



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΗΧΑΝΩΝ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ

Ανάπτυξη Μεθοδολογίας Διόρθωσης της Ισχύος Πρόωσης
Ναυτικών Κινητήρων Diesel Λόγω των Συνθηκών Πλεύσης με
Χρήση Λειτουργικών Δεδομένων

Διπλωματική Εργασία

Παστρομάς Κωνσταντίνος

Επιβλέπων: Δημήτριος Χουντάλας

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Ιούνιος 2018

Πρόλογος

Με την περάτωση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας κλείνει ο κύκλος των σπουδών μου στο τμήμα των Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου. Ήταν μια περίοδος της ζωής μου για την οποία θα μπορούσα να γράψω πολλές σελίδες αλλά αυτός δεν είναι ο στόχος την παρούσα χρονική στιγμή. Από αυτήν την περίοδο θα ήθελα να κρατήσω τις θετικές στιγμές, δηλαδή τις γνώσεις, τους φίλους αλλά και τα ερεθίσματα που αποκόμισα.

Υπεύθυνοι για αυτές τις γνώσεις και τα ερεθίσματα είναι όλοι οι καθηγητές του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών τους οποίους και θα ήθελα να ευχαριστήσω από τα βάθη της καρδιάς μου. Ειδική μνεία πρέπει να γίνει στον επιβλέποντα καθηγητή της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, κύριο Δ.Θ Χουντάλα, ο οποίος μου έδωσε την δυνατότητα να ασχοληθώ με ένα ενδιαφέρον θέμα που συνδυάζει την ναυτιλία και τις μηχανές εσωτερικής καύσης. Επίσης ιδιαίτερη μνεία πρέπει να γίνει στον επιστημονικό συνεργάτη του εργαστηρίου Μ.Ε.Κ, Α.Κ Αντωνόπουλο, ο οποίος με βοήθησε έμπρακτα καθοδηγώντας με σε κάθε φάση αυτής της διαδικασίας. Οι γνώσεις του αποτέλεσαν έναν πολύτιμο σύμμαχο στην προσπάθεια ολοκλήρωσης αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Σοφία και Ανδρέα, οι οποίοι με στήριξαν τόσο υλικά όσο και ψυχολογικά κατά την διάρκεια των σπουδών μου. Η διπλωματική μου αφιερώνεται σε αυτούς καθώς χωρίς την στήριξη τους τίποτα από αυτά που προανέφερα δεν θα ήταν εφικτό.

Παστρουμάς Κωνσταντίνος

Αθήνα 2018



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΗΧΑΝΩΝ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ

Ανάπτυξη Μεθοδολογίας Διόρθωσης της Ισχύος Πρόωσης Ναυτικών Κινητήρων Diesel Λόγω των Συνθηκών Πλεύσης με Χρήση Λειτουργικών Δεδομένων

Διπλωματική Εργασία

Παστρομάς Κωνσταντίνος

Επιβλέπων: Δημήτριος Χουντάλας

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Ιούνιος 2018

Περίληψη

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας, αναπτύχθηκε μεθοδολογία η οποία θα λαμβάνει τα πραγματικά λειτουργικά δεδομένα ενός πλοίου και θα διορθώνει τις τιμές ισχύος και ταχύτητας του, εξαλείφοντας την επιρροή των καιρικών φαινομένων. Αρχικά γίνεται λεπτομερής παρουσίαση του μοντέλου διόρθωσης και στην συνέχεια εφαρμογή του και σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα δεδομένα που προέρχονται από την κατασκευάστρια εταιρεία.

Πιο συγκεκριμένα, περιγράφονται τα φαινόμενα τα οποία προκαλούν πρόσθετη αντίσταση στο πλοίο κατά την πλεύση του αλλά και τα φαινόμενα που προκαλούν απώλεια της ταχύτητας του. Έχοντας τα πραγματικά λειτουργικά δεδομένα ενός πλοίου, που περιγράφουν τόσο την απόδοση του όσο και το περιβάλλον στο οποίο αυτό πλέει, καλούμαστε να υπολογίσουμε την πρόσθετη αντίσταση αλλά και την απώλεια της ταχύτητας την οποία υφίσταται το πλοίο και να διορθώσουμε τις δεδομένες τιμές της ισχύος και της ταχύτητας.

Με βάση την μεθοδολογία που αναπτύχθηκε, έγινε ανάπτυξη λογισμικού σε γλώσσα προγραμματισμού Fortran. Για τον έλεγχο της λειτουργίας του λογισμικού, έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από το λογισμικό διόρθωσης με τις τιμές των μετρήσεων της κατασκευάστριας εταιρείας του πλοίου κατά τις πειραματικές δοκιμές σε δεξαμενή (tank tests) αλλά και κατά τις δοκιμές θαλάσσης του (sea trials).

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή.....	1
1.1 Εισαγωγικά σχόλια	1
1.2 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας.....	2
1.3 Δομή της διπλωματικής εργασίας.....	3
2. Σύντομη παρουσίαση των βασικών αρχών αντίστασης και πρόωσης ενός πλοίου	5
2.1 Το περιβάλλον του πλοίου	5
2.1.1 Γενικά χαρακτηριστικά αέρα και νερού στον ωκεανό	5
2.1.2 Γενικά χαρακτηριστικά κυμάτων	7
2.2 Αντίσταση του πλοίου κατά την πλεύση του	10
2.2.1 Εισαγωγή.....	10
2.2.2 Αντίσταση τριβής	11
2.2.3 Υπολειπόμενη αντίσταση	12
2.2.4 Αντίσταση λόγω του αέρα	13
2.2.5 Συνολική αντίσταση και πρόσθετη αντίσταση κατά την πλεύση του πλοίου	13
2.3 Πρόωση του πλοίου.....	14
2.3.1 Εισαγωγή.....	14
2.3.2 Βασικές αρχές βραδύστροφων ναυτικών κινητήρων Diesel.....	15
2.3.3 Τύποι ελίκων	19
2.3.4 Συνθήκες ροής γύρω από την έλικα και συντελεστές απόδοσης του συστήματος πρόωσης.....	20
2.3.5 Νόμος της έλικας	23
3. Μέθοδοι υπολογισμού της πρόσθετης αντίστασης κατά την πλεύση του πλοίου	25
3.1 Εισαγωγή.....	25
3.2 Μέθοδοι υπολογισμού πρόσθετης αντίστασης λόγω κυμάτων.....	26
3.2.1 Γενικές αρχές πρόσθετης αντίστασης λόγω κυμάτων	26
3.2.2 Παρουσίαση μεθόδων υπολογισμού της πρόσθετης αντίστασης λόγω κυμάτων.....	28
3.2.3 Συγκριτική αξιολόγηση των μεθόδων υπολογισμού της πρόσθετης αντίστασης λόγω κυμάτων	29
3.3 Μέθοδοι υπολογισμού της πρόσθετης αντίστασης λόγω ανέμων.....	30

3.4	Μέθοδος υπολογισμού της πρόσθετης αντίστασης λόγω της πυκνότητας του νερού.....	31
4.	Παρουσίαση της προτεινόμενης μεθόδου διόρθωσης της ισχύος και της ταχύτητας πλεύσης του πλοίου	33
4.1	Παρουσίαση του διαγράμματος ροής της μεθόδου διόρθωσης.....	33
4.2	Περιγραφή της μεθόδου διόρθωσης της ισχύος και της ταχύτητας πλεύσης του πλοίου	35
4.2.1	Περιγραφή των δεδομένων εισόδου	35
4.2.2	Υπολογισμός των βοηθητικών λειτουργικών παραμέτρων	37
4.2.3	Υπολογισμός της πρόσθετης αντίστασης λόγω κυμάτων.....	40
4.2.4	Υπολογισμός της πρόσθετης αντίστασης λόγω των ανέμων.....	45
4.2.5	Υπολογισμός της απώλειας ταχύτητας πλεύσης λόγω κίνησης σε αβαθή νερά.....	51
4.2.6	Υπολογισμός της απώλειας ταχύτητας πλεύσης λόγω καιρικών συνθηκών.....	52
4.2.7	Υπολογισμός των διορθωμένων τιμών ισχύος και ταχύτητας πλεύσης του πλοίου	54
5.	Εφαρμογή της μεθόδου διόρθωσης και σύγκριση με τα δεδομένα των μετρήσεων... 57	57
5.1	Γενικά χαρακτηριστικά των πλοίων από τα οποία λήφθηκαν τα δεδομένα των μετρήσεων	57
5.2	Περιγραφή των δεδομένων των μετρήσεων.....	59
5.3	Παρουσίαση αποτελεσμάτων της διόρθωσης των σημείων που επιλέχθηκαν	61
5.3.1	Παρουσίαση αποτελεσμάτων της μεθόδου διόρθωσης για το πλοίο A	62
5.3.2	Παρουσίαση αποτελεσμάτων της μεθόδου διόρθωσης για το πλοίο B.	64
6.	Συμπεράσματα-Επίλογος.....	67
	Παράρτημα-Υπολογιστικός κώδικας.....	69
	Βιβλιογραφία.....	99

Κεφάλαιο 1

1. Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγικά σχόλια

Διαχρονικά, στην κατασκευή των πλοίων, η απόδοση τους στους τομείς της ταχύτητας και της ισχύος ήταν ένας από τους βασικότερους πυλώνες σχεδίασης. Τα ιστοφόρα των παλαιότερων εποχών υποβάλλονταν σε αγώνες προκειμένου να συγκριθούν οι ταχύτητες τους σε κοινές περιβαλλοντικές συνθήκες. Με την ανακάλυψη της ατμομηχανής και της εφαρμογής της στα πλοία, η σύγκριση πήγε ένα βήμα παρακάτω και είχαμε τις πρώτες δοκιμές ταχύτητας σε απόσταση ενός «μετρημένου» ναυτικού μιλίου. Η ταχύτητα υπολογιζόταν απλά μετρώντας τον χρόνο που χρειαζόταν το πλοίο να διανύσει την συμφωνημένη απόσταση.

Στις μέρες μας, με την διαθεσιμότητα του GPS, η ανάγκη για συμφωνημένες αποστάσεις έχει εξαλειφθεί και οι δοκιμές ταχύτητας και ισχύος διεξάγονται σε οποιαδήποτε μέρος στον κόσμο. Η σημασία αυτών των δοκιμών έχει αυξηθεί ραγδαία. Ο κύριος στόχος των δοκιμών ταχύτητας και ισχύος είναι να καθορίσουν την απόδοση του πλοίου στους τομείς της ταχύτητας, της ισχύος και των στροφών της έλικας κάτω υπό ορισμένες ιδανικές συνθήκες λειτουργίας του πλοίου, επαληθεύοντας κατά αυτόν τον τρόπο την ικανοποιητική επίτευξη της ταχύτητας του πλοίου που ορίζει το συμβόλαιο μεταξύ της πλοιοκτήτριας και της κατασκευάστριας εταιρείας. Μέσω της επίτευξης αυτής είναι δυνατόν να υπολογιστεί και το Energy Efficiency Index(EEDI) όπως απαιτείται από την IMO. Το EEDI ισούται με την ισχύ που φτάνει στο άξονα της προπέλας του πλοίου αν αυτή διαιρεθεί με το γινόμενο της ταχύτητας και του εκποπίσματος στο μέγιστο βύθισμα του πλοίου για το 75% MCR του κινητήρα. Η ταχύτητα πλοίου, η οποία ορίζεται στο συμβόλαιο, αλλά και η ταχύτητα για το EEDI αναφέρονται σε συγκεκριμένα βυθίσματα πλοίου(βύθισμα συμβολαίου και EEDI βύθισμα) και για ιδανικές περιβαλλοντικές συνθήκες, δηλαδή για περιβάλλον χωρίς ανέμους, θάλασσα χωρίς κύματα και ρεύματα και επαρκές βάθος νερού. Όπως είναι φυσικό, τέτοιες προβλεπόμενες συνθήκες είναι πολύ δύσκολο να συναντηθούν κατά την διάρκεια των πραγματικών δοκιμών στην θάλασσα. Στην πράξη πρέπει να υπάρξουν διορθώσεις για τις συνθήκες περιβάλλοντος, όπως το βάθος του νερού, ο άνεμος, τα κύματα αλλά και το αποκλίνων βύθισμα του πλοίου.

Για την εφαρμογή των διορθώσεων κάθε κατασκευάστρια εταιρεία χρησιμοποιούσε τις δικές της μεθόδους, κάτι το οποίο οδηγούσε σε διαφορετικά αποτελέσματα ανάλογα με το ναυπηγείο αλλά και στην απουσία ενιαίου μέτρου σύγκρισης των αποτελεσμάτων. Για αυτό το λόγο δημιουργήθηκε η ITTC(International Towing Tank Conference), η οποία είναι μια παγκόσμια ανεξάρτητη αρχή που αποτελείται από οργανισμούς που ασχολούνται με την έρευνα στο πεδίο της υδροδυναμικής. Σκοπός αυτής της ανεξάρτητης αρχής είναι να υποστηρίξει τους σχεδιαστές, κατασκευαστές και τους χειριστές των πλοίων και των

θαλάσσιων κατασκευών δίνοντας συμβουλές και πληροφορίες αναφορικά με την απόδοση, την ασφάλεια και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των πλοίων και των θαλάσσιων κατασκευών, χρησιμοποιώντας αποτελέσματα από δοκιμές μοντέλων, αριθμητικών μοντελοποιήσεων αλλά και μετρήσεων από δοκιμές μοντέλων πλήρης κλίμακας. Για να επιτύχει αυτή την υποστήριξη αλλά και για να επικυρώσει την ακρίβεια στις μετρήσεις πλήρης κλίμακας, όπως είναι οι δοκιμές θαλάσσης, έχει εκδώσει μια σειρά κανονισμών(recommended procedures). Αυτή η σειρά κανονισμών διασφαλίζει την ποιότητα των αποτελεσμάτων, περιγράφοντας με σαφήνεια τα βήματα που θα πρέπει να ακολουθήσει μια κατασκευάστρια εταιρεία προκειμένου τα αποτελέσματα των δοκιμών πλήρης κλίμακας να διορθωθούν κατάλληλα, έτσι ώστε να αντιπροσωπεύουν την πραγματικότητα αλλά και να έχουν μια παγκόσμια πιστοποίηση.

Το αποτέλεσμα των δοκιμών θαλάσσης είναι η εύρεση καμπυλών ισχύος και ταχύτητας πλοίου για διάφορα βυθίσματα σε ιδανικές περιβαλλοντικές συνθήκες. Αυτές οι καμπύλες, αν και ιδιαίτερα σημαντικές για την επίτευξη συμφωνίας μεταξύ πλοιοκτήτη και κατασκευάστριας εταιρείας αλλά και για τον υπολογισμό του EEDI, είναι παράλληλα και το αρχικό σημείο αναφοράς για την παρακολούθηση των επιδόσεων του πλοίου κατά την διάρκεια της λειτουργίας του σε πραγματικές συνθήκες. Η ανάγκη για την παρακολούθηση των επιδόσεων ενός πλοίου είναι προφανής. Οι υψηλές τιμές του πετρελαίου αλλά και ο αυξανόμενος αριθμός κανονισμών με στόχο την μείωση των εκπομπών καυσαερίων για την βελτίωση των συνθηκών της ατμόσφαιρας έχουν οδηγήσει στην αναζήτηση τρόπων μείωσης του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των πλοίων. Για να μειωθούν λοιπόν οι εκπομπές καυσαερίων ενός πλοίου θα πρέπει να αυξηθεί η αποδοτικότητα του πλοίου σαν σύνολο. Για να επιτευχθεί αυτό είναι απαραίτητη η γνώση των επιδόσεων του πλοίου και κατ'επέκταση η κατανάλωση καυσίμου που αυτό επιτυγχάνει. Παρ'όλα αυτά η ακριβής μέτρηση των επιδόσεων του πλοίου δεν είναι απλή διαδικασία. Οι δοκιμές θάλασσας μας δίνουν μια σειρά καμπυλών ισχύος και ταχύτητας για διάφορα βυθίσματα αλλά όπως αναλύσαμε παραπάνω αυτές αφορούν ιδανικές περιβαλλοντικές συνθήκες για ένα πλοίο που μόλις κατασκευάστηκε. Στην λειτουργία ενός πλοίου οι περιβαλλοντικές συνθήκες δεν είναι ιδανικές ενώ επίσης η ρύπανση της γάστρας παίζει σημαντικό ρόλο στην αύξηση της αντίστασης που αυτό δέχεται.

Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα σημεία ισχύος και ταχύτητας των μετρήσεων από την πραγματική λειτουργία ενός πλοίου να μην μοιάζουν με τις καμπύλες ισχύος και ταχύτητας που δίνονται από την κατασκευάστρια εταιρεία μετά τις δοκιμές θάλασσας. Αυτό συμβαίνει διότι για ένα εύρος τιμών της ταχύτητας πλεύσης του πλοίου που καλύπτει το επιθυμητό φάσμα λειτουργίας του, η ισχύς που προσδίδει ο κινητήρας για την ώση παραμένει πρακτικά αμετάβλητη, φαινόμενο το οποίο είναι ενάντια στον φυσικό νόμο που περιγράφεται από τον νόμο της έλικας [2.22].

1.2 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η ανάπτυξη ενός λογισμικού διόρθωσης των τιμών ισχύος και ταχύτητας πλεύσης ενός πλοίου. Το συγκεκριμένο λογισμικό χρησιμοποιεί πραγματικά λειτουργικά δεδομένα και έχει σαν στόχο να εξαλείψει την επιρροή των καιρικών φαινομένων και να συγκρίνει τα αποτελέσματα των διορθωμένων τιμών με τις τιμές που δίνονται από την κατασκευάστρια εταιρεία.

Πιο συγκεκριμένα, για να γίνει η διόρθωση των τιμών ισχύος και ταχύτητας ενός πλοίου απαιτείται η περιγραφή των φαινομένων τα οποία προκαλούν πρόσθετη αντίσταση στο πλοίο κατά την πλεύση του αλλά και των φαινομένων που προκαλούν απώλεια της ταχύτητας πλεύσης του. Γνωρίζοντας τα πραγματικά λειτουργικά δεδομένα ενός πλοίου, που περιγράφουν τόσο την απόδοση του όσο και το περιβάλλον στο οποίο αυτό πλέει, καλούμαστε να υπολογίσουμε την πρόσθετη αντίσταση αλλά και την απώλεια της ταχύτητας πλεύσης την οποία υφίσταται το πλοίο και να διορθώσουμε τις δεδομένες τιμές της ισχύος και της ταχύτητας πλεύσης.

Με βάση την μεθοδολογία που αναπτύχθηκε, έγινε ανάπτυξη λογισμικού σε γλώσσα προγραμματισμού Fortran. Για τον έλεγχο της λειτουργίας του λογισμικού, έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από το λογισμικό διόρθωσης με τις τιμές των μετρήσεων της κατασκευάστριας εταιρείας του πλοίου κατά τις πειραματικές δοκιμές σε δεξαμενή(tank tests) αλλά και κατά τις δοκιμές θαλάσσης του(sea trials).

1.3 Δομή της διπλωματικής εργασίας

Η δομή της εργασίας έχει ως εξής:

- Στο κεφάλαιο 2 γίνεται μια σύντομη παρουσίαση των βασικών αρχών πρόωσης και αντίστασης του πλοίου. Παρουσιάζονται τα γενικά χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος στο οποίο πλέει ένα πλοίο[2],[12], οι επιμέρους αντιστάσεις που δέχεται ένα πλοίο σε ιδανικές συνθήκες[4],[6], τα γενικά χαρακτηριστικά του συστήματος πρόωσης του πλοίου(κινητήρας και έλικα)[3],[6],[16] και πως αυτό αλληλοεπιδρά με το περιβάλλον λειτουργίας του[1],[2].
- Στο κεφάλαιο 3 περιγράφεται η πρόσθετη αντίσταση που δέχεται ένα πλοίο κατά την πλεύση του και η σημασία της στην απόδοση του πλοίου στους τομείς της ισχύος και της ταχύτητας[5],[6],[15]. Επιπρόσθετα γίνεται παρουσίαση των μεθόδων που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των διαφόρων ειδών πρόσθετης αντίστασης και μια συγκριτική αξιολόγηση τους[2],[4],[5],[9].
- Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται λεπτομερώς η μέθοδος διόρθωσης που χρησιμοποιήθηκε στον υπολογιστικό κώδικα. Γίνεται μια παρουσίαση του

διαγράμματος ροής της μεθόδου και στην συνέχεια γίνεται διατύπωση των δεδομένων εισόδου αλλά και των εξισώσεων που χρησιμοποιούνται σε αυτήν[5],[6],[9],[13].

- Στο κεφάλαιο 5 περιγράφονται τα γενικά χαρακτηριστικά των δύο πλοίων στα οποία εφαρμόστηκε η μέθοδος διόρθωσης και το σκεπτικό της επιλογής των λειτουργικών δεδομένων. Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που εξάγονται μετά από την χρήση του υπολογιστικού κώδικα σε αυτά τα λειτουργικά δεδομένα.
- Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζεται η σύνοψη των αποτελεσμάτων της διπλωματικής εργασίας και στην συνέχεια γίνεται αναφορά σε μελλοντικό έργο που θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί για την βελτίωση του υπολογιστικού κώδικα και της μεθόδου διόρθωσης.

Κεφάλαιο 2

2. Σύντομη παρουσίαση των βασικών αρχών αντίστασης και πρόωσης ενός πλοίου

2.1 Το περιβάλλον του πλοίου

Όσον αφορά το πλοίο, υπάρχουν δύο περιβάλλοντα που επηρεάζουν την λειτουργία του. Το εξωτερικό(ωκεανός) και το εσωτερικό. Το εσωτερικό περιβάλλον καθορίζει την ευεξία του πληρώματος και των επιβατών(επιβατηγά πλοία) και κάποιες φορές πρέπει να τροποποιηθεί ανάλογα με το φορτίο του(φορτηγά πλοία). Όπως είναι φυσικό τα δύο περιβάλλοντα αλληλοεπιδρούν. Το περιβάλλον του ωκεανού όμως είναι αυτό που απαιτεί την μεγαλύτερη προσοχή από τον κατασκευαστή του πλοίου καθώς είναι υπεύθυνο για τους μεγαλύτερους κινδύνους που θα αντιμετωπίσει το πλοίο κατά την πλεύση του. Τα κύματα, ο αέρας, ο πάγος αλλά και οι ακραίες θερμοκρασίες στον νερό και στον αέρα αποτελούν εμπόδια που κάθε πλοίο θα πρέπει να είναι έτοιμο να υπερνικήσει προκειμένου να είναι ασφαλές κατά την διάρκεια ζωής του.

2.1.1 Γενικά χαρακτηριστικά αέρα και νερού στον ωκεανό

Το νερό, ως ασυμπίεστο μέσο, έχει την ίδια πυκνότητα σε οποιοδήποτε βάθος. Όμως η πυκνότητα του επηρεάζεται τόσο από την θερμοκρασία του όσο και από την περιεκτικότητα του σε αλάτι. Η περιεκτικότητα του νερού σε αλάτι είναι ένας παράγοντας ο οποίος παίρνει διαφορετικές τιμές ανά περιοχή και εξαρτάται από τα ρεύματα του ωκεανού σε κάθε περίπτωση. Για αυτό το λόγο σε υπολογισμούς η ΙΤΤC έχει θεωρήσει ένα σταθερό επίπεδο περιεκτικότητας σε αλάτι ίσο με 3.5% και δίνει την τιμή της πυκνότητας του νερού, σε συνάρτηση μόνο με την θερμοκρασία του, με βάση την εξής εξίσωση από το [12]:

$$\rho(T_w)_{seawater} = g(a + bT_w + cT_w^2 + dT_w^3) \quad [2.1]$$

με τις εξής σταθερές:

- $a = 104.83004$
- $b = -6.210858 \times 10^{-3}$
- $c = -5.976822 \times 10^{-4}$

- $d = 25797397 \times 10^{-6}$

Η κινηματική συνεκτικότητα του νερού επηρεάζεται από τους ίδιους παράγοντες που επηρεάζεται και η πυκνότητα του. Οι ναυπηγοί σε μια νέα μελέτη πλοίου, στους αρχικούς υπολογισμούς, χρησιμοποιούν για την πυκνότητα τις τιμές 1000 kg/m^3 για νερό με 0% περιεκτικότητα σε αλάτι και 1025 kg/m^3 για το θαλασσινό νερό.

Όσον αφορά τον αέρα, σε σπάνιες περιπτώσεις αυτός μένει ακίνητος. Τις περισσότερες φορές εκδηλώνεται ως άνεμος ο οποίος έχει κάποια ταχύτητα και κάποια κατεύθυνση. Οι άνεμοι δημιουργούνται από τους εξής δύο λόγους:

- Λόγω της κυκλοφορίας του αέρα ,που έχει ως αποτέλεσμα η παρουσία μεγάλων μαζών αέρα με διαφορετικές θερμοκρασίες στην επιφάνεια της γης, που δημιουργεί τους λεγόμενους παγκόσμιους ανέμους.
- Λόγω της διαφοράς πίεσης τοπικά στην ατμόσφαιρα που δημιουργεί τους λεγόμενους τοπικούς ανέμους.

Η κατηγοριοποίηση των ανέμων, όσον αφορά την δύναμη τους, έχει μεγάλη ποικιλία αλλά η κλίμακα των Beaufort είναι η πιο διαδεδομένη. Η κλίμακα Beaufort κατατάσσει τους ανέμους με βάση την ταχύτητα τους και πλέον χρησιμοποιείται και ως σημείο αναφοράς που περιγράφει τις συνθήκες στον ωκεανό.

Οι άνεμοι από την φύση τους αυξάνουν την αντίσταση που δέχεται το πλοίο. Για αυτό το λόγο είναι ιδιαίτερα σημαντικό να γνωρίζουμε την πυκνότητα του αέρα. Αυτή εξαρτάται από την θερμοκρασία, την υγρασία και την πίεση στην ατμόσφαιρα. Η ύπαρξη υγρασίας στον αέρα μειώνει την πυκνότητα του. Το φαινόμενο αυτό συμβαίνει καθώς για ένα ιδανικό αέριο, σε μια δεδομένη θερμοκρασία και πίεση, ο αριθμός των μορίων του είναι σταθερός για ένα δεδομένο όγκο. Κατά αυτόν τον τρόπο όταν εισέρχεται ένας αριθμός μορίων νερού σε ένα δεδομένο όγκο αέρα, τα μόρια του ξηρού αέρα πρέπει να μειωθούν κατά τον ίδιο αριθμό, προκειμένου να μην ανέβει η πίεση ή η θερμοκρασία του. Αυτό σε συνδυασμό με το ότι η μοριακή μάζα του νερού (18 g/mol) είναι μικρότερη από την μοριακή μάζα του ξηρού αέρα (29 g/mol) οδηγεί σε μείωση της πυκνότητας του.

Για τον υπολογισμό της πυκνότητας του αέρα που περιέχει υγρασία, τον αντιμετωπίζουμε ως συνδυασμό 2 ιδανικών αερίων, τα οποία είναι ο ξηρός αέρας και οι υδρατμοί. Η πυκνότητα λοιπόν του αέρα με υγρασία δίνεται από το [17] με βάση την εξής εξίσωση:

$$\rho_{humid\ air} = \frac{p_d}{R_d T} + \frac{p_v}{R_v T} = \frac{p_d M_d + p_v M_v}{RT} \quad [2.2]$$

με τις εξής μεταβλητές:

- $\rho_{\text{humid air}}$: Η πυκνότητα του αέρα που περιέχει υγρασία σε kg/m^3
- p_d : Η μερική πίεση του ξηρού αέρα σε Pa
- R_d : Η σταθερά του αερίου για τον ξηρό αέρα, ίση με 287.058 J/(kgK)
- T : Η θερμοκρασία στην ατμόσφαιρα σε K
- p_v : Η μερική πίεση των υδρατμών σε Pa
- R_v : Η σταθερά του αερίου για τους υδρατμούς, ίση με 461.495 J/(kgK)
- M_d : Η μοριακή μάζα του ξηρού αέρα, ίση με 0.028964 kg/mol
- M_v : Η μοριακή μάζα των υδρατμών, ίση με 0.018016 kg/mol
- R : Η σταθερά ιδανικών αερίων, ίση με 8.314 J/(Kmol)

Η μερική πίεση των υδρατμών μπορεί να υπολογιστεί από την πίεση κορεσμού των υδρατμών και την σχετική υγρασία τους. Η εξίσωση που την υπολογίζει είναι η εξής:

$$p_v = p_{\text{sat}} \phi \quad [2.3]$$

με τις εξής μεταβλητές:

- p_v : Η μερική πίεση των υδρατμών σε Pa
- ϕ : Η σχετική υγρασία
- p_{sat} : Η πίεση κορεσμού των υδρατμών

Η πίεση κορεσμού των υδρατμών p_{sat} υπολογίζεται από την εξής εξίσωση:

$$p_{\text{sat}} = \frac{\left(6.1078 \times 10^{\frac{7.5T}{T+237.3}}\right)}{100} \quad [2.4]$$

με την πίεση κορεσμού να υπολογίζεται σε Pa και η θερμοκρασία T να είναι σε βαθμούς Κελσίου($^{\circ}\text{C}$)

Τέλος η μερική πίεση του ξηρού αέρα p_d βρίσκεται από την εξής εξίσωση:

$$p_d = p - p_v \quad [2.5]$$

2.1.2 Γενικά χαρακτηριστικά κυμάτων

Τα χαρακτηριστικά των κυμάτων που δημιουργούνται από τους ανέμους εξαρτώνται από την ταχύτητα του ανέμου, την διάρκεια τους αλλά και την απόσταση στην οποία αυτοί επιδρούν. Με βάση τα παραπάνω ,αλλά και τον διαχωρισμό των ανέμων σε τοπικούς και παγκόσμιους, έχουμε δύο είδη κυμάτων:

- Τα κύματα που δημιουργούνται λόγω τοπικών ανέμων.
- Τα κύματα που δημιουργούνται λόγω παγκόσμιων ανέμων, μακριά από την τοποθεσία που εντοπίζονται, και τα οποία ονομάζονται στην αγγλική ορολογία swell.

Η μορφή των κυμάτων επηρεάζεται από το βάθος του νερού, τα ρεύματα που πιθανόν υπάρχουν αλλά και την τοπογραφία της περιοχής, στην οποία αυτά εξετάζονται. Για έναν παρατηρητή, η επιφάνεια της θάλασσας μπορεί να φανεί πολύ σύνθετη. Για πολλά χρόνια δεν υπήρχε μαθηματική μοντελοποίηση της. Η πρώτη σημαντική παρατήρηση για την μοντελοποίηση αυτής της τυχαίας επιφάνειας έγινε από τον Froude(1905), ο οποίος υπέθεσε ότι η επιφάνεια της θάλασσας είναι το άθροισμα μεγάλων αριθμών κανονικών κυμάτων, τα οποία καλύπτουν ένα εύρος περιόδων και κατευθύνσεων. Επιπρόσθετα τόνισε ότι η επιρροή αυτής της θαλάσσιας επιφάνειας σε ένα πλοίο, θα είναι το άθροισμα των αποτελεσμάτων των επιμέρους κανονικών κυμάτων από τα οποία αποτελείται. Αυτή είναι η βάση για όλες τις σύγχρονες θεωρίες που αφορούν τα κύματα, την αντίσταση που αυτά προκαλούν αλλά και τις κινήσεις στις οποίες υποβάλλουν ένα πλοίο.

Ένα κανονικό κύμα, που έχει μονή κατεύθυνση, έχει μια σταθερή μορφή στον χρόνο. Καθώς θα περνούσε από ένα σταθερό σημείο που καταγράφει το ύψος του, θα παρατηρούσαμε ότι η διαφοροποίηση του ύψους του είναι επαναλαμβανόμενη στον χρόνο. Για να μοντελοποιήσουμε το κανονικό κύμα, χρησιμοποιούμε τα εξής δύο είδη κυμάτων:

- Τα τροχοειδή κύματα
- Τα ημιτονοειδή κύματα

Παρατηρώντας τα κύματα στον ωκεανό μπορεί κάποιος να καταλήξει στο συμπέρασμα ότι οι κορυφές των κυμάτων είναι πιο απότομες από τις κοιλάδες τους. Αυτό είναι το χαρακτηριστικό των τροχοειδών κυμάτων ,τα οποία και χρησιμοποιούνται για την μοντελοποίηση των κυμάτων σε αρχικούς υπολογισμούς που αφορούν την αντοχή του πλοίου. Όμως η δυσκολία χειρισμού των μαθηματικών εξισώσεων που τα περιγράφουν οδήγησε στην περιγραφή των κανονικών κυμάτων και στην μοντελοποίηση της θαλάσσιας επιφάνειας με βάση τα ημιτονοειδή κύματα τα οποία έχουν την εξής εξίσωση:

$$\eta(x, t) = a \sin(kx \pm \omega t) \quad [2.6]$$

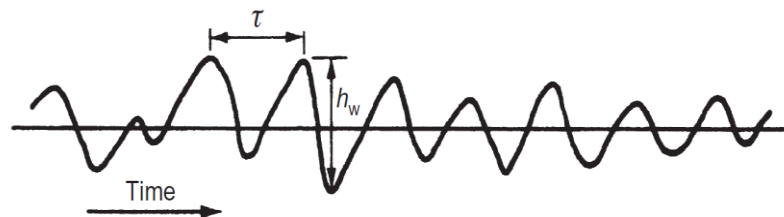
με τις εξής μεταβλητές:

- a : Πλάτος κύματος σε m
- k : Αριθμός κύματος σε rad/m
- ω : Κυκλική συχνότητα κύματος σε rad/s

Η παραπάνω εξίσωση δίνει το ύψος του κύματος για μετατόπιση x και χρόνο t . Το μέγιστο ύψος που μπορεί να έχει ένα ημιτονοειδές κύμα είναι ίσο με το διπλάσιο του πλάτους του.

Με βάση αυτά που παρουσιάστηκαν παραπάνω, η μοντελοποίηση της θαλάσσιας επιφάνειας είναι το άθροισμα ενός μεγάλου αριθμού κανονικών κυμάτων, που το καθένα έχει το δικό του μήκος, ύψος και κατεύθυνση. Αν αυτός ο αριθμός κυμάτων έχει την ίδια κατεύθυνση τότε μπορούμε να πούμε ότι η επιφάνεια της θάλασσας μοντελοποιείται ως μονοδιάστατο σύστημα, με την διάσταση αυτή να είναι η περίοδος. Στην γενικότερη περίπτωση, στην οποία οι κατευθύνσεις των επιμέρους κανονικών κυμάτων διαφέρουν, η θαλάσσια επιφάνεια μοντελοποιείται ως δισδιάστατο σύστημα, με τις διαστάσεις να είναι η περίοδος και η κατεύθυνση.

Ένα τέτοιο τυπικό σύστημα, το οποίο μετρείται σε ένα σταθερό σημείο δίνει το εξής διάγραμμα:



Σχήμα 2.1 : Καταγραφή συστήματος κυμάτων

Το ύψος των κυμάτων h_w μπορεί να θεωρηθεί ως η κάθετη αντίσταση μεταξύ μιας διαδοχικής κοιλάδας και κορυφής ενώ το μήκος του κύματος ως η οριζόντια απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών.

Με βάση τα δεδομένα για το ύψος των κυμάτων, που μπορούν να προκύψουν από ένα τέτοιο διάγραμμα, μπορεί κάποιος να κατασκευάσει ένα ιστόγραμμα που να δείχνει την συχνότητα που εμφανίζονται τα διάφορα ύψη κυμάτων. Έχει παρατηρηθεί ότι με βάση αυτό το ιστόγραμμα μπορεί κάποιος να βγάλει μια κατανομή Rayleigh, αν το αυτό αφορά δεδομένα μικρού χρονικού διαστήματος.

Αν μετρήσουμε όλα τα ύψη των κυμάτων και τα τοποθετήσουμε κατά φθίνουσα σειρά, ο μέσος όρος του ύψους των τριών υψηλότερων κυμάτων καλείται σημαντικό ύψος κύματος $H_{1/3}$. Το σημαντικό ύψος κύματος ισούται με 4 φορές την τυπική απόκλιση της κατανομής Rayleigh του συστήματος κυμάτων. Στην ωκεανογραφία αυτός ο όρος δημιουργήθηκε για να προσομοιάσει τις παρατηρήσεις ενός έμπειρου ωκεανογράφου.

Γνωρίζοντας δηλαδή το σημαντικό ύψος κύματος, έχουμε μια πολύ καλή ιδέα της μορφής της θαλάσσιας επιφάνειας όσον αφορά το ύψος των κυμάτων. Με βάση την κατανομή Rayleigh η πιθανότητα να συναντήσουμε κύμα διπλάσιου μεγέθους από το σημαντικό ύψος κυμάτων είναι 0.1% .

2.2 Αντίσταση του πλοίου κατά την πλεύση του

2.2.1 Εισαγωγή

Προκειμένου να κινηθεί ένα πλοίο, θα πρέπει αρχικά να μπορεί να υπερνικήσει την αντίσταση που δρα αντίθετα από την πρόωσή του. Είναι ιδιαίτερο σημαντικό το πλοίο να έχει αρκετή ισχύ, αλλά όχι αρκετά παραπάνω, προκειμένου να φτάνει την ταχύτητα που απαιτείται. Καθώς το πλοίο κινείται στον ωκεανό, θα αντιμετωπίζει δυνάμεις από τον αέρα και τον νερό που θα αντιτίθενται στην κίνηση του. Όσο μεγαλύτερη η ταχύτητα του, τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η αντίσταση που θα δέχεται. Για τους παραπάνω λόγους είναι ιδιαίτερα σημαντικός ο υπολογισμός της αντίστασης που δέχεται το πλοίο ώστε να επιλεγεί το κατάλληλο σύστημα πρόωσης, δηλαδή η έλικα και ο κύριος κινητήρας. Η συνολική αντίσταση ενός πλοίου αποτελείται από αντιστάσεις διαφόρων ειδών οι οποίες κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- 1) Αντίσταση τριβής R_F
- 2) Υπολειπόμενη αντίσταση R_R
- 3) Αντίσταση του αέρα R_A

Από την μηχανική ρευστών και το νόμο του Bernoulli γνωρίζουμε ότι μια ροή νερού με ταχύτητα V και πυκνότητα ρ έχει δυναμική πίεση ίση με $1/2\rho V^2$. Επομένως όταν το νερό σταματήσει πάνω σε ένα ακίνητο στερεό σώμα θα εξασκήσει πάνω σε αυτό μια δύναμη λόγω δυναμικής πίεσης. Η σχέση αυτή είναι η βάση των υπολογισμών των διαφόρων αντιστάσεων R της γάστρας του πλοίου μέσω αδιάστατων συντελεστών αντίστασης C . Οι αδιάστατοι συντελεστές C σχετίζονται με την δύναμη αναφοράς K , που ορίζεται ως η δύναμη που προκαλεί η δυναμική πίεση του νερού με ταχύτητα V , ίση με αυτή του πλοίου, σε μια επιφάνεια, η οποία είναι ίση με την βρεχόμενη επιφάνεια της γάστρας του πλοίου A_s . Τα παραπάνω περιγράφονται από την εξής εξίσωση με βάση το [6]:

$$K = \frac{1}{2}\rho V^2 A_s \quad [2.7]$$

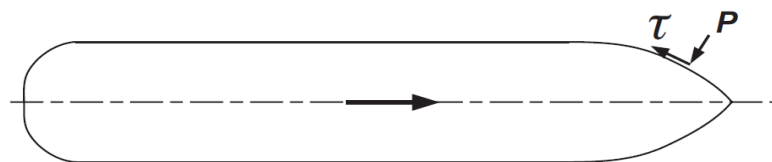
με τις αντιστάσεις R να είναι ως εξής:

$$R = C \times K = C \times \frac{1}{2}\rho V^2 A_s \rightarrow R \propto V^2 \quad [2.8]$$

Με βάση την εξίσωση [2.8] μπορούμε να συμπεράνουμε ότι όλες οι αντιστάσεις του πλοίου είναι ανάλογες του τετραγώνου της ταχύτητας του και επομένως η αντίσταση ρυμουλκήσεως του πλοίου που ισούται με το άθροισμα των επιμέρους αντιστάσεων είναι επίσης ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητας. Στην πράξη ο υπολογισμός της αντίστασης ρυμουλκήσεως του πλοίου γίνεται πειραματικά, με τις δοκιμές ενός μοντέλου του πλοίου σε πειραματική δεξαμενή.

2.2.2 Αντίσταση τριβής

Καθώς το πλοίο κινείται στο νερό δημιουργείται ένα πλήθος διατμητικών δυνάμεων τ στην γάστρα του πλοίου, όπως αυτό φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.2 : Διατμητικές δυνάμεις στην γάστρα του πλοίου

Το άθροισμα αυτών των διατμητικών δυνάμεων στην γάστρα του πλοίου μας δίνει την συνολική αντίσταση τριβής του πλοίου. Η παρουσία αυτών των δυνάμεων οφείλεται στην ιξώδη ιδιότητα του νερού.

Η αντίσταση τριβής R_F ενός πλοίου εξαρτάται από το μέγεθος της βρεχόμενης επιφάνειας του πλοίου A_S και από ένα συγκεκριμένο συντελεστή της τριβής αντίστασης C_F . Όταν το πλοίο κινείται στο νερό, η αντίσταση τριβής του είναι ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητας του. Η συγκεκριμένη αντίσταση αποτελεί το μεγαλύτερο μέρος της αντίστασης για πλοία χαμηλών ταχυτήτων όπως δεξαμενόπλοια ή πλοία χύδην φορτίου. Η αντίσταση τριβής δίνεται από την εξής εξίσωση σύμφωνα με το [6]:

$$R_F = C_F \times K \quad [2.9]$$

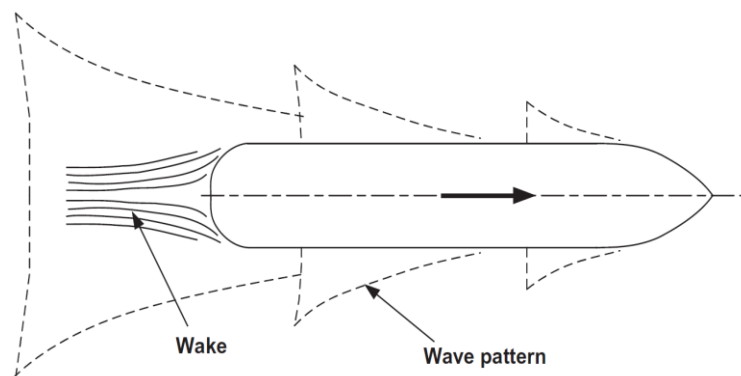
Όπου το K υπολογίζεται από την εξίσωση [2.7] και ο συντελεστής C_F , με βάση την ITTC [9], να είναι ίσος με:

$$C_F = \frac{0.075}{(\log_{10}(R_n) - 2)^2} \quad [2.10]$$

όπου R_n ο αριθμός Reynolds.

2.2.3 Υπολειπόμενη αντίσταση

Παρατηρώντας κάποιος ένα πλοίο να κινείται στο νερό, μπορεί να διακρίνει δύο είδη ροών να σχηματίζονται. Το πρώτο είδος είναι μια κυματομορφή που κινείται σχεδόν παράλληλα με την γάστρα του πλοίου και το δεύτερο είδος είναι μια περιοχή τυρβώδους ροής που αναπτύσσεται κατά το μήκος της γάστρας του πλοίου και η οποία καταλήγει σε μια δίνη στην πρύμνη του, όπως φαίνεται και από το παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.3: Είδη ροών που σχηματίζονται από την κίνηση ενός πλοίου σε νερό

Η υπολειπόμενη αντίσταση R_R περιλαμβάνει την αντίσταση που προκύπτει από αυτές τις δύο ροές, δηλαδή περιλαμβάνει την αντίσταση κυματισμού και την αντίσταση λόγω των δινών.

Ένα σώμα το οποίο κινείται σε μια επιφάνεια νερού η οποία είναι αδιατάρακτη, δημιουργεί ένα πεδίο πίεσης, το οποίο εκδηλώνεται ως κύματα καθώς η πίεση στην επιφάνεια του νερού πρέπει να ισούται με την πίεση της ατμόσφαιρας. Όταν αυτό το σώμα, στην προκειμένη περίπτωση ένα πλοίο, κινείται με σταθερή ταχύτητα αυτό το σύστημα κυμάτων που δημιουργείται παραμένει σταθερό και κινείται ταυτόχρονα με το πλοίο. Η ενέργεια για την δημιουργία και την διατήρηση αυτού του συστήματος κυμάτων πρέπει να προέλθει από το σύστημα πρόωσης του πλοίου. Αυτά τα κύματα όμως δημιουργούν μια οπισθέλκουσα δύναμη την οποία πρέπει να αντισταθμίσει το σύστημα πρόωσης του πλοίου. Αυτή η δύναμη είναι η αντίσταση λόγω κυματισμού. Η αντίσταση κυματισμού σε χαμηλές ταχύτητες είναι ανάλογη με το τετράγωνο της ταχύτητας αλλά αυξάνει ραγδαία σε υψηλότερες ταχύτητες. Θεωρητικά αυτό σημαίνει ότι υπάρχει ένα φράγμα ταχύτητας, το οποίο δηλώνει ότι οποιαδήποτε επιπλέον αύξηση της ωστικής ισχύος του πλοίου δεν θα έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερη ταχύτητα καθώς όλη η επιπλέον ενέργεια θα μετατρέπεται σε ενέργεια κυματισμού.

Αναφορικά με την αντίσταση λόγω δινών, αυτή δημιουργείται από τις διάφορες αποκολλήσεις της ροής του νερού γύρω από την γάστρα του πλοίου. Αυτές οι αποκολλήσεις της ροής οφείλονται συνήθως σε ξαφνικές αλλαγές της μορφής της γάστρας του πλοίου, οι οποίες οφείλονται στα διάφορα προσαρτήματα του πλοίου. Όμως η διακοπή της ροής μπορεί να υπάρξει ακόμα και σε μια τέλεια μορφή γάστρας. Αυτό το φαινόμενο συμβαίνει λόγω της κατανομής της ταχύτητας και της πίεσης στο οριακό στρώμα. Η ταχύτητα αυξάνεται όπου μειώνεται η πίεση. Λαμβάνοντας υπόψιν μας ότι το νερό κινείται σχετικά αργά κοντά στην γάστρα του πλοίου, η αύξηση της πίεσης κατά μήκος του πλοίου με κατεύθυνση στην πρύμνη, μπορεί να οδηγήσει στον μηδενισμό της ταχύτητας του νερού ή ακόμα και να αντιστρέψει την ροή του. Υπό αυτές τις συνθήκες μπορεί να επιτευχθεί αποκόλληση της ροής και να δημιουργηθούν δίνες, οι οποίες προκαλούν αντίσταση.

Η υπολειπόμενη αντίσταση δίνεται ως εξής από το [6]:

$$R_R = C_R \times K \quad [2.11]$$

Όπου το K υπολογίζεται από την εξίσωση [2.7] και C_R είναι ο αδιάστατος συντελεστής της υπολειπόμενης αντίστασης.

2.2.4 Αντίσταση λόγω του αέρα

Σε συνθήκες απουσίας ανέμων, η αντίσταση του αέρα θα είναι πολύ μικρότερη από την αντίσταση του νερού, καθώς η πυκνότητα του νερού είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή του αέρα. Η αντίσταση του αέρα, όταν απουσιάζουν οι άνεμοι, είναι ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητας του πλοίου και της επιφάνειας του πλοίου που είναι εκτεθειμένη σε αυτόν. Η αντίσταση του αέρα μπορεί να δοθεί στην μορφή που δόθηκαν οι άλλες αντιστάσεις από το [6], ως εξής:

$$R_A = C_A \times K \quad [2.12]$$

Όπου το K υπολογίζεται από την εξίσωση [2.7] και ο C_A είναι ο αδιάστατος συντελεστής της αντίστασης του αέρα.

2.2.5 Συνολική αντίσταση και πρόσθετη αντίσταση κατά την πλεύση του πλοίου

Η συνολική αντίσταση ρυμουλκήσεως του πλοίου R_T δίνεται ως εξής:

$$R_T = R_F + R_R + R_A \quad [2.13]$$

Όπου R_F, R_R, R_A οι επιμέρους αντιστάσεις που υπολογίζονται από τις εξισώσεις [2.9],[2.11],[2.12] αντίστοιχα. Η συνολική αντίσταση ρυμουλκήσεως του πλοίου είναι ιδιαίτερα σημαντική γιατί μας δίνει μια αρχική εκτίμηση της ισχύος που χρειάζεται ένα πλοίο προκειμένου να κινηθεί με μια ταχύτητα V .

Όμως αυτή η αντίσταση ρυμουλκήσεως αφορά την κίνηση ενός καινούριου πλοίου στις ιδανικές συνθήκες περιβάλλοντος, όπου απουσιάζουν τα κύματα και οι άνεμοι. Όμως το πλοίο, κατά την διάρκεια πλεύσης του θα συναντήσει τελείως διαφορετικές συνθήκες.

Η αντίσταση που θα δεχθεί ένα πλοίο σε κανονική λειτουργία θα αυξηθεί λόγω κυμάτων, ανέμων και θαλάσσιων ρευμάτων. Επιπρόσθετα κατά την διάρκεια ζωής του πλοίου η μεμβράνη του υφαλοχρώματος στην γάστρα του πλοίου θα αποκολληθεί. Η διάβρωση λόγω του θαλασσινού νερού αλλά και η ανάπτυξη θαλάσσιων οργανισμών στην γάστρα και την έλικα του πλοίου, θα επηρεάσουν τις ομαλές τους επιφάνειες και θα οδηγήσουν σε αύξηση της αντίστασης.

Στην πράξη δηλαδή η πρόσθετη αντίσταση λόγω έντονων καιρικών συνθηκών αλλά και ρύπανσης του πυθμένα του πλοίου μπορεί να οδηγήσουν σε τελείως διαφορετικές απαιτήσεις ισχύος προκειμένου αυτό να πλεύσει μια συγκεκριμένη ταχύτητα V .

2.3 Πρόωση του πλοίου

2.3.1 Εισαγωγή

Το παραδοσιακά μέσα που χρησιμοποιούνται για την κίνηση ενός πλοίου είναι ο κινητήρας Diesel σε συνδυασμό με την έλικα, τα οποία αποτελούν και τα κύρια μέρη του συστήματος πρόωσης ενός πλοίου. Ο αριθμός και το είδος των κινητήρων και των ελίκων εξαρτάται από το είδος, το μέγεθος αλλά και το λειτουργικό προφίλ του πλοίου. Η απαιτούμενη ώση για την κίνηση ενός πλοίου με ταχύτητα V και συνολική αντίσταση ρυμουλκήσεως R_T είναι το αρχικό σημείο ανάλυσης του συστήματος πρόωσης του πλοίου. Αυτή η απαιτούμενη ώση είναι μεγαλύτερη από την αντίσταση R_T λόγω της αλληλεπίδρασης μεταξύ του συστήματος πρόωσης ενός πλοίου και της ροής του νερού γύρω από την γάστρα του πλοίου. Μπορεί τα κεφάλαια αντίστασης και πρόωσης του πλοίου να αναλύονται διαφορετικά αλλά σαν φαινόμενα είναι αλληλένδετα. Στην συνέχεια θα ακολουθήσει μια περιεκτική επιμέρους αναφορά στα γενικά χαρακτηριστικά του συστήματος πρόωσης ενός πλοίου(κινητήρας και έλικα) αλλά και μια παρουσίαση των συντελεστών απόδοσης που περιγράφουν το σύστημα πρόωσης ως σύνολο.

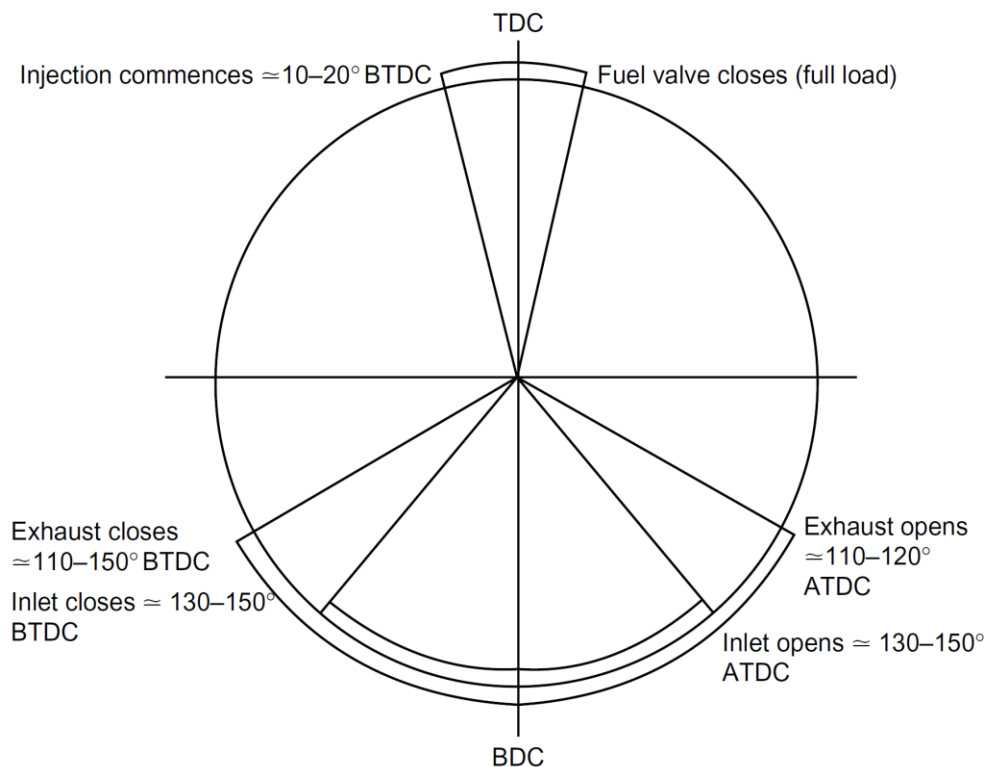
2.3.2 Βασικές αρχές βραδύστροφων ναυτικών κινητήρων Diesel

Στην σημερινή εποχή, ο κινητήρας Diesel έχει επικρατήσει ως η κύρια μηχανή πρόωσης των πλοίων. Αυτό συνέβη διότι ο θερμοδυναμικός βαθμός απόδοσης του κινητήρα Diesel είναι ανώτερος από οποιαδήποτε άλλη μηχανή εσωτερικής καύσης. Αυτός ο βαθμός απόδοσης μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω χρησιμοποιώντας την απορριπτόμενη θερμότητα που περιέχεται στα καυσαέρια του, είτε με την διαδεδομένη χρήση στροβίλου ισχύος μετά τον υπερπληρωτή είτε με την χρήση σύγχρονων συστημάτων ανάκτησης θερμότητας για τις ενεργειακές απαιτήσεις του πλοίου. Επιπρόσθετα ο κινητήρας Diesel έχει την δυνατότητα καύσης χαμηλής ποιότητας καυσίμων που σε συνδυασμό με τον υψηλό θερμοδυναμικό βαθμό απόδοσης του, τον καθιστά με διαφορά την πιο οικονομική λύση. Τέλος οι σύγχρονοι κινητήρες Diesel, με τις κατάλληλες μετατροπές, μπορούν να χρησιμοποιήσουν ως καύσιμο το φυσικό αέριο, ιδιαίτερα σε εφαρμογές πλοίων που έχουν ως στόχο την μεταφορά του (LNG carriers). Οι ναυτικοί κινητήρες διακρίνονται στις εξής κατηγορίες με βάση το [3]:

- Δίχρονοι(2-Χ) ή τετράχρονοι(4-Χ), ανάλογα με τον κύκλο λειτουργίας τους.
- Με σύστημα διωστήρα-στροφάλου ή με σύστημα βάκτρου-σταυρού-διωστήρα-στροφάλου, ανάλογα με τον κινηματικό μηχανισμό τους.
- Φυσικής αναπνοής ή υπερπληρωμένοι.
- Βραδύστροφοι, Μεσόστροφοι ή Ταχύστροφοι, ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής τους.

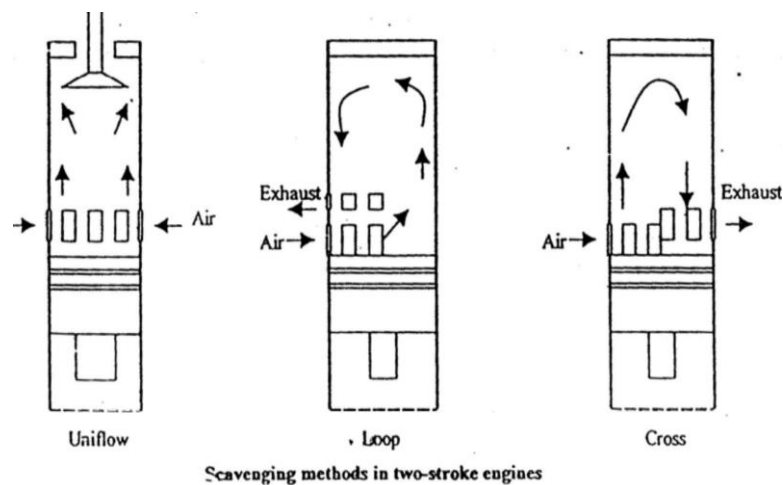
Στα φορτηγά πλοία, όπου χρησιμοποιούνται κινητήρες Diesel μεγάλου μεγέθους ως κύριες μηχανές πρόωσης, έχει επικρατήσει η χρήση του δίχρονου βραδύστροφου υπερπληρωμένου κινητήρα Diesel με βάκτρο και σταυρό στον κινηματικό μηχανισμό.

Ένας δίχρονος κινητήρας έχει δύο κύκλους λειτουργίας. Ο πρώτος κύκλος είναι η συμπίεση, η οποία ξεκινάει καθώς κλείνουν οι θυρίδες εισαγωγής και εξαγωγής ενώ παράλληλα το έμβολο κατευθύνεται από το ΚΝΣ στο ΑΝΣ. Κατά την διάρκεια της κίνησης του εμβόλου, το εργαζόμενο μέσο που βρίσκεται στο εσωτερικό του κυλίνδρου συμπιέζεται και λίγο πριν το ΑΝΣ γίνεται η έναρξη της καύσης. Ο δεύτερος κύκλος ονομάζεται αποτόνωση και συμβαίνει κατά την κίνηση του εμβόλου από το ΑΝΣ στο ΚΝΣ. Τα προϊόντα της καύσης ωθούν το έμβολο προς τα κάτω παράγοντας το μηχανικό έργο. Κατά την διάρκεια της καθοδικής κίνησης του εμβόλου, αποκαλύπτονται από το πάνω μέρος του εμβόλου, οι θυρίδες εξαγωγής και έτσι τα καυσαέρια ξεκινούν να εγκαταλείπουν το εσωτερικό του κυλίνδρου. Καθώς το έμβολο συνεχίζει την καθοδική του πορεία, αποκαλύπτονται οι θυρίδες εισαγωγής, οι οποίες ολοκληρώνουν την απόπλυση του κυλίνδρου από τα καυσαέρια ενώ παράλληλα πληρώνουν τον κύλινδρο με νέα ποσότητα εργαζόμενου μέσου. Το έμβολο και οι θυρίδες είναι διαμορφωμένες κατάλληλα έτσι ώστε να αποφεύγεται το πέρασμα του εργαζόμενου μέσου απευθείας από την εισαγωγή στην εξαγωγή ενώ παράλληλα η νέα ποσότητα του εργαζόμενου μέσου να ωθήσει τα καυσαέρια στην εξαγωγή.



Σχήμα 2.4: Ο κύκλος λειτουργίας ενός 2-Χ κινητήρα

Η παραπάνω εναλλαγή αερίων ονομάζεται απόπλυση και σε κινητήρες που δεν είναι υπερπληρωμένοι επιτυγχάνεται με την βοήθεια μιας ειδικής αντλίας αποπλύσεως που παίρνει κίνηση από τον στροφαλοφόρο άξονα. Υπάρχουν τρεις βασικοί τρόποι απόπλυσης των δίχρονων κινητήρων, η ευθύγραμμη, η βρογχοειδής και η εγκάρσια. Η πρώτη χρησιμοποιεί αντί για θυρίδες εξαγωγής, μία ή περισσότερες βαλβίδες εξαγωγής στην κεφαλή του κυλίνδρου και είναι αυτή που έχει επικρατήσει σε πρακτικές εφαρμογές και η μοναδική που απαντάται σε μεγάλους δίχρονους ναυτικούς κινητήρες.



Σχήμα 2.5: Διατάξεις απόπλυσης σε 2-Χ κινητήρες

Με το σύστημα της ευθύγραμμης απόπλυσης επιτυγχάνεται καλύτερη σάρωση του κυλίνδρου, φαινόμενο το οποίο οδηγεί στην μείωση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου και στην μείωση της θερμικής καταπόνησης του κινητήρα. Επιπρόσθετα με αυτήν την διάταξη απόπλυσης και λόγω της ανοδικής κίνησης αέρα και καυσαερίων, μειώνεται η απώλεια θερμότητας προς το ψυκτικό μέσο, μέσω των τοιχωμάτων του κυλίνδρου ενώ υπάρχει και μεγαλύτερη απορριπτόμενη θερμική ενέργεια καυσαερίων προς ανάκτηση από τα υπόλοιπα συστήματα ανάκτησης θερμικής ενέργειας.

Όσον αφορά την επικράτηση του δίχρονου κινητήρα έναντι του τετράχρονου, αυτό συνέβη λόγω της μεγαλύτερης συγκέντρωσης ισχύος του πρώτου. Ο δίχρονος κινητήρας απαιτεί 1 πλήρη περιστροφή του στροφαλοφόρου άξονα για να ολοκληρώσει τον κύκλο λειτουργίας του έναντι 2 πλήρων περιστροφών του τετράχρονου κινητήρα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα σε κινητήρες ίδιου μεγέθους ο δίχρονος κινητήρας, αν συμπεριλάβουμε τις αυξημένες απώλειες του σε σχέση με τον τετράχρονο κατά την εναλλαγή των αερίων του, να παράγει περίπου 1.8 φορές παραπάνω ισχύ από έναν τετράχρονο.

Στα φορτηγά πλοία μεγάλου μεγέθους, που για την πρόωση τους χρησιμοποιούν έλικες με μεγάλη διάμετρο, προκειμένου η έλικα να λειτουργεί σε υψηλούς βαθμούς απόδοσης θα πρέπει η ταχύτητα της να είναι χαμηλή. Κατά αυτόν τον τρόπο και εφόσον η έλικα πρέπει να συνδεθεί στον κινητήρα χωρίς την ύπαρξη μειωτήρα, για λόγους κόστους και απλής λειτουργίας, θα πρέπει η ταχύτητα του κινητήρα να είναι αντίστοιχα χαμηλή. Για αυτόν τον λόγο επικράτησαν οι βραδύστροφοι κινητήρες, οι οποίοι έχουν εύρος τιμών από 60 έως 200 στροφές το λεπτό. Έχοντας ένα βραδύστροφο δίχρονο κινητήρα Diesel συνδεδεμένο άμεσα με μια έλικα επιτυγχάνουμε τον μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης και ως εκ τούτου την μείωση της κατανάλωσης της εγκατάστασης. Όμως επειδή η μέση ταχύτητα του εμβόλου δεν μπορεί να πέσει κάτω από μια ορισμένη τιμή και καθώς είναι ανάλογη με την διαδρομή του εμβόλου s και τις στροφές του κινητήρα n , για να επιτευχθεί μείωση των στροφών οι κατασκευαστές ναυτικών κινητήρων αυξάνουν την διαδρομή του εμβόλου s κάτι που έχει οδηγήσει σε μεγάλους λόγους διαδρομής προς διαμέτρου εμβόλου στους σύγχρονους ναυτικούς κινητήρες.

Η βασική εξίσωση που δίνει την ισχύ ενός κυλίνδρου μιας δίχρονης μηχανής είναι η εξής από το [18]:

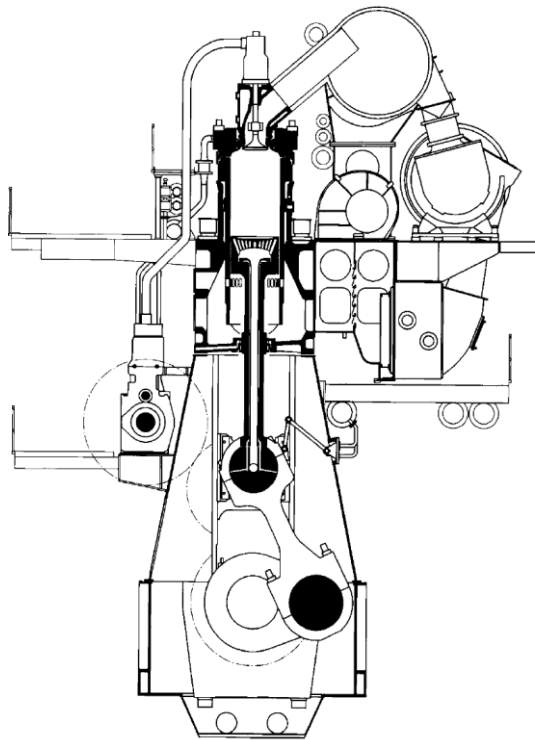
$$P = \bar{p}_i \times A \times s \times \frac{n}{60} \quad [2.14]$$

με τις εξής μεταβλητές:

- P : Μέγιστη ισχύς σε W.
- \bar{p}_i : Μέση ενδεικνύμενη πίεση του κυλίνδρου.
- A : Η επιφάνεια του εμβόλου σε m^2 .
- s : Η διαδρομή του εμβόλου σε m.
- n : Οι στροφές της μηχανής σε rpm.

Παρατηρούμε λοιπόν ότι πέρα από την επίτευξη της αναγκαίας μείωσης των στροφών, η αύξηση της διαδρομής του εμβόλου επιτρέπει στο καύσιμο να διογκωθεί

παραπάνω οδηγώντας στην μείωση της κατανάλωσης και την αύξηση της ισχύος. Οι μηχανές σήμερα έχουν λόγο διαδρομής προς διάμετρο εμβόλου μεταξύ των τιμών 2.5 και 4.5, ανάλογα την εφαρμογή. Με την διάμετρο να φτάνει έως και σχεδόν τα 1000mm είναι φυσικό πως ο κινηματικός μηχανισμός του διωστήρα με τον στρόφαλο δεν θα ήταν ικανός να αντέξει τα φορτία που θα αναπτύσσονταν κατά την λειτουργία του κινητήρα. Για αυτό το λόγο έχει κυριαρχήσει στις σύγχρονες κατασκευές ο κινηματικός μηχανισμός εμβόλου-βάκτρου-σταυρού-διωστήρα, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.6: Τομή σύγχρονης βραδύστροφης 2-Χ μηχανής Diesel, Wärtsilä RTA96C

Για να μετατραπεί η ευθύγραμμη κίνηση του βάκτρου στην παλινδρομική κίνηση του διωστήρα, απαιτείται η ύπαρξη ενός εδράνου το οποίο προσφέρει το ζύγωμα/σταυρός. Το άνω μέρος του διωστήρα συνδέεται με την κεφαλή του ζυγώματος/σταυρού, μέσω εδράνων, η οποία με την σειρά της συνδέεται γερά στο βάκτρο μέσω βιδών ενώ το κάτω μέρος του διωστήρα συνδέεται στο στρόφαλο. Κατά την διάρκεια λειτουργίας της μηχανής, οι δυνάμεις στο βάκτρο και τον διωστήρα παίρνουν τιμές που εξαρτώνται από την γωνιακή μετατόπιση του διωστήρα καθώς αυτός παίρνει κίνηση από τον στροφαλοφόρο άξονα. Οι δυνάμεις που αναπτύσσονται στον στροφαλοφόρο άξονα εξουδετερώνονται από τα έδρανα του ενώ οι δυνάμεις που αναπτύσσονται στον σταυρό/ζύγωμα εξουδετερώνονται λόγω της ύπαρξης κατάλληλων οδηγών.

Όσον αφορά την επικράτηση της υπερπλήρωσης στους ναυτικούς κινητήρες Diesel οι λόγοι είναι σχετικά απλοί. Με την εφαρμογή της υπερπλήρωσης στους ναυτικούς κινητήρες Diesel αυξάνουμε την συγκέντρωση ισχύος για ένα συγκεκριμένο μέγεθος μηχανής ενώ

παράλληλα λόγω αυξημένης πίεσης του νέου εργαζόμενου μέσου επιτυγχάνεται καλύτερη σάρωση του κυλίνδρου κατά την απόπλυση. Επιπρόσθετα με την χρήση της υπερπλήρωσης εκμεταλλευόμαστε την θερμική ενέργεια των καυσαερίων αυξάνοντας τον βαθμό απόδοσης του κινητήρα. Τέλος καθώς μιλάμε για ναυτική μηχανή δεν υφίστανται τα μειονεκτήματα της έλλειψης χώρου και της δυσκολίας παροχής μεγάλης ποσότητας ψυκτικού μέσου χαμηλής θερμοκρασίας και έτσι έχει επίσης επικρατήσει καθολικά η τοποθέτηση ψυγείου αέρα υπερπλήρωσης.

Ο χρονισμός της εγχύσεως του καυσίμου, στις παλαιότερες μηχανές, γινόταν μηχανικά με τη χρήση εκκεντροφόρου άξονα, ο οποίος παίρνει κίνηση από το στροφαλοφόρο μέσω μια αλυσίδας. Ο εκκεντροφόρος ρυθμίζει το χρονισμό των αντλιών καυσίμων και των βαλβίδων εξαγωγής. Στην σύγχρονη εποχή όμως, έχει σχεδόν κυριαρχήσει οι ρυθμίσεις αυτές να γίνονται ηλεκτρονικά μέσω υδραυλικών επενεργητών, εξαλείφοντας την ανάγκη για ύπαρξη εκκεντροφόρου άξονα. Με την απουσία του εκκεντροφόρου άξονα οι μηχανές καθίστανται ελαφρύτερες έχοντας λιγότερες μηχανικές απώλειες ενώ παράλληλα επιτυγχάνουν βελτίωση στην ειδική κατανάλωση καυσίμου στα χαμηλότερα φορτία.

Συνοψίζοντας, τα πλεονεκτήματα του βραδύστροφου δίχρονου κινητήρα Diesel με άμεση σύνδεση με την έλικα είναι η χαμηλή κατανάλωση, ακόμα και καυσίμου χαμηλής ποιότητας, καθώς και η απλότητα στην σχεδίαση και την κατασκευή που συνεπάγονται υψηλή λειτουργική αξιοπιστία. Έχοντας λιγότερα κινούμενα μέρη, μειώνονται οι πιθανότητες βλάβης ενώ το κόστος συντήρησης συχνά αποδεικνύεται μικρότερο από αυτό των μεσόστροφων μηχανών. Προκειμένου να βελτιωθεί περαιτέρω η θερμοδυναμική απόδοση αυτών των κινητήρων, οι κατασκευαστές έχουν στρέψει την προσοχή τους κυρίως στην αύξηση της μέσης ενδεικνύμενης πίεσης. Η μείωση της διάρκειας της καύσεως και οι βελτιώσεις στην ανάμιξη αέρα και καυσίμου αποδίδουν μικρές βελτιώσεις ενώ προσπάθεια περαιτέρω αύξησης του λόγου διαδρομής προς διάμετρο εμβόλου προσκρούει στην αύξηση των θερμικών απωλειών αλλά και την αύξηση του κατασκευαστικού κόστους.

2.3.3 Τύποι ελίκων

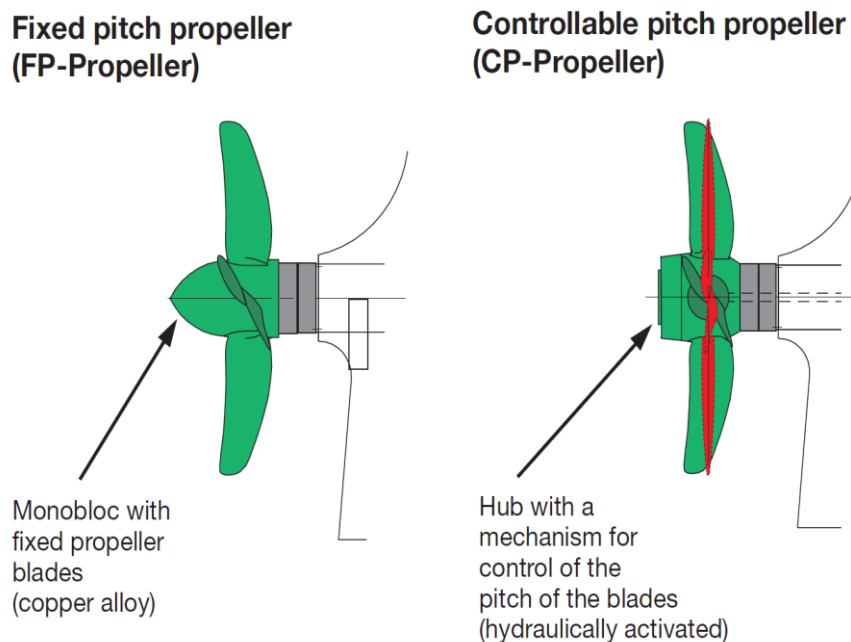
Οι έλικες μπορεί να χωριστούν στις δύο ακόλουθες κατηγορίες:

- 1) Έλικες σταθερού βήματος
- 2) Έλικες μεταβλητού βήματος

Οι έλικες σταθερού βήματος είναι ενιαία χυτά κομμάτια. Η θέση των πτερυγίων, και ως αποτέλεσμα το βήμα της έλικας, είναι ίση και σταθερή για όλα. Κατά την λειτουργία ενός πλοίου με έλικα σταθερού βήματος, το βήμα της δεν αλλάζει και έχει ως αποτέλεσμα οι καμπύλες απόδοσης της έλικας να αλλάζουν ακολουθώντας τους φυσικούς νόμους χωρίς αυτές να μπορούν να μεταβληθούν από το πλήρωμα. Η πλειοψηφία των εμπορικών πλοίων χρησιμοποιούν τέτοιου είδους έλικες καθώς κατά την διάρκεια λειτουργίας τους

πλέον για μεγάλα χρονικά διαστήματα σε σταθερές καιρικές συνθήκες και σε μια δεδομένη ταχύτητα λειτουργίας

Οι έλικες μεταβλητού βήματος διαφέρουν με τις έλικες σταθερού βήματος στο μέγεθος της πλήμνης τους, καθώς η πλήμη πρέπει να έχει αρκετό χώρο για τον υδραυλικό μηχανισμό ελέγχου του βήματος των πτερυγίων. Αυτού του είδους οι έλικες παρέχουν πολύ καλές ικανότητες ελιγμού αλλά είναι ακριβότερες, έχουν χαμηλότερη απόδοση και συνοδεύονται από υψηλότερο ρίσκο εμφάνισης προβλημάτων κατά την λειτουργία τους. Συνήθως χρησιμοποιούνται στα κρουαζιερόπλοια και τα διάφορα επιβατικά πλοία.



Σχήμα 2.7: Είδη ελίκων

2.3.4 Συνθήκες ροής γύρω από την έλικα και συντελεστές απόδοσης του συστήματος πρόωσης

Μεταξύ της γάστρας του πλοίου και του συστήματος πρόωσης του υπάρχει μια αλληλεπίδραση η οποία επηρεάζει την απόδοση της πρόωσης και τον σχεδιασμό του συστήματος πρόωσης. Όταν ένα σύστημα πρόωσης τοποθετείται στο πλοίο αλλάζει την ροή του νερού στην πρύμνη του πλοίου προκαλώντας αύξηση της αντίστασης που δέχεται η γάστρα του πλοίου αλλά και μείωση της μέσης ταχύτητας εισόδου της ροής στο σύστημα πρόωσης. Αυτά τα δύο αποτελέσματα ονομάζονται συντελεστής μείωσης ώσης t και συντελεστής ποσοστού ομόρρου w . Μαζί αυτά τα δύο αποτελέσματα δείχνουν την απόδοση της γάστρας του πλοίου.

Το σύστημα πρόωσης επιταχύνει την ροή του νερού που βρίσκεται μπροστά του. Αυτό το φαινόμενο οδηγεί στην αύξηση των διατμητικών δυνάμεων και στην μείωση της

πίεσης στο πίσω μέρος της γάστρας του πλοίου. Δηλαδή αυτή η επιτάχυνση της ροής από το σύστημα πρόωσης έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της αντίστασης της γάστρας του πλοίου για μια τιμή που είναι σχεδόν ανάλογη με την ώση που αυτό παράγει. Αυτή η αύξηση της αντίστασης παρουσιάζεται ως απώλεια ώσης και μπορεί να εκφραστεί σε αδιάστατη μορφή μέσω του συντελεστή μείωσης της ώσης t . Οι εξισώσεις [2.15] έως [2.23] που ακολουθούν δίνονται από το [6] ενώ ο συντελεστής μείωσης της ώσης t ορίζεται ως εξής:

$$t = \frac{F}{T} = \frac{T - R}{T} \rightarrow T = \frac{R}{(1 - t)} \quad [2.15]$$

Όπου F η απώλεια ώσης, T η ώση και R_T η αντίσταση ρυμουλκήσεως του πλοίου. Το μέγεθος του συντελεστή μείωσης της ώσης t επηρεάζεται από το σχήμα της γάστρας του πλοίου και για πλοία με μία έλικα κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0.12 και 0.30.

Με βάση το σχήμα [2.3] μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η έλικα πίσω από την γάστρα θα λειτουργεί σε ένα πεδίο ομόρρου. Συνεπώς το νερό γύρω από την έλικα θα έχει μια ταχύτητα ομόρρου V_W , η οποία έχει την ίδια κατεύθυνση με την ταχύτητα του πλοίου V . Αυτό σημαίνει ότι η ροή του νερού που φτάνει στην έλικα θα έχει μια ταχύτητα V_A που θα είναι κατά V_W χαμηλότερη από την ταχύτητα του πλοίου. Η πραγματική ταχύτητα του ομόρρου στην έλικα θα είναι η εξής:

$$V_W = V - V_A \quad [2.16]$$

Αυτή μπορεί να εκφραστεί σε αδιάστατη μορφή μέσω του συντελεστή ποσοστού του ομόρρου w , ως εξής:

$$w = \frac{V_W}{V} = \frac{V - V_A}{V} \quad [2.17]$$

Η τιμή του συντελεστή ποσοστού ομόρρου εξαρτάται σημαντικά από το σχήμα της γάστρας αλλά επίσης και από την θέση της έλικας και το μέγεθος της και επηρεάζει σημαντικά την απόδοσή της. Για πλοία που χρησιμοποιούν μια έλικα ο συντελεστής αυτός παίρνει τιμές που κυμαίνονται μεταξύ του 0.20 και 0.45

Οι 2 παραπάνω συντελεστές που υπολογίζονται από τις εξισώσεις [2.15] και [2.17] μας δίνουν συνδυαστικά τον βαθμό απόδοσης γάστρας η_H , ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος μεταξύ της ισχύος ρυμουλκήσεως του πλοίου P_E και της ισχύος που η έλικα προσδίδει στο νερό P_T και έχει την εξής εξίσωση:

$$\eta_H = \frac{P_E}{P_T} = \frac{R_T V}{V_A T} = \frac{\frac{R_T}{T}}{\frac{V_A}{V}} = \frac{1-t}{1-w} \quad [2.18]$$

Για ένα πλοίο με μία έλικα, ο βαθμός απόδοσης γάστρας η_H κυμαίνεται συνήθως στην περιοχή τιμών από 1.1 έως 1.4, με την υψηλή τιμή να αφορά πλοία με υψηλό συντελεστή γάστρας C_b .

Το τρίτο αποτέλεσμα είναι ότι ο συνδυασμός γάστρας και του συστήματος πρόωσης του πλοίου προκαλεί μια ροή νερού προς το σύστημα πρόωσης η οποία δεν είναι ομοιόμορφη και δεν είναι σε ορθή γωνία προς τον δίσκο της έλικας, αλλά είναι περιστροφική. Συνεπώς σε σχέση με την λειτουργία της έλικας σε ελεύθερη ροή, ο βαθμός της έλικας επηρεάζεται από συντελεστή η_R . Ο λόγος της ισχύς που παράγει η έλικα όταν δεν είναι προσαρτημένη στην γάστρα του πλοίου προς την ισχύ που παράγει όταν είναι, ονομάζεται βαθμός απόδοσης σχετικής περιστροφής η_R του συστήματος πρόωσης. Σε πλοία με μία έλικα, αυτός ο βαθμός απόδοσης σχετικής περιστροφής κυμαίνεται ανάμεσα στις τιμές 1.0 έως 1.07, δηλαδή αυτή η περιστροφική ροή έχει ευεργετικά αποτελέσματα στην λειτουργία της έλικας.

Πέρα από τους δύο παραπάνω συντελεστές που περιγράφουν τις συνθήκες ροής γύρω από την έλικα του πλοίου αλλά και τον βαθμό απόδοσης σχετικής περιστροφής, προκειμένου να βρούμε τον συνολικό βαθμό απόδοσης του συστήματος πρόωσης πρέπει να μιλήσουμε για τον βαθμό απόδοσης της έλικας σε ελεύθερη ροή η_o .

Ο βαθμός απόδοσης της έλικας η_o σχετίζεται με την απόδοση της έλικας σε ελεύθερη ροή, δηλαδή όταν η έλικα λειτουργεί λόγω απουσίας της γάστρας του πλοίου σε ομοιογενές πεδίο ομόρρου. Αυτός ο βαθμός απόδοσης εξαρτάται από την ταχύτητα της ροής του νερού που φθάνει στην έλικα V_A , την ώση T , τον ρυθμό περιστροφής n , την διάμετρο d αλλά και από τα επιμέρους γεωμετρικά χαρακτηριστικά της έλικας. Αυτός ο βαθμός απόδοσης κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0.35 και 0.75

Με βάση τους παραπάνω βαθμούς απόδοσης μπορούμε να ορίσουμε τον βαθμό απόδοσης του συστήματος πρόωσης η_D , ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος ρυμουλκήσεως του πλοίου P_E με την απαιτούμενη ισχύ που προσδίδεται στην έλικα P_D και δίνεται από την εξής εξίσωση:

$$\eta_D = \frac{P_E}{P_D} = \eta_H \eta_R \eta_o \quad [2.19]$$

Για να ολοκληρωθεί η ανάλυση του συστήματος πρόωσης του πλοίου, οφείλουμε να αναφέρουμε τον βαθμό απόδοσης του άξονα η_s , ο οποίος εξαρτάται μεταξύ άλλων από

την ευθυγράμμιση και την λίπανση των εδράνων του άξονα και του μειωτήρα, αν αυτός υπάρχει. Αυτός ο βαθμός απόδοσης του άξονα είναι ίσος με τον λόγο της ισχύος που προσδίδεται στην έλικα P_D και της ισχύος πέδησης της κύριας μηχανής P_B . Ο βαθμός απόδοσης του άξονα παίρνει τιμές από 0.96 έως 0.995 και έχει την εξής εξίσωση:

$$\eta_S = \frac{P_D}{P_B} \quad [2.20]$$

Τέλος με βάση τις εξισώσεις [2.19] και [2.20] μπορούμε να ορίσουμε τον ολικό βαθμό απόδοσης η_T , που ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος ρυμουλκήσεως P_E προς την απαιτούμενη ισχύ πέδησης P_B που παράγει η κύρια μηχανή και έχει την εξής εξίσωση:

$$\eta_T = \frac{P_E}{P_B} = \frac{P_E}{P_D} \times \frac{P_D}{P_B} = \eta_D \eta_S \quad [2.21]$$

2.3.5 Νόμος της έλικας

Με βάση αυτά που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο [2.2] όλες οι αντιστάσεις του πλοίου είναι ανάλογες του τετραγώνου της ταχύτητας. Συνεπώς η αντίσταση ρυμουλκήσεως του πλοίου R_T , που είναι άθροισμα των επιμέρους αντιστάσεων, είναι επίσης ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητας. Η σχέση αυτή έχει μεγάλη ακρίβεια για πλοία χαμηλής ταχύτητας. Η αντίστοιχη ισχύς ρυμουλκήσεως που απαιτείται για να κινηθεί το πλοίο μέσα στο νερό με μια ταχύτητα V , είναι ίση με το γινόμενο της αντίστασης ρυμουλκήσεως επί την ταχύτητα V και έχει την εξής μορφή:

$$P_T = R_T \times V \rightarrow P_T \propto V^3 \quad [2.22]$$

Με βάση την παραπάνω σχέση η ισχύς που πρέπει να αναπτύξει η έλικα προκειμένου να υπερνικήσει την ισχύ της αντίστασης θα είναι ανάλογη της 3^{ης} δύναμης της ταχύτητας του πλοίου. Όμως γνωρίζουμε ότι για ένα πλοίο που έχει ένα σύστημα πρόωσης με έλικα σταθερού βήματος, η ταχύτητα V είναι ανάλογη με το ρυθμό περιστροφής της έλικας n και επομένως η εξίσωση [2.22] παίρνει την εξής μορφή:

$$P = c \times n^3 \quad [2.23]$$

Η εξίσωση [2.23] εκφράζει τον νόμο της έλικας, ο οποίος δηλώνει ότι η αναγκαία ισχύς που απορροφάται από την έλικα είναι ανάλογη με την 3^η δύναμη του ρυθμού

περιστροφής της. Πραγματικές μετρήσεις έδειξαν ότι η σχέση μεταξύ ισχύος και ταχύτητας πλοίου συχνά εμφανίζεται να είναι μεγαλύτερη του τρία. Οι προσεγγίσεις για τις διάφορες κατηγορίες πλοίων έχουν ως εξής:

- Πλοία υψηλών ταχυτήτων: $P = c \times V^{4.5}$
- Πλοία μεσαίου μεγέθους και ταχύτητας: $P = c \times V^4$
- Πλοία χαμηλής ταχύτητας όπως δεξαμενόπλοια και πλοία μεταφοράς χύδην φορτίου: $P = c \times V^{3.5}$

Ο νόμος της έλικας ορίζεται για πλοίο με καθαρή γάστρα, σε ένα συγκεκριμένο βύθισμα και σε ιδανικές περιβαλλοντικές συνθήκες. Όμως κατά την διάρκεια λειτουργίας του το πλοίο αντιμετωπίζει αυξημένη αντίσταση λόγω ρύπανσης της γάστρας αλλά και λόγω έντονων καιρικών συνθηκών. Επιπρόσθετα το πλοίο έχει διάφορα βυθίσματα λειτουργίας κατά την διάρκεια ζωής του. Όπως είναι φυσικό ο νόμος της έλικας θα παίρνει τη μορφή μια «υψηλότερης» καμπύλης όταν το πλοίο αντιμετωπίζει συνθήκες που προσθέτουν αντίσταση στο πλοίο ή μιας «χαμηλότερης» καμπύλης όταν το βύθισμα του πλοίου είναι μικρότερο σε σύγκριση με το βύθισμα της καμπύλης που εκφράζει ο νόμος της έλικας.

Κεφάλαιο 3

3. Μέθοδοι υπολογισμού της πρόσθετης αντίστασης κατά την πλεύση του πλοίου

3.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο 2 έγινε παρουσίαση των βασικών αρχών αντίστασης και πρόωσης του πλοίου και πως αυτές αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους. Οι αντιστάσεις που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο αφορούσαν αποκλειστικά την αντίσταση που δέχεται ένα πλοίο σε ιδανικές συνθήκες, κατά τις οποίες δεν υπάρχουν κύματα και άνεμοι. Στην πραγματική λειτουργία του πλοίου όμως, η αντίσταση που αυτό δέχεται είναι μεγαλύτερη από την αντίσταση ρυμουλκήσεως R_T λόγω των καιρικών συνθηκών, της μείωσης της ομαλής επιφάνειας της γάστρας με τον χρόνο αλλά και άλλων λειτουργικών συνθηκών όπως το βάθος του νερού. Αυτή η αύξηση ισχύος που χρειάζεται για να ισοσταθμίσει την πρόσθετη αντίσταση ονομάζεται περιθώριο καιρού και είναι το ποσοστό της επιπλέον ισχύος σε σχέση με την ισχύ ρυμουλκήσεως του πλοίου σε ιδανικές συνθήκες.

Αυτό το ποσοστό κυμαίνεται μεταξύ του 15 έως 30%, με βάση την γενικότερη εμπειρία των κατασκευαστριών εταιρειών, της αντίστασης σε ιδανικές συνθήκες με την μεγαλύτερη πρόσθετη αντίσταση να είναι λόγω της επιρροής των κυμάτων. Μέχρι πριν από λίγα χρόνια αυτή η διαδικασία πρόσθεσης ενός εμπειρικού ποσοστού θεωρούταν κατάλληλη για πρακτικές εφαρμογές και σπανίως αμφισβητήθηκε. Στην σημερινή ημέρα όμως ο υπολογισμός της πρόσθετης αντίστασης που δέχεται ένα πλοίο προσέλκυσε το ενδιαφέρον των εταιρειών παγκοσμίως καθώς είναι πρωταρχική ανάγκη να μειωθεί η κατανάλωση των καυσίμων ενώ παράλληλα να υπάρξει συμμόρφωση με βάση τις νέες περιβαλλοντικές προϋποθέσεις. Με την παλιά διαδικασία πρόσθεσης ενός εμπειρικού ποσοστού ισχύος για να αντισταθμιστεί η πρόσθετη αντίσταση, ανεξάρτητα από το είδος του πλοίου και το μέγεθος του, οδηγούμασταν σε καταστάσεις κατά τις οποίες υπήρχαν μικρότερα πλοία χωρίς αρκετή ισχύ για να υπερνικήσουν την πρόσθετη αντίσταση κατά την λειτουργία τους παράλληλα με μεγαλύτερα πλοία που είχαν παραπάνω δύναμη από ότι χρειαζόνταν.

Με βάση τα παραπάνω, ο ακριβής υπολογισμός της πρόσθετης αντίστασης αποκτά μεγάλη σημασία στον υπολογισμό της επίδοσης του πλοίου στους τομείς της ισχύος και της ταχύτητας. Η πρόσθετη αντίσταση επηρεάζει τόσο την ισχύ του πλοίου όσο και την ταχύτητα του. Ο υπολογισμός της πρόσθετης αντίστασης μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα εξής προβλήματα που αφορούν τον σχεδιασμό, την λειτουργία και την συντήρηση του πλοίου:

- Γνωρίζοντας την ακριβή πρόσθετη αντίσταση μπορεί να αποφασιστεί από την κατασκευάστρια εταιρεία ποια θα είναι η μέγιστη αντίσταση που θα έχει το

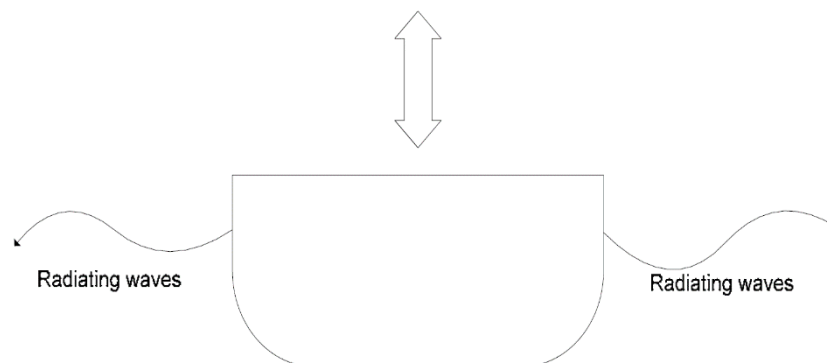
πλοίο και με βάση αυτή την τιμή να καθοριστεί η επιλογή του κινητήρα και γενικότερα του συστήματος πρόωσης.

- Η δρομολόγηση ενός πλοίου με βάση τον καιρό είναι πολύ σημαντική λόγω της οικονομικής επιρροής της κατά την λειτουργία ενός πλοίου. Γνωρίζοντας την πρόσθετη αντίσταση που δέχεται ένα πλοίο μπορούμε να υπολογίσουμε καλύτερα το χρόνο που θα χρειαστεί ένα πλοίο για να φτάσει στο προορισμό του, ελαχιστοποιώντας έτσι τα κόστη αποθήκευσης των φορτίων. Επιπρόσθετα μπορούμε να βελτιστοποιήσουμε την δρομολόγηση του πλοίου έτσι ώστε αυτό να πλέει σε θάλασσες με την μικρότερη δυνατή πρόσθετη αντίσταση μειώνοντας έτσι την κατανάλωση καυσίμου.
- Τα προηγούμενα δύο προβλήματα χρησιμοποιούν τον υπολογισμό της πρόσθετης αντίστασης για να βρουν την συνολική αντίσταση του πλοίου. Όμως το αντίστροφο πρόβλημα έχει επίσης μεγάλο ενδιαφέρον. Υπολογίζοντας την πρόσθετη αντίσταση του πλοίου μπορούμε να υπολογίσουμε την αντίσταση του σε ιδανικές συνθήκες. Αυτή η αντίσταση σε ιδανικές συνθήκες μπορεί να λειτουργήσει ως μέτρο της απόδοσης του πλοίου με τον χρόνο. Οι πλοιοκτήτες μπορούν να χρησιμοποιήσουν αυτήν την πληροφορία προκειμένου να καθορίσουν την αξία ενός πλοίου αλλά και κάθε πόσο θα χρειάζεται δεξαμενισμό το πλοίο προκειμένου να γίνουν εργασίες καθαρισμού της γάστρας και των ελίκων του.

3.2 Μέθοδοι υπολογισμού πρόσθετης αντίστασης λόγω κυμάτων

3.2.1 Γενικές αρχές πρόσθετης αντίστασης λόγω κυμάτων

Όταν ένα πλοίο κινείται σε μια θαλάσσια περιοχή με κύματα, όπως είναι φυσικό ταλαντώνεται. Μέσω αυτής της ταλάντωσης μεταφέρει ενέργεια στο νερό που το περικλείει, ενέργεια η οποία θα αυξήσει την αντίσταση που αυτό δέχεται. Η ενέργεια αυτή είναι λόγω της υδροδυναμικής απόσβεσης, η οποία έχει ως αποτέλεσμα το πλοίο να παράγει καινούρια κύματα.



Σχήμα 3.1: Παραγωγή κυμάτων λόγω ταλάντωσης του πλοίου

Αυτά τα κύματα παράγονται με δύο μηχανισμούς. Ο πρώτος μηχανισμός είναι η ανάκλαση των εισερχόμενων κυμάτων στην γάστρα του πλοίου ενώ ο δεύτερος μηχανισμός αφορά την σχετική κίνηση μεταξύ του πλοίου και της επιφάνειας της θάλασσας. Η ανάκλαση των εισερχόμενων κυμάτων αποτελεί το μεγαλύτερο μέρος της πρόσθετης αντίστασης των κυμάτων όταν το μήκος των κυμάτων είναι μικρό σε σχέση με το μήκος του πλοίου. Από την άλλη μεριά ο δεύτερος μηχανισμός είναι κυρίαρχος όταν το πλοίο ταλαντώνεται έντονα στον κάθετο άξονα, δηλαδή όταν παρατηρούνται μεγάλες κάθετες κινήσεις οι οποίες έχουν και ως αποτέλεσμα σημαντική κίνηση της γάστρας του πλοίου σε σχέση με την επιφάνεια της θάλασσας. Για το συγκεκριμένο μηχανισμό παραγωγής κυμάτων γνωρίζουμε ότι για κύματα με μικρό ύψος αλλά και για κύματα με αρκετά μεγάλη περίοδο T , το πλοίο θα ακολουθήσει την κίνηση τους και επομένως δεν θα υπάρχει η σχετική κίνηση μεταξύ της γάστρας του πλοίου και των κυμάτων η οποία προκαλεί την πρόσθετη αντίσταση.

Στην πραγματικότητα οι απόκριση ενός πλοίου στα κύματα δεν είναι γραμμική. Για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο πρέπει οι αποκρίσεις να γραμμικοποιηθούν. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με ικανοποιητική ακρίβεια καθώς το γραμμικό μέρος είναι υπεύθυνο για την απόκριση του πλοίου. Κατά αυτόν τον τρόπο οι κινήσεις του πλοίου αλλά και οι δυνάμεις που αυτό δέχεται από τα κύματα μοντελοποιούνται σαν ένα γραμμικό, χρονικά αμετάβλητο σύστημα. Αυτό σημαίνει ότι ένα πλοίο θεωρείται ως ένα σύστημα το οποίο λαμβάνει σαν είσοδο ένα γραμμικό ημιτονοειδές κύμα, το οποίο αντιπροσωπεύει το θαλάσσιο κύμα, και δίνει ως έξοδο ένα γραμμικό ημιτονοειδές σήμα που μπορεί να αντιπροσωπεύει μια κίνηση του πλοίου ή μια δύναμη την οποία δέχεται. Ένα γραμμικό, χρονικά αμετάβλητο σύστημα επιτρέπει η έξοδος του να έχει διαφορά φάσης με την είσοδο αλλά και να υπάρχει μια γραμμική αλλαγή στο πλάτος του ημιτονοειδούς κύματος. Αυτά τα χαρακτηριστικά του συστήματος, επιτρέπουν την χρήση της υπέρθεσης των κυμάτων εσόδου και εξόδου, τα οποία θα έχουν την εξής μορφή:

$$x(t) = \sum_k x_k(t) \rightarrow y(t) = \sum_k y_k(t) \quad [3.1]$$

Αυτό σημαίνει ότι οι κινήσεις του πλοίου και οι δυνάμεις που δέχεται από τα κύματα μια τυχαίας θαλάσσιας επιφάνειας, μπορούν να εκφραστούν ως το άθροισμα των αποκρίσεων ενός πλήθους κανονικών κυμάτων.

Η πρόσθετη αντίσταση λόγω κυμάτων είναι η μέση δύναμη που ασκείται αντίθετα στην κατεύθυνση του πλοίου. Υπολογίζοντας την μέση δύναμη από μια γραμμική δύναμη της μορφής της εξισώσεως [3.1] θα δούμε ότι δίνει αποτέλεσμα μηδέν καθώς η μέση τιμή ενός ημιτονοειδούς κύματος πρώτης τάξης στον χρόνο είναι ως εξής:

$$\frac{1}{T} \int_0^T A \cos(\omega t + \varepsilon) dt = 0 \quad [3.2]$$

Η μέση τιμή ενός ημιτονοειδούς κύματος δεύτερης τάξης στο χρόνο θα δίνει το εξής αποτέλεσμα:

$$\frac{1}{T} \int_0^T (A \cos(\omega t + \varepsilon))^2 dt = \frac{A^2}{2} \quad [3.3]$$

Επομένως η πρόσθετη αντίσταση είναι πρόβλημα 2^{ης} τάξης και σύμφωνα με πειράματα που έχουν δημοσιευθεί στο [15] η πρόσθετη αντίσταση λόγω κυμάτων εξαρτάται γραμμικά από το ύψος του κύματος στο τετράγωνο για ένα σταθερό μήκος κύματος.

3.2.2 Παρουσίαση μεθόδων υπολογισμού της πρόσθετης αντίστασης λόγω κυμάτων

Για τον υπολογισμό της πρόσθετης αντίστασης λόγω κυμάτων που δέχεται ένα πλοίο έχει αναπτυχθεί πληθώρα μεθόδων. Οι μέθοδοι μπορούν να ταξινομηθούν στις εξής τρεις κατηγορίες:

- Πειραματικές μέθοδοι
- Ρευστοδυναμικά μοντέλα (CFD models)
- Ημι-εμπειρικές μέθοδοι

Στις πειραματικές μεθόδους χρησιμοποιούνται μοντέλα των πλοίων σε κλίμακα, τα οποία τοποθετούνται σε μια δεξαμενή πειραμάτων και στόχος των οποίων είναι, η εύρεση των συναρτήσεων μεταφοράς του μοντέλου στα διάφορα είδη κυματισμού. Τα πειράματα στην δεξαμενή είναι διαφόρων ειδών (resistance tests, self-propulsion tests) και ως επιθυμητά αποτελέσματα είναι η εύρεση των συναρτήσεων μεταφοράς της ροπής, της ώσης και των στροφών της έλικας αλλά και της αδιάστατης πρόσθετης αντίστασης για διάφορους κυματισμούς. Για μια αναλυτική παρουσίαση των πειραματικών μεθόδων που χρησιμοποιούνται, αρκεί μια ανάγνωση του κειμένου της ITTC [11].

Στα ρευστοδυναμικά μοντέλα σκοπός είναι η ανάλυση του πεδίου ροής γύρω από την γάστρα του πλοίου με την εφαρμογή των θεμελιωδών εξισώσεων διατήρησης της μάζας, της ορμής και της ενέργειας (Navier-Stokes) αλλά και κάποιων τροποποιημένων εξισώσεων του ίδιου τύπου, όπως για ρευστό που είναι ασυμπίεστο (RANSE) ή για ρευστό που

αμελείται ο ιξώδης χαρακτήρας του . Η επίλυση των εξισώσεων αυτών γίνεται αριθμητικά και η διαδικασία που ακολουθείται συνοπτικά είναι η εξής:

1. Αρχικά γίνεται διακριτοποίηση της γάστρας του πλοίου, εφαρμόζοντας σε αυτή κατάλληλο αριθμητικό πλέγμα, το οποίο πρέπει να προσαρμόζεται όσο το δυνατόν καλύτερα στην γεωμετρία της. Το πλέγμα μπορεί να είναι δισδιάστατο (αξονοσυμμετρικό) ή τρισδιάστατο.
2. Διακριτοποίηση της μεταβλητής του χρόνου με μικρά συνεχή χρονικά διαστήματα, τα λεγόμενα χρονικά βήματα.
3. Διακριτοποίηση διαφορικών εξισώσεων, οι οποίες τροποποιούνται σε αλγεβρικές εξισώσεις που συνδέουν τα στοιχειώδη μεγέθη μεταξύ τους και αναφέρονται σε κόμβους στα όρια του πλέγματος. Επιπρόσθετα στους κόμβους στα όρια του πλέγματος αναφέρονται και οι οποιεσδήποτε οριακές συνθήκες τεθούν.
4. Οι παραπάνω αλγεβρικές εξισώσεις επιλύονται με κατάλληλο αλγόριθμο γραμμένο στην επιθυμητή γλώσσα προγραμματισμού. Τα αποτελέσματα δίνουν τις τιμές των προαναφερθέντων μεγεθών σε κάθε κόμβο του πλέγματος. Οι τιμές την χρονική στιγμή t_{n+1} προκύπτουν από τις αντίστοιχες για την στιγμή t_n .

Τα τελευταία χρόνια ,που η εξέλιξη της υπολογιστικής ισχύος είναι ραγδαία, έχουν αναπτυχθεί διάφορα τέτοια μοντέλα για εμπορική χρήση.

Οι ημι-εμπειρικές μέθοδοι έχουν ως βάση τις αρχές της πρόσθετης αντίστασης που προκαλούν τα κύματα σε ένα πλοίο ενώ παράλληλα χρησιμοποιούν τα δεδομένα πειραμάτων προκειμένου να βρουν μια προσέγγιση σύνθετων ολοκληρωμάτων ώστε να απλοποιήσουν τον υπολογισμό ή να παραμετροποιήσουν τις εξισώσεις με τέτοιο τρόπο ώστε τα αποτελέσματα να είναι σε συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα.

3.2.3 Συγκριτική αξιολόγηση των μεθόδων υπολογισμού της πρόσθετης αντίστασης λόγω κυμάτων

Η επιλογή της εκάστοτε μεθόδου που θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της πρόσθετης αντίστασης λόγω κυμάτων εξαρτάται από την εφαρμογή, τον χρόνο αλλά και τα διαθέσιμα δεδομένα.

Οι πειραματικές μέθοδοι, πέρα από το μεγάλο κόστος σε χρόνο και ανθρώπινο δυναμικό, υπόκεινται σε περιορισμούς λόγω της φύσης των δεξαμενών στις οποίες διεξάγονται τα πειράματα. Σε μια τυπική εφαρμογή τα μοντέλα έχουν μήκος από 3 έως 6 μέτρα και γίνονται πειράματα για λόγους μήκους κύματος προς μήκους πλοίο από 0.5 έως 2. Για κύματα με μικρό μήκος τα αποτελέσματα που προκύπτουν για την πρόσθετη αντίσταση περιέχουν μεγάλη αβεβαιότητα, καθώς λόγω κατασκευής των δεξαμενών δεν είναι εύκολη η αναπαράσταση κυμάτων με μικρό μήκος αφού υπάρχει η πιθανότητα ανάκλασης τους στα τοιχώματα της δεξαμενής.

Τα ρευστοδυναμικά μοντέλα επίσης παρουσιάζουν τεχνικές δυσκολίες στην περιοχή των κυμάτων που αντιπροσωπεύουν τα μικρά μήκη. Στα κύματα με μικρό μήκος, το αριθμητικό πλέγμα θα πρέπει να είναι πολύ πυκνό, κάτι το οποίο οδηγεί τα μοντέλα αυτά στα υπολογιστικά τους όρια. Επιπρόσθετα δημιουργούνται προβλήματα καθώς η πλειοψηφία των ρευστοδυναμικών μοντέλων αμελεί τον ιξώδη χαρακτήρα του νερού αλλά και την αλληλεπίδραση των εισερχόμενων κυμάτων με τα κύματα που παράγονται από την πλεύση του πλοίου.

Οι ημι-εμπειρικές μέθοδοι απαιτούν τα λιγότερα δεδομένα εισόδου, έχουν θεωρητική αλλά και πειραματική βάση και είναι σχετικά απλές στην εφαρμογή τους. Επίσης υπάρχει πληθώρα τέτοιων μεθόδων στην βιβλιογραφία προκειμένου κάποιος να αποφασίσει ποια μέθοδος έχει παραμετροποιήσει καλύτερα το πρόβλημα της πρόσθετης αντίστασης των κυμάτων. Στο κεφάλαιο 4 όπου γίνεται η παρουσίαση της μεθόδου διόρθωσης της ισχύος και της ταχύτητας των πλοίων προς μελέτη, γίνεται ανάλυση τεσσάρων ημι-εμπειρικών μεθόδων.

3.3 Μέθοδοι υπολογισμού της πρόσθετης αντίστασης λόγω ανέμων

Για τον υπολογισμό της πρόσθετης αντίστασης λόγω ανέμων χρειάζεται να γνωρίζουμε την πυκνότητα του αέρα, γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πλοίου, την σχετική ταχύτητα και κατεύθυνση του ανέμου αλλά και τον συντελεστή αντίστασης του αέρα, με βάση την εξής γενική εξίσωση που προκύπτει από [5] ή [9]:

$$R_{AA} = \frac{1}{2} \rho_{AA} C_{AA}(\psi_{ref}) A_{XV} V_{WRref}^2 \quad [3.4]$$

Οι διαφορετικοί μέθοδοι υπολογισμού αφορούν την εύρεση του συντελεστή αντίστασης του αέρα, ο οποίος εξαρτάται από την σχετική κατεύθυνση του αέρα και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πλοίου. Για την μεγαλύτερη ακρίβεια στον υπολογισμό του συντελεστή αντίστασης του αέρα, θα πρέπει να έχει γίνει δοκιμή του μοντέλου του πλοίου σε αεροδυναμική σήραγγα.

Σε περίπτωση που αυτή δεν έχει γίνει ή δεν υπάρχουν διαθέσιμα τα σχετικά αποτελέσματα, με βάση τον τύπο του πλοίου μπορούν να προκύψουν οι τιμές του συντελεστή από μια αντίστοιχη βάση δεδομένων παρόμοιων πλοίων. Για να είναι ικανοποιητική αυτή η προσέγγιση θα πρέπει ο τύπος του πλοίου να είναι ίδιος και η μορφή του να παρομοιάζει ικανοποιητικά με την γεωμετρία του πλοίου για το οποίο υπάρχουν δεδομένα.

Τέλος ένα άλλο είδος μεθόδου είναι οι ημι-εμπειρικές μέθοδοι που συνδυάζουν πειραματικά αποτελέσματα δοκιμών σε αεροδυναμική σήραγγα από ένα μεγάλο πλήθος διαφορετικών τύπων πλοίου και παραμετροποιούν τον συντελεστή αντίστασης του πλοίου με βάση κάποια γεωμετρικά χαρακτηριστικά του. Δύο τέτοιες μέθοδοι αναλύονται διεξοδικά στο κεφάλαιο 4.

3.4 Μέθοδος υπολογισμού της πρόσθετης αντίστασης λόγω της πυκνότητας του νερού

Όπως είδαμε στο κεφάλαιο 2, η θερμοκρασία του νερού και η περιεκτικότητα του σε αλάτι επηρεάζουν την πυκνότητα του, η οποία με την σειρά της επηρεάζει την αντίσταση του πλοίου. Συνήθως οι συνθήκες αναφοράς είναι 15^o C για την θερμοκρασία και 1025 kg/m³ για την πυκνότητα. Οποιαδήποτε απόκλιση από αυτές τις τιμές επηρεάζει την αντίσταση που δέχεται το πλοίο κατά την κίνηση του.

Η εξίσωση που υπολογίζει την αύξηση της αντίστασης λόγω αποκλίσεων από τις τιμές αναφοράς είναι η εξής και προέρχεται από το [9]:

$$R_{AS} = R_{T0} \left(\frac{\rho_s}{\rho_{s0}} - 1 \right) - R_F \left(\frac{C_{F0}}{C_F} - 1 \right) \quad [3.5]$$

Όπου:

$$R_F = \frac{1}{2} \rho_s S V_S^2 C_F \quad [3.6]$$

$$R_{F0} = \frac{1}{2} \rho_{s0} S V_S^2 C_{F0} \quad [3.7]$$

$$R_{T0} = \frac{1}{2} \rho_{s0} S V_S^2 C_{T0} \quad [3.8]$$

Με:

- R_{AS} : Πρόσθετη αντίσταση λόγω των αποκλίσεων θερμοκρασίας και πυκνότητας από τις τιμές αναφοράς.
- R_F : Αντίσταση τριβής για την πραγματική θερμοκρασία και πυκνότητα του νερού.
- R_{F0} : Αντίσταση τριβής για τις τιμές αναφοράς της θερμοκρασίας και πυκνότητας του νερού.
- R_{T0} : Συνολική αντίσταση για τις συνθήκες αναφοράς.

- C_F : Συντελεστής αντίστασης τριβής για την πραγματική θερμοκρασία και πυκνότητα νερού.
- C_{F0} : Συντελεστής αντίστασης τριβής για τις τιμές αναφοράς της θερμοκρασίας και της πυκνότητας του νερού.
- C_{T0} : Συντελεστής συνολικής αντίστασης τριβής για τις συνθήκες αναφοράς.
- S : Βρεχόμενη επιφάνεια του πλοίου.
- ρ : Η πυκνότητα του νερού στις πραγματικές συνθήκες.
- ρ_0 : Η πυκνότητα του νερού για τις συνθήκες αναφοράς.

Για να πάρουμε τιμές από την παραπάνω μέθοδο χρειάζεται να ξέρουμε την συνολική αντίσταση που δέχεται το πλοίο στις ιδανικές συνθήκες.

Κεφάλαιο 4

4. Παρουσίαση της προτεινόμενης μεθόδου διόρθωσης της ισχύος και της ταχύτητας πλεύσης του πλοίου

4.1 Παρουσίαση του διαγράμματος ροής της μεθόδου διόρθωσης

Προκειμένου να διορθωθούν οι τιμές της ισχύος και της ταχύτητας του πλοίου πρέπει να δοθούν τα κατάλληλα δεδομένα εισόδου, τα οποία θα περιγράφουν τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν σε μια δεδομένη χρονική περίοδο αλλά και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πλοίου προς εξέταση.

Στην πράξη δηλαδή τα δεδομένα εισόδου χωρίζονται στις εξής δύο κατηγορίες:

1. Λειτουργικά δεδομένα του πλοίου που διαφοροποιούνται ανά λεπτό
2. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πλοίου προς εξέταση

Εφόσον δοθούν τα δεδομένα εισόδου, στην συνέχεια υπολογίζονται κάποιες βοηθητικές παράμετροι που αφορούν τις καιρικές συνθήκες και την λειτουργία του πλοίου και είναι απαραίτητοι προκειμένου να προχωρήσει η διόρθωση των τιμών της ισχύος και της ταχύτητας.

Μετά τον υπολογισμό των βοηθητικών παραμέτρων μπορούμε να προχωρήσουμε στον υπολογισμό της πρόσθετης αντίστασης που δημιουργείται λόγω των καιρικών φαινομένων, η οποία χωρίζεται στις εξής 2 κατηγορίες:

1. Πρόσθετη αντίσταση λόγω κυμάτων
2. Πρόσθετη αντίσταση λόγω ανέμων

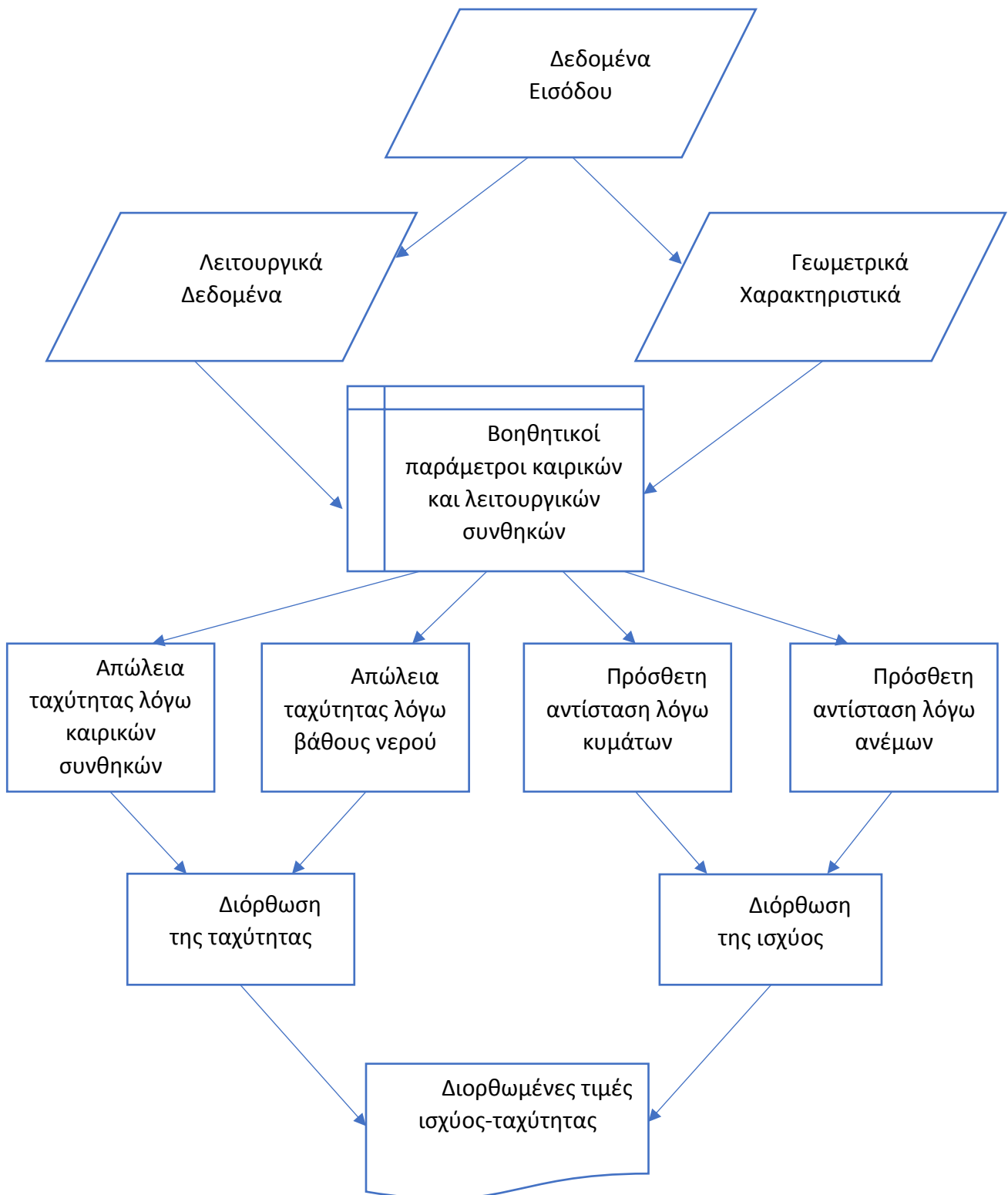
Στην συνέχεια βρίσκουμε την νέα ταχύτητα του πλοίου υπολογίζοντας την απώλεια ταχύτητας που θα έχει αυτό για τους εξής λόγους:

1. Απώλεια ταχύτητας λόγω δυσμενών καιρικών συνθηκών
2. Απώλεια ταχύτητας λόγω πλοήγησης σε αβαθή νερά

Στην συγκεκριμένη περίπτωση δεν προβλέπεται διόρθωση για εξάλειψη των ρευμάτων του ωκεανού καθώς χρησιμοποιείται η ταχύτητα του πλοίου σε σχέση με το νερό για τους υπολογισμούς.

Έχοντας βρει την πρόσθετη αντίσταση που δημιουργείται λόγω των καιρικών φαινομένων και γνωρίζοντας την απόδοση της πρόωσης του πλοίου μπορούμε να μετατρέψουμε αυτές τις αντιστάσεις σε ισχύ και κατά αυτόν τον τρόπο να βρούμε την νέα διορθωμένη ισχύ. Σε συνδυασμό με την νέα διορθωμένη ταχύτητα του πλοίου που έχει υπολογιστεί, ολοκληρώνεται η αξιολόγηση του πλοίου στους τομείς ισχύος και ταχύτητας και είναι δυνατή η χάραξη της καμπύλης ισχύος και ταχύτητας του πλοίου.

Οι παραπάνω επεξηγήσεις συνοψίζονται στο εξής διάγραμμα ροής:



Σχήμα 4.1: Διάγραμμα ροής της μεθόδου διόρθωσης

4.2 Περιγραφή της μεθόδου διόρθωσης της ισχύος και της ταχύτητας πλεύσης του πλοίου

4.2.1 Περιγραφή των δεδομένων εισόδου

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω τα δεδομένα εισόδου χωρίζονται στις εξής δύο κατηγορίες:

1. Λειτουργικά δεδομένα του πλοίου
2. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πλοίου

Αυτός ο διαχωρισμός γίνεται γιατί τα λειτουργικά δεδομένα του πλοίου αλλάζουν ανά λεπτό ενώ τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά παραμένουν τα ίδια καθ' όλη την διάρκεια της μελέτης. Παρακάτω παρουσιάζονται τα δεδομένα εισόδου ανά κατηγορία, με την ακριβή περιγραφή τους και τις μονάδες στις οποίες καταγράφονται:

Πίνακας 4.1: Λειτουργικά δεδομένα του πλοίου

Λειτουργικά δεδομένα εισόδου	Μονάδες
Κατεύθυνση κυμάτων	Μοίρες(°)
Κατεύθυνση πλοίου	Μοίρες(°)
Σχετική κατεύθυνση ανέμου	Μοίρες(°)
Ύψος κυμάτων	m
Περίοδος κυμάτων	s
Σχετική ταχύτητα ανέμου	m/s
Ταχύτητα πλοίου σε σχέση με το έδαφος	knots
Ταχύτητα πλοίου σε σχέση με το νερό	knots
Θερμοκρασία νερού	Βαθμοί Κελσίου(°C)
Βάθος νερού	m
Θερμοκρασία αέρα	Βαθμοί Κελσίου(°C)
Ισχύς κινητήρα	kW

Όπως μπορεί να παρατηρήσει κάποιος όλα τα παραπάνω δεδομένα εισόδου μπορούν να πάρουν ένα μεγάλο εύρος τιμών κατά την λειτουργία ενός πλοίου σε αντίθεση με τα δεδομένα εισόδου που ακολουθούν, τα οποία στην πλειοψηφία τους παραμένουν σταθερά καθ' όλη την διάρκεια της ζωής ενός πλοίου. Η μοναδική εξαίρεση αποτελεί το βύθισμα του πλοίου, το οποίο και αλλάζει ανά ταξίδι αλλά στην συγκεκριμένη μέθοδο θα

4. Παρουσίαση της προτεινόμενης μεθόδου διόρθωσης

θεωρείται σταθερό καθώς εξετάζουμε μικρότερες χρονικές περιόδους από ένα ολόκληρο ταξίδι.

Πίνακας 4.2: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πλοίου

Γεωμετρικά χαρακτηριστικά πλοίου	Περιγραφή παραμέτρου	Μονάδες
Μήκος	Συνολικό μήκος	m
	Μήκος γραμμής νερού	
	Μήκος μεταξύ των 2 καθέτων	
	Οριζόντια απόσταση μεταξύ της πλώρης και του σημείου στο οποίο βρίσκεται το 95% του συνολικού πλάτους του πλοίου πάνω στην γραμμή νερού	
	Οριζόντια απόσταση μεταξύ του κέντρου της μέσης τομής και του κέντρου της πλευρικής επιφάνειας	
	Μήκος της περιμέτρου της πλευρικής επιφάνειας	
	Οριζόντια απόσταση μεταξύ της πλώρης και του κέντρου της εγκάρσιας επιφάνειας	
Πλάτος	-	m
Βύθισμα	Βύθισμα στην μέση τομή	m
Ύψος	Ύψος ανεμόμετρου	m
	Ύψος μεταξύ γραμμής νερού και κέντρου της πλευρικής επιφάνειας	
	Ύψος της υψηλότερης υπερκατασκευής του πλοίου	
Επιφάνεια	Πλευρική επιφάνεια	m ²
	Εγκάρσια επιφάνεια στην οποία προσπίπτει ο αέρας	
	Εγκάρσια επιφάνεια των υπερκατασκευών του πλοίου	
	Επιφάνεια μέσης τομής που βρίσκεται κάτω από την γραμμή νερού	
Συντελεστής μορφής	Συντελεστής γάστρας	-
	Συντελεστής μέσης τομής	

4.2.2 Υπολογισμός των βοηθητικών λειτουργικών παραμέτρων

Προτού προχωρήσουμε στις διορθώσεις που αφορούν την ταχύτητα αλλά και την ισχύ του πλοίου θα πρέπει να υπολογίσουμε κάποιες παραμέτρους, οι οποίες λειτουργούν ως όρια στους υπολογισμούς των διορθώσεων.

Στην πράξη δηλαδή αν αυτές οι παράμετροι δεν λαμβάνουν τιμές εντός κάποιων ορίων, τα οποία θα αναλυθούν στον υπολογισμό της πρόσθετης αντίστασης λόγω κυμάτων, τότε οι εξισώσεις θα διαφοροποιηθούν καθώς δεν θα ισχύει η διασπορά των κυμάτων με βάση την γραμμική θεωρία τους.

Με βάση την γραμμική θεωρία των κυμάτων για την κυκλική συχνότητα ω , την περίοδο T και τον αριθμό κύματος k , ισχύουν τα εξής:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad [4.1]$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad [4.2]$$

Η διασπορά των κυμάτων στην γραμμική θεωρία τους υποδεικνύει ότι υπάρχει μια σχέση μεταξύ k και ω , η οποία εξαρτάται από την επιτάχυνση της βαρύτητας g αλλά και το βάθος του νερού. Δηλαδή για ένα δεδομένο k προκύπτουν δύο τιμές του ω ως εξής με βάση το [2]:

$$\omega^2 = gk \tanh(hk) \quad [4.3]$$

Λύνοντας ως προς ω καταλήγουμε στις δύο τιμές, που συμβολίζουν την κατεύθυνση κατά την οποία διασπείρονται τα κύματα:

$$\omega = \pm (gk \tanh(hk))^{\frac{1}{2}} \quad [4.4]$$

Γνωρίζουμε ότι για μεγάλες τιμές του x της συνάρτησης $\tanh(x)$ ισχύει η εξής συνθήκη:

$$\tanh(x) = 1 \quad [4.5]$$

Επομένως στην περίπτωση των κυμάτων για μεγάλη τιμή του γινομένου h επί k θα ισχύει:

$$\tanh(hk) = 1 \quad [4.6]$$

δηλαδή

$$\omega = \pm(gk)^{\frac{1}{2}} \quad [4.7]$$

Άρα για να καταλήξουμε στην παραπάνω σχέση μεταξύ ω και k θα πρέπει το γινόμενο hk να λαμβάνει μεγάλες τιμές. Όμως το γινόμενο hk είναι ίσο με:

$$hk = h \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{h}{\lambda} (\sigmaταθ) \quad [4.8]$$

Επομένως για να ισχύει η εξίσωση [4.7] θα πρέπει ο λόγος του βάθους του νερού με το μήκος του κυμάτων να είναι ο εξής:

$$\frac{h}{\lambda} > 0.5 \quad [4.9]$$

Έτσι κάνουμε την υπόθεση ότι ισχύει η εξίσωση [4.9] λόγω πλεύσης σε ωκεανό και υπολογίζουμε το λ με βάση την εξής εξίσωση:

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \quad [4.10]$$

Έχοντας βρει πλέον το μήκος κύματος λ μπορούμε να επιβεβαιώσουμε ότι η υπόθεση [4.9] είναι σωστή και να υπολογίσουμε και τις εξής τρεις παραμέτρους των κυμάτων που θα χρειαστούν στον υπολογισμό της πρόσθετης αντίστασης λόγω κυμάτων:

Αρχικά το ύψος των κυμάτων H το οποίο εξαρτάται από το σημαντικό ύψος των κυμάτων που δημιουργούνται από τον αέρα τοπικά $H_{w1/3}$ αλλά και μακριά από την τοποθεσία του πλοίου $H_{s1/3}$ προκύπτει ως εξής από το [9] :

$$H = \sqrt{H_{W1/3}^2 + H_{S1/3}^2} \quad [4.11]$$

Με βάση την [4.11] υπολογίζουμε το πλάτος του κύματος ζ_A ως εξής:

$$\zeta_A = \frac{1}{2}H \quad [4.12]$$

Τέλος υπολογίζουμε τον λόγο μεταξύ του μήκους κύματος και του ολικού μήκους του πλοίου L_{ratio} :

$$L_{ratio} = \frac{\lambda}{L_{OA}} \quad [4.13]$$

Μια επιπλέον βοηθητική παράμετρος που πρέπει να υπολογιστεί προκειμένου η πρόσθετη αντίσταση να μετατραπεί σε πρόσθετη ισχύ είναι η απόδοση του συστήματος πρόωσης η_D . Για τον υπολογισμό της, έχουμε βασιστεί στις τιμές που αυτή πήρε στις δοκιμές θαλάσσης σε σχέση με την ταχύτητα του πλοίου, οι οποίες παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες:

Πίνακας 4.3 : Τιμές ταχύτητας και βαθμού απόδοσης της πρόωσης για το πλοίο A

Πλοίο A	
Ταχύτητα(knots)	$\eta_D(-)$
11.39	0.6610
13.64	0.6880
14.80	0.6940
15.01	0.6960
15.68	0.7010
15.73	0.7020
15.76	0.7020
16.87	0.7070

Πίνακας 4.4 : Τιμές ταχύτητας και βαθμού απόδοσης της πρόωσης για το πλοίο B

Πλοίο B	
Ταχύτητα(knots)	$\eta_D(-)$
13.051	0.8439
14.33	0.8255
15.10	0.8213
15.20	0.8210
15.38	0.8209
15.40	0.8209
15.70	0.8201
15.73	0.8193
15.82	0.8192
16.16	0.8168

16.17	0.8168
17.06	0.8068

Γνωρίζοντας ότι η απόδοση της πρόωσης εξαρτάται γραμμικά από την πρόσθετη αντίσταση και καθώς η αντίσταση, όπως είδαμε στο κεφάλαιο 2 εξαρτάται από το τετράγωνο της ταχύτητας, εφαρμόζοντας την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων στην περιοχή των ταχυτήτων που μελετήθηκαν, καταλήξαμε στις εξής σχέσεις για τον υπολογισμό της απόδοσης της πρόωσης με βάση την ταχύτητα του πλοίου:

$$(\eta_D)_A = 0.0002981V_{TW}^2 + 0.6273 \quad [4.14]$$

$$(\eta_D)_B = -0.0002697V_{TW}^2 + 0.8855 \quad [4.15]$$

4.2.3 Υπολογισμός της πρόσθετης αντίστασης λόγω κυμάτων

Για τον υπολογισμό της πρόσθετης αντίστασης λόγω κυμάτων χρησιμοποιούμε τέσσερις ημι-εμπειρικές μεθόδους. Από αυτές τις τέσσερις μεθόδους μόνο η πρώτη δεν υπόκειται σε προϋποθέσεις με βάση τα δεδομένα εισόδου αλλά και τις βοηθητικές παραμέτρους που υπολογίστηκαν στο κεφάλαιο [4.2.2]. Οι υπόλοιπες τρεις μέθοδοι είναι πιο ακριβείς αλλά δεν ικανοποιούνται πάντα οι προϋποθέσεις που απαιτούν προκειμένου να δώσουν μια τιμή της πρόσθετης αντίστασης λόγω των κυμάτων.

Παρακάτω θα παρουσιαστούν οι τέσσερις μέθοδοι με την σειρά μικρότερης ακρίβειας και μεγαλύτερης εφαρμογής κατά τον υπολογισμό. Είναι εύκολο να παρατηρήσει κάποιος ότι η τελευταία μέθοδος έχει μεγαλύτερο αριθμό μεταβλητών που της επιτρέπει να υπολογίζει με μεγαλύτερη ακρίβεια το υδροδυναμικό φαινόμενο της πρόσθετης αντίστασης που δημιουργούν τα κύματα αλλά παράλληλα απαιτεί σαν δεδομένο εισόδου ιδιαίτερα σύνθετα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πλοίου τα οποία συνήθως δεν είναι διαθέσιμα.

Κατά την διάρκεια των υπολογισμών χρησιμοποιούνται και οι τέσσερις μέθοδοι αλλά κρατάμε το αποτέλεσμα από την μέθοδο που είναι πιο ακριβής.

Μέθοδος Kreitner

Η συγκεκριμένη μέθοδος προέρχεται από το [19] και απαιτεί σαν είσοδο τις εξής μεταβλητές:

- H : Ύψος κυμάτων σε m.
- B : Πλάτος πλοίου σε m.

- C_b : Συντελεστής γάστρας του πλοίου.
- ρ_w : Πυκνότητα του νερού σε kg/m^3 .
- L_{WL} : Μήκος της γραμμής νερού του πλοίου σε m.
- g : Επιτάχυνση της βαρύτητας σε m/s^2 .
- α_w : Η γωνία μεταξύ της κατεύθυνσης του πλοίου και των εισερχόμενων κυμάτων σε μοίρες.

Η πρόσθετη αντίσταση λόγω κυμάτων R_{wave} δίνεται από την εξής εξίσωση :

$$R_{wave} = \left(0.64 H^2 B^2 C_b \rho_w \frac{1}{L_{WL}} g \right) (0.667 + 0.333 \cos \alpha_w) \quad [4.16]$$

Μέθοδος STAwave-1

Η συγκεκριμένη μέθοδος υπολογισμού της πρόσθετης αντίστασης είναι εξίσου απλή με αυτήν που προηγήθηκε αλλά έχει κάποιες προϋποθέσεις όσον αφορά τα δεδομένα εισόδου.

Η συγκεκριμένη μέθοδος προέρχεται από το [9] και απαιτεί σαν είσοδο τις εξής μεταβλητές:

- L_{BWL} : Η απόσταση της πλώρης στο επίπεδο της γραμμής νερού μέχρι το σημείο που φτάνει στο 95% του μέγιστου πλάτους του πλοίου σε m.
- H : Ύψος κυμάτων σε m.
- B : Πλάτος πλοίου σε m.
- ρ_w : Πυκνότητα του νερού σε kg/m^3 .
- g : Επιτάχυνση της βαρύτητας σε m/s^2 .
- α_w : Η γωνία μεταξύ της κατεύθυνσης του πλοίου και των εισερχόμενων κυμάτων σε μοίρες.
- L_{pp} : Το μήκος του πλοίου μεταξύ των 2 καθέτων σε m.

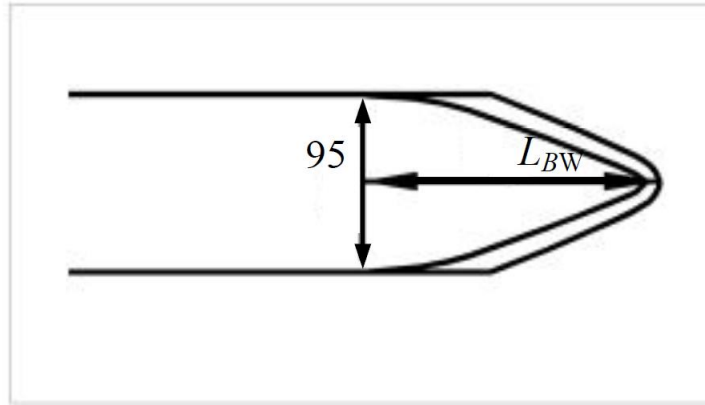
Επίσης η συγκεκριμένη μέθοδος έχει τις εξής προϋποθέσεις σχετικές με τις τιμές που μπορούν να λάβουν τα δεδομένα εισόδου:

$$H \leq 2.25 \sqrt{\frac{L_{PP}}{100}} \quad [4.17]$$

$$-45 \leq \alpha_w \leq 45 \quad [4.18]$$

Η πρόσθετη αντίσταση λόγω κυμάτων R_{wave} δίνεται από την εξής εξίσωση :

$$R_{wave} = \frac{1}{16} \rho_w g H^2 B \sqrt{\frac{B}{L_{BWL}}} \quad [4.19]$$



Σχήμα 4.2: Σχηματική απεικόνιση του L_{BWL}

Μέθοδος STAwave-2

Η συγκεκριμένη μέθοδος υπολογισμού της πρόσθετης αντίστασης λόγω κυμάτων είναι η πιο σύνθετη καθώς απαιτεί σαν δεδομένα εισόδου πληθώρα χαρακτηριστικών που περιγράφουν τον κυματισμό την δεδομένη στιγμή του υπολογισμού, πέρα από τα διάφορα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που συναντήσαμε στις προηγούμενες δυο μεθόδους.

Επιπρόσθετα προκειμένου να δώσει μια τιμή της πρόσθετης αντίστασης απαιτεί έναν μεγάλο αριθμό προϋποθέσεων σχετικών με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πλοίου αλλά και την ταχύτητα πλεύσης του.

Η τιμή της πρόσθετης αντίστασης που προκύπτει είναι το άθροισμα της πρόσθετης αντίστασης λόγω της ανάκλασης των κυμάτων στην καρίνα του πλοίου R_{AWR} και της πρόσθετης αντίστασης λόγω της επακόλουθης ταλάντωσης του πλοίου από την επιρροή των κυμάτων R_{AWM} .

Η μέθοδος απαιτεί σαν είσοδο τα εξής δεδομένα με βάση το [9]:

- C_b : Συντελεστής γάστρας του πλοίου.
- ζ_A : Πλάτος κυμάτων σε m.
- k_{yy} : Ακτίνα αδράνειας του πλοίου στην κάθετη κατεύθυνση.
- T_M : Βύθισμα πλοίου στην μέση τομή σε m.
- ρ_w : Πυκνότητα του νερού σε kg/m^3 .
- g : Επιτάχυνση της βαρύτητας σε m/s^2 .
- B : Το πλάτος του πλοίου σε m.
- L_{pp} : Το μήκος του πλοίου μεταξύ των 2 καθέτων σε m.

4. Παρουσίαση της προτεινόμενης μεθόδου διόρθωσης

- F_n : Ο αριθμός Froude.
- k : Ο αριθμός κύματος σε radians ανά μέτρο.
- ω : Η κυκλική συχνότητα των κυμάτων σε s^{-1} .
- V_{TW} : Η ταχύτητα του πλοίου σε σχέση με το νερό σε m/s.
- L_{WL} : Μήκος του πλοίου στην γραμμή νερού.
- I_1, K_1 : Τροποποιημένες συναρτήσεις Bessel 1^{ης} τάξης, πρώτου και δεύτερου τύπου αντίστοιχα.

Έχουμε και τις εξής προϋποθέσεις αναφορικά με τα δεδομένα εισόδου:

$$75 < L_{pp} < 350 \quad [4.20]$$

$$4 < \frac{L_{pp}}{B} < 9 \quad [4.21]$$

$$2.2 < \frac{B}{T} < 5.5 \quad [4.22]$$

$$0.10 < Fn < 0.30 \quad [4.23]$$

$$0.50 < C_b < 0.90 \quad [4.24]$$

$$-45 \leq \alpha_w \leq 45 \quad [4.25]$$

Για τον υπολογισμό της πρόσθετης αντίστασης με την συγκεκριμένη μέθοδο χρησιμοποιούνται οι εξής εξισώσεις:

$$R_{wave} = R_{AWM} + R_{AWR} \quad [4.26]$$

Όπου R_{AWM} προκύπτει από τις εξής εξισώσεις:

$$R_{AWM} = 4\rho_w g \zeta_A^2 \frac{B^2}{L_{pp}} \bar{r}_{aw}(\omega) \quad [4.27]$$

Με $\bar{r}_{aw}(\omega)$ ως εξής:

$$\bar{r}_{aw}(\omega) = \bar{\omega}^{b_1} e^{\left(\frac{b_1}{a_1}[1-\bar{\omega}^{a_1}]\right)} a_1 Fr^{1.5} e^{-3.5Fr} \quad [4.28]$$

$$\bar{\omega} = \frac{\sqrt{\frac{L_{pp}}{g}} \sqrt[3]{k_{yy}}}{1.17 Fr^{-0.143}} \omega \quad [4.29]$$

$$a_1 = 60.3C_b^{1.34} \quad [4.30]$$

$$b_1 = \begin{cases} 11.0 \text{ για } \bar{\omega} < 1 \\ -8.50 \text{ για } \bar{\omega} \geq 1 \end{cases} \quad [4.31]$$

$$d_1 = \begin{cases} 14.0 \text{ για } \bar{\omega} < 1 \\ -566 \left(\frac{L_{pp}}{B}\right)^{-2.66} \end{cases} \quad [4.32]$$

$$Fn = \frac{V_{TW}}{\sqrt{gL_{WL}}} \quad [4.33]$$

Η αντίσταση R_{AWR} υπολογίζεται ως εξής :

$$R_{AWR} = \frac{1}{2} \rho_S g \zeta_A^2 B \alpha_1(\omega) \quad [4.34]$$

Με $\alpha_1(\omega)$ να προκύπτει ως εξής:

$$\alpha_1(\omega) = \frac{\pi^2 I_1^2(1,5kT_M)}{\pi^2 I_1^2(1,5kT_M) + K_1^2(1,5kT_M)} f_1 \quad [4.35]$$

$$f_1 = 0.692 \left(\frac{V_{TW}}{\sqrt{T_M g}} \right)^{0.769} + 1.81 C_b^{6.95} \quad [4.36]$$

Τροποποιημένη μέθοδος STAwave-2

Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι μια τροποποίηση της παραπάνω μεθόδου. Για τιμές του λόγου [4.13] μικρότερες από 0.5 μπορεί να αμεληθεί η αντίσταση που προκαλείται λόγω της ταλάντωσης του πλοίου από την επιρροή των κυμάτων. Κατά αυτόν τον τρόπο η πρόσθετη αντίσταση λόγω κυμάτων είναι ως εξής:

$$R_{wave} = R_{AWR} \quad [4.37]$$

Όπου R_{AWR} όπως αυτό υπολογίζεται από τις εξισώσεις [4.34],[4.35] και [4.36].

4.2.4 Υπολογισμός της πρόσθετης αντίστασης λόγω των ανέμων

Για τον υπολογισμό της πρόσθετης αντίστασης λόγω των ανέμων χρησιμοποιούμε την εξής εξίσωση σύμφωνα με το [5]:

$$R_{Air} = \frac{1}{2} \rho_{Air} C_{AA(\psi_{WRref})} A_{XV} V_{WRref}^2 - \frac{1}{2} \rho_{Air} C_{AA(0)} A_{XV} V_G^2 \quad [4.38]$$

Στην οποία έχουμε της εξής μεταβλητές:

- A_{XV} : Η προβολή της εγκάρσιας επιφάνειας που είναι εκτεθειμένη στον αέρα σε m^2 .
- C_{AA} : Ο συντελεστής αντίστασης του αέρα.
- V_{WR} : Η σχετική ταχύτητα του ανέμου σε m/s .
- ρ_{Air} : Η πυκνότητα του αέρα σε kg/m^3 .
- ψ_{WR} : Η σχετική κατεύθυνση του ανέμου σε μοίρες($^\circ$). Όταν αυτή ισούται με 0 σημαίνει ότι ο άνεμος έχει αντίθετη κατεύθυνση από την κατεύθυνση της πλώρης του πλοίου.
- V_G : Η ταχύτητα του πλοίου σε σχέση με το έδαφος σε m/s .

Το δεύτερο μέλος της εξίσωσης [4.38] εξαλείφει την πρόσθετη αντίσταση του ανέμου που δημιουργείται λόγω της κίνησης του πλοίου και χρησιμοποιεί τον συντελεστή αντίστασης αέρα για μετωπικό άνεμο.

Η σχετική ταχύτητα και η κατεύθυνση του ανέμου συνήθως μετριοούνται με την βοήθεια του ανεμόμετρου που βρίσκεται επί του πλοίου(συνήθως στο υψηλότερο σημείο της γέφυρας) . Για αυτό το λόγο οι μετρήσεις της σχετικής ταχύτητας που λαμβάνονται θα πρέπει να διορθωθούν λαμβάνοντας υπόψη το ύψος του ανεμόμετρου αλλά και το ύψος αναφοράς για τους συντελεστές αντίστασης του αέρα που θα χρησιμοποιηθούν στον υπολογισμό.

Η διόρθωση αυτών των σχετικών ταχυτήτων, προκειμένου να ανταποκρίνονται στις τιμές του συντελεστή αντίστασης του αέρα, γίνεται σε τρία βήματα. Αρχικά υπολογίζεται η πραγματική ταχύτητα και κατεύθυνση του ανέμου στο ύψος του ανεμόμετρου. Στην συνέχεια με βάση αυτήν την πραγματική ταχύτητα στο ύψος του ανεμόμετρου υπολογίζουμε την πραγματική ταχύτητα στο ύψος που αντιστοιχεί στον συντελεστή αντίστασης του αέρα. Τέλος έχοντας την πραγματική ταχύτητα στο ύψος που αντιστοιχεί στον συντελεστή αντίστασης του αέρα υπολογίζουμε την σχετική ταχύτητα και κατεύθυνση του ανέμου που θα χρειαστεί στον υπολογισμό της σχέσης [4.38].

Στην συνέχεια ακολουθούν οι εξισώσεις των βημάτων που αναλύθηκαν παραπάνω και βασίζονται στο [5]:

Υπολογισμός πραγματικής ταχύτητας και κατεύθυνσης ανέμου στο ύψος του ανεμόμετρου

$$V_{WT} = \sqrt{V_{WR}^2 + V_G^2 - 2V_G V_{WR} \cos \psi_{WR}} \quad [4.39]$$

$$\psi_{WT} = \tan^{-1} \left\{ \frac{V_{WR} \sin(\psi_{WR} + \psi) - V_G \sin \psi}{V_{WR} \cos(\psi_{WR} + \psi) - V_G \cos \psi} \right\} \text{ όταν ισχύει} \quad [4.40]$$

$$V_{WR} \cos(\psi_{WR} + \psi) - V_G \cos \psi \geq 0$$

$$\psi_{WT} = \tan^{-1} \left\{ \frac{V_{WR} \sin(\psi_{WR} + \psi) - V_G \sin \psi}{V_{WR} \cos(\psi_{WR} + \psi) - V_G \cos \psi} \right\} + 180 \text{ όταν ισχύει} \quad [4.41]$$

$$V_{WR} \cos(\psi_{WR} + \psi) - V_G \cos \psi \geq 0$$

$$V_{WR} \cos(\psi_{WR} + \psi) - V_G \cos \psi < 0$$

Στις παραπάνω εξισώσεις συναντάμε τις εξής μεταβλητές:

- V_{WT} : Η πραγματική ταχύτητα του ανέμου σε m/s.
- V_G : Η ταχύτητα του πλοίου σε σχέση με το έδαφος σε m/s.
- V_{WR} : Η σχετική ταχύτητα του ανέμου σε m/s.
- ψ : Η κατεύθυνση του πλοίου σε μοίρες($^\circ$).
- ψ_{WT} : Η πραγματική κατεύθυνση του ανέμου σε μοίρες($^\circ$).
- ψ_{WR} : Η σχετική κατεύθυνση του ανέμου σε μοίρες($^\circ$).

Διόρθωση των πραγματικών μεγεθών του ανέμου για την διαφορά ύψους ανεμόμετρου και ύψους αναφοράς των συντελεστών αντίστασης του αέρα

$$V_{WTref} = V_{WT} \left(\frac{Z_{ref}}{Z_{anem}} \right)^{\frac{1}{7}} \quad [4.42]$$

με τις εξής μεταβλητές:

- V_{WTref} : Η πραγματική ταχύτητα του ανέμου στο ύψος αναφοράς των συντελεστών αντίστασης του αέρα σε m/s.
- Z_{ref} : Το ύψος αναφοράς που χρησιμοποιήθηκε στην υπολογισμό των συντελεστών αντίστασης του αέρα σε m.
- Z_{anem} : Το ύψος του ανεμόμετρου επί του πλοίου σε m.

Υπολογισμός των σχετικών μεγεθών του ανέμου για το ύψος αναφοράς του συντελεστή αντίστασης του αέρα.

$$V_{WRref} = \sqrt{V_{WTref}^2 + V_G^2 + 2V_G V_{WTref} \cos(\psi_{WT} - \psi)} \quad [4.43]$$

$$\psi_{WRref} = \tan^{-1} \left\{ \frac{V_{WTref} \sin(\psi_{WT} - \psi)}{V_G + V_{WTref} \cos(\psi_{WT} - \psi)} \right\} \text{ για } V_G + V_{WTref} \cos(\psi_{WT} - \psi) \geq 0 \quad [4.44]$$

$$\psi_{WRref} = \tan^{-1} \left\{ \frac{V_{WTref} \sin(\psi_{WT} - \psi)}{V_G + V_{WTref} \cos(\psi_{WT} - \psi)} \right\} + 180 \text{ για} \quad [4.45]$$

$$V_G + V_{WTref} \cos(\psi_{WT} - \psi) < 0$$

με τις εξής νέες μεταβλητές:

- V_{WRref} : Η σχετική ταχύτητα του ανέμου στο ύψος αναφοράς των συντελεστών αντίστασης του αέρα σε m/s.
- Ψ_{WRref} : Η σχετική κατεύθυνση του ανέμου στο ύψος της αναφοράς των συντελεστών αντίστασης του αέρα σε μοίρες($^{\circ}$)

Έχοντας υπολογίσει τα μεγέθη της σχετικής ταχύτητας και κατεύθυνσης του ανέμου που απαιτούνται για τον υπολογισμό της εξίσωσης [4.38] μένει να υπολογιστεί η τιμή του συντελεστή αντίστασης του αέρα που εξαρτάται από την σχετική κατεύθυνση του ανέμου.

Για τον υπολογισμό του συντελεστή αντίστασης του αέρα χρησιμοποιούνται δύο μέθοδοι, ανάλογα με τα διαθέσιμα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πλοίου προς μελέτη.

Μέθοδος Isherwood

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην ανάλυση πειραματικών δεδομένων από μεγάλο αριθμό πλοίων και η οποία οδήγησε στην εξής εξίσωση σύμφωνα με το [10]:

$$C_X = A_0 + A_1 \frac{2A_L}{L_{OA}^2} + A_2 \frac{2A_T}{B^2} + A_3 \frac{L_{OA}}{B} + A_4 \frac{S}{L_{OA}} + A_5 \frac{C}{L_{OA}} + A_6 M \quad [4.46]$$

όπου έχουμε τις εξής μεταβλητές:

- C_x : Ο συντελεστής αντίστασης του αέρα.
- A_{0-6} : Σταθερές που εξαρτώνται από την τιμή της κατεύθυνσης του σχετικού ανέμου.
- A_L : Η προβολή της πλευρικής επιφάνειας του πλοίου σε m^2 .
- A_T : Η προβολή της εγκάρσιας επιφάνειας του πλοίου σε m^2 .
- L_{OA} : Το συνολικό μήκος του πλοίου σε m .
- B : Το πλάτος του πλοίου σε m .
- S : Το μήκος της περιμέτρου της προβολής της πλευρικής επιφάνειας του πλοίου σε m .
- C : Η απόσταση μεταξύ της πλώρης και του κέντρου της προβολής της πλευρικής επιφάνειας του πλοίου.
- M : Ο αριθμός των διακεκριμένων ομάδων δοκαριών διαχείρισης φορτίων που μπορεί να διακρίνει κάποιος στην προβολή της πλευρικής επιφάνειας.

Παρακάτω παρατίθενται οι τιμές των σταθερών A_{0-6} για τις διάφορες τιμές της σχετικής κατεύθυνσης του ανέμου:

Πίνακας 4.3: Τιμές σταθερών μεθόδου Isherwood για διαφορετικές τιμές της σχετικής κατεύθυνσης του ανέμου

$\psi_{WR}(^\circ)$	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
0	2.152	-5.00	0.243	-0.164	-	-	-
10	1.714	-3.33	0.145	-0.121	-	-	-
20	1.818	-3.97	0.211	-0.143	-	-	0.033
30	1.965	-4.81	0.243	-0.154	-	-	0.041
40	2.333	-5.99	0.247	-0.190	-	-	0.042
50	1.726	-6.54	0.189	-0.173	0.348	-	0.048
60	0.913	-4.68	-	-0.104	0.482	-	0.052
70	0.457	-2.88	-	-0.068	0.346	-	0.043
80	0.341	-0.91	-	-0.031	-	-	0.032
90	0.355	-	-	-	-0.247	-	0.018
100	0.601	-	-	-	-0.372	-	-0.020
110	0.651	1.29	-	-	-0.582	-	-0.031
120	0.564	2.54	-	-	-0.748	-	-0.024
130	-0.142	3.58	-	0.047	-0.700	-	-0.028
140	-0.677	3.64	-	0.069	-0.529	-	-0.032
150	-0.723	3.14	-	0.064	-0.475	-	-0.032
160	-2.148	2.56	-	0.081	-	1.27	-0.027
170	-2.707	3.97	-0.175	0.126	-	1.81	-
180	-2.529	3.76	-0.174	0.128	-	1.55	-

Μέθοδος Fujiwara

Μια άλλη μέθοδος υπολογισμού του συντελεστή αντίστασης του αέρα είναι η ημι-εμπειρική μέθοδος που αναπτύχθηκε από τον Fujiwara, βασισμένη σε δοκιμές αεροδυναμικών μοντέλων πλοίων σε αεροδυναμική σήραγγα. Η συγκεκριμένη μέθοδος κατέληξε στις εξής εξισώσεις υπολογισμού με βάση το [9]:

$$C_{AA} = C_{LF} \cos \psi_{WR} + C_{XLI} \left(\sin \psi_{WR} - \frac{1}{2} \sin \psi_{WR} (\cos \psi_{WR})^2 \right) \sin \psi_{WR} \cos \psi_{WR} + C_{ALF} \sin \psi_{WR} (\cos \psi_{WR})^2 \quad [4.47]$$

με τις παραμέτρους C_{LF}, C_{XLI}, C_{ALF} να εξαρτιούνται από τις τιμές της σχετικής κατεύθυνσης του αέρα.

Για $0 \leq \psi_{WR} < 90(deg)$ οι παράμετροι δίνονται από τις εξής εξισώσεις:

$$C_{LF} = \beta_{10} + \beta_{11} \frac{A_{YV}}{L_{OA}} + \beta_{12} \frac{C_{MC}}{L_{OA}} \quad [4.48]$$

$$C_{XLI} = \delta_{10} + \delta_{11} \frac{A_{YV}}{L_{OA} h_{BR}} + \delta_{12} \frac{A_{XV}}{B h_{BR}} \quad [4.49]$$

$$C_{ALF} = \varepsilon_{10} + \varepsilon_{11} \frac{A_{OD}}{A_{YV}} + \varepsilon_{12} \frac{B}{L_{OA}} \quad [4.50]$$

Για $90 < \psi_{WR} \leq 180(deg)$ οι παράμετροι δίνονται από τις εξής εξισώσεις:

$$C_{LF} = \beta_{20} + \beta_{21} \frac{B}{L_{OA}} + \beta_{22} \frac{h_C}{L_{OA}} + \beta_{23} \frac{A_{OD}}{L_{OA}^2} + \beta_{24} \frac{A_{XV}}{B^2} \quad [4.51]$$

$$C_{XLI} = \delta_{20} + \delta_{21} \frac{A_{YV}}{L_{OA} h_{BR}} + \delta_{22} \frac{A_{XV}}{A_{YV}} + \delta_{23} \frac{B}{L_{OA}} + \delta_{24} \frac{A_{XV}}{B h_{BR}} \quad [4.52]$$

$$C_{ALF} = \varepsilon_{20} + \varepsilon_{21} \frac{A_{OD}}{A_{YV}} \quad [4.53]$$

Για $\psi_{WR} = 90(deg)$ η τιμή του συντελεστή αντίστασης του αέρα είναι η εξής:

$$C_{AA|\psi_{WR}=90(deg)} = \frac{1}{2} (C_{AA|\psi_{WR}=90(deg)-\mu} + C_{AA|\psi_{WR}=90(deg)+\mu}) \quad [4.54]$$

Οι παραπάνω εξισώσεις έχουν τις εξής μεταβλητές:

- C_{AA} : Ο συντελεστής αντίστασης του αέρα.
- A_{OD} : Η προβολή της πλευρικής επιφάνειας των υπερκατασκευών του πλοίου στο κατάστρωμα σε m^2 .
- A_{XV} : Η επιφάνεια της μέγιστης εγκάρσιας τομής που εκτίθεται στον αέρα σε m^2 .
- A_{YV} : Η προβολή της πλευρικής επιφάνειας πάνω από την γραμμή νερού σε m^2 .
- B : Το πλάτος του πλοίου σε m .
- C_{MC} : Η οριζόντια απόσταση από την μέση τομή του πλοίου μέχρι το κέντρο της προβολής της πλευρικής επιφάνειας πάνω από την γραμμή νερού A_{YV} σε m .
- h_{BR} : Το ύψος της κορυφής της υπερκατασκευής (γέφυρα κ.λ.π) σε m .
- h_c : Το ύψος από την γραμμή νερού μέχρι το κέντρο της προβολής της πλευρικής επιφάνειας A_{YV} σε m .
- L_{OA} : Το συνολικό μήκος του πλοίου σε m .
- μ : Εύρος εξομάλυνσης του συντελεστή αντίστασης του αέρα, συνήθως 10 μοίρες.
- ψ_{WR} : Η σχετική κατεύθυνση του αέρα, 0 σημαίνει ότι ο αέρας έχει κατεύθυνση αντίθετη από αυτή του πλοίου.

Οι αδιάστατοι παράμετροι $\beta_{ij}, \delta_{ij}, \varepsilon_{ij}$ παίρνουν τις εξής τιμές:

Πίνακας 4.5: Τιμές αδιάστατων παραμέτρων μεθόδου Fujiwara

	j				
	0	1	2	3	4
β_{ij}	0.922	-0.507	-1.162	-	-
	-0.018	5.091	-10.367	3.011	0.341
δ_{ij}	-0.458	-3.245	2.313	-	-
	1.901	-12.727	-24.407	40.310	5.481
ε_{ij}	0.585	0.906	-3.239	-	-
	0.314	1.117	-	-	-

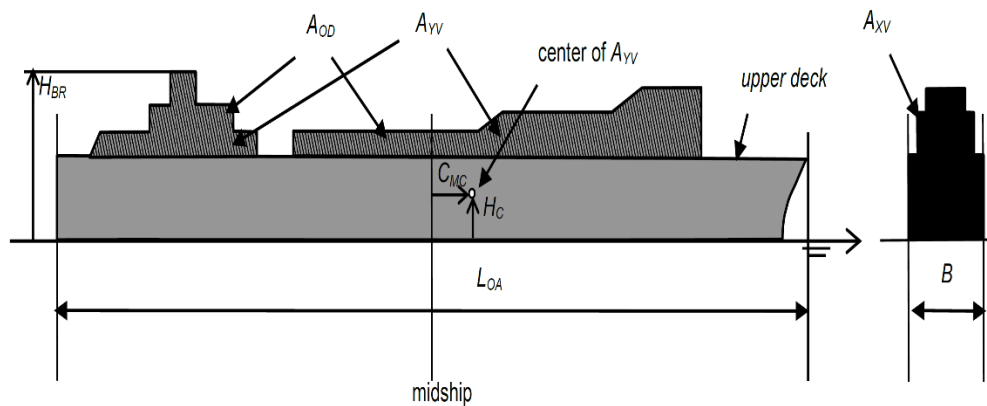


Figure C.2 Input parameters for regression formula by Fujiwara

Σχήμα 4.3: Οι παράμετροι εισόδου για την μέθοδο Fujiwara

Με βάση τις παραπάνω μεθόδους που αναλύθηκαν μπορούμε να υπολογίσουμε την πρόσθετη αντίσταση του ανέμου για κάθε τιμή της σχετικής κατεύθυνσης του αέρα με βάση την εξίσωση [4.38].

4.2.5 Υπολογισμός της απώλειας ταχύτητας πλεύσης λόγω κίνησης σε αβαθή νερά

Η μέθοδος του Lackenby χρησιμοποιείται για την διόρθωση της ταχύτητας του πλοίου όταν αυτό κινείται σε νερά με βάθος κάτω από κάποιες συγκεκριμένες τιμές.

Η εξίσωση που υπολογίζει την απώλεια της ταχύτητας είναι η εξής σύμφωνα με το [9]:

$$\frac{\Delta V_{swallow}}{V_{TW}} = 0.1242 \left(\frac{A_M}{h_w^2} - 0.05 \right) + 1 - \left(\tan h \left(\frac{gh_w}{V_{TW}^2} \right) \right)^{\frac{1}{2}} \quad [4.55]$$

με τον εξής περιορισμό:

$$\frac{A_M}{h_w^2} < 0.05 \quad [4.56]$$

Για τις παραπάνω εξισώσεις έχουμε τις εξής μεταβλητές:

- A_M : Επιφάνεια της μέσης τομής του πλοίου που βρίσκεται κάτω από την γραμμή νερού σε m^2 .

- g : Η επιτάχυνση της βαρύτητας σε m/s^2 .
- h_w : Το βάθος του νερού σε m .
- V_{TW} : Η ταχύτητα του πλοίου σε σχέση με το νερό σε m/s .
- $\Delta V_{swallow}$: Η απώλεια της ταχύτητας λόγω του βάθους του νερού.

4.2.6 Υπολογισμός της απώλειας ταχύτητας πλεύσης λόγω καιρικών συνθηκών

Για την διόρθωση της ταχύτητας του πλοίου, λόγω της πρόσθετης αντίστασης που προκαλείται από τις καιρικές συνθήκες, χρησιμοποιήθηκε μια τροποποιημένη εκδοχή του μοντέλου του Kwon σύμφωνα με το [13]. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι είναι απλή και πρακτική κατά την εφαρμογή της.

Η επίδραση του καιρού, η οποία στην συγκεκριμένη μέθοδο παρουσιάζεται ως απώλεια ταχύτητας του πλοίου, συγκρίνει την ταχύτητα του πλοίου στις συγκεκριμένες πραγματικές συνθήκες με την ταχύτητα που θα είχε αν δεν υπήρχε καμία επίδραση καιρού (απουσία ανέμων και κυμάτων). Αυτή η απώλεια ταχύτητας εκφράζεται με την εξής εξίσωση:

$$\frac{\Delta V_{weather}}{V_1} 100\% = \frac{V_1 - V_2}{V_1} 100\% = C_\beta C_U C_{form} \quad [4.57]$$

όπου έχουμε τις εξής παραμέτρους:

- V_1 : Ταχύτητα λειτουργίας του πλοίου αν δεν υπήρχε η επίδραση του καιρού σε m/s .
- V_2 : Πραγματική ταχύτητα του πλοίου για τις συνθήκες που επικρατούν και επιδέχονται διόρθωσης σε m/s .
- $\Delta V_{weather}$: Απώλεια ταχύτητας σε m/s .
- C_β : Συντελεστής κατεύθυνσης, ο οποίος εξαρτάται από την κατεύθυνση των κυμάτων και τον αριθμό των Beaufort που επικρατούν όπως φαίνεται από τον πίνακα 4.8
- C_U : Συντελεστής μείωσης ταχύτητας ο οποίος εξαρτάται από τον συντελεστή γάστρας του πλοίου, την κατάσταση φορτώσεως του και τον αριθμό Froude όπως δείχνει ο πίνακας 4.7
- C_{form} : Συντελεστής μορφής του πλοίου, ο οποίος εξαρτάται με βάση τα περιεχόμενα του πίνακα 4.9

Η ταχύτητα V_2 στην συγκεκριμένη μέθοδο είναι η ταχύτητα του πλοίου σε σχέση με το νερό V_{TW} . Επιπρόσθετα για τον υπολογισμό των 3 συντελεστών της μεθόδου αυτής χρειάζονται και οι εξής μεταβλητές:

- BN : Ο αριθμός Beaufort που περιγράφει τις καιρικές συνθήκες

4. Παρουσίαση της προτεινόμενης μεθόδου διόρθωσης

- F_n : Ο αριθμός Froude με βάση την εξίσωση [4.33]
- C_b : Ο συντελεστής γάστρας του πλοίου
- $\alpha_{weather}$: Η κατεύθυνση των καιρικών συνθηκών σε σχέση με την κατεύθυνση του πλοίου σε μοίρες($^{\circ}$)
- Δ : Το εκτόπισμα του πλοίου σε τόνους(tn)

Η κατεύθυνση των καιρικών συνθηκών στη συγκεκριμένη μέθοδο ισούται με την πραγματική κατεύθυνση του αέρα ο οποίος υπολογίζεται από τις εξισώσεις [4.40] ή [4.41].

Τον αριθμό Beaufort τον υπολογίζουμε με βάση την τιμή της πραγματικής ταχύτητας του ανέμου στο ύψος αναφοράς, δηλαδή με βάση την εξίσωση [4.42]. Ανάλογα την τιμή αυτής της πραγματικής ταχύτητας του ανέμου ο αριθμός Beaufort παίρνει τις εξής τιμές:

Πίνακας 4.6: Τιμές του αριθμού Beaufort με βάση την ταχύτητα του ανέμου

Ελάχιστη τιμή ταχύτητας ανέμου(m/s)	Μέγιστη τιμή ταχύτητας ανέμου(m/s)	Αριθμός Beaufort(BN)
0	0.29	0
0.3	1.59	1
1.6	3.39	2
3.4	5.49	3
5.5	7.99	4
8	10.79	5
10.8	13.89	6
13.9	17.19	7
17.2	20.79	8
20.8	24.49	9
24.5	28.4	10

Οι τρεις συντελεστές της μεθόδου ορίζονται ως εξής:

Πίνακας 4.7: Τιμές του συντελεστή μείωσης ταχύτητας C