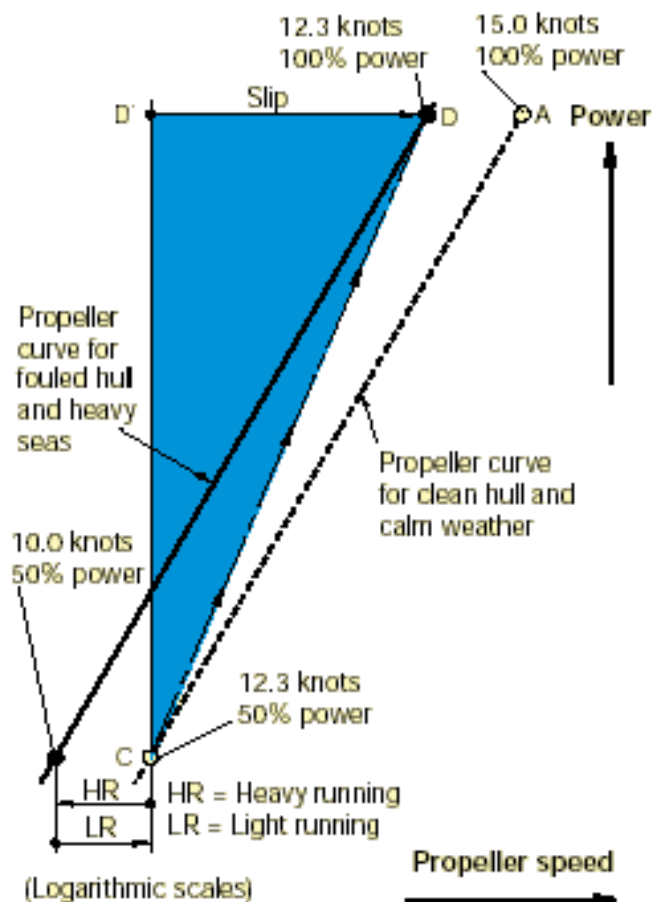




Σχήμα 3.11: Απόδοση ταχύτητας πλοίου με 15% περιθώριο θάλασσας



Σχήμα 3.12: Απόδοση ταχύτητας έλικας με 15% περιθώριο θάλασσας



Σχήμα 3.13 : Απόδοση ταχύτητας έλικας σε μεγάλη επιπρόσθετη αντίσταση

### 3.5.5 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΑΥΞΗΜΕΝΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΗΣ ΕΛΙΚΑΣ

Μαζί με τις παραμέτρους λειτουργίας που αναφέρθηκαν προηγουμένως και που προκαλούν αυξημένη φόρτιση έλικας, οι παράμετροι που αναφέρονται παρακάτω μπορούν να αποτελέσουν έναν δείκτη του κινδύνου/ευαισθησίας εμφάνισης αυξημένης φόρτισης έλικας κατά την διάρκεια πλεύσης με άσχημο καιρό:

1. Σχετικά μικρά πλοία (<70,000dwt) όπως πλοία ψυγεία και μικρά πλοία εμπορευματοκιβωτίων είναι ευαίσθητα, ενώ μεγάλα πλοία όπως μεγάλα δεξαμενόπλοια και πλοία εμπορευματοκιβωτίων είναι λιγότερο ευαίσθητα, αφού τα κύματα είναι σχετικά μικρά σε σχέση με το μέγεθος του πλοίου.
2. Μικρά πλοία ( $L_{PP} < 135m$ , 20000dwt) έχουν μικρή κατευθυντική ευστάθεια και χρειάζονται συχνές διορθώσεις πηδαλίου, οι οποίες αυξάνουν την αντίσταση του πλοίου (ένα αυτο-ελεγχόμενο πηδάλιο θα ελάττωνε αυτή την αντίσταση).
3. Πλοία υψηλών ταχυτήτων είναι πιο ευαίσθητα σε σχέση με τα αργά πλοία, επειδή τα κύματα ασκούν μεγαλύτερη δύναμη στα γρήγορα πλοία απ' ότι στα αργά.
4. Πλοία με επίπεδη πλώρη μπορεί να επιβραδυνθούν γρηγορότερα από τα κύματα σε σχέση με πλοία με οξεία πλώρη. Έτσι ένας βολβός σε σχήμα πέλεκυ μπορεί να κόβει τα κύματα καλύτερα και να μειώνει την τάση αυξημένης φόρτισης.

5. Ρύπανση της γάστρας και της έλικας οδηγεί σε αύξηση της αντίστασης της γάστρας και της ροπής της έλικας. Ο καθαρισμός της έλικας όσο συχνότερα γίνεται, έχει πολύ ευεργετικά αποτελέσματα. Η χρήση αντιρρυπαντικών χρωμάτων θα εμποδίσει την ρύπανση από ζωντανούς οργανισμούς.
6. Η επιτάχυνση του πλοίου θα αυξήσει την ροπή της έλικας και θα προκαλέσει μια προσωρινή αυξημένη φόρτιση της.
7. Η πλεύση σε ρηχά νερά αυξάνει την αντίσταση της γάστρας και μειώνει την κατευθυντική ευστάθεια του πλοίου.
8. Πλοία που έχουν λοξή έλικα (skewed, έλικα με πτερύγια χορδής που έχει επεκταθεί) είναι ικανά να απορροφήσουν μεγαλύτερη ροπή υπό συνθήκες αυξημένης φόρτισης.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

# ΠΕΔΙΟ ΡΥΘΜΙΣΕΩΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

### 4.1 ΠΡΟΩΣΗ ΚΑΙ ΣΗΜΕΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ

Η ισχύς πύξης  $P_B$  ενός κινητήρα Diesel είναι ανάλογη ως προς την μέση πραγματική πίεση (mean effective pressure,  $mep$ )  $P_e$  και τον αριθμό στροφών της μηχανής (ταχύτητα περιστροφής)  $n$ . Χρησιμοποιώντας μια σταθερά  $c$ , η  $P_B$  μπορεί να εκφραστεί:

$$P_B = c \times p_e \times n \quad (4.1)$$

ή αλλιώς, για σταθερή μέση πραγματική πίεση η ισχύς είναι ανάλογη με τον ρυθμό περιστροφής:

$$P_B = c \times n \quad (4.2)$$

Όταν χρησιμοποιείται έλικα σταθερού βήματος η ισχύς μπορεί να εκφραστεί με τον νόμο της έλικας. Σύμφωνα με αυτή την σχέση, η ισχύς πύξης  $P_B$  μπορεί να εκφραστεί ως μία εκθετική συνάρτηση ταχύτητας περιστροφής  $n$  και με εκθέτη  $i$ , δηλαδή:

$$P_B = c \times n^i \quad (4.3)$$

Στο σχήμα 4.1 φαίνεται η σχέση των γραμμικών συναρτήσεων,  $y = a \times x + b$ , (A), χρησιμοποιώντας γραμμικές κλίμακες και των εκθετικών συναρτήσεων  $P_B = c \times n^i$ , (B), χρησιμοποιώντας λογαριθμική κλίμακα.

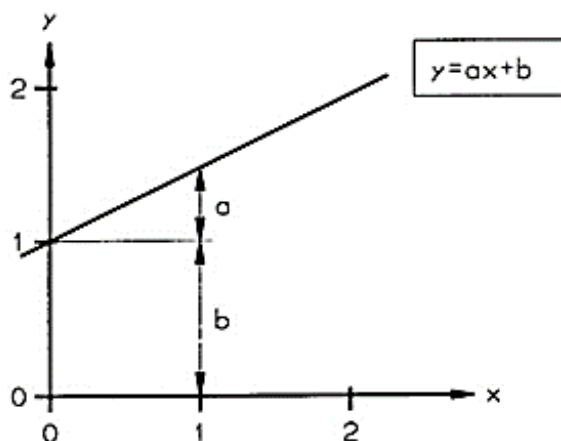
Οι εκθετικές συναρτήσεις θα είναι γραμμικές χρησιμοποιώντας λογαριθμική κλίμακα, δηλαδή:

$$\log(P_B) = i \times \log(n) + \log(c) \quad (4.4)$$

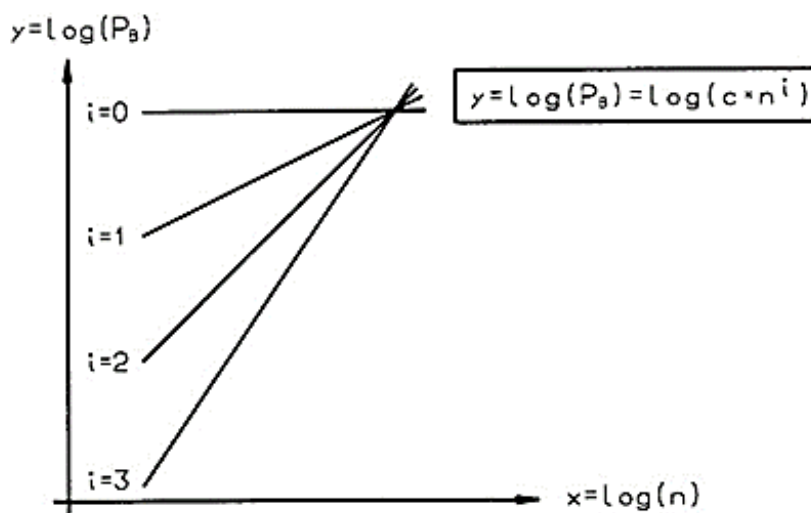
που είναι ισοδύναμη με:

$$y = a \times x + b \quad (4.5)$$

Συνεπώς οι καμπύλες της έλικας θα είναι παράλληλες της ευθείας με κλίση  $i = 3$ , και οι γραμμές της σταθερής μέσης πραγματικής πίεσης θα είναι παράλληλες στις ευθείες με κλίση  $i = 1$ .



A. Ευθείες γραμμές σε γραμμική κλίμακα



$P_a$  = ισχύς μηχανής  
 $c$  = σταθερά  
 $n$  = στροφές μηχανής

$$P_a = c \cdot n^i \implies \begin{cases} \log(P_a) = i \cdot \log(n) + \log(c) \\ y = ax + b \end{cases}$$

B. Εκθετικές καμπύλες σε λογαριθμική κλίμακα

Σχήμα 4.1: Σχέση μεταξύ γραμμικών συναρτήσεων με γραμμική κλίμακα και εκθετικών συναρτήσεων με λογαριθμική κλίμακα

Έτσι λοιπόν στα πεδία λειτουργίας και στα διαγράμματα φόρτισης των κινητήρων Diesel όπως περιγράφονται παρακάτω, χρησιμοποιείται λογαριθμική κλίμακα μετατρέποντας τις διάφορες καμπύλες σε απλές ευθείες γραμμές.

#### 4.1.1 ΣΗΜΕΙΟ ΣΧΕΔΙΑΣΕΩΣ ΕΛΙΚΑΣ

Με υπολογισμούς βάσει θεωρητικών τύπων βασίζονται οι εκτιμήσεις για την απαιτούμενη ισχύς της έλικας και την ταχύτητα περιστροφής της, και συχνά με υπολογισμούς από μετρήσεις σε πειραματικές δεξαμενές, και τα δύο όμως υποθέτουν βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας, δηλαδή καλό καιρό και καθαρή γάστρα. Ο συνδυασμός ταχύτητας και ισχύος που προκύπτει μπορεί να ονομαστεί σημείο σχεδιάσεως της έλικας (propeller design point, PD), σχήμα 4.2. Από την άλλη μεριά, μερικά ναυπηγεία και/ή κατασκευαστές ελίκων χρησιμοποιούν μερικές φορές ένα σημείο σχεδιάσεως της έλικας λαμβάνοντας υπ' όψη τους όλο ή μέρος ενός καλούμενου "περιθωρίου θάλασσας" που περιγράφεται παρακάτω.

#### 4.1.2 ΡΥΠΑΣΜΕΝΗ ΓΑΣΤΡΑ

Η γάστρα και η έλικα ρυπαίνονται, όταν το πλοίο έχει ταξιδεύσει για αρκετό καιρό προκαλώντας αλλαγή στο πεδίο του ομόρρου της έλικας και αυξημένη αντίσταση γάστρας. Εάν ταυτόχρονα ο καιρός δεν είναι καλός με ανέμους αντίθετους από την κατεύθυνση του πλοίου, η αντίσταση του πλοίου αυξάνεται περαιτέρω. Συνεπώς, η ταχύτητα του πλοίου θα μειωθεί, εκτός εάν η μηχανή μπορεί να δώσει και άλλη ισχύ, δηλαδή, το φορτίο της έλικας θα αυξηθεί και άλλο και θα λειτουργεί, με αυξημένη φόρτιση (heavy running, HR).

Επίσης, τα καινούργια πλοία υψηλών ταχυτήτων έχουν πάρα πολύ λεία επιφάνεια γάστρας και έλικας κατά την διάρκεια δοκιμών όταν παραδίδονται από το ναυπηγείο. Αυτό σημαίνει ότι η αναπόφευκτη αύξηση της τραχύτητας της επιφάνειας της γάστρας και της έλικας λόγω ρύπανσης κατά την διάρκεια της ζωής του πλοίου, θα οδηγήσει σε μια πολύ αυξημένη φόρτιση έλικας, σε σύγκριση με παλαιότερα πλοία που φτιάχτηκαν με πιο τραχιά επιφάνεια.

#### 4.1.3 ΠΕΡΙΘΩΡΙΟ ΘΑΛΑΣΣΑΣ ΤΟΥ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ

Εάν, την ίδια στιγμή, ο καιρός είναι κακός, με μετωπικούς ανέμους, η αντίσταση του πλοίου θα αυξηθεί πολύ περισσότερο, και η έλικα θα λειτουργεί με πιο αυξημένη φόρτιση.

Όταν καθορίζεται η απαιτούμενη ισχύς του κινητήρα πρόωσης, είναι κοινή τακτική να προστίθεται ένα επιπλέον περιθώριο ισχύος, το αποκαλούμενο «περιθώριο θάλασσας», το οποίο είναι παραδοσιακά περίπου 15% της ισχύος σχεδιάσεως έλικας (PD). Όμως σε μεγάλα πλοία εμπορευματοκιβωτίων το περιθώριο θάλασσας μπορεί να είναι και 20–30%.

Όταν καθορίζεται η απαιτούμενη ταχύτητα του κινητήρα, για το πεδίο λειτουργίας του, προτείνεται—σε σύγκριση με την καμπύλη έλικας καθαρής γάστρας και ήρεμου νερού (6)—να επιλέξουμε την πιο φορτισμένη καμπύλη (2), σχήμα 4.2, που έχει χαμηλότερη ταχύτητα 3-7% σε σχέση με την καμπύλη (6).

#### 4.1.4 ΣΗΜΕΙΟ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Ο συνδυασμός ταχύτητας και ισχύος που προκύπτει — όταν συμπεριλαμβάνεται η βαριά λειτουργία έλικας (heavy running) και το περιθώριο

θάλασσας (sea margin) - ονομάζεται ισχύς πρόωσης συνεχούς λειτουργίας (Service Point, SP) με ρυπασμένη γάστρα και άσχημο καιρό.

Η ισχυρώς φορτισμένη καμπύλη έλικας (καμπύλη 2) για ρυπασμένη γάστρα και άσχημο καιρό θα χρησιμοποιείται κανονικά ως η βάση για την καμπύλη λειτουργίας της μηχανής σε κατάσταση υπηρεσίας, και η καμπύλη έλικας για καθαρή γάστρα και ήρεμο νερό (καμπύλη 6) θα αντιπροσωπεύει την "λειτουργία της έλικας με μειωμένη φόρτιση" (light running, LR).

#### 4.1.5 ΙΣΧΥΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΕ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ

Η ισχύς συνεχούς λειτουργίας σε κατάσταση υπηρεσίας (Continuous Service Rating) είναι η ισχύς, συμπεριλαμβανομένου και του περιθωρίου θάλασσας, στην οποία ο κινητήρας θεωρείται ότι λειτουργεί, και το σημείο S είναι ίδιο με το σημείο πρόωσης σε κατάσταση υπηρεσίας SP, εκτός και εάν υπάρχει εγκατεστημένη γεννήτρια άξονα.

#### 4.1.6 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΕ ΜΕΙΩΜΕΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ

Η καμπύλη της έλικας για ρυπασμένη γάστρα (και μεγάλα κύματα) μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βάση για την καμπύλη λειτουργίας της μηχανής κατά την υπηρεσία, καμπύλη 2, ενώ η καμπύλη της έλικας για καθαρή γάστρα (και ήρεμο καιρό), καμπύλη 6, μπορεί να ισχύει για συνθήκες λειτουργίας σε καινούργια πλοία. Έτσι η καμπύλη της έλικας για καθαρή γάστρα λέγεται ότι αντιπροσωπεύει την "λειτουργία της έλικας με μειωμένη φόρτιση" (light running, LR) και θα συσχετισθεί με συνθήκες ρυπασμένης γάστρας μέσω ενός συντελεστή λειτουργίας με μειωμένη φόρτιση  $f_{LR}$ , ο οποίος, για ίδια ισχύ στην έλικα, ορίζεται ως η επί τοις εκατό αύξηση του ρυθμού περιστροφής  $n$ , σε σύγκριση με τον ρυθμό περιστροφής με ρυπασμένη γάστρα, δηλαδή:

$$f_{LR} = \frac{n_{καθαρή} - n_{ρυπασμένη}}{n_{ρυπασμένη}} \times 100\% \quad (4.6)$$

#### 4.1.7 ΠΕΡΙΘΩΡΙΟ ΜΗΧΑΝΗΣ

Εκτός από το περιθώριο θάλασσας, ένα «περιθώριο μηχανής» της τάξης του 10-15% συχνά προστίθεται, ως ένα περιθώριο λειτουργίας της μηχανής. Το αντίστοιχο σημείο ονομάζεται «προδιαγεγραμμένη Μέγιστη Συνεχής Ισχύς για πρόωση» MP, σχήμα 4.2, και αναφέρεται στο γεγονός ότι η ισχύς για το σημείο SP είναι 10-15% χαμηλότερη από αυτή του σημείου MP, δηλαδή ίση με το 90-85% του MP.

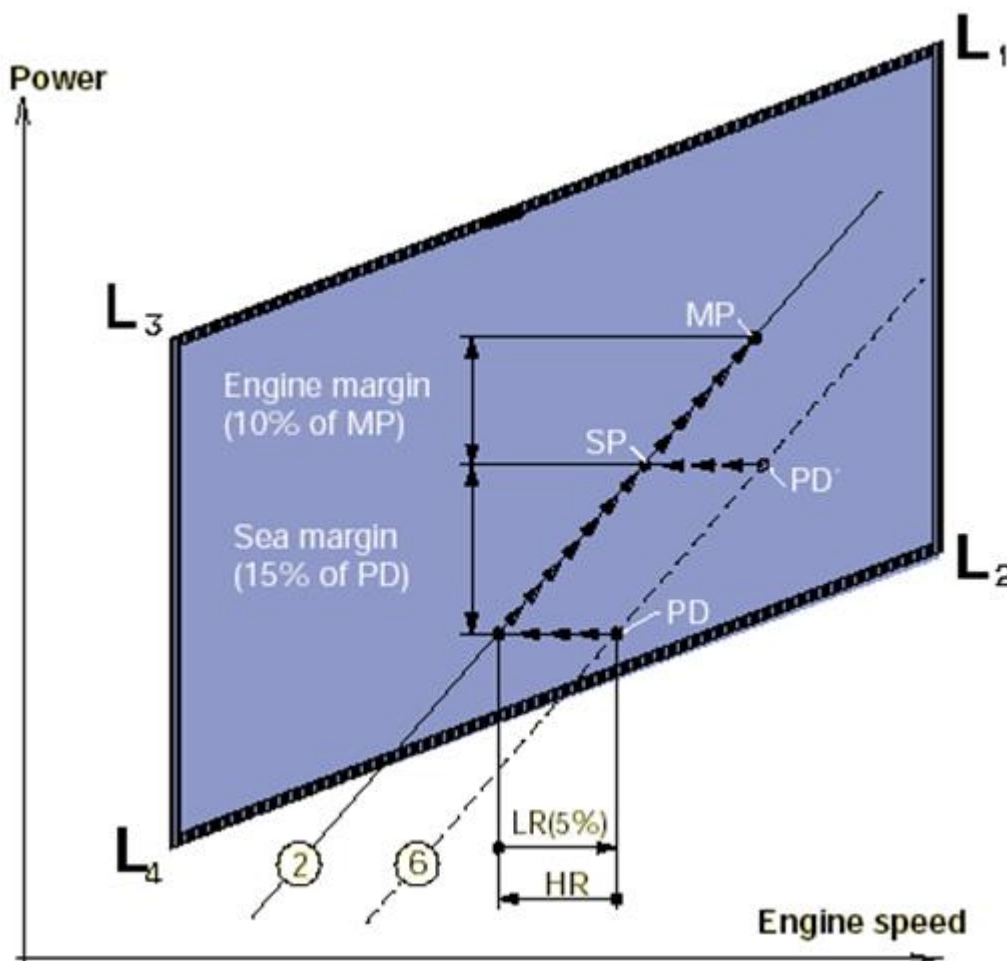
#### 4.1.8 ΠΡΟΔΙΑΓΕΓΡΑΜΜΕΝΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΣΥΝΕΧΗΣ ΙΣΧΥΣ

Η προδιαγεγραμμένη μέγιστη συνεχής ισχύς (Specified Maximum Continuous Rating M) του κινητήρα (σημείο M) είναι η μέγιστη ισχύς που απαιτείται από το ναυπηγείο ή τον ιδιοκτήτη για συνεχή λειτουργία του κινητήρα.

Το σημείο MP είναι το ίδιο με το συγκεκριμένο σημείο μέγιστη συνεχής ισχύς της μηχανής (M) εκτός εάν υπάρχει εγκατεστημένη γεννήτρια που κινείται



από τον άξονα της Κυρίας Μηχανής. Σε τέτοια περίπτωση, η επιπλέον απαιτούμενη ισχύς της γεννήτριας του άξονα πρέπει επίσης να ληφθεί υπ' όψη.



- ② Heavy propeller curve – fouled hull and heavy weather
- ⑥ Light propeller curve – clean hull and calm weather
- MP: Specified propulsion point
- SP: Service propulsion point
- PD: Propeller design point
- PD': Alternative propeller design point
- LR: Light running factor
- HR: Heavy running

Σχήμα 4.2: Σημεία λειτουργίας προώσεως και πεδίο λειτουργίας μηχανής

## 4.2 ΠΕΔΙΟ ΡΥΘΜΙΣΕΩΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ

Για τις 2-Χ μηχανές, που ο κατασκευαστής προσφέρει την δυνατότητα ρυθμίσεως σύμφωνα με τις επιθυμίες του πελάτη, το προσφερόμενο πεδίο λειτουργίας τους περιορίζεται από δύο ευθείες μέσης πραγματικής πίεσης (mep) L<sub>1</sub> - L<sub>3</sub> και L<sub>2</sub> - L<sub>4</sub> και από δύο ευθείες σταθερής ταχύτητας της μηχανής, L<sub>1</sub> - L<sub>2</sub> και L<sub>3</sub> - L<sub>4</sub>, σχήμα 4.2.

Το σημείο L<sub>1</sub> αντιστοιχεί στην ονομαστική μέγιστη συνεχή ισχύ του συγκεκριμένου τύπου μηχανής. Μέσα στο πεδίο λειτουργίας υπάρχει απόλυτη

ελευθερία να επιλέξει κανείς και να ορίσει ως μέγιστη συνεχή λειτουργία MCR (maximum continuous rating) οποιοδήποτε σημείο M και το αντίστοιχο σημείο βέλτιστης λειτουργίας O (όπως θα δούμε παρακάτω), που είναι το βέλτιστο για το πλοίο και τις προδιαγραφές χρήσεως και λειτουργίας.

Με βάση τα σημεία λειτουργίας της μηχανής και της προώσεως μπορεί κανείς να σχεδιάσει (στο ίδιο διάγραμμα) το πεδίο λειτουργίας μιας σχετικής μηχανής. Το συγκεκριμένο σημείο μέγιστης συνεχή λειτουργίας M πρέπει να βρίσκεται μέσα στα περιθώρια του πεδίου λειτουργίας. Εάν δεν είναι, η ταχύτητα της έλικας θα πρέπει να αλλάξει ή κάποιος άλλος τύπος Κύριας Μηχανής θα πρέπει να εκλεγεί. Ωστόσο σε ειδικές περιπτώσεις, το σημείο M μπορεί να βρίσκεται δεξιά της γραμμής  $L_1 - L_2$ .

Το σημείο βέλτιστης λειτουργίας O είναι ο συνδυασμός ισχύος και ταχύτητας περιστροφής (rating) όπου γίνεται η σύζευξη κινητήρα - υπερσυμπιεστή και στον οποίο ρυθμίζονται ο χρονισμός της μηχανής και ο λόγος συμπίεσης. Όπως φαίνεται στα επόμενα σχήματα το σημείο βέλτιστης λειτουργίας τοποθετείται στην γραμμή 1 του διαγράμματος φόρτισης, και η βέλτιστη ισχύς μπορεί να είναι από 85%÷100% της ισχύος του σημείου M, όταν ληφθούν υπ' όψη ο υπερπληρωτής και ο χρονισμός (εγχύσεως καυσίμου) της μηχανής.

Το σημείο βέλτιστης λειτουργίας O πρέπει να τοποθετείται μέσα στο πεδίο λειτουργίας της μηχανής. Σε μερικές περιπτώσεις, το καθορισμένο σημείο μέγιστης συνεχή λειτουργίας, M, μπορεί να τοποθετείται έξω από το πεδίο λειτουργίας, αλλά μόνον δεξιά της γραμμής  $L_1 - L_2$  και, φυσικά μόνο όταν το σημείο βέλτιστης λειτουργίας O βρίσκεται μέσα στο πεδίο λειτουργίας.

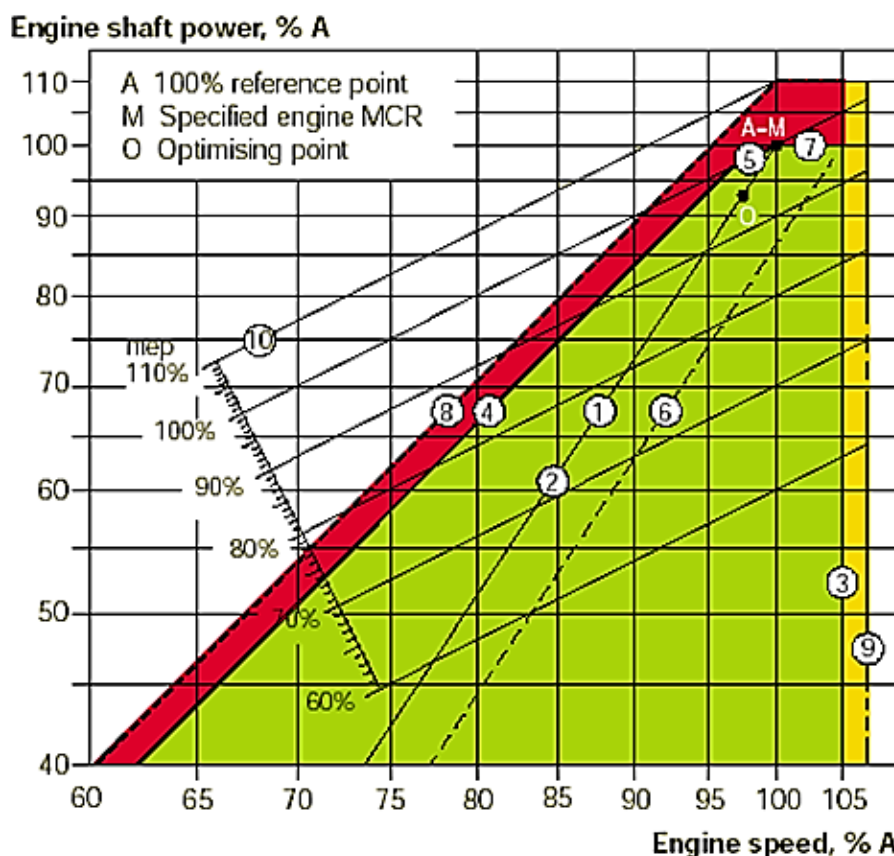
## 4.3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

### 4.3.1 ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

Το διάγραμμα φόρτισης (σχήμα 4.3) καθορίζει τα όρια ισχύος και στροφών λειτουργίας για συνεχή καθώς και για υπερφορτισμένη λειτουργία, ενός εγκατεστημένου κινητήρα που έχει σημείο βέλτιστης λειτουργίας O και καθορισμένο σημείο μέγιστης συνεχή λειτουργίας, M, που ανταποκρίνεται στις προδιαγραφές του πλοίου.

Το σημείο A είναι ένα σημείο αναφοράς 100% της ισχύος και των στροφών του διαγράμματος φορτίσεως και ορίζεται ως το σημείο της καμπύλης της έλικας που περνά από το σημείο βέλτιστης λειτουργίας, O, και έχει την καθορισμένη ισχύ μέγιστης συνεχή λειτουργίας.

Κανονικά, το σημείο M είναι το ίδιο με το σημείο A, αλλά σε ειδικές περιπτώσεις, όπως για παράδειγμα όταν υπάρχει γεννήτρια στον άξονα, το σημείο M μπορεί να τοποθετηθεί στα δεξιά του σημείο A στην γραμμή 7. Τα σημεία λειτουργίας του εγκατεστημένου κινητήρα συμπεριλαμβάνουν την απαιτούμενη ισχύ του κινητήρα για την πρόωση του πλοίου και για την γεννήτρια του άξονα, αν υπάρχει.



- Line 1: Propeller curve through optimizing point (O) – layout curve for engine
- Line 2: Heavy propeller curve – fouled hull and heavy seas
- Line 3: Speed limit
- Line 4: Torque/speed limit
- Line 5: Mean effective pressure limit
- Line 6: Light propeller curve – clean hull and calm weather – layout curve for propeller
- Line 7: Power limit for continuous running
- Line 8: Overload limit
- Line 9: Sea trial speed limit
- Line 10: Constant mean effective pressure (mep) lines

Σχήμα 4.3: Διάγραμμα φόρτισης μηχανής

#### 4.3.2 ΟΡΙΑ ΓΙΑ ΣΥΝΕΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ

Έτσι λοιπόν τα όρια για συνεχή λειτουργία είναι η περιοχή που ορίζεται από τις τέσσερις γραμμές 4,5,7 και 3 (9).

Γραμμή 3, Γραμμή 9: Η γραμμή 3 αντιστοιχεί στην μέγιστη ταχύτητα περιστροφής που μπορεί να γίνει αποδεκτή για συνεχή λειτουργία, δηλαδή, 105% του A, ωστόσο όχι πάνω από το 105% του  $L_1$ . Κατά την διάρκεια δοκιμών θαλάσσης η μέγιστη ταχύτητα μπορεί να επεκταθεί ως το 107 % του A (γραμμή 9). Τα παραπάνω όρια μπορούν γενικά να επεκταθούν στο 105% και στην διάρκεια των δοκιμών στο 107% της ονομαστικής ταχύτητας λειτουργίας της μηχανής  $L_1$ , μόνον όμως όταν οι συνθήκες των στρεπτικών ταλαντώσεων το επιτρέπουν. Το όριο υπερτάχυνσης είναι 109% της ταχύτητας στο A, όμως

μπορεί να μετακινηθεί και στο 109% της ονομαστικής ταχύτητας του  $L_1$ , δεδομένου ότι οι συνθήκες των στρεπτικών ταλαντώσεων το επιτρέπουν.

Γραμμή 4: Αντιπροσωπεύει το όριο μέχρι το οποίο υπάρχει ικανοποιητική ποσότητα αέρα για καύση και θέτει έναν περιορισμό στον μέγιστο συνδυασμό ροπής και ταχύτητας.

Γραμμή 5: Αντιστοιχεί στο μέγιστο επίπεδο μέσης πραγματικής πίεσης ( $mep$ ), που μπορεί να γίνει αποδεκτό για συνεχή λειτουργία.

Γραμμή 7: Αντιπροσωπεύει την μέγιστη ισχύ για συνεχή λειτουργία.

Γραμμή 8: Αντιπροσωπεύει τους περιορισμούς για λειτουργία με υπερφόρτιση. Η περιοχή μεταξύ των γραμμών 4,5,7 και της διακεκομμένης γραμμής 8 στο σχήμα 4.3 είναι διαθέσιμη για λειτουργία με υπερφόρτιση για περιορισμένες χρονικές περιόδους μόνο (1 ώρα κάθε 12 ώρες)

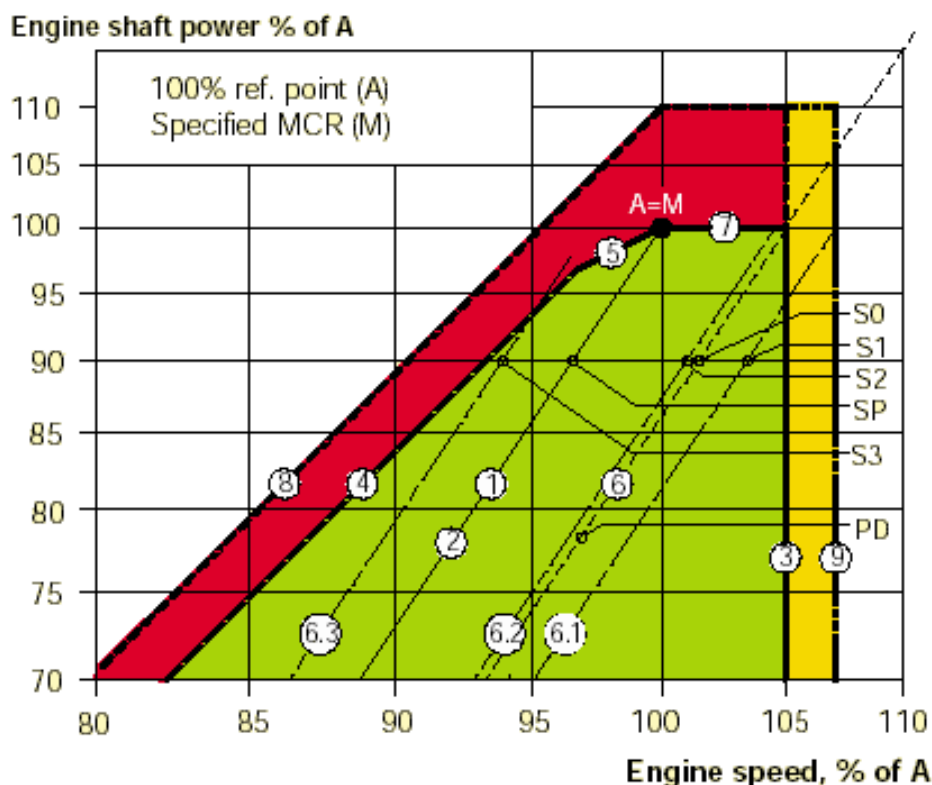
Γραμμή 10: Αντιστοιχούν στις ευθείες σταθερής μέσης πραγματικής πίεσης ( $mep$  lines). Η γραμμή 5 είναι ίδια με την 100 %  $mep$  line. Οι γραμμές σταθερής μέσης πραγματικής πίεσης αποτελούν μια ένδειξη του εγχυόμενου καυσίμου του κινητήρα.

#### **4.4 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΕ ΤΑΡΑΓΜΕΝΗ ΘΑΛΑΣΣΑ ΜΕ ΜΕΓΑΛΑ ΚΥΜΑΤΑ**

Όταν το πλοίο ταξιδεύει σε ταραγμένη θάλασσα αντίθετα, με μεγάλα κύματα, η έλικα μπορεί να λειτουργεί με 7-8% αυξημένη φόρτιση από ότι σε ήρεμο καιρό, δηλαδή, στην ίδια ισχύ της έλικας, ο ρυθμός περιστροφής μπορεί να είναι 7-8% χαμηλότερος. Για μία ισχύ έλικας ίση με το 90% της ισχύος του καθορισμένου σημείου MCR, το σημείο S3 στο διάγραμμα φόρτισης του σχήματος 4.4 δίνει ένα παράδειγμα για μία τέτοια περίπτωση λειτουργίας. Σε μερικές περιπτώσεις στην πράξη με ισχυρό αντίθετο άνεμο, κατά την λειτουργία με αυξημένη φόρτιση έχει αποδειχθεί ότι το ποσοστό υπερφόρτισης είναι ακόμη μεγαλύτερο και μάλιστα μπορεί το σημείο λειτουργίας να βρεθεί ακόμη και αριστερά της οριακής γραμμής 4 του διαγράμματος φόρτισης. Σε τέτοιες περιπτώσεις, για να αποφευχθούν οι σφυροκρούσεις του πλοίου (*slamming*) και έτσι η ζημιά στην πρύμνη και ξενέρισμα/υπερτάχυνση χωρίς φορτίο (*racing*) της έλικας, η ταχύτητα του πλοίου κανονικά θα μειωθεί από τον καπετάνιο.

Σε λειτουργία κατά την πλεύση σε συνθήκες δοκιμών, στο σημείο S1, κανονικά, η καμπύλη έλικας (6) με καθαρή γάστρα θα αναφέρεται ως η καμπύλη έλικας του ταξιδιού δοκιμών. Ωστόσο, καθώς το πλοίο σπάνια είναι φορτωμένο κατά την διάρκεια των δοκιμών και καθώς ακόμη πιο συχνά πλέει στην κατάσταση ερματισμού, η πραγματική καμπύλη 6.1 της έλικας θα αντιστοιχεί σε λειτουργία με μειωμένη φόρτιση σε σχέση με την καμπύλη 6.

Για μια ισχύ στην έλικα ίση με το 90% της ισχύος που αντιστοιχεί στο MCR, το σημείο S1 στο διάγραμμα φόρτισης στο σχήμα 4.4, δίνει ένα παράδειγμα από μία τέτοια περίπτωση λειτουργίας. Για να είναι δυνατό να επιδείξει λειτουργία κατά την διάρκεια των δοκιμών στα 100% της ισχύος, μπορεί να χρειαστεί σε μερικές περιπτώσεις να ξεπερασθεί ο περιορισμός της ταχύτητας περιστροφής της έλικας, γραμμή 3, που κατά την διάρκεια των δοκιμών μπορεί να επιτραπεί να επεκταθεί μέχρι το 107%.



PD: Propeller design point, clean hull and calm weather  
 Continuous service rating for propulsion with a power equal to 90% specified MCR, based on:

- S0: Clean hull and calm weather, loaded ship
- S1: Clean hull and calm weather, ballast (trial)
- S2: Clean hull and 15% sea margin, loaded ship
- SP: Fouled hull and heavy weather, loaded ship
- S3: Very heavy sea and wave resistance

- Line 1: Propeller curve through point A=M, layout curve for engine
- Line 2: Heavy propeller curve, fouled hull and heavy weather, loaded ship
- Line 6: Light propeller curve, clean hull and calm weather, loaded ship, layout curve propeller
- Line 6.1: Propeller curve, clean hull and calm weather, ballast (trial)
- Line 6.2: Propeller curve, clean hull and 15% sea margin, loaded ship
- Line 6.3: Propeller curve, very heavy sea and wave resistance

Σχήμα 4.4: Επίδραση των διαφόρων τύπων αντίστασης πλοίου στην επιλογή της περιοχής συνεχούς λειτουργίας



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

# ΗΜΙΚΥΚΛΙΚΟΙ ΔΑΚΤΥΛΙΟΙ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

### 5.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΣΥΣΚΕΥΩΝ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

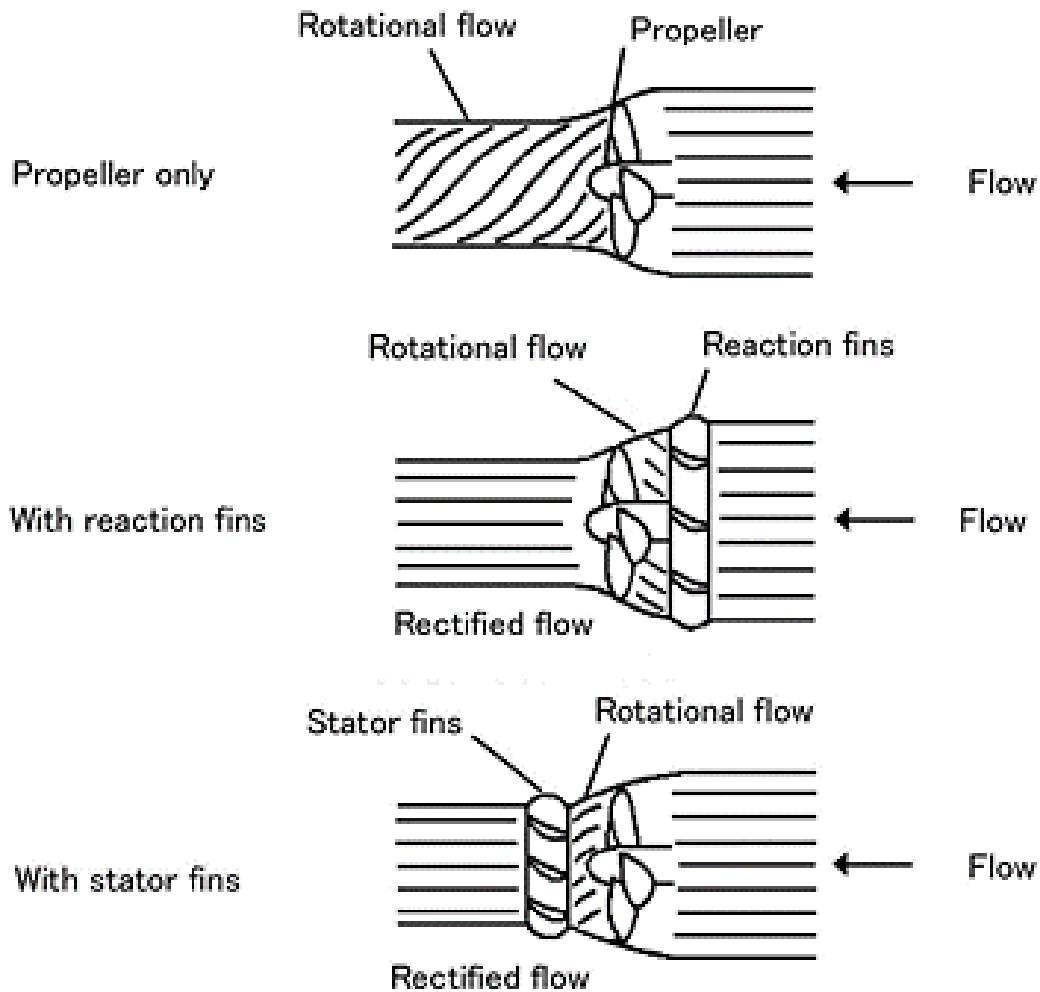
Για την ανταπόκριση στην αυξανόμενη ζήτηση εξοικονόμησης ενέργειας λόγω της αύξησης του κόστους του πετρελαίου και μια μεγάλη ζήτηση για μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> που σχετίζονται με περιβαλλοντικά θέματα, η απαίτηση για μείωση της κατανάλωσης καυσίμων των πλοίων είναι μεγαλύτερη από ποτέ. Γι' αυτό ένας ημικυκλικός τύπος δακτυλίου συσκευής εξοικονόμησης ενέργειας αναπτύχθηκε. Αντί ενός συμβατικού κυκλικού δακτυλίου, ο δακτύλιος αυτός είναι ένας ημικυκλικός τύπου δακτύλιος που παράγεται από την αφαίρεση του κάτω μισού τμήματος ενός κυκλικού δακτυλίου. Σε σύγκριση με τις παρούσες συσκευές εξοικονόμησης ενέργειας του κυκλικού τύπου αγωγού, το κατώτερο τμήμα του δακτυλίου αφαιρέθηκε για να μεγιστοποιήσει την απόδοση του που βρίσκεται στο πολύπλοκο πεδίο ροής γύρω από την πρύμνη, λαμβάνοντας υπόψη τους υδροδυναμικούς παράγοντες που διέπουν το αποτέλεσμα εξοικονόμησης ενέργειας. Ένας αριθμός με δοκιμές μοντέλου πραγματοποιήθηκαν και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η εξοικονόμηση για ημικυκλικό αγωγό ενέργειας ήταν περίπου 5%.

Οι συσκευές εξοικονόμησης ενέργειας [Energy Saving Devices (ESDs)] είναι σταθερές συσκευές κατευθυντήριας-ροής τοποθετημένες κοντά στην έλικα. Αυτές μπορούν να τοποθετούνται είτε μπροστά από την έλικα, στερεωμένες στην γάστρα του πλοίου, είτε πίσω, τοποθετημένες στο πηδάλιο ή στην έλικα του. Οι συσκευές εξοικονόμησης ενέργειας ανακτούν την χαμένη ενέργεια της έλικας του πλοίου με συγκεκριμένο τρόπο και είναι ταξινομημένες από την ανάκτηση ενέργειας ως εξής:

- Συσκευές που ανακτούν την περιστροφική ροή της έλικας
- Συσκευές που μειώνουν το φορτίο της έλικας
- Συσκευές που διαχέουν τις δίνες στην πλήμνη της έλικας

Τα πτερύγια αντίδρασης τα οποία αποτελούνται από πολλαπλά πτερύγια εγκατεστημένα μπροστά από την έλικα, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.1, στροβιλίζουν την ροή που εισέρχεται στην έλικα σε αντίθετη κατεύθυνση από τη περιστροφή της έλικας. Τα σταθερά πτερύγια τα οποία είναι εγκατεστημένα πίσω από την έλικα, ακυρώνουν την περιστροφική ροή που δημιουργείται από την έλικα. Ένα πτερύγιο αντίδρασης δημιουργεί από μόνο του αντίδραση, ως εκ τούτου, εφαρμόζεται σε χαμηλής ταχύτητας πλήρη πλοία, για τα οποία η αντίσταση είναι μικρή σε σύγκριση με την επίδραση της περιστροφικής ανάκτηση ροής, λόγω της βραδύτερης ταχύτητας ροής στην πρύμνη. Τα πτερύγια αντίδρασης δεν εφαρμόζονται σε υψηλής ταχύτητας πλοία, για τα οποία η αντίσταση είναι μεγάλη, λόγω της υψηλότερης ταχύτητας ροής. Ένα

σταθερό πτερύγιο παράγει ώση, έτσι η εξοικονόμηση ενέργειας κατορθώνεται σε υψηλής ταχύτητας πλοία.



Σχήμα 5.1: Αρχή των πτερυγίων αντίδρασης και των σταθερών πτερυγίων

## 5.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΑΚΤΥΛΙΟΥ

Με βάση την εξέταση των διαφόρων τύπων συσκευών εξοικονόμησης ενέργειας που ήταν ήδη διαθέσιμα στο εμπόριο, η ανάπτυξη ξεκίνησε με έμφαση σε έναν τύπο συσκευής εξοικονόμησης ενέργειας δακτύλιου (hereinafter called “duct”), η οποία έδειξε μια σχετικά μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας στη επίδραση μεταξύ τους.

### 5.2.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Ο αγωγός τυπικά βρίσκεται ακριβώς μπροστά από την έλικα, και έχει ένα κυκλικό σχήμα ή παρόμοιο. Ο δακτύλιος έχει τα ακόλουθα αποτελέσματα σε γενικές γραμμές. (Το σχήμα 5.2 δείχνει τις βασικές αρχές της εξοικονόμησης ενέργειας).

- (1) Μείωση της αντοχής γάστρας από την ευθυγράμμιση που επηρεάζεται από το πεδίο ροής που δημιουργείται στην πρύμνη.



Το σχήμα 5.3 δείχνει ένα παράδειγμα του σχεδίου των απόνερων στο επίπεδο των ελίκων ενός γεμάτου πλοίου. Περίπου γύρω από την πρύμνη της γάστρας, υπάρχει συνήθως μια περίπλοκη ροή με (διαχωριστική ροή γύρω από την πρύμνη της γάστρας) (όπως φαίνεται στα σχήματα 5.2 και 5.3). Ο δακτύλιος ελέγχει τη ροή διαχωρισμού στην επιφάνεια της γάστρας από την ευθυγράμμιση αυτής τη ροής στην αξονική διεύθυνση, και κατά συνέπεια συμβάλλει στη μείωση της αντίστασης της γάστρας.

(2) Παραγωγή ώσης του δακτυλίου.

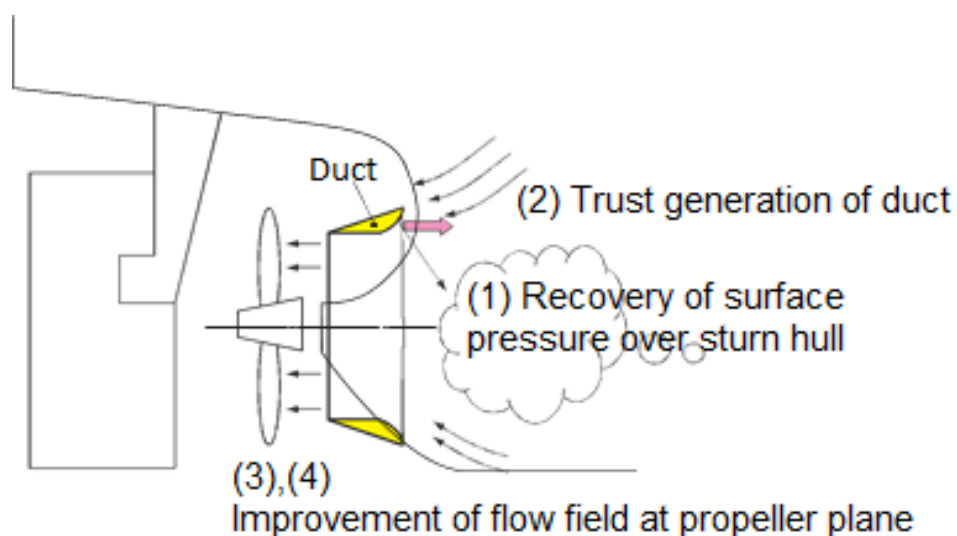
Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.2, η ροή γύρω από την πρύμνη της γάστρας είναι ένα σύζευγμα ροής που αποτελείται από δίνες και μία ροή κατά μήκος της κύριας γάστρας. Ως εκ τούτου, μια δύναμη ώθησης του ίδιου του δακτυλίου μπορεί να δημιουργηθεί από την κατάλληλη ρύθμιση μορφής πτερυγίου και της γωνίας προσβολής.

(3) Αύξηση λόγω ωφέλειας από τους κυματισμούς που δημιουργούνται από τα απόνερα.

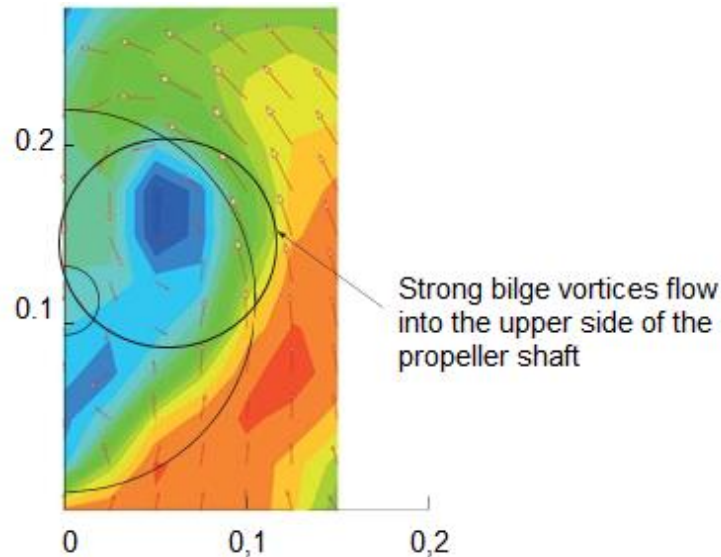
Ένα κέρδος λόγω απόνερων μπορεί να ληφθεί από χαμηλή ροή των απόνερων στην ζώνη που έχει δημιουργηθεί δίνη προς το επίπεδο των ελίκων.

(4) Βελτίωση της αποδοτικότητας της έλικας.

Η ακτινική συνιστώσα της ροής στην πρύμνη μετατρέπεται σε αξονική ροή από τον δακτύλιο και η κατανομή της αξονικής ταχύτητας στο επίπεδο της έλικας γίνεται ομοιόμορφη. Αυτό δημιουργεί ένα ευνοϊκό πεδίο ροής για να βελτιώσει την απόδοση της σπηλαιώσης της έλικας. Με άλλα λόγια, αυτό επιτρέπει ένα ωφέλιμο σχεδιασμό έλικας που έχει ως αποτέλεσμα την βελτίωση της αποδοτικότητας της έλικας.



Σχήμα 5.2: Βασική αρχή συσκευών δακτυλίων εξοικονόμησης ενέργειας



- Σημείωση:
1. Το μπλε εμβαδόν υποδεικνύει χαμηλή ταχύτητα περιοχής.
  2. Οι φορείς δείχνουν τα διανύσματα της ταχύτητας σε επίπεδο YZ.

Σχήμα 5.3: Παράδειγμα της ροής που δημιουργούνται από τα απόνερα στην έλικα

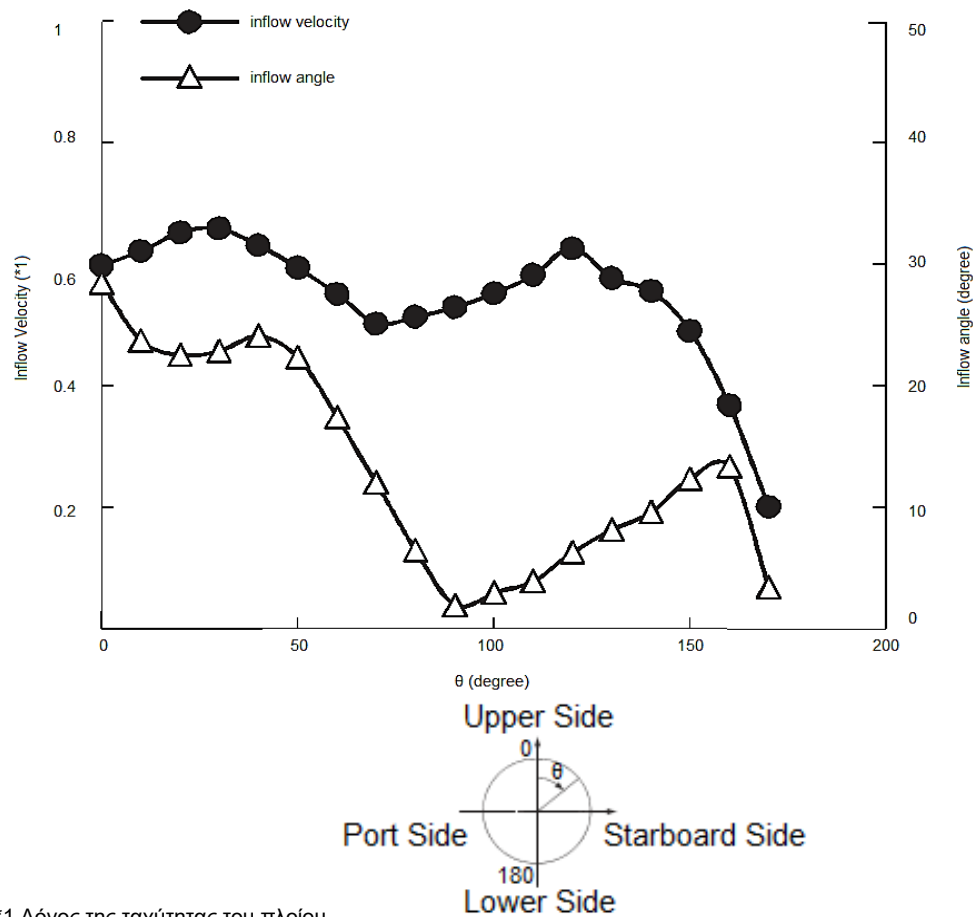
### 5.2.2 ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΗ ΦΙΛΟΣΟΦΙΑ ΤΟΥ ΔΑΚΤΥΛΙΟΥ

Με βάση την παραπάνω βασική αρχή της εξοικονόμησης ενέργειας, έννοιες του σχεδιασμού για το σχήμα και τη θέση του αγωγού αποφασίστηκαν ως ακολούθως.

- Το αποτέλεσμα ευθυγράμμισης ενισχύεται με την τοποθέτηση του δακτυλίου σε μια θέση όπου οι δίνες στην πρύμνη είναι ισχυρές (Αρχές (1) και (4)).
- Μια προς τα εμπρός δύναμη ώσης αυξάνεται με την τοποθέτηση του δακτυλίου σε μια θέση όπου η γωνία της διαγώνιου ροής είναι μεγάλη (Αρχή (2)).
- Η διάμετρος του δακτυλίου ανέρχεται σε περίπου 0,7 φορές της διαμέτρου της έλικας ώστε να προκαλέσει μια χαμηλή ταχύτητα ροής απόνερων σε αυτόν τον τομέα, όπου η έλικα παράγει τη μέγιστη ισχύ (Αρχή (3)).
- Επειδή οι δίνες είναι συνήθως ισχυρές επί της άνω πλευράς του άξονα της έλικας, είναι επιθυμητός ο ημικυκλικός δακτύλιος, αφαιρώντας το κάτω ήμισυ ενός κυκλικού δακτυλίου.

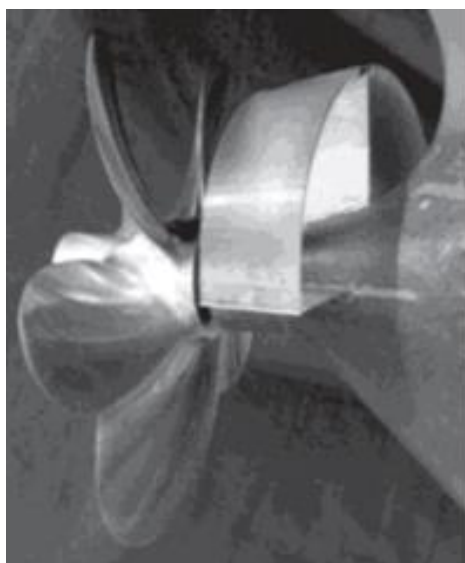
Πριν από το σχεδιασμό, ένα πεδίο ροής στην πρύμνη μετρήθηκε στη θέση τοποθέτησης του αγωγού για τη συλλογή πληροφοριών που απαιτούνται για το σχεδιασμό του αγωγού. Η μέτρηση διεξήχθη με τη βοήθεια ενός σχήματος L - σωλήνα Pitot όταν η έλικα δούλευε κατά τη διάρκεια μιας δοκιμής αυτοδύναμης πρόωσης. Το σχήμα 5.4 δείχνει την περιφερειακή κατανομή της ταχύτητας ροής και την γωνία εισροής των απόνερων της γάστρας εντός του αγωγού, που μετρήθηκε σε 0,7 φορές της ακτίνας της έλικας. Από αυτό το σχήμα, έχει βρεθεί ότι η γωνία εισόδου και η ταχύτητα εισροής είναι μεγάλη στην άνω πλευρά του άξονα της έλικας ( $\alpha = 0$  έως 50 βαθμούς). Ως εκ τούτου, έχει βρεθεί να είναι σημαντικό να σχεδιάσει σωστά το άνω τμήμα του δακτυλίου, ώστε να εξασφαλιστεί ότι ο δακτύλιος δημιουργεί αποτελεσματικά μια δύναμη ώσης και βελτιώνει το αποτέλεσμα ευθυγράμμισης. Με βάση αυτό το πεδίο

δεδομένων ροής, με σκοπό σύγκρισης τους, τόσο ένας ημικυκλικός και ένας κυκλικός δακτύλιος έχουν σχεδιαστεί. Το σχήμα 5.5 δείχνει το ημικυκλικό δακτύλιο, και το σχήμα 5.6 δείχνει το κυκλικό δακτύλιο.

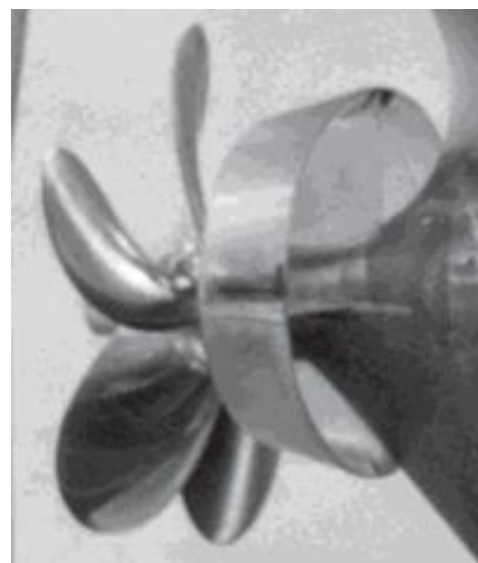


Σημείωση \*1 Λόγος της ταχύτητας του πλοίου

Σχήμα 5.4: Εισροή ταχύτητας και γωνίας προσβολής στη θέση του δακτυλίου



Σχήμα 5.5: Ημικυκλικός δακτύλιος



Σχήμα 5.6: Κυκλικός δακτύλιος

## **5.3 ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

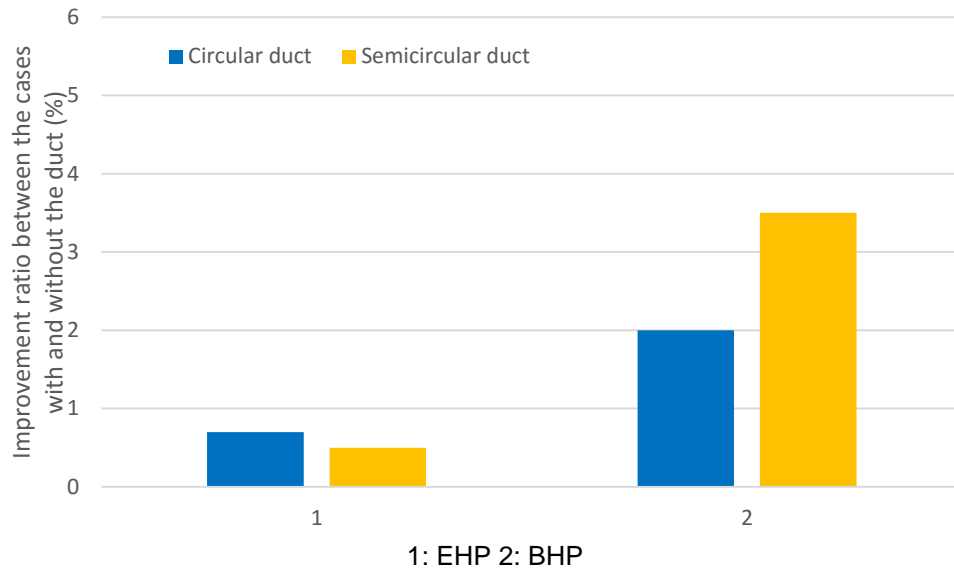
### **5.3.1 ΠΡΟΩΘΗΤΙΚΗ ΔΟΚΙΜΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ**

Μια δοκιμή προωθητικής απόδοσης αποτελείται από ένα τεστ αντοχής - αντίστασης και τον έλεγχο αυτοδύναμης πρόωσης. Η δοκιμή αντοχής μετρά την αντίσταση της γάστρας όταν δεν έχει εγκατασταθεί η έλικα και ο έλεγχος αυτοδύναμης πρόωσης μετρά έναν συντελεστή αυτοδύναμης πρόωσης (παράγοντας παρεμβολής της προπέλας, της γάστρας, και του πηδάλιου), όταν η έλικα λειτουργεί. Η δοκιμή προωθητικής απόδοσης διεξήχθη σε μοντέλο πλοίου όπου ήταν δεξαμενόπλοιο 300000 tons, με και χωρίς την σχεδίαση δακτυλίου. Τα αποτελέσματα της δοκιμής χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό απαιτούμενης ιπποδύναμης, και στις δύο περιπτώσεις συγκρίθηκαν για να προσδιοριστεί η επίδραση εξοικονόμησης ενέργειας. Προκειμένου να εξακριβωθεί η διαφορά μεταξύ της κυκλικής μορφής και του ημικυκλικού σχήματος, ένα μοντέλο κυκλικού δακτυλίου ήταν διατεθειμένο να πραγματοποιήσει την ίδια δοκιμή.

### **5.3.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΟΥ ΔΑΚΤΥΛΙΟΥ**

Το σχήμα 5.7 δείχνει τις αναλογίες στην βελτίωση της πραγματικής ιπποδύναμης EHP (Effective Horse Power) και της ιπποδύναμης πέδης BHP (Brake Horse Power) μεταξύ των περιπτώσεων με και χωρίς τον δακτύλιο. Όπως φαίνεται στο σχήμα αυτό, η πραγματική ιπποδύναμη και η ιπποδύναμη πέδης βελτιώθηκαν όταν ο δακτύλιος εγκαταστάθηκε. Ένα αποτέλεσμα την εξοικονόμηση ενέργειας περίπου 3% επιτεύχθηκε με τη μείωση της αντίστασης της γάστρας και τη βελτίωση του συντελεστή αυτοδύναμης πρόωσης.

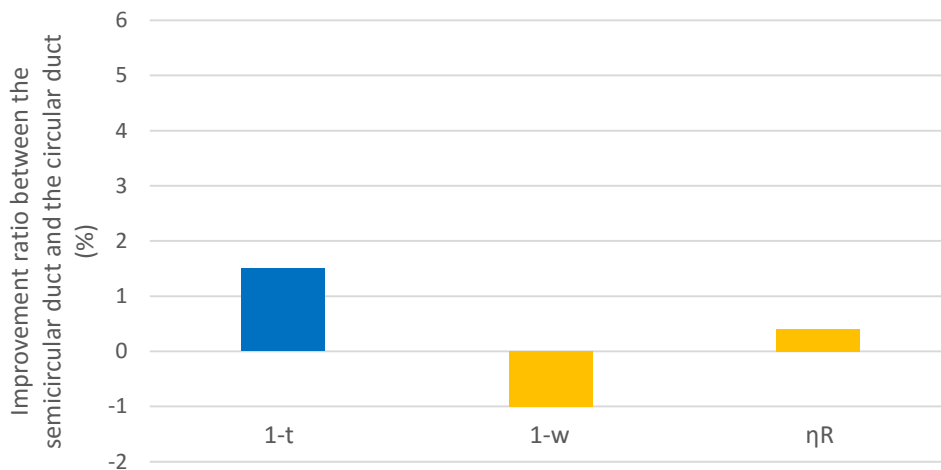
Διαπιστώθηκε ότι το αποτέλεσμα της εξοικονόμησης ενέργειας του ημικυκλικού δακτυλίου ήταν μεγαλύτερη από εκείνη του κυκλικού δακτυλίου. Το σχήμα 5.8 δείχνει την σύγκριση των συντελεστών αυτοδύναμης πρόωσης μεταξύ του κυκλικού δακτυλίου και του ημικυκλικού δακτυλίου. Όταν και οι δύο συντελεστές αυτοδύναμης πρόωσης συγκρίθηκαν, η βελτίωση του 1-t, η οποία σχετίζεται με μία δύναμη ώθησης που παράγεται από τον δακτύλιο, είναι αξιοσημείωτη. Από αυτό το αποτέλεσμα, μπορεί να θεωρηθεί ότι το άνω ήμισυ του δακτυλίου παίζει σημαντικό ρόλο στη βελτίωση του αποτελέσματος της εξοικονόμησης ενέργειας (δημιουργώντας μία δύναμη ώσης).



(Σημείωση)  $EHP = R \times V_S$   
 $BHP = EHP \times \frac{1-w}{1-t \times \eta_R \times \eta_0 \times \eta_t}$

EHP : Effective horse power  
 $V_S$  : Ship velocity  
 $\eta_0$  : Propeller efficiency  
 $t$  : Thrust deduction fraction  
 $\eta_R$  : Relative rotative efficiency  
 $R$  : Hull resistance  
 BHP : Brake horse power  
 $\eta_t$  : Shaft transmission efficiency  
 $w$  : Wake fraction

Σχήμα 5.7: Εξοικονόμηση ενέργειας από συσκευή δακτυλίου



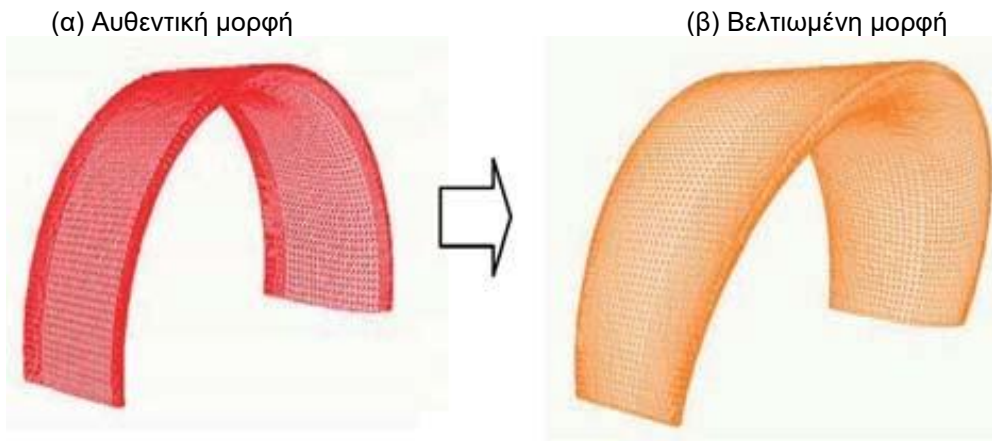
Σχήμα 5.8: Σύγκριση των συντελεστών αυτοδύναμης πρόωσης μεταξύ του κυκλικού και ημικυκλικού δακτυλίου

### 5.3.3 ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΗΣ ΜΟΡΦΗΣ ΤΟΥ ΗΜΙΚΥΚΛΙΚΟΥ ΔΑΚΤΥΛΙΟΥ

Προκειμένου να δημιουργηθεί μια μέθοδος για τον σχεδιασμό του ημικυκλικού αγωγού, η επίδραση των παρακάτω παραμέτρων (σε σχέση με το σχήμα του δακτυλίου και την θέση του) για την απόδοση εξοικονόμηση ενέργειας επαληθεύθηκε από μία δοκιμή δεξαμενής όπου έχουμε δεδομένα σχεδιασμού.

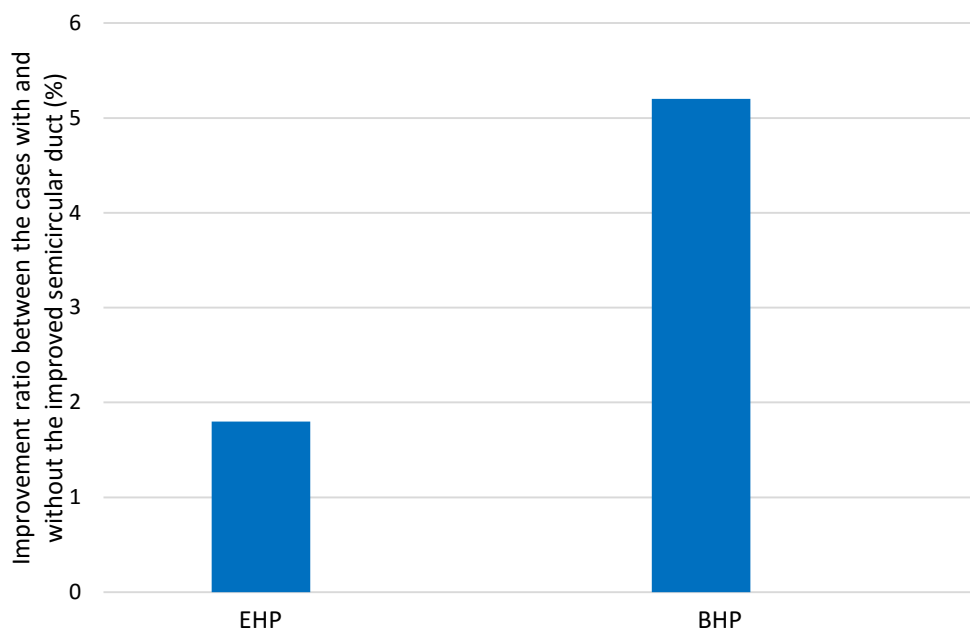
- Θέση στερέωσης του δακτυλίου
- Γωνία του προφυλακτήρα του δακτυλίου
- Μήκος δακτυλίου

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την παραμετρική μελέτη δείχνουν ότι το αποτέλεσμα της εξοικονόμησης ενέργειας είναι καλύτερο όταν ο δακτύλιος είναι μεγαλύτερος, ιδιαίτερα καθώς το πάνω μέρος είναι μεγαλύτερο. Με βάση αυτά τα αποτελέσματα, ένας βελτιωμένος ημικυκλικός δακτύλιος με μεγαλύτερο μήκος χορδής του στο άνω μέρος σχεδιάστηκε, και το αποτέλεσμα της εξοικονόμησης ενέργειας επαληθεύθηκε με δοκιμή δεξαμενής (σχήμα 5.9).

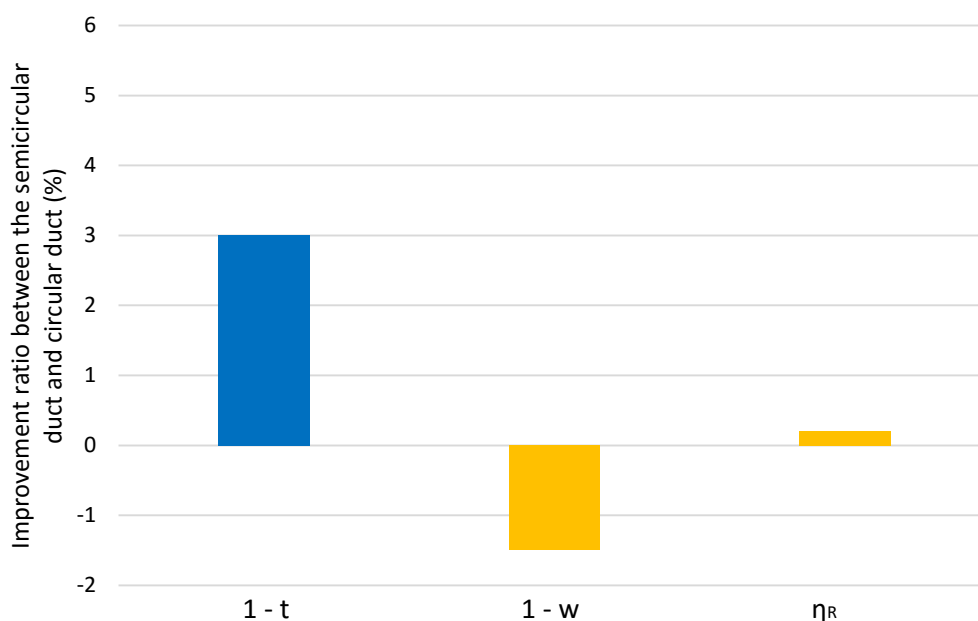


Σχήμα 5.9: Βελτίωση σε ημικυκλική συσκευή δακτυλίου

Το σχήμα 5.10 δείχνει τις αναλογίες βελτίωσης της πραγματικής ιπποδύναμης και της ιπποδύναμης πέδης μεταξύ των περιπτώσεων με και χωρίς τον προαναφερόμενο δακτύλιο. Όπως φαίνεται στο σχήμα αυτό, οι αναλογίες βελτίωσης της πραγματικής ιπποδύναμης και της ιπποδύναμης πέδης του βελτιωμένου ημικυκλικού δακτυλίου ήταν μεγαλύτερες από εκείνες του αρχικού ημικυκλικού δακτυλίου, και ένα αποτέλεσμα εξοικονόμησης ενέργειας περίπου 5% επιτεύχθηκε. Όταν συγκρίνονται οι συντελεστές αυτοδύναμης πρόωσης του κυκλικού δακτυλίου και του βελτιωμένου ημικυκλικού δακτυλίου, η σημαντική βελτίωση της  $1-t$  έχει βρεθεί, η οποία φέρνει κυρίως τη βελτίωση της ιπποδύναμης πέδης (σχήμα 5.11).



Σχήμα 5.10: Εξοικονόμηση ενέργειας από βελτιωμένη συσκευή δακτυλίου

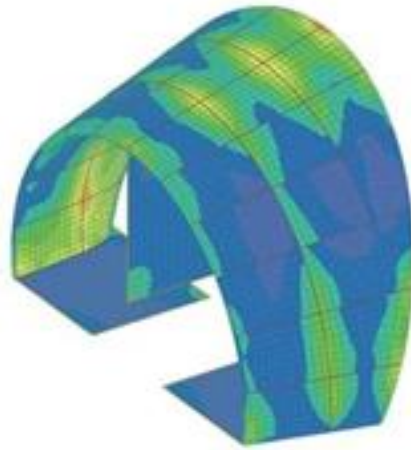


Σχήμα 5.11: Σύγκριση των συντελεστών αυτοδύναμης πρόωσης μεταξύ του κυκλικού και ημικυκλικού δακτυλίου

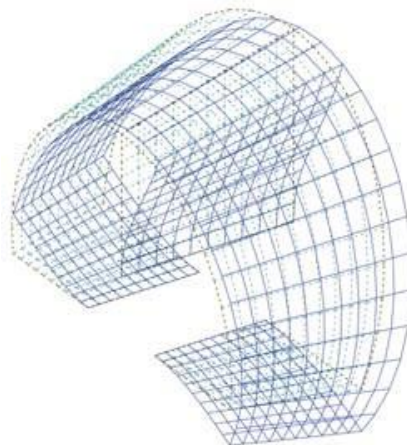
## 5.4 ΜΕΛΕΤΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ

Αναγκαίο εργαλείο για την κατασκευαστική αντοχή είναι η μέθοδος ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων (FEM – Finite Element Method). Ως παράδειγμα, το σχήμα 5.12 δείχνει το αποτέλεσμα του υπολογισμού αντοχής για την πλάκα στήριξης του δακτυλίου που λαμβάνεται μέσω της μεθόδου ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων (FEM). Από τη μελέτη αυτή, διαπιστώθηκε ότι μια υποστηρικτική κατασκευή έχει επαρκή δύναμη να αντέξει κρουστικά φορτία που προκαλούνται από μεταβαλλόμενη κακοκαιρία ή/και πλευρικές

δυνάμεις κατά τη διάρκεια της περιστροφικής κίνησης. Επιπλέον, επιβεβαιώθηκε ότι ο συντονισμός θα μπορούσε να αποφευχθεί επαρκώς. Ως αποτέλεσμα διαφόρων μελετών για κατασκευαστική αντοχή, διαπιστώθηκε ότι η σχεδιασμένη κατασκευή του δακτυλίου έχει επαρκή αντοχή και εφαρμόζεται για το σημείο ασφαλείας.



(α) Περίγραμμα πιέσεων



(β) Περίγραμμα ταλαντώσεων

Σχήμα 5.12: Παράδειγμα της μεθόδου ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### ΔΑΚΤΥΛΙΟΣ ΤΥΠΟΥ-1

#### 6.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΔΑΚΤΥΛΙΟΥ ΤΥΠΟΥ-1

Ο δακτύλιος τύπου-1 είναι μια συσκευή εξοικονόμησης ενέργειας που αναπτύχθηκε για πλήρη-μορφή για βραδύτερα πλοία, που παρέχει είτε σημαντική εξοικονόμηση καυσίμων σε μια δεδομένη ταχύτητα ή, εναλλακτικά, επιτρέπει στο πλοίο να ταξιδέψει πιο γρήγορα σε ένα δεδομένο επίπεδο ισχύος.

Ο δακτύλιος τύπου-1 αποτελείται από δύο σταθερά ακίνητα στοιχεία τοποθετημένα στο πλοίο. Ένας δακτύλιος τοποθετείται μπροστά από την έλικα μαζί με ένα ολοκληρωμένο σύστημα πτερυγίων μέσα. Ο δακτύλιος ευθυγραμμίζει και επιταχύνει τα απόνερα της γάστρας στην έλικα και επίσης παράγει ένα δίχτυ εμπρόσθιας ώθησης. Το σύστημα πτερυγίου παρέχει στροβιλισμό στα απόνερα του πλοίου, το οποίο μειώνει τις απώλειες ροής στο ρεύμα ολίσθησης της έλικας, με αποτέλεσμα την αύξηση της ώσης στην έλικα σε δεδομένη προωθητική ισχύ. Και οι δυο επιδράσεις συμβάλλουν το καθένα στο άλλο.

Η εξοικονόμηση ενέργειας που μπορούμε να κατορθώσουμε είναι ισχυρά εξαρτώμενη στην φόρτωση ώσης της προπέλας, από 3% για πολλαπλών χρήσεων πλοία έως 8% για τα δεξαμενόπλοια και φορτηγά πλοία. Η εξοικονόμηση ενέργειας είναι σχεδόν ανεξάρτητη από την σχεδίαση του πλοίου και την ταχύτητά του.

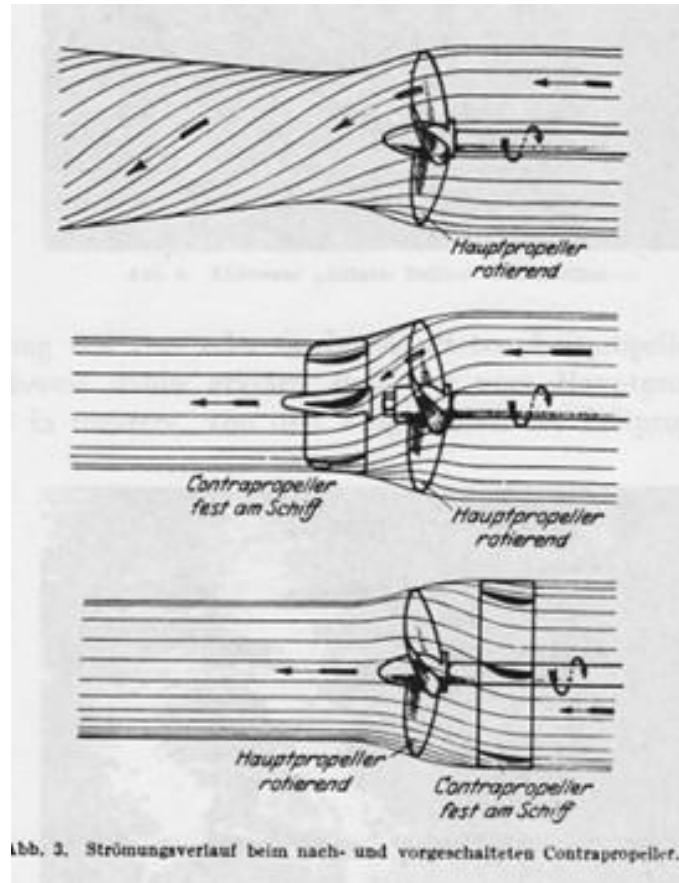
Ο δακτύλιος τύπου-1 είναι ιδανικός τόσο για πλοία νέας κατασκευής όσο και για παλαιότερες εφαρμογές (πχ Tankers, Bulkers και MPCs).

Τα χαρακτηριστικά στοιχεία του δακτυλίου τύπου-1 είναι:

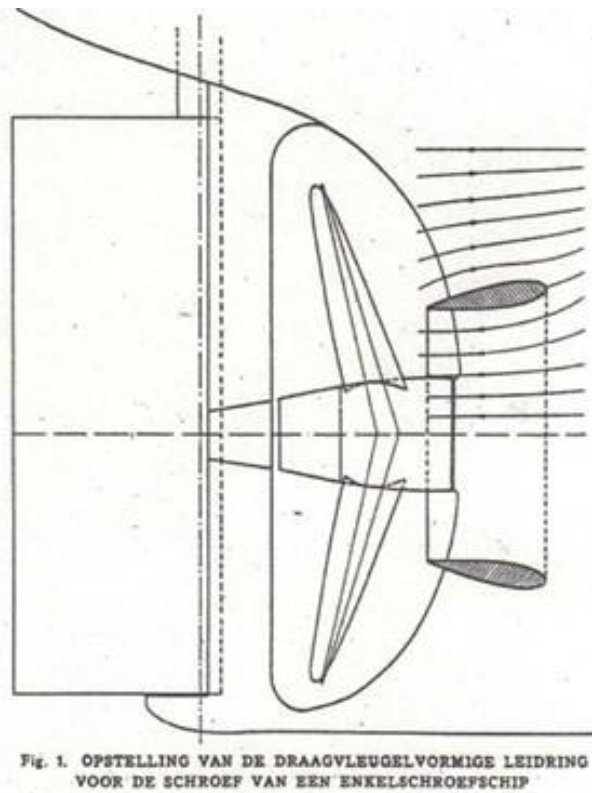
- Εξοικονόμηση καυσίμου έως και 8%
- Μείωση των αερίων του θερμοκηπίου (GHG)
- Δεν υπάρχουν κινούμενα μέρη και δεν είναι απαραίτητη η συντήρηση
- Μειωμένες δονήσεις και παλμούς πίεσης
- Η απόδοση των επενδύσεων πραγματοποιείται σε περίπου ένα χρόνο
- Ο χρόνος τοποθέτησης του είναι περίπου τέσσερις ημέρες

Ο δακτύλιος τύπου-1 που περιγράφεται εδώ είναι ένας συνδυασμός, ο οποίος βασίζεται σε δύο πλήρως ανεξάρτητες Συσκευές Εξοικονόμησης Ενέργειας-Αρχές εργασίας:

- Η κατάντη ροής στην έλικα αρχή (Contra-Propeller-Principle), γνωστή για αρκετά χρόνια [από τον Wagner (1929)], σχήμα 6.1
- Η ανάντη ροής στην έλικα αρχή (Pre – Duct - Principle), δημοσιεύτηκε για πρώτη φορά το 1949 [από τον Van Lammeren], σχήμα 6.2.



Σχήμα 6.1: Επεξήγηση της κατάντη ροής στην έλικα αρχή [Wagner (1929)]

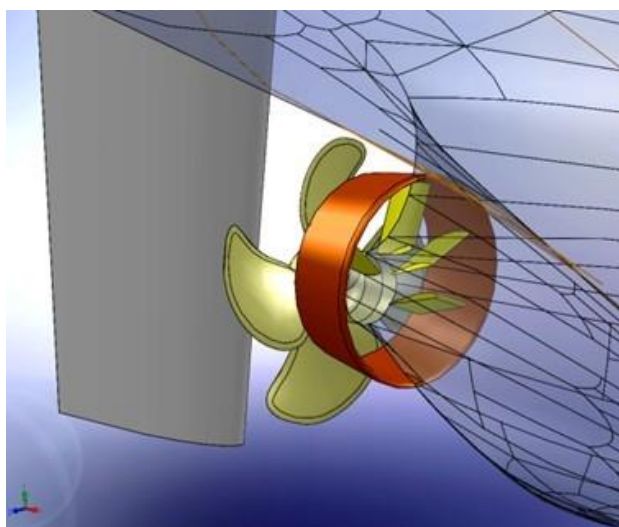


Σχήμα 6.2: Επεξήγηση της ανάντη ροής στην έλικα αρχή [Van Lammeren (1949)]

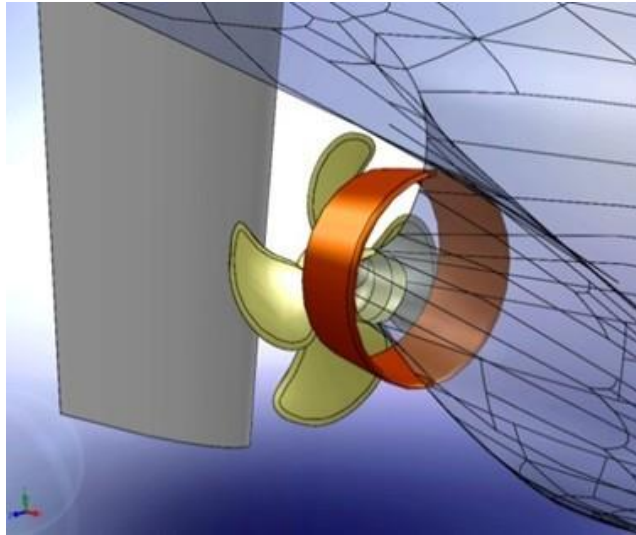
Ο στόχος του σχεδιασμού του δακτυλίου τύπου-1, σε σύγκριση με άλλες συσκευές εξοικονόμησης ενέργειας, είναι να βελτιώσει δύο πλήρως ανεξάρτητες πηγές απωλειών, συγκεκριμένα:

- Απώλειες στα απόνερα πλοίων από τον δακτύλιο
  - Περιτροφικές απώλειες στο ρεύμα ολίσθησης από τα πτερύγια
- Το βασικό πλεονέκτημα του δακτυλίου τύπου-1 είναι να βελτιώσει τέσσερις συνιστώσες της ροής στην έλικα:
- Την εξίσωση της εισροής στην έλικα τοποθετώντας τον δακτύλιο μπροστά από την έλικα. Ο άξονας του δακτυλίου τοποθετείται κατακόρυφα πάνω από τον άξονα της ελικοφόρου ατράκτου, με τη διάμετρο του δακτυλίου να είναι μικρότερη από τη διάμετρο της έλικας. Ο δακτύλιος είναι σταθεροποιημένος στα πτερύγια κατορθώνοντας να παράγει ώση.
  - Μείωση των περιστροφικών απωλειών στο ρεύμα ολίσθησης με την ενσωμάτωση ενός συστήματος πτερυγίου προ-στροβιλισμού εντός του αγωγού. Το μήκος της χορδής του πτερυγίου προφίλ είναι μικρότερο από το μήκος της χορδής του δακτυλίου, με τα πτερύγια τοποθετημένα προς το πρυμναίο άκρο του δακτυλίου. Ο δακτύλιος από μόνος του δρα ως ένα είδος τελικής πλάκας των πτερυγίων, αυξάνοντας έτσι την αποτελεσματικότητά τους.
  - Μια πρόσθετη μικρή βελτίωση της προωθητικής απόδοσης λαμβάνεται από υψηλότερα φορτία που δημιουργούνται στην εσωτερική ακτίνα της έλικας η οποία οδηγεί σε μείωση των απωλειών της δίνης της έλικας στην πλήμνη. Αυτό το αποτέλεσμα αυξάνεται με την αύξηση πλήμνης στην διάμετρο της έλικας ανάλογα.
  - Μία περαιτέρω μικρή μείωση της ισχύος προκύπτει από την βελτίωση της συμπεριφοράς σπηλαίωσης στα ακροπτερύγια της έλικας.

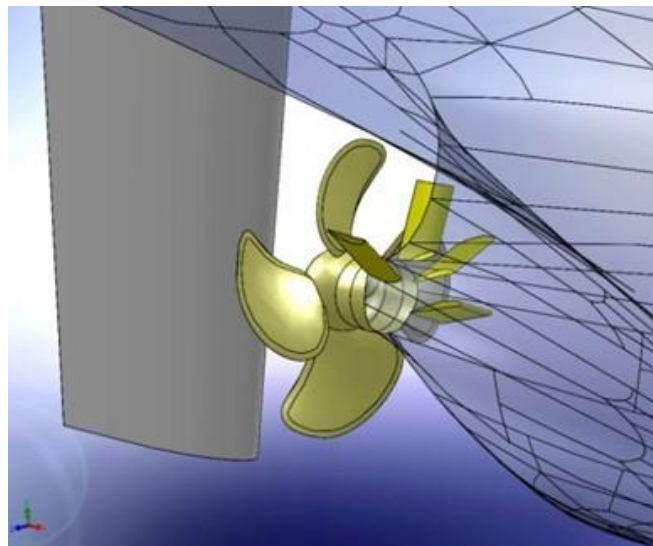
Το σχήμα 6.3 δείχνει τις γενικές ετοιμασίες του δακτυλίου τύπου-1, τα σχήματα 6.4 και 6.5 δείχνουν προ-δακτυλίου και προ-στροβιλισμού πτερύγιο σύστημα εξαρτημάτων, αντιστοίχως.



Σχήμα 6.3: Δακτύλιος τύπου-1 με έλικα δεξιόστροφης περιστροφής, όψη διαγώνια από την μπροστά/δεξιά πλευρά του πλοίου, απλοποιημένη εικόνα



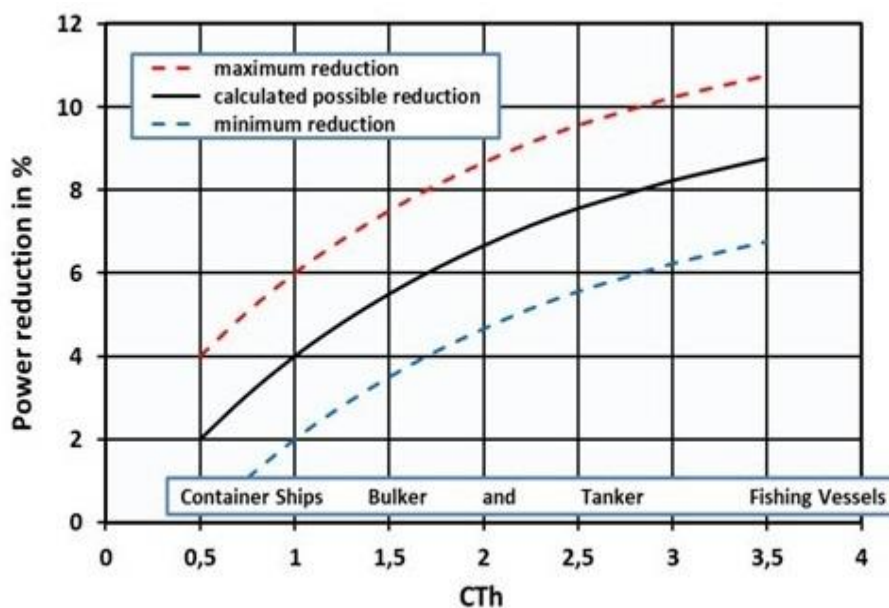
Σχήμα 6.4: Δακτύλιος τύπου-1 - Εξαρτήματα, ο προ-δακτύλιος



Σχήμα 6.5: Δακτύλιος τύπου-1-Εξαρτήματα, το προ-στροβιλισμού πτερύγιο σύστημα

Η προ-εκτίμηση της αναμενόμενης μείωσης κατανάλωσης ισχύος από συσκευές εξοικονόμησης ενέργειας είναι δυνατόν μόνο στην βάση της προσεκτικής ανάλυσης των απωλειών γύρω από την τρεχόμενη έλικα πίσω στο πλοίο. Υπάρχει ένας σημαντικός κανόνας όμως ότι δεν μπορούμε να ανακτήσουμε περισσότερο ροή από τις υφιστάμενες απώλειες που δημιουργούνται.

Το σχήμα 6.6 δείχνει τις πιθανές μειώσεις κατανάλωσης ενέργειας από τον δακτυλίου τύπου-1 σε αναλύσεις βασισμένες σε απώλειες. Η στερεά μαύρη γραμμή αναπαριστά τη θεωρητικά υπολογισμένη μείωση της ισχύος, αλλά οι πραγματικές δυνατότητες εξαρτώνται από πιο ρεαλιστικές συνθήκες, όπως η ποιότητα του πεδίου απόνερων του πλοίου, τον τύπο έλικας και το σχεδιασμό της , και την ποιότητα του σχεδιασμού του δακτυλίου τύπου-1. Όλοι αυτοί οι παράγοντες οδηγούν σε διασπορά περίπου  $\pm 2\%$  επί του βασικής γραμμής.



Σχήμα 6.6: Πιθανές μειώσεις κατανάλωσης ισχύος από δακτύλιο τύπου-1, υπολογισμένη με βάση την ανάλυση απωλειών

## 6.2 Η ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΤΟΥ ΔΑΚΤΥΛΙΟΥ ΤΥΠΟΥ-1

Η τοποθέτηση του δακτυλίου τύπου-1 σε νέες κατασκευές μπορεί εύκολα να γίνει κατά τη διάρκεια της εγκατάστασης της πρύμνης, με σχεδόν μικρό κόστος για το ναυπηγείο και τον ιδιοκτήτη. Το ναυπηγείο είναι σε θέση για την υλοποίηση της εγκατάστασης στο πρόγραμμα επισκευής. Η σχεδιαστική ομάδα εφαρμόζει τις διεπαφές του δακτυλίου τύπου-1 και του πλοίου σύμφωνα με στη δομή χάλυβα του πλοίου και χρησιμοποιεί τυποποιημένες ποιότητες χάλυβα για την κατασκευή του δακτυλίου τύπου-1. Ο χρόνος τοποθέτησης είναι περίπου τέσσερις ημέρες.

Σε πλοία που είναι ήδη πλέον στην θάλασσα και δεν διαθέτουν την συσκευή και θέλουν να την εγκαταστήσουν ο δακτύλιος τύπου-1 μπορεί να ανταποκριθεί και να εγκατασταθεί εύκολα στα πλοία. Ο δακτύλιος τύπου-1 μπορεί να εγκατασταθεί στη διάρκεια της επισκευής στα λιμάνια ή ακόμα και στις επισκευές που γίνονται στη θάλασσα είτε με την έλικα στη θέση της ή να αποσυναρμολογηθεί. Η τεχνογνωσία που υπάρχει σε αυτό τον δακτύλιο εξασφαλίζει ότι η εγκατάσταση είναι λιγότερο χρονοβόρα όσο το δυνατόν, και κατά μέσο όρο τρεις έως πέντε ημέρες. Η εγκατάσταση πραγματοποιείται με την καθοδήγηση και επίβλεψη της τεχνικής ομάδας με το πρότυπο συγκόλλησης και την τοποθέτηση των διαδικασιών, έτσι ώστε η εγκατάσταση να είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί σε όλο τον κόσμο. Ο σχεδιασμός του δακτυλίου τύπου-1 των διεπαφών στο πλοίο παρέχει υψηλότερη αντοχή και ακαμψία, σύμφωνα με νηογνώμονες.

## 6.3 ΠΛΗΡΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Νέες πλήρους κλίμακας δοκιμαστικές μετρήσεις, χωρίς και με το δακτύλιο τύπου-1 έχουν αναληφθεί τον Οκτώβριο του 2010 για 57000 TDW μεταφοράς φορτίου χύδην νέας κατασκευής, AS Vincentia, εντός 5 ημερών

μεταξύ τους και κάτω από ιδανικές συγκρίσιμες συνθήκες. Μετά το συνηθισμένο δοκιμαστικό ταξίδι, το πλοίο επέστρεψε στην προκυμαία για την εγκατάσταση του δακτυλίου τύπου-1. Πέντε ημέρες αργότερα, στο πλοίο πραγματοποιήθηκαν συμπληρωματικές δοκιμές στην ίδια θέση στη θάλασσα. Σε σύγκριση με την αρχική σειρά των δοκιμών οι καιρικές συνθήκες και το πλοίο ήταν σχεδόν πανομοιότυπα, με μόνο μια μικρή διαφορά 5 cm σε κατάσταση φόρτισης.

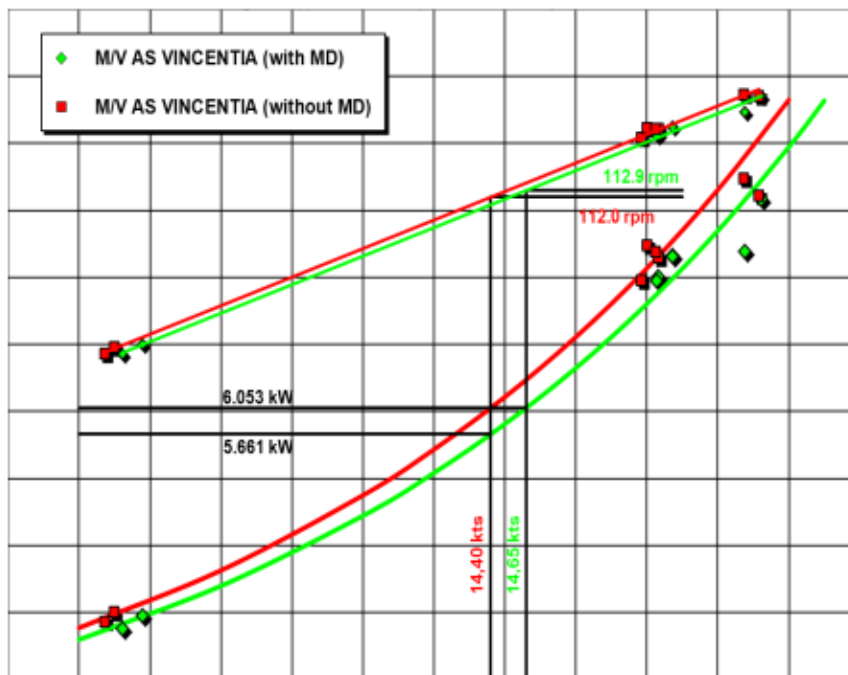
Τα σχήματα 6.7 και 6.8 δείχνουν τα αποτελέσματα της μελέτης πλήρους κλίμακας και το μοντέλο κλίμακας δοκιμαστικής πρόγνωσης για το 57000 TDW μεταφοράς φορτίου χύδην AS Vincencia χωρίς και με τον δακτύλιο τύπου-1.

Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν σε συμβατή ταχύτητα 14,4 κόμβων του πλοίου:

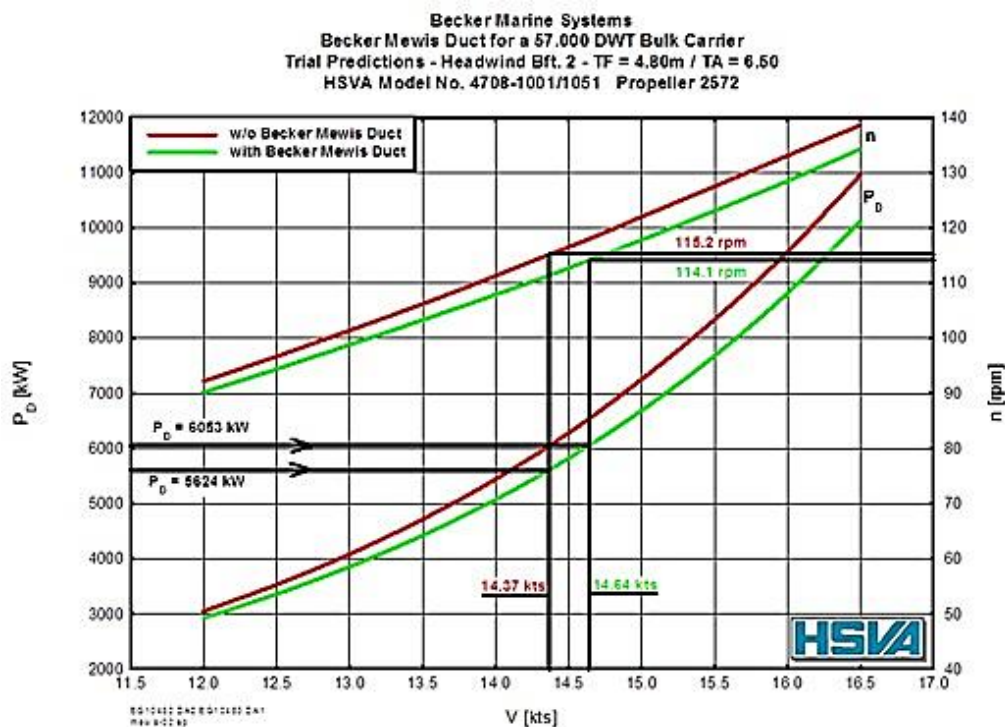
Πλήρης Κλίμακα	Μοντέλου Κλίμακα
6,5% μείωση ισχύς ή 0,25 κόμβους υψηλότερη ταχύτητα με σταθερή ισχύ, η ταχύτητα έλικας αυξήθηκε 0,8%	7,1% μείωση ισχύς ή 0,27 κόμβους υψηλότερη ταχύτητα με σταθερή ισχύ, η ταχύτητα έλικας μειώθηκε 0,9%

Οι εξοικονομήσεις ισχύος που μετρήθηκαν μπορούν να ονομαστούν εντελώς ίδιες, η διαφορά του 0,6% βρίσκεται εντός του εύρους της συνολικής ακρίβειας μέτρησης.

Η μεταβολή της ταχύτητας της έλικας σε πλήρη κλίμακα δεν επηρεάζει το μοντέλο κλίμακας πρόγνωσης, ενώ η ταχύτητα της έλικας μειώθηκε σε μοντέλο κλίμακας, αυτή αυξήθηκε σε πλήρη κλίμακα από περίπου ένα τοις εκατό το κάθε ένα. Μέχρι σήμερα, μια εξήγηση για τη διαφορά αυτή δεν έχει βρεθεί.



Σχήμα 6.7: Πλήρης κλίμακα δοκιμαστικών αποτελεσμάτων χωρίς και με τον δακτύλιο τύπου-1, AS VINCENTIA, μείωση ισχύς: 6,5% σε συμβατή ταχύτητα 14,4 kts



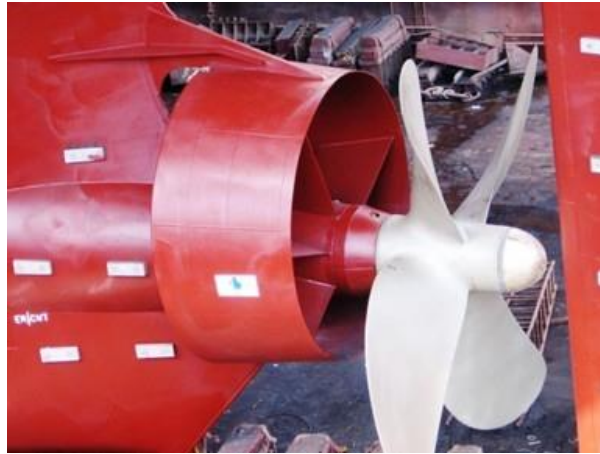
Σχήμα 6.8: Μοντέλο δοκιμαστικών αποτελεσμάτων χωρίς και με τον δακτύλιο τύπου-1, AS VINCENTIA, μείωση ισχύος: 7,1% σε συμβατή ταχύτητα 14,4 kts

## 6.4 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΣΤΗ ΣΠΗΛΑΙΩΣΗ ΚΑΙ ΣΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗΣ

Στο πρώτο πλοίο που τοποθετήθηκε ένας δακτύλιος τύπου-1, το STAR ISTIND, (σχήμα 6.9), μια κάμερα για την παρακολούθηση είχε εγκατασταθεί πάνω από την έλικα και του δακτυλίου τύπου-1 για την παρατήρηση της συμπεριφοράς της σπηλαιώσης στην έλικα. Οι παρατηρήσεις αυτές ξεκίνησαν με την εγκατάσταση του δακτυλίου τύπου-1, οπότε δεν είναι δυνατή η σύγκριση της συμπεριφοράς σπηλαιώσης στην έλικα. Αλλά δύο αποτελέσματα είναι πολύ σημαντικά: Δεν υπάρχει σπηλαιώση στο δακτυλίου τύπου-1 και καμία σπηλαιώση στις ρίζες του πτερυγίου της έλικας.

Όσον αφορά τη συμπεριφορά των ταλαντώσεων για αυτό το σκάφος, δυστυχώς, δεν υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία μετρήσεων, αλλά υπάρχει πληροφόρηση από τα πληρώματα από σχεδόν όλα τα ανακατασκευασμένα πλοία με δακτύλιο τύπου-1 αναφορές, ότι οι ταλαντώσεις είναι σημαντικά χαμηλότερες, ειδικά στο σχεδιαστικό ερματισμό.

Υπάρχει μια αξιοσημείωτη παρατήρηση σχετικά με τη συμπεριφορά του κινητήρα σε θαλασσοταραχή με και χωρίς τον δακτύλιο τύπου-1. Φαίνεται ότι ο δακτύλιος τύπου-1 σταθεροποιεί τις περιστροφές τις έλικας σε βαριά θαλασσοταραχή. Αυτή η παρατήρηση έγινε σε διαφορετικά πλοία ενός συγκεκριμένου τύπου, καθένα από τα οποία έχουν βιώσει προβλήματα στον κινητήρα τους πριν από την εγκατάσταση των δακτυλίων τύπου-1.



Σχήμα 6.9: Πρώτη εγκατάσταση πλήρης κλίμακας δακτυλίου τύπου-1, STAR ISTIND, 54000 TDW MPC, Σεπτέμβριος 2009

## 6.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 6.5.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΑΥΤΟΔΥΝΑΜΗΣ ΠΡΩΩΣΗΣ

Από την αρχή της ανάπτυξης του δακτυλίου τύπου-1, η εταιρεία που τα κατασκευάζει αποφάσισε να αναλάβει δοκιμαστικά μοντέλα πλοίων για τα αρχικά σχέδια ώστε να είναι σίγουροι για τις αναμενόμενες μειώσεις ισχύος. Η απόφαση αυτή έγινε με δύο στόχους: πρώτον, την εκτίμηση της πραγματικής εξοικονόμησης ισχύος, και το δεύτερο, η συλλογή δεδομένων για την επικύρωση των υπολογιστικών ρευστοδυναμικών-αποτελεσμάτων, με στόχο τη βελτίωση της κατανόησης και σχετικές με τον τρόπο ενέργειας απόψεις για να επιτρέψει μόνο των υπολογιστικών ρευστοδυναμικών-τεχνικών που πρέπει να χρησιμοποιηθούν στο μέλλον.

Μέχρι το τέλος Ιανουαρίου 2011 δοκιμές αυτοδύναμης πρόωσης για να εκτιμηθεί η εξοικονόμηση ενέργειας από το δακτύλιο τύπου-1 έχουν διεξαχθεί για 18 διαφορετικά έργα σε 6 διαφορετικές δεξαμενές μοντέλων, δηλαδή HSVA (8), SVA (3), SSPA (3), MARINTEK (2), HMRI (1), και MARIN (1). Δεν υπάρχουν σχεδόν καθόλου διαφορές στα αποτελέσματα από την μία δεξαμενή στην άλλη.

Οι τύποι πλοίων περιλαμβάνουν το εύρος από 12000 TDW μεταφοράς φορτίου χύδην σε 320000 TDW VLCC δεξαμενόπλοιο, καθώς επίσης και σε ένα 20 - knot RoRo πλοίο ( $C_{Th} = 1.1$ ).

Τα αποτελέσματα από όλα τα 35 δοκιμαστικά μοντέλα με και χωρίς τον δακτύλιο τύπου-1 συνοψίζονται στο σχήμα 6.10. Ο μέσος όρος όλων των μετρήσεων είναι 6,5% της μείωσης ισχύος από τον δακτύλιο τύπου-1.

Μέσος όρος προμελέτης σχεδιασμού: 5.7% μείωση ισχύος

Μέσος όρος σχεδιασμός ερματισμού: 7.3% μείωση ισχύος

Η διαφορά μεταξύ της προμελέτης σχεδιασμού και του σχεδιαστικού ερματισμού είναι υψηλότερη από ότι αναμενόταν θεωρητικά. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε δύο λόγους:

1. Πρώτον, ότι σε γενικές γραμμές, οι γραμμές των πλοίων για την κατάσταση ερματισμού, από υδροδυναμική άποψη, είναι λιγότερο



βέλτιστη σε σύγκριση με την προμελέτη του σχεδιασμού, δεδομένου ότι οι γραμμές των πλοίων είναι βελτιστοποιημένες για το σχέδιο σχεδιασμού τους. Με άλλα λόγια, στην κατάσταση ερματισμού οι απώλειες ροής είναι υψηλότερες, και ως εκ τούτου, αυτή η κατάσταση είναι πιο δεκτική σε βελτίωση μέσω της χρήσης των συσκευών εξοικονόμησης ενέργειας.

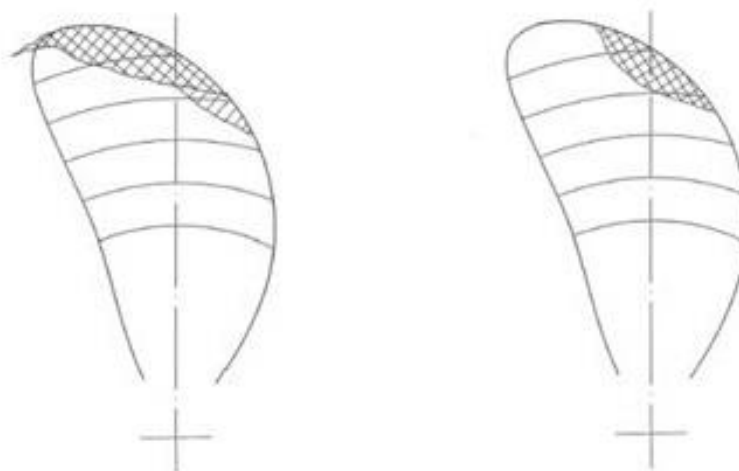
2. Δεύτερον, ότι σε μερικές περιπτώσεις η μετρούμενη διαφορά ισχύος σε δοκιμές μοντέλου επηρεάζεται από διαχωρισμούς ροής στο σχέδιο ερματισμού, τα οποία μειώνονται ή εξαλείφονται με τον δακτύλιο τύπου-1. Αυτοί οι διαχωρισμοί ροής συνήθως δεν συμβαίνουν σε πλήρη κλίμακα.

Αν το κέρδος ισχύος πρέπει να αποδεικνύεται σε πλήρη κλίμακα στο σχέδιο ερματισμού, το γεγονός αυτό μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά προβλήματα στην πώληση του δακτυλίου τύπου-1, δεδομένου ότι, κατά πάγια χρήση της τυποποιημένης διαδικασίας για την εκτίμηση της επιτευχθείσας μείωσης ισχύος σε σχέδιο σχεδιασμού που βασίζεται σε σχέδιο του ερματισμού με μετρήσεις σε πλήρη κλίμακα, η μέθοδος μπορεί να οδηγήσει σε λάθος αποτελέσματα της προμελέτης.

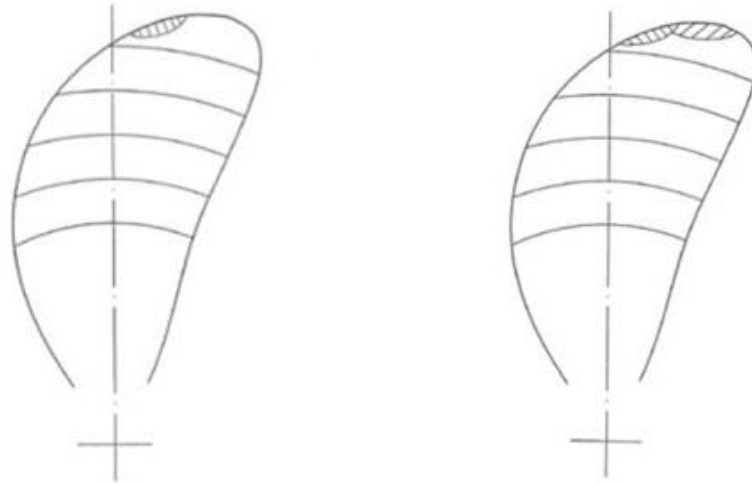
### 6.5.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΣΠΗΛΑΙΩΣΗΣ

Οι δοκιμές μοντέλου για την εκτίμηση της επίδρασης του δακτυλίου τύπου-1 στη συμπεριφορά σπηλαίωσης και των παλμών πιέσεων πραγματοποιήθηκαν για δύο διαφορετικούς τύπους πλοίων σε δύο διαφορετικές δεξαμενές ρυμούλκησης (SSPA και HSVA).

Τα αποτελέσματα της δοκιμής είναι πολύ παρόμοια. Τα σχήματα 6.10 και 6.11 δείχνουν τα αποτελέσματα των παρατηρήσεων σπηλαίωσης από ένα μοντέλο 158000 TDW μεταφοράς χύδην φορτίου, εξοπλισμένο με και χωρίς τον δακτύλιο τύπου-1. Μπορεί να φανεί ότι στο ακροπτερύγιο μειώνεται σημαντικά η σπηλαίωση από τον δακτύλιο τύπου-1. Αυτό οδηγεί σε περαιτέρω μικρή μείωση ισχύος όταν χρησιμοποιείται μια υπάρχουσα έλικα. Για μια νέα κατασκευή με τοποθετημένο τον δακτύλιο τύπου-1, η έλικα θα μπορούσε να σχεδιαστεί με μια καλύτερη κατανομή του φορτίου με αποτέλεσμα ελαφρώς υψηλότερη απόδοση της έλικας.



Σχήμα 6.10: Συμπεριφορά σπηλαίωσης χωρίς τον δακτύλιο τύπου-1, στο 158000 TDW Bulker, στα αριστερά γωνία στροφής πτερυγίου 190°, στα δεξιά 200°



Σχήμα 6.11: Συμπεριφορά σπηλαίωσης με τον δακτύλιο τύπου-1, στο 158000 TDW Bulker, στα αριστερά γωνία στροφής πτερυγίου 190°, στα δεξιά 200°

### 6.5.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΕΛΙΓΜΩΝ

Οι δοκιμές μοντέλου με και χωρίς τον δακτύλιο τύπου-1 διεξήχθησαν στο SSPA για ένα δεξαμενόπλοιο 46000 TDW. Το πλοίο χωρίς τον δακτύλιο τύπου-1 είναι λίγο ασταθές. Σε αυτήν την περίπτωση, ο δακτύλιος τύπου-1 οδήγησε σε αξιοσημείωτη και απροσδόκητη βελτίωση της ευστάθειας εκτροπής. Στον πίνακα 6.1 φαίνονται τα αποτελέσματα, η πρώτη υπέρβαση γωνίας των τυποποιημένων ζιγκ-ζαγκ-Δοκιμών 10°/10° μειώθηκε κατά 15% και το δεύτερο κατά 23%, με την τακτική διαμέτρου να αυξηθεί μόνο κατά 3%. Σε αυτή την ειδική περίπτωση, τα IMO-κριτήρια έχουν εκπληρωθεί με την εγκατάσταση του δακτυλίου τύπου-1.

Zig-Zag-Tests 10°/10°	IMO-Criterion	w/o Duct	With Duct	Duct/without
1st overshoot (°)	17,2	17	14,5	-15%
2nd overshoot (°)	31,8	40,6	31,4	-23%
Tactical diameter/Lpp	5	2,75	2,84	3%

Πίνακας 6.1: Αποτελέσματα δοκιμής ελιγμών, 46.000 tdw Tanker, SSPA

### 6.6 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΑ ΑΠΟΝΕΡΑ ΕΠΙΤΥΓΧΑΝΟΝΤΑΣ ΒΕΛΤΙΩΣΕΙΣ

Όλες οι συσκευές εξοικονόμησης ενέργειας λειτουργούν μειώνοντας τις απώλειες γύρω από την περιστρεφόμενη έλικα πίσω από το πλοίο.

Το χτύπημα ροής της έλικας ονομάζεται απόνερα πλοίων και μπορεί απλά να παρουσιάζεται ως λεγόμενο πεδίο τριών διαστάσεων-πεδίο απόνερων, το οποίο είναι εύκολο να μετρηθεί σε δοκιμές μοντέλου ή να εκτιμηθεί με υπολογιστικής ρευστοδυναμικής-υπολογισμούς.

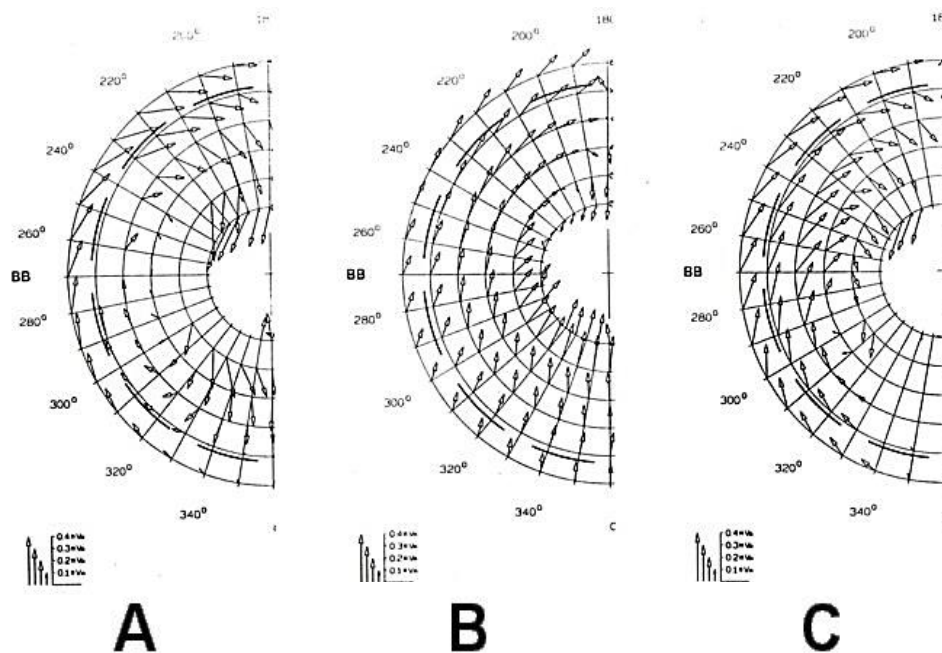
Η αξονική συνιστώσα γενικά προκαλείται από την τριβή της επιφάνειας του πλοίου. Οι εγκάρσιες συνιστώσες προκαλούνται κυρίως από τη μορφή του πλοίου, ειδικά η καμπυλότητα των γραμμών του πλοίου. Η έλικα είναι σε θέση να ανακτήσει ένα μέρος της τριβής ενέργειας που υπάρχουν στα απόνερα του πλοίου.

Προ-δακτύλιοι (και εν μέρει προ-πτερύγια) μειώνουν τις απώλειες χωρίς εγκάρσιες συνιστώσες του πεδίου απόνευρων. Κατά συνέπεια, η αποτελεσματικότητα των προ-δακτυλίων και προ-πτερυγίων εξαρτάται από τον τύπο του πεδίου απόνευρων, και ιδίως από τις εγκάρσιες απώλειες ροής απόνευρων.

Οι εγκάρσιες συνιστώσες στο πεδίο απόνευρων είναι πολύ διαφορετικές από μορφή πλοίου σε μορφή πλοίου.

Το Σχήμα 6.12 δείχνει τα τρία κύρια είδη των εγκάρσιων πεδίων απόνευρων. Τύπος Α έχει μια πολύ μεγάλη δίνη, δηλαδή ένα υψηλό ενεργειακό περιεχόμενο. Τύπου Β έχει πολύ μικρότερη δίνη. Τα περισσότερα πλοία είναι κάπου στη μέση, τύπου C. Οι δίνες οι λεγόμενες δίνες γραμμής, έχουν δημιουργηθεί ακριβώς πίσω από το μέση τομή στην περιοχή όπου δημιουργούνται τα νερά, για το λόγο αυτό καλούνται επίσης δίνες υδροσυλλεκτών.

Αυτές οι δίνες υδροσυλλεκτών επηρεάζουν την πιθανή εξοικονόμηση ενέργειας από τους προ-δακτυλίους, και, επιπλέον, έχουν μεγάλη επίδραση στην ευστάθεια και μια μέτρια επίδραση στη συμπεριφορά σπηλαίωσης. Ο πίνακας 6.2 συνοψίζει αυτούς τους παράγοντες.



Σχήμα 6.12: Διάφοροι τύποι εγκάρσιων πεδίων απόνευρων

Κατά συνέπεια, η ένταση της εγκάρσιας δίνης χωρίς επιδράσεις του πεδίου απόνευρων επηρεάζει την πιθανή μείωση της ισχύος από τον δακτύλιο τύπου-1.

Περιληπτικά:

Μεγάλες δίνη: 5% - 10% μείωση της δυνατής ισχύος

Μικρή δίνη: 1% - 5% μείωση δυνατή ισχύ

Μεσαία δίνη: 3% - 8% μείωση δυνατή ισχύ

Τύπος Δίνης	A	B	C
Ένταση δίνης	μεγάλη	μικρή	μεσαία
Εξοικονόμηση ισχύος με τον δακτύλιο τύπου-1			
Αντίσταση πλοίου	υψηλή	χαμηλή	μεσαία
Μείωση ισχύος με τον δακτύλιο τύπου-1	υψηλή	χαμηλή	μεσαία
Βελτίωση σταθερής πορείας από τον δακτύλιο τύπου-1			
Σταθερή πορεία	επαρκής	μη επαρκής	μεσαία
Βελτίωση με τον δακτύλιο τύπου-1	χαμηλή	μεσαία	μεσαία
Μείωση των παλμών πίεσης			
Μείωση από τον δακτύλιο τύπου-1	υψηλή	μεσαία	μεσαία

Πίνακας 6.2: Επίδραση του δακτυλίου τύπου-1 ανάλογα με την ένταση της εγκάρσιας δίνης στο πεδίο απόνερων

## 6.7 Η ΧΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΤΟΝ ΔΑΚΤΥΛΙΟ ΤΥΠΟΥ-1

Για κάθε νέα μελέτη πλοίου στο οποίο εφαρμόζεται δακτύλιος τύπου-1, μια μοναδική σχεδίαση και βελτιστοποίηση του δακτυλίου τύπου-1 αναπτύσσεται. Η διαδικασία αυτή βασίζεται σε μεγάλο βαθμό σε υπολογιστική ρευστοδυναμική-υπολογισμούς (CFD, Computational Fluid Dynamics), σε συνδυασμό με τις δοκιμές μοντέλου.

Οι υπολογιστικής ρευστοδυναμικής-υπολογισμοί έγιναν από την επίλυση των εξισώσεων RANS σε αδόμητα πλέγματα πεπερασμένων όγκων. Για τις προσομοιώσεις ροής της γάστρας του πλοίου, πηδάλιο, έλικας και ο δακτύλιος είναι όλα μοντελοποιημένα ρητά. Ως εκ τούτου, προκειμένου να σχεδιαστεί ένας δακτύλιος τύπου-1 για ένα συγκεκριμένο πλοίο, είναι απαραίτητες οι πληροφορίες γεωμετρίας για το πλοίο, γάστρας και έλικας, καθώς και βασικά δεδομένα αυτοδύναμης πρόωσης για το συμβατικό συμφωνηθείσα σημείο του σχεδιασμού, που είναι διατεθειμένο.

Ο στόχος της βελτιστοποίησης είναι η προσαρμογή του δακτυλίου με τα ατομικά χαρακτηριστικά σχήματος της γάστρας και απόνερων, και να επιλέξουμε ένα σχέδιο αγωγού που παρέχει την υψηλότερη δυνατή εξοικονόμηση ενέργειας για την υπό εξέταση πλοίου. Τα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής-εργαλεία ιδανικά για αυτό το είδος της εργασίας, διότι σχεδόν κάθε λεπτομέρεια της ροής που βοηθά στις αποφάσεις της διαδικασίας σχεδιασμού μπορεί σχετικά εύκολα να εξαχθεί από τις προσομοιώσεις. Ως ένα παράδειγμα, το σχήμα 6.13 δείχνει την επίδραση του δακτυλίου στο κοντινό τοίχωμα ροής για μια πρόσφατη μελέτη.

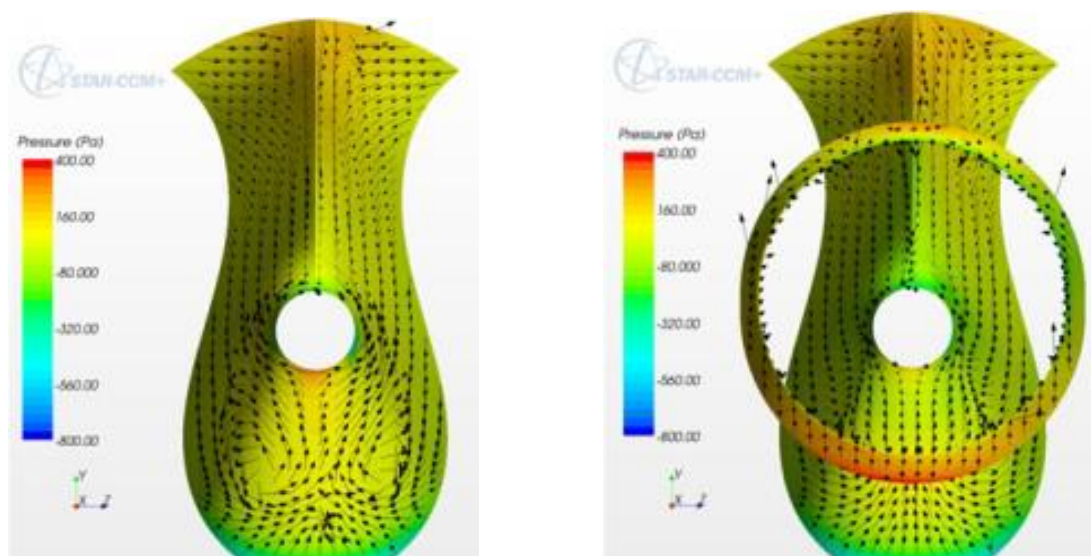
Σε γενικές γραμμές, ανάμεσα στο 3 και 20 του δακτυλίου τύπου-1 σχέδια που μελετήθηκαν με τη βοήθεια προσομοιώσεων υπολογιστικής ρευστοδυναμικής πριν ληφθεί απόφαση σχετικά με το τελικό σχέδιο του δακτυλίου να κατασκευασθεί, το οποίο στη συνέχεια θα ερευνηθεί περαιτέρω με δοκιμές μοντέλου. Το τελικό σχέδιο δακτυλίου τύπου-1 μπορεί να μοιάζει αρκετά διαφορετικό, ανάλογα για το πλοίο που έχει σχεδιαστεί. Ο αριθμός των επαναλήψεων του σχεδιασμού του δακτυλίου που απαιτούνται για κάθε έργο έχει μειωθεί αισθητά με την αυξανόμενη εμπειρία του σχεδιασμού.

Οι δοκιμές μοντέλου χρησιμεύουν κυρίως για τον προσδιορισμό της εξοικονόμησης ενέργειας που επιτυγχάνεται με το σχεδιασμό του δακτυλίου τύπου-1. Επιπλέον, οι δοκιμές μοντέλου χρησιμοποιούνται για την βελτιστοποίηση των γωνιών βήματος πτερυγίων και ως δεδομένα επικύρωσης για τους υπολογιστικές ρευστοδυναμικής-υπολογισμούς.

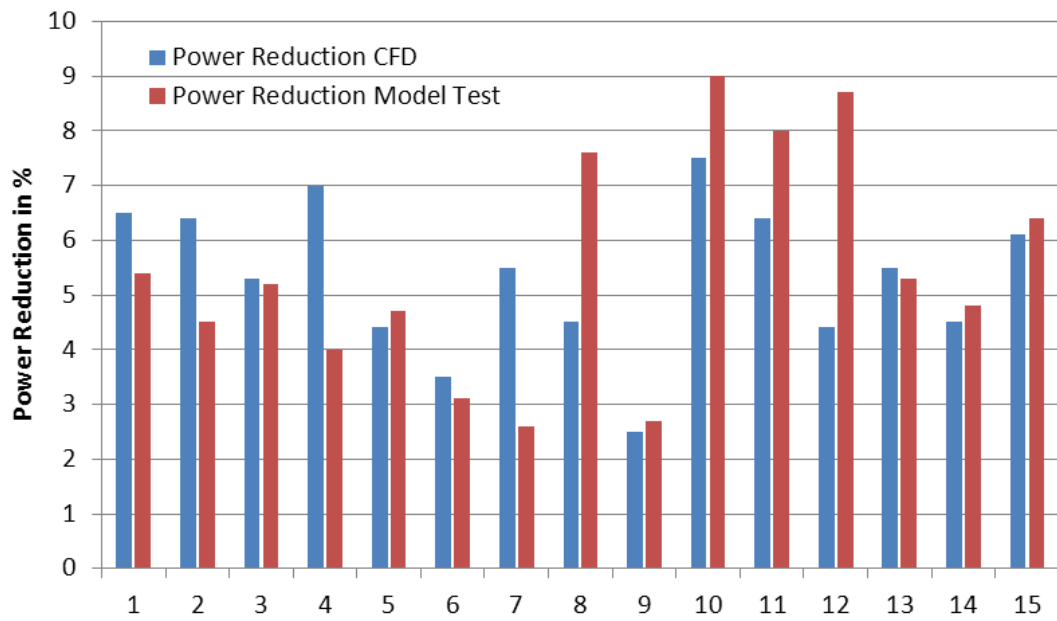
Προκειμένου να διασφαλίζεται η ορθή εκτέλεση του δακτυλίου τύπου-1 σε πλήρη κλίμακα, ο τελικός δακτύλιος με τις τελικές βελτιστοποιημένες ρυθμίσεις πτερυγίων από τις δοκιμές μοντέλου υπολογίζεται τόσο σε πλήρη κλίμακα όσο και σε κλίμακα μοντέλου. Σε περίπτωση που παρατηρούνται σημαντικές διαφορές, τα πτερύγια ρυθμίζονται για να προσαρμοστούν ελαφρώς. Οι προσαρμογές αυτές γίνονται με μεγάλη προσοχή, δεδομένου ότι υπάρχουν αβεβαιότητες που συνδέονται με την ορθή πρόβλεψη της πλήρους κλίμακας απόπνεων στα πλοία.

Για τους σκοπούς αξιόπιστου προσδιορισμού ώστε να κατορθώσουμε μείωση ισχύος, πριν από κάθε θαλάσσιες δοκιμές, πλήρους κλίμακας προβλέψεις βασισμένες σε δοκιμαστικά μοντέλα φαίνεται να είναι το καταλληλότερο εργαλείο αυτή τη στιγμή. Όπως προαναφέραμε αυτή η συμφωνία βρέθηκε μέχρι σήμερα για τις προβλέψεις που είναι βασισμένη σε δοκιμές μοντέλου και μετρήσεις πλήρους κλίμακας.

Η ακρίβεια των υπολογιστικής ρευστοδυναμικής-υπολογισμών σχετικά με τη μείωση της ισχύος δείχνει ακόμη ένα βαθμό διασποράς. Στο σχήμα 6.14, η μείωση της ισχύος που μετράτε σε δοκιμές μοντέλου και ότι προέβλεψε με μοντέλο κλίμακας από υπολογιστικής ρευστοδυναμικής-υπολογισμούς, παρουσιάζεται για τους τελευταίους 15 δακτυλίου τύπου-1 σχεδιασμένα δοκιμαστικά μοντέλα ως μέρος των τελευταίων 9 μελετών δακτυλίων τύπου-1. Μπορεί να φανεί ότι για 11 από τα τελευταία 15 σχεδιασμένα, η υπολογιστική ρευστοδυναμική προβλέπει την εξοικονόμηση ενέργειας που επιτυγχάνεται με ακρίβεια  $\pm 2\%$  της απόλυτης τιμής ισχύος. Παρ'όλα αυτά, σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να προκύψει από τις διαφορές έως 4%. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι διαφορές που παρατηρήθηκαν δεν είναι καθαρά σε σχέση με τη ροή των προβλημάτων μοντελοποίησης. Κατά την διάρκεια αυτών των μελετών έγιναν εμπορικές εργασίες, συμβιβασμοί που πρέπει να γίνουν σε σχέση με χρονοδιαγράμματα και πληροφορίες πλοίων που είναι διαθέσιμες.



Σχήμα 6.13: Ροή κοντά στο τοίχωμα για ένα σχέδιο χωρίς και με τον δακτύλιο τύπου-1



Σχήμα 6.14: Καθοριστική μείωση ισχύος με τον δακτύλιο τύπου-1 βασισμένο σε υπολογιστική ρευστοδυναμική και δοκιμές μοντέλου

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

# ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΕΛΙΚΑΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΠΡΟΣΘΕΤΩΝ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ ΚΕΦΑΛΗΣ

### 7.1 ΠΑΡΑΔΟΣΙΑΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΤΗΣ ΕΛΙΚΑΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΠΡΟΣΘΕΤΩΝ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ ΚΕΦΑΛΗΣ

Η συσκευή της έλικας και των πρόσθετων πτερυγίων κεφαλής αναπτύχθηκε το 1987 από Mitsui OSK Lines, στο Εργαστήριο Μηχανικής Ρευστών στην Δυτική Ιαπωνία και Mikado Propeller (Nakashima Mitsuwa Propeller) και έχει τοποθετηθεί σε περισσότερα από 3000 πλοία σε όλο τον κόσμο.

Ο θεμελιώδης μηχανισμός του και οι επιπτώσεις του έχουν επανειλημμένα επαληθευθεί μέσα από πολλές δοκιμές μοντέλου δεξαμενής και πραγματικές μετρήσεις του πλοίου από το πρώτο στάδιο της ανάπτυξης του.

Τα αίτια της επιτυχίας της συσκευής της έλικας και των πρόσθετων πτερυγίων κεφαλής είναι:

- Εξοικονόμηση καυσίμων έως 5 %.
- Πάνω από 25 χρόνια εμπειρίας, η συσκευή της έλικας και των πρόσθετων πτερυγίων κεφαλής έχει εγκατασταθεί σε περισσότερα από 3000 πλοία.
- Εύκολη κατασκευή και εύκολη τοποθέτηση.
  - Δεν υπάρχουν κινούμενα μέρη, καμία τροποποίηση της γάστρας και δεν απαιτείται καμία εργασία συγκόλλησης.
  - Μπορεί να τοποθετηθεί με έλικα σταθερού βήματος είτε με ρυθμιζόμενου βήματος.
  - Βελτιστοποιημένη σχεδίαση και κατά παραγγελία προσαρμοσμένη για κάθε έλικα.
- Μια φορά εγκατάσταση, η συντήρηση της να μην είναι απαραίτητη και η δράση της να διαρκεί για όλη της την ζωή.
- Η διάρκεια επενδυτικής απόδοσης είναι μικρή. Η επένδυση να είναι μικρή με μεγάλες επιστροφές χρημάτων.
- Έγκριση ταξινόμησης δεν είναι απαραίτητη.
  - Οι κυριότερες νηογνώμονες τοποθετούν την συσκευή της έλικας και των πρόσθετων πτερυγίων κεφαλής έξω από τους κανόνες ταξινόμησης τους.
  - Δεν υπάρχει καμία ανάγκη για τα πλοία να επιθεωρούνται όταν περνάνε ελέγχους στα λιμάνια.

Η συσκευή της έλικας και των πρόσθετων πτερυγίων κεφαλής είναι μια αποτελεσματική συσκευή εξοικονόμησης ενέργειας η οποία μπορεί να ανακτήσει την απώλεια ενέργειας της δίνης στον άξονα της πλήμνης της έλικας στην κάτω ροή του ρεύματος της και να εξαλείψει της χαμηλή πίεση περιοχής πίσω από το κύριο καπάκι. Η συσκευή της έλικας και των πρόσθετων πτερυγίων κεφαλής αποτελείται από μερικά μικρά πτερύγια που είναι τοποθετημένα επίπεδα στο κύριο καπάκι της έλικας και περιστρέφονται μαζί με την έλικα. Το σχήμα 7.1 δείχνει την συσκευή της έλικας και των πρόσθετων πτερυγίων κεφαλής εγκατεστημένη σε πλοία.

Ο υδροδυναμικός μηχανισμός της συσκευής της έλικας και των πρόσθετων πτερυγίων κεφαλής μπορεί να συνοψιστεί ως εξής:

- (1) Η ώση της έλικας αυξάνεται από την εξαφάνιση της χαμηλής-πίεσης περιοχής πίσω από το κυρίως καπάκι λόγω της διάλυσης της δίνης στον άξονα.
- (2) Η συνολική ροπή της έλικας μειώνεται επειδή η δύναμη που ασκείται στο πτερύγιο αντιδρά ως αντίστροφη ροπή από τη διόρθωση της ροής του ρεύματος κατάντη από το πτερύγιο της έλικας ελεύθερου άκρου.

Κυρίως, το σχεδιαστικό έργο της συσκευής της έλικας και των πρόσθετων πτερυγίων κεφαλής εξαρτάται από τη βέλτιστη επιλογή των αποτελεσμάτων των δοκιμών μοντέλου, και η αλληλεπίδραση μεταξύ της έλικας και της συσκευής της δεν λαμβάνεται επαρκώς υπόψη.

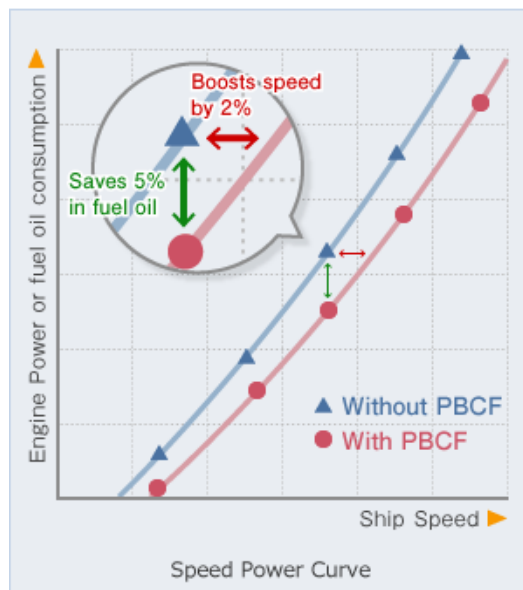
Μια ολοκληρωμένη διαδικασία σχεδιασμού της συσκευής της έλικας και των πρόσθετων πτερυγίων κεφαλής για ένα φορτηγό πλοίο θα δούμε παρακάτω, και τα αποτελέσματα των δοκιμών του μοντέλου δείχνουν ότι η συσκευή της έλικας και των πρόσθετων πτερυγίων κεφαλής που σχεδιάστηκε από την ολοκληρωμένη μέθοδο θα έχει υψηλότερη απόδοση υπό συνθήκες σχεδιασμού.



Σχήμα 7.1: Εγκατεστημένες συσκευές της έλικας και των πρόσθετων πτερυγίων κεφαλής

Συνοψίζοντας στο σχήμα 7.2 βλέπουμε πως με την συσκευή της έλικας και των πρόσθετων πτερυγίων κεφαλής επιτυγχάνουμε εξοικονόμηση ενέργειας της τάξης του 5 % με την ίδια ταχύτητα, ή με την ίδια ιπποδύναμη, και αυξάνει την ταχύτητα του σκάφους κατά περίπου 2 % από την τοποθέτησή του.





Σχήμα 7.2: Εξοικονόμηση ενέργειας της συσκευής της έλικας και των πρόσθετων πτερυγίων κεφαλής

### 7.1.1 ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Συνδυάζοντας εμπειρική σχεδίαση με την επικύρωση της δοκιμής μοντέλου είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος σχεδιασμού της συσκευής της έλικας και των πρόσθετων πτερυγίων κεφαλής σε τεχνικές εφαρμογές. Οι σχεδιαστές επιλέγουν συνήθως μια σειρά από γεωμετρικές παραμέτρους της συσκευής της έλικας και των πρόσθετων πτερυγίων κεφαλής εμπειρικά, και επιλέγουν τη βέλτιστη μέχρι την σχεδιαστική υλοποίηση, σύμφωνα με τα αποτελέσματα των δοκιμών μοντέλου της συσκευής της έλικας και των πρόσθετων πτερυγίων κεφαλής. Αυτή η μέθοδος είναι απλή και πρακτική, και το αποτέλεσμα της δοκιμής του μοντέλου είναι αξιόπιστη, και έτσι οι σχεδιαστές μπορούν να πάρουν κανονικά το κατάλληλο σχήμα σχεδιασμού μέσα από αυτό. Ωστόσο, αυτή η μέθοδος μπορεί να βρει σχεδόν την πιο αποδοτική συσκευή της έλικας και των πρόσθετων πτερυγίων κεφαλής, γιατί οι σχεδιαστές έχουν περιορισμένα δείγματα για να κάνουν τις επιλογές τους, άλλωστε τα δείγματα εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την εμπειρία ενός ατόμου. Επιπλέον η βέλτιστη επιλογή βασισμένη στα αποτελέσματα δοκιμής μοντέλου είναι σε θέση να αποφύγει τα μειονεκτήματα των δοκιμών μοντέλων των ιδίων, όπως είναι η επίδραση της κλίμακας.

### 7.1.2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

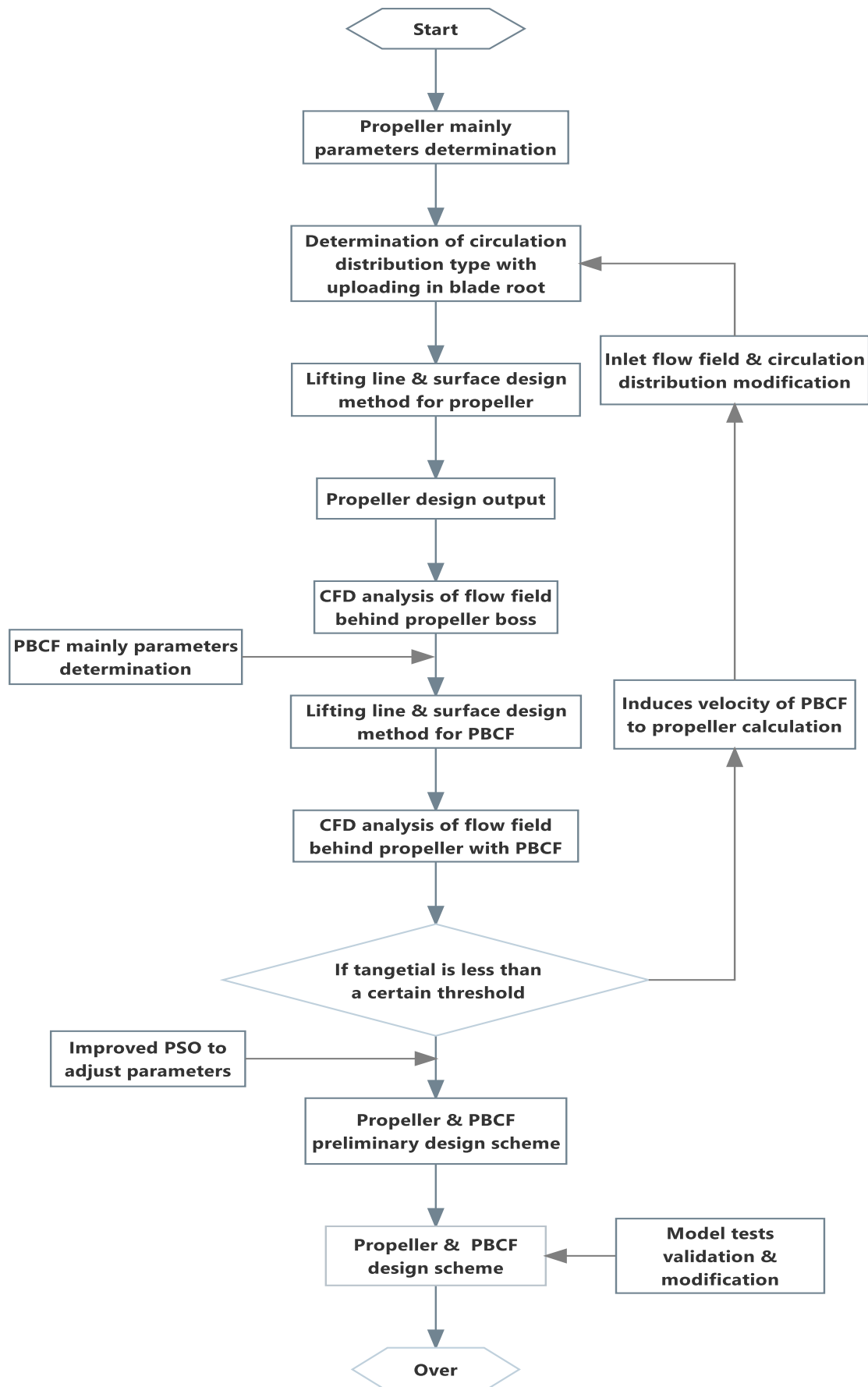
Στη δεκαετία του 1990, η θεωρητική σχεδιαστική μέθοδος της συσκευής της έλικας και των πρόσθετων πτερυγίων κεφαλής εμφανίστηκε (HU 1991, LI 2012), με βάση το δυναμικό της θεωρίας ροής όπως η ανύψωση της γραμμής και ανυψωμένης επιφάνειας του μοντέλου. Στη μέθοδο αυτή, η συσκευή της έλικας και των πρόσθετων πτερυγίων κεφαλής θεωρείται ως ένας στρόβιλος ή διαδοχική εγκατάσταση πίσω από την έλικα, και η επαγόμενη ταχύτητα της έλικας λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό.

Ωστόσο, έλικα και η συσκευή της έλικας και των πρόσθετων πτερυγίων κεφαλής θεωρούνται ως δύο ξεχωριστά τμήματα σε αυτή τη μέθοδο, η γεωμετρία της έλικας είναι σταθερή κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού της συσκευής της έλικας και των πρόσθετων πτερυγίων κεφαλής, έτσι ώστε η επίδραση της συσκευής της έλικας και των πρόσθετων πτερυγίων κεφαλής πάνω στην έλικα να μην λαμβάνεται υπ' όψη. Η θεωρητική σχεδιαστική μέθοδος της συσκευής της έλικας και των πρόσθετων πτερυγίων κεφαλής δεν χρησιμοποιείται ευρέως σε μηχανικές εφαρμογές.

## **7.2 ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΗ ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΤΗΣ ΕΛΙΚΑΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΠΡΟΣΘΕΤΩΝ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ ΚΕΦΑΛΗΣ**

Όσον αφορά το μηχανισμό εξοικονόμησης ενέργειας της συσκευής της έλικας και των πρόσθετων πτερυγίων κεφαλής, είναι λογικό ότι όσο ισχυρότερο είναι το κομβικό σημείο δίνης χωριστά από την συσκευή της έλικας και των πρόσθετων πτερυγίων κεφαλής, τόσο περισσότερη ενέργεια θα ανακτηθεί. Ως εκ τούτου, εάν το φορτίο στην εσωτερική ακτίνα της έλικας είναι αυξημένο, η βελτίωση της αποτελεσματικότητας της συσκευής της έλικας και των πρόσθετων πτερυγίων κεφαλής θα αυξηθεί αναλόγως, και το δυναμικό εξοικονόμησης ενέργειας των συσκευών της έλικας και των πρόσθετων πτερυγίων κεφαλής μπορεί να αναπτυχθεί επαρκώς. Εκτός αυτού, το φόρτωμα στην βάση του πτερυγίου φέρνει και άλλα πλεονεκτήματα. Για παράδειγμα, το φορτίο του πτερυγίου κινείται προς την εσωτερική ακτίνα κατάλληλα και κατά συνέπεια η τροποποιημένη με καλές αναλογίες ακτινικής φόρτισης κατανομή είναι επωφελής για την κατάθλιψη της δονητικής δύναμης και δίνης των ακροπτερυγίων, η ρίζα του πτερυγίου έχει μεγαλύτερο πάχος και αντοχή, και είναι δύσκολο να δονείται, ως εκ τούτου, το φόρτωμα είναι ευεργετικό για τη μείωση του θορύβου.

Εδώ θα δούμε ότι η θεωρία δυναμικής ροής περιέχει ανυψωτική γραμμή και θεωρία ανυψωτικής επιφάνειας όπου χρησιμοποιείται ως προκαταρκτική μέθοδος σχεδιασμού. Στη συνέχεια, τυρβώδης ροή με υπολογιστικής ρευστοδυναμικής εργαλεία προσομοιώνει και αναλύει το πεδίο ροής γύρω από έλικα και την συσκευή της έλικας και των πρόσθετων πτερυγίων κεφαλής. Και η βελτίωση με βελτιστοποίηση πλήθους σωματιδίων PSO (particle swarm optimization) αλγόριθμος (CAI 2009) έχει επιλεγεί για την προσαρμογή τόσο της έλικας και της συσκευής της έλικας και των πρόσθετων πτερυγίων κεφαλής. ελαφρώς. Μετά από αυτό, τα αποτελέσματα δοκιμών μοντέλου της εξόδου του σχεδιασμού εξυπηρετούν ως επικύρωση και τροποποίησης μεθόδου για την ολοκληρωμένη μελέτη του έργου. Επαναλαμβανόμενες επαναλήψεις του κάθε τμήματος σχεδιασμού τελικά κατασκευάζουν την σχεδιαστική μέθοδο της έλικας και της συσκευής της έλικας και των πρόσθετων πτερυγίων κεφαλής.. Η διαδικασία επανάληψης σχεδιασμού μπορεί να εκφραστεί από το διάγραμμα ροής που φαίνεται στο σχήμα 7.3.



Σχήμα 7.3: Διάγραμμα ροής της διαδικασίας σχεδιασμού

## 7.3 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΕΠΙΚΥΡΩΣΗ ΔΟΚΙΜΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

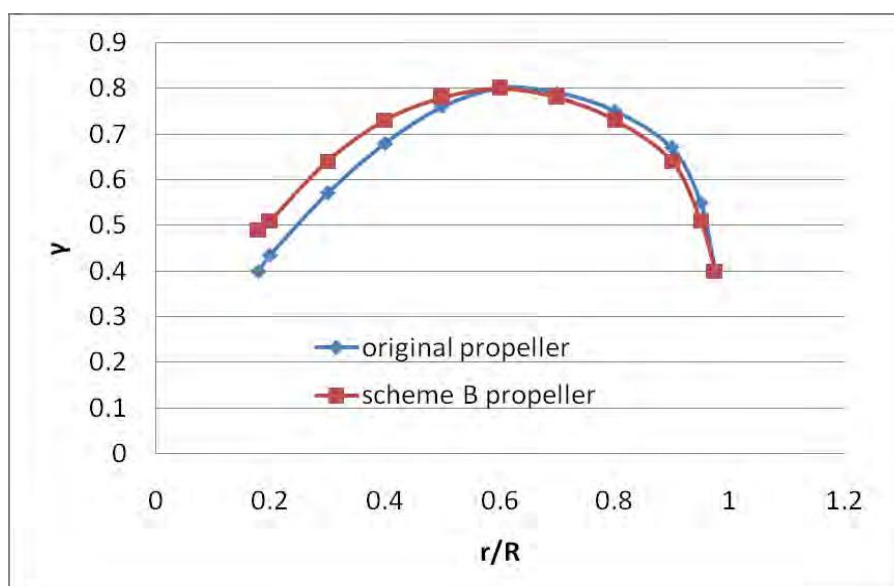
### 7.3.1 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Δύο έλικες με συσκευές της έλικας και των πρόσθετων πτερυγίων κεφαλής, ονομάζονται ως Α,Β έχουν σχεδιαστεί για ένα φορηγό πλοίο. Η συσκευή της έλικας και των πρόσθετων πτερυγίων κεφαλής του συστήματος Α έχει σχεδιαστεί για να ταιριάζει με την αρχική έλικα του πλοίου, και την έλικα και των πρόσθετων πτερυγίων κεφαλής με την έλικα του συστήματος Β όπου σχεδιάστηκαν πρόσφατα από την μέθοδο που παρουσιάζουμε. Το σχήμα 7.4 δείχνει την ακτινική κατανομή κυκλοφορίας τόσο του συστήματος Α έλικας και Β έλικας. Μπορεί να φανεί από το σχήμα 7.4 ότι η έλικα του συστήματος Β έχει μεγαλύτερη κυκλοφορία σε εσωτερική ακτίνα από εκείνη του συστήματος Α.

Ο πίνακας 7.1 παρουσιάζει τη σύγκριση των παραμέτρων μεταξύ των συστημάτων Α και Β. Η κύρια διαφορά του συστήματος Α και Β είναι ο λόγος βήματος της έλικας στην εσωτερική ακτίνα και η εγκατεστημένη γωνία της συσκευής της έλικας και των πρόσθετων πτερυγίων κεφαλής.

ΣΧΗΜΑ	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ΣΧΕΔΙΟ Α	ΣΧΕΔΙΟ Β
Έλικα	Διάμετρος (m)	5.5	5.5
	Αριθμός πτερυγίων	3	3
	$(P/D)_{0.7R}$	0.8058	0.7865
	$(P/D)_{0.2R}$	0.7202	0.8601
	Λόγος Εμβαδού	0.85	0.85
Συσκευή της έλικας και των πρόσθετων πτερυγίων κεφαλής	Εγκατεστημένη γωνία	46	49
	Αριθμός πτερυγίων	3	3
	Λόγος ακτίνας (Rf/R)	0.28	0.28

Πίνακας 7.1: Σύγκριση των παραμέτρων του συστήματος Α και Β



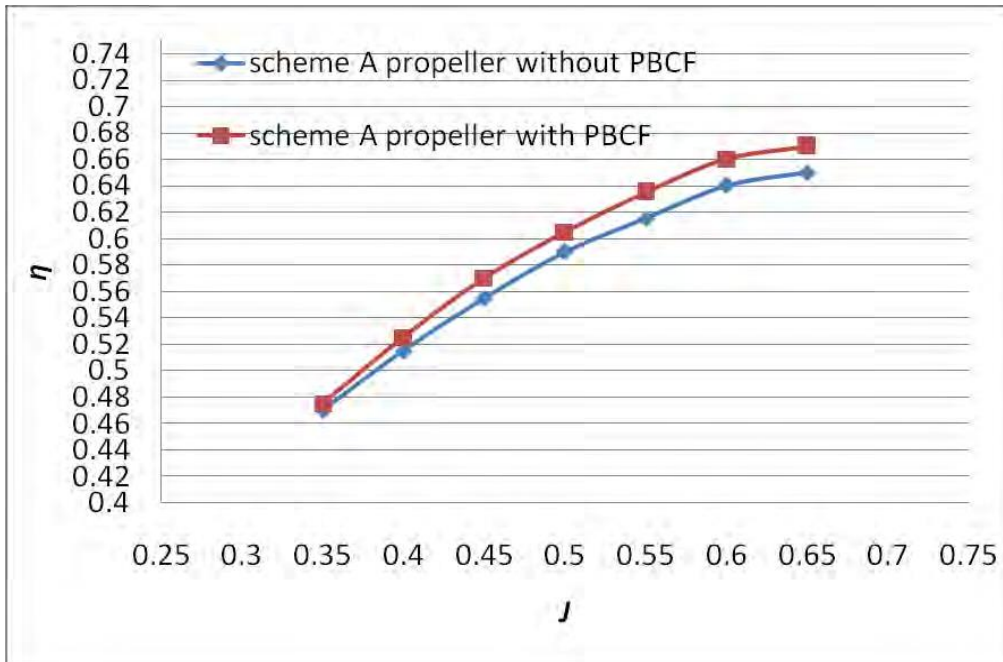
Σχήμα 7.4: Κατανομή κυκλοφορίας των ελίκων

### 7.3.2 ΕΠΙΚΥΡΩΣΗ ΔΟΚΙΜΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

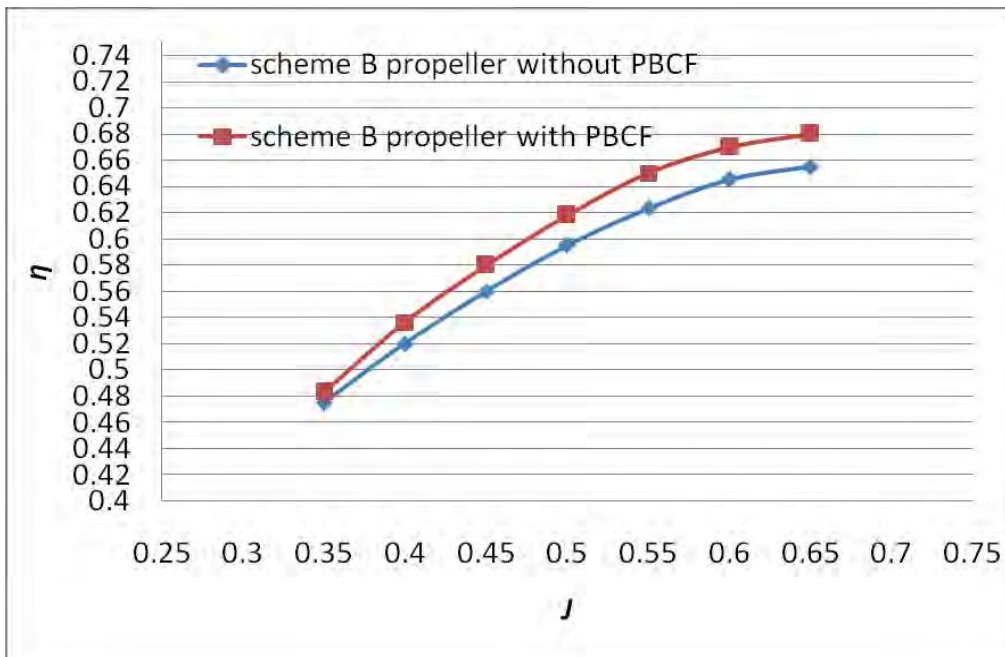
Για την επικύρωση της επίδρασης εξοικονόμησης ενέργειας της μεθόδου ενσωμάτωσης του σχεδιασμού του παραδείγματος μας, η αντίστροφη ανοιχτή δοκιμή έλικας "reverse POT" [(Propeller Open Test) (22nd ITTC 2000)] διεξάχθηκε στη σήραγγα Shanghai Jiao Tong University (SJTU). Οι δοκιμές διεξάγονται με και χωρίς την συσκευή της έλικας και των πρόσθετων πτερυγίων κεφαλής για σύστημα A και B.

Το σχήμα 7.5 στην επόμενη σελίδα δείχνει τη σύγκριση της υδροδυναμικής απόδοσης μεταξύ συστήματος A και B, με και χωρίς την συσκευή της έλικας και των πρόσθετων πτερυγίων κεφαλής. Τα αποτελέσματα των δοκιμών μοντέλου δείχνουν ότι η αποτελεσματικότητα της προωθητικής απόδοσης μπορεί να φθάσει σε 2,9% για την υπόθεση συστήματος A, ενώ 4,1 % για την περίπτωση συστήματος B σε σχεδιαστική κατάσταση (περίπου  $J = 0,44$ ). Η έλικα και η συσκευή της έλικας και των πρόσθετων πτερυγίων κεφαλής συστήματος B σχεδιάστηκαν από την ολοκληρωμένη μέθοδο έχοντας υψηλότερη απόδοση από το σύστημα A που σχεδιάστηκε από την 'συσκευή της έλικας και των πρόσθετων πτερυγίων κεφαλής με ταίριασμα σταθερής έλικας' μέθοδο σε ένα εύρος από πλεονεκτήματα συντελεστών.

(α) Σύστημα A

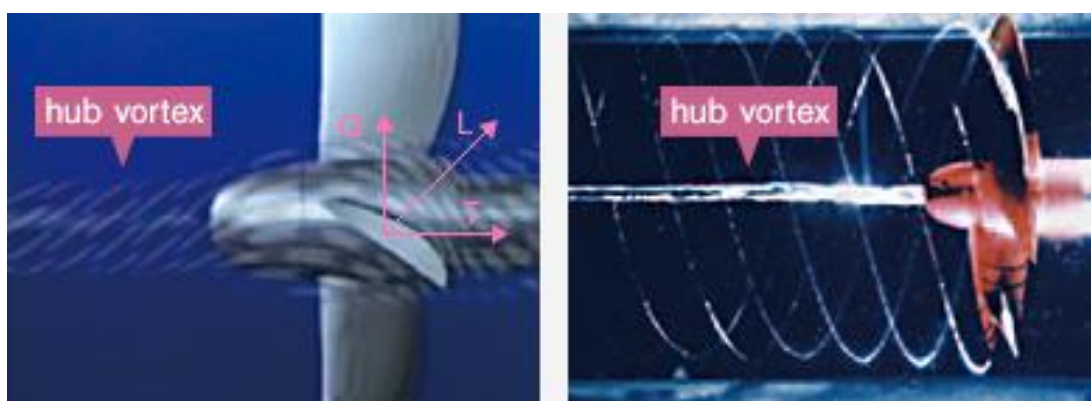


(β) Σύστημα B

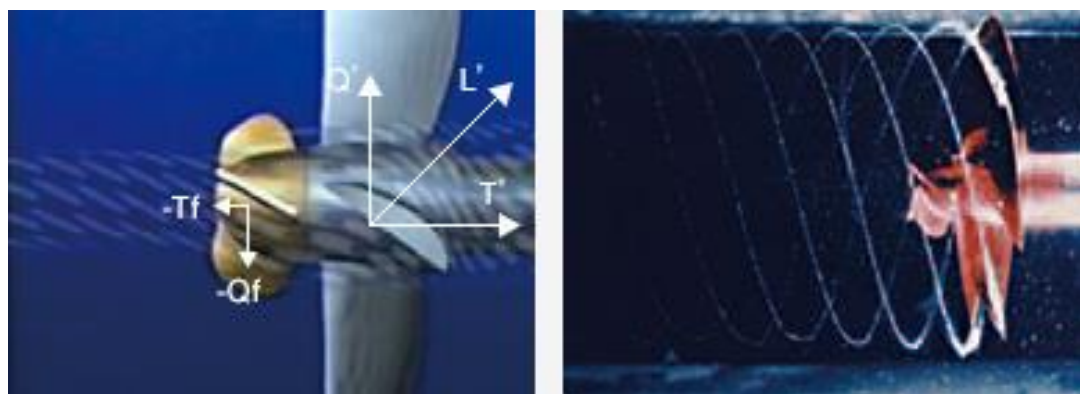


Σχήμα 7.5: Σύγκριση της υδροδυναμικής απόδοσης μεταξύ του συστήματος A & B

Μοντέλα δοκιμαστικών αποτελεσμάτων σπηλαιώσης δείχνουν ότι και τα δύο συστήματα A και B μπορούν να διαλύσουν τις δίνες που δημιουργούνται στον άξονα. Το σχήμα 7.6 δείχνει τη σύγκριση των αποτελεσμάτων οπτικοποίησης σπηλαιώσης μεταξύ της αρχικής έλικας χωρίς την συσκευή της έλικας και των πρόσθετων πτερυγίων κεφαλής και του συστήματος σχεδιασμού B. Μπορεί να φανεί ότι η δίνη στον άξονα της πλήμνης εξαφανίζεται στην περίπτωση του συστήματος B, εξάλλου, στη βαριά φορτωμένη κατάσταση λειτουργίας ( $J = 0,30$ ), η δίνη στον άξονα πλήμνης δεν παράγεται ακόμα. Ως εκ τούτου, μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι η έλικα και η συσκευή της έλικας και των πρόσθετων πτερυγίων κεφαλής συστήματος B καθώς και η μέθοδος ενσωμάτωσης του σχεδιασμού είναι αποτελεσματική και αξιόπιστη.



Χωρίς την συσκευή της έλικας και των πρόσθετων πτερυγίων κεφαλής

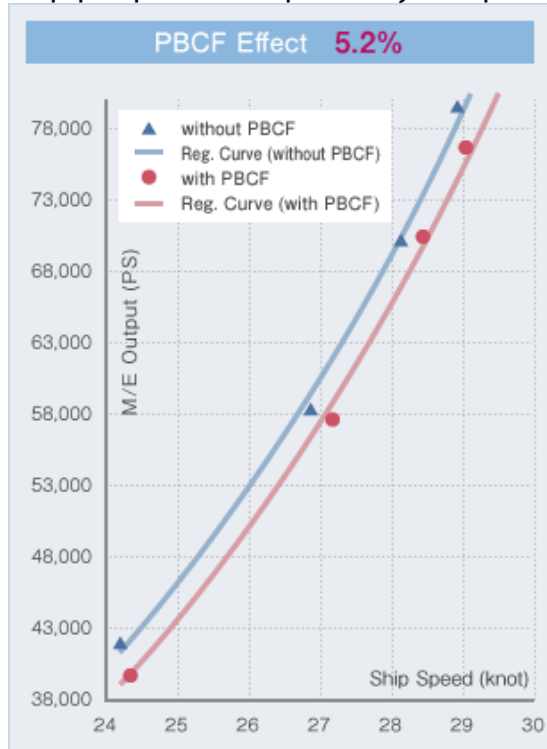


Με την συσκευή της έλικας και των πρόσθετων πτερυγίων κεφαλής

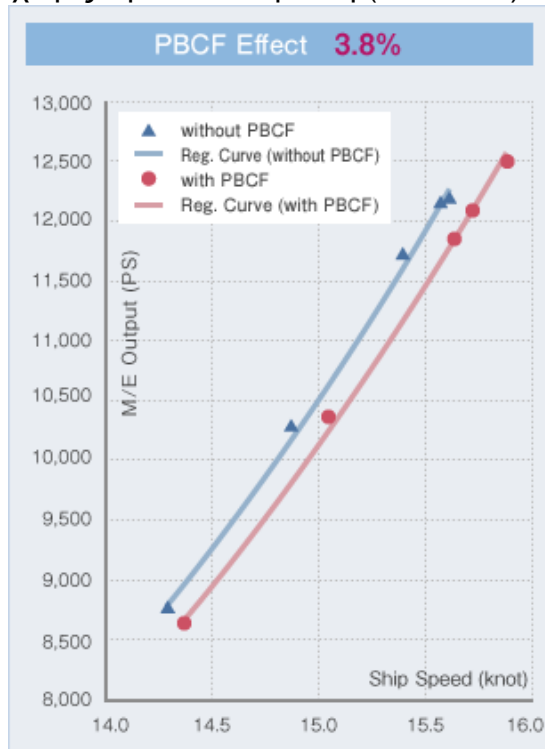
Σχήμα 7.6: Αποτελέσματα απεικόνισης σπηλαιώσης

## 7.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

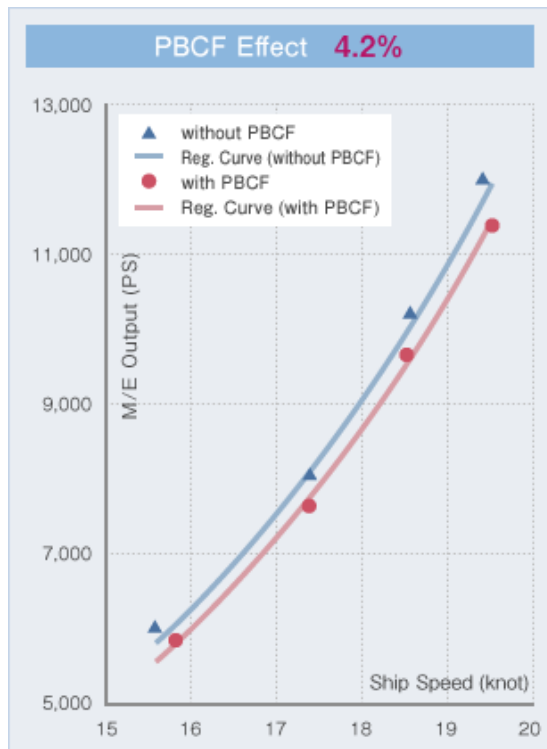
Τα παραδείγματα της ανάλυσης των αποτελεσμάτων της συσκευή της έλικας και των πρόσθετων πτερυγίων κεφαλής με πραγματικές μετρήσεις πλοίων φαίνονται στο σχήμα 7.7. Τα αποτελέσματα αναλύθηκαν με τη σύγκριση από δεδομένα ταξιδιού με και χωρίς την συσκευή αυτή (Sea trials).



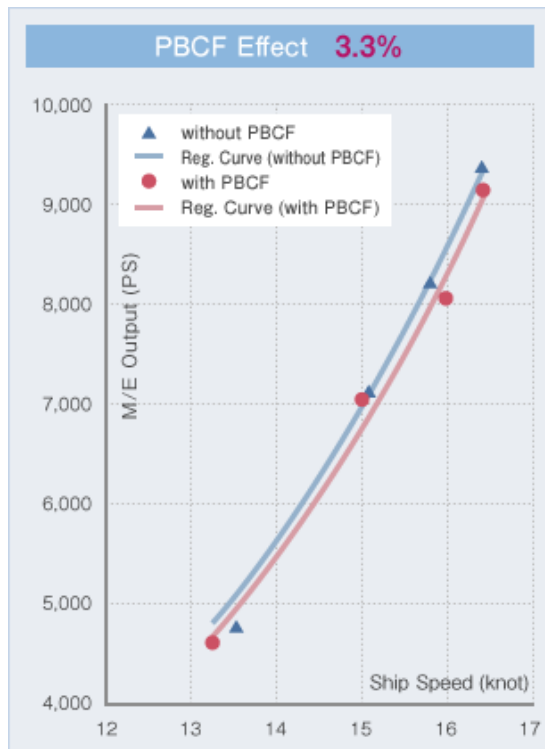
6,350 TEU Containership (MCR 82,107 PS)



Aframax Tanker (MCR 19,460 PS)



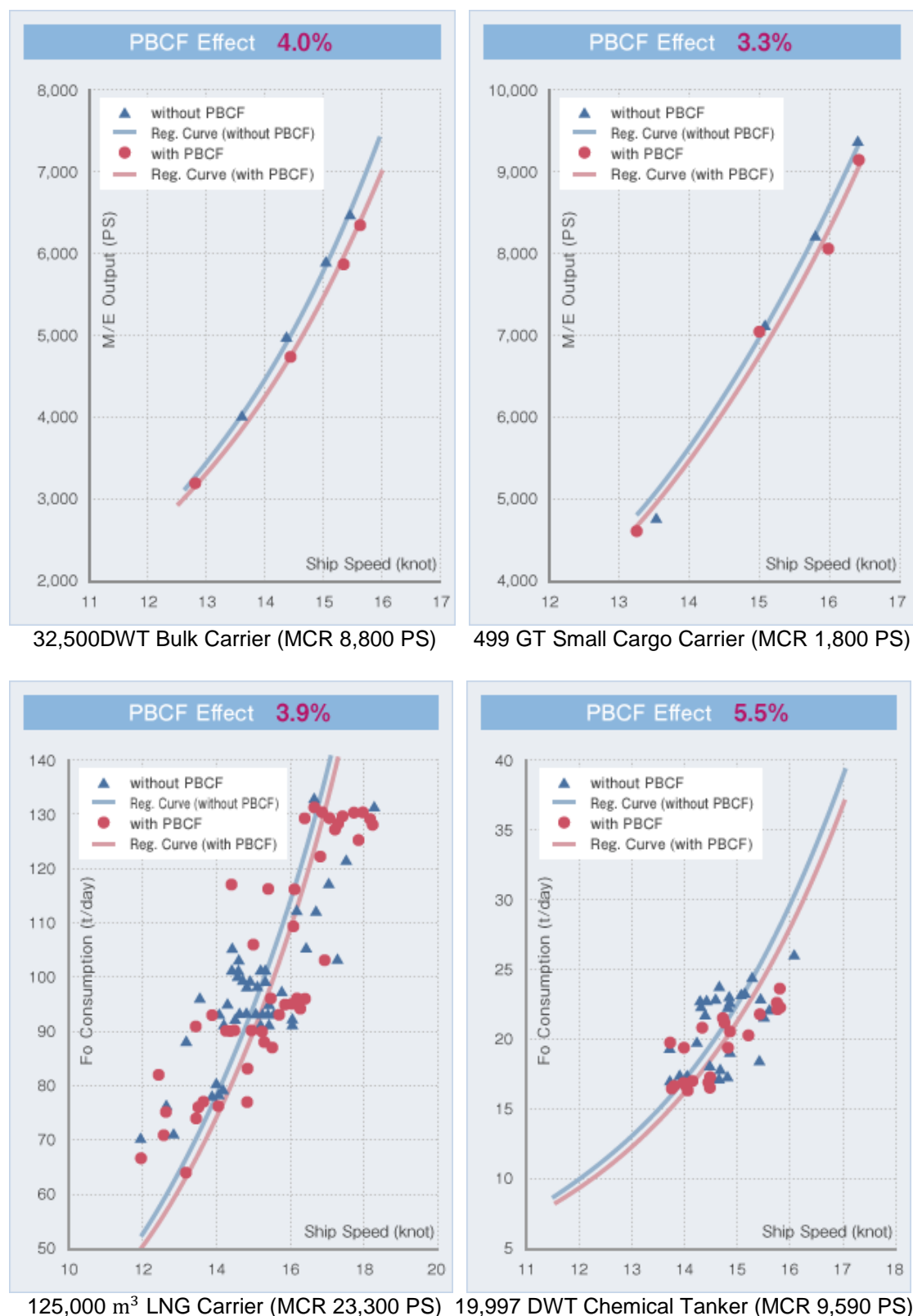
4000unit Pure Car Carrier (MCR 12,260 PS)



42,730DWT Chip Carrier (MCR 9,400 PS)



## Κεφάλαιο 7. Σχεδιαστική μέθοδος της έλικας και των πρόσθετων πτερυγίων κεφαλής



Σχήμα 7.7: Αποτελέσματα ανάλυσης της συσκευής της έλικας και των πρόσθετων πτερυγίων κεφαλής σε δοκιμές θαλάσσης



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

# ΔΑΚΤΥΛΙΟΣ ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗΣ ΡΟΗΣ

### 8.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΔΑΚΤΥΛΙΟΥ ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗΣ ΡΟΗΣ

Ο δακτύλιος εξισορρόπησης ροής [Wake Equalizing Duct (WED)] είναι ένα σύστημα για τη βελτίωση της πρόωσης των πλοίων και επίδοσης οικονομικής ανάπτυξης από τον καθηγητή Schneekluth στο Cupertino με το Εργαστήριο Έρευνας στο Ντούισμπουργκ.

Τα χαρακτηριστικά του δακτυλίου εξισορρόπησης ροής είναι τα εξής:

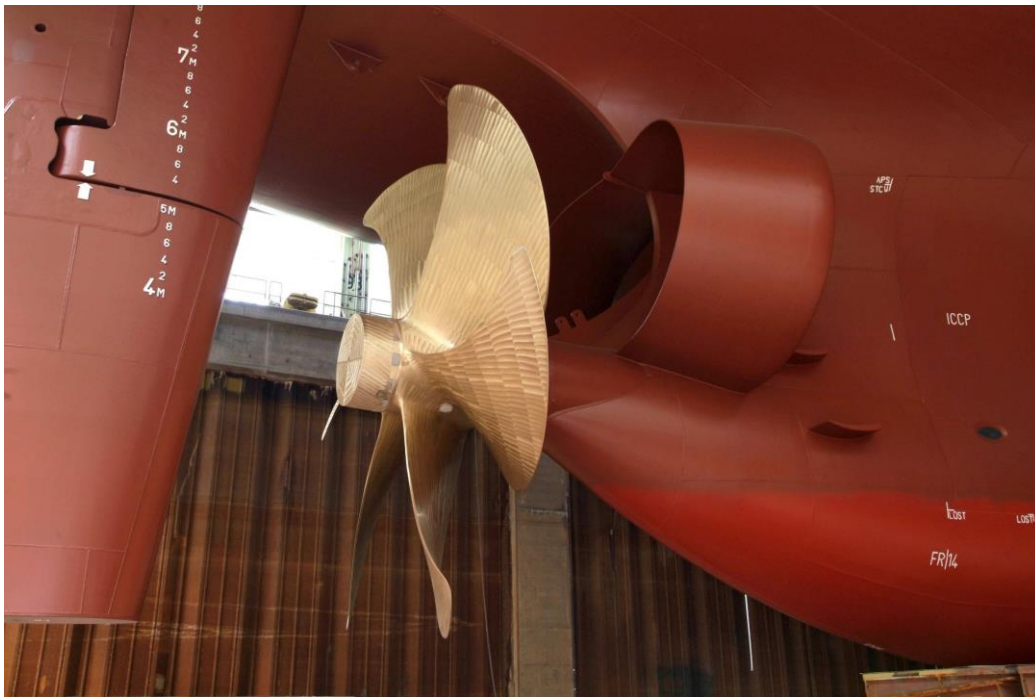
- Η συσκευή αυτή έχει εξοικονόμηση καυσίμων μέχρι και 12%. Αυτό σημαίνει εξοικονόμηση καυσίμου ή μεγαλύτερη ταχύτητα.
- Ο δακτύλιος εξισορρόπησης ροής έχει μείωση ταλαντώσεων έως και 50%.
- Σημαντική μείωση της φθοράς υλικού
- Μείωση των ζημιών έντασης
- Προστασία του ηλεκτρονικού εξοπλισμού
- Πιο άνετη διαμονή και συνθήκες εργασίας στα πλοία
- Αξιοσημείωτη βελτίωση της υγείας για το προσωπικό
- Ο δακτύλιος εξισορρόπησης ροής έχει τον μικρότερο χρόνο αποπληρωμής της επένδυσης και κανένα επιπλέον κόστος παρακολούθησης.
- Περισσότερα από 1500 πλοία έχουν εξοπλιστεί με την συσκευή αυτή και κατορθώνουν εκπληκτικές εξοικονομήσεις.

Το κύριο πλεονέκτημα έγκειται στην εξοικονόμηση ενέργειας, η οποία προκύπτει από διάφορες επιδράσεις. Αυτές μπορούν να διαφοροποιηθούν ως εξής:

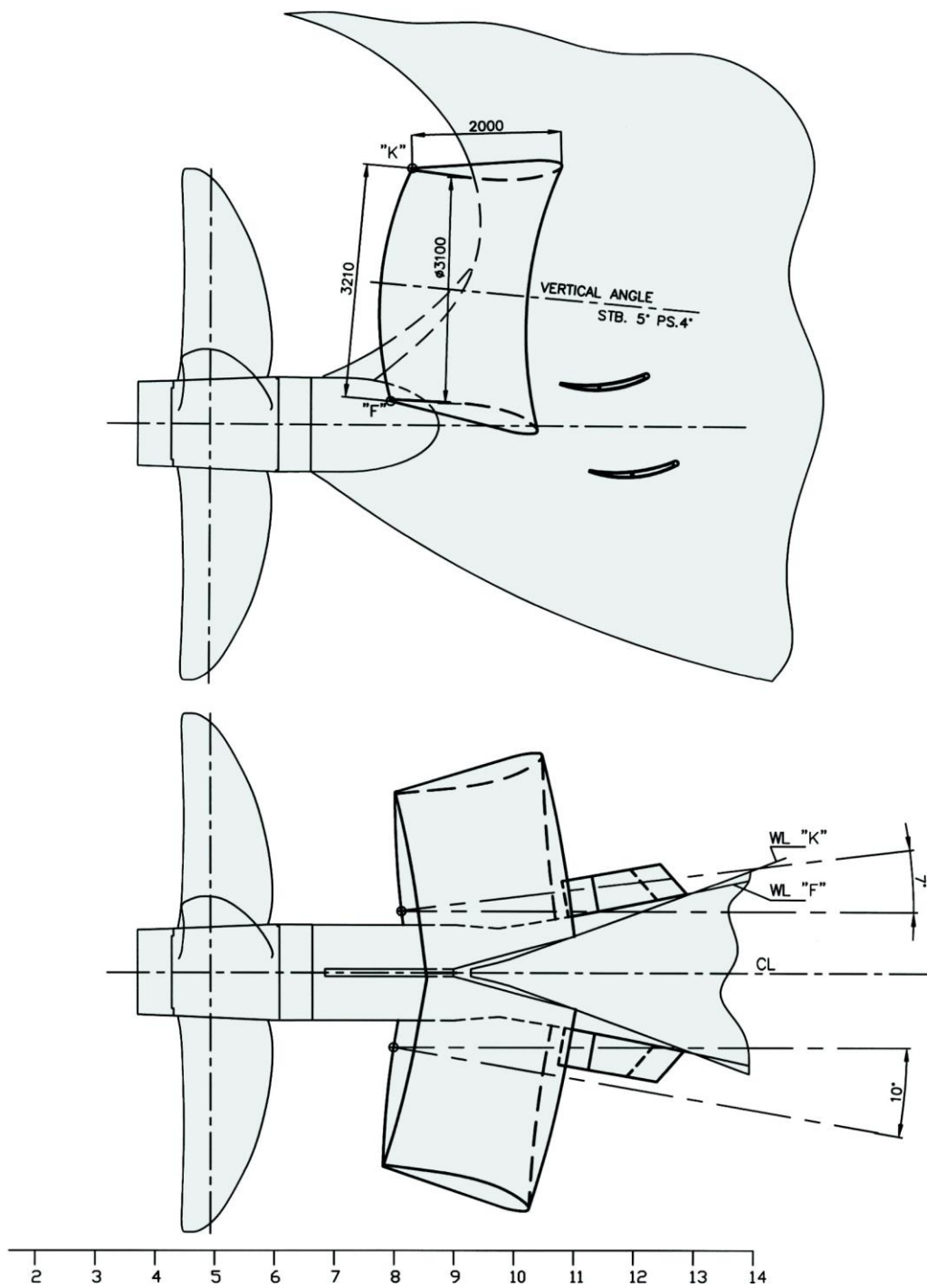
- Βελτίωση της απόδοσης της έλικας από περισσότερες αξονικές ροές και πιο ίση κατανομή της ταχύτητας πάνω από την περιοχή του δίσκου. Το πρώτο αποτέλεσμα είναι πιο κυρίαρχο. Μετρήσεις σε μοντέλο ενός πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων δείχνουν ότι η γωνία κλίσης προς τα μέσα της ροής στο επίπεδο πίσω του δακτυλίου μειώνεται από 20°C έως περίπου 7° ως προς το διαμήκη άξονα του πλοίου. Η ασύμμετρη διάταξη των ημιδακτυλίων δίνει μια περιστροφική κατεύθυνση προς το νερό που εισέρχεται στην έλικα, η οποία είναι αντίθετη προς εκείνη που θα μεταδώσει η έλικα. Έτσι, η απώλεια ενέργειας από την περιστροφή όπου βρέχεται η έλικα είναι μικρότερη.
- Μείωση του διαχωρισμού ροής στην μετά του σώματος. Αυτό το αποτέλεσμα είναι το πιο διαδεδομένο και εκφράζεται με μείωση του κλάσματος της δίνης.
- Παραγωγή της άνωσης με μία προς τα εμπρός συνιστώσα δύναμη στο τμήμα αεροτομής με παρόμοιο τρόπο, αν και δεν είναι, εξογκωμένη όπως στην Kort-Duct.

- Η ομοιόμορφη ροή μειώνει τις ταλαντώσεις που δημιουργούνται στην έλικα. Η βελτίωση μπορεί είτε να χρησιμοποιηθεί προς το σκοπό αυτό, αν αρχικά κακές συνθήκες ροής εξέρχονται, ή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αύξηση της διαμέτρου της έλικας, διότι τότε μικρότερα διάκενα γίνονται επιτρεπτά, που με τη σειρά τους βελτιώνουν την απόδοση. Η επίδραση αυτή δεν έχει δοκιμαστεί μέχρι στιγμής.
- Μείωση των ταλαντώσεων στην έλικα από μειωμένη φόρτιση του άκρου της έλικας στο ανώτερο τεταρτημόριο.
- Βελτίωση των ιδιοτήτων της πηδαλιούχησης από περισσότερες ευθυγραμμισμένες ροές στο πηδάλιο. Στην αξίνα πηδαλίων τα μεγαλύτερα ανώτερα τμήματα γίνονται περισσότερο αποτελεσματικά από την υψηλότερη ταχύτητα ροής.
- Βελτίωση της διατήρησης διαδρομής από αύξηση πλευρικού επιπέδου στην περιοχή της πρύμνης.
- Μη κατασκευαστικές αλλαγές ούτε και τροποποιήσεις στο σχεδιασμό της έλικας που εμπλέκονται όταν ο δακτύλιος θα τοποθετηθεί σε μεταγενέστερα πλοία δηλαδή σε πλοία που δεν είναι καινούργιας κατασκευής.
- Προσφέρει τη δυνατότητα να ενσωματωθούν συσκευές για την προστασία της έλικας από πάγο.

Στο σχήμα 8.1 φαίνεται η συσκευή εξοικονόμησης ενέργειας του δακτυλίου εξισορρόπησης ροής και στο σχήμα 8.2 φαίνεται η σχεδιαστική του λεπτομέρεια.



Σχήμα 8.1: Συσκευή δακτυλίου εξισορρόπησης ροής



Σχήμα 8.2 : Σχεδιαστικές λεπτομέρειες του δακτυλίου εξισορρόπησης ενέργειας

## 8.2 ΙΣΧΥΣ ΑΠΟ ΟΜΟΙΟΓΕΝΕΣ ΠΕΔΙΟ ΑΠΟΝΕΡΩΝ

Ο βασικός παράγοντας είναι δακτύλιος εξισορρόπησης ροής και η γεωμετρία στην αεροτομή. Οι ταλαντώσεις που μπορούν να προκληθούν από την έλικα των πλοίων εφόσον η βυθισμένη πρύμνη έχει δυσμενή χαρακτηριστικά ροής δημιουργούν τον κίνδυνο βλάβης στα δομικά στοιχεία και τις σχετικές συνδέσεις. Μειώνουν την άνεση των επιβατών, με τη μορφή του ήχου, και τη μέτρια υδροδυναμική από τις ρωγμές που προκύπτουν. Είναι γνωστό ότι μια ορισμένη βελτίωση μπορεί να επιτευχθεί μέσω της ροής εξίσωσης αγωγών. Μέτρηση της σειράς από δοκιμαστικά μοντέλα και θαλάσσιες δοκιμές αποδεικνύουν ότι οι πρόσθετες αεροτομές (συσκευή για την μείωση της ανύψωσης, spoiler) αυξάνουν σημαντικά την αποτελεσματικότητα όταν έχουν σχεδιαστεί ως μια ολοκληρωμένη μονάδα με τα μισά κελύφη στη γάστρα.

Μοναδικές βελτιώσεις που επιτυγχάνονται με τη χρήση της εξίσωσης μετά του δακτυλίου τύπου εξισορρόπησης ροής, σε συνδυασμό με την παραμόρφωση/ροή στα κατευθυντήρια πτερύγια τα οποία είναι επίσης γνωστά στην διεθνή βιβλιογραφία ως Grothues - Spork spoiler. Η σημαντική χειροτέρευση του προωθητικού βαθμού απόδοσης από τις κάτω-ροές είχε υποεκτιμηθεί στο παρελθόν. Περισσότεροι τρόποι βελτίωσης τότε έγιναν και στην συνέχεια διερευνήθηκαν αυτά με περισσότερες λεπτομέρειες. Διαπιστώθηκε ότι τα προς τα κάτω αποτελέσματα εγκάρσιας ροής από τις υδροδυναμικές διαφορές πίεσης που προκύπτουν στη γάστρα, ενώ το πλοίο είναι σε κίνηση και επί τη βάση της οποίας τα προσανατολίζει η ροή, ευθυγραμμίζει το ίδιο όσον αφορά την ταχύτητα και την κατεύθυνση.

Μετά από επιτυχημένες δοκιμές μοντέλου με την καθοδήγηση της ροής στα πτερύγια στο Βερολίνο/Γερμανία, Ιαπωνία και Νορβηγία άριστα αποτελέσματα προκύπτουν από συνδυασμό του δακτυλίου εξισορρόπησης ροής με την αεροτομή.

Στο MARIN (Maritime Research Institute Netherlands) εξοικονόμηση καυσίμων κατά 9,7% καταγράφηκαν για τις τρέχουσες νέες ναυπηγήσεις δεξαμενόπλοιων, και στη Γερμανία βάση Hamburg Ship Model Basin, HSVA βελτιώσεις σε επίπεδο 11,8% βρέθηκαν για δεξαμενόπλοια τύπου E3.

Το Potsdam model tank καθιέρωσε την γνώμη ότι η έλικα-επαγόμενη παλμοί οφείλονται, μεταξύ άλλων, σε μια ανομοιογενές ροή στην έλικα. Σε μία μη-στρωτή ροή τυρβώδους πεδίου η γωνία προσβολής των πτερυγίων της έλικας αλλάζει με κάθε γωνιακή προσαύξηση. Αυτό, με τη σειρά του, σημαίνει ότι η έλικα υποβάλλεται σε ένα μόνιμο εναλλασσόμενο φορτίο το οποίο, αναπόφευκτα, οδηγεί στην παραγωγή των ταλαντώσεων.

Οι παλμοί πίεσης διαδίδονται μέσω του εξωτερικού περιβλήματος, και σε ορισμένες περιπτώσεις ακόμη και στην πλεύση, αλλά κυρίως θέτουν σε κίνδυνο τις συγκολλημένες ενώσεις κοντά στην έλικα και ως εκ τούτου στο μηχανισμό διεύθυνσης του πηδαλίου.

Επιπλέον, κατά τον παραχώδη περιβάλλοντα χώρο η έλικα δεν μπορεί να στηριχθεί από μόνη της δυναμικά. Στην περίπτωση των δυσμενών συνθηκών που δημιουργούνται μεγάλη ροή απόνερων ο κινητήρας πρέπει να παραδώσει μια υψηλότερη απόδοση για μια ορισμένη ταχύτητα από ό,τι στην περίπτωση ενός πεδίου απόνερων που ομοιογεντοποιείται σε ολόκληρη την περιοχή της έλικας.

### 8.3 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ

Η τοποθέτηση του δακτυλίου στο πλοίο γίνεται στην αποβάθρα και διαρκεί λίγες μέρες και μπορεί να γίνει κατά την διάρκεια μιας περιόδου στεγνής σύνδεσης (dry docking). Η χαμηλότερη σύνδεση των ημιδακτυλίων στη γάστρα είναι στην διαδρομή του κύριου σωλήνα της πρύμνης. Για μεταγενέστερες συναρμολογήσεις σε ένα πλοίο κανονικά δεν είναι απαραίτητο να αποσυρθεί η ουρά του άξονα. Εναλλαγές του εδράνου του κύριου σωλήνα και αξονικής ευθυγράμμισης από συγκόλληση μπορούν να αποφευχθούν ή να περιοριστούν στο ελάχιστο από την καλή ποιότητα κατασκευής και με συγκόλληση των δακτυλίων και στις δύο πλευρές ταυτόχρονα. Το υλικό που χρησιμοποιείται για την κατασκευή είναι χάλυβας. Καλύτερα υλικά δεν είναι αναγκαίο να χρησιμοποιηθούν επειδή ούτε η δύναμη απαιτείται ούτε οποιαδήποτε μελέτη ταλαντώσεων απαιτούν τη χρήση τους. Στα επόμενα σχήματα 8.3, 8.4, φαίνονται πως τοποθετείται η συσκευή αυτή στα ναυπηγεία και στην θάλασσα.



Σχήμα 8.3: Τοποθέτηση δακτυλίου εξισορρόπησης ροής σε ναυπηγείο

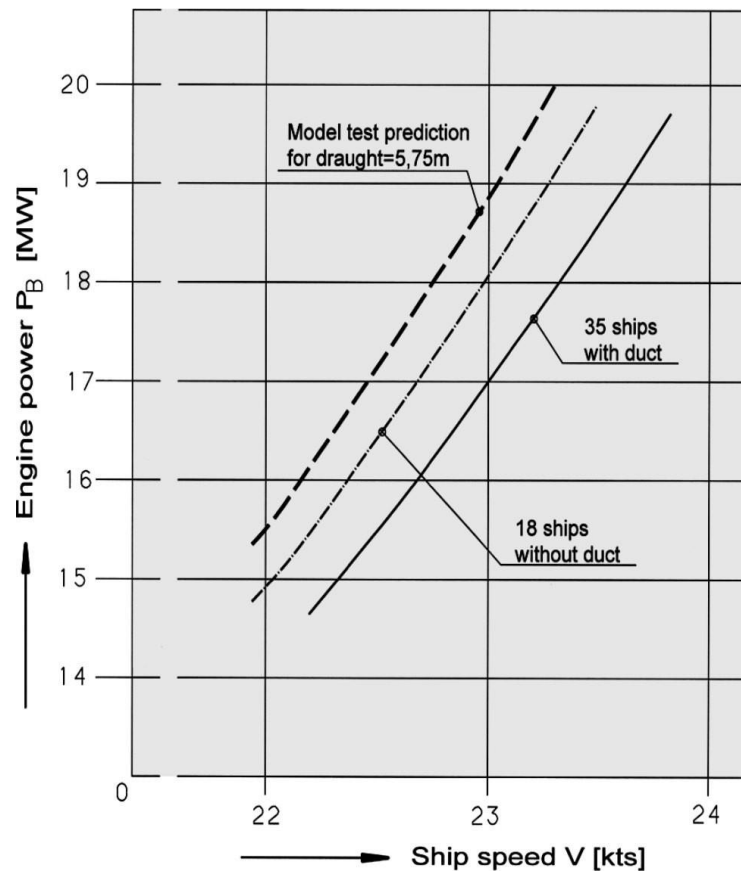


Σχήμα 8.4: Τοποθέτηση του δακτυλίου εξισορρόπησης ροής σε θαλάσσια επισκευή

## 8.4 ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΚΑΥΣΙΜΩΝ

Περισσότερα από 1500 πλοία - δεξαμενόπλοια, εμπορευματοκιβώτια, φορτηγά χύδην φορτίου, πλοία μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου, αλλά και σκάφη εσωτερικής ναυσιπλοΐας είναι που έχουν ήδη κέρδη από μια τέτοια εγκατάσταση. Το Shell AG έχει μετακατασκευάσει 14 δεξαμενόπλοια και πέτυχε υπολογιζόμενη εξοικονόμηση καυσίμων μεταξύ 1 και 7 τόνων/ημέρα. Σε ένα μεγάλο κόστος μαζούτ 450 \$/ημέρα, με χρόνο λειτουργίας 200 μέρες/έτος και κατά μέσο όρο εξοικονόμηση 4 τόνους/ημέρα προκύπτει η μέση τιμή της εξοικονόμησης του κόστους λειτουργίας των 360000 \$ ανά σκάφος και έτος.

Το σχήμα 8.5 από κάτω δείχνει τις τεράστιες εξοικονομήσεις με ένα παράδειγμα, με βάση τις μετρήσεις που λαμβάνονται σε 35 πλοία αρχικής κλίμακας του 2500 TEU σχεδιασμένου πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων με την απαίτηση ισχύος από 21560 kw, τιμή των καυσίμων την άνοιξη του 2008 σε μιας-φοράς κόστος επένδυσης περίπου 105000 €.



- Hamburg / Sydney 11800 ναυτικά μίλια  
27000 € εξοικονόμηση κόστους καυσίμων σε 253 tons CO<sub>2</sub> μείωση
- Hamburg / Singapore 8541 ναυτικά μίλια  
19000 € εξοικονόμηση κόστους καυσίμων σε 184 tons CO<sub>2</sub> μείωση
- Hamburg / Hong Kong 9950 ναυτικά μίλια  
22000 € εξοικονόμηση κόστους καυσίμων σε 214 tons CO<sub>2</sub> μείωση

Σχήμα 8.5: Διάγραμμα ταχύτητας πλοίου με την ισχύ μηχανής



## 8.5 ΜΕΙΩΣΗ ΤΟΥ CO<sub>2</sub>

Σύμφωνα με μια πρόσφατη μελέτη, η κατανάλωση καυσίμων διεθνώς από φορτηγά πλοία ανέρχεται σε περίπου 280 εκατομμύρια τόνους. Το 2007, η ετήσια εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα παγκόσμια στην εμπορική ναυτιλία ανήλθε σε 1,12 δις τόνους. Μέχρι το 2020, η συνεχιζόμενη αύξηση της διεθνούς εμπορικής ναυσιπλοΐας και η επακόλουθη αύξηση κατανάλωσης καυσίμων θα προκαλέσει μια αύξηση 30% των εκπομπών CO<sub>2</sub> από τη ναυτιλία.

Τοποθέτηση δακτυλίου εξισορρόπησης ροής σε ένα πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων 2500 TEU οδηγεί σε αύξηση της ισχύος του πλοίου περίπου 950 kw ανά ώρα, που αντιστοιχεί σε εξοικονόμηση καυσίμων των 4 τόνων ημερησίως. Από 1 kg καυσίμου στα πλοία προέρχονται περίπου 2,98 kg εκπομπών CO<sub>2</sub>. Μια καθημερινή εξοικονόμηση καυσίμων 4000 kg οδηγούν σε μια μείωση των εκπομπών κατά περίπου 12 τόνους ανά ημέρα.

Σε περισσότερα από 1500 πλοία σε όλο τον κόσμο έχουν τοποθετηθεί μέχρι σήμερα δακτύλιοι εξισορρόπησης ροής, συνολικού ύψους εξοικονόμησης εκπομπών CO<sub>2</sub> περισσότερο από 5 εκατομμύρια τόνους ετησίως.

## 8.6 ΜΕΙΩΣΗ ΤΩΝ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΩΝ

Στις μέρες μας οι νέες κατασκευές πλοίων πρέπει να πληρούν τις ακόλουθες βασικές προϋποθέσεις:

- υψηλή ταχύτητα
- χαμηλό βάρος
- εύκολο σχεδιασμό

Στις περισσότερες περιπτώσεις, αυτές οι προδιαγραφές σχεδιασμού μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα ταλαντώσεων που έχουν ως αποτέλεσμα όχι μόνον τον σχηματισμό ρωγμών και κόπωσης υλικού στην περιοχή του πίσω τμήματος, αλλά επίσης να προκαλέσουν βλάβη και καταστροφή των τεχνικών και ηλεκτρονικών εγκαταστάσεων.

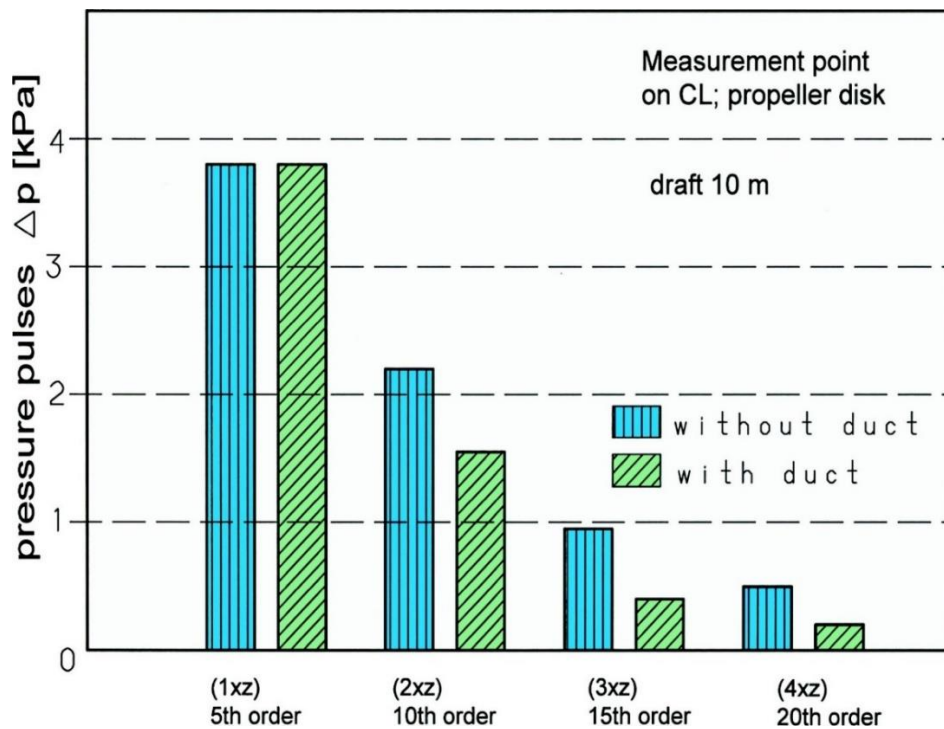
Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας είναι η φόρτιση του πληρώματος από το θόρυβο και τις δονήσεις - συχνά μέχρι το κατώφλι του πόνου. Περισσότερο από το 50% των ταλαντώσεων μπορεί να μειωθεί με τη μετασκευή των πλοίων με ένα συνδυασμό του δακτυλίου εξισορρόπησης ενέργειας και των αεροτομών.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η πρώτη από τις δύο πανομοιότυπες κατασκευές 31000 ton (νέα κατασκευή 551) ήταν εξοπλισμένο με τον δακτύλιο και την αεροτομή σωστά από την αρχή, ενώ η νέα κατασκευή 552 αρχικά παραδόθηκε χωρίς αυτές τις προσκολλήσεις. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών της θάλασσας κάθε πλοίου οι ναυτικοί υπάλληλοι κατέγραψαν απόδοση ταξιδιού, ταχύτητα και τη συμπεριφορά των ταλαντώσεων. Η ανάλυση επικεντρώθηκε, μεταξύ άλλων, στις συχνότητες ταλάντωσης σε διάφορα σημεία της μέτρησης: στο πηδάλιο της γέφυρας οι μηχανικοί πήραν μετρήσεις χωρίς και με αεροτομή και την εξίσωση δακτυλίου από τις διαμήκεις ταλαντώσεις στην ποσότητα των 2,38 mm/s, σε σύγκριση με 0,93 mm/s, και κατακόρυφες κινήσεις του 1,98 σε σύγκριση με 1,39 mm/s. Παρόμοιες διαφορές μπορούσαν να δουν ότι διανέμεται σε ολόκληρη την διάταξη.

Λόγω της πληθώρας των ισχυρών παραγόντων, ακόμη και ταυτόσημες κατασκευές δεν θα είναι, φυσικά, να επιφέρουν ένα μοτίβο δόνησης που συμπίπτει σε κάθε τιμή και την τοποθεσία, αλλά αυτό είναι πολύ πιθανό ότι οι

βελτιωμένες τιμές οφείλονται κατά κύριο λόγο στην πιο ομοιογενή ροή του νερού κατά την πορεία απορρόφησης του έλικα.

Στο επόμενο σχήμα 8.6 οι δοκιμές που περιγράφονται επιβεβαιώνουν ότι : είναι η υπερκατασκευή επάνω από την πρύμνη, ειδικότερα, που υποφέρει από τους παλμούς πίεσης που προκαλείται από την έλικα, και στην περίπτωση των πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων είναι το κατάστρωμα που καταπονείται από τους παλμούς πίεσης. Συνεπώς, η ζήτηση για τις νέες ναυπηγήσεις προσδιορίζουν συχνά ένα φορτίο δονήσεων που δεν υπερβαίνει τα 4 kilopascal (kPa) για τις δονήσεις πρώτης τάξης. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα ναυπηγεία προσπαθούν να ανταποκριθούν σε αυτούς τους περιορισμούς στο μέγιστο δυνατό βαθμό από τον τρόπο βελτιστοποίησης της διαμόρφωσης ροής στο τμήμα της πρύμνης. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί, ωστόσο, δεν γίνεται πάντα να το κατορθώσουμε βασισμένο μόνο στις γραμμές.



Σχήμα 8.6: Παλμοί πίεσης στην έλικα με και χωρίς τον δακτύλιο εξισορρόπησης ροής

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

# ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ

Στους επόμενους πίνακες 9.1, 9.2 παρουσιάζονται ενδεικτικές τιμές από μια κύρια μελέτη του δακτυλίου τύπου-1 που τοποθετήθηκε σε ένα 45000 DWT πολλαπλών δυνατοτήτων φορτίων και εμπορευματοκιβωτίων δεξαμενόπλοιο.

<b>Τιμή (\$)</b>	220000
<b>Τοποθέτηση (\$)</b>	30000
<b>Συνολικό κόστος επένδυσης(\$)</b>	250000

Πίνακας 9.1: Ενδεικτικό κόστος του δακτυλίου τύπου-1

<b>Μείωση της ισχύος</b>	6 %	Δηλαδή περίπου 1000 \$/ημέρα
<b>Λειτουργία του δακτυλίου</b>	220 ημέρες/έτος	Δηλαδή περίπου 220000 \$/έτος
<b>Εξοικονόμηση</b>	Μετά από 14 μήνες	256000 \$

Πίνακας 9.2: Εξοικονόμηση του κόστους που επιτεύχθηκε με τον δακτύλιο τύπου-1

Επομένως η αποπληρωμή της επένδυσης έγινε περίπου μετά από 1 χρόνο και 3 μήνες μετά την τοποθέτηση της συσκευής.

Στην συνέχεια στους πίνακες 9.3, 9.4 έχουμε ενδεικτικές τιμές από μια αντίστοιχη κύρια μελέτη τοποθέτησης του δακτυλίου εξισορρόπησης ροής σε ένα 30000 DWT πλοίο φορτίου χύδην.

<b>Τιμή (\$)</b>	70000 ÷ 80000
<b>Τοποθέτηση (\$)</b>	20000 ÷ 30000
<b>Συνολικό κόστος επένδυσης(\$)</b>	90000 ÷ 110000

Πίνακας 9.1: Ενδεικτικό κόστος του δακτυλίου εξισορρόπησης ροής

<b>Μείωση της ισχύος</b>	Το λιγότερο 4 %	Δηλαδή περίπου 670 \$/ημέρα
<b>Λειτουργία του δακτυλίου</b>	220 ημέρες/έτος	Δηλαδή περίπου 147400 \$/έτος
<b>Εξοικονόμηση</b>	Μετά από 9 μήνες	110000 \$

Πίνακας 9.2: Εξοικονόμηση του κόστους που επιτεύχθηκε με τον δακτύλιο εξισορρόπησης ροής

Άρα η αποπληρωμή της επένδυσης έγινε περίπου μετά από 9 μήνες μετά την τοποθέτηση της συσκευής αυτής.

Στον επόμενο πίνακα 9.3 θα δούμε σε διάφορους τύπους πλοίων τον εκτιμώμενο χρόνο αποπληρωμής επένδυσης όταν κάνουμε μια εγκατάσταση της συσκευής της έλικας και των πρόσθετων πτερυγίων κεφαλής.

Τύπος Πλοίου	Χρησιμοποίηση (%)	Κατανάλωση καυσίμου (τόνοι/ημέρα)	Εκτιμώμενο κόστος (\$)	Εκτιμώμενος χρόνος αποπληρωμής (μήνες)
Πλοία εμπορευματοκιβωτίων	75	210	185000	2,2
Υπερβολικά μεγάλα πλοία ακατέργαστου φορτίου	85	100	165000	3,6
Πλοία φορτίου χύδην	75	60	105000	4,4
Μικρά πλοία φορτίου χύδην	70	30	65000	5,8
Γενικά φορτηγά πλοία	55	10	40000	13,7

Πίνακας 9.3: Εκτιμώμενος χρόνος αποπληρωμής της επένδυσης με την τοποθέτηση της συσκευής της έλικας και των πρόσθετων πτερυγίων κεφαλής

Στην συνέχεια έχουμε ένα παράδειγμα από μετρήσεις σε δύο πλοία (ένα πλοίο νέας κατασκευής το K-class και ένα πλοίο που βρίσκεται σε λειτουργία το J-class) για να συγκρίνουμε τις συσκευές εξοικονόμησης ενέργειας από την εξοικονόμηση καυσίμου που επιτυγχάνουν. Το K-class είναι ένα νέο πλοίο με στόχο τον σχεδιασμό 15÷20% χαμηλότερης κατανάλωσης καυσίμου σε σύγκριση με το προηγούμενο πλοίο της εταιρείας J-class.

Η βελτίωση της υδροδυναμικής συμπεριφοράς πραγματοποιήθηκε σε συνεργασία διαφόρων απόψεων από διάφορες τεχνικές εταιρείες. Η συνεργασία έγινε σε εποικοδομητικό επίπεδο με το ναυπηγείο και μια βελτίωση έγινε κυρίως για τον βολβό του πλοίου και τις εμπρόσθιες γραμμές. Επίσης οι γραμμές πίσω από το σώμα της πρύμνης τροποποιήθηκαν ελαφρώς από την αρχική πρόταση που έγινε στο ναυπηγείο. Οι κύριοι παράγοντες που συνέβαλαν στις υδροδυναμικές μετρήσεις και βελτιώσεις συνοψίζονται ως εξής:

1. Βελτίωση των γραμμών του τόξου, που ελέγχθηκαν από τους υπολογιστική ρευστοδυναμική-υπολογισμούς.  
Είναι δυνατόν να επιτευχθεί μείωση ισχύος 2%, που αντιστοιχεί στο 0,9% της μείωσης του λειτουργικού κόστους.
2. Τακτοποίηση βελτιστοποίησης, δοκιμές μοντέλου που πραγματοποιήθηκαν σε εργαστήριο.  
Είναι δυνατόν να επιτευχθεί κατά μέσο όρο μείωση ισχύος 3%.  
1,5% ρευστοποιήσιμη, που αντιστοιχεί στο 0,7% της μείωσης του λειτουργικού κόστους.
3. Η μείωση της ταχύτητας, οι υπολογισμοί έγιναν από ομάδα εργαστηρίου.  
Είναι δυνατόν να επιτευχθεί μείωση ισχύος 30%, που αντιστοιχεί σε 3% της μείωσης του λειτουργικού κόστους.  
15% ρευστοποιήσιμη μείωση της ισχύος, που αντιστοιχεί στο 1,5% της μείωσης του λειτουργικού κόστους.

4. Ισχύς από συσκευή εξοικονόμησης ενέργειας, εγκατάσταση της συσκευής της έλικας και των πρόσθετων πτερυγίων κεφαλής, όπου δεν πραγματοποιήθηκαν δοκιμές μοντέλου.  
Αναμένεται μείωση της ισχύος 3%, που αντιστοιχεί στο 1,4% της μείωσης του λειτουργικού κόστους.

Το σύνολο λοιπόν των μειώσεων της ισχύος που επιτεύχθηκε στο πλοίο K-class είναι 21,5%, που αντιστοιχεί σε 4,5% της μείωσης του λειτουργικού κόστους.

Από τα αποτελέσματα των υδροδυναμικών βελτιώσεων του νέου σκάφους K-class που ήταν ενθαρρυντικά, ο όμιλος της ναυτιλιακής εταιρείας ξεκίνησε αμέσως στην υδροδυναμική βελτιστοποίηση του προηγούμενου παρόμοιου πλοίου που ήταν σε λειτουργία J-class.

Τα αποτελέσματα ήταν:

1. Βελτίωση των γραμμών του πλοίου, δεν είναι δυνατόν να πραγματοποιηθούν αφού το πλοίο ήταν ήδη κατασκευασμένο και σε λειτουργία.
2. Τακτοποίηση βελτιστοποίησης, δοκιμές μοντέλου που πραγματοποιήθηκαν σε εργαστήριο.  
Είναι δυνατόν να επιτευχθεί κατά μέσο όρο μείωση ισχύος 1%.  
0,5% ρευστοποιήσιμη, που αντιστοιχεί στο 0,2% της μείωσης του λειτουργικού κόστους.
3. μείωση της ταχύτητας, οι υπολογισμοί έγιναν από ομάδα εργαστηρίου.  
Είναι δυνατόν να επιτευχθεί μείωση ισχύος 32%, που αντιστοιχεί σε 3% της μείωσης του λειτουργικού κόστους.  
16% ρευστοποιήσιμη μείωση της ισχύος, που αντιστοιχεί στο 1,5% της μείωσης του λειτουργικού κόστους.
4. Ισχύς από συσκευή εξοικονόμησης ενέργειας, εγκατάσταση του δακτυλίου τύπου-1, όπου πραγματοποιήθηκαν δοκιμές μοντέλου σε εργαστήριο.  
Αναμένεται μείωση της ισχύος 6%, που αντιστοιχεί στο 2,7% της μείωσης του λειτουργικού κόστους.

Το σύνολο λοιπόν των μειώσεων της ισχύος που επιτεύχθηκε στο πλοίο J-class είναι 22,5%, που αντιστοιχεί σε 4,4% της μείωσης του λειτουργικού κόστους.

Ο επόμενος πίνακας 9.4 είναι ο συγκεντρωτικός από τα στοιχεία των δύο πλοίων που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Τύπος Πλοίου	J-class σε λειτουργία στην θάλασσα		K-class νέα κατασκευή	
	Μειώσεις			
	Ισχύς (%)	Κόστη (%)	Ισχύς (%)	Κόστη (%)
Βελτίωση των γραμμών του πλοίου	-	-	2,0	0,9
Περιοπή βελτιστοποίησης	0,5	0,2	1,5	0,7
Μείωση ταχύτητας (50%)	16,0	1,5	15,0	1,5
Συσκευή εξοικονόμησης ενέργειας	6,0	2,7	3,0	1,4
<b>Συνολική μείωση</b>	<b>22,5</b>	<b>4,4</b>	<b>21,5</b>	<b>4,5</b>

Πίνακας 9.4: Συγκεντρωτικά στοιχεία της πιθανής μείωσης της ισχύος και του κόστους

Αυτό ώθησε την έρευνα για την εφαρμογή παρόμοιων μέτρων σε διαφορετικούς τύπους πλοίων με τα χαρακτηριστικά τους όπως φαίνονται στον πίνακα 9.5.

Οι τύποι των πλοίων είναι:

- |                                          |            |          |
|------------------------------------------|------------|----------|
| 1. Μικρό πλοίο μεταφοράς φορτίου χύδην   | 12700 DWT  | 16,2 kts |
| 2. J-class                               | 46000 DWT  | 16,0 kts |
| 3. Πολύ μεγάλο δεξαμενόπλοιο             | 300000 DWT | 15,5 kts |
| 4. Πλοίο εμπορευματοκιβωτίων με τρόφιμα  | 1700 TEU   | 20,0 kts |
| 5. Πολύ μεγάλο πλοίο εμπορευματοκιβωτίων | 13500 TEU  | 24,6 kts |

Αριθμός περίπτωσης		1	2	3	4	5
<b>L<sub>pp</sub></b>	<b>m</b>	130.00	187.00	324.00	165.00	350.00
<b>B</b>	<b>m</b>	21.00	31.00	60.00	27.90	51.20
<b>T</b>	<b>m</b>	7.50	12.00	20.00	8.50	14.00
<b>CB</b>	-	0.79	0.80	0.81	0.65	0.69
<b>DP</b>	<b>m</b>	4.90	7.00	9.70	6.60	8.90
<b>PD</b>	<b>kw</b>	4464	8151	22450	12250	56000
<b>n</b>	<b>rpm</b>	130	91	73	101	100
<b>VD</b>	<b>kts</b>	15.20	16.00	15.50	20.00	24.60
<b>Fn</b>	-	0.21	0.19	0.14	0.26	0.22
<b>CTh</b>	-	1.60	1.31	2.32	1.00	1.25

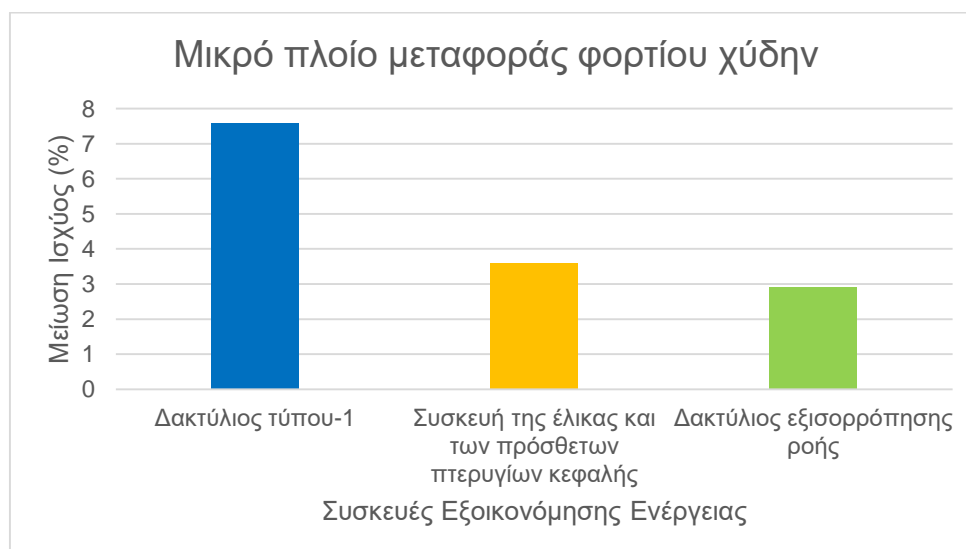
Πίνακας 9.5: Κύρια στοιχεία των πλοίων

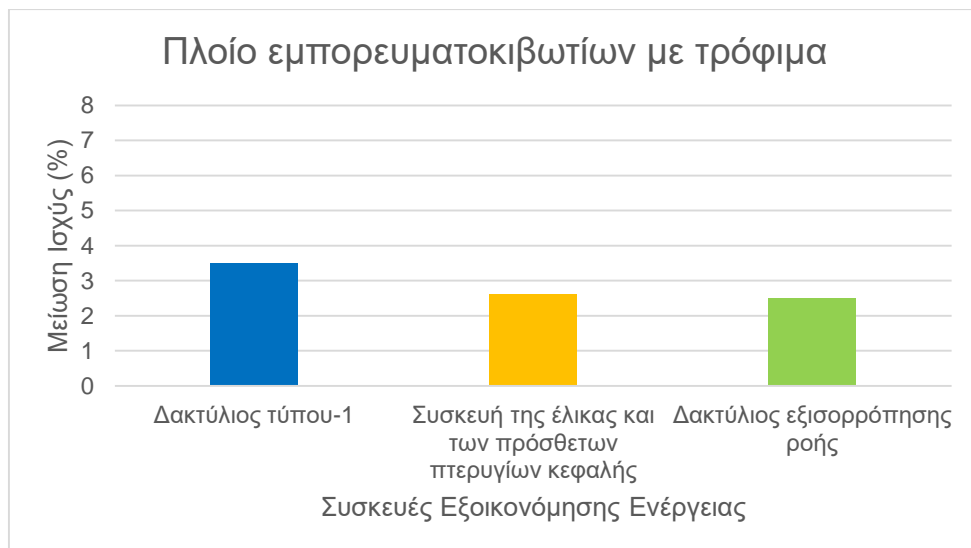
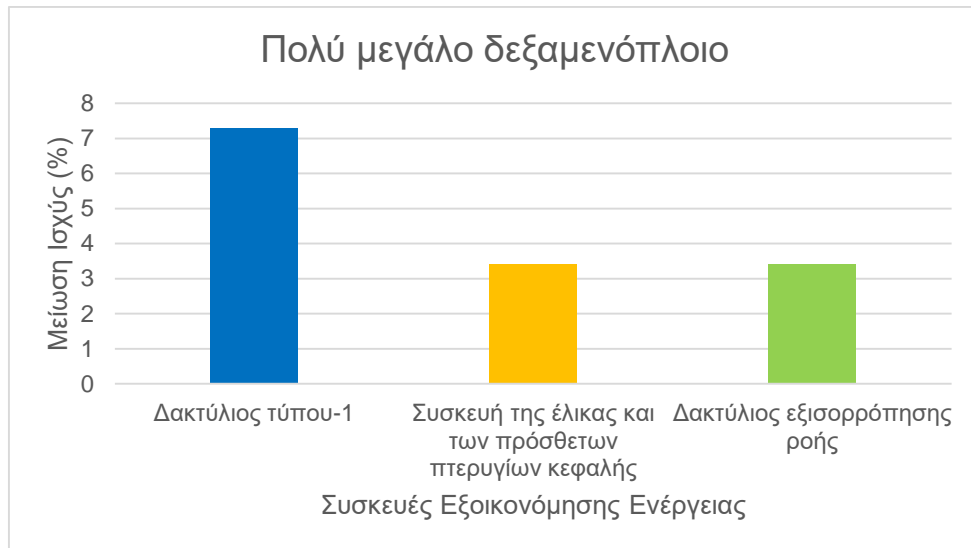
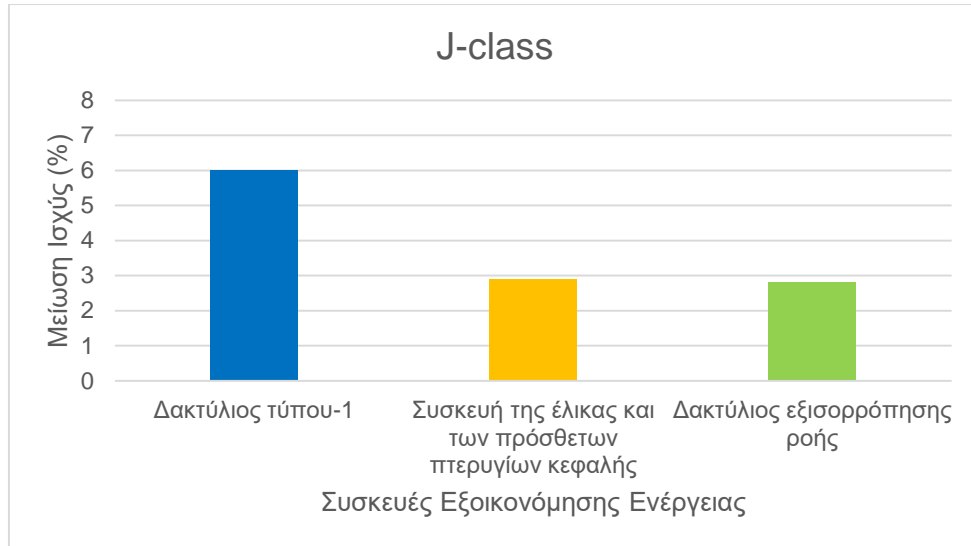
Ο επόμενος πίνακας 9.6 δείχνει τις πιθανές μειώσεις κατανάλωσης ισχύος και από τις τρεις συσκευές εξοικονόμησης ενέργειας που παρουσιάστηκαν στην παρούσα εργασία όπως έχουν περιγραφεί στα προηγούμενα κεφάλαια. Τα στοιχεία βασίζονται σε έναν συνδυασμό της ανάλυσης των απωλειών γύρω από την ροή της έλικας στο πίσω μέρος του πλοίου, των δοκιμών μοντέλων που έχουν γίνει στα εργαστήρια, και την ανάπτυξη των εν λόγω συσκευών.

Αριθμός περίπτωσης		1	2	3	4	5
VD	kts	15,20	16,00	15,50	20,00	24,60
CTh	-	1,60	1,31	2,32	1,00	1,25
Δακτύλιος τύπου-1	%	7,7	6	7,3	3,5	-
Συσκευή της έλικας και των πρόσθετων πτερυγίων κεφαλής	%	3,6	2,9	3,4	2,6	2,6
Δακτύλιος εξισορρόπησης ροής	%	2,9	2,8	3,4	2,5	2,7

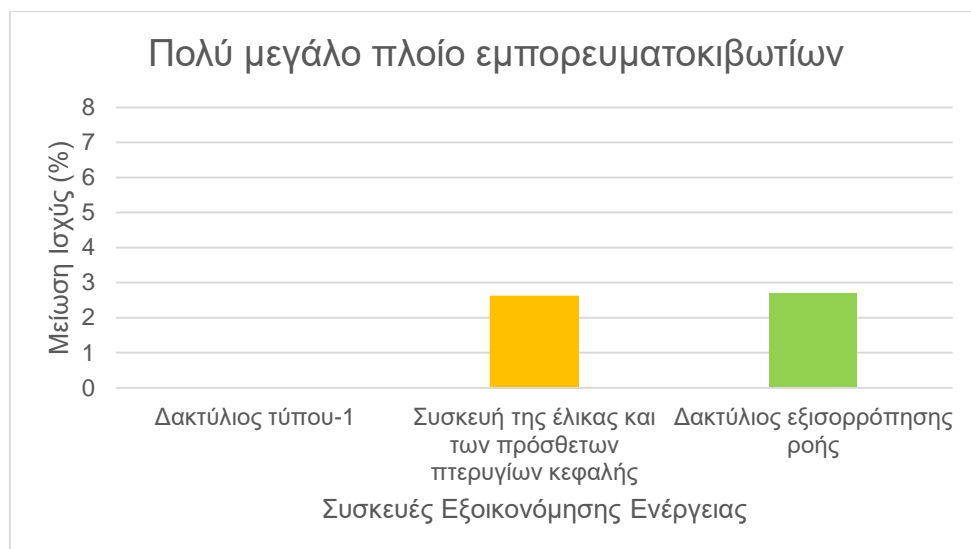
Πίνακας 9.6: Συσκευές εξοικονόμησης ισχύος, πιθανή μείωση ισχύος

Όπως παρατηρούμε από τον πίνακα 9.6 και από τα διαγράμματα στο σχήμα 9.1 συγκρίνοντας τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης η πιο αποτελεσματική συσκευή σε όλους του τύπους πλοίων θεωρείται ο δακτύλιος τύπου-1, και γενικά παρέχει πολύ σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας. Τα στοιχεία εξοικονόμησης ενέργειας για τον δακτύλιο τύπου-1 για το μικρό πλοίο μεταφοράς φορτίου χύδην, το πλοίο J-class και το πολύ μεγάλο δεξαμενόπλοιο είναι τα αποτελέσματα του μοντέλου της δοκιμής, και τα αποτελέσματα που προέκυψαν για το πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων εκτιμήθηκαν από τους υπολογιστικές ρευστοδυναμικής-υπολογισμούς. Όταν έγιναν οι μετρήσεις ο δακτύλιος τύπου-1 δεν είχε αναπτυχθεί για να είναι κατάλληλος σε τοποθέτηση για το μεγάλο πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων λόγω της ταχύτητας που ανακτούσε το πλοίο.









Σχήμα 9.1: Διαγράμματα της πιθανής μείωσης ισχύος που μπορεί να επιτευχθεί από τις συσκευές εξοικονόμησης ενέργειας για διάφορους τύπους πλοίων

Τέλος στον πίνακα 9.7 φαίνεται σε ποιους τύπους πλοίων μπορούν να τοποθετηθούν οι συσκευές εξοικονόμησης ενέργειας. Από τον πίνακα αυτό βλέπουμε ότι μόνο ο δακτύλιος εξισορρόπησης ροής δεν μπορεί να τοποθετηθεί σε συγκεκριμένους τύπους πλοίων λόγω των αναλύσεων που έχουν γίνει από τις εκάστοτε τεχνικές εταιρείες διότι δεν συμβάλει στην βελτίωση του προωθητικού βαθμού απόδοσης με αναμενόμενα αποτελέσματα όπως άλλες συσκευές και δεν είναι συμφέρουσα επένδυση η εγκατάσταση του για τους συγκεκριμένους τύπους πλοίων. Επίσης ο δακτύλιος εξισορρόπησης ροής δεν μπορεί να τοποθετηθεί με τα άλλα δύο συστήματα μαζί. Αντίθετα σε αρκετές περιπτώσεις ο δακτύλιος τύπου-1 με την συσκευή της έλικας και των πρόσθετων πτερυγίων κεφαλής μπορούν να τοποθετηθούν μαζί σε ένα πλοίο με σκοπό την βελτίωση του προωθητικού βαθμού απόδοσης ώστε να επιτευχθεί μεγαλύτερη εξοικονόμηση καυσίμων.

Συσκευές Εξοικονόμησης Ενέργειας	Δακτύλιος τύπου-1	Συσσκευή της έλικας και των πρόσθετων πτερυγίων κεφαλής	Δακτύλιος εξισορρόπησης ροής
<b>Τύποι Πλοίων</b>			
Δεξαμενόπλοια	✓	✓	✓
Πλοία φορτίου χύδην	✓	✓	✓
Γενικά φορτηγά πλοία	✓	✓	✓
Πλοία εμπορευματοκιβωτίων	✓	✓	✓
Επιβατικά πλοία	✓	✓	
Πλοία μεταφοράς αυτοκινήτων	✓	✓	
Πλοία μεταφοράς φυσικού αερίου	✓	✓	

Πίνακας 9.7: Τύποι πλοίων όπου μπορούν να τοποθετηθούν οι συσκευές εξοικονόμησης ενέργειας



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συνοψίζοντας σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η περιγραφή και διερεύνηση των συσκευών εξοικονόμησης ενέργειας (Energy Saving Devices - ESDs) με εφαρμογή στο σύστημα πρόωσης των πλοίων. Από τις συσκευές αυτές μπορούμε να πετύχουμε μείωση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου, βελτίωση του προωθητικού βαθμού απόδοσης, μείωση των ταλαντώσεων που δημιουργούνται στα πλοία, ευστάθεια και ευθυγράμμιση της πορείας πλεύσης του πλοίου, και μείωση του διοξειδίου του άνθρακα.

Υπάρχουν πάρα πολλές συσκευές τέτοιου τύπου όπου έχουν αναπτυχθεί για την βελτίωση του προωθητικού βαθμού απόδοσης όπου η κάθε κατασκευαστική τους εταιρεία συνεχώς κάνει έρευνες για την βελτίωση τους ώστε να επιτευχθεί μεγαλύτερη εξοικονόμηση καυσίμων. Στην παρούσα εργασία βλέπουμε μια γενική ανασκόπηση των δακτυλίων τύπου-1, της συσκευής της έλικας και των πρόσθετων πτερυγίων κεφαλής και του δακτυλίου εξισορρόπησης ροής. Παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά της κάθε συσκευής, ο σχεδιασμός τους, ο τρόπος εγκατάστασης τους και τι επιτυγχάνουμε με την τοποθέτησή τους. Όλα αυτά γίνονται με προμελέτες, σχεδιαστικές μεθόδους, υπολογιστικής ρευστοδυναμικής-υπολογισμούς, δοκιμές μοντέλων και δοκιμές θαλάσσης. Για να καταλάβουμε τι ακριβώς κερδίζουμε χρειάζεται απλά μια σύγκριση με τις συσκευές και χωρίς τις συσκευές αυτές τοποθετημένες στα πλοία.

Την μεγαλύτερη εξοικονόμηση καυσίμου την πετυχαίνει ο δακτύλιος εξισορρόπησης ροής περίπου 12%, αμέσως μετά ο δακτύλιος τύπου-1 περίπου 8% και τέλος η συσκευή της έλικας και των πρόσθετων πτερυγίων κεφαλής περίπου 5%. Βλέπουμε όμως ότι η συσκευή της έλικας και των πρόσθετων πτερυγίων κεφαλής έχει τοποθετηθεί σε μεγαλύτερο αριθμό πλοίων από τις υπόλοιπες συσκευές, επειδή η συσκευή αυτή είναι πιο οικονομική από τις υπόλοιπες και έχει μικρότερο χρόνο αποπληρωμής της επένδυσης, η τοποθέτησή της είναι πολύ πιο εύκολη από την εγκατάσταση των διαφόρων τύπων δακτυλίων και γιατί μπορεί επιπλέον να τοποθετηθεί μαζί με κάποιους συγκεκριμένους τύπους δακτυλίων.

Υπάρχουν πάρα πολλοί παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοσή τους, οι κύριοι είναι σε τι τύπο πλοίου τοποθετούνται ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του, οι καιρικές συνθήκες, τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά όπου μπορούμε να εκμεταλλευτούμε από τις απώλειες ροής και οι συνθήκες θαλάσσης που λαμβάνονται υπόψιν κατά την μελέτη του σχεδιασμού των συσκευών.

Τέλος μέσα από έγκυρες πηγές και παραδείγματα βλέπουμε ότι αυτές οι συσκευές έχουν τοποθετηθεί σε πάρα πολλά πλοία και είναι αρκετά συμφέρουσες για τους πλοιοκτήτες γιατί έχουν καλή απόδοση σαν επένδυση με τις μειώσεις από τα κόστη των καυσίμων με σχετικά γρήγορη επιστροφή χρημάτων από την στιγμή που θα τοποθετηθούν οι συσκευές.



# ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] 'Αρχές Εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ.' Κ.Δ. Ρακόπουλος
- [2] 'Μ.Ε.Κ. ΙΙ' Κ.Δ. Ρακόπουλος
- [3] 'Εναλλαγή Αερίων και Υπερπλήρωση Μ.Ε.Κ.' Κ.Δ. Ρακόπουλος, Ε.Γ. Γιακουμής
- [4] 'Καύση – Ρύπανση Εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ.' Κ.Δ. Ρακόπουλος, Δ.Θ. Χουντάλας
- [5] 'Αντίσταση και Πρόωση Πλοίου' Γ. Πολίτης
- [6] 'Υδροστατική και Ευστάθεια Πλοίου' Θ. Λουκάκης, Γ. Τζαμπίρας, Π. Πέρας
- [7] 'Basic Principle of Ship Propulsion' MAN B&W
- [8] 'Engine Layouts and Load Diagrams' MAN B&W
- [9] 'Propeller Handbook' Dave Gerr
- [10] 'Ship Design for Efficiency and Economy' H. Schneekluth and V. Bertram
- [11] MOL Techno-Trade, LTD.PBCF Department
- [12] Becker Marine Systems
- [13] Ship efficiency by STG 4<sup>th</sup> International Conference Hamburg
- [14] Energy Saving Device for ship – IHIMU Semicircular Duct –
- [15] Second International Symposium on Marine Propulsors smp'11, Hamburg, Germany, June 2011, – Mewis Duct – New Developments, Solutions and Conclusions
- [16] Evaluation of ship performance at actual sea conditions, Noriyuki Sasaki, National Maritime Research Institute
- [17] CFD on Cavitation around Marine Propellers with Energy Saving Devices, Mitsubishi Heavy Industries Technical Review Vol. 49 No. 1 (March 2012)
- [18] Third International Symposium on Marine Propulsors smp'13, Launceston, Tasmania, Australia, May 2013, An Integrative Design Method of Propeller and PBCF (Propeller Boss Cap Fins)
- [19] A Framework for Energy Saving Device (ESD) Decision Making

[20] Energy Saving Devices, Hydrodynamics R&D Team, The House of Wisdom & Innovation, prepared by Y.B. Choi

[21] Fuel- and Cost-Savings by Hydrodynamic Measures, Jan Svardal, Grieg Shipping Group, Bergen/Norway, Friedrich Mewis, Mewis Ship Hydrodynamics (MSH), Dresden/Germany.

[22] Lambos Maritime Services LTD, Marine Efficiency Systems at “Slow Steaming” Conditions.

[23] MDT Alpha Aft Ship & Propeller, MAN

[24] Ship Energy Efficiency Measures, ABS