



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΛΟΙΟΥ

Ανάλυση της ισχύος πρόωσης  
και ανάλωσης καυσίμου  
εμπορικού πλοίου σε  
πραγματικές καταστάσεις  
υπηρεσίας

Σταμάτης Σπυρίδων  
Διπλωματική Εργασία

Επιβλέπων καθηγητής : Απόστολος Δ. Παπανικολάου  
Μέλος επιτροπής: Κώστας Ι. Σπύρου  
Μέλος επιτροπής: Γεώργιος Ν. Ζαραφωνίτης

Αθήνα, Οκτώβριος 2016

## Περίληψη

Αυτή η διπλωματική εργασία αποσκοπεί στην ανάλυση της ημερήσιας απαιτούμενης ισχύος πρόωσης (Shaft Horse Power-SHP) από την κύρια μηχανή και κατά συνέπεια της κατανάλωσης καυσίμου σε επιμέρους συνιστώσες ενός δεξαμενόπλοιου τύπου VLCC. Μέσω των συνιστωσών είναι δυνατή η εξακρίβωση των αιτιών της μεταβολής της κατανάλωσης καυσίμου και κατά συνέπεια είναι δυνατός ο έλεγχος και η αύξηση της αποδοτικότητας του υπό εξέταση πλοίου.

Στα πλοία τύπου VLCC, η ισχύς πρόωσης που οφείλεται στην αντίσταση σε ήρεμο νερό αποτελεί την κυρία συνιστώσα της συνολικής ισχύος πρόωσης. Γι' αυτό το λόγο η μέθοδος υπολογισμού της γίνεται με τρεις μεθόδους, ώστε να βελτιωθεί η αξιοπιστία της. Η πρώτη είναι η χρήση των αποτελεσμάτων των δοκιμών παραλαβής (Sea Trials), η δεύτερη η εκτέλεση πειραμάτων CFD (Computational Fluid Dynamics) και η τρίτη η χρήση της εμπειρικής μεθόδου Holtrop-Mennen.

Σημαντικό ρόλο στην ισχύ πρόωσης παίζει και η πρόσθετη αντίσταση κυματισμού, που αναλύεται στην αντίσταση λόγω ανάκλασης των κυματισμών γύρω από το πλοίο και την αντίσταση λόγω των κινήσεων του πλοίου. Τα μεγάλα πλοία, όπως τα VLCC, συναντούν μικρά κύματα ως προς το μήκος τους και συνεπώς, η ανάκλαση των κυματισμών επιδρά κυρίως στην πρόσθετη αντίσταση κυματισμού. Η επίδραση αυτή απαιτεί την αξιόπιστη εκτίμηση της συγκεκριμένης συνιστώσας και γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιείται η κατάλληλη ημι-εμπειρική μέθοδος Liu που λαμβάνει υπόψη τη συγκεκριμένη επίδραση.

Οι υπόλοιπες συνιστώσες συνεισφέρουν λιγότερο στη ζητούμενη ισχύ. Η αύξηση της αντίστασης λόγω ρύπανσης διαφέρει από πλοίο σε πλοίο και έτσι εξετάστηκε μέσω της αύξησης της ζητούμενης ισχύος της κύριας μηχανής που οφείλεται στη ρύπανση, αφαιρώντας όλες τις άλλες συνιστώσες. Η αντίσταση λόγω ανέμου υπολογίζεται μέσω της αναδρομικής μεθόδου Fujiwara, που προτείνεται στην 2012 ITTC (International Towing Tank Conference).

Το κατάλληλο φιλτράρισμα των δεδομένων εισόδου, όπως και ο σωστός υπολογισμός των δεδομένων που λείπουν, χρήζουν ιδιαίτερης σημασίας. Χρησιμοποιώντας τη θέση και την ημερομηνία πλεύσης του πλοίου είναι δυνατή, επίσης, η εκτίμηση πολλών διαφορετικών δεδομένων που επιδρούν στη συνολική αντίσταση του πλοίου. Μέσω της αξιοπιστίας των στοιχείων που χρησιμοποιούνται, εκτός της βελτίωσης της ακρίβειας των αποτελεσμάτων, είναι δυνατή η γνώση των λόγων της ευαισθησίας της μεθόδου και κατ' επέκταση της βελτιστοποίησής της.

Λέξεις-κλειδιά: VLCC; Ανάλυση της SHP σε επιμέρους συνιστώσες; Ανάλυση της ανάλωσης καυσίμου; CFD; Holtrop-Mennen; Επίδραση της ανάκλασης των κυματισμών; Μέθοδος Liu; Αύξηση της ρύπανσης της γάστρας; Φιλτράρισμα δεδομένων εισόδου; Υπολογισμός δεδομένων βάσει της θέσης του πλοίου;

## Περίληψη

[Αυτή η σελίδα παραμένει σκόπιμα κενή]

## Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Μελέτης Πλοίου της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου υπό την επίβλεψη του Καθηγητή Απόστολου Παπανικολάου.

Καταρχάς θα ήθελα να εκφράσω την ειλικρινή ευγνωμοσύνη μου στον επιβλέποντα Καθηγητή Απόστολο Παπανικολάου για τη συνεχή υποστήριξη και καθοδήγηση του, που με βοήθησε σε όλα τα στάδια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή Γεώργιο Τζαμπίρα, όπως και τον Δρ. Στυλιανό Πολύζο αναφορικά με την εκτέλεση των πειραμάτων υπολογιστικής υδροδυναμικής-CFD, τα οποία ενίσχυσαν την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της εργασίας αυτής.

Ακόμα, οι ευχαριστίες μου πηγαίνουν στον Υπ. Δρ. Τιμολέοντα Πλέσσα τόσο για την επίβλεψη όσο και για την παροχή όλων των απαραίτητων πληροφοριών που ήταν απαραίτητες για την εκκίνηση της εργασίας. Όμοια, ευχαριστώ τον Δρ. Shukui Liu και τον Διπλ. Ναυπηγό Μηχ. Μηχ. Victor Bolbot, για την βοήθεια σχετικά με το θεωρητικό υπόβαθρο της πρόσθετης αντίστασης κυματισμού και τη μέθοδο υπολογισμού της.

Επιπροσθέτως, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Maran Tankers Management Inc. και ειδικότερα τον αναπληρωτή Επιχειρησιακό Διευθυντή Δρ. Νίκο Αδαμόπουλο για την παροχή των στοιχείων, που ήταν απαραίτητα για την ολοκλήρωση της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, στην οποία και αφιερώνω αυτή την εργασία. Η βοήθεια και η ηθική στήριξη τους στη διάρκεια του συνόλου των σπουδών μου και στη ζωή μου γενικότερα είναι ανεκτίμητη.

## Ευχαριστίες

[Αυτή η σελίδα παραμένει σκόπιμα κενή]

## Περιεχόμενα

Περίληψη.....	1
Ευχαριστίες.....	3
Περιεχόμενα.....	5
Περιεχόμενα Εικόνων.....	8
Περιεχόμενα Πινάκων.....	9
Περιεχόμενα Διαγραμμάτων.....	10
1 Εισαγωγή.....	11
2 Σκοπός της εργασίας.....	12
3 Δομή της εργασίας.....	12
4 Αντίσταση Πλοίου.....	14
4.1 Αντίσταση του πλοίου σε ήρεμο νερό $R_{CALM}$ .....	14
4.2 Αντίσταση ανέμου.....	17
4.3 Πρόσθετη αντίσταση κυματισμού.....	19
4.4 Αντίσταση λόγω ρύπανση της γάστρας και της έλικας $R_{FOUL}$ .....	22
4.5 Παράγοντες που επηρεάζουν την αντίσταση και αλλάζουν ανά περιοχή της υδρογείου.....	24
4.5.1 Πυκνότητα και συνεκτικότητα του θαλάσσιου νερού.....	24
4.5.2 Επιτάχυνση της βαρύτητας (g).....	28
4.5.3 Βάθος της θάλασσας.....	29
4.5.4 Θαλάσσια Ρεύματα.....	31
4.5.5 Ρύπανση της γάστρας.....	33
4.5.6 Μετεωρολογικά δεδομένα.....	33
5 Βασικές αρχές πρόωσης.....	34
5.1 Πρόωση με τη βοήθεια της έλικας- Εισαγωγή.....	34
5.2 Συντελεστής ποσοστού ομόρρου $w$ .....	34
5.3 Συντελεστής μείωσης ώσης $t$ .....	35
5.4 Βαθμοί απόδοσης.....	35
5.4.1 Βαθμός απόδοσης της γάστρας $\eta_H$ .....	35
5.4.2 Βαθμός απόδοσης της έλικας σε ελεύθερη ροή $\eta_0$ .....	35
5.4.3 Βαθμός απόδοσης σχετικής περιστροφής $\eta_R$ .....	36
5.4.4 Βαθμός απόδοσης άξονα $\eta_S$ .....	37
5.4.5 Συνολικός βαθμός απόδοσης της προωστήριας εγκατάστασης P.C.(Propulsive Coefficient) ή $\eta_T$ .....	37

## Περιεχόμενα

6	Μέθοδοι εκτίμησης της αντίστασης και της πρόωσης .....	39
6.1	Εισαγωγή.....	39
6.2	Εμπειρικές μέθοδοι .....	39
6.2.1	Εκτίμηση της αντίστασης .....	39
6.2.2	Εκτίμηση της πρόωσης .....	41
6.3	Πειράματα με μοντέλα πλοίων.....	41
6.3.1	Εκτίμηση της αντίστασης .....	41
6.3.2	Εκτίμηση της πρόωσης .....	42
6.4	Υπολογιστική υδροδυναμική – CFD.....	43
7	Case Study-Ανάλυση της SHP.....	45
7.1	Ανάλυση του προβλήματος .....	45
7.2	Εξεταζόμενο πλοίο.....	45
7.3	Διαθέσιμα Δεδομένα .....	47
7.3.1	Noon reports.....	47
7.3.2	Report of Sea Trials.....	48
7.3.3	Σχέδιο Γραμμών (Lines Plan) .....	48
7.3.4	General Arrangement (GA) και Trim & Stability Booklet .....	48
7.3.5	Ημερομηνίες καθαρισμού της γάστρας και της έλικας.....	49
7.4	Αποκλεισμός Σημείων .....	49
7.5	Μεθοδολογία Υπολογισμών .....	50
7.5.1	Μη υπολογίσιμα μεγέθη.....	50
7.5.2	Υπολογισμός δεδομένων βάσει της γεωγραφικής θέσης του πλοίου και της ημερομηνίας .....	50
7.5.3	Διόρθωση της ταχύτητας λόγω παρουσίας ρεύματος.....	53
7.5.4	Υπολογισμός στοιχείων ανέμου και κυματισμού .....	53
7.5.5	Υπολογισμός της αντίστασης.....	55
7.5.6	Εκτίμηση του συντελεστή πρόωσης P.C.....	64
7.5.7	Σύνοψη διαδικασίας υπολογισμού αντίστασης και πρόωσης.....	66
7.6	Εύρος Τιμών .....	67
7.7	Sea Trials .....	72
8	Παρουσίαση αποτελεσμάτων.....	74
8.1	Μέθοδος CFD .....	74
8.2	Συνιστώσες συνολικής αντίστασης .....	77
8.2.1	Αποτελέσματα αντίστασης σε ήρεμο νερό $R_{CALM}$ με τη μέθοδο Holtrop.....	77
8.2.2	Αντίσταση ανέμου $R_{AA}$ .....	79

## Περιεχόμενα

8.2.3	Πρόσθετη αντίσταση κυματισμού ( $R_{AW}$ ).....	80
8.3	Συνολική αντίσταση $R_T$ .....	82
8.4	Ισχύς πρόωσης SHP .....	83
8.5	Επίδραση παραγόντων στη SHP .....	85
8.5.1	Επίδραση της ρύπανσης της γάστρας $R_{FOUL}$ .....	85
8.5.2	Επίδραση της διαγωγής.....	87
8.5.3	Επίδραση της κατάστασης του καιρού .....	88
8.5.4	Επίδραση στην κατανάλωση καυσίμου και προτάσεις για μείωση της ισχύος πρόωσης SHP .....	88
9	Συμπεράσματα και Προτάσεις .....	90
9.1	Συμπεράσματα εργασίας .....	90
9.2	Προτάσεις για μελλοντικές εργασίες.....	91
10	Βιβλιογραφία.....	92
Παράρτημα Α	Λόγος Ολίσθησης της έλικας.....	94
Παράρτημα Β	Μέθοδος Holtrop.....	96



## Περιεχόμενα Εικόνων

Εικόνα 1. Σύστημα κυματισμών Kelvin (1).....	15
Εικόνα 2. Διανυσματικό άθροισμα του πραγματικού και του φαινόμενου ανέμου [ockam.com].....	18
Εικόνα 3. Ανάλυση της $R_{AW}$ (4).....	19
Εικόνα 4. Σκέδαση κυμάτων λόγω ταλάντωσης του πλοίου. (5).....	19
Εικόνα 5. Ανάκλαση (Reflection/Diffraction) κυμάτων από πλοίο. (6).....	20
Εικόνα 6. Τρόπος δημιουργίας ανεμογενών κυματισμών [ec.gc.ca].....	22
Εικόνα 7. Ρύπανση της γάστρας (Tunnel2Funnel.com).....	22
Εικόνα 8. Επίδραση της ρύπανσης στην απαιτούμενη ισχύ πρόωσης (11).....	23
Εικόνα 9. Η επιφανειακή θερμοκρασία της θάλασσας σε κάθε σημείο της γης μια συγκεκριμένη στιγμή (Wikipedia.com).....	25
Εικόνα 10. Αναπαράσταση της μεταβολής της θερμοκρασίας σε έναν ωκεανό συναρτήσει του βάθους (marinebio.org/oceans/temperature).....	26
Εικόνα 11. Διακύμανση της αλατότητας του νερού (Wikipedia.com).....	27
Εικόνα 12. Η επιτάχυνση της βαρύτητας συναρτήσει του γεωγραφικού πλάτους $\varphi$ .....	28
Εικόνα 13. Αλλαγές της βύθισης και της διαγωγής σε ρηχά νερά για ένα δεξαμενόπλοιο τύπου T2 (16).....	29
Εικόνα 14. Σχηματική αναπαράσταση της συμπεριφοράς κυμάτων σε βαθύ και ρηχό νερό [Surf-forecast.com].....	31
Εικόνα 15. Ωκεάνια Ρεύματα [oceanmotion.org].....	32
Εικόνα 16. Κύρια ρεύματα της Μεσογείου θάλασσας [nasa.gov].....	32
Εικόνα 17. Αύξηση της ρύπανσης σε διαφορετικές περιοχές θαλάσσης (18).....	33
Εικόνα 18. Σχηματική παράσταση ώσης και αντίστασης.....	34
Εικόνα 19. Μεταβολή του $\eta_0$ συναρτήσει του $J$ για δεδομένη έλικα (1).....	36
Εικόνα 20. Αξονικό σύστημα πλοίου (3).....	37
Εικόνα 21. Ροή ενέργειας στο σύστημα πρόωσης του πλοίου (3).....	38
Εικόνα 22. Τυπικές καμπύλες του συντελεστή υπόλοιπης αντίστασης για πλοίο της σειράς Formdata (3).....	41
Εικόνα 23. Πείραμα αντίστασης μοντέλου πλοίου σε δεξαμενή (AMC Towing Tank).....	42
Εικόνα 24. Έλικα υπό κλίμακα προσαρμοσμένη σε μοντέλου πλοίου για τις ανάγκες του πειραμάτος αυτοπρόωσης (HSVA, 2014).....	43
Εικόνα 25. Αναπαράσταση CFD (19).....	44
Εικόνα 26. Όμοιο πλοίο με το υπό εξέταση.....	45
Εικόνα 27. Διόρθωση ταχύτητας πλοίο λόγω παρουσίας ρευμάτων.....	53
Εικόνα 28. C-τύπος πλέγματος για πλώρη με βολβό.....	56
Εικόνα 29. H-O blocks.....	57
Εικόνα 30. Διάταξη του πλέγματος πάνω στη γάστρα.....	57
Εικόνα 31. Ορισμός του flare angle.....	62
Εικόνα 32. Ορισμός περιοχής ολοκλήρωσης.....	63
Εικόνα 33. Υπολογισμένη ελεύθερη επιφάνεια για την πλώρη.....	75
Εικόνα 34. Υπολογισμένη ελεύθερη επιφάνεια για την πρύμνη.....	75
Εικόνα 35. Περίγραμμα ελεύθερης επιφάνειας για όλο το πλοίο.....	76
Εικόνα 36. Λόγος ολίσθησης έλικας.....	94

## Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 1. Κύρια χαρακτηριστικά του πλοίου .....	46
Πίνακας 2. Κύρια χαρακτηριστικά της έλικας.....	46
Πίνακας 3. Χαρακτηριστικά της προωστήριας εγκατάστασης.....	46
Πίνακας 4. Κλίμακα Beaufort [noaa.gov].....	54
Πίνακας 5. Στοιχεία πλήρως ανεπτυγμένων κυματισμών για φάσμα Pierson-Moskowitz συναρτήσεως της κλίμακας Beaufort [noaa.gov] .....	54
Πίνακας 6. Αδιάστατοι παράμετροι.....	60
Πίνακας 7. Συνοπτική παρουσίαση των υπολογιστικών μεθόδων .....	66
Πίνακας 8. SHP που υπολογίζεται μέσω των Sea Trials .....	72
Πίνακας 9. Συνθήκες των εξεταζόμενων καταστάσεων .....	74
Πίνακας 10. Χαρακτηριστικά της αντίστασης .....	76
Πίνακας 11. Χαρακτηριστικά της αυτοπρόωσης.....	77
Πίνακας 12. Σύγκριση αποτελεσμάτων CFD με Sea Trials για ισχύ πρόωσης που αντίστοιχει σε αντίσταση σε ήρεμο νερό χωρίς την επίδραση της ρύπανσης της γάστρας SHP <sub>c</sub> .....	77
Πίνακας 13. Σύγκριση αποτελεσμάτων CFD με την εκτίμηση της SHP που αντίστοιχει σε αντίσταση σε ήρεμο νερό χωρίς την επίδραση της ρύπανσης της γάστρας (SHP <sub>c</sub> )	85

## Περιεχόμενα Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1. Μεταβολή του συντελεστή $C_W$ συναρτήσει του αριθμού Froude και συνεισφορά των αποκλίνοντων και των εγκάρσιων κυματισμών (1).....	16
Διάγραμμα 2. Μεταβολή του συντελεστή $C_{CALM}(C_T)$ συναρτήσει του αριθμού Froude (1) .....	17
Διάγραμμα 3. Η αδιάστατη πρόσθετη αντίσταση κυματισμού συναρτήσει του αδιάστατου μήκους κύματος (9) .....	21
Διάγραμμα 4. Μεταβολή της πυκνότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας και της αλατότητας του νερού [hyperphysics.phy-astr.gsu.edu].....	24
Διάγραμμα 5. Σύγκριση της μεταβολής της θερμοκρασίας και της αλατότητας του νερού συναρτήσει του βάθους (Wikipedia.com) .....	27
Διάγραμμα 6. Επίδραση του βάθους του νερού στην ποσοστιαία μείωση της ταχύτητας (1).....	31
Διάγραμμα 7. Συντελεστής αντίστασης ανέμου πλοίου συναρτήσει της γωνίας φαινόμενου ανέμου ( $0^\circ$ για μετωπικούς ανέμους) (1).....	60
Διάγραμμα 8. Στίγμα του πλοίου τις εξεταζόμενες χρονιές.....	67
Διάγραμμα 9. Διακύμανση του $V_S$ συναρτήσει του βυθίσματος.....	68
Διάγραμμα 10. Διακύμανση του $g$ συναρτήσει του χρόνου.....	69
Διάγραμμα 11. Περιοχή που περικλείεται μεταξύ των παραλλήλων στις $38^\circ$ .....	69
Διάγραμμα 12. Σχετική ταχύτητα ανέμου συναρτήσει της σχετικής γωνίας.....	70
Διάγραμμα 13. Πυκνότητα του νερού $\rho$ συναρτήσει του χρόνου .....	71
Διάγραμμα 14. Καμπύλες SHP- $V_S$ των Sea Trials .....	73
Διάγραμμα 15. $R_{CALM}-V_S$ .....	78
Διάγραμμα 16. Ανάλυση της $R_{calm}$ σε $R_F$ και $R_R$ .....	78
Διάγραμμα 17. Κατανομή του $C_{AA}$ συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης του ανέμου.....	79
Διάγραμμα 18. $R_{WIND}-V_S$ .....	80
Διάγραμμα 19. Αδιάστατη πρόσθετη αντίσταση κυματισμού συναρτήσει του αδιάστατου μήκους κύματος για διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης του κυματισμού.....	81
Διάγραμμα 20. Πρόσθετη αντίσταση κυματισμού $R_{AW}$ συναρτήσει της ταχύτητας $V_S$ .....	81
Διάγραμμα 21. Σχηματική αναπαράσταση όλων των συνιστωσών της αντίστασης συναρτήσει της ταχύτητας.....	82
Διάγραμμα 22. Ποσοστιαία μεταβολή των συνιστωσών της αντίστασης συναρτήσει της ταχύτητας .....	83
Διάγραμμα 23. Σύγκριση της εκτιμώμενης και πραγματικής SHP στη full load condition .....	84
Διάγραμμα 24. Σύγκριση της εκτιμώμενης και πραγματικής SHP στη ballast condition	84
Διάγραμμα 25. Διακύμανση του $C_{BRAKE}$ ως προς το χρόνο .....	86
Διάγραμμα 26. Διακύμανση του $C_{FOUL}$ ως προς το χρόνο.....	86
Διάγραμμα 27. Επίδραση της διαγωγής στη SHP στη $V_S=12$ kn.....	87
Διάγραμμα 28. Ισχύς πρόωσης συναρτήσει της αύξησης της έντασης Beaufort κατά μία μονάδα τη φορά .....	88

## 1 Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται αυξημένη πίεση στη ναυτιλιακή βιομηχανία για να βελτιωθεί η αποδοτικότητα των εμπορικών πλοίων, ιδιαίτερα ως προς τη μείωση της κατανάλωσης καυσίμων, που συνεπάγεται ταυτόχρονη αύξηση της ανταγωνιστικότητας των πλοίων, των περιθωρίων κερδών της εταιρείας και μείωση των εκπομπών ρύπων. Η αποδοτικότητα ενός πλοίου εξαρτάται γενικά από την σχεδίαση και τη διαχείριση του.

Για να γίνει ένα πλοίο κερδοφόρο θα πρέπει τα έσοδα από τα ναύλα να είναι υψηλότερα από τα λειτουργικά του έξοδα. Οπότε μια αύξηση του κέρδους επιτυγχάνεται με αύξηση των ναύλων ή μείωση των λειτουργικών εξόδων ή συνδυασμός και των δύο. Τα λειτουργικά έξοδα αναφέρονται κυρίως στις δαπάνες για τα καύσιμα, το πλήρωμα, τα λιμενικά έξοδα, τη συντήρηση και την επισκευή του πλοίου, αλλά και χρηματοδοτικά έξοδα εξυπηρέτησης ενδεχόμενων δανείων.

Το κόστος των καυσίμων πάντα παίζει ένα σημαντικό ρόλο στα έξοδα του πλοίου (ιδιαίτερα όταν η τιμή των ναυτιλιακών καυσίμων είναι υψηλή) συνεπώς γίνεται μία συνεχής προσπάθεια για μείωση της κατανάλωσης. Η κύρια τεχνική εξοικονόμηση καυσίμου που χρησιμοποιείται τα τελευταία χρόνια είναι το slow steaming, που αναφέρεται στην πρακτική της λειτουργίας των πλοίων σε σημαντικά χαμηλότερες ταχύτητες (απ' ότι αρχικά είχε προβλεφθεί στη σχεδίαση πλοίων) και έτσι επιτυγχάνεται σημαντική μείωση δεδομένης της σχέσης της κατανάλωσης καυσίμου με την ταχύτητα στο τετράγωνο για δεδομένη απόσταση.

Ένας σημαντικός παράγοντας όμως που βοηθά στην εξοικονόμηση καυσίμου είναι η ανάλυση της κατανάλωσης καυσίμου, αφού έχοντας μια καλύτερη εικόνα των παραπάνω είναι εφικτή η λειτουργία του πλοίου όσο το δυνατόν αποτελεσματικότερα. Για να γίνει εφικτή η ανάλυση θα πρέπει η ναυτιλιακή να συλλέγει όσο το δυνατόν περισσότερα στοιχεία κατά την πλεύση του πλοίου και στη συνέχεια να τα επεξεργάζεται και να εξάγει συμπεράσματα για τον τρόπο και τη βελτίωση της λειτουργίας του πλοίου.

Τα στοιχεία που μπορεί να έχει μία εταιρεία για την απόδοση των πλοίων της είναι οι μεσημβρινές αναφορές ημερολογίου (noon reports), οι οποίες παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τη λειτουργία των πλοίων σε ημερήσια βάση. Ανάλογα με την ποιότητα και την ποσότητα των δεδομένων που συλλέγονται, μπορούν να γίνουν εκτιμήσεις για την απαίτηση ισχύος της κύριας μηχανής (Shaft Horse Power-SHP) και την κατάσταση του πλοίου και της μηχανής του.

Η ανάλυση των noon reports καταδεικνύει καταρχάς την εύρυθμη λειτουργία του πλοίου, τη συμπεριφορά του σε διάφορες καταστάσεις θάλασσας, το ποσοστό της κατανάλωσης καυσίμου που οφείλεται στην αντίσταση λόγω ανέμου, λόγω ρευμάτων και λόγω ρύπανσης της γάστρας, στη διαγωγή του κ.α. Με βάση αυτών των αναλύσεων μπορεί το πλοίο να πλέει στη βέλτιστη διαγωγή, να αποφασιστεί η καλύτερη διαδρομή που μπορεί να ακολουθήσει ή τότε θα γίνει ο επόμενος καθαρισμός της γάστρας και της έλικας του πλοίου.

## Σκοπός της εργασίας

Οι μέθοδοι εκτίμησης για την απαίτηση ισχύος της κύριας μηχανής και ουσιαστικά για την κατανάλωση καυσίμου μπορεί να γίνει μέσω εμπειρικών μεθόδων, πειραμάτων αντίστασης και πρόωσης μοντέλων σε δεξαμενή, μέσω υπολογιστικής υδροδυναμικής (CFD) και μέσω των δοκιμών παραλαβής (Sea Trials). Συνήθως χρησιμοποιείται ένας συνδυασμός και των τριών μεθόδων.

Με τη σύγκριση και των τριών μεθόδων γίνεται λοιπόν να υπάρχει μια αξιόπιστη ανάλυση της SHP της κύριας μηχανής και συνεπώς να εντοπιστούν οι αρνητικοί παράγοντες ώστε να μειωθεί κατά το δυνατόν η κατανάλωση καυσίμου. Έτσι, πέραν της μείωσης των λειτουργικών εξόδων, θα μειωθούν και οι εκπομπές καυσαερίων, με θετικές επιδράσεις στην αειφόρο ναυτιλιακή ανάπτυξη.

## 2 Σκοπός της εργασίας

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία αναλύονται η απαίτηση ισχύος της κύριας μηχανής ενός πλοίου τύπου VLCC, για το οποίο υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία, και οι παράγοντες που επιδρούν στην κατανάλωση καυσίμου. Ο στόχος είναι η εξήγηση της αύξησης της κατανάλωσης καυσίμου και η διερεύνηση της καλύτερης διαχείρισης του συγκεκριμένου πλοίου.

Τα δεδομένα κατανάλωσης εξάγονται από τα noon reports. Καθώς υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις από το ροπόμετρο (torque meter) στον άξονα της κύριας μηχανής, λαμβάνεται υπόψη και η Shaft Horse Power (SHP).

Αναλύοντας την SHP σε επιμέρους συνιστώσες, μελετάται πως η απόδοση του πλοίου και η κατανάλωση καυσίμου επηρεάζεται από την κατάσταση της θάλασσας, του καιρού και της φόρτωσής του. Χρησιμοποιώντας ως βάση αυτές τις αναλύσεις, μελετώνται οι βελτιωτικές προτάσεις για την απόδοση της προωστήριας εγκατάστασης του.

## 3 Δομή της εργασίας

Συνοπτικά, στα επόμενα κεφάλαια της εργασίας περιγράφεται η θεωρία του εξεταζόμενου προβλήματος, έπειτα αναλύεται η μεθοδολογία των υπολογισμών, στη συνέχεια παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα και στο τέλος παρατίθενται τα συμπεράσματα της εργασίας.

Αναλυτικότερα, στο κεφάλαιο 4, περιγράφεται η θεωρία σχετικά με την αντίσταση του πλοίου. Στην αρχή γίνεται περιγραφή των συνιστωσών που αποτελούν την αντίσταση σε ήρεμο νερό, κατόπιν αναλύονται η αντίσταση ανέμου, η πρόσθετη αντίσταση κυματισμού και η αντίσταση λόγω ρύπανσης της γάστρας. Τέλος, παρουσιάζονται οι παράγοντες που επηρεάζουν την αντίσταση και αλλάζουν ανά περιοχή της γης.

## Δομή της εργασίας

Στο κεφάλαιο 5, αντίστοιχα, γίνεται θεωρητική περιγραφή των βασικών αρχών πρόωσης. Αρχικά, αναλύονται οι βασικές έννοιες της πρόωσης με έλικα. Ακολούθως, παρουσιάζονται οι υδροδυναμικοί συντελεστές και στο τέλος, ορίζονται οι βαθμοί απόδοσης της προωστήριας εγκατάστασης.

Το κεφάλαιο 6 πραγματεύεται τις μεθόδους εκτίμησης της αντίστασης και της πρόωσης. Καταρχάς, εξηγούνται οι λόγοι που είναι απαραίτητες οι διαφορετικές μέθοδοι. Στη συνέχεια, περιγράφονται οι εμπειρικές μέθοδοι, έπειτα τα πειράματα με μοντέλα πλοίων και στο τέλος, η υπολογιστική υδροδυναμική-CFD.

Στο κεφάλαιο 7, περιγράφεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε. Στην αρχή, αναλύεται το πρόβλημα και γίνεται περιγραφή του εξεταζόμενου πλοίου. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα διαθέσιμα δεδομένα εισόδου και οι πηγές αυτών. Ακολούθως, γίνεται περιγραφή των μεθοδολογιών υπολογισμού που ακολουθήθηκαν, του εύρους των τιμών που χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου και το φιλτράρισμα των δεδομένων εισόδου. Τέλος, παρουσιάζονται τα δεδομένα που προκύπτουν από την αναφορά των Sea Trials.

Στο κεφάλαιο 8, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών που έγιναν. Στη συνέχεια, γίνεται η σύγκριση και ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων και στο τέλος, καταγράφονται οι διάφορες επιδράσεις επιχειρησιακών παραγόντων στην απαιτούμενη SHP.

Στο κεφάλαιο 9, γίνεται παρουσίαση των συμπερασμάτων που εξήχθησαν από την εργασία, καθώς και προτείνονται κατευθύνσεις για μελλοντικές εργασίες.

Στο παράρτημα Α, περιγράφεται το φαινόμενο της ολίσθησης της έλικας και φαίνονται οι υπολογισμοί του φαινομένου και του πραγματικού λόγου ολίσθησης.

Στο παράρτημα Β, παρατίθενται η μεθοδολογία υπολογισμού της αντίστασης σε ήρεμο νερό με βάση τη μέθοδο Holtrop.

## 4 Αντίσταση Πλοίου

### 4.1 Αντίσταση του πλοίου σε ήρεμο νερό $R_{CALM}$

Η αντίσταση ενός πλοίου για δεδομένη ταχύτητα είναι η δύναμη που απαιτείται να ρυμουλκηθεί σε ήρεμο νερό. Μέσω της αντίστασης σε ήρεμο νερό  $R_{CALM}$ , ορίζεται και ο συντελεστής αντίστασης  $C_{CALM}$  ως:

$$C_{CALM} = \frac{R_{CALM}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_S^2 \cdot S} \quad 4.1-1$$

Όπου:

$\rho$ : Η πυκνότητα του νερού

$V_S$ : Η ταχύτητα του πλοίου,

$S$ : Η βρεχόμενη επιφάνεια του πλοίου

Η αντίσταση ρυμούλκησης διαφέρει με την αντίσταση του πλοίου, καθώς στην τελευταία εμπεριέχονται οι αλληλεπιδράσεις γάστρας και έλικας. Η συνολική αντίσταση εξαρτάται από πληθώρα συνιστωσών και συνιστά ένα πολύπλοκο φαινόμενο. Για να μελετηθεί λοιπόν, εξυπηρετεί η διάσπαση της σε επί μέρους **συνιστώσες αντίστασης**. (1)

Στην επαφή της γάστρας με το περιβάλλον ρευστό ασκείται μια στοιχειώδης δύναμη, η οποία θεωρείται ως η συνισταμένη μιας κάθετης στην επιφάνεια συνιστώσας που οφείλεται στην πίεση και μιας εφαπτόμενης στην επιφάνεια συνιστώσας που οφείλεται στη συνεκτικότητα. Εξ' ορισμού, η αντίσταση του πλοίου είναι η προβολή κατά τη διεύθυνση κίνησης του πλοίου του ολοκληρώματος των στοιχειωδών αυτών δυνάμεων στην επιφάνεια της γάστρας. Κατά συνέπεια, προκύπτουν άμεσα οι δύο βασικές συνιστώσες αντίστασης, η αντίσταση τριβής και η αντίσταση πίεσης.

- Η **αντίσταση τριβής** λαμβάνεται από τις **εφαπτομενικές τάσεις** ή τάσεις συνεκτικότητας με προβολή κατά τη διεύθυνση της ροής.
- Η **αντίσταση πίεσης** λαμβάνεται από τις **κάθετες τάσεις** ή δυνάμεις πίεσης, που έχουν προβολή κάθετα στη διεύθυνση της ροής.

Σύμφωνα με το παράδοξο του D' Alembert, σε ιδανικό απέρατο ρευστό, οι μόνες δυνάμεις που θα ασκούνται σε ένα πλήρως βυθισμένο σώμα (μακριά από 'ελεύθερες' επιφάνειες) θα οφείλονται στις πιέσεις, που είναι παντού κάθετες και αλληλοεξουδετερώνονται. Έτσι το σώμα θα έχει εκτός από μηδενική αντίσταση τριβής, λόγω ύπαρξης ιδανικού ρευστού, και μηδενική αντίσταση πίεσης, οπότε και **μηδενική συνολική αντίσταση**.

Αντίθετα σε ένα πραγματικό ρευστό πρώτιστα η συνεκτικότητα συντελεί στην ανάπτυξη της αντίστασης τριβής, ενώ η κατανομή πίεσης στο πρυμναίο μέρος του σώματος λόγω του παχύτερου **οριακού στρώματος** μειώνεται με αποτέλεσμα να αυξάνεται η αντίσταση πίεσης. Σε περίπτωση αποκόλλησης της ροής μειώνεται παραπάνω η ολική πίεση, που οδηγεί σε μεγαλύτερη αύξηση της αντίστασης πίεσης.

Άλλα συνεπακόλουθα της αποκόλλησης είναι η δημιουργία **δρόμου δινών** και **ανάστροφης ροής**. (2)

Η αντίσταση πίεσης σε ένα πλήρως βυθισμένο σώμα ονομάζεται **αντίσταση πίεσης λόγω συνεκτικότητας** καθώς η ύπαρξη του οριακού στρώματος και των υπόλοιπων φαινομένων οφείλονται στη συνεκτικότητα. Μαζί με την **αντίσταση τριβής** αποτελούν την **αντίσταση συνεκτικότητας** του σώματος.

Επιπλέον η παρουσία ελεύθερης επιφάνειας συνεπάγεται μία επιπλέον συνιστώσα της αντίστασης σε ήρεμο νερό. Καθώς το σώμα με την κίνηση του δημιουργεί ένα σύστημα κυματισμών, διαφοροποιείται η κατανομή της πίεσης πάνω στο σώμα. Η ύπαρξη κυματισμών απαιτούν ενέργεια που πρέπει να παράγεται συνεχώς κι αυτή η ενέργεια αντιστοιχεί στην **αντίσταση κυματισμού  $R_w$** . Με δεδομένο ότι οι κυματισμοί επηρεάζουν πρωτίστως τις πιέσεις πάνω στο σώμα, η αντίσταση κυματισμού είναι κυρίαρχα αντίσταση πίεσης. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1, το σύστημα κυματισμών Kelvin που δημιουργείται, αποτελείται από εγκάρσιους και αποκλίνοντες κυματισμούς, που βρίσκονται εντός δύο ευθειών, που σχηματίζουν γωνία  $19.28^\circ$  ως προς τη διεύθυνση κίνησης.

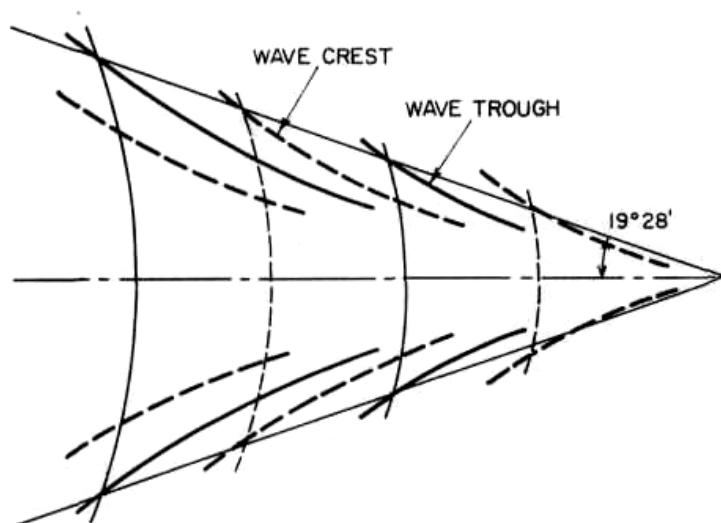
Στο Διάγραμμα 1 απεικονίζεται η μεταβολή του συντελεστή  $C_w$  συναρτήσει του αριθμού Froude του πλοίου και η συνεισφορά των αποκλινόντων και εγκάρσιων κυματισμών σε αυτόν. Όμοια, με το συντελεστή  $C_{CALM}$ , ορίζεται και ο συντελεστής αντίστασης κυματισμού  $C_w$ . Ο αριθμός Froude του πλοίου  $F_n$  ορίζεται ως:

$$F_n = \frac{Vs}{\sqrt{g \cdot L}}$$

Όπου:

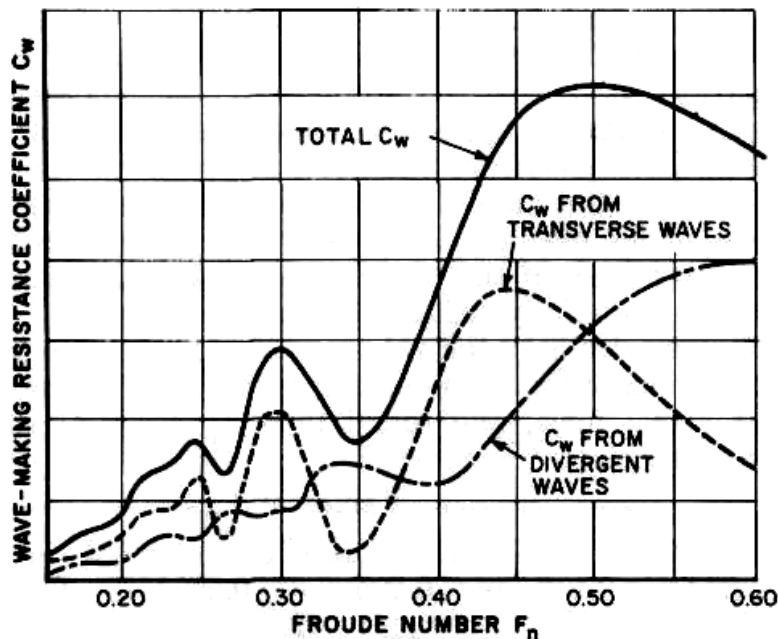
g: Η επιτάχυνση της βαρύτητας

L: Το μήκος του πλοίου



Εικόνα 1. Σύστημα κυματισμών Kelvin (1)





Διάγραμμα 1. Μεταβολή του συντελεστή  $C_w$  συναρτήσει του αριθμού Froude και συνεισφορά των αποκλίνοντων και των εγκάρσιων κυματισμών (1)

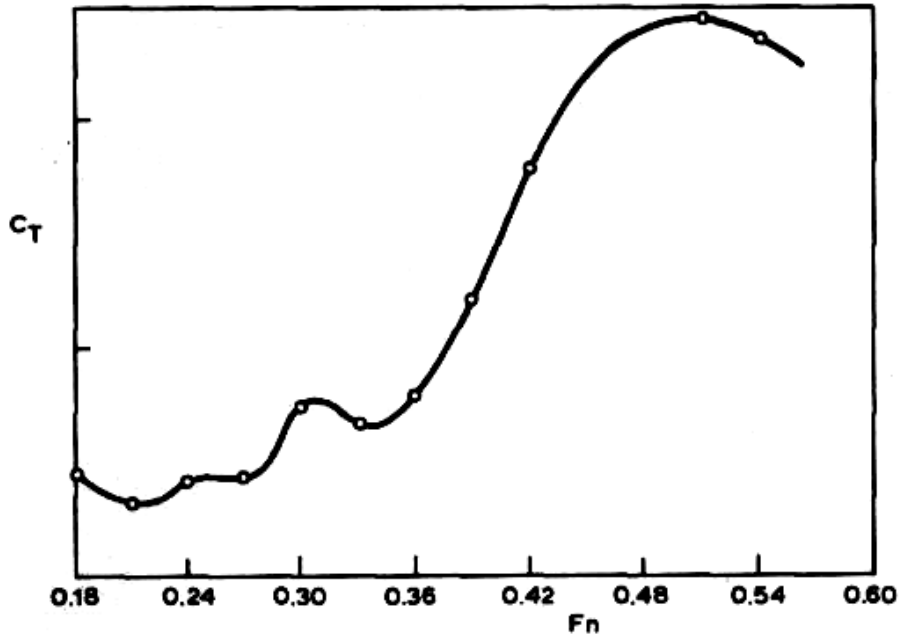
Η αντίσταση τριβής  $R_F$  είναι η πιο σημαντική και κυρίαρχη σε χαμηλές ταχύτητες. Η βρεχόμενη επιφάνεια, η ταχύτητα, η τραχύτητα και η γεωμετρία του σώματος επηρεάζουν την αντίσταση τριβής. Για τον υπολογισμό της διασπάται στην αντίσταση τριβής επίπεδης πλάκας  $R_{FLAT\ PLATE}$  και στην αντίστασης τριβής λόγω καμπυλότητας του σώματος. Η διαφορά της αντίστασης τριβής από την ολική αντίσταση ονομάζεται **υπόλοιπη αντίσταση  $R_R$**  και σε αυτή ανήκει η αντίσταση τριβής λόγω καμπυλότητας του σώματος. Αντίστοιχα με τους συντελεστές αντίστασης  $C_{CALM}$  και  $C_w$  ορίζονται οι συντελεστές αντίστασης τριβής  $C_F$  και υπόλοιπης αντίστασης  $C_R$ . Επομένως ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις 4.1-2 έως 4.1-4:

$$R_{FORM} = R_F - R_{FLAT\ PLATE} \quad 4.1-2$$

$$R_R = R_{CALM} - R_{FLAT\ PLATE} \quad 4.1-3$$

$$C_{CALM} = C_F + C_R \quad 4.1-4$$

Αντίστοιχα, η **αντίσταση πίεσης λόγω συνεκτικότητας** είναι συνάρτηση της βρεχόμενης επιφάνειας, της τραχύτητας και της γεωμετρίας του σώματος και είναι μέρος της υπόλοιπης αντίστασης. Τέλος, η **αντίσταση κυματισμού** είναι μικρή σε χαμηλές ταχύτητες και κυρίαρχη σε υψηλές ταχύτητες, καθώς εξαρτάται από τη μορφή της γάστρας και της ταχύτητας και μπορεί να διασπαστεί περαιτέρω σε αντίσταση σχηματισμού κυματισμών και αντίσταση θραύσεως κυματισμών. Αποτελεί κι αυτή μέρος της υπόλοιπης αντίστασης. Στο Διάγραμμα 2 απεικονίζεται η μεταβολή του συντελεστή ολικής αντίστασης  $C_{CALM}$  (στο διάγραμμα  $C_T$ ), που περιλαμβάνει όλες τις επιδράσεις των επιμέρους συνιστωσών.



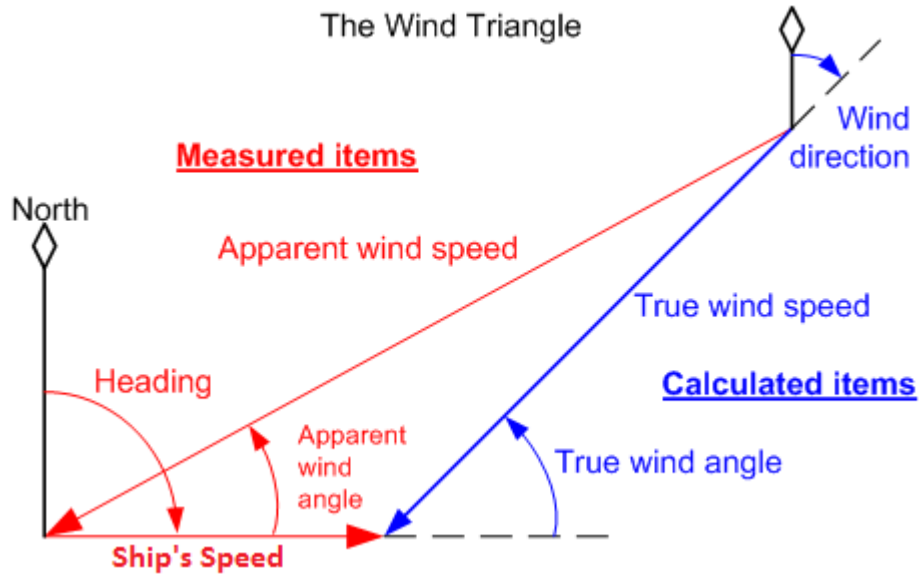
Διάγραμμα 2. Μεταβολή του συντελεστή  $C_{CALM}(C_T)$  συναρτήσει του αριθμού Froude (1)

## 4.2 Αντίσταση ανέμου

Ένα πλοίο που πλέει σε ήρεμη θάλασσα και χωρίς άνεμο δέχεται μια αντίσταση λόγω της κίνησης των εξάλων του πλοίου στον αέρα. Η αντίσταση αυτή εξαρτάται από τη ταχύτητα του πλοίου και από το σχήμα και την επιφάνεια του πλοίου που βρίσκεται πάνω από το νερό.

Όταν όμως φυσάει άνεμος, η αντίσταση εξαρτάται κι από τη ταχύτητα του ανέμου και τη σχετική του ταχύτητα. Ο **πραγματικός άνεμος (true wind)** ορίζεται ως ο άνεμος που οφείλεται σε φυσικά αίτια και υπάρχει πάνω από τη θάλασσα ανεξάρτητα του πλοίου. Αντίθετα, ο φαινόμενος άνεμος είναι το διανυσματικό άθροισμα των ταχυτήτων του πλοίου και του πραγματικού ανέμου. Ο **φαινόμενος άνεμος (apparent wind)** είναι η ταχύτητα του ανέμου που βλέπει το πλοίο. [Εικόνα 2]

Η ταχύτητα του ανέμου, ακόμα και σε ένα σταθερό άνεμο, διαφοροποιείται ανάλογα με το ύψος πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας η ταχύτητα είναι πιο αργή και οφείλεται στο οριακό στρώμα που δημιουργείται. Το ύψος του οριακού στρώματος είναι περίπου 7.5 m. Ένα **ανεμόμετρο** πάνω σε ένα πλοίο αντιλαμβάνεται τον **φαινόμενο** άνεμο και η ταχύτητα του εξαρτάται από το ύψος που είναι τοποθετημένο το ανεμόμετρο. Έτσι με γνωστό το ύψος και σε συνδυασμό με το **δρομόμετρο**, υπολογίζονται τα χαρακτηριστικά του **πραγματικού** ανέμου.



Εικόνα 2. Διανυσματικό άθροισμα του πραγματικού και του φαινόμενου ανέμου [ockam.com]

Οι υπερκατασκευές ενός πλοίου λόγω των πολλών λειτουργιών που πρέπει να πληρούν, δεν μπορούν να αποκτήσουν αεροδυναμικό σχήμα. Εν πάση περιπτώσει αυτό θα ήταν αποτελεσματικό μόνο σε μετωπικούς ανέμους και η μείωση της αντίστασης που θα επιτυγχανόταν, θα ήταν σχετικά μικρή.

Για ένα πλοίο η **αντίσταση λόγω ανέμου**  $R_{AA}$  υπολογίζεται ως:

$$R_{AA} = \frac{1}{2} * \rho_A * C_{AA} * A_{XV} * V_{WR}^2 \quad 4.2-1$$

Όπου:

$\rho_A$ : Η πυκνότητα του αέρα,

$A_{XV}$ : Το εμβαδόν της εγκάρσιας προβεβλημένης επιφάνειας του πλοίου που είναι εκτεθειμένη στον άνεμο,

$C_{AA}$ : Συντελεστής που εξαρτάται από την μορφή των εξάλων του πλοίου και τη γωνία του ανέμου,

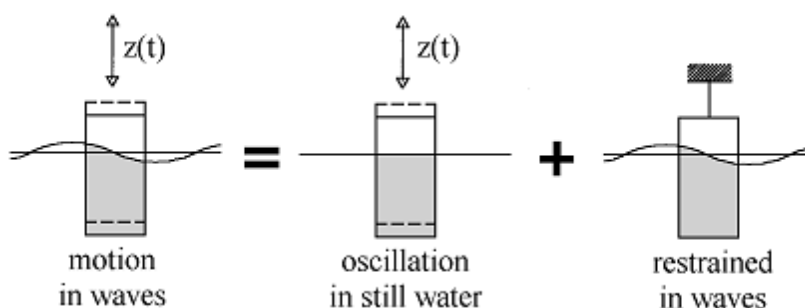
$V_{WR}$ : Η ταχύτητα του φαινόμενου ανέμου.

Η πυκνότητα του αέρα σε σχέση με την πυκνότητα του νερού είναι περίπου 1000 φορές μικρότερη. Συνεπώς, λόγω της **μικρής πυκνότητας** του αέρα, η αντίσταση λόγω αέρα είναι **πολύ μικρή** συγκριτικά με την αντίσταση συνεκτικότητας του πλοίου. Χαρακτηριστικά ανάλογα με την ταχύτητα ενός πλοίου και του ανέμου μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ **2%-10%** της συνολικής αντίστασης. (3)

### 4.3 Πρόσθετη αντίσταση κυματισμού

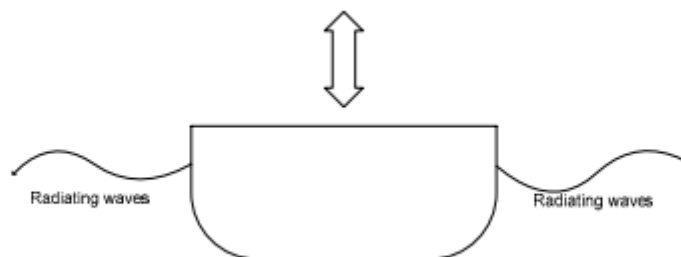
Η πρόσθετη αντίσταση κυματισμού  $R_{AW}$  είναι μέρος της συνολικής αντίστασης του πλοίου και προκαλείται από τα κύματα που οφείλονται στα μετεωρολογικά φαινόμενα, κυρίως τα ανεμογενή κύματα. Όταν ένα πλοίο ταλαντώνεται εξαιτίας των κυμάτων, το πλοίο απολύει ενέργεια που τροφοδοτείται στα περιβάλλοντα ύδατα αυξάνοντας την αντίσταση.

Η πρόσθετη αντίσταση κυματισμού παραδοσιακά μελετάται χωριστά σε δύο συνιστώσες, στην πρόσθετη αντίσταση λόγω των κινήσεων του πλοίου  $R_{AWM}$  και λόγω της ανάκλασης των κυματισμών  $R_{AWR}$ , χωρίς βέβαια να παραγνωρίζονται οι αλληλεπιδράσεις. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3, η  $R_{AW}$  μελετάται σε δύο βασικά φαινόμενα για ένα πλωτό σώμα.



Εικόνα 3. Ανάλυση της  $R_{AW}$  (4)

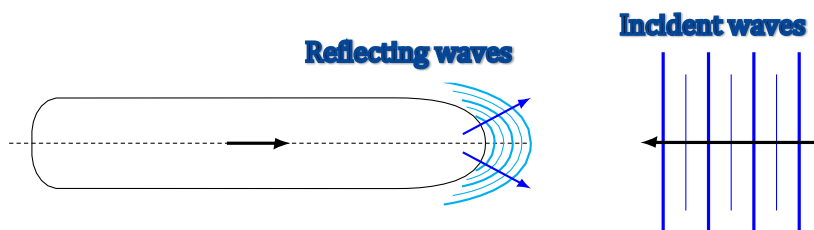
Σε μεσαία μήκη κύματος η απολυόμενη ενέργεια μεταδίδεται κυρίως μέσω της **σκέδασης (radiation)** [Εικόνα 4] των κυμάτων από το πλοίο, επειδή οι κινήσεις του πλοίου είναι μεγάλες. Αυτό συμβαίνει ιδιαίτερα σε περιοχές συντονισμού των **κατακόρυφων κινήσεων (heaving)** και του **προνευτασμού (pitching)**. Η παρεχόμενη ενέργεια και συνεπαγόμενη **αντίσταση  $R_{AWM}$**  οφείλεται στην απόσβεση των ταλαντώσεων. (5)



Εικόνα 4. Σκέδαση κυμάτων λόγω ταλάντωσης του πλοίου. (5)

Η **ανάκλαση (reflection)** των προσπιπτόντων κυμάτων επίσης δημιουργεί πρόσθετη αντίσταση. Η αντίσταση που οφείλεται στην **περίθλαση ( $R_{AWR}$ )** είναι

κυρίαρχη στις περιοχές μεγάλης συχνότητας ή μικρούς μήκους κυμάτων, όπου οι κινήσεις του πλοίου είναι μικρές. [Εικόνα 5]



Εικόνα 5. Ανάκλαση (Reflection/Diffraction) κυμάτων από πλοίο. (6)

Η εκτίμηση της πρόσθετης αντίστασης κυματισμού είναι σημαντική για:

- **Το περιθώριο καιρού (weather margin) για την επιλογή μηχανής**  
Το περιθώριο καιρού για καινούρια πλοία μπορεί να εκτιμηθεί βάσει της αύξησης της αντίστασης λόγω καιρού και να γίνει έπειτα κατάλληλη επιλογή μηχανής.
- **Καθορισμός πλεύσης σε σχέση με τις καιρικές συνθήκες (weather routing)**  
Ο καθορισμός πλεύσης/πορείας σε σχέση με τις καιρικές συνθήκες είναι πολύ σημαντικός παράγοντας για τα κέρδη ενός πλοίου. Πρωτίστως, μια καλή εκτίμηση βοηθάει στη σωστή προσέγγιση του χρόνου άφιξης ενός πλοίου σε ένα λιμάνι. Έτσι οι παραλήπτες του φορτίου μπορούν να γνωρίζουν πότε ένα πλοίο θα φτάσει στο λιμάνι, ελαχιστοποιώντας παράλληλα και τα κόστη αποθήκευσης στο λιμάνι. Επίσης, είναι πολύ σημαντικό για την επιλογή της βέλτιστης διαδρομής (optimizing route), μειώνοντας την κατανάλωση καυσίμου και τις εκπομπές καυσαερίων.
- **Ανάλυση αποδοτικότητας (performance analysis)**  
Γνωρίζοντας την ολική αντίσταση ενός πλοίου και αφαιρώντας την αντίσταση που οφείλεται στον καιρό, είναι δυνατόν να υπολογιστεί η αντίσταση του πλοίου σε ήρεμο νερό. Αυτή η αντίσταση μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέτρηση της αποδοτικότητας του πλοίου συναρτήσει του χρόνου. Έτσι, οι πλοιοκτήτες μπορούν να χρησιμοποιήσουν αυτή την πληροφορία για να αξιολογήσουν την αξία ενός πλοίου ή πόσο συχνά σε ένα πλοίο θα πηγαίνει για καθαρισμό.

Όπως φαίνεται και στην Διάγραμμα 3, σε ένα πλοίο τύπου VLCC η  $R_{AWR}$  είναι κυρίαρχη στα **μικρά μήκη κύματος** (μικρότερα από το 50% του μήκους του πλοίου), ενώ η  $R_{AWM}$  σε **μεσαία μήκη κύματος** (μεταξύ 50% και 150~200% του μήκους του πλοίου). Ένα VLCC όμως πλέει ως επί το πλείστον σε μικρά μήκη κύματος (7), γι' αυτό και  $R_{AWR}$  είναι η αντίσταση που παίζει σημαντικό ρόλο στον υπολογισμό της αντίστασης. Σε πολύ **μεγάλα μήκη κύματος** το πλοίο ακολουθεί την κίνηση των κυμάτων, οπότε **δεν υπάρχει πρόσθετη αντίσταση κυματισμού**. Οι συνιστώσες της  $R_{AW}$  στο Διάγραμμα 3 υπολογίστηκαν με χρήση της ημι-εμπειρικής μεθόδου του Εργαστήριου Μελέτης Πλοίου του ΕΜΠ (8). Στα περισσότερα διαγράμματα, όπως επίσης και στο παρακάτω, η αντίσταση κυματισμού  $R_{AW}$  παρουσιάζεται αδιαστοτοποιημένη ως:

$$R_{aw} = \frac{R_{AW}}{\rho \cdot g \cdot \zeta_a^2 \cdot \frac{B^2}{L_{WL}}} \quad 4.3-1$$

Όπου:

$\rho$ : Η πυκνότητα του νερού

$g$ : Η επιτάχυνση της βαρύτητας

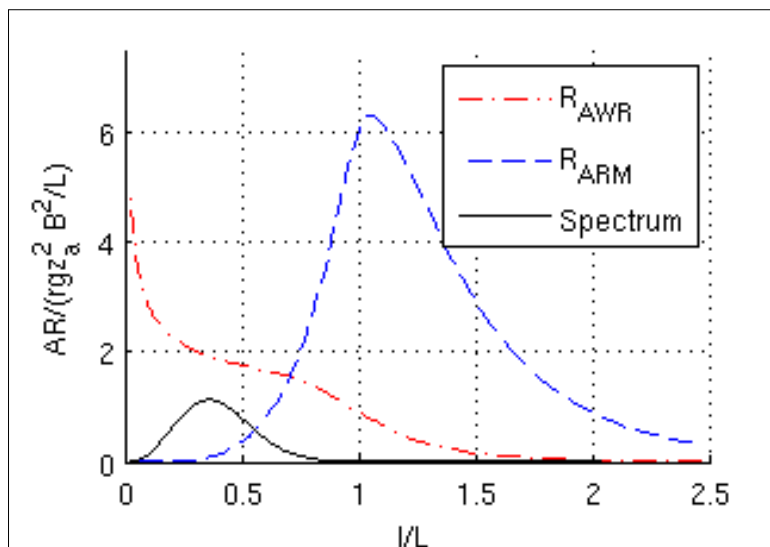
$\zeta_a$ : Το πλάτος κυματισμού

$B$ : Το πλάτος πλοίου

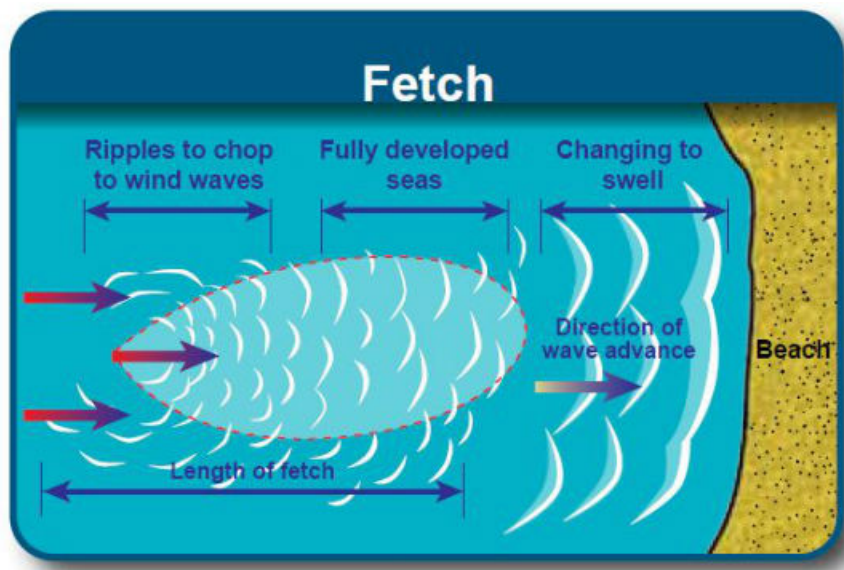
$L_{WL}$ : Το μήκος πλοίου στην ίσαλο γραμμή

Ο οριζόντιος άξονας στα διαγράμματα είναι ο λόγος του μήκος κύματος συνάντησης  $\lambda$  ως προς το μήκος της ισάλου του πλοίου και παρουσιάζεται συνήθως ως  $\lambda/L_{WL}$ .

Η ανάπτυξη των ανεμογενών κυματισμών εξαρτάται κυρίως από το **βάθος του νερού, το χρόνο και την απόσταση** στην οποία **επενεργεί ο άνεμος** στους κυματισμούς σε μια κατεύθυνση (**fetch length**). Για να θεωρηθεί ότι μια θάλασσα είναι **πλήρως ανεπτυγμένη (fully developed)**, θα πρέπει να η παρεχόμενη ενέργεια από τον άνεμο στα κύματα είναι σε ισορροπία με τη μεταφορά ενέργειας μεταξύ των διαφόρων συνιστωσών των κυμάτων και με τη διάχυση της ενέργειας από τη θραύση των κυμάτων. Στην Εικόνα 6 απεικονίζεται η επίδραση του fetch length και του βάθους του νερού στη δημιουργία των ανεμογενών κυματισμών.



Διάγραμμα 3. Η αδιάστατη πρόσθετη αντίσταση κυματισμού συναρτήσει του αδιάστατου μήκους κύματος (9)



Εικόνα 6. Τρόπος δημιουργίας ανεμογενών κυματισμών [ec.gc.ca]

#### 4.4 Αντίσταση λόγω ρύπανση της γάστρας και της έλικας $R_{FOUL}$

Η ρύπανση της γάστρας και της έλικας ενός πλοίου με βιολογικούς οργανισμούς είναι ανεπιθύμητη και αυξάνει την αντίσταση του πλοίου. Στον πυθμένα των πλοίων χωρίς κάποια προστασία κατά της ρύπανσης της γάστρας, μπορεί να συγκεντρωθούν περισσότερο από 150 kg από θαλάσσιους οργανισμούς ανά  $m^2$ . Σε ένα VLCC μπορεί κατά συνέπεια να συγκεντρωθούν πάνω από 6.000 τόνοι μικροοργανισμών.

Από τη στιγμή του **δεξαμενισμού** (dry-docking) και ύστερα η επιφάνεια του πλοίου γίνεται τραχύτερη λόγω της ρύπανσης της. Λόγω της **τραχύτητας** (roughness) δημιουργείται ένα οριακό στρώμα παχύτερο και πιο τυρβώδες που οδηγεί σε αύξηση της αντίστασης τριβής. Μια μικρής έκτασης ρύπανσης μπορεί να προκαλέσει αύξηση της κατανάλωσης καυσίμου κατά 40%-50%. (10)



Εικόνα 7. Ρύπανση της γάστρας (Tunnel2Funnel.com)



## Αντίσταση Πλοίου

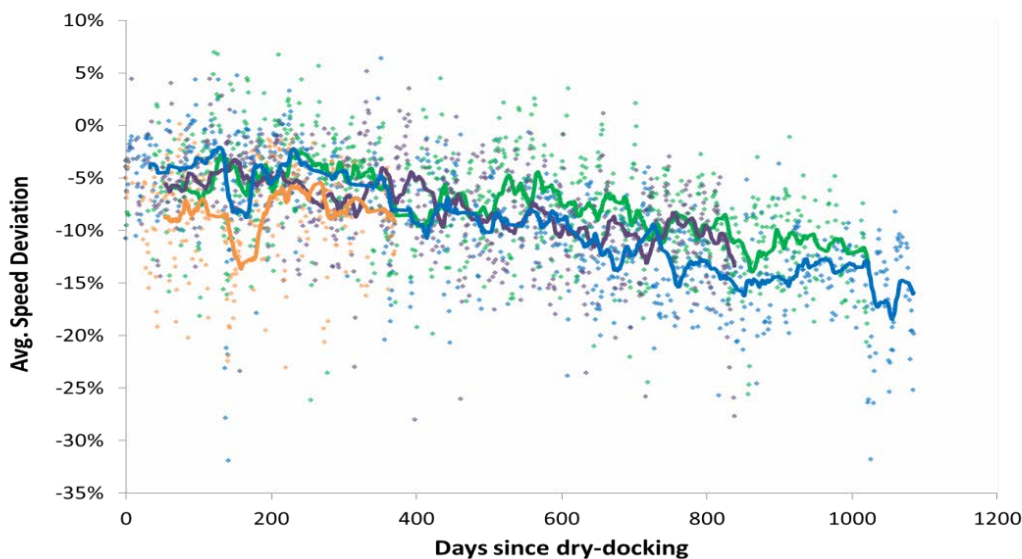
Με την **πρόληψη** της ρύπανσης λοιπόν, μπορούν να εξοικονομηθούν σημαντικά έξοδα. Γι' αυτό το λόγο κρίνεται αναγκαία η χρησιμοποίηση αντιρρυπαντικών βαφών στα ύφαλα του πλοίου. Τα κύρια **χαρακτηριστικά** που θα πρέπει να έχει ένα αντιρρυπαντικό σύστημα είναι τα ακόλουθα:

- Ευρύ φάσμα λειτουργίας
- Χαμηλή τοξικότητα για τα θηλαστικά
- Χαμηλή διαλυτότητα στο νερό
- Συμβατό με το χρώμα της γάστρας
- Φιλικό προς το περιβάλλον και τη τροφική αλυσίδα
- Καλή σχέση μεταξύ τιμής και απόδοσης

Στην Εικόνα 8 φαίνεται η επίδραση της ρύπανσης της γάστρας και της έλικας στην **απώλεια της ταχύτητας (speed deviation)** συναρτήσεως των ημερών από τον τελευταίο δεξαμενισμό. Οι διαφορετικές καμπύλες αντιστοιχούν σε διαφορετικά πλοία και το μήκος τους στην χρονική περίοδο μετά το δεξαμενισμό που έχουν γίνει μετρήσεις.

Μεταξύ των δεξαμενισμών, γίνονται καθαρισμοί της γάστρας και της έλικας, όπου επίσης μειώνεται η τραχύτητα αλλά δεν αντικαθίσταται το υφαλόχρωμα. Επίσης, στους καθαρισμούς μπορεί να υπάρξει αποκόλληση του υφαλοχρώματος, με συνέπεια τη ραγδαία αύξηση της ρύπανσης. Ένα αποτελεσματικό σύστημα αντιρρύπανσης επίσης μπορεί να εξοικονομήσει κεφάλαια στον πλοιοκτήτη σε μια σειρά από τρόπους:

- Άμεση εξοικονόμηση καυσίμων, διατηρώντας τη γάστρα καθαρή
- Επέκταση του χρόνου μεταξύ δύο δεξαμενισμών, αφού το αντιρρυπαντικό σύστημα παρέχει προστασία για σειρά ετών
- Αύξηση της διαθεσιμότητας του πλοίου δεδομένου ότι μειώνεται ο χρόνος που ξοδεύεται σε δεξαμενισμούς



Εικόνα 8. Επίδραση της ρύπανσης στην απαιτούμενη ισχύ πρόωσης (11)



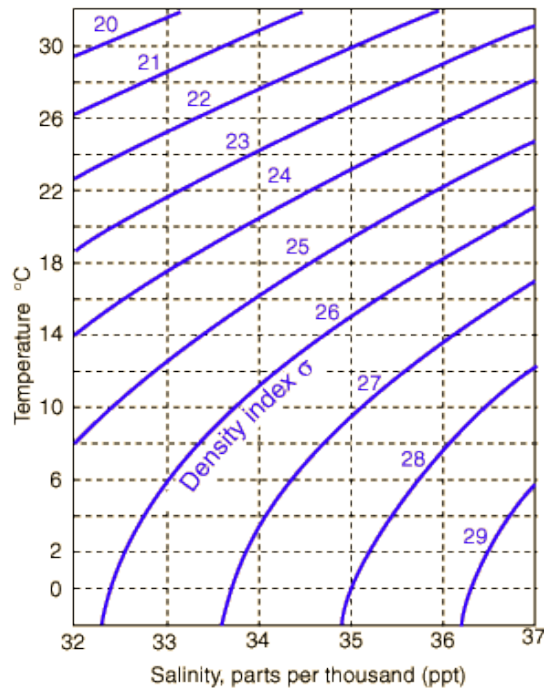
## 4.5 Παράγοντες που επηρεάζουν την αντίσταση και αλλάζουν ανά περιοχή της υδρογείου

Για τον υπολογισμό της αντίστασης ενός πλοίου σε πραγματικές συνθήκες υπηρεσίας χρησιμοποιούνται διάφορα δεδομένα και απλουστεύσεις, που όμως μπορούν να διαφέρουν σε κάθε σημείο της γης. Τα πιο σημαντικά εξ' αυτών είναι:

### 4.5.1 Πυκνότητα και συνεκτικότητα του θαλάσσιου νερού

Η πυκνότητα και η συνεκτικότητα του θαλάσσιου νερού στα επιφανειακά στρώματα της θάλασσας εξαρτώνται κυρίως από τη θερμοκρασία και την αλατότητα του νερού, όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 4, στο οποίο η πυκνότητα είναι ίση με  $\rho=1,000+\sigma$ , όπου  $\sigma$  ο συντελεστής που απεικονίζεται στο συγκεκριμένο διάγραμμα.

Η πυκνότητα του νερού εξαρτάται επίσης από την πίεση. Όμως σύμφωνα με τους πίνακες ιδιοτήτων νερού (12) για αύξηση της πίεσης κατά 2 bar, που αντιστοιχεί σε 20 m βάθους νερού, όσο δηλαδή και το βύθισμα σχεδίασης των VLCC πλοίων, η πυκνότητα αυξάνεται κατά μόλις 0.009%. Γι' αυτό το λόγο, δε λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό της πυκνότητας.



Διάγραμμα 4. Μεταβολή της πυκνότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας και της αλατότητας του νερού [hyperphysics.phy-astr.gsu.edu]

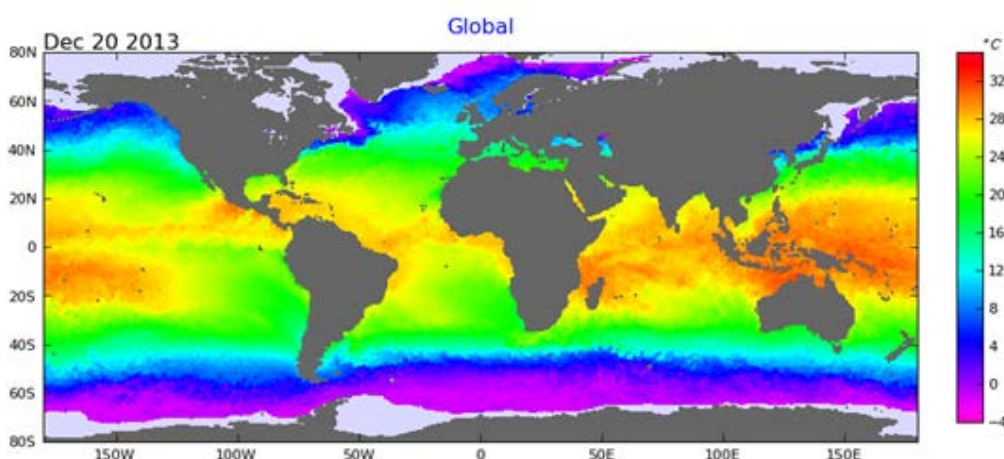
- **Θερμοκρασία του νερού**

Όταν το φως του ηλίου πέφτει στην επιφάνεια της θάλασσας, θερμαίνει τα πάνω στρώματα του νερού σαφώς πιο εύκολα. Στους ωκεανούς, η περισσότερη ενέργεια απορροφάται στα πρώτα 50 cm. Στα 2 μέτρα βάθος, το 98% της ενέργειας έχει απορροφηθεί και έχει μετατραπεί σε θερμότητα. (13)

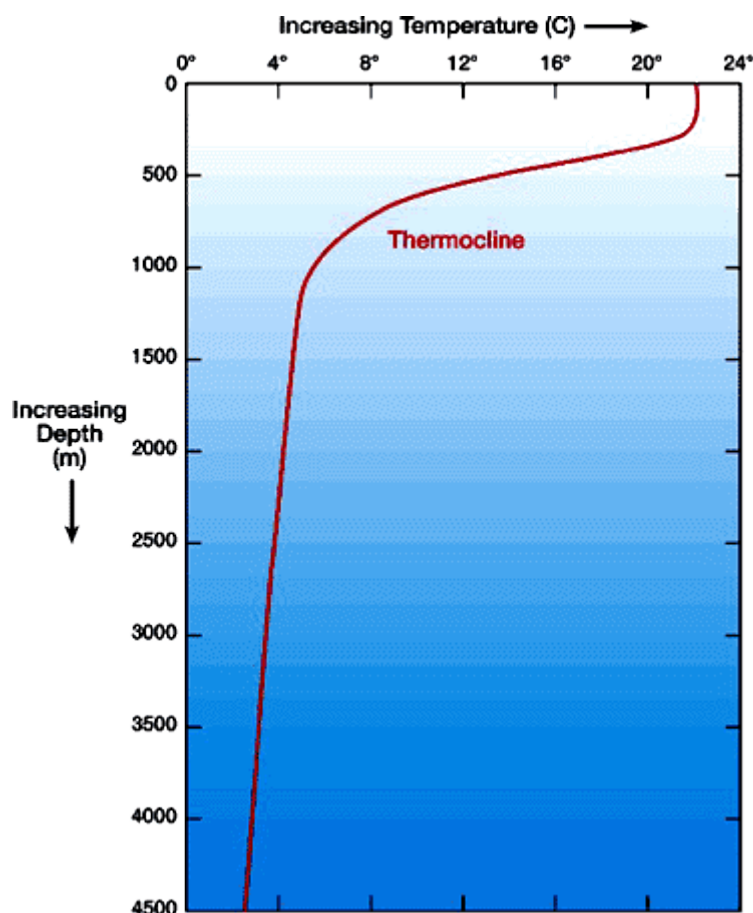
Το νερό έχει πολύ μεγάλη θερμοχωρητικότητα, οπότε όταν ζεσταίνεται, παραμένει θερμό για μεγάλο διάστημα. Οι εποχιακές μεταβολές στις θερμοκρασίες των ωκεανών υστερούν περίπου 2 μήνες των εποχιακών αλλαγών στη στεριά. Η καθυστέρηση αυτή είναι μεγαλύτερη σε ωκεανούς με μεγάλα βάθη. (14) Η επιφανειακή θερμοκρασία του νερού επηρεάζεται έντονα από τις αλλαγές της θερμότητας που δέχεται. Στην Εικόνα 9 φαίνεται η έντονη διακύμανση της επιφανειακής θερμοκρασίας σε κάθε σημείο της γης.

Η θερμότητα μεταφέρεται στα χαμηλότερα επίπεδα των ωκεανών και των θαλασσών κυρίως μέσω της κυκλοφορίας του νερού. Το νερό κοντά στην επιφάνεια θερμαίνεται από τον ήλιο και είναι λιγότερο πυκνό από το νερό κοντά στον πυθμένα. Όταν όμως τα επιφανειακά στρώματα του νερού δεν επηρεάζονται από ανέμους ή ρεύματα, στρώματα νερού με διαφορετικές πυκνότητες μπορούν να διαχωρίζονται χωρίς να αναμιγνύονται οι διαφορετικές πυκνότητες. Όταν το ανώτερο στρώμα θερμαίνεται κατά τους ζεστούς μήνες, διαχωρίζεται από το βαθύ νερό μέσω ενός **θερμοκλινούς (thermocline)** στρώματος, στο οποίο η θερμοκρασία μειώνεται ταχύτερα σε μικρότερες αυξήσεις του βυθίσματος. Όπως παρατηρείται και στην Εικόνα 10, στο θερμοκλινές στρώμα η θερμοκρασία συναρτήσει του βάθους αλλάζει ραγδαία ενώ στις άλλες ζώνες η θερμοκρασία παραμένει πιο σταθερή.

Συνεπώς, ένα πλοίο καθώς πλέει στα επιφανειακά στρώματα του νερού, η θερμοκρασία που θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη, είναι η επιφανειακή θερμοκρασία, όπως φαίνεται και στην προηγούμενη εικόνα.



Εικόνα 9. Η επιφανειακή θερμοκρασία της θάλασσας σε κάθε σημείο της γης μια συγκεκριμένη στιγμή (Wikipedia.com)



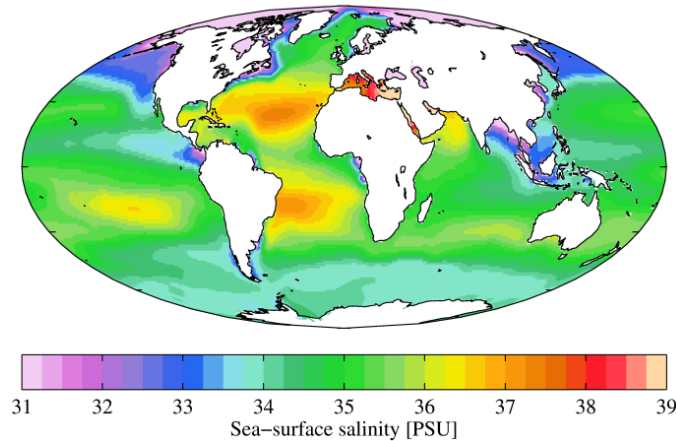
Εικόνα 10. Αναπαράσταση της μεταβολής της θερμοκρασίας σε έναν ωκεανό συναρτήσει του βάθους ([marinebio.org/oceans/temperature](http://marinebio.org/oceans/temperature))

- **Αλατότητα του νερού**

Η συνολική ποσότητα διαλυμένου υλικού στο νερό ονομάζεται αλατότητα και εκφράζεται σε μονάδες **psu**, που είναι η **αναλογία σε 1000 g**. Η εξάτμιση του νερού των ωκεανών και ο σχηματισμός πάγων στη θάλασσα αυξάνουν την αλατότητα του νερού. Ωστόσο, οι παράγοντες που αυξάνουν την αλατότητα αντισταθμίζονται από εκείνους που τη μειώνουν, όπως η συνεχής εισροή γλυκού νερού από τους ποταμούς, τη βροχή και το χιόνι, τη τήξη των πάγων, την ύπαρξη θαλάσσιων ρευμάτων κλπ.

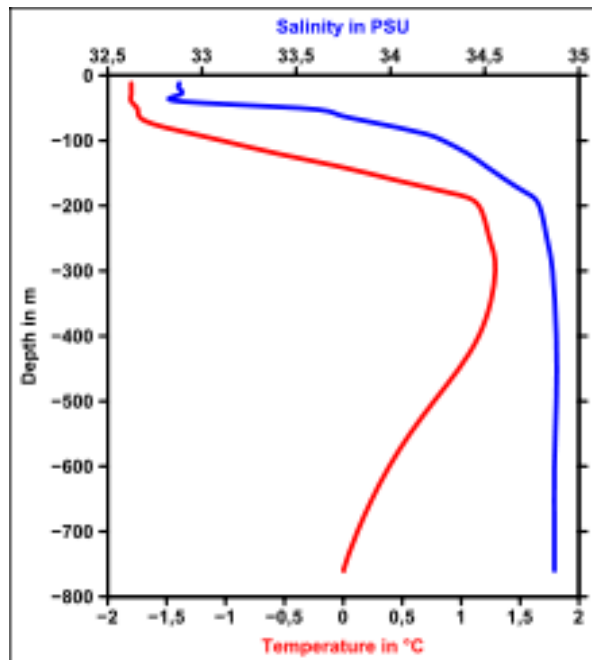
Στα ανοιχτά ωκεάνια τμήματα, οι περιοχές που βρίσκονται εγγύτερα στον ισημερινό έχουν μεγαλύτερη εξάτμιση υδάτων, λόγω υψηλότερων θερμοκρασιών, γεγονός που προκαλεί αύξηση της αλατότητας. Αντίθετα, περιοχές που αποκλίνουν από τον ισημερινό έχουν μικρότερη θερμοκρασία, άρα μικρότερη εξάτμιση και επομένως χαμηλότερη αλατότητα. Εξαίρεση αποτελούν περιοχές που βρίσκονται πολύ κοντά στον ισημερινό και παρουσιάζουν αυξημένες βροχοπτώσεις άρα και χαμηλή αλατότητα λόγω του βρόχινου νερού (15). Στην Εικόνα 11 φαίνεται η αλατότητα του νερού μια χρονική στιγμή σε κάθε σημείο της γης. Για παράδειγμα, η αλατότητα σε συνήθεις περιοχές πλεύσης διαφέρει αρκετά. Στη Νότια Σινική Θάλασσα κυμαίνεται γύρω στα 33 psu, στον Ινδικό Ωκεανό στα 35 psu, στον αραβικό κόλπο στα 36-37 psu, στη **Μεσόγειο στα 38 psu**, ενώ στον Ατλαντικό Ωκεανό στο ύψος του Ισημερινού στα 36.5 psu.

## Αντίσταση Πλοίου



Εικόνα 11. Διακόμανση της αλατότητας του νερού (Wikipedia.com)

Αντίστοιχα με τη θερμοκρασία, η αλατότητα μεταβάλλεται με το βάθος του νερού και σε αντίθεση με το θερμοκλινές στρώμα στη θερμοκρασία, στην αλατότητα ορίζεται το **αλοκλινές (halocline)** στρώμα, στο οποίο η αλατότητα μεταβάλλεται ταχύτερα με μικρότερες αυξήσεις του βυθίσματος, όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 5. Όμως, το αλοκλινές στρώμα ξεκινάει σε σαφώς μικρότερο βάθος σε σχέση με το θερμοκλινές στρώμα και έτσι επηρεάζεται η πυκνότητα του θαλάσσιου νερού που συναντά το πλοίο. Η μεταβολή της αλατότητας του νερού συναρτήσει του βάθους είναι διαφορετική από θάλασσα σε θάλασσα λόγω της διαφορετικής ανανέωσης του νερού και των διαφορετικών θερμοκρασιών που επικρατούν και έτσι είναι πολύ δύσκολο να προβλεφτεί.



Διάγραμμα 5. Σύγκριση της μεταβολής της θερμοκρασίας και της αλατότητας του νερού συναρτήσει του βάθους (Wikipedia.com)

Έτσι ορίζεται και το **πυκνοκλινές (pycnocline)** στρώμα, στο οποίο η πυκνότητα μεταβάλλεται ταχύτερα με μικρότερες αυξήσεις του βάθους και εξαρτάται κυρίως από την θερμοκρασία και την αλατότητα του νερού, αλλά και από την πίεση. Εξαιτίας όμως της δυσκολίας εκτίμησης της μεταβολής της αλατότητας του νερού συναρτήσει του βάθους, αντίστοιχα είναι πολύ δύσκολη και η εκτίμηση της μεταβολής της πυκνότητας του νερού συναρτήσει του βάθους.

#### 4.5.2 Επιτάχυνση της βαρύτητας (g)

Η **επιτάχυνση της βαρύτητας g** διαφέρει ανάλογα με το ύψος από την επιφάνεια της θάλασσας και το γεωγραφικό πλάτος. Η **μέση τιμή** της είναι  $9.80665 \frac{m}{s^2}$  και μπορεί να διαφέρει από  $9.78 \frac{m}{s^2}$  έως  $9.83 \frac{m}{s^2}$ .

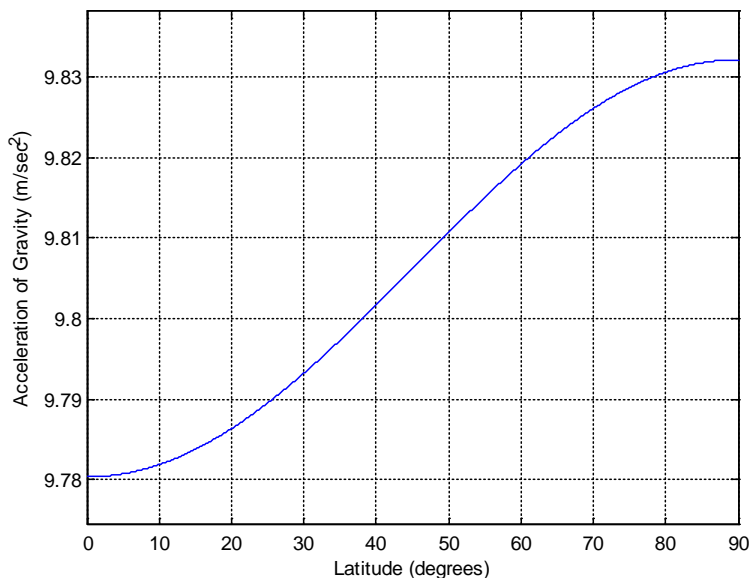
Ένα πλοίο, όπως είναι λογικό, πλέει πάντα στο **επίπεδο της θάλασσας**, οπότε το g που δέχεται είναι συνάρτηση μόνο του γεωγραφικού πλάτους. Οπότε η επιτάχυνση της βαρύτητας δίνεται από την παρακάτω σχέση WGS (World Geodetic System) 84 (4.5.2-1), που είναι συναρτήσει μόνο του γεωγραφικού πλάτους.

$$g(\varphi) = 9.7803253359 \cdot \left( \frac{1 + 0.001931185265241 \cdot \sin(\varphi)^2}{\sqrt{1 - 0.00669437999013 \cdot \sin(\varphi)^2}} \right) \quad 4.5.2-1$$

Όπου:

$\varphi$ : Το γεωγραφικό πλάτος [°]

Στην Εικόνα 12 φαίνεται η γραφική αναπαράσταση της εξίσωσης 4.5.2-1 και παρατηρείται ξεκάθαρα ότι στον ισημερινό το g γίνεται ελάχιστο, ενώ στους πόλους το μέγιστο.



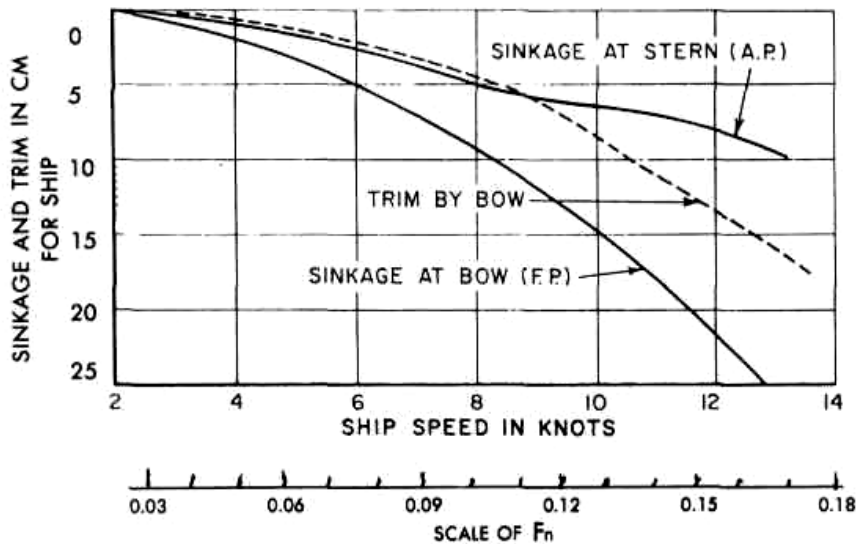
Εικόνα 12. Η επιτάχυνση της βαρύτητας συναρτήσει του γεωγραφικού πλάτους  $\varphi$

### 4.5.3 Βάθος της θάλασσας

Το βάθος της θάλασσας στην οποία πλέει ένα πλοίο παίζει κυρίαρχο παράγοντα στην αντίσταση ενός πλοίου. Το βάθος της θάλασσας, εκτός από την πυκνότητα του νερού που αναπτύχθηκε παραπάνω, επηρεάζει την αντίσταση με τρεις διαφορετικούς τρόπους.

- **Δυναμική ροή γύρω από τη γάστρα**

Αν το πλοίο πλέει σε ρηχά νερά απεριορίστου πλάτους, τότε το νερό που περνάει κάτω από το πλοίο επιταχύνεται περισσότερο απ' ότι στο βαθύ νερό, με αποτέλεσμα να μειώνεται περισσότερο η πίεση και άρα αυξημένη παράλληλη βύθιση και αλλαγή στη διαγωγή, λόγω αύξησης της πρυμναίας βύθισης και αύξηση εν τέλει της αντίστασης. Όποτε σε ρηχά νερά η βύθιση και η διαγωγή θέτουν ένα άνω όριο πλεύσης σε ρηχά νερά. (1) Η αύξηση της βύθισης και της διαγωγής φαίνεται στην Εικόνα 13.



Εικόνα 13. Αλλαγές της βύθισης και της διαγωγής σε ρηχά νερά για ένα δεξαμενόπλοιο τύπου T2 (16)

- **Επίδραση βάθους νερού στην αντίσταση κυματισμού**

Μια δεύτερη επίδραση είναι οι αλλαγές στη μορφή των κυματισμών και στην απολυόμενη ενέργεια του πλοίου που συμβαίνουν στο πέρασμα από βαθύ σε ρηχό νερό. Η αντίσταση γίνεται μέγιστη όταν:

$$V_s = \sqrt{gh} \quad 4.5.3-1$$

Όπου:

h: Το βάθος του νερού

Σε αυτή την ταχύτητα η αντίσταση είναι πολύ μεγαλύτερη απ' ό,τι στο βαθύ νερό, αλλά σε μια αρκετά μεγαλύτερη ταχύτητα γίνεται μικρότερη απ' ό,τι στο βαθύ νερό. Στις δοκιμές παραλαβής επίσης του πλοίου παίζει πολύ σημαντικό ρόλο αυτή η επίδραση του βάθους και μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένες εκτιμήσεις μεταξύ της απαιτούμενης ισχύος SHP και της ταχύτητας.

- **Διαφοροποίηση της διασποράς των κυματισμών**

Η εξίσωση διασποράς συνδέει το μήκος κύματος με την περίοδο του και το βάθος του νερού. Είναι η σχέση:

$$\omega^2 = gk \tanh(kh) \quad 4.5.3-2$$

Όπου:

$\omega$ : Η κυκλική συχνότητα του κύματος,

$k$ : Ο κυματάριθμος

- Σε **βαθύ νερό** με  $\frac{h}{\lambda} \geq 0.5$ , όπου  $\lambda$ : το μήκος κύματος, η εξίσωση διασποράς εκφυλίζεται στην:

$$\omega^2 = gk \quad 4.5.3-3$$

- Σε **ρηχό νερό** με  $\frac{h}{\lambda} \leq 0.015$ , η εξίσωση διασποράς εκφυλίζεται στην:

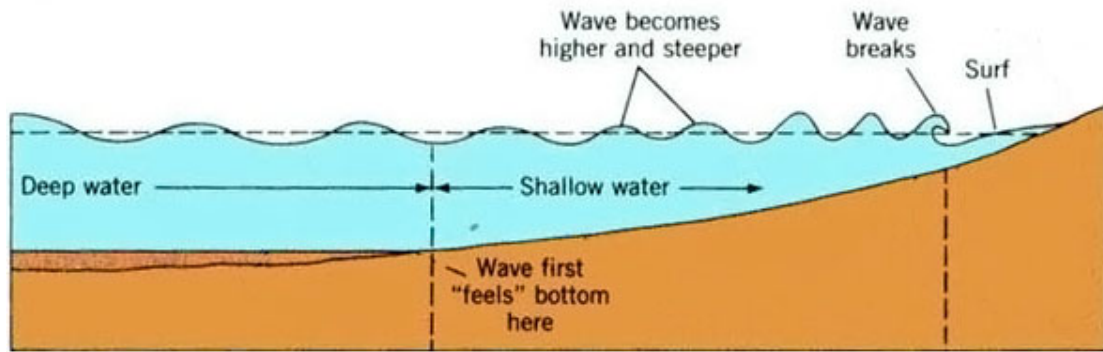
$$\omega^2 = ghk^2 \quad 4.5.3-4$$

- Σε **ενδιάμεσο νερό** με  $0.015 \leq \frac{h}{\lambda} \leq 0.5$ , η εξίσωση διασποράς είναι η (4.5.3-2)

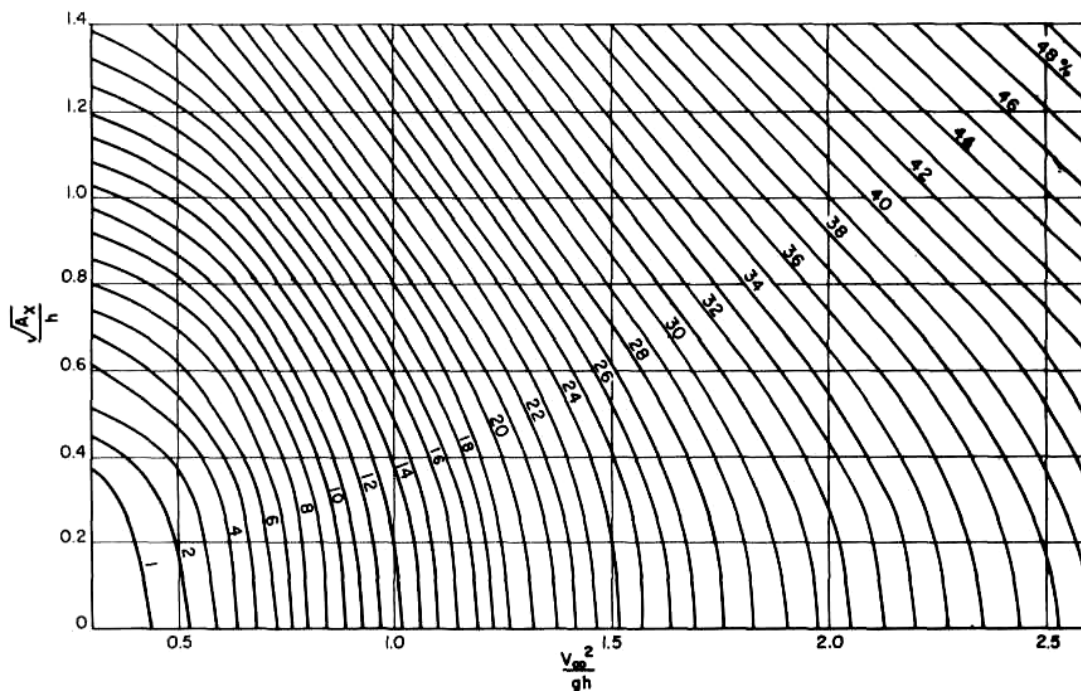
Μια γραφική αναπαράσταση της συμπεριφοράς των κυμάτων σε διαφορετικά βάθη φαίνεται και στην Εικόνα 14. Τα κύματα σε βαθύ νερό έχουν μεγαλύτερο μήκος κύματος και μικρότερο ύψος κύματος, ενώ πηγαίνοντας σε περιοχή ρηχού νερού τα κύματα γίνονται ψηλότερα και μικρότερα σε μήκος.

Στο Διάγραμμα 6 παρουσιάζεται η συνολική επίδραση του βάθους του νερού στη μείωση της ταχύτητας του πλοίου βάσει της μεθόδου Schlichting (17). Ο κατακόρυφος άξονας είναι ο λόγος της ρίζας της επιφάνειας της μέγιστης εγκάρσιας διατομής των υφάλων του πλοίου  $A_x$  προς το βάθος του νερού  $h$  και ο οριζόντιος άξονας η ταχύτητα του νερού στο τετράγωνο προς το γινόμενο  $g \cdot h$ . Οι αριθμοί στις καμπύλες απεικονίζουν την ποσοστιαία μείωση της ταχύτητας του πλοίου. Παρατηρείται λοιπόν, ότι η ποσοστιαία μείωση αυξάνεται από την μείωση του βάθους του νερού, από την αύξηση της ταχύτητας του νερού και από την αύξηση της επιφάνειας  $A_x$ .





Εικόνα 14. Σχηματική αναπαράσταση της συμπεριφοράς κυμάτων σε βαθύ και ρηχό νερό [Surf-forecast.com]



Διάγραμμα 6. Επίδραση του βάθους του νερού στην ποσοστιαία μείωση της ταχύτητας (1)

#### 4.5.4 Θαλάσσια Ρεύματα

Τα θαλάσσια ρεύματα επηρεάζουν τη ναυσιπλοΐα με διάφορους τρόπους. Κυρίως αυξομειώνουν τη ταχύτητα του πλοίου και δευτερευόντως προκαλούν έκπτωση του πλοίου, δηλαδή την απομάκρυνση από την επιθυμητή πορεία. Επίσης, μπορούν να προκαλέσουν δονήσεις στο σκάφος.

Όταν το πλοίο πλέει σε ευνοϊκό ρεύμα, δηλαδή όταν η πορεία (course) του πλοίου συμπίπτει με την κατεύθυνση του ρεύματος, η πραγματική ταχύτητα του πλοίου ως προς τη θάλασσα (speed over water) είναι μικρότερη από την ταχύτητα ως προς το έδαφος (speed over ground). Στην αντίθετη κατεύθυνση ρεύματος, η speed over water είναι σαφώς μεγαλύτερη.

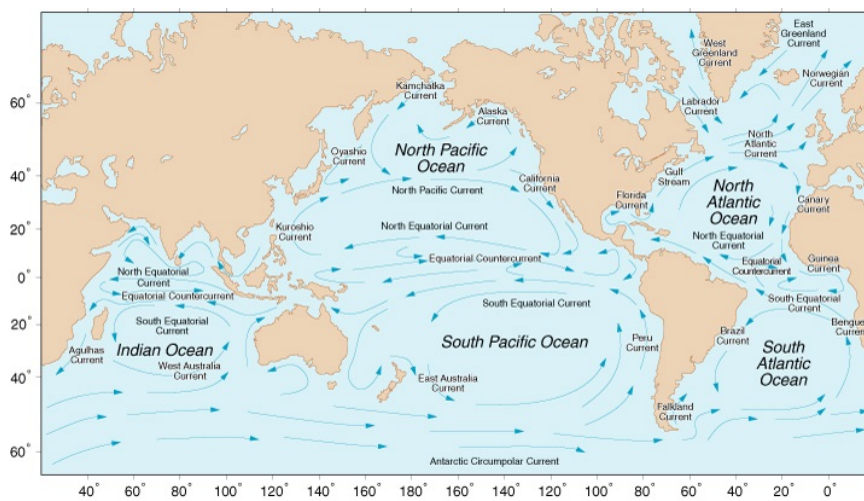


## Αντίσταση Πλοίου

Σε περίπτωση πλάγιων ρευμάτων το πλοίο υπόκειται σε έκπτωση, η οποία αυξάνει την απόσταση που πρέπει να καλυφθεί και τροποποιεί την περιοχή πιέσεων και τη δυναμική ροή γύρω από τη γάστρα. Για τον λόγο αυτό είναι σημαντικό στη χάραξη της πορείας ενός ταξιδιού, να σχεδιάζεται ο πλους με τέτοιο τρόπο ώστε να πλέει το πλοίο σε όσο το δυνατόν ευμενή κατάσταση ρευμάτων.

Τα πλοία συνήθως λαμβάνουν πληροφορίες από ιδιωτικές υπηρεσίες όπως η Applied Weather Technology (AWT), η Ocean Routes κ.α. ή μέσω διαδικτύου ή δορυφορικού συστήματος.

Στην Εικόνα 15 παρουσιάζονται τα κύρια ωκεάνια ρεύματα και στην Εικόνα 16 τα κύρια ρεύματα που επικρατούν στη Μεσόγειο θάλασσα. Οι ταχύτητες των ρευμάτων που μπορεί να συναντήσει ένα πλοίο συνήθως φτάνουν μέχρι τους 2.5 κόμβους.



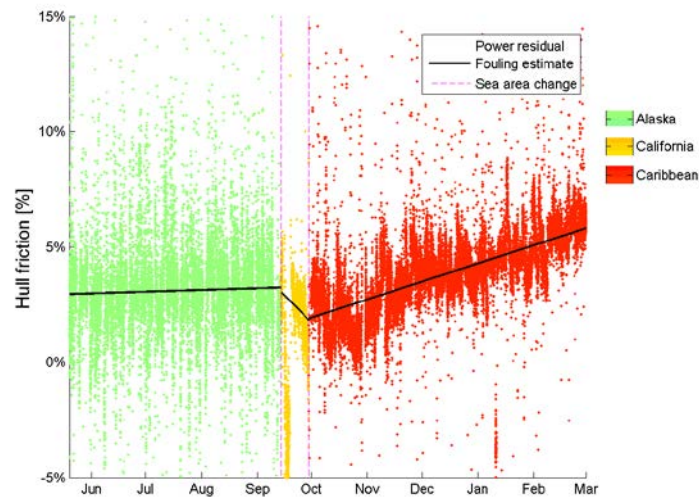
Εικόνα 15. Ωκεάνια Ρεύματα [oceanmotion.org]



Εικόνα 16. Κύρια ρεύματα της Μεσογείου Θάλασσας [nasa.gov]

#### 4.5.5 Ρύπανση της γάστρας

Ο ρυθμός της αύξησης της ρύπανσης της γάστρας διαφέρει αισθητά από τη μια περιοχή στην άλλη. Οι περιβαλλοντικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη ρύπανση της γάστρας είναι η θερμοκρασία και η αλατότητα του νερού, η τοποθεσία, η περίοδος του χρόνου και η ηλιοφάνεια. Αν και δεν έχει εξακριβωθεί ακόμα ακριβώς πως επιδρούν όλοι αυτοί οι παράγοντες μαζί, η επίδραση της αλλαγής της θάλασσας στη ρύπανση της γάστρας φαίνεται στην Εικόνα 17. Η ρύπανση επίσης μπορεί να μειώνεται για λίγο, όταν ένα πλοίο εισέρχεται σε διαφορετική περιοχή. Ο πιθανότερος λόγος για αυτό είναι, ότι οι οργανισμοί που ζουν σε ένα οικοσύστημα αρχίζουν να καταστρέφονται σε ένα ξένο περιβάλλον, επιτρέποντας ύστερα την ανάπτυξη των οργανισμών του νέου οικοσυστήματος. (18)



Εικόνα 17. Αύξηση της ρύπανσης σε διαφορετικές περιοχές θαλάσσης (18)

#### 4.5.6 Μετεωρολογικά δεδομένα

Όσον αφορά τα μετεωρολογικά δεδομένα προφανώς είναι **ανομοιόμορφα** σε όλα τα σημεία της Γης και αλλάζουν συνεχώς. Για τον ακριβή υπολογισμό της αντίστασης του πλοίου είναι απαραίτητη κυρίως η συλλογή των παρακάτω δεδομένων μετεωρολογίας:

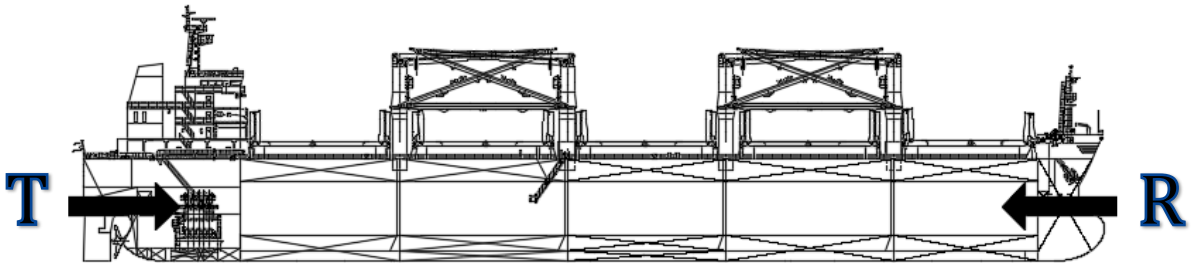
- Ένταση και διεύθυνση ανέμου
- Ταχύτητα και φορά θαλάσσιων ρευμάτων
- Ύψος και μήκος κύματος
- Θερμοκρασία, αλατότητα του νερού

## 5 Βασικές αρχές πρόωσης

### 5.1 Πρόωση με τη βοήθεια της έλικας- Εισαγωγή

Η **πρόωση** ενός μεγάλου εμπορικού πλοίου συνήθως πραγματοποιείται με τη βοήθεια έλικας. Η κίνηση της έλικας επίσης συνήθως πραγματοποιείται μέσω ενός ή περισσότερων κινητήρων Diesel, με ή χωρίς ενδιάμεσο μειωτήρα στροφών της μηχανής. Η απαίτηση ισχύος από τον κινητήρα εξαρτάται από την ταχύτητα του πλοίου, τη μορφή της γάστρας και τα χαρακτηριστικά της έλικας.

Για να περιστραφεί η έλικα θα πρέπει να ασκηθεί **ροπή Q** από τον κινητήρα. Ως συνέπεια αυτού του γεγονότος, η έλικα αναπτύσσει **ώση T**. Για να κινηθεί ένα πλοίο με σταθερή ταχύτητα, η ώση T θα πρέπει να **υπερκαλύπτει την αντίσταση R**, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 18.



Εικόνα 18. Σχηματική παράσταση ώσης και αντίστασης

Γενικότερα στα πλοία τύπου container, bulk carrier και tanker, εγκαθίστανται έλικες σταθερού βήματος (CPP) καθώς δεν απαιτούνται ιδιαίτερες ελικτικές ικανότητες. Για να συνδεθούν όμως τα μεγέθη της αντίστασης και της ώσης ή της ισχύος του κινητήρα θα πρέπει να γίνει ανάλυση των δεδομένων της πρόωσης.

### 5.2 Συντελεστής ποσοστού ομόρρου w

Η πραγματική ταχύτητα του νερού που βλέπει η έλικα είναι διαφορετική από τη ταχύτητα του πλοίου  $V_S$ . Το πλοίο επιβραδύνει (κυρίως λόγω της επίδρασης της τύρβης επί της ροής της γάστρας) τη ροή προς την έλικα και η έλικα πίσω από τη γάστρα λειτουργεί σε ένα πεδίο ομόρρου. Η πραγματική ταχύτητα είναι ίση με  $V_w = V_S - V_o$  και σε αδιάστατη μορφή εκφράζεται μέσω του συντελεστή ποσοστού ομόρρου w που δίνεται από τον Taylor ως:

$$w = 1 - \frac{V_o}{V_S} \quad 5.2-1$$

Όπου:

$V_o$ : Η μέση αξονική ταχύτητα που βλέπει η έλικα και

$V_w$ : Η πραγματική ταχύτητα του ομόρρου στην έλικα

Το ποσοστό ομόρρου για τα συνηθισμένα πλοία που αναφέρθηκαν παραπάνω κυμαίνεται στην περιοχή  $w$ : 0.20~0.4

### 5.3 Συντελεστής μείωσης ώσης $t$

Η αντίσταση ρυμούλκησης  $R_o$ , όπως έχει αναφερθεί στην παράγραφο 4.1, διαφέρει από την 'πραγματική' αντίσταση του πλοίου  $R$ , εξαιτίας της λειτουργίας της έλικας στην περιοχή της πρύμνης, η οποία μειώνει τις πιέσεις και τροποποιεί τις εφαπτομενικές τάσεις, με συνέπεια  $R > R_o$ .

Ο λόγος «ποσοστό μείωσης ώσης»  $t$  ορίζεται κατά τη σχέση:

$$1 - t = \frac{R_o}{R} = \frac{R_o}{T} \quad 5.3-1$$

Το ποσοστό μείωσης ώσης κυμαίνεται στην περιοχή  $t$ : 0.12~0.30.

### 5.4 Βαθμοί απόδοσης

#### 5.4.1 Βαθμός απόδοσης της γάστρας $\eta_H$

Ο βαθμός απόδοσης της γάστρας  $\eta_H$  ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος ρυμούλκησης  $EHP=R_oV$  και της ισχύος ώσης  $THP_o=TV_o$ . Οπότε:

$$\eta_H = \frac{EHP}{THP_o} = \frac{R_oV}{TV_o} = \frac{1-t}{1-w} \quad 5.4.1-1$$

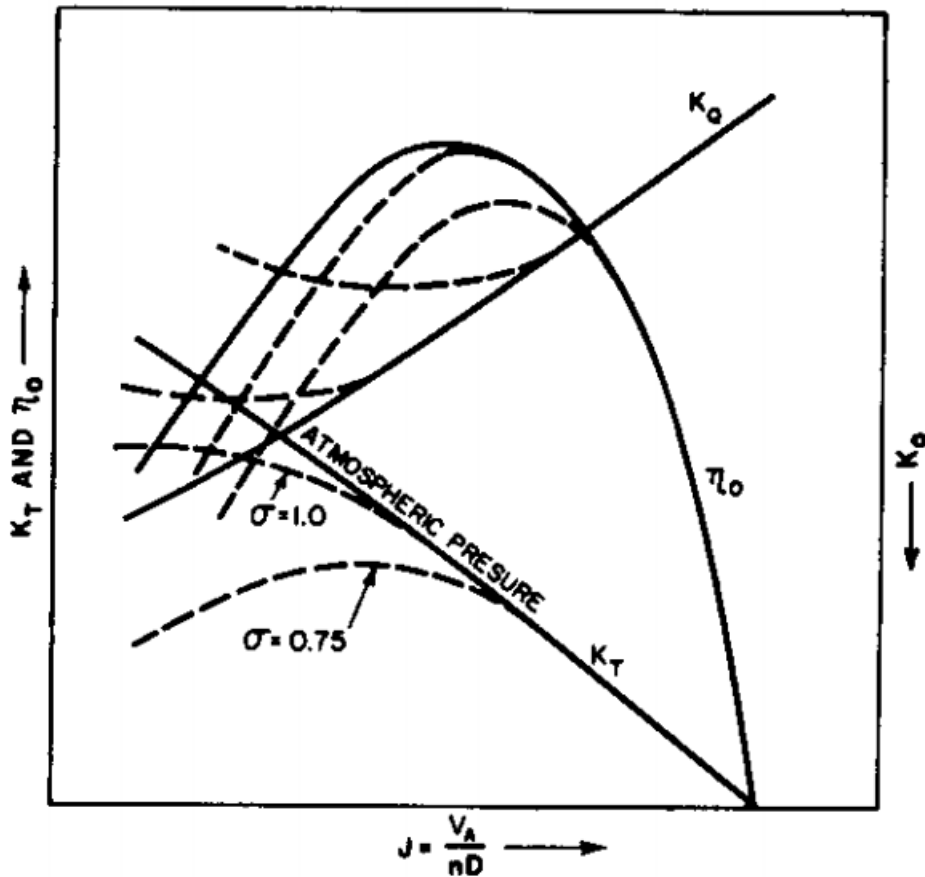
#### 5.4.2 Βαθμός απόδοσης της έλικας σε ελεύθερη ροή $\eta_o$

Ο βαθμός απόδοσης της έλικας σε ελεύθερη ροή  $\eta_o$  ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος ώσης της έλικας  $THP_o$  και της ισχύος της αντίστοιχης ροπής  $DHP_o=2\pi nQ_o$ , όπου  $Q_o$ : Η ροπή της έλικας σε ελεύθερη ροή. Άρα είναι:

$$\eta_o = \frac{THP_o}{DHP_o} = \frac{TV_o}{2\pi nQ_o} \quad 5.4.2-1$$

Ο βαθμός απόδοσης της έλικας σε ελεύθερη ροή μπορεί να κυμαίνεται στην περιοχή  $\eta_0$ : 0.60~0.75

Ο βαθμός απόδοσης της έλικας σε ελεύθερη ροή συνήθως δίνεται σε διαγράμματα όπως το παρακάτω στην Εικόνα 19. Η Εικόνα 19 δείχνει το βαθμό απόδοσης της έλικας συναρτήσει του συντελεστή προχώρησης της έλικας  $J = \frac{V_0}{nD}$ . Επίσης παρατηρείται ότι σε διαφορετικούς αριθμούς σπηλαιώσης  $\sigma$ , ο βαθμός απόδοσης της έλικας  $\eta_0$  αλλάζει ραγδαία με τη σπηλαιώση.



Εικόνα 19. Μεταβολή του  $\eta_0$  συναρτήσει του  $J$  για δεδομένη έλικα (1)

### 5.4.3 Βαθμός απόδοσης σχετικής περιστροφής $\eta_R$

Ο βαθμός απόδοσης σχετικής περιστροφής  $\eta_R$  ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος της ροπής της έλικας σε ελεύθερη ροή  $DHP_0$  ως προς την ισχύ της ροπής της έλικας σε πραγματική ροή ή αλλιώς αποδιδόμενη ισχύ πρόωσης  $DHP = 2\pi nQ$ , όπου:  $Q$  είναι η ροπή της έλικας σε πραγματική ροή. Οπότε:

$$\eta_R = \frac{DHP_0}{DHP} = \frac{2\pi nQ_0}{2\pi nQ} = \frac{Q_0}{Q} \quad 5.4.3-1$$

Η πραγματική ροή που πηγαίνει προς την έλικα πίσω από τη γάστρα δεν είναι ίδια με την ελεύθερη ροή, με συνέπεια ο βαθμός απόδοσης της έλικας να επηρεάζεται από το βαθμό απόδοσης της σχετικής περιστροφής. Σε πλοία με μία έλικα ο βαθμός απόδοσης σχετικής περιστροφής κυμαίνεται γύρω στο 1.0 με 1.07, που σημαίνει ότι η περιστροφή του νερού έχει ευεργετικά αποτελέσματα.

#### 5.4.4 Βαθμός απόδοσης άξονα η<sub>s</sub>

Το αξονικό σύστημα ενός πλοίου [Εικόνα 20] έχει απώλειες τριβείς στις εδράσεις και στο μειωτήρα αν υπάρχει. Συνεπώς η ισχύς του κινητήρα φτάνει **μειωμένη στην έλικα** και οι απώλειες αυτές χαρακτηρίζονται από το **βαθμό απόδοσης άξονα η<sub>s</sub>**. Ο συγκεκριμένος βαθμός απόδοσης ορίζεται ως ο λόγος της αποδιδόμενης ισχύς πρόωσης DHP με την ισχύ του κινητήρα  $SHP=2\pi n_{\text{engine}}Q_{\text{engine}}$ . Οπότε γράφεται:

$$\eta_s = \frac{DHP}{SHP} \quad 5.4.4-1$$

Στα σύγχρονα πλοία το η<sub>s</sub> κυμαίνεται γύρω στο 0.96 με 0.99.



Εικόνα 20. Αξονικό σύστημα πλοίου (3)

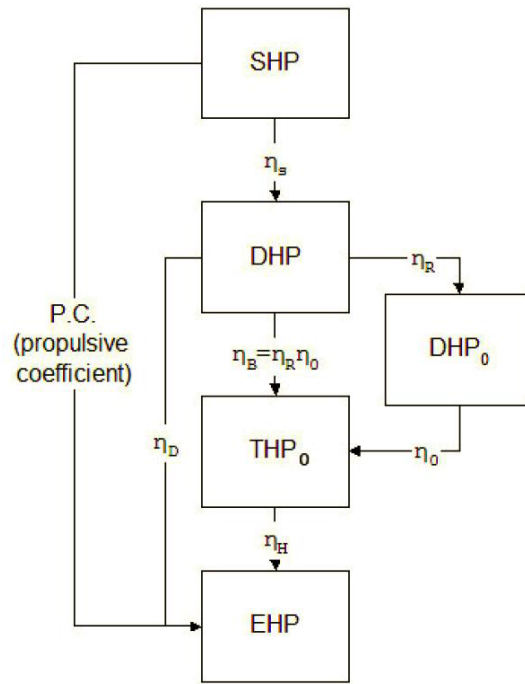
#### 5.4.5 Συνολικός βαθμός απόδοσης της προωστήριας εγκατάστασης P.C.(Propulsive Coefficient) ή η<sub>T</sub>

Ο συνολικός βαθμός απόδοσης της προωστήριας εγκατάστασης ορίζεται ως:

$$P.C. = \frac{EHP}{SHP} = \frac{EHP}{THP_0} \frac{THP_0}{DHP_0} \frac{DHP_0}{DHP} \frac{DHP}{SHP} = \eta_H \eta_O \eta_R \eta_s \quad 5.4.5-1$$

Αυτός ο λόγος, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 21, συνδέει την αντίσταση ενός πλοίου με την ισχύ του κινητήρα. Έχοντας γνωστό το P.C. και τη SHP, μπορεί να γίνει εκτίμηση της αντίστασης ή αντίστροφα υπολογίζοντας την αντίσταση και με γνωστό το P.C., εκτιμάται η απαιτούμενη ισχύς πρόωσης.

## Βασικές αρχές πρόωσης



Εικόνα 21. Ροή ενέργειας στο σύστημα πρόωσης του πλοίου (3)



## 6 Μέθοδοι εκτίμησης της αντίστασης και της πρόωσης

### 6.1 Εισαγωγή

Το πλήρες φαινόμενο της αντίστασης θα μπορούσε να αναλυθεί με την επίλυση των εξισώσεων **Navier-Stokes**, οι οποίες περιγράφουν τη ροή πραγματικού ρευστού. Η επίλυση όμως αυτών των εξισώσεων παρουσιάζει ακόμα **δυσκολίες** και πραγματοποιείται μόνο με **αριθμητικές μεθόδους**. Έτσι, παραδοσιακά η πρόβλεψη της αντίστασης γίνεται με απλούστερες μεθόδους, όπως με μεθόδους που στηρίζονται στην θεωρία δυναμικών (potential theory) για την αντίσταση κυματισμού, μέσω εμπειρικών μεθόδων για την αντίσταση λόγω συνεκτικότητας και την ολική αντίσταση, στην ανάλυση υπαρκτών δεδομένων αντίστασης και τέλος, μέσω πειραμάτων σε δεξαμενή με υπό κλίμακα μοντέλα και κατόπιν παρεκβολή με μεθόδους τύπου Froude για την εκτίμηση της αντίστασης σε φυσική κλίμακα. Αντίστοιχα και η πρόωση μελετάται μέσω παρόμοιων μεθόδων.

### 6.2 Εμπειρικές μέθοδοι

#### 6.2.1 Εκτίμηση της αντίστασης

Στα προκαταρκτικά στάδια της μελέτης, η αντίσταση του πλοίου υπολογίζεται με προσεγγιστικές μεθόδους που βασίζονται σε συστηματικές σειρές πλοίων ή σε παλινδρομική ανάλυση των υπαρκτών δεδομένων αντίστασης.

Μια **συστηματική σειρά** είναι μια κατηγορία γαστρών πλοίου που λαμβάνεται μέσω παραμετρικών αλλαγών ενός ή παραπάνω παραμέτρων μορφής της γάστρας. Η αντίσταση όλων των μοντέλων που αποτελούν μια σειρά έχει υπολογιστεί πειραματικά. Χρησιμοποιώντας μια **βάση δεδομένων**, είναι δυνατό να εκτιμηθεί η αντίσταση για άλλες γάστρες μέσω παραμετρικών συντελεστών.

Οι εμπειρικές μέθοδοι, συνεπώς, θα πρέπει να επιλέγονται **με βάση το πλοίο** που μελετάται. Για κάθε τύπο και μέγεθος πλοίου υπάρχει διαφορετική μέθοδος που είναι κατάλληλη. Φυσικά θα πρέπει να χρησιμοποιούνται παραπάνω από μια μέθοδοι και έπειτα να επιλέγεται η ακριβέστερη.

Εκτός όμως από το προκαταρκτικό στάδιο της μελέτης, οι εμπειρικές μέθοδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν και αργότερα, καθώς είναι εύκολοι στην εφαρμογή και μπορεί να γίνει ταχύς υπολογισμός της αντίστασης σε διάφορες καταστάσεις, όπως σε διαφορετική διαγωγή και βύθισμα.

Στην Εικόνα 22 είναι ένα τυπικό διάγραμμα σειράς αντίστασης για το συντελεστή υπόλοιπης αντίστασης συναρτήσεως του αριθμού Froude και του πρισματικού συντελεστή  $C_p = \frac{L}{v^3}$ . Οι πιο γνωστές σειρές αντίστασης είναι:



## Μέθοδοι εκτίμησης της αντίστασης και της πρόωσης

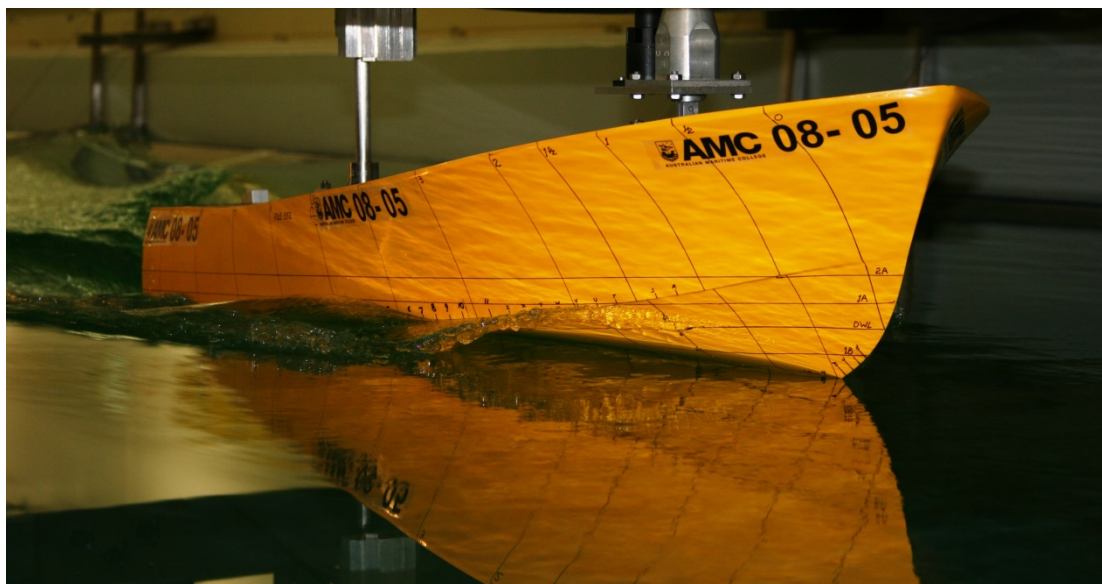
- Σειρά Taylor  
Αναπτύχθηκε από το Ναύαρχο Taylor το 1930 και είναι βασισμένη σε ένα Βρετανικό κρουαζιερόπλοιο με πρύμνη καταδρομικού κατάλληλο για δύο έλικες.
- Σειρά 60  
Δημοφιλής σειρά που αναπτύχθηκε από την SNAME και είναι βασισμένη σε μονέλικο εμπορικό πλοίο. Η συγκεκριμένη μέθοδος αν και έχει περιοχή μεταβολής των αδιάστατων γεωμετρικών παραμέτρων μικρότερη συγκριτικά με τη σειρά Taylor, υπολογίζει τα  $\eta_H, \tau, w$  και  $\eta_R$ , που αποτελούν χαρακτηριστικά της πρόωσης.
- Σειρά BSRA  
Βασίζεται σε μονέλικες γάστρες εμπορικού τύπου και αναπτύχθηκε από την BSRA το 1960. Όπως και η σειρά 60, παρέχονται πληροφορίες για την πρόωση εκτός από το  $\eta_H$ .
- Σειρά SSPA  
Αναπτύχθηκε το 1950 και περιλαμβάνει πληροφορίες για διπλέλικα φορτηγά υψηλής ταχύτητας, γρήγορα μονέλικα φορτηγά και δεξαμενόπλοια.
- Σειρά Formdata  
Είναι διάσημη σειρά, που αναπτύχθηκε το 1970 στη Δανία. Συνδυάζει όλες οι προηγούμενες σειρές και θεωρείται αρκετά αξιόπιστη.
- Σειρά Holtrop  
Η συγκεκριμένη σειρά αναπτύχθηκε το 1978 και έκτοτε έχουν βγει αρκετές βελτιωμένες εκδόσεις. Αποτελεί μια συλλογή από μια ευρεία γκάμα πλοίων και θεωρείται ευρέως ως μια ολοκληρωμένη και αξιόπιστη μέθοδος.
- Σειρά Marad  
Αναπτύχθηκε το 1971 στις ΗΠΑ και αφορά μεγάλα εμπορικά πλοία. Η σειρά παρέχει δεδομένα τόσο για την αντίσταση, όσο και για την πρόωση και θεωρείται αρκετά αξιόπιστη.



Συνήθως, τα πειράματα με μοντέλο γίνονται με **ισότητα των αριθμών Froude**

$$\frac{V_{model}}{V_{ship}} = \sqrt{\frac{L_{ship}}{L_{model}}}$$

Με τη βοήθεια του δυναμόμετρου μετράται η ολική αντίσταση του μοντέλου  $(R_T)_m$  και μετά με την εφαρμογή της θεωρίας της εκάστοτε μεθόδου εκτιμάται η ολική αντίσταση του πλοίου. Τα μοντέλα επίσης επειδή δεν έχουν τραχύτητα, χρησιμοποιούνται διεγέρτες τύρβης για την κατά το δυνατόν μεγαλύτερη αξιοπιστία. Στην Εικόνα 23 φαίνεται μοντέλου εμπορικού πλοίου σε δεξαμενή δοκιμών μαζί με το δυναμόμετρο που μετράει την αντίσταση.

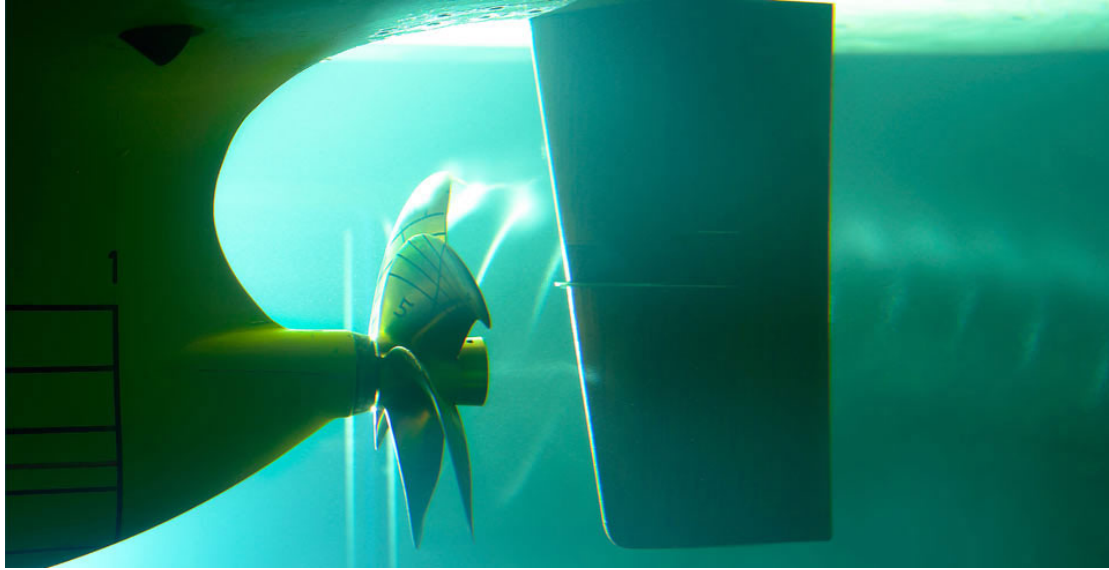


Εικόνα 23. Πείραμα αντίστασης μοντέλου πλοίου σε δεξαμενή (AMC Towing Tank)

### 6.3.2 Εκτίμηση της πρόωσης

Για την εκτίμηση της πρόωσης ενός πλοίου πραγματοποιείται το **πείραμα αυτοπρόωσης**. Στο πείραμα αυτοπρόωσης πάλι χρησιμοποιείται το μοντέλο με κλίμακα  $\lambda = \frac{L_{ship}}{L_{model}}$  και τα πειράματα γίνονται σε ταχύτητα μοντέλου με ισότητα Froude. Μετρώντας τη δύναμη αντίστασης, την ώση και τη ροπή της έλικας συναρτήσει των στροφών της έλικας, είναι δυνατόν να υπολογιστούν οι στροφές, η ώση και η ροπή της έλικας του πλοίου. [Εικόνα 24]

Λαμβάνοντας υπόψη τη συμπεριφορά της έλικας σε ελεύθερη ροή και την έλικα σε κατάσταση αυτοπρόωσης, γίνεται αποσύζευξη του προβλήματος αυτοπρόωσης και εκτιμώνται τα χαρακτηριστικά της πρόωσης.

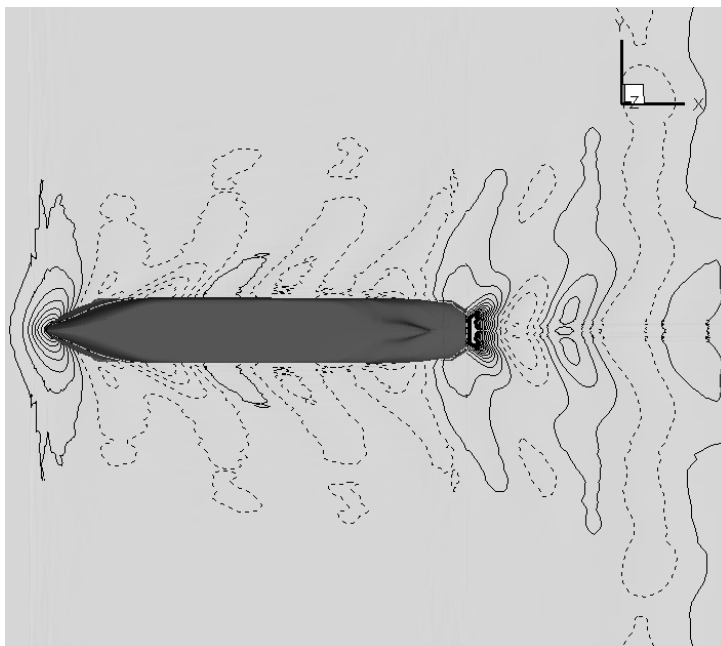


Εικόνα 24. Έλικα υπό κλίμακα προσαρμοσμένη σε μοντέλο πλοίου για τις ανάγκες του πειραμάτος αυτοπρόωσης (HSVA, 2014)

#### 6.4 Υπολογιστική υδροδυναμική – CFD

Η υπολογιστική υδροδυναμική είναι μια μέθοδος αριθμητικής επίλυσης των εξισώσεων Navier-Stokes σε συνδυασμό με τις εξισώσεις διατήρησης μάζας και ενέργειας. Για να λάβει χώρα μία μέτρηση CFD σήμερα θα πρέπει να υπάρχει γρήγορος υπολογιστής, καθώς οι αριθμητικοί υπολογισμοί απαιτούν μεγάλη ταχύτητα επεξεργασίας. Τα CFD βοηθάνε στη βελτιστοποίηση της μορφής της γάστρας και μπορούν να υποκαθιστούν πολλές φορές τα πειράματα αντίστασης και αυτοπρόωσης σε δεξαμενή.

Για να επιλυθεί ένα πρόβλημα με CFD, καταρχάς διαχωρίζεται ο χώρος σε πλέγμα κελιών όπου διακριτοποιούνται οι εξισώσεις που αναλύουν το φαινόμενο. Έτσι οι εξισώσεις μετατρέπονται σε αλγεβρικές εξισώσεις που είναι δυνατόν να επιλυθούν.



Εικόνα 25. Αναπαράσταση CFD (19)

Οι κύριες τεχνικές που χρησιμοποιούνται είναι οι:

- Direct Numerical Simulation (DNS)  
Η τεχνική αυτή επειδή επιλύει όλο το φάσμα από τις κλίμακες ταραχώδους μήκους, περιθωριοποιεί την επίδραση των μοντέλων και είναι ιδιαίτερα δαπανηρή. Επίσης δεν μπορεί να επιλύσει πολύπλοκες ροές.
- Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS)  
Η μέθοδος RANS είναι η πρώτη προσέγγιση που είχε γίνει για την προσέγγιση της τυρβώδους ροής. Απαιτεί τη μικρότερη υπολογιστική ισχύ, ενώ ο στόχος των μοντέλων τύρβης είναι να υπολογιστούν οι τάσεις Reynolds.
- Large Eddy Simulation (LES)  
Η μέθοδος LES εμπεριέχει μια τεχνική που αφαιρούνται οι μικρότερες κλίμακες ροής μέσω φίλτρου και η επίδραση τους υπολογίζεται σε sub-grid κλίμακα. Αυτό βοηθάει στις μεγαλύτερες και σημαντικότερες κλίμακες της αναταραχής να επιλυθούν, μειώνοντας σημαντικά και την υπολογιστική ισχύ. Με αυτή τη τεχνική η LES απαιτεί λιγότερη υπολογιστική ισχύ από τη DNS, αλλά περισσότερη από τη RANS.



## 7 Case Study-Ανάλυση της SHP

### 7.1 Ανάλυση του προβλήματος

Ο στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας, όπως έχει αναφερθεί, είναι να αναλύσει την ισχύ πρόωσης ενός VLCC πλοίου, έχοντας ως βάση κυρίως τα **noon reports**. Μετέπειτα, μέσω της ανάλυσης της SHP θα εξεταστεί η λειτουργία και η συμπεριφορά του πλοίου σε διάφορες καταστάσεις υπηρεσίας.

### 7.2 Εξεταζόμενο πλοίο

Το πλοίο που εξετάζεται είναι ένα δεξαμενόπλοιο VLCC της εταιρείας Maran Tankers Management Inc.. Το υπό εξέταση πλοίο είχε κατασκευαστεί στην Κορέα στα ναυπηγεία της Daewoo το 2007. Το κόστος του πλοίου κατά την παραγγελία ήταν γύρω στα 90 εκατ. \$. Παρακάτω παρουσιάζονται οι κύριες διαστάσεις του πλοίου, της έλικας και της κύριας μηχανής.



Εικόνα 26. Όμοιο πλοίο με το υπό εξέταση

Πίνακας 1. Κύρια χαρακτηριστικά του πλοίου

Κύριες Διαστάσεις Πλοίου		
$L_{OA}$	333.0	[m]
$L_{BP}$	320.0	[m]
B	60.0	[m]
D	30.5	[m]
$T_D$	21.0	[m]
$DWT_D$	292,223.7	[t]
$T_S$	22.56	[m]
$DWT_S$	320,475.5	[t]
LS	44,434.3	[t]
Gross Tonnage	15,8070	
Net Tonnage	10,8339	

Πίνακας 2. Κύρια χαρακτηριστικά της έλικας

Τύπος έλικας	CPP	
z	4	
D	9.9	[m]
P	7.225	[m]
P/D	0.7298	
$A_E/A_0$	0.5332	

Πίνακας 3. Χαρακτηριστικά της προωστήριας εγκατάστασης

Main Engine- B&W 6S90MC-C		
MCR	43,020	[PS]
$RPM_{MCR}$	78.0	[RPM]
NCR	38,720	[PS]
$RPM_{NCR}$	75.3	[RPM]
$V_{S,NCR}$	16.5	knots
$R_{NCR}$	25,500	nm

Τα πλοία τύπου VLCC έχουν τη δυνατότητα να περνούν από τη διώρυγα του Σουέζ και κατά συνέπεια χρησιμοποιούνται κατά κόρον στη βόρεια θάλασσα, στη Μεσόγειο και στον Ινδικό Ωκεανό. Επίσης τα πλοία αυτά έχουν μεγάλο ενδιαφέρον για την Ελλάδα, καθώς το **30% των VLCC** σε όλο τον κόσμο είναι **ελληνόκτητα**.

Όλα τα δεξαμενόπλοια που χτίζονται πια είναι διπλού τοιχώματος, το οποίο είναι απαιτούμενο από τη Marpol 73/78 Annex I Regulation 13F. Επίσης τα VLCC είναι τα μεγαλύτερα δεξαμενόπλοια που παραγγέλλονται πλέον, καθώς τα ULCC παρουσίαζαν πολλά προβλήματα. Εξαιτίας του μεγέθους των VLCC, το **κόστος μεταφερόμενου φορτίου ανά τόνο είναι φθηνότερο** απ' ό,τι τα μικρότερα σε μέγεθος δεξαμενόπλοια.

Το υπό εξέταση πλοίο εξετάζεται ως προς την αποδοτικότητά του για τις χρονιές 2014 και 2015, καθώς από το 2014 ήταν ακριβέστερα τα στοιχεία. Οι διαδρομές του πλοίου είναι σχεδόν σε όλο τον κόσμο και κυρίως πλέει στην Κίνα, στον

Ινδικό Ωκεανό, στην Αραβική θάλασσα, στη Μεσόγειο, στον Ατλαντικό Ωκεανό και τέλος στον κόλπο του Μεξικού.

Το πλοίο όταν είναι σε **πλήρη φόρτωση (full load condition)** πλέει γύρω στα **21 μέτρα βύθισμα**, ενώ σε **κατάσταση ερματισμού (ballast condition)** πλέει γύρω στα **10 μέτρα βύθισμα**. Η κατανάλωση καυσίμου της κύριας μηχανής, όταν το πλοίο πλέει σε ταχύτητα 12 κόμβων, σε πλήρη φόρτωση είναι γύρω στα 250 kg/nm, ενώ στη κατάσταση ερματισμού είναι γύρω στα 130 kg/nm.

### 7.3 Διαθέσιμα Δεδομένα

Τα δεδομένα που χρειάστηκαν για την ανάλυση του προβλήματος τα προήλθαν από την Maran Tankers Management Inc. και είναι τα παρακάτω:

#### 7.3.1 Noon reports

Τα **noon reports** είναι μια αναφορά για την κατάσταση του πλοίου που καταγράφεται καθημερινά σε φύλλο δεδομένων. Τα δεδομένα παραδοσιακά καταγράφονταν χειροκίνητα για την κατάσταση του πλοίου στις **12 το μεσημέρι** και κάθε φορά που το πλοίο **εισέπλεε και απέπλεε** από τα λιμάνια, και στέλνονταν έπειτα στη διαχειρίστρια εταιρεία. Στο υπό εξέταση πλοίο όμως η καταγραφή των δεδομένων γίνεται με μετρητές που έχει η εταιρεία, χωρίς την ανθρώπινη παρέμβαση.

Στο υπό εξέταση πλοίο τα noon reports περιέχουν τα παρακάτω στοιχεία:

- Ημερομηνία και ώρα καταγραφής
- Θέση του πλοίου, που λαμβάνεται μέσω GPS σε μορφή συντεταγμένων
- Απόσταση που καλύφθηκε από την προηγούμενη καταχώρηση
- Βύθισμα στο LCF
- Μέσες στροφές του άξονα - RPM
- Κατεύθυνση σε μίρες
- Κατεύθυνση και ένταση ανέμου σε Beaufort από ανεμολογικά δεδομένα
- Κατεύθυνση και ταχύτητα του νερού στη θάλασσα από μετεωρολογικά δεδομένα
- Ισχύς στον άξονα - SHP
- Μέση κατανάλωση καυσίμου ανά ημέρα

Από τα παραπάνω δεδομένα εξάγονται και τα παρακάτω με άμεσο τρόπο και καταγράφονται επίσης στα noon reports:

- Ταχύτητα επιφανείας (Speed over ground)
- Μέση ταχύτητα ταξιδιού
- Μέση κατανάλωση καυσίμου ανά nm
- Φαινόμενος λόγος ολίσθησης (Apparent Slip rate) της έλικας. Ο τρόπος υπολογισμού του φαινομένου και του πραγματικού λόγου ολίσθησης αναφέρεται στο παράρτημα Α.



Τα δεδομένα πλην των μετεωρολογικών θεωρούνται ακριβή, καθώς καταγράφονται από μετρητές που έχουν μικρά περιθώρια σφάλματος. Η ισχύς στον άξονα, που είναι το πιο δύσκολο μετρήσιμο μέγεθος, μετράται με ροπόμετρο πάνω στον άξονα της μηχανής. Η μέση κατανάλωση καυσίμου μετράται με ροόμετρο (flowmeter).

Αντίθετα για τα **μετεωρολογικά δεδομένα** λαμβάνονται τιμές για την κατάσταση που επικρατεί κατά τη διάρκεια της μέτρησης και εκεί βρίσκεται και η **μεγαλύτερη περιοχή σφαλμάτων** που μπορεί να παρουσιαστούν. Με δεδομένο ότι το πλοίο κατά τη διάρκεια της μέρας μπορεί να έχει συναντήσει δυσμενέστερες ή ευνοϊκότερες καταστάσεις καιρού, δεν μπορεί να ληφθεί υπόψη η αυξομείωση του καιρού και θεωρούνται σωστές τιμές καιρού αυτές που δεν αλλάζουν ραγδαία από τη μία μέρα στην άλλη, οπότε συμπεραίνεται ότι η κατάσταση είναι περίπου ίδια με αυτή τη στιγμή της μέτρησης. Τέλος, οι εκτιμήσεις για την κατάσταση της θάλασσας είναι ποιοτικές και έχουν μεγάλο εύρος αβεβαιότητας ως προς τα χαρακτηριστικά (ύψος και περίοδος/μήκος) των επικρατούντων κυματισμών, που είναι γενικά ανεμογενείς, ακανόνιστοι κυματισμοί.

### 7.3.2 Report of Sea Trials

Τα αποτελέσματα των δοκιμών παραλαβής (sea trials) θεωρούνται **αξιόπιστα** και λαμβάνονται ως **σημείο αναφοράς** για τα δεδομένα κατά τη διαχείριση του πλοίου. Από την αναφορά των δοκιμών παραλαβής, παραλαμβάνονται ακριβείς μετρήσεις για την ισχύ πρόωσης συναρτήσει των στροφών της έλικας και της ταχύτητας σε δεδομένη φόρτωση.

### 7.3.3 Σχέδιο Γραμμών (Lines Plan)

Το σχέδιο γραμμών ενός πλοίου συνήθως είναι **απόρρητο** (του ναυπηγείου κατασκευής) και ακόμα και οι πλοιοκτήτριες εταιρείες δεν τα έχουν στην κατοχή τους. Το σχέδιο γραμμών ενός πλοίου είναι όμως το πιο χρήσιμο εργαλείο/βασική πληροφορία για την εκτίμηση της αντίστασης, καθώς μέσω αυτού μπορούν να προκύψουν με **ακρίβεια όλα τα βασικά δεδομένα** της γάστρας του πλοίου. Επίσης, για τη χρήση των CFD είναι απαραίτητη η ύπαρξη γραμμών του πλοίου, όπως επίσης και σε διάφορα άλλα ναυπηγικά προγράμματα εκτίμησης της αντίστασης και της ισχύος πρόωσης του πλοίου.

### 7.3.4 General Arrangement (GA) και Trim & Stability Booklet

Έχοντας το GA και το Trim & Stability Booklet του πλοίου μπορούν να γίνουν διάφοροι υπολογισμοί για το πλοίο.

Με βάση το GA εκτιμάται η επιφάνεια εξάλων, η θέση της έλικας και να αποκτήσει μια γενική εικόνα για το υπό εξέταση πλοίο. Με βάση το Trim & Stability Booklet γίνονται υπολογισμοί όσον αφορά τα υδροστατικά μεγέθη του πλοίου και σε περίπτωση διαθεσιμότητας των γραμμών πλοίου γίνεται να επαληθευτούν τα αποτελέσματα μέσω της ανάλυσης των γραμμών.

### 7.3.5 Ημερομηνίες καθαρισμού της γάστρας και της έλικας

Στην εξεταζόμενη χρονική περίοδο έχουν γίνει τρεις καθαρισμοί γάστρας και έλικας. Η πρώτη ήταν στις 01/09/2014 στη Σιγκαπούρη, η δεύτερη στις 19/03/2015 στη Φουτζέιρα των Ηνωμένων Αραβικών Εμιράτων και η τελευταία στις 13/11/2015 στους Αγίους Θεόδωρους του Νομού Κορινθίας στην Ελλάδα.

### 7.4 Αποκλεισμός Σημείων

Για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων κρίθηκε απαραίτητο να φιλτραριστούν τα δεδομένα. Οι μετρήσεις που αποκλείστηκαν είναι οι εξής:

- Σε μέρα που το πλοίο προσέγγιζε ή έφευγε από λιμάνι ή τη στεριά, γιατί δεν γίνεται με τα διαθέσιμα δεδομένα να εκτιμηθεί η επίδραση της πηδαλιουχίας του πλοίου και των μεταβατικών φαινομένων.
- Για τον ίδιο λόγο, όταν το πλοίο διένυε σε μία μέρα λιγότερα από **100 ναυτικά μίλια (nm)**, εκτιμάται ότι εμπεριέχονται τα δύο φαινόμενα που αναφέρθηκαν παραπάνω, λόγω της μικρής απόστασης. Χαρακτηριστικά, όταν το πλοίο πλέει με  $V_S=12$  kn, σε μία μέρα διανύει 288 nm.
- Όταν οι μετρήσεις των δεδομένων παρουσίαζαν **ελλείψεις** ή ήταν **λανθασμένες**.
- Όταν έπνεαν άνεμοι με ένταση μεγαλύτερη ή ίση των **8 Beaufort**, επειδή σε αυτές τις καταστάσεις, πρώτον, η οποιαδήποτε μεταβολή της γωνίας του ανέμου επηρεάζει σημαντικά την αντίσταση και δεύτερα συμβαίνουν κι εδώ μεταβατικά φαινόμενα και φαινόμενα πηδαλιουχίας.
- Όταν η **σταθερά της έλικας** ήταν μεγαλύτερη του **30% της μέσης τιμής της σταθεράς**, επειδή σημαίνει ότι είτε οι στροφές του άξονα είτε η ισχύς του άξονα δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα.

## 7.5 Μεθοδολογία Υπολογισμών

Οι υπολογισμοί αρχικά αφορούσαν την επεξεργασία των δεδομένων, έπειτα τον υπολογισμό της αντίστασης και της ισχύος πρόωσης και τέλος την ανάλυση των δεδομένων.

### 7.5.1 Μη υπολογίσιμα μεγέθη

- **Βάθος του νερού**

Ο υπολογισμός του **βάθους** του νερού κατέστη **ανέφικτος** εξαιτίας της έλλειψης δεδομένων για το βάθος του νερού στους ωκεανούς στο διαδίκτυο.

Η επίδραση του βάθους του νερού στη δυναμική ροή γύρω από τη γάστρα, θεωρείται ότι δεν επηρεάζει ιδιαίτερα καθώς λόγω του πρώτου και του δεύτερου κριτηρίου φιλτραρίσματος των σημείων, που αναλύθηκαν παραπάνω, θεωρείται ότι οι μετρήσεις γίνονται για πλεύσεις σε ανοικτή θάλασσα, όπου ένα βάθος νερού μεγαλύτερο από 100m, σύμφωνα με το Διάγραμμα 6 του κεφαλαίου 4.5.3, μειώνει λιγότερο από 1% την ταχύτητα του πλοίου.

- **Χαρακτηριστικά κύματος συναρτήσει του βάθους του νερού, χρόνου και απόστασης επενέργειας του ανέμου στους κυματισμούς**

Τα στοιχεία που ήταν διαθέσιμα για τον άνεμο ήταν μόνο η ένταση και η κατεύθυνση του. Συνεπώς δεν μπορούσε να υπολογιστεί η επίδραση του χρόνου και της απόστασης επενέργειας του ανέμου στους κυματισμούς (fetch length).

### 7.5.2 Υπολογισμός δεδομένων βάσει της γεωγραφικής θέσης του πλοίου και της ημερομηνίας

Η **επιτάχυνση της βαρύτητας (g)** στην επιφάνεια της θάλασσας, όπως έχει ήδη αναφερθεί, αλλάζει με τη μεταβολή του γεωγραφικού πλάτους. Έτσι, σύμφωνα με την εξίσωση 4.5.2-1 υπολογίζεται η μεταβολή της επιτάχυνσης της βαρύτητας.

Στη συνέχεια υπολογίζεται η **επιφανειακή θερμοκρασία** της θάλασσας λαμβάνοντας δεδομένα από διεθνείς υπηρεσίες μέσω της ιστοσελίδας [seatemperature.org]. Τα δεδομένα είναι οι μέσες θερμοκρασίες των μηνών για διάφορες τοποθεσίες που περνάει το πλοίο.

Καταρχάς, γνωρίζοντας τη γεωγραφική θέση του πλοίου υπολογίζεται η απόσταση από τα σημεία που είναι γνωστές οι θερμοκρασίες σύμφωνα με την Haversine εξίσωση (20) ως:

$$d = 2r \operatorname{asin} \left( \sqrt{\sin^2 \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2} + \cos(\varphi_1) \cos(\varphi_2) \sin^2 \left( \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2} \right)} \right) \quad 7.5.2-1$$

**Όπου:**

$\varphi_1, \varphi_2$ : Τα γεωγραφικά πλάτη των δύο σημείων

$\lambda_1, \lambda_2$ : Τα γεωγραφικά μήκη των δύο σημείων

Κατόπιν, έχοντας υπολογίσει την **απόσταση της θέσης** του πλοίου από όλα τα σημεία, για τα οποία είναι γνωστές οι θερμοκρασίες, βρίσκονται τα δύο πιο κοντινά σημεία. Έχοντας γνωστά τα κοντινότερα σημεία, υπολογίζεται η **θερμοκρασία** ως εξής:

$$T = T_1 * \frac{d_{All} - d_1}{d_{All}} + T_2 * \frac{d_{All} - d_2}{d_{All}} \quad 7.5.2-2$$

**Όπου:**

$T_1, T_2$  : Οι θερμοκρασίες των δύο πλησιέστερων σημείων

$d_1, d_2$ : Οι αποστάσεις των δυο πλησιέστερων σημείων

$d_{All}$ :  $d_1 + d_2$

Οι θερμοκρασίες των δυο πλησιέστερων σημείων υπολογίζονται ως εξής:

$$T_{1,2} = T_b * \frac{(d - (15 - x))}{d} + T_a * \frac{15 - x}{d} \quad 7.5.2-3$$

**Όπου:**

$T_b$ : Η θερμοκρασία στο μήνα πλεύσης

$T_a$ : Η θερμοκρασία στον αμέσως πλησιέστερο μήνα

$d$ : Οι μέρες που χωρίζουν τη 15<sup>η</sup> του μηνός των δύο μηνών

$x$ : Η μέρα πλεύσης

Κατά συνέπεια αν ένα πλοίο πλέει τη 13<sup>η</sup> Απριλίου τότε ο υπολογισμός της θερμοκρασίας θα γίνει ως εξής:

$$\begin{aligned} T_{1,2} &= T_{\text{Απριλίου}} * \frac{(31 - (15 - 13))}{31} + T_{\text{Μαρτίου}} * \frac{15 - 13}{31} \\ &= T_{\text{Απριλίου}} * \frac{29}{31} + T_{\text{Μαρτίου}} * \frac{2}{31} \end{aligned} \quad 7.5.2-4$$

## Case Study-Ανάλυση της SHP

Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε για να προσεγγιστεί κατά το δυνατόν περισσότερο η θερμοκρασία που πλέει το πλοίο με βάση στοιχεία των περασμένων ετών. Αντίστοιχα, για την **αλατότητα** του νερού χρησιμοποιήθηκε η ίδια μέθοδος.

Γνωρίζοντας λοιπόν την θερμοκρασία και την αλατότητα του νερού και σε συνδυασμό με την πίεση στην επιφάνεια της θάλασσας που θεωρείται ότι παραμένει σταθερή, μπορούν να υπολογιστούν όλα τα **θερμοδυναμικά μεγέθη** που αφορούν το νερό που πλέει το πλοίο βάση της εξίσωσης του El-Dessouky Ettoumy (2002) (15). Το βάθος του νερού δε λαμβάνεται υπόψη, καθώς όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 4.5.1, είναι πολύ δύσκολη η εκτίμηση της μεταβολής της πυκνότητας του νερού συναρτήσει του βάθους. Η εξίσωση προκύπτει ως:

$$\rho = (A_1F_1 + A_2F_2 + A_3F_3 + A_4F_4) * 10^3 \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad 7.5.2-5$$

**Όπου:**

$F_1=0.5$	$G_1=0.5$	$A_1=4.032219 \cdot G_1 + 0.115313 \cdot G_2 + 3.26 \cdot 10^{(-4)} \cdot G_3$
$F_2=A$	$G_2=B$	$A_2=-0.108199 \cdot G_1 + 1.571 \cdot 10^{(-3)} \cdot G_2 - 4.23 \cdot 10^{(-4)} \cdot G_3$
$F_3=2A^2-1$	$G_3=2B^2-1$	$A_3=-0.012247 \cdot G_1 + 1.74 \cdot 10^{(-3)} \cdot G_2 - 4.23 \cdot 10^{(-4)} \cdot G_3$
$F_4=4A^3$		$A_4=6.92 \cdot 10^{(-4)} \cdot G_1 - 8.7 \cdot 10^{(-5)} \cdot G_2 - 5.3 \cdot 10^{(-5)} \cdot G_3$

$$A=(2 \cdot T-200)/160, B=(2 \cdot \text{Sal}-150)/150 \quad 7.5.2-6$$

**Όπου:**

T: Η θερμοκρασία του νερού [°C]

Sal: Η αλατότητα του νερού [psu]

Αντίστοιχα υπολογίζεται η δυναμική συνεκτικότητα του νερού  $\mu$ , ως:

$$\mu = (1 + (1.474 * 10^{-3} + 1.5 * 10^{-5} * T - 3.927 * 10^{-8} * T^2) * \text{Sal} + (1.0734 * 10^{-5} - 8.5 * 10^{-8} * T + 2.23 * 10^{-10} * T^2) * \text{Sal}^2) * e^{-3.79418 + \frac{604.129}{139.18+T}} \text{ [Pa}\cdot\text{s]} \quad 7.5.2-7$$

Η κινηματική συνεκτικότητα  $\nu$  δίνεται ως:

$$\nu = \mu / \rho \cdot 10^3 \text{ [m}^2\text{/s]} \quad 7.5.2-8$$

Επίσης θα μπορούσαν να υπολογιστούν αντίστοιχα και οι αλλαγές στην πυκνότητα του αέρα, όμως με δεδομένο ότι η αντίσταση λόγω αέρα αντιπροσωπεύει περίπου το 5% της συνολικής αντίστασης, ο υπολογισμός θεωρείται περιττός. Η πυκνότητα του αέρα μπορεί να κυμαίνεται από 1.15 έως 1.3 [kg/m<sup>3</sup>]. Μια μέγιστη διαφορά λοιπόν 5% της μέγιστης πυκνότητας από τη μέση πυκνότητα αντιπροσωπεύει αναλογικά 5% διαφορά στην αντίσταση αέρα και 0.25% στη συνολική αντίσταση που θεωρείται αμελητέα, με δεδομένο ότι η πυκνότητα θα υπολογιζόταν κατά προσέγγιση.

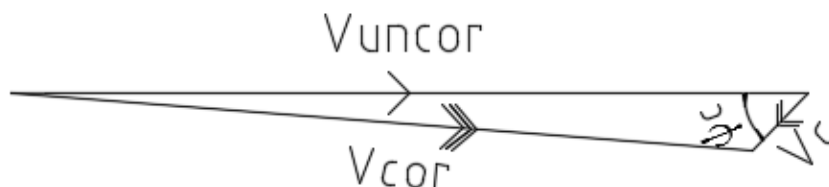
### 7.5.3 Διόρθωση της ταχύτητας λόγω παρουσίας ρεύματος

Η πραγματική ταχύτητα του πλοίου ως προς το νερό ( $V_{COR}$ ) θα πρέπει να υπολογιστεί με διανυσματικό άθροισμα της ταχύτητας του ρεύματος ( $V_C$ ) και της ταχύτητας του πλοίου ως προς το έδαφος ( $V_{UNCOR}$ ), όπως φαίνεται και στην Εικόνα 27. Οπότε με βάση τα παραπάνω, έχουμε:

$$V_{COR} = \sqrt{V_C^2 + V_{UNCOR}^2 + 2 \cdot V_C \cdot V_{UNCOR} \cdot \cos(\psi_C)} \quad 7.5.3-1$$

Όπου:

$\psi_C$ : Η γωνία πρόσπτωσης του ρεύματος στην πλώρη [ $^\circ$ ],  $0^\circ$  για μετωπικά ρεύματα



Εικόνα 27. Διόρθωση ταχύτητας πλοίο λόγω παρουσίας ρευμάτων

### 7.5.4 Υπολογισμός στοιχείων ανέμου και κυματισμού

Για τον άνεμο μας δίνεται η ένταση σε μονάδες Beaufort. Η ταχύτητα του ανέμου σε μονάδες ταχύτητας δίνεται από τον Πίνακα 4, όπου συσχετίζονται οι μονάδες Beaufort με τις μονάδες ταχύτητας.

Για τη σύνδεση της κλίμακας Beaufort με τα στοιχεία των ανεμογενών κυματισμών σε πλήρως ανεπτυγμένη θάλασσα, χρησιμοποιούνται τα στοιχεία του φάσματος Pierson-Moskowitz, που φαίνονται στον Πίνακα 5.

## Case Study-Ανάλυση της SHP

**Πίνακας 4. Κλίμακα Beaufort [noaa.gov]**

Beaufort*	Avg Miles per Hour	Knots	Surroundings
0 calm		0-1	Smoke rises vertically and the sea is mirror smooth
1 light air	1.2 - 3.0	1 - 3	Smoke moves slightly with breeze and shows direction of wind
2 light breeze	3.7 - 7.5	4 - 6	You can feel the breeze on your face and hear the leaves start to rustle
3 gentle breeze	8.0 - 12.5	7 - 10	Smoke will move horizontally and small branches start to sway. Wind extends a light flag
4 moderate	13.0 - 18.6	11 - 16	Loose dust or sand on the ground will move and larger branches will sway, loose paper blows
5 fresh breeze	19.3 - 25.0	17 - 21	Surface waves form of water and small trees sway
6 strong breeze	25.5 - 31.0	22 - 27	Trees begin to bend with the force of the wind and causes whistling in telephone wires. Some spray on the sea surface
7 moderate gale	32.0 - 38.0	28 - 33	Large trees sway. Moderate sea spray
8 fresh gale	39.0 - 46.0	34 - 40	Twigs break from trees, and long streaks of foam appear on the ocean
9 strong gale	47.0 - 55.0	41 - 47	Branches break from trees
10 whole gale	56.0 - 64.0	48 - 55	Trees are uprooted and the sea takes on a white appearance
11 storm	65.0 - 74.0	56 - 63	Widespread damage
12 hurricane	75+	64 +	Structural damage on land, and storm waves at sea

**Πίνακας 5. Στοιχεία πλήρως ανεπτυγμένων κυματισμών για φάσμα Pierson-Moskowitz συναρτήσει της κλίμακας Beaufort [noaa.gov]**

Beaufort Scale	Sea State	Significant Wave (Ft)	Significant Range of Periods (Sec)	Average Period (Sec)	Average Length of Waves (ft)
1	0	<0.5	.5 - 1	1	2
2	1	0.5	1 - 2.5	1.5	9.5
3	2	2	1.5 - 5	3	26
4	3	3.5	2 - 6.5	4	50
5	4	6	2.5 - 8.5	5	80
6	5	8	3-10	6-7	130
7	6	18	4-13	8-9	220
8	7	32	5.5 - 17	10-12	400
9	8	52	7.5 - 23	13-15	650

### 7.5.5 Υπολογισμός της αντίστασης

Η αντίσταση υπολογίζεται ως το άθροισμα της αντίστασης σε ήρεμο νερό, της αντίστασης ανέμου, της πρόσθετης αντίστασης κυματισμού και της αντίστασης λόγω ρύπανσης της γάστρας. Η αντίσταση λόγω ρύπανσης της γάστρας θεωρείται στην παρούσα εργασία ξεχωριστή από την αντίσταση σε ήρεμο νερό, καθώς χρησιμοποιούνται διαφορετικές μέθοδοι εκτίμησής. Η συνολική αντίσταση υπολογίζεται λοιπόν ως:

$$R_T = R_{CALM} + R_{AW} + R_{AA} + R_{FOUL} \quad 7.5.5-1$$

Όπου:

$R_{CALM}$ : Η αντίσταση σε ήρεμο νερό

$R_{AW}$ : Η πρόσθετη αντίσταση κυματισμού

$R_{AA}$ : Η αντίσταση ανέμου

$R_{FOUL}$ : Η αντίσταση λόγω ρύπανσης της γάστρας

- **Αντίσταση σε ήρεμο νερό**

Για τον υπολογισμό της αντίστασης σε ήρεμο νερό χρησιμοποιήθηκαν δύο μέθοδοι. Καταρχάς, υπολογίστηκε η αντίσταση με τη μέθοδο Holtrop-Mennen (21) και έπειτα για δύο χαρακτηριστικές καταστάσεις χρησιμοποιήθηκαν CFD για επαλήθευση της μεθόδου.

- **Μέθοδος Holtrop-Mennen**

Η μέθοδος Holtrop-Mennen εφαρμόζεται σύμφωνα με το παράρτημα Β. Όλα τα αναγκαία υδροστατικά μεγέθη, που αποτελούν δεδομένα εισόδου, υπολογίζονται από τα διαθέσιμα στοιχεία, που έχουν εξαχθεί από την ανάλυση των γραμμών του πλοίου με το πρόγραμμα AVEVA.

- **Χρησιμοποιούμενη μέθοδος CFD**

Η αριθμητική μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε, έχει αναπτυχθεί στο **εργαστήριο Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής** του ΕΜΠ. Η συγκεκριμένη μέθοδος λύνει τις εξισώσεις της μεθόδου **RANS**, που αναφέρθηκε παραπάνω, στο πλαίσιο μιας σταθερής ελεύθερης επιφάνειας με την υιοθέτηση μιας λύσης **υποπεδίου (block)** που επιτρέπει την εφαρμογή πολύ **λεπτής πλεγματικής διακριτότητας**, ώστε να λαμβάνονται όσο το δυνατόν πιο ακριβή αποτελέσματα. Αν η εξεταζόμενη γάστρα έχει πλώρη με βολβό, παράγεται ένας C-τύπος πλέγματος και ορίζει την περιοχή του block 1, όπως φαίνεται στην Εικόνα 28. Διαφορετικά παράγεται ένα block, που αποτελείται από μια ακολουθία παράλληλων και εγκάρσιων νομέων (τύπος H-O). Αν υπάρχει βυθισμένη πρύμνη καθρέφτη, εισάγονται δύο ακόμα blocks που καλύπτουν αντίστοιχα το τμήμα της πρύμνης και του αντίστοιχου ομόρρου που παράγεται. Τα H-O blocks χαρακτηρίζονται

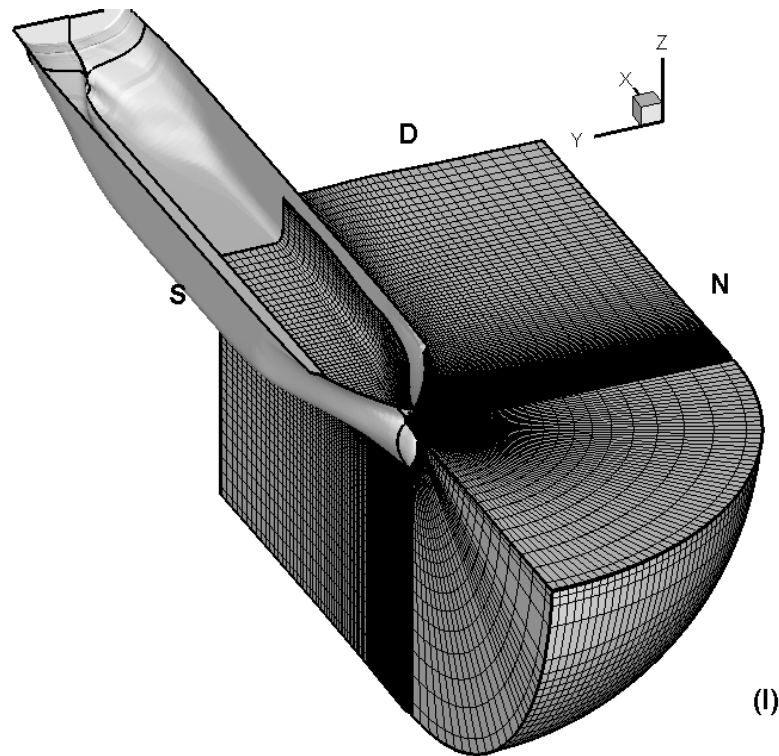


ως II και III στην Εικόνα 29. Σε κάθε περίπτωση, η δημιουργία του πλέγματος βασίζεται στη **σύμμορφη απεικόνιση απλών ή διπλών συνεκτικών περιοχών**. (19)

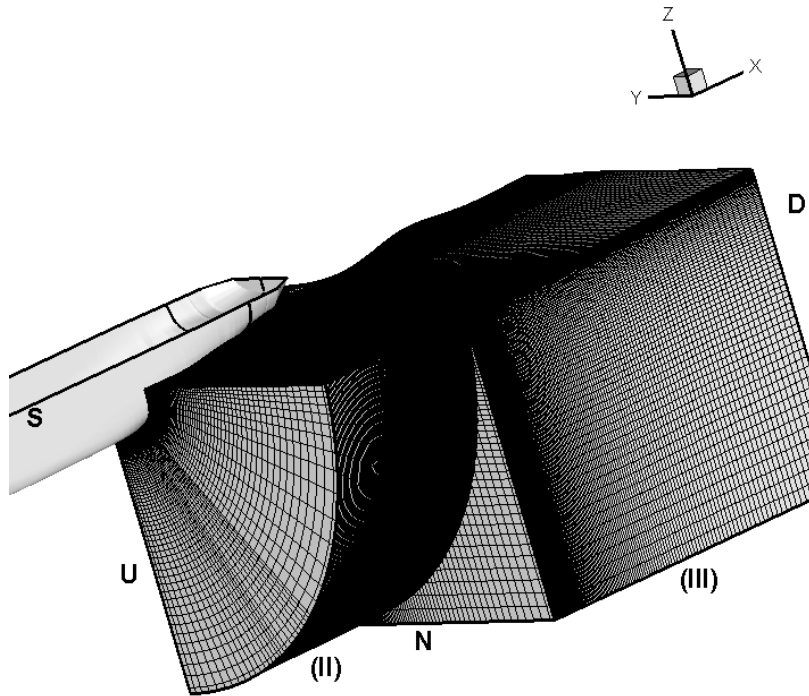
Οι προσομοιώσεις αυτοπρόωσης εκτελούνται θεωρώντας την **έλικα ως δίσκο ορμής** με μια ημιτονοειδή κατανομή της κυκλοφορίας κατά μήκος των πτερυγίων. Οι δυνάμεις που εξασκεί η έλικα λαμβάνονται υπόψη μόνο στην εξίσωση της αξονικής ροής της ορμής και η κατά μήκος διακύμανση ακολουθεί ακριβώς την ίδια γεωμετρία της έλικας. Η πρόβλεψη της απόδοσης της έλικας βασίζεται σε ένα **θεωρητικό πείραμα ελεύθερης ροής** σε συνδυασμό με τις σειρές **Wageningen B**.

Ο υπολογισμός της ελεύθερης επιφάνειας γίνεται με την εφαρμογή της μεθόδου δυναμικής επίλυσης, όπως περιγράφεται στη μέθοδο του Tzabiras (2008) (22). Το πρόβλημα Laplace λύνεται με την Hess & Smith (1968) μέθοδο, κατανέμοντας τετράπλευρα πλέγματα στην πραγματική επιφάνεια και τη γάστρα του πλοίου. Ένα κλασικό παράδειγμα της διάταξης του πλέγματος φαίνεται στην Εικόνα 30. Ένας επαναληπτικός Lagrangian-Eulerian αλγόριθμος εκτελείται για να υπολογίσει το τελευταίο ελεύθερο όριο και **σταματάει όταν ισχύουν ταυτόχρονα οι δυναμικές και οι κινηματικές συνθήκες**. Ο κώδικας μπορεί να υπολογίσει τη δυναμική διαγωγή και τις συνθήκες βύθισης συμβατικών και καταμαράν πλοίων.

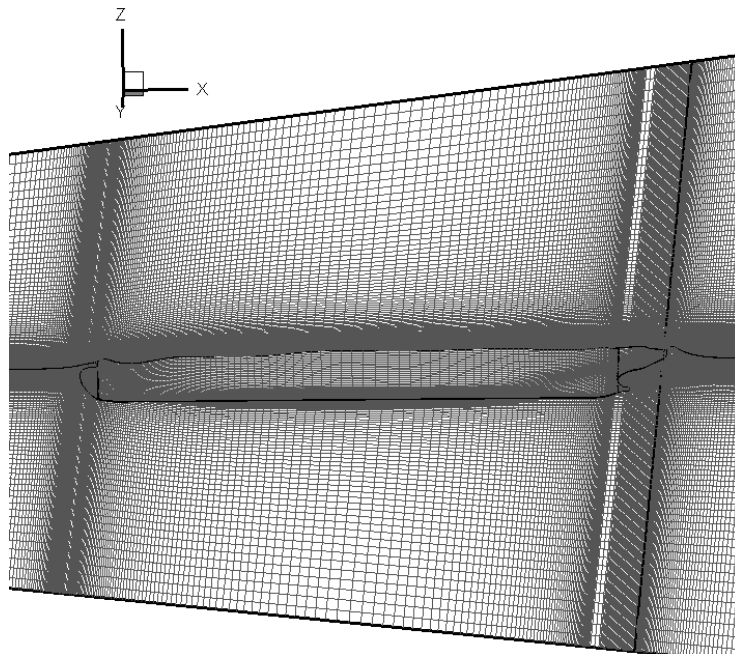
Η μέθοδος που χρησιμοποιείται περιγράφεται αναλυτικά στο άρθρο του Tzabiras (2014) (23)



Εικόνα 28. C-τύπος πλέγματος για πλώρη με βολβό



Εικόνα 29. H-O blocks



Εικόνα 30. Διάταξη του πλέγματος πάνω στη γάστρα

• **Αντίσταση ανέμου**

Η **αντίσταση ανέμου** στην παρούσα διπλωματική εργασία υπολογίζεται με την αναδρομική σχέση του Fujiwara et al. (2005) (24) Η μέθοδος αυτή επιλέχθηκε γιατί προτείνεται στην ITTC 2012 (25). Στη συγκεκριμένη μέθοδο η αντίσταση ανέμου υπολογίζεται ως:

$$R_{AA} = 0.5 \cdot \rho_A \cdot V_{WR}^2 \cdot C_{AA}(\psi_{WR}) \cdot A_{XV} \quad 7.5.5-2$$

Όπου:

$\psi_{WR}$ : Η γωνία πρόσπτωσης του φαινόμενου ανέμου

Η **ταχύτητα** του **φαινόμενου ανέμου**, όπως έχει αναφερθεί, είναι το διανυσματικό άθροισμα της πραγματικής ταχύτητας του ανέμου και της ταχύτητας του πλοίου με αντίθετη κατεύθυνση. Οπότε υπολογίζεται ως:

$$\vec{V}_{WR} = \vec{V}_{WT} - \vec{V}_S \quad 7.5.5-3$$

Όπου:

$V_{WT}$ : Η ταχύτητα του πραγματικού ανέμου

$V_S$ : Η ταχύτητα του πλοίου

Το μέτρο του φαινόμενου ανέμου  $V_{WR}$  ορίζεται ως:

$$V_{WR} = \sqrt{V_{TW}^2 + V_S^2 + 2 \cdot V_S \cdot V_{TW} \cdot \cos(\psi_{WT})} \quad 7.5.5-4$$

Όπου:

$\psi_{WT}$ : Η γωνία πρόσπτωσης του πραγματικού ανέμου

Η γωνία  $\psi_{WR}$  ισούται με:

$$\psi_{WR} = \text{atan} \left( \frac{V_{WT} \cdot \sin(\psi_{WT})}{V_S + V_{TW} \cdot \cos(\psi_{WT})} \right) \quad 7.5.5-5$$

Ο συντελεστής  $C_{AA}$  συνήθως υπολογίζεται με πειράματα σε αεροσήραγγα, αλλά εδώ χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Fujiwara et al. (2005) και ο υπολογισμός παρουσιάζεται παρακάτω:

$$C_{AA} = C_{LF} \cdot \cos(\psi_{WR}) + C_{XLI} \cdot \left( \sin(\beta_{WR}) - \frac{1}{2} \sin(\beta_{WR}) \cdot \cos(\beta_{WR}^2) \right) \cdot \sin(\beta_{WR}) \cdot \cos(\psi_{WR}) + C_{ALF} \cdot \sin(\psi_{WR}) \cos(\psi_{WR})^3 \quad 7.5.5-6$$

Οι συντελεστές  $C_{LF}$ ,  $C_{XLI}$  και  $C_{ALF}$  υπολογίζονται ως:

Όταν  $0^\circ \leq \psi_{WR} < 90^\circ$ , έχουμε:

## Case Study-Ανάλυση της SHP

$$C_{LF} = \beta_{10} + \beta_{11} \cdot \frac{A_{YV}}{L_{OA} \cdot B} + \beta_{12} \cdot \frac{C_{MC}}{L_{OA}} \quad 7.5.5-7$$

$$C_{XLI} = \delta_{10} + \delta_{11} \cdot \frac{A_{YV}}{L_{OA} \cdot H_{BR}} + \delta_{12} \cdot \frac{A_{XV}}{B \cdot H_{BR}} \quad 7.5.5-8$$

$$C_{ALF} = \varepsilon_{10} + \varepsilon_{11} \cdot \frac{A_{OD}}{A_{YV}} + \varepsilon_{12} \cdot \frac{B}{L_{OA}} \quad 7.5.5-9$$

Όταν  $90^\circ < \psi_{WR} \leq 180^\circ$ , οι συντελεστές υπολογίζονται ως:

$$C_{LF} = \beta_{20} + \beta_{21} \cdot \frac{B}{L_{OA}} + \beta_{22} \cdot \frac{H_C}{L_{OA}} + \beta_{23} \cdot \frac{A_{OD}}{L_{OA}^2} + \beta_{24} \cdot \frac{A_{XV}}{B^2} \quad 7.5.5-10$$

$$C_{XLI} = \delta_{20} + \delta_{21} \cdot \frac{A_{YV}}{L_{OA} \cdot H_{BR}} + \delta_{22} \cdot \frac{A_{XV}}{A_{YV}} + \delta_{23} \cdot \frac{B}{L_{OA}} + \delta_{24} \cdot \frac{A_{XV}}{B \cdot H_{BR}} \quad 7.5.5-11$$

$$C_{ALF} = \varepsilon_{20} + \varepsilon_{21} \cdot \frac{A_{OD}}{A_{YV}} \quad 7.5.5-12$$

Ενώ όταν  $\psi_{WR} = 90^\circ$ , ο συντελεστής  $C_{AA}$  υπολογίζεται ως:

$$C_{AA|\psi_{WR}=90^\circ} = 0.5 \cdot \left( C_{AA|\psi_{WR}=90^\circ-\mu} + C_{AA|\psi_{WR}=90^\circ+\mu} \right) \quad 7.5.5-13$$

**Όπου:**

$A_{OD}$ : Το εμβαδόν πλευρικής προβεβλημένης επιφάνειας υπερκατασκευών,

$A_{YV}$ : Το εμβαδόν πλευρικής προβεβλημένης επιφάνειας πλοίου,

$C_{MC}$ : Η οριζόντια απόσταση από το μέσο νομέα έως το κέντρο της επιφάνειας  $A_{YV}$ ,

$H_{BR}$ : Το ύψος έως την κορυφή των υπερκατασκευών,

$H_C$ : Το ύψος από την ίσαλο έως το κέντρο της επιφάνειας  $A_{YV}$ ,

$L_{OA}$ : Το ολικό μήκος πλοίου,

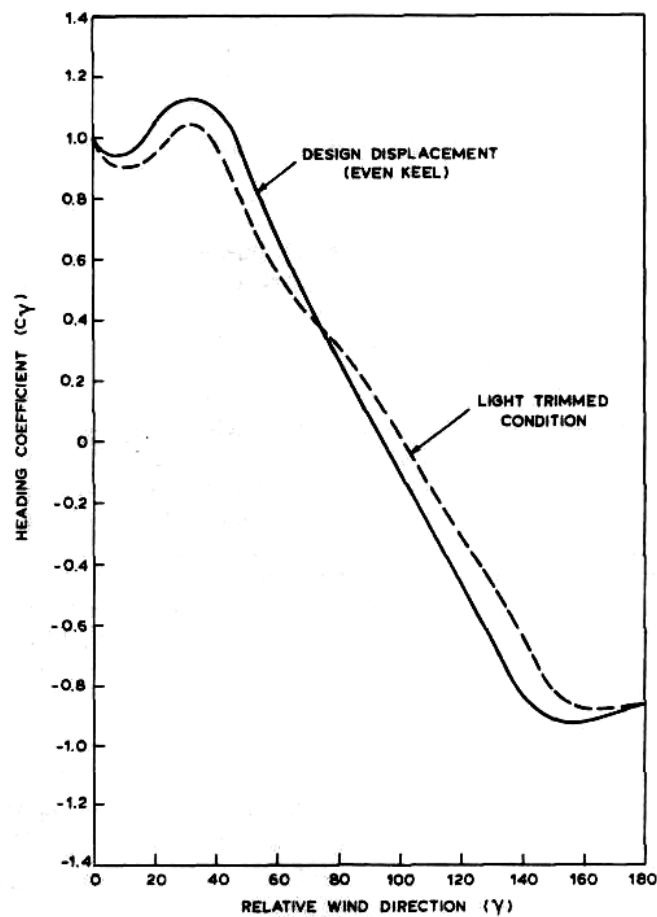
$\mu$ : Η γωνία εξομάλυνσης, που λαμβάνεται ίση με  $10^\circ$

Οι αδιάστατοι συντελεστές  $\beta_{ij}$ ,  $\delta_{ij}$  και  $\varepsilon_{ij}$  παρουσιάζονται στον Πίνακα 6

Πίνακας 6. Αδιάστατοι παράμετροι

	i	j				
		0	1	2	3	4
$\beta_{ij}$	1	0.922	-0.507	-1.162	-	-
	2	-0.018	5.091	-10.367	3.011	0.341
$\delta_{ij}$	1	-0.458	-3.245	2.313	-	-
	2	1.901	-12.727	-24.407	40.31	5.481
$\epsilon_{ij}$	1	0.585	0.906	-3.239	-	-
	2	0.314	1.117	-	-	-

Μια κλασική γραφική παράσταση μεταβολής του συντελεστή  $C_{AA}$  παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 7.



Διάγραμμα 7. Συντελεστής αντίστασης ανέμου πλοίου συναρτήσει της γωνίας φαινόμενου ανέμου ( $0^\circ$  για μετωπικούς ανέμους) (1)

- **Πρόσθετη αντίσταση κυματισμού**

Η πρόσθετη αντίσταση κυματισμού  $R_{AW}$  είναι των συνιστωσών της περίθλασης και της σκέδασης, όπως φαίνεται παρακάτω:

$$R_{AW} = R_{AWR} + R_{AWM} \quad 7.5.5-14$$

- **Υπολογισμός  $R_{AWR}$**

Ο υπολογισμός του  $R_{AWR}$  υπολογίζεται σύμφωνα με τον Liu et al. (2016) (26) ως:

$$R_{AWR} = 2 \iint \frac{S(\omega, \alpha)}{\zeta_a^2} \cdot R_{AWR}(\omega, \alpha) d\omega d\alpha \quad 7.5.5-15$$

Το φάσμα  $S(\omega)$  ορίζεται από την ITTC για πλήρως ανεπτυγμένη θάλασσα (fully developed sea) ως:

$$S(\omega, \alpha) = \frac{H_S^2}{3} \cdot T_z \cdot \frac{0.11}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{\omega \cdot T_z}{2 \cdot \pi}\right)^{-5} e^{(-0.44 \cdot \left(\frac{\omega \cdot T_z}{2 \cdot \pi}\right)^{-4})} \quad 7.5.5-16$$

**Όπου:**

$H_S$ : Σημαντικό ύψος κύματος

$T_z$ : Μέση περίοδος κύματος

Το  $R_{AWR}(\omega, \alpha)$  για διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης  $\alpha$  και κυκλικές κυματικές συχνότητες  $\omega$  υπολογίζεται ως:

$$R_{AWR}(\omega, \alpha) = \int_L \vec{F}_n \cdot \sin\theta dl \quad 7.5.5-17$$

Το  $F_n$  του κάθε τμήματος υπολογίζεται ως:

$$F_n = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot g \cdot \zeta_a^2 \sec(a_{WL}) \cdot a_d \cdot \left(\frac{0.87}{C_B}\right)^{f(a) \cdot (1+4 \cdot \sqrt{F_n})} \cdot \left( \sin(\theta + \alpha)^2 + \frac{2 \cdot \omega \cdot U}{g} \cdot (\cos(a) - \cos(\theta) \cdot \cos(\theta + \alpha)) \right) \quad 7.5.5-18$$

Όπου:

$$a_d = \frac{\pi^2 \cdot I_1 \cdot (k_e \cdot d)}{\pi^2 I_1 \cdot (k_e \cdot d) + K_1^2 (k_e \cdot d)}$$

$$k_e = \frac{\omega_e^2}{g}$$

$$\omega_e = \omega + \frac{\omega^2}{g} \cdot V \cdot \cos(\alpha),$$

$$d = \min[T_M \cdot \cos(\alpha_{WL}), d(x)],$$

$$f(\alpha) = \cos(\alpha), \text{ όταν } 0 \leq \alpha < \frac{\pi}{2},$$

$$f(\alpha) = 0, \text{ όταν } \frac{\pi}{2} < \alpha \leq \pi,$$

$\alpha$ : Η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού,

$I_1, K_1$ : Μετασχηματισμένες συναρτήσεις Bessel,

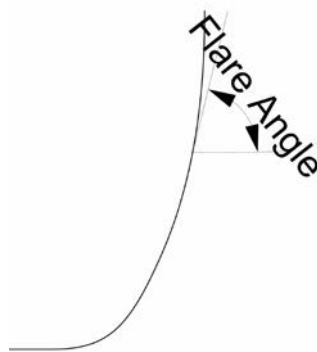
$\theta$ : Η γωνία κλίσης κάθε τμήματος της ισάλου

$\omega$ : Η κυκλική συχνότητα του κυματισμού,

$\omega_e$ : Η κυκλική συχνότητα συνάντησης του κυματισμού,

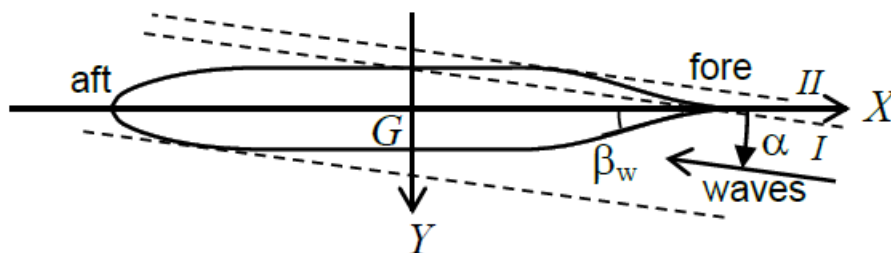
$\alpha_{WL}$ : Γωνία διεύρυνσεως (flare angle), όπως ορίζεται στην Εικόνα 31.

$C_B$ : Ο συντελεστής γάστρας του πλοίου



Εικόνα 31. Ορισμός του flare angle

Η περιοχή που γίνεται η επικαμπύλια ολοκλήρωση φαίνεται στην Εικόνα 32:



Εικόνα 32. Ορισμός περιοχής ολοκλήρωσης

- Υπολογισμός  $R_{AWM}$

Η συνιστώσα  $R_{AWM}$  υπολογίζεται σύμφωνα με τον Liu et al (2015) (8) ως:

$$R_{AWM}(\omega) = 4 \cdot \rho \cdot g \cdot \zeta_{\alpha}^2 \cdot \frac{B^2}{L} \bar{\omega}^{b_1} \cdot e^{\frac{b_1}{d_1}(1-\bar{\omega}_1^d)} \cdot a_1 \cdot a_2 \quad 7.5.5-19$$

Όπου:

$$a_1 = 60.3 \cdot C_B \cdot 1.34 \cdot \left(\frac{0.87}{C_B}\right)^{1+Fn}$$

$$a_2 = 0.0072 + 0.1676 \cdot Fn, \text{ όταν } Fn < 0.12,$$

$$a_2 = Fn^{1.5} e^{-3.5 \cdot Fn}, \text{ όταν } Fn \geq 0.12$$

$$\bar{\omega} = \frac{\sqrt{\frac{L}{g}} \cdot \sqrt[3]{k_{yy}}}{1.17} \cdot 0.05^{0.0143} \cdot \omega, \text{ όταν } Fn < 0.05$$

$$\bar{\omega} = \frac{\sqrt{\frac{L}{g}} \cdot \sqrt[3]{k_{yy}}}{1.17} \cdot Fn^{0.0143} \cdot \omega, \text{ όταν } Fn \geq 0.05$$

$k_{yy}$ : ακτίνα αδρανείας προνευτασμού (radius of gyration pitch)

$$b_1 = 11, \text{ όταν } \bar{\omega} < 1$$

$$b_1 = -8.5, \text{ αλλιώς}$$

$$d_1 = 566 \cdot \left(\frac{L}{B}\right)^{-2.66}, \text{ όταν } \bar{\omega} < 1$$

$$d_1 = -566 \cdot \left(\frac{L}{B}\right)^{-2.66} \cdot 6, \text{ αλλιώς}$$



- **Αντίσταση λόγω ρύπανσης της γάστρας και της έλικας  $R_{FOUL}$**

Η αντίσταση λόγω ρύπανσης της γάστρας και της έλικας  $R_{FOUL}$ , εξαιτίας των συχνών καθαρισμών της γάστρας και της έλικας, δεν γίνεται να χρησιμοποιηθεί κάποιο συγκεκριμένο μοντέλο εκτίμησης της. Οπότε, γνωρίζοντας την συνολική αντίσταση, από τη μετατροπή της ισχύος πρόωσης σε ολική αντίσταση μέσω του συντελεστή πρόωσης εκτιμάται η  $R_{FOUL}$ . Έτσι προκύπτει:

$$R_{FOUL} = R_T - R_{CALM} + R_{AW} + R_{AA} \quad 7.5.5-20$$

Η αντίσταση του πλοίου είναι ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητας, δηλαδή:

$$R = C \cdot V^2 \quad 7.5.5-21$$

Όπου:

C: Η σταθερά αντίστασης

Ορίζοντας τη σταθερά αντίστασης λόγω ρύπανσης της γάστρας  $C_{FOUL}$  προκύπτει ως:

$$C_{FOUL} = \frac{SHP_{FOUL}}{RPM^3} \quad 7.5.5-22$$

Όπου:

$SHP_{FOUL}$ : Η ισχύς πρόωσης που οφείλεται στη  $R_{FOUL}$

### 7.5.6 Εκτίμηση του συντελεστή πρόωσης P.C.

Ο συντελεστής πρόωσης υπολογίζεται από τη σχέση 5.4.5-1 ως:

$$P.C. = \frac{EHP}{SHP} = \frac{EHP}{THP_o} \frac{THP_o}{DHP_o} \frac{DHP_o}{DHP} \frac{DHP}{SHP} = \eta_H \eta_O \eta_R \eta_S$$

- **Υπολογισμός βαθμού απόδοσης της γάστρας  $\eta_H$**

Ο βαθμός απόδοσης της γάστρας ορίζεται από τη σχέση 5.4.1-1 ως:

$$\eta_H = \frac{EHP}{THP_o} = \frac{R_o V}{TV_o} = \frac{1-t}{1-w}$$

Για τον υπολογισμό του συντελεστή μείωσης ώσης  $t$  χρησιμοποιείται ο μέσος όρος των παρακάτω εμπειρικών εξισώσεων 7.5.6-1 έως 7.5.6-3:

$$t = 0.5 \cdot C_p - 0.12, \text{ Hecksher} \quad 7.5.6-1$$

$$t = 0.5 \cdot C_B - 0.15, \text{Danckwardt} \quad 7.5.6-2$$

$$t = w \cdot \left( 1.57 - 2.3 \cdot \frac{C_B}{C_{WP}} + 1.5 \cdot C_B \right), \text{SSPA} \quad 7.5.6-3$$

Αντίστοιχα για τον υπολογισμό του ποσοστού ομόρρου  $w$ , χρησιμοποιείται ο μέσος όρος των παρακάτω εμπειρικών εξισώσεων 7.5.6-4 έως 7.5.6-6:

$$w = 0.75 \cdot C_B - 0.24, \text{Kruger} \quad 7.5.6-4$$

$$w = 0.7 \cdot C_P - 0.18, \text{Hecksher} \quad 7.5.6-5$$

$$w = 0.25 + 2.5 \cdot (C_B - 0.6)^2, \text{Troost} \quad 7.5.6-6$$

#### • Υπολογισμός βαθμού απόδοσης της έλικας σε ελεύθερη ροή $\eta_0$

Ο βαθμός απόδοσης  $\eta_0$  εκτιμάται μέσω των **διαγραμμάτων** των σειρών **Wageningen** για έλικα σε ελεύθερη ροή, συναρτήσεως του συντελεστή προχώρησης  $J$  και του λόγου βήματος- διαμέτρου της έλικας  $P/D$ .

#### • Υπολογισμός βαθμού απόδοσης σχετικής περιστροφής $\eta_R$

Για τον υπολογισμό του **βαθμού απόδοσης  $\eta_R$**  χρησιμοποιείται η παρακάτω εξίσωση:

$$\eta_R = 0.9922 - 0.05908 \cdot \frac{A_E}{A_O} + 0.07424 \cdot (C_P - 0.0225 \cdot lcb), \text{Holtrop - Menner (1978)} \quad 7.5.6-7$$

#### • Υπολογισμός βαθμού απόδοσης άξονα $\eta_S$

Ο **βαθμός απόδοσης άξονα  $\eta_S$**  λαμβάνεται ίσος με 0.98 λόγω συνήθων απωλειών ενέργειας στον άξονα. (3)

### 7.5.7 Σύνοψη διαδικασίας υπολογισμού αντίστασης και πρόωσης

Στον Πίνακα 7 παρουσιάζονται όλες οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται, οι ποσότητες που υπολογίζονται και τα δεδομένα που απαιτούνται.

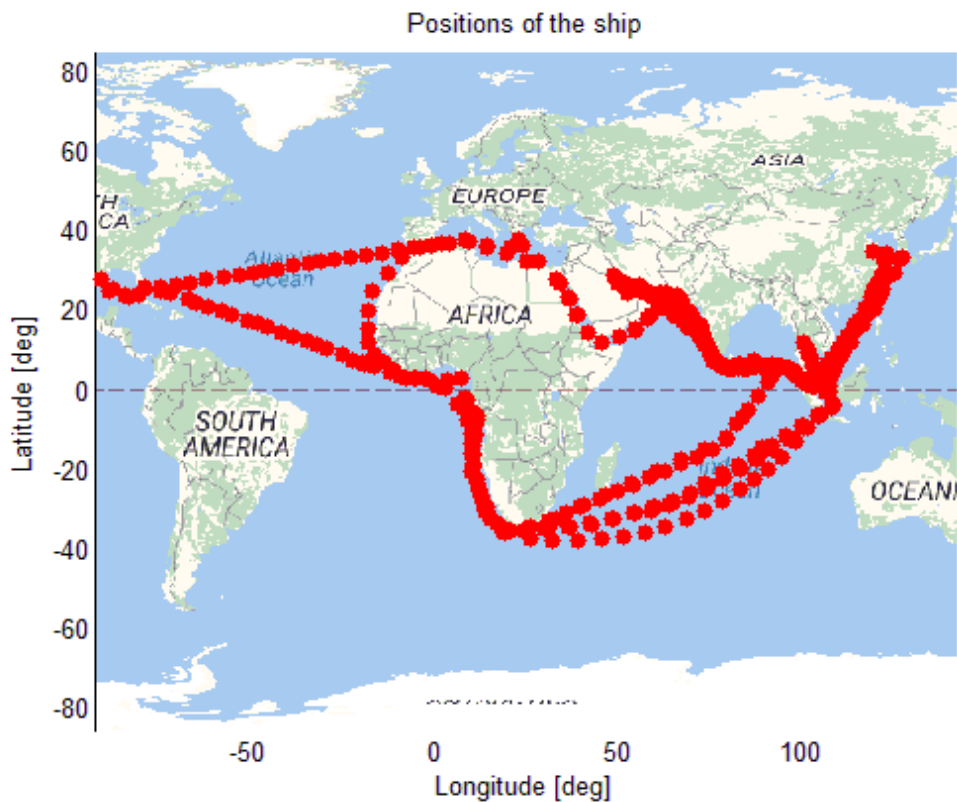
Πίνακας 7. Συνοπτική παρουσίαση των υπολογιστικών μεθόδων

	Υπολογιστική μέθοδος	Απαιτούμενα δεδομένα
Αντίσταση του πλοίου σε ήρεμο νερό $R_{CALM}$	Holtrop-Mennen	$L_{BP}$ , $B$ , $D_{PROP}$ , $t$ , $T_M$ , $L_{WL}$ , $W_A$ , $\nabla$ , $C_M$ , $A_{BT}$ , $h_B$ , $A_T$ , $LCB$ , $V_{COR}$ , $g$ , $\rho$ και $u$
	CFD μαζί με το πείραμα αυτοπρόωσης	Γραμμές Πλοίου, Στοιχεία έλικας, $t$ , $T_M$ , $V_{COR}$ , $g$ , $\rho$ , $u$
Πρόσθετη αντίσταση κυματισμού $R_{AW}$	Liu et al. (2015,2016)	Σημεία Ίσαλου γραμμής, $a_{WL}$ , $C_B$ , $k_{yy}$ , Στοιχεία κύματος ( $h$ , $T$ , $\lambda$ ), $\rho$ και $g$
Αντίσταση ανέμου $R_w$	Fujiwara et al. (2005)	$V_s$ , $V_{WT}$ , $\psi_{WT}$ , $A_{OD}$ , $A_{YV}$ , $C_{MC}$ , $H_{BR}$ , $H_C$ και $L_{OA}$
Υπολογισμός συντελεστών πρόωσης	Μέσω διάφορων εμπειρικών μεθόδων	$C_P$ , $C_B$ , $C_{WP}$ , $V_{COR}$ , $P/D$ , $A_E/A_O$

## 7.6 Εύρος Τιμών

- Στίγμα του πλοίου

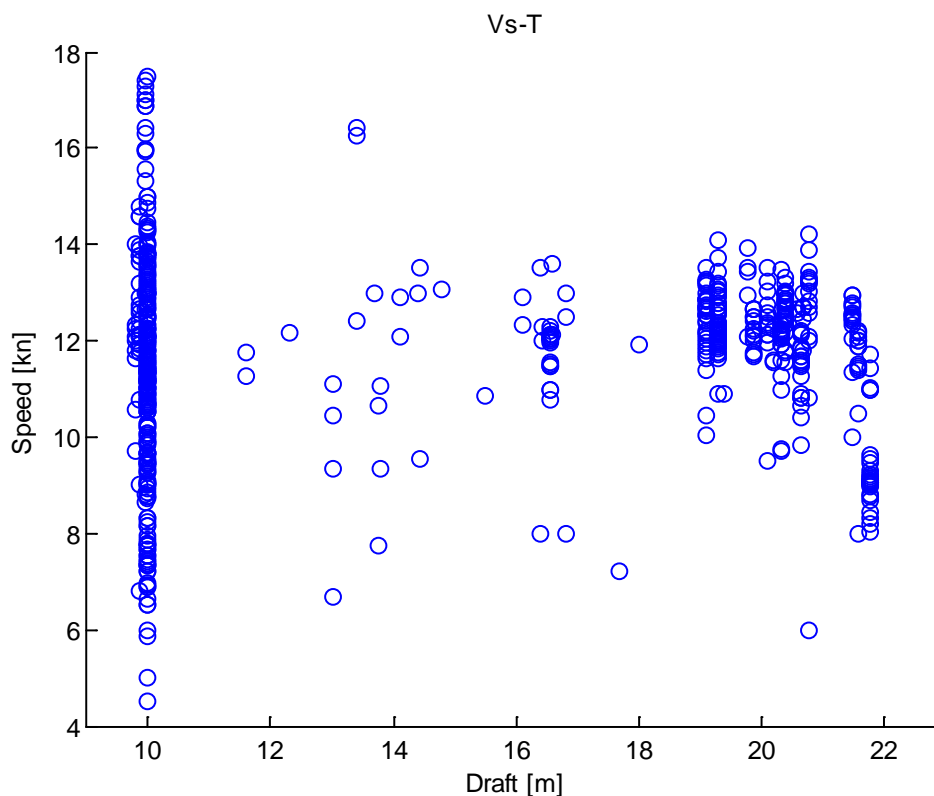
Οι διαδρομές που έκανε το πλοίο τις χρονιές 2014 και 2015 παρουσιάζονται γραφικά στο Διάγραμμα 8. Στο συγκεκριμένο διάγραμμα καταγράφεται η ημερήσια γεωγραφική θέση του πλοίου. Παρατηρείται ότι το πλοίο **δεν έχει πλεύσει καθόλου στον Ειρηνικό Ωκεανό**.



Διάγραμμα 8. Στίγμα του πλοίου τις εξεταζόμενες χρονιές

- Ταχύτητα

Οι ταχύτητες στις οποίες πλέει το πλοίο είναι περίπου σταθερές για τη **full load condition** γύρω από τους **12 κόμβους**, ενώ αντίθετα στη **ballast condition** το πλοίο πλέει σε σχεδόν **όλες τις δυνατές ταχύτητες**, όπως φαίνει και στο Διάγραμμα 9.

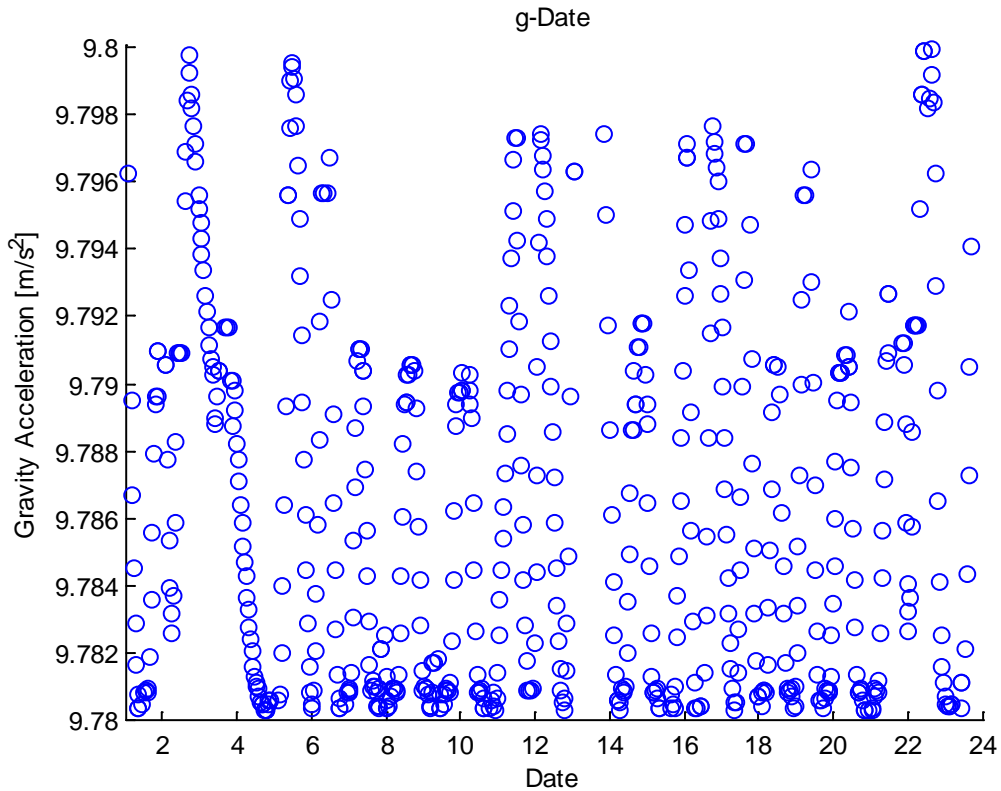


Διάγραμμα 9. Διακόμευση του Vs συναρτήσει του βυθίσματος

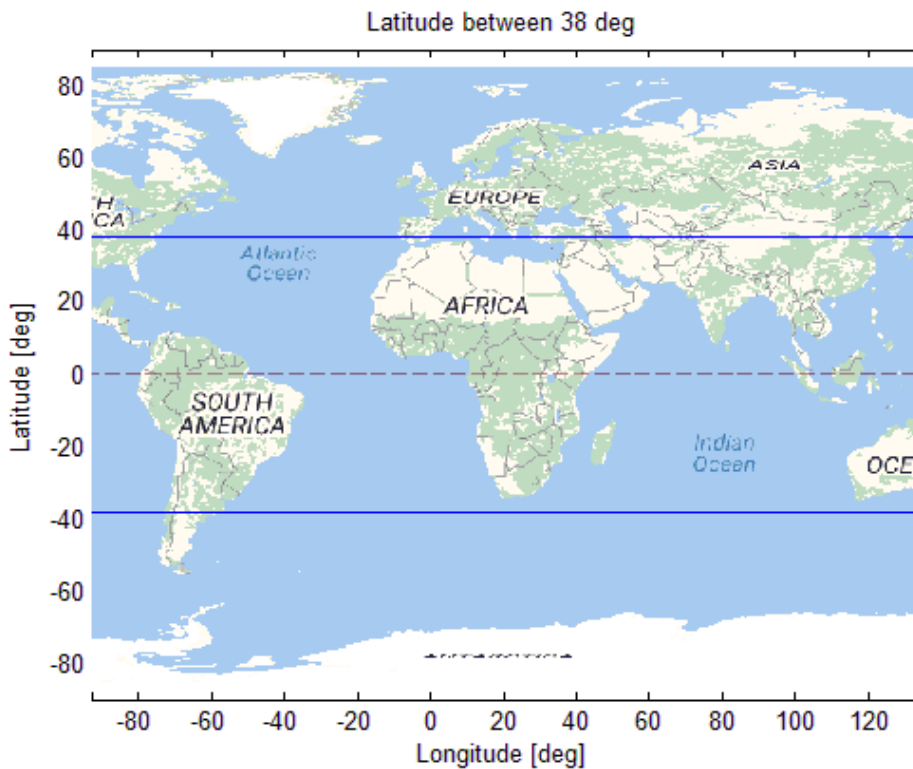
- Επιτάχυνση της βαρύτητας (g)

Η επιτάχυνση της βαρύτητας, όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 10, κυμαίνεται μεταξύ του 9.78 και 9.80 m/s<sup>2</sup>. Η τιμή  $g=9.8 \text{ m/s}^2$  αντιστοιχεί στον παράλληλο της Αθήνας και του Κέιπ Τάουν. Αυτό σημαίνει πως οι διαδρομές του πλοίου είναι ανάμεσα σε αυτούς τους δύο παραλλήλους (Διάγραμμα 11). Η μέση τιμή που λαμβάνεται κατά τη σχεδίαση ενός πλοίου λαμβάνεται ίση με 9.80665 m/s<sup>2</sup>, ενώ η μέση τιμή των υπολογισμένων τιμών είναι ίση με **9.787 m/s<sup>2</sup>**.

## Case Study-Ανάλυση της SHP



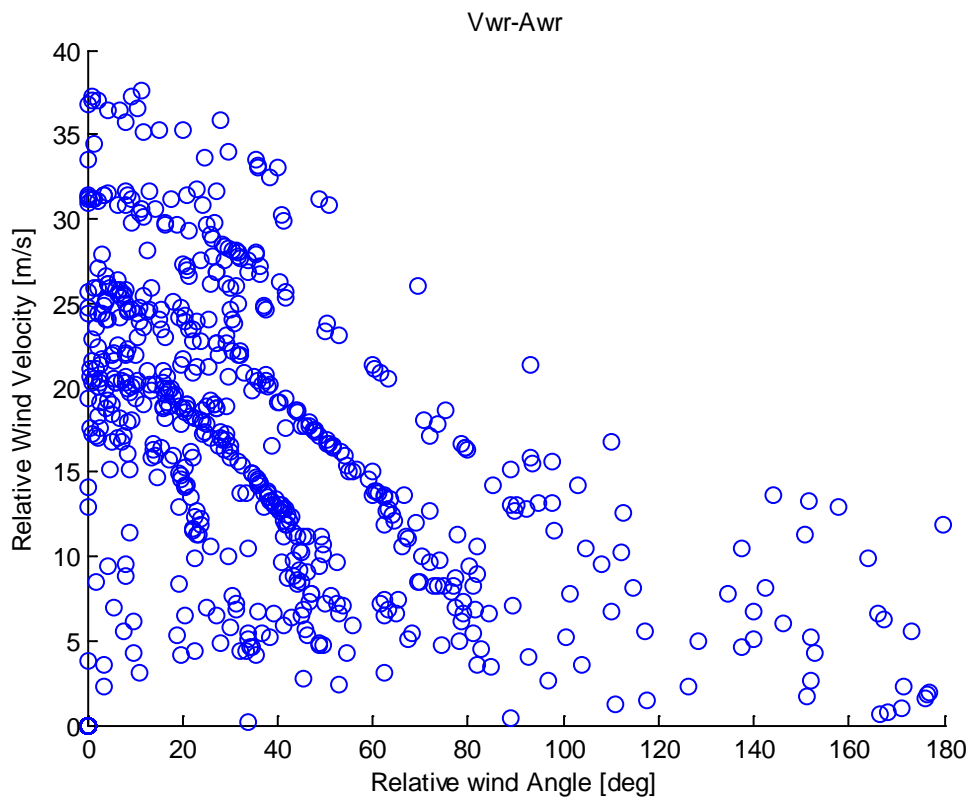
Διάγραμμα 10. Διακύμανση του g συναρτήσει του χρόνου



Διάγραμμα 11. Περιοχή που περιλαμβάνεται μεταξύ των παραλλήλων στις 38°

- Σχετική ταχύτητα  $V_{WR}$  και γωνία ανέμου  $A_{WR}$

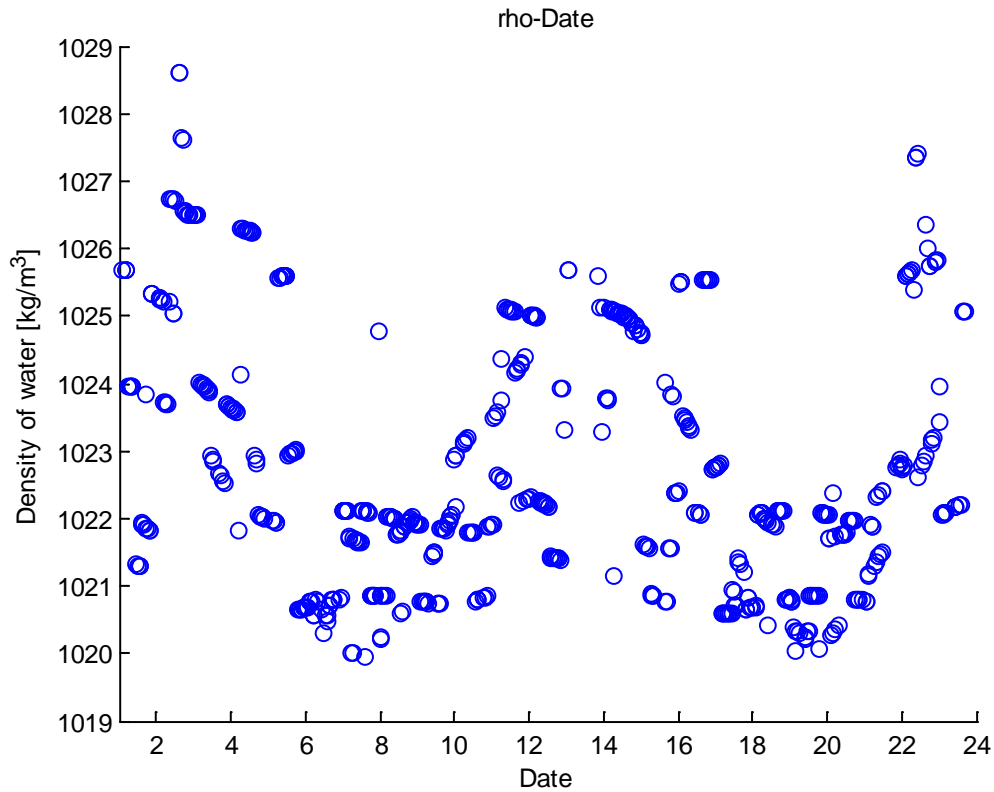
Κάθε κινούμενο σώμα μέσα σε ατμόσφαιρα δέχεται μια αντίσταση αέρα που αντιστοιχεί στη ταχύτητα κίνησης με αντίθετη κατεύθυνση. Γι' αυτό το λόγο, η φαινόμενα ταχύτητα ανέμου είναι λογικό να είναι **μεγαλύτερη από αυτή του πλοίου** και η σχετική γωνία θα πρέπει να είναι μικρότερη από τη γωνία πρόσπτωσης του ανέμου, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 12.



Διάγραμμα 12. Σχετική ταχύτητα ανέμου συναρτήσει της σχετικής γωνίας

- Πυκνότητα του νερού

Η πυκνότητα του νερού, όπως έχει αναφερθεί εξαρτάται από την θερμοκρασία και την αλατότητα του νερού. Η μέση τιμή της πυκνότητας του νερού υπολογίστηκε ίση με **1022.85 kg/m<sup>3</sup>**, ενώ η μέση τιμή πυκνότητας που εκτιμάται κατά τη σχεδίαση του πλοίου είναι ίση με 1025 kg/m<sup>3</sup>. Η διακύμανση των τιμών της πυκνότητας του νερού παρουσιάζεται γραφικά στο Διάγραμμα 13.



Διάγραμμα 13. Πυκνότητα του νερού  $\rho$  συναρτήσει του χρόνου

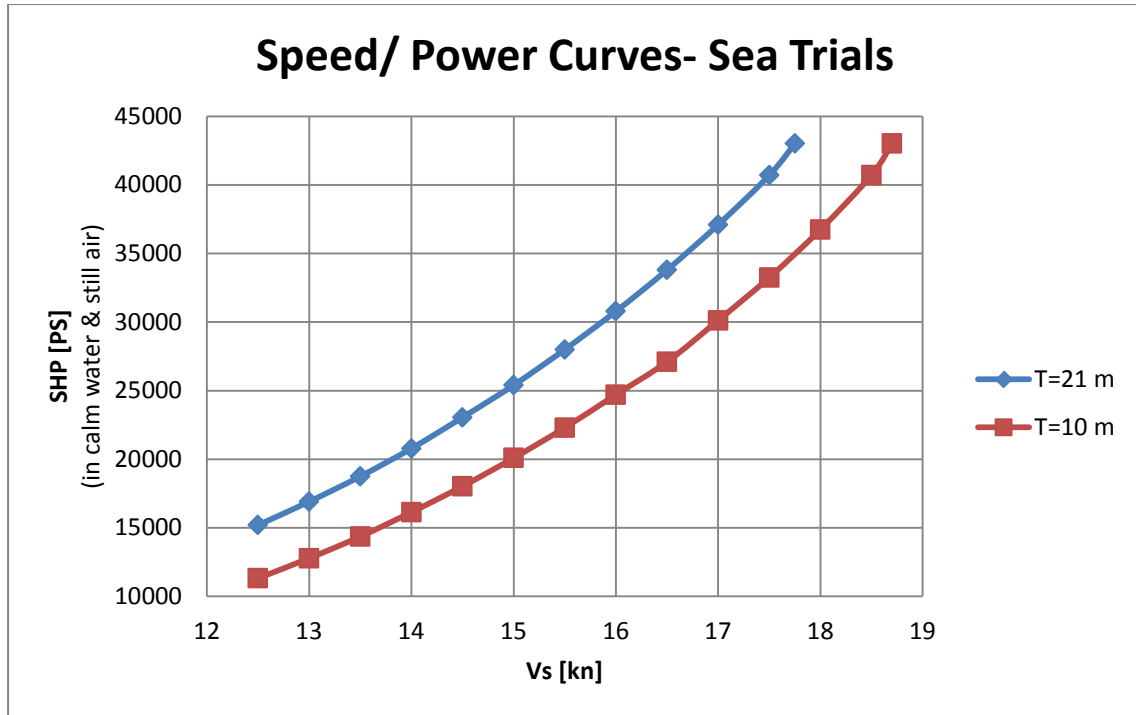


## 7.7 Sea Trials

Από το report των Sea trials λαμβάνονται οι καμπύλες SHP-Vs. Οι SHP αναφέρονται στην ισχύ πρόωσης που οφείλεται μόνο στην αντίσταση σε ήρεμο νερό. Τα Sea Trials έγιναν σε **μηδενική διαγωγή t**, σε **design draft T=21 m**. Τα δεδομένα παρατίθενται στον Πίνακας 8 και παρουσιάζονται γραφικά στο Διάγραμμα 14.

Πίνακας 8. SHP που υπολογίζεται μέσω των Sea Trials

Vs [kn]	SHP [PS]	
	T [m]	
	21	10
12	13,683	10,064
12.5	15,200	11,324
13	16,908	12,784
13.5	18,750	14,360
14	20,785	16,140
14.5	23,050	18,030
15	25,401	20,092
15.5	28,000	22,300
16	30,785	24,709
16.5	33,800	27,100
17	37,102	30,124
17.5	40,700	33,250
17.75	43,020	-
18	-	36,749
18.5	-	40,720
18.7	-	43,020



Διάγραμμα 14. Καμπύλες SHP-V<sub>s</sub> των Sea Trials

Η τιμή SHP=43020 PS αναφέρεται στο MCR της κύριας μηχανής. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το σημείο από το οποίο έγιναν οι υπόλοιποι υπολογισμοί και θεωρείται βέβαιο είναι τα:

Τιμές από βέβαιο σημείο:

SHP [PS] : 33,670  
 V<sub>s</sub> [kn] : 16.47  
 Shaft RPM : 75.2  
 T [m] : 21  
 t [m] : 0

## 8 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

### 8.1 Μέθοδος CFD

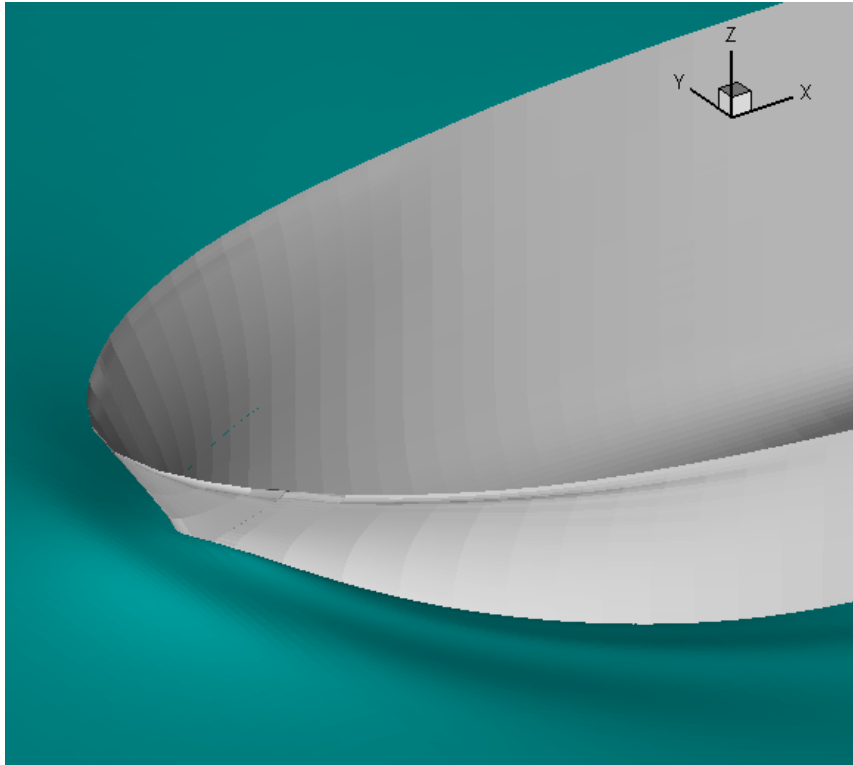
Η μέθοδος που περιγράφηκε, εφαρμόστηκε για τον υπολογισμό της αντίστασης και της πρόωσης του εξεταζόμενου πλοίου. Οι υπολογισμοί έγιναν για δύο τυπικές καταστάσεις FL1 και FL2, όπως φαίνεται στον Πίνακα 9. Η κατάσταση **FL1 αντιστοιχεί σε συνηθισμένη πραγματική κατάσταση** full load departure και η **FL2 στη ταχύτητα που έγινε το ένα σκέλος των sea trials**. Η διαγωγή  $t$  και στις δύο καταστάσεις είναι μηδενική, ενώ δεν υπολογίζεται η επίδραση του καιρού.

Πίνακας 9. Συνθήκες των εξεταζόμενων καταστάσεων

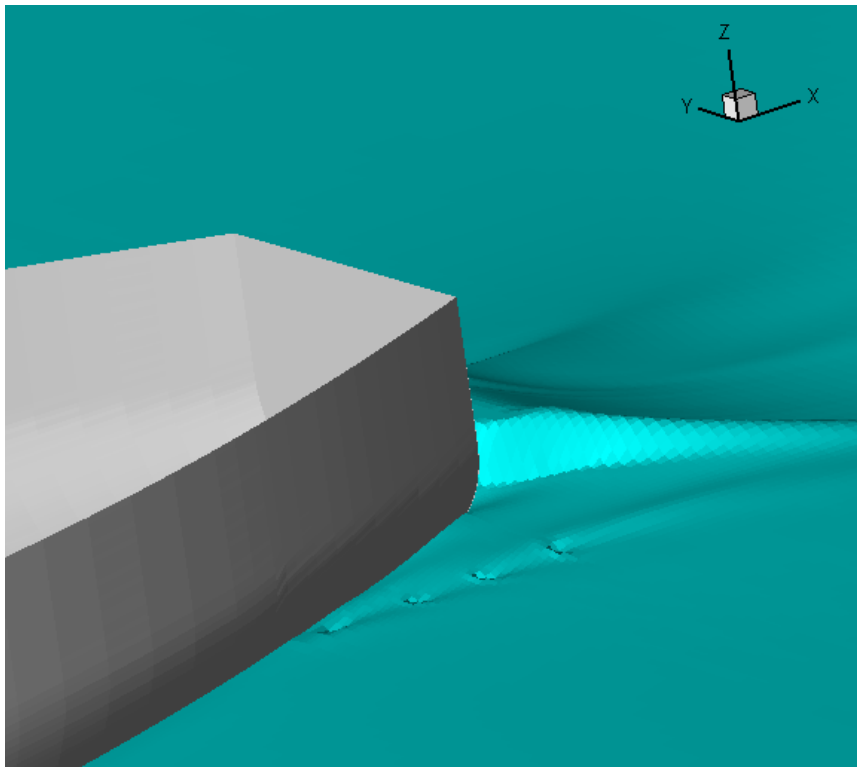
	FL1	FL2
<b>V<sub>s</sub> [kn]</b>	12	17.892
<b>T [m]</b>	21.0	21.0
<b>t [m]</b>	0	0
<b>Re·10<sup>9</sup></b>	1.41	2.09
<b>Fn</b>	0.109	0.163

Στους υπολογισμούς της δυναμικής ροής έγιναν υπολογισμοί για να προσδιορισθεί η γεωμετρία της ελεύθερης επιφάνειας. Γι' αυτό το σκοπό χρησιμοποιήθηκαν περίπου 44,000 στοιχεία (panels), από τα οποία τα 4,000 καλύπτουν τη γάστρα και τα 40,000 τα ελεύθερα όρια. Το άνω όριο της περιοχής λύσης τοποθετήθηκε σε μία απόσταση  $0.7L_{OA}$  πλώραθεν της πλώρης και η έξοδος  $1.7L_{OA}$  μετά την πρύμνη. Ένα τυπικό παράδειγμα του υπολογισμού της γεωμετρίας της ελεύθερης επιφάνειας για τη γάστρα δίνεται στην Εικόνα 33 για την πλώρη, στην Εικόνα 34 για την πρύμνη και στην Εικόνα 35 για όλο το πλοίο.

## Παρουσίαση αποτελεσμάτων

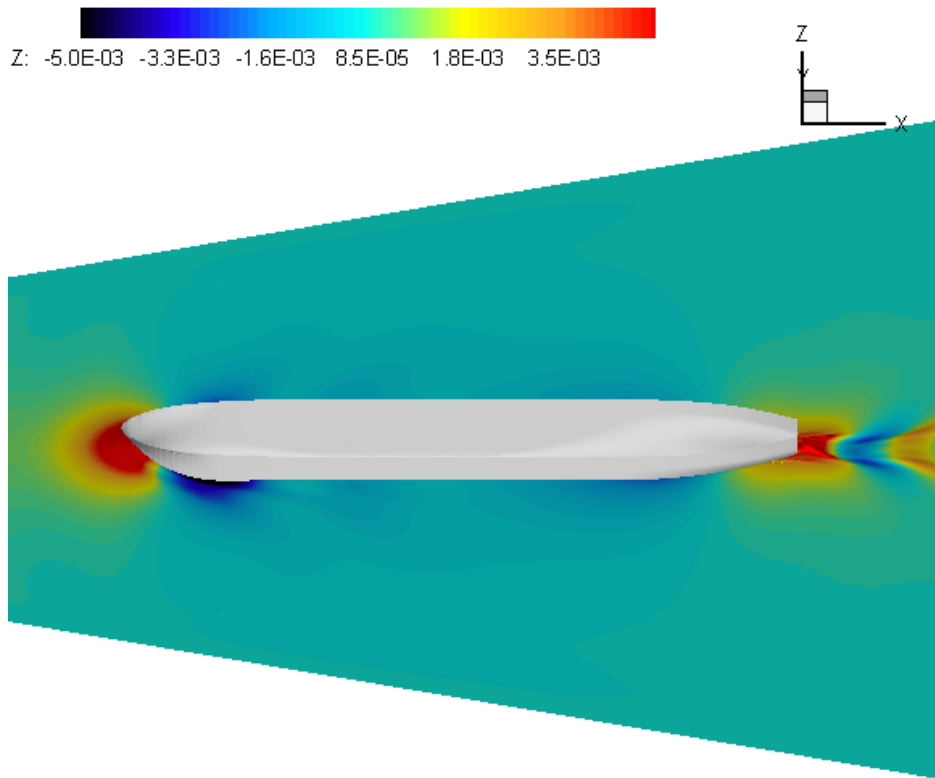


Εικόνα 33. Υπολογισμένη ελεύθερη επιφάνεια για την πλώρη



Εικόνα 34. Υπολογισμένη ελεύθερη επιφάνεια για την πρύμνη

## Παρουσίαση αποτελεσμάτων



Εικόνα 35. Περίγραμμα ελεύθερης επιφάνειας για όλο το πλοίο

Τα χαρακτηριστικά της αντίστασης και της πρόωσης για τις δύο καταστάσεις απεικονίζονται στον Πίνακα 10 για την αντίσταση και στον Πίνακα 11 για την αυτοπρόωση. Προκειμένου να υπολογιστεί η SHP και οι στροφές του άξονα, η προωστήρια εγκατάσταση μοντελοποιήθηκε με βάση τα στοιχεία της έλικας. Η απαιτούμενη SHP στα Sea Trials για  $V_S=17.892$  kn εκτιμήθηκε ίση με 44,060 PS, ενώ για  $V_S=12$  kn υπολογίστηκε ίση με 13,683 PS. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων της μεθόδου CFD, με τα Sea Trials γίνεται στον Πίνακα 12.

Οι αποκλίσεις των δύο μεθόδων είναι σε **αποδεκτά επίπεδα**. Μεταξύ των αποτελεσμάτων για τις καταστάσεις FL1 και FL2 υπήρξε μια μικρή διαφοροποίηση των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν, γι' αυτό και οι αποκλίσεις μεταξύ των δύο μεθόδων είναι διαφορετικές. Επίσης, η αναγωγή της SHP των Sea Trials σε διαφορετικές ταχύτητες από μία μέτρηση, γίνεται με μεθόδους που περιέχουν ένα ποσοστό ανακρίβειας.

Πίνακας 10. Χαρακτηριστικά της αντίστασης

	FL1	FL2
$1-w_N$	0.615	0.620
<b>R [KN]</b>	1,204	2,428
<b>EHP [PS]</b>	10,104	30,378
<b>S [m<sup>2</sup>]</b>	28,433	28,433

Πίνακας 11. Χαρακτηριστικά της αυτοπρόωσης

	FL1	FL2
<b>1-t</b>	0.867	0.826
<b>1-w<sub>E</sub></b>	0.638	0.648
<b>T [KN]</b>	1,389	2,939
<b>DHP [PS]</b>	13,852	43,593
<b>RPM</b>	55.3	81.6
<b>P/D</b>	0.730	0.730
<b>K<sub>T</sub></b>	0.166	0.161
<b>10K<sub>Q</sub></b>	0.221	0.208
<b>η<sub>P</sub></b>	0.537	0.547
<b>J</b>	0.431	0.443

Πίνακας 12. Σύγκριση αποτελεσμάτων CFD με Sea Trials για ισχύ πρόωσης που αντιστοιχεί σε αντίσταση σε ήρεμο νερό χωρίς την επίδραση της ρύπανσης της γάστρας SHP<sub>C</sub>

	FL1	FL1-Sea Trials	Απόκλιση %	FL2	FL2- Sea Trials	Απόκλιση %
<b>RPM</b>	55.3	55.7	-0.07%	81.6	79.41	2.76%
<b>SHP<sub>C</sub> [PS] (η<sub>S</sub>=0.98)</b>	14,134	13,683	3.29%	44,482	44,060	0.96%
<b>P.C.</b>	0.715	0.720	0.70%	0.683	0.711	-3.93%

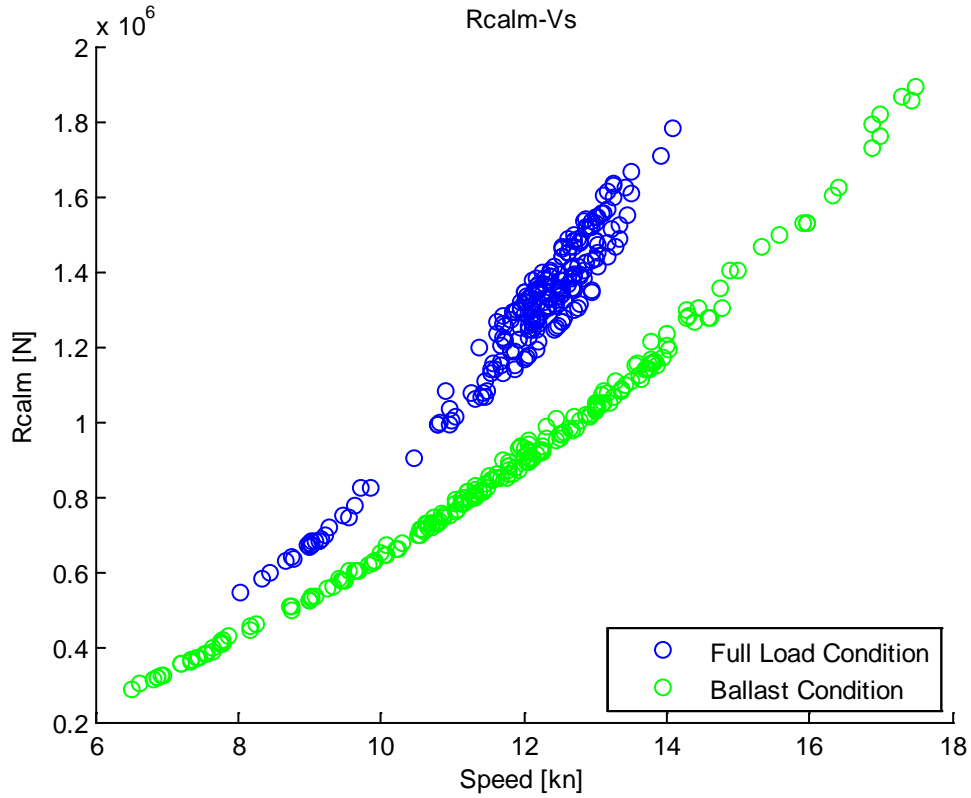
## 8.2 Συνιστώσες συνολικής αντίστασης

### 8.2.1 Αποτελέσματα αντίστασης σε ήρεμο νερό R<sub>CALM</sub> με τη μέθοδο Holtrop

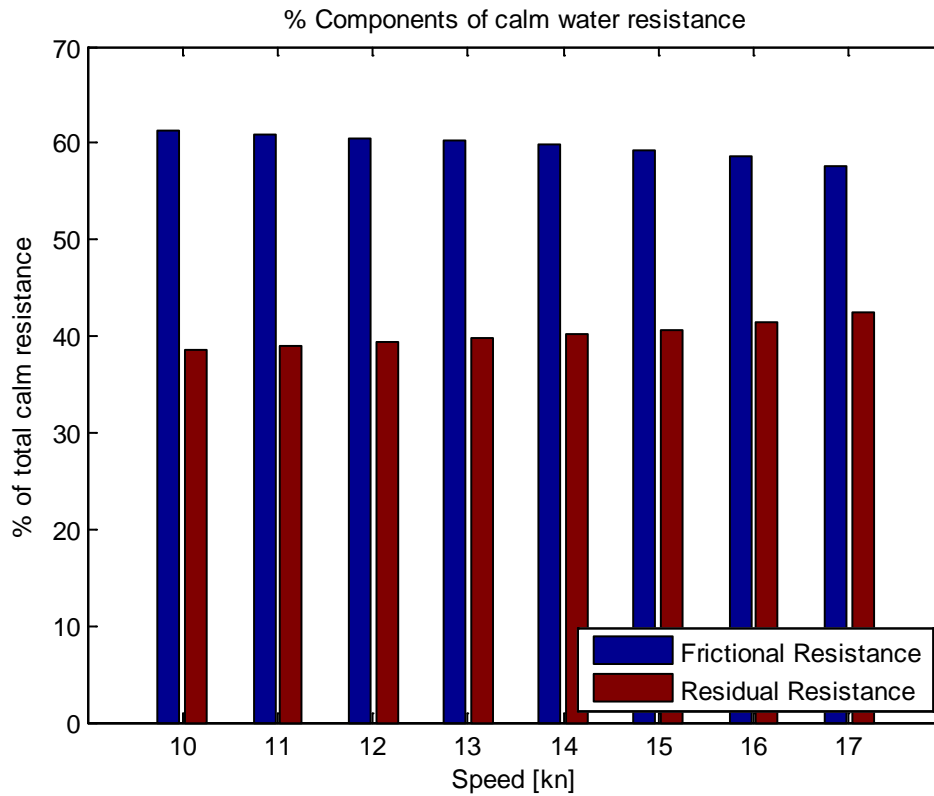
Η αντίσταση σε ήρεμο νερό R<sub>CALM</sub> υπολογίστηκε για κάθε κατάσταση και παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 15. Με μπλε χρώμα παρουσιάζεται η R<sub>CALM</sub> που αντιστοιχεί σε full load κατάσταση και με πράσινο χρώμα σε ballast κατάσταση. Όπως παρατηρείται η αντίσταση σε ballast condition, όπως και η ταχύτητα, κυμαίνεται σε όλο το δυνατό εύρος, ακόμα και υψηλότερα από την αντίσταση σε full load condition. Αυτό συμβαίνει όταν το πλοίο πλέει σε υψηλές ταχύτητες, για να προλάβει συνήθως να είναι στον επόμενο προορισμό άμεσα.

Στο Διάγραμμα 16 παρουσιάζεται η ποσοστιαία μεταβολή των συνιστωσών της R<sub>CALM</sub>, συναρτήσει της ταχύτητας. Όπως φαίνεται, η αντίσταση τριβής R<sub>F</sub> μειώνεται ποσοστιαία με την αύξηση της ταχύτητας, λόγω της μεγαλύτερης αύξησης της υπόλοιπης αντίστασης που εξαρτάται κυρίως από τη ταχύτητα.

Παρουσίαση αποτελεσμάτων



Διάγραμμα 15.  $R_{CALM}-V_S$

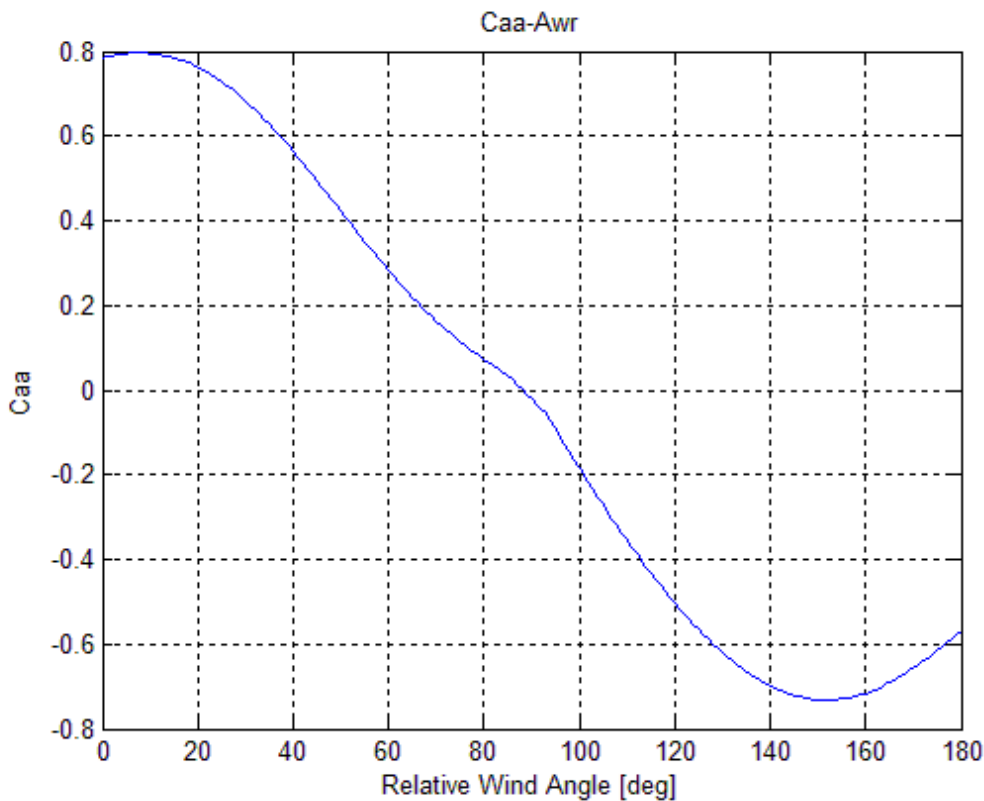


Διάγραμμα 16. Ανάλυση της  $R_{calm}$  σε  $R_F$  και  $R_R$

### 8.2.2 Αντίσταση ανέμου $R_{AA}$

Για την αντίσταση ανέμου η κατανομή του συντελεστή  $C_{AA}$  παρουσιάζεται γραφικά στο Διάγραμμα 17. Παρατηρείται, ότι για μικρές γωνίες, όπως ήταν αναμενόμενο, ο συντελεστής  $C_{AA}$  παίρνει τις μέγιστες απόλυτες τιμές. Επίσης οι τιμές του  $C_{AA}$  παρουσιάζονται θετικές για θετικές γωνίες, δηλαδή θετική αντίσταση ανέμου, ενώ αντίθετα αρνητικές για αρνητικές γωνίες, άρα ευνοϊκή αντίσταση ανέμου.

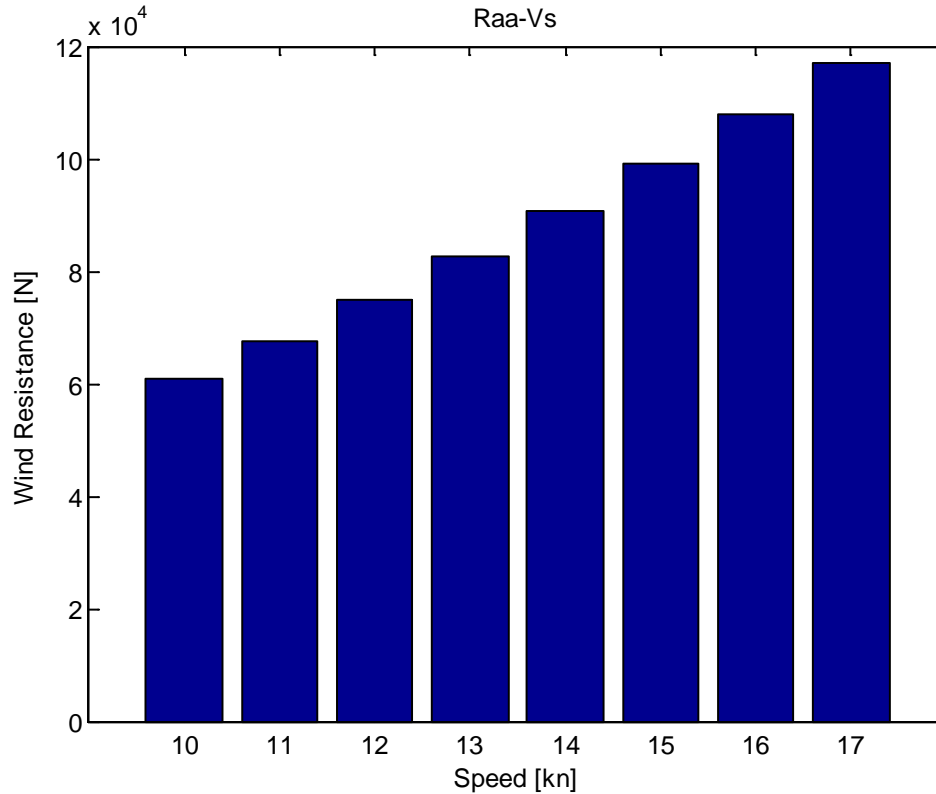
Στο Διάγραμμα 18 απεικονίζεται η αύξηση της  $R_{AA}$ , με αύξηση της ταχύτητας του πλοίου. Η σχέση μεταξύ των δύο μεγεθών είναι πιο πολύ γραμμική παρά δεύτερης τάξης, καθώς η αντίσταση ανέμου επηρεάζεται από τη ταχύτητα του φαινόμενου ανέμου στο τετράγωνο, η οποία είναι συνήθως μεγαλύτερη από τη ταχύτητα του πλοίου και επηρεάζεται επίσης από την ένταση του ανέμου εκτός από τη ταχύτητα του πλοίου, όπως είχε παρουσιαστεί και στο Διάγραμμα 12.



Διάγραμμα 17. Κατανομή του  $C_{AA}$  συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης του ανέμου



## Παρουσίαση αποτελεσμάτων

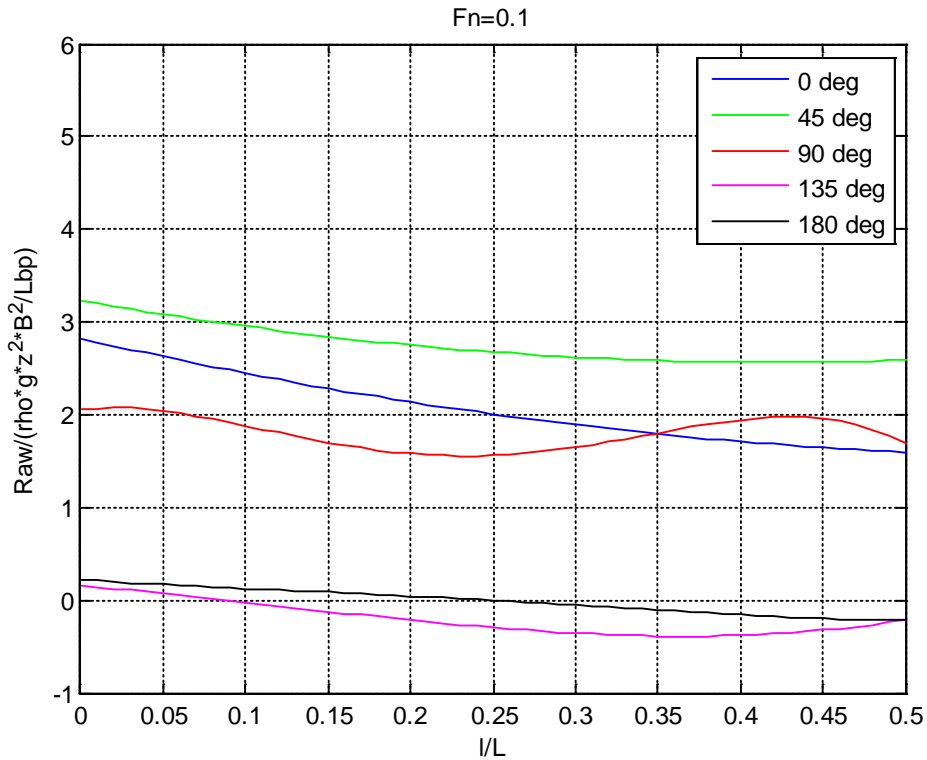


Διάγραμμα 18.  $R_{WIND}-V_S$

### 8.2.3 Πρόσθετη αντίσταση κυματισμού ( $R_{AW}$ )

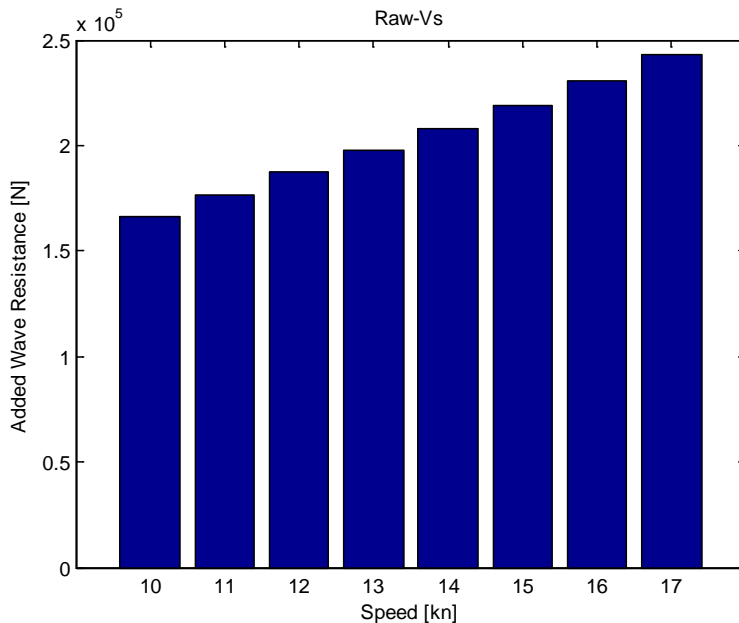
Η πρόσθετη αντίσταση κυματισμού  $R_{AW}$ , όπως έχει αναφερθεί, παρουσιάζεται γραφικά με τη βοήθεια των αδιάστατων συντελεστών  $R_{aw}$  και  $\lambda/L$  και για την παρούσα μέθοδο τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 19 για  $F_n=0.1$ . Παρατηρείται ότι η μέγιστη αντίσταση  $R_{AW}$  αντιστοιχεί σε γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού  $\alpha=45^\circ$  ( $0^\circ$  για μετωπικούς κυματισμούς), εξαιτίας των κινήσεων του πλοίου και στις δύο κατευθύνσεις και λόγω της λιγότερο υδροδυναμικής ισάλου γραμμής για μεγαλύτερες γωνίες από τη μηδενική.

## Παρουσίαση αποτελεσμάτων



Διάγραμμα 19. Αδιάστατη πρόσθετη αντίσταση κυματισμού συναρτήσει του αδιάστατου μήκους κύματος για διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης του κυματισμού

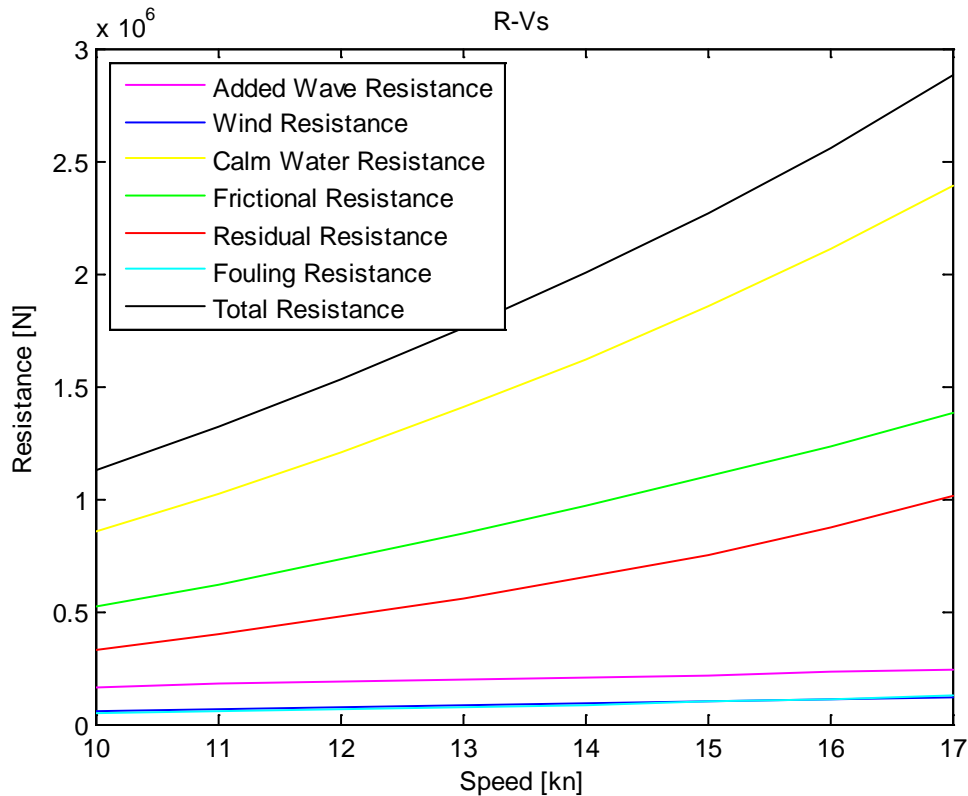
Στο Διάγραμμα 20 παρουσιάζεται η αύξηση της  $R_{AW}$  με αύξηση της ταχύτητας για full load condition.



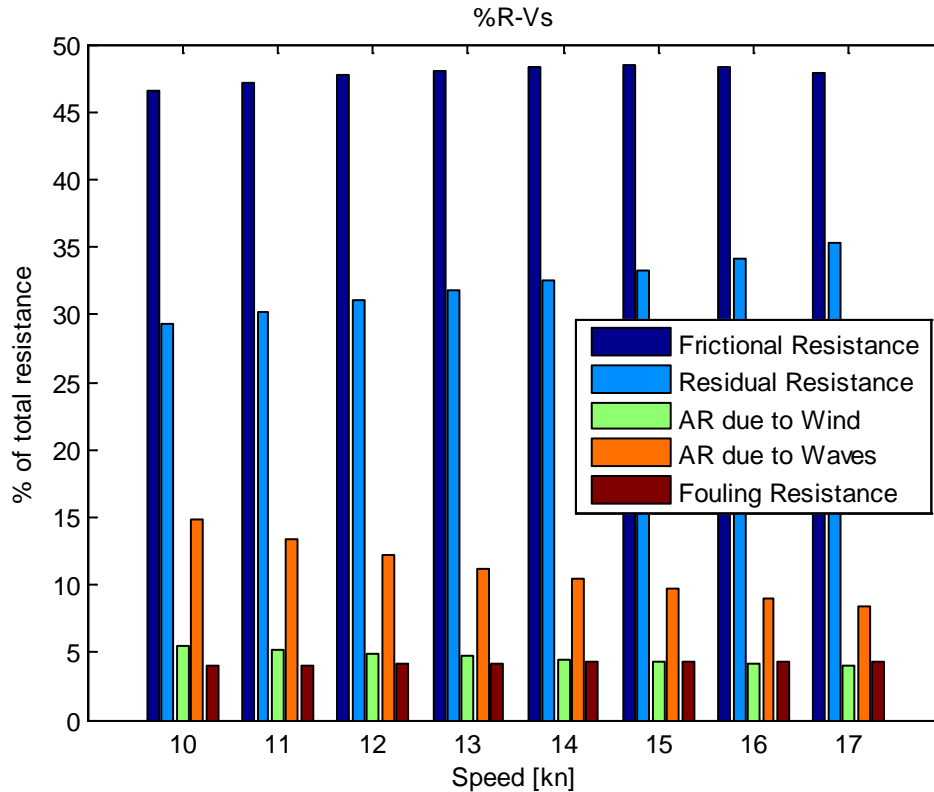
Διάγραμμα 20. Πρόσθετη αντίσταση κυματισμού  $R_{AW}$  συναρτήσει της ταχύτητας  $V_s$

### 8.3 Συνολική αντίσταση $R_T$

Η κατανομή της συνολικής αντίστασης και των συνιστωσών της ως προς τη ταχύτητα για μια συνήθη κατάσταση παρουσιάζεται γραφικά στο Διάγραμμα 21. Η αντίστοιχη τάση σε ποσοστιαία μεταβολή των επιμέρους συνιστωσών απεικονίζεται στο Διάγραμμα 22. Παρατηρείται και στα δύο διαγράμματα ότι η **αντίσταση σε ήρεμο νερό αυξάνεται**, όπως προβλεπόταν, **αναλογικά με το τετράγωνο** ενώ οι άλλες δύο αντιστάσεις μεταβάλλονται σχεδόν γραμμικά.



Διάγραμμα 21. Σχηματική αναπαράσταση όλων των συνιστωσών της αντίστασης συναρτήσει της ταχύτητας

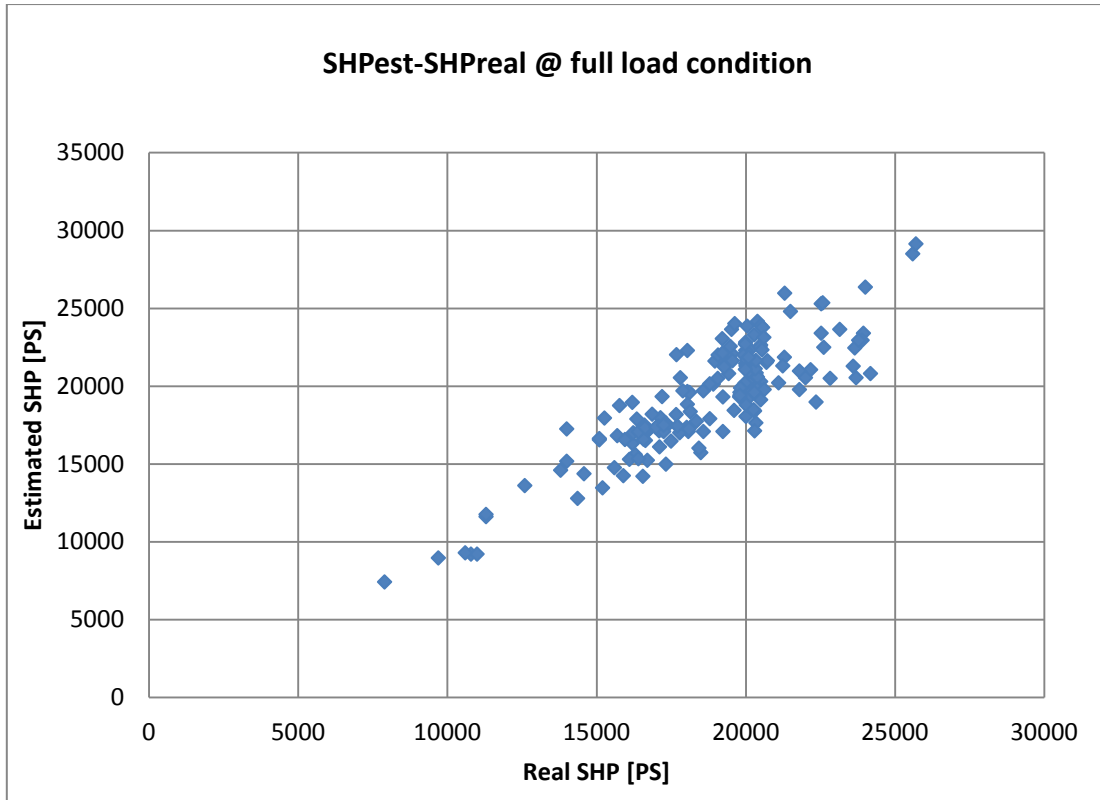


Διάγραμμα 22. Ποσοστιαία μεταβολή των συνιστωσών της αντίστασης συναρτήσει της ταχύτητας

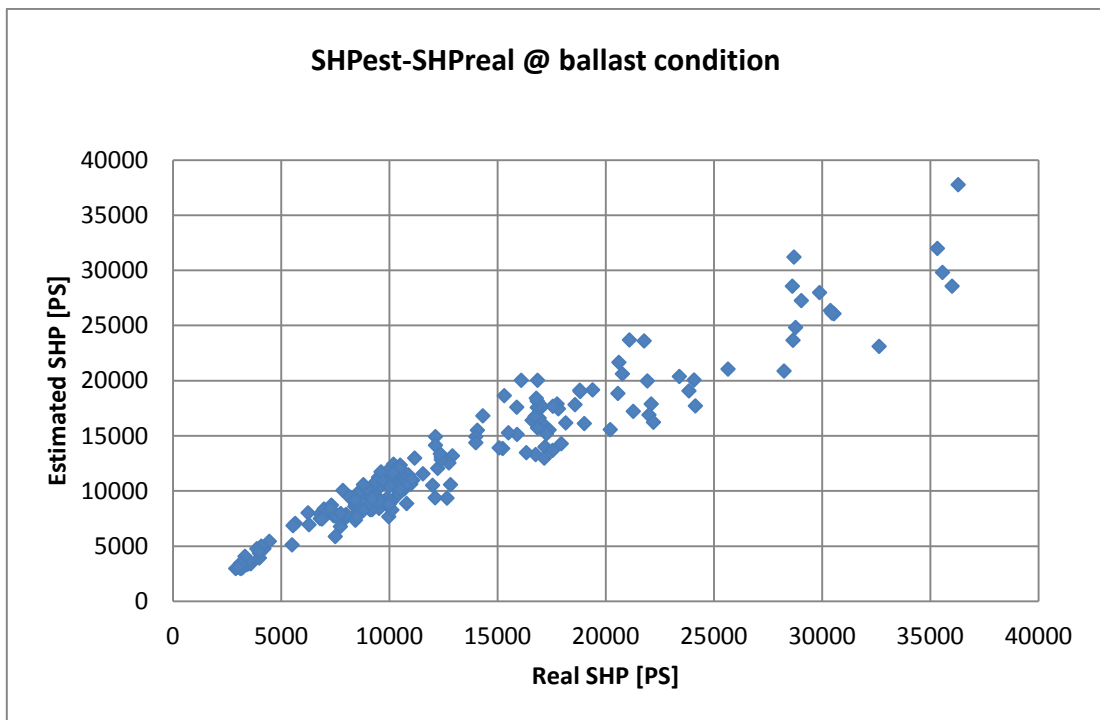
#### 8.4 Ισχύς πρόωσης SHP

Ο υπολογισμός της απαιτούμενης ισχύος πρόωσης SHP είναι το τελικό στάδιο των υπολογισμών για την ανάλυση της ισχύος πρόωσης. Στο Διάγραμμα 23 και στο Διάγραμμα 24 συγκρίνονται οι εκτιμώμενες SHP με τις πραγματικές SHP.

Η **απόκλιση** και στις δύο καταστάσεις είναι περίπου **10%** και θεωρείται ικανοποιητική και οφείλεται κυρίως στη μη αξιοπιστία των μετεωρολογικών δεδομένων, όπως επίσης και σε μεταβατικά φαινόμενα και φαινόμενα πηδαλιουχίας που δεν μπορούσαν να εκτιμηθούν. Επίσης, δεν έχει εκτιμηθεί η επίδραση του βάρους του νερού και της απόστασης που διανύεται από τον άνεμο και τα κύματα από τη δημιουργία τους (fetch length). Ακόμα, η επίδραση της ολίσθησης της έλικας στην ισχύ πρόωσης δεν κατέστη δυνατό να συνδεθεί με τα αποτελέσματα, καθώς συνδέεται με πολλούς εξωτερικούς παράγοντες, που ήταν αδύνατο να διαχωριστούν. Στον Πίνακα 13 παρουσιάζεται η σύγκριση των τιμών της SHP με αυτές των CFD.



Διάγραμμα 23. Σύγκριση της εκτιμώμενης και πραγματικής SHP στη full load condition



Διάγραμμα 24. Σύγκριση της εκτιμώμενης και πραγματικής SHP στη ballast condition

Πίνακας 13. Σύγκριση αποτελεσμάτων CFD με την εκτίμηση της SHP που αντιστοιχεί σε αντίσταση σε ήρεμο νερό χωρίς την επίδραση της ρύπανσης της γάστρας (SHP<sub>C</sub>)

	FL1-Holtrop	FL1- CFD	Απόκλιση %	FL2-Holtrop	FL2- CFD	Απόκλιση %
SHP <sub>C</sub> [PS] ( $\eta_s=0.98$ )	14,134	14,201	-0.47%	46,219	43,509	6.23%
P.C.	0.715	0.713	0.28%	0.710	0.698	1.72%

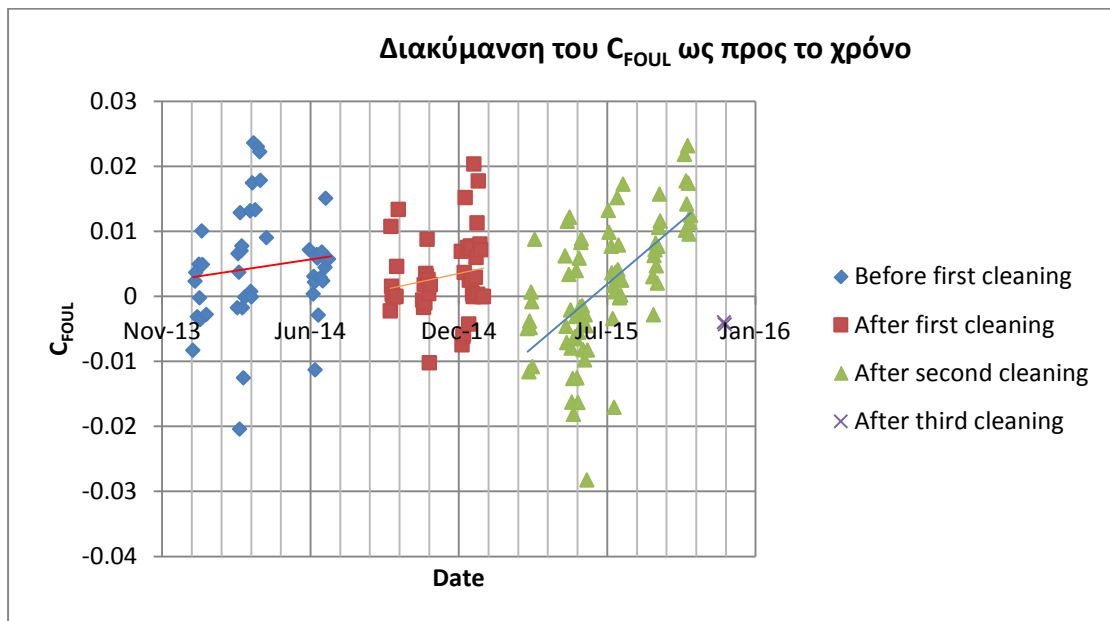
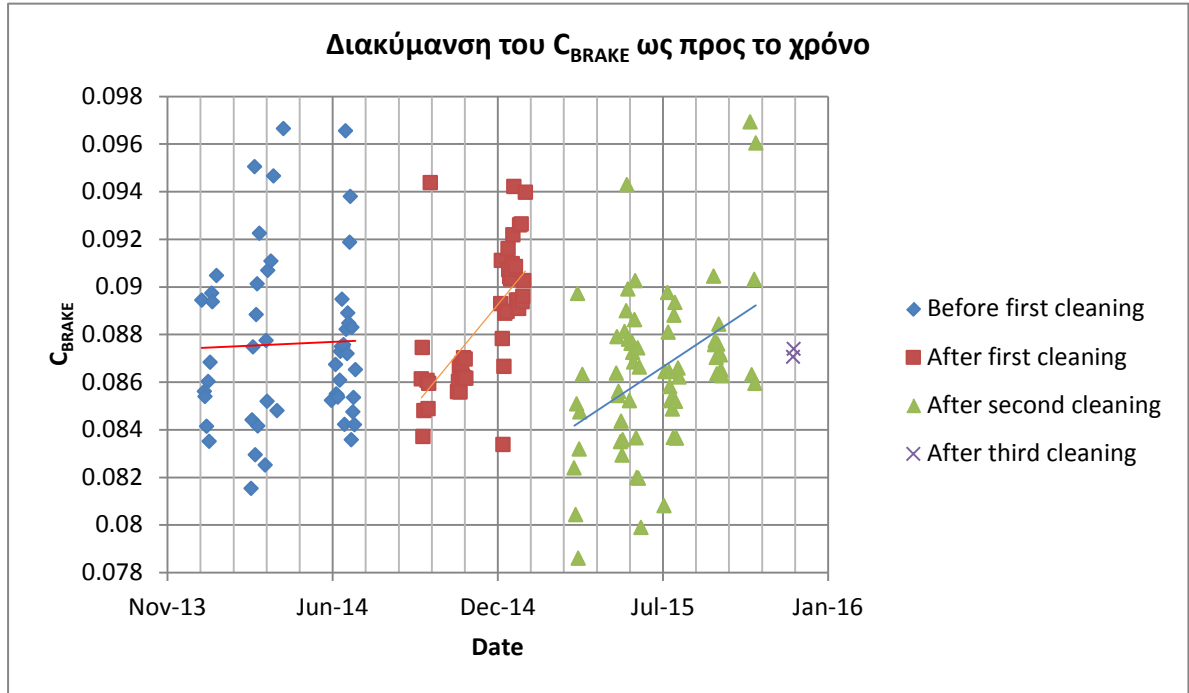
Τα αποτελέσματα της παρούσας εμπειρικής μεθοδολογίας για την εκτίμηση της SHP σε ήρεμο νερό σε σύγκριση με τα αποτελέσματα από την εκτέλεση των CFD και των Sea Trials παρουσιάζουν **πολύ ικανοποιητικές αποκλίσεις** ιδιαίτερα στην κατάσταση **FL1** (που είναι η συνήθης κατάσταση πλεύσης). Οι μικρές αποκλίσεις επέτρεψαν τη χρήση της παρούσας μεθοδολογίας για όλες τις καταστάσεις υπηρεσίας.

## 8.5 Επίδραση παραγόντων στη SHP

### 8.5.1 Επίδραση της ρύπανσης R<sub>FOUL</sub>

Γνωρίζοντας την ημερομηνία των καθαρισμών της γάστρας και με τη βοήθεια κυρίως της **σταθεράς της έλικας C<sub>BRAKE</sub>=SHP/RPM<sup>3</sup>** και δευτερευόντως μέσω του **C<sub>FOUL</sub>** θα **εκτιμηθεί η επίδραση της ρύπανσης της γάστρας**. Η C<sub>FOUL</sub> θα παρουσιάζει μικρότερη αξιοπιστία λόγω της μικρότερης ακρίβειας των δεδομένων καθώς εκεί εμπεριέχεται και η εκτίμηση της SHP. Στο Διάγραμμα 25 απεικονίζεται η μεταβολή του C<sub>BRAKE</sub> ως προς το χρόνο.

Όπως ήταν αναμενόμενο, η **τάση** είναι η **αύξηση των σταθερών C<sub>BRAKE</sub> και C<sub>FOUL</sub> μέχρι τον επόμενο καθαρισμό** και έπειτα πάλι απότομη πτώση. Ο χρόνος που κάνουν οι σταθερές να επανέλθουν στις προηγούμενες τιμές είναι περίπου **9 μήνες**. Επίσης, η μείωση του C<sub>BRAKE</sub> μετά από κάθε καθαρισμό είναι περίπου 5%, τιμή που είναι απόλυτα σύμφωνη με τη θεωρία της ρύπανσης της γάστρας.



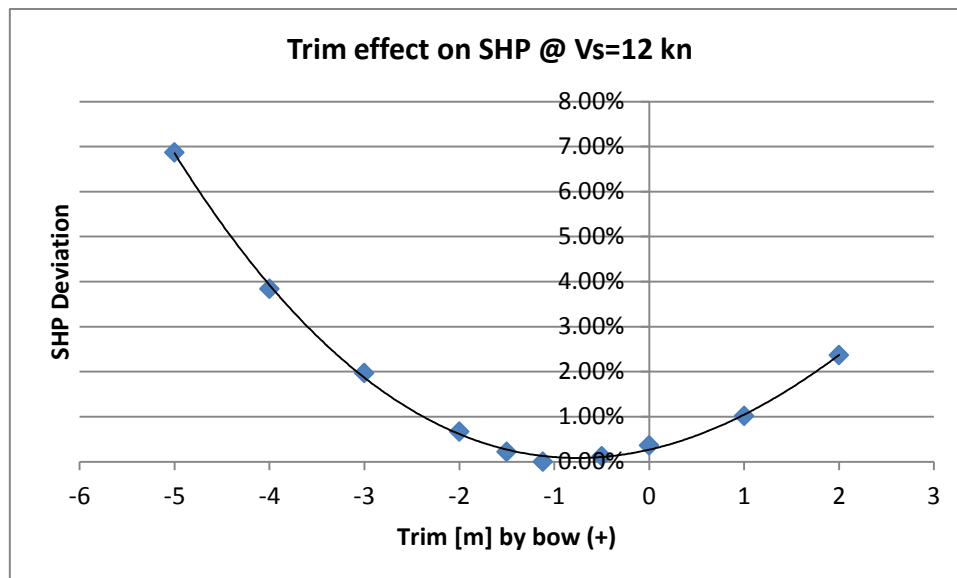
### 8.5.2 Επίδραση της διαγωγής

Η επίδραση της διαγωγής υπολογίστηκε για την ταχύτητα  $V_s=12$  kn στη full load condition, που είναι και η πιο συνηθισμένη ταχύτητα. Δεδομένου ότι όλες οι υδροστατικές τιμές που αλλάζουν με την αλλαγή της διαγωγής είναι γνωστές μέσω των γραμμών του πλοίου, υπολογίστηκε η επίδραση της διαγωγής στη SHP με βάση τις εμπειρικές μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν. Στο Διάγραμμα 27 παρουσιάζεται γραφικά η ποσοστιαία μεταβολή της SHP συναρτήσει της διαγωγής.

Η επίδραση της διαγωγής εκτιμήθηκε μόνο για τη full load condition, καθώς στη ballast condition με αλλαγή της διαγωγής προκύπτει είτε αερισμός της έλικας είτε μεγάλη αλλαγή της επίδρασης του βολβού στην αντίσταση. Και οι δύο περιπτώσεις θεωρήθηκαν περίπλοκες και η αρχική εκτίμηση που έγινε δεν έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα. Στη full load condition μικρές αλλαγές της διαγωγής ουσιαστικά δεν αφήνουν ουσιαστικά ανεπηρέαστη την SHP, σε αντίθεση με τη ballast condition η SHP δείχνει εντελώς αντίθετη τάση.

Τα πλοία σχεδιάζονται έτσι ώστε να πλέουν στη μικρότερη αντίσταση με μια μικρή διαγωγή προς την πρύμνη, οπότε και τα αποτελέσματα του παραπάνω διαγράμματος θεωρούνται ικανοποιητικά. Η διαγωγή κυρίως επηρεάζει τη βρεχόμενη επιφάνεια και δευτερευόντως τη δυναμική ροή γύρω από τη γάστρα. Κατά συνέπεια, η αντίσταση μεταβάλλεται, όπως επίσης και ο συντελεστής πρόωσης PC.

Οι μέθοδοι όμως που χρησιμοποιήθηκαν είναι εμπειρικές και η επίδραση της διαγωγής δεν μπορεί να εκτιμηθεί σωστά, καθώς οι μέθοδοι έχουν 'κατασκευαστεί' για τις συνήθεις καταστάσεις.

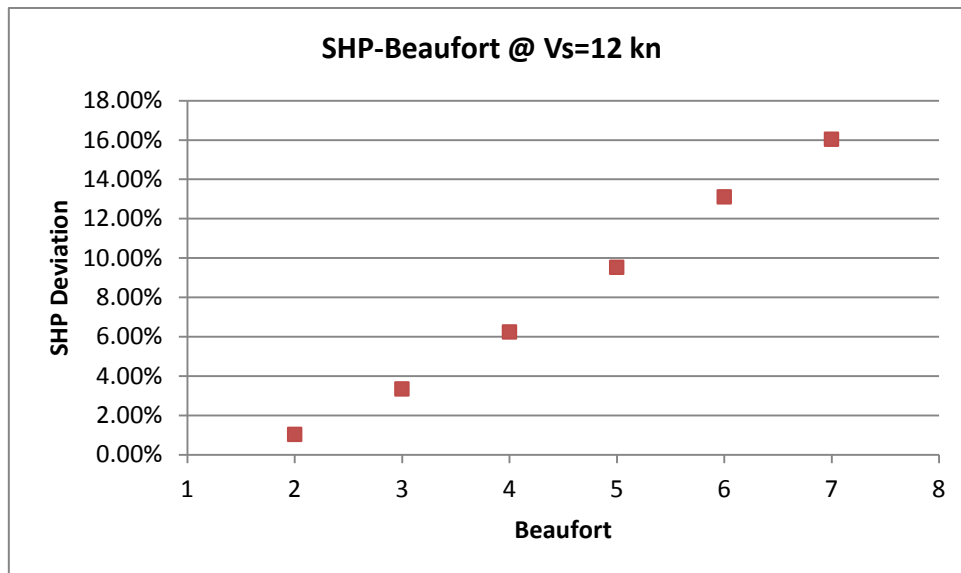


Διάγραμμα 27. Επίδραση της διαγωγής στη SHP στη  $V_s=12$  kn



### 8.5.3 Επίδραση της κατάστασης του καιρού

Όταν ένα πλοίο πλέει σε δυσμενείς καιρικές συνθήκες, αυξάνεται η αντίσταση ανέμου και η πρόσθετη αντίσταση κυματισμού, με αποτέλεσμα την αύξηση της SHP. Στο Διάγραμμα 28 παρουσιάζεται η **ποσοστιαία αύξηση της SHP** με την αύξηση της έντασης του ανέμου κατά μία μονάδα Beaufort. Η κατάσταση που εξετάστηκε είναι για **fully developed sea**, άπειρο βάθους νερού, full load condition και  $V_s=12$  kn.



Διάγραμμα 28. Ισχύς πρόωσης συναρτήσει της αύξησης της έντασης Beaufort κατά μία μονάδα τη φορά

### 8.5.4 Επίδραση στην κατανάλωση καυσίμου και προτάσεις για μείωση της ισχύος πρόωσης SHP

Όπως παρατηρήθηκε, η ισχύς πρόωσης σε ένα δεδομένο βύθισμα εξαρτάται κυρίως από τη ταχύτητα του πλοίου, τη ρύπανση της γάστρας, τη διαγωγή και την κατάσταση του καιρού. Μια **μείωση της ισχύος πρόωσης κατά 10%** αντιστοιχεί συνήθως σε μείωση της **κατανάλωσης του καυσίμου** περίπου κατά **8%**, λόγω της αύξησης της ειδικής κατανάλωσης σε χαμηλή φόρτιση της κύριας μηχανής. Δεδομένου ότι το εξεταζόμενο πλοίο αναλώνει ετησίως 15,000t καυσίμου, μια μείωση 8% στην κατανάλωση καυσίμου, συνεπάγεται μείωση των καυσίμων κατά 1,200t, άρα ετήσια εξοικονόμηση κεφαλαίου μεγαλύτερη από 300,000\$, δεδομένου ότι 1 μετρικός τόνος HFO κοστίζει περίπου 280\$.

Μέσω της ανάλυσης που έγινε, τα συμπεράσματα που είναι δυνατόν να εξαχθούν σχετικά με τη δυνατότητα μείωσης της SHP είναι τα παρακάτω:

- **Ταχύτητα του πλοίου**

Η μείωση εδώ επιτυγχάνεται με τη μείωση τη ταχύτητα πλεύσης (slow steaming), επειδή η SHP είναι ανάλογη της ταχύτητας στον κύβο και κατά συνέπεια μείωση της ταχύτητας από 13 kn σε 12 kn, δηλαδή 8.3%, αντιστοιχεί σε μείωση της SHP κατά 20% και της κατανάλωσης περίπου κατά 16% για δεδομένη διαδρομή ή 150,000\$ ετησίως.

- **Ρύπανση της γάστρας**

Η μείωση της SHP σε αυτή την περίπτωση, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, μπορεί να γίνει μέσω καθαρισμών της γάστρας και της έλικας και μέσω δεξαμενισμών. Στις εξεταζόμενες χρονιές δεν είχε γίνει δεξαμενισμός του πλοίου, οπότε εκτιμάται μόνο η επίδραση των καθαρισμών. Κάθε 9 μήνες η σταθερά της έλικας επιστρέφει στη τιμή που είχε πριν τον καθαρισμό και τότε θα πρέπει να γίνει ο νέος καθαρισμός. Η μείωση που επιτυγχάνεται αμέσως μετά τον καθαρισμό είναι περίπου 5% της SHP και 4% της κατανάλωσης.

- **Μεταβολή της διαγωγής**

Μέσω της αλλαγής της διαγωγής, η απαιτούμενη SHP μεταβάλλεται. Μέσω των διαγραμμάτων επίδρασης της διαγωγής, όπως το Διάγραμμα 27, μπορεί το πλοίο να πλέει σε βέλτιστη διαγωγή, ώστε να έχει τη μικρότερη δυνατή SHP.

- **Route Optimization**

Για την αποφυγή των δυσμενών καιρικών συνθηκών, γνωρίζοντας την επίδραση της κατάστασης του καιρού μέσω της ανάλυσης της εκτιμώμενης απαιτούμενης SHP και την πρόβλεψη του καιρού για τις ημέρες του ταξιδιού, γίνεται να εκτιμηθεί η βέλτιστη διαδρομή. Έτσι το πλοίο θα εκμεταλλευτεί τις ευνοϊκές καταστάσεις καιρού και θα αποφύγει όσο το δυνατόν τις δυσμενέστερες.

## 9 Συμπεράσματα και Προτάσεις

### 9.1 Συμπεράσματα εργασίας

Μέσα από αυτή την εργασία φάνηκε πως είναι δυνατή η ανάλυση της απαιτούμενης ισχύος πρόωσης (SHP) στις επιμέρους συνιστώσες, χρησιμοποιώντας δεδομένα από τα noon reports. Με την παραπάνω ανάλυση υπολογίστηκε η επίδραση των υπηρεσιακών και εξωτερικών παραγόντων στην SHP.

Η αντίσταση του πλοίου σε ήρεμο νερό ( $R_{CALM}$ ) αποτελεί την κύρια συνιστώσα της συνολικής αντίστασης, γι' αυτό υπολογίστηκε με συνδυασμό των αποτελεσμάτων των Sea Trials, της εμπειρικής μεθόδου Holtrop και μέσω της χρήσης CFD. Οι αποκλίσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων και των τριών μεθόδων ήταν αποδεκτές και έτσι έγινε δυνατό να υπολογιστεί η  $R_{CALM}$  για όλες τις καταστάσεις μέσω της μεθόδου Holtrop.

Επίσης, παρουσιάστηκε η σημασία της εκτίμησης της πρόσθετης αντίστασης κυματισμού ( $R_{AW}$ ) και κυρίως της συνιστώσας που οφείλεται στην ανάκλαση των κυματισμών ( $R_{AWR}$ ), καθώς ένα VLCC πλοίο συναντά μικρά κύματα ως προς το μήκος του. Γι' αυτό το λόγο, η  $R_{AWR}$  υπολογίστηκε μέσω της ημι-εμπειρικής μεθόδου Liu et al. (2016), ενώ η συνιστώσα που οφείλεται στις κινήσεις του πλοίου ( $R_{AWM}$ ), υπολογίστηκε μέσω της απλοποιημένης εξίσωσης Liu et al. (2015).

Η δυσκολία που παρουσιάστηκε, αφορούσε στην αξιοπιστία των δεδομένων εισόδου στις μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των συνιστωσών της αντίστασης ( $R_{CALM}$ ,  $R_{AW}$ , ανέμου  $R_{AA}$ ). Για να βελτιωθεί η αξιοπιστία κρίθηκε αναγκαίο το φιλτράρισμα των δεδομένων που προέκυπταν από τα noon reports και ο υπολογισμός των δεδομένων που έλειπαν, όπως η πυκνότητα του νερού, η επιτάχυνση της βαρύτητας, τα χαρακτηριστικά του κύματος και τα υδροστατικά μεγέθη.

Όμως η πιο σημαντική ανακρίβεια των δεδομένων εισόδου ήταν ότι οι μετρήσεις που καταγράφονταν αναφορικά με την κατάσταση του καιρού και τα ρεύματα αφορούσαν τη στιγμή της μέτρησης, με αποτέλεσμα σε περίπτωση έντονων διακυμάνσεων στις τιμές να μην μπορούν να εκτιμηθούν.

Αναφορικά με τα αποτελέσματα, αναλύθηκε η απαιτούμενη SHP με ποσοστό λάθους περίπου ίσο με 10%, το οποίο οφείλεται στην αναξιπιστία των μετεωρολογικών δεδομένων, που αναφέρθηκε παραπάνω και των χαρακτηριστικών του κύματος, όπου η επίδραση του βάθους του νερού και η απόσταση που διανύεται από τον άνεμο και τα κύματα από τη δημιουργία τους (fetch length) δεν μπορούσαν να εκτιμηθούν

Με την αύξηση της ταχύτητας του πλοίου για δεδομένη κατάσταση φόρτωσης, η  $R_{CALM}$ , όπως αναμενόταν, αυξανόταν στο τετράγωνο σε σχέση με την  $R_{AA}$  και την  $R_{AW}$ , που αυξάνονταν σχεδόν γραμμικά. Επίσης, φάνηκε η επίδραση της έντασης του ανέμου και της διαγωγής στην αύξηση της SHP. Γνωρίζοντας την επίδραση των δύο παραπάνω μεγεθών, δύναται να επιλεγεί η βέλτιστη διαγωγή και η βέλτιστη διαδρομή (route optimization).

Σχετικά με τη ρύπανση της γάστρας και της έλικας, οι τάσεις που παρατηρήθηκαν ήταν η αύξηση του  $C_{BRAKE}$  και του  $C_{FOUL}$  μέχρι τον επόμενο καθαρισμό και έπειτα απότομη ελάττωση. Παρατηρήθηκε, ότι η επίδραση της ρύπανσης μετά από περίοδο 9 μηνών συνεχής πλεύσης από το τελευταίο καθαρισμό, έφτανε την κατάσταση πριν τον καθαρισμό. Η συγκεκριμένη τάση οφείλεται επίσης σε πολλούς παράγοντες, όπως η θάλασσα πλεύσης, το είδος των υφαλοχρωμάτων, η ποιότητα του καθαρισμού κ.α.

Τελικά, συμπεραίνεται ότι πέρα από το slow steaming είναι δυνατή η μείωση της κατανάλωσης καυσίμου μέσω της επιλογής της βέλτιστης διαδρομής, της βέλτιστης διαδρομής και ενός κατάλληλου προγραμματισμού για τους καθαρισμούς και τους δεξαμενισμούς, αρκεί να γίνεται προηγουμένως ανάλυση της SHP σε επιμέρους συνιστώσες, χρησιμοποιώντας αξιόπιστα δεδομένα.

### 9.2 Προτάσεις για μελλοντικές εργασίες

Καταρχάς, η μελλοντική εργασία θα μπορούσε να αποσκοπεί στην ανάπτυξη ενός software, που θα υπολογίζει την βέλτιστη διαδρομή και διαγωγή χρησιμοποιώντας την παρούσα μέθοδο για την ανάλυση της απαιτούμενης SHP. Με αυτό τον τρόπο θα γίνεται άμεση πρόταση για διόρθωση της διαγωγής και της βέλτιστης διαδρομής.

Επίσης, η βελτίωση της παρούσας μεθόδου μπορεί να μελετηθεί σε μελλοντική εργασία. Ο κύριος άξονας αυτής της εργασίας προτείνεται να είναι η βελτίωση των μεθόδων υπολογισμού των συντελεστών πρόωσης, των χαρακτηριστικών του κύματος και της επίδρασης της διαγωγής στην ισχύ πρόωσης.

Ακόμα, σε μελλοντική εργασία μπορεί να υπολογιστεί με την παρούσα μέθοδο η επίδραση της ρύπανσης της γάστρας και της έλικας σε βάθος χρόνου και σε μεγαλύτερο αριθμό πλοίων. Έτσι, θα καταδειχθεί η επίδραση των καθαρισμών, των δεξαμενισμών και των υφαλοχρωμάτων που χρησιμοποιούνται και θα εκτιμηθεί ο κατάλληλος προγραμματισμός συντήρησης για τη μείωση της επίδρασης της ρύπανσης.

Τέλος, ενδιαφέρον παρουσιάζει η εκπόνηση μιας μελέτης, που θα εξετάζει την μέγιστη εξοικονόμηση καυσίμων που θα μπορούσε να επιτευχθεί μέσω της διαφοράς της πραγματικής διαδρομής και διαγωγής από τις αντίστοιχες βέλτιστες, αν είναι γνωστά η διαγωγή του πλοίου και η κατάσταση του καιρού και των ρευμάτων για όλη την περιοχή γύρω από τη διαδρομή πλεύσης.

## 10 Βιβλιογραφία

1. **Lewis, E. V.** *Principles of Naval Architecture 2nd Revision Volume II Resistance, Propulsion and Vibration.* New Jersey, USA : SNAME, 1988.
2. **Harvald, A. S.** *Resistance and Propulsion of Ships.* Lyngby, Denmark : John Wiley & Sons, 1983.
3. **Πολίτης, Γ. Κ.** *Σημειώσεις μαθήματος: «Αντίστασης και Πρόωσης Πλοίου».* Αθήνα : Ε.Μ.Π., 2011.
4. **Journée, J. M.J. και Pinkster, J.** *Journée J.M.J. and Pinkster J. (2002), 'Introduction to ship hydrodynamics.* Delft, Netherlands : Delft University of Technology, 2002.
5. **Alexandersson, Martin.** *A study of methods to predict added resistance in waves.* Stockholm, Sweden : KTH Centre for Naval Architecture, 2009.
6. **Solé Rebull, Miquel.** *Powering a Vessel in a Seaway.* Barcelona : Universitat Politècnica de Catalunya, 2014.
7. **IMO. MEPC.1/Circ.796.** 2012.
8. **Liu, S., Papanikolaou, A. και Zaraphonitis, G.** *Practical approach to the added resistance of a ship in short waves.* Athens : Ship Design Laboratory, National Technical University of Athens, 2015.
9. **Bolbot, Victor.** *Optimization of Ship's Hull Form.* Athens : National Technical University of Athens, 2015.
10. **IMO. Anti-fouling systems.** 2002.
11. **Krapp, A. και Vranakis, G.** *A Practical Way to Evaluate the In-Service Performance of Antifouling Coatings.* Athens : SNAME, 2013.
12. **Schmidt, Ernst και Grigul, Ulrich.** *Πίνακες ιδιοτήτων νερού υδρατμού.* Αθήνα : Φούντας.
13. **Global Lab Studies.** *Water Dissolves.* Massachusetts, USA : Concord, 2010.
14. **Whitmarsh, F., Zika, J. και Czaja, A.** *Ocean heat uptake and the global surface temperature record.* London : Imperial College, 2015.
15. **EL-Dessouky, T. και Ettouney, H. M.** *Fundamentals of Salt Water Desalination.* Amsterdam, Netherlands : Elsevier, 2002.
16. **Norley, W.H.** *Shallow Water Effect on the Performance of Single-Screw Vessels of U.S.* USA : Maritime Commission Design, Determined from Resistance, Propulsion, and Sinkage Tests of Models, 1948.

17. **Schlichting, O.** *Ship Resistance in Water of Limited Depth—Resistance of Sea-Going Vessels in Shallow Water*. s.l. : Jahrbuch der STG, 1934.
18. **Kovanen, Lauri.** *Study of Hull Fouling on cruise vessels across various seas*. Helsinki, Finland : ENIRAM, 2012.
19. **Tzabiras, G. D. και Kontogiannis, K.** *An integrated method for predicting the hydrodynamic performance of low C<sub>b</sub> ships*. Athens : Computer Aided Design Journal, 2011.
20. **Sinnott, R. W.** *Virtues of the Haversine*. Florida, USA : Sky and Telescope, 1984.
21. **Holtrop, J. και Mennen, G. G.J.** *An approximate power prediction method*. Delft, Netherlands : International Shipbuilding Progress, 1982.
22. **Tzabiras, G. D.** *A method of predicting the influence of an additive bulb on ship resistance*. Nantes, France : 8th International Conference on Hydrodynamics, 2008.
23. **Tzabiras, George D. και Psaras, Kyriakos G.** *Numerical Simulation of self-propulsion test of a product-carrier at various conditions*. Athens : NTUA, 2014.
24. **Fujiwara, T., Ueno, M. και Ikeda Y.** *A New Estimation Method of Wind Forces and Moments acting on Ships on the basis of Physical Component Models*. Tokyo, Japan : J. JASNAOE, 2005.
25. **ITTC.** *Speed and Power Trials, Part 2 Analysis of Speed/Power Trial Data*. 2012.
26. **Liu, S. και Papanikolaou, A.** *Prediction of the Added Resistance of Ships in Oblique Seas*. Athens : Ship Desing Laboratory, National Technical University of Athens, 2016.
27. **Menter, F.** *Zonal two equation turbulence models for aerodynamic flows*. Florida, USA : 24th Fluid Dynamics Conference, 1993.

## Παράρτημα Α Λόγος Ολίσθησης της έλικας

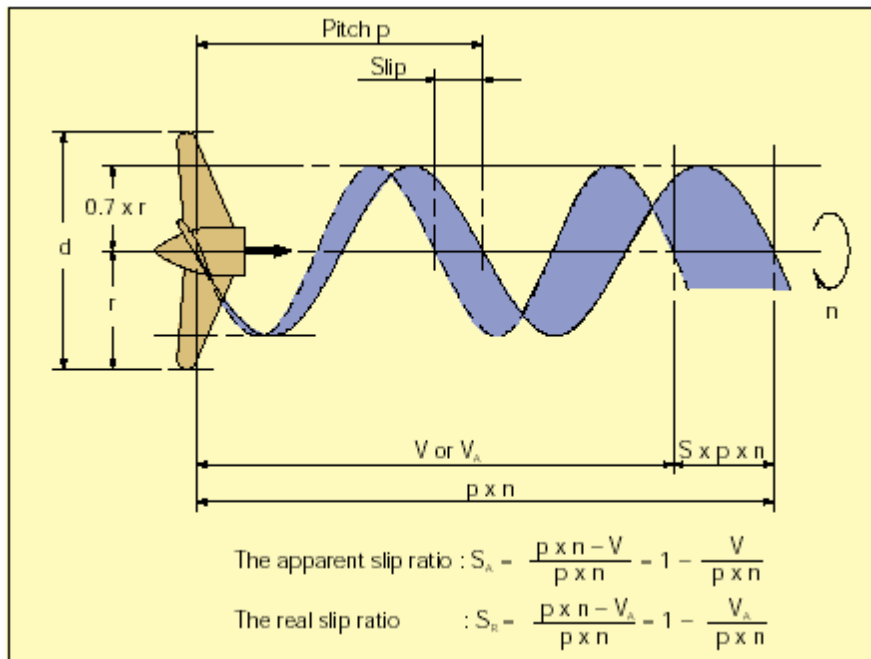
Η ολίσθηση της έλικας ορίζεται ως η υποχώρηση του νερού ως προς την έλικα, δηλαδή το νερό επιταχύνεται προς τα πίσω. Το βήμα P είναι η απόσταση που η έλικα με κάθε περιστροφή της θα πρέπει να προχωράει προς τα μπροστά μέσα στο νερό. Αν η έλικα βρίσκεται μέσα σε ένα μαλακό στερεό υλικό όπου η ολίσθηση είναι μηδενική, τότε θα κινείται προς τα εμπρός με ταχύτητα  $V=P \cdot N$ .

Αντίθετα όμως το νερό είναι ρευστό και υποχωρεί, η ταχύτητα προχώρησης της έλικας μειώνεται και γίνεται ίδια με του πλοίου. Έτσι ορίζεται ο φαινόμενος λόγος ολίσθησης ως:

$$S_A = \frac{P \cdot N - V}{P \cdot N} = 1 - \frac{V}{P \cdot N} \tag{A-1}$$

Ο πραγματικός λόγος ολίσθησης της έλικας είναι μεγαλύτερος από τον φαινόμενο, καθώς η πραγματική ταχύτητα προχώρησης της έλικας  $V_A$  είναι μικρότερη από τη ταχύτητα του πλοίου. Έτσι ορίζεται ο πραγματικός λόγος ολίσθησης  $S_R$ :

$$S_R = 1 - \frac{V_A}{P \cdot N} = 1 - \frac{V \cdot (1 - w)}{P \cdot N} \tag{A-2}$$



Εικόνα 36. Λόγος ολίσθησης έλικας

Ο λόγος ολίσθησης της έλικας επηρεάζεται από τα φορτία που δέχεται η έλικα σε διάφορες καταστάσεις θάλασσας. Ο λόγος ολίσθησης αυξάνεται περαιτέρω όταν το

σκάφος πλέει αντίθετα στον άνεμο, τα κύματα και τα ρεύματα, όταν η γάστρα είναι ρυπασμένη, σε επιταχύνσεις του πλοίου και σε ρηχά νερά. Αντίθετα σε ευνοϊκό καιρό μειώνεται και μπορεί σε σπάνιες περιπτώσεις να είναι και αρνητικός.

Οι λόγοι ολίσθησης δίνονται ως ποσοστά επί τοις εκατό. Στις δοκιμές στην αποβάθρα, όταν το πλοίο έχει μηδενική ταχύτητα οι δύο λόγοι ολίσθησης είναι 100%.



## Παράρτημα Β Μέθοδος Holtrop

Η μέθοδος **Holtrop** υπολογίζει την **ολική αντίσταση** σε ήρεμο νερό ως:

$$R_{calm} = R_F(1 + k_1) + R_{APP} + R_W + R_B + R_{TR} + R_A [N] \quad B-1$$

**Όπου:**

$R_F$ : Η αντίσταση συνεκτικότητας [N]

$f$ : Ο συντελεστής μορφής του πλοίου

$R_{APP}$ : Η αντίσταση παρελκόμενων [N]

$R_W$ : Η αντίσταση κυματισμού [N]

$R_B$ : Η αντίσταση που οφείλεται στην ύπαρξη βολβού [N]

$R_{TR}$ : Η αντίσταση που οφείλεται σε βυθισμένη πρύμνη καθρέφτη [N]

$R_A$ : Η αντίσταση διόρθωσης μοντέλου-πλοίου [N]

Οι επιμέρους συνιστώσες και συντελεστές για ένα πλοίο VLCC υπολογίζεται ως εξής:

- Ο **συντελεστής μορφής** του πλοίου υπολογίζεται ως:

$$1 + k_1 = c_{13} \cdot \left( 0.93 + c_{12} \cdot \left( \frac{B}{L_R} \right)^{0.92497} \cdot (0.95 - C_p)^{-0.521448} \cdot (1 - C_p + 0.0225 \cdot lcb)^{0.6906} \right) \quad B-2$$

**Όπου:**

$$L_R = L_{WL} \cdot (1 - C_p + 0.06 \cdot C_p \cdot lcb / (4 \cdot C_p - 1)) [m]$$

$L_{WL}$ : Το μήκος της ισάλου γραμμής [m]

$C_p$ : Ο πρισματικός συντελεστής του πλοίου

$lcb$ : Η διαμήκης θέση του κέντρου άντωσης από το μεσαίο νομέα [m]

$$c_{13} = 1 + 0.003 \cdot C_{STERN}$$

$C_{STERN} = 10$  για νομείς τύπου U

Ο συντελεστής  $c_{12}$  ορίζεται ως:

$$c_{12} = \left(\frac{T}{L}\right)^{0.2228446}, \text{ όταν } \frac{T}{L} > 0.05$$

$$c_{12} = 48.20 \cdot \left(\frac{T}{L} - 0.02\right)^{2.078} + 0.479948, \text{ όταν } 0.02 < \frac{T}{L} < 0.05$$

$$c_{12} = 0.479948, \text{ όταν } \frac{T}{L} < 0.02$$

- Η αντίσταση συνεκτικότητας υπολογίζεται ως:

$$R_F = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S \cdot C_F \quad [N] \quad \text{B-3}$$

Όπου:

$\rho$ : Η πυκνότητα του νερού [kg/m<sup>3</sup>]

$V$ : Η ταχύτητα του πλοίου [m/s]

$S$ : Η βρεχόμενη επιφάνεια [m<sup>2</sup>]

$$C_F = 0.075 / (\log_{10}(\text{Re}) - 2)^2$$

$\text{Re} = \frac{V \cdot L}{\nu}$ , ο αριθμός Reynolds του πλοίου

- Η αντίσταση λόγω παρελκόμενων υπολογίζεται ως:

$$R_{APP} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S_{APP} \cdot (1 + k_2) \cdot C_F \quad [N] \quad \text{B4}$$

Όπου:

$S_{APP}$ : Η βρεχόμενη επιφάνεια των παρελκόμενων

$k_2 = 1.5$ , για ένα κλασσικό πλοίο VLCC

- Η αντίσταση κυματισμού ορίζεται ως:

$$R_w = c_1 \cdot c_2 \cdot c_5 \cdot \nabla \cdot \rho \cdot g \cdot e^{m_1 \cdot F_n^d + m_2 \cdot \cos(\lambda \cdot F_n^{-2})} \quad [N] \quad \text{B-5}$$

Όπου:

$F_n = \frac{V}{\sqrt{g \cdot L}}$ , ο αριθμός Froude του πλοίου

$d = 0.9$

$$c_1 = 2223105 \cdot c_7^{3.78613} \cdot \left(\frac{T}{B}\right)^{1.07691} \cdot (90 - i_E)$$

$i_E$ : Η γωνία εισόδου στην ίσαλο γραμμή [°]

$$c_7 = \frac{B}{L_{WL}}$$

$$c_2 = e^{-1.89\sqrt{c_3}}$$

$$c_5 = 1 - 0.8 \frac{A_T}{B \cdot T \cdot C_M}$$

$A_T$ : Εμβαδόν βυθισμένης πρύμνης καθρέφτη [m<sup>2</sup>]

$C_M$ : Συντελεστής μέσης Τομής

$$\lambda = 1.446 \cdot C_p - 0.03 \cdot \frac{L}{B}$$

$$m_1 = 0.0140407 \cdot \frac{LWL}{T} - 1.75254 \cdot \frac{\nabla^{\frac{1}{3}}}{LWL} - 4.79323 \cdot \frac{B}{LWL} - c_{16}$$

$$c_{16} = 8.07981 \cdot C_p - 13.8673 \cdot C_{p^2} + 6.984388 \cdot C_p^3, \text{ όταν } C_p < 0.80$$

Αλλιώς,

$$c_{16} = 1.73014 - 0.7067 \cdot C_p$$

$$m_2 = c_{15} \cdot C_p^2 \cdot e^{(-0.1 \cdot Fn^{-2})}$$

$$c_{15} = -1.69385, \text{ όταν } \frac{L^3}{\nabla} < 512$$

$$c_{15} = -1.69385 + \frac{\frac{LWL}{\nabla^{\frac{1}{3}}} - 8}{2.36}, \text{ όταν } 512 < \frac{L^3}{\nabla} < 1727$$

Αλλιώς,

$$c_{15} = 0$$

- Η αντίσταση που οφείλεται στην ύπαρξη **βολβού** υπολογίζεται ως:

$$R_B = 0.11 \cdot e^{-3 \cdot P_b^{-2}} \cdot Fni^3 \cdot A_{BT}^{1.5} \cdot \rho \cdot \frac{g}{1 + Fni^2} \quad [N] \quad B-6$$

Όπου:

$$P_b = 0.56 \cdot \frac{\sqrt{A_{BT}}}{T - 1.5 \cdot hb}$$

$$Fni = \frac{V}{\sqrt{g \cdot (T - hb - 0.25 \cdot \sqrt{A_{BT}}) + 0.15 \cdot V^2}}$$

$A_{BT}$ : Το εμβαδόν επιφάνειας του βυθισμένου βολβού

- Η αντίσταση που οφείλεται σε **βυθισμένη πρύμνη καθρέφτη** υπολογίζεται ως:

$$R_{TR} = 0.5 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A_T \cdot c_6 \quad \text{B-7}$$

Όπου:

$$c_6 = 0.2 \cdot (1 - 0.2 \cdot F_{nt}), \text{όταν } F_{nt} < 5$$

$$c_6 = 0, \text{όταν } F_{nt} \geq 5$$

$$F_{nt} = \frac{V}{\sqrt{2 \cdot g \cdot \frac{A_T}{B + B \cdot C_{wp}}}}$$

➤ Τέλος η αντίσταση διόρθωσης μοντέλου-πλοίου υπολογίζεται ως:

$$R_A = 0.5 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S \cdot C_A \quad [N] \quad \text{B-8}$$

Όπου:

$$C_A = 0.006 \cdot (L_{WL} + 100)^{-0.16} - 0.00205 + 0.003 \cdot \sqrt{\frac{L_{WL}}{7.5}} \cdot C_B^4 \cdot c_2 \cdot (0.04 - c_4)$$

$$c_4 = 0.04, \text{όταν } \frac{T_F}{L_{WL}} > 0.04$$

Αλλιώς

$$c_4 = \frac{T_F}{L_{WL}}$$

$T_F$ : Το πρωραίο βύθισμα [m]

$C_B$ : Ο συντελεστής γάστρας του πλοίου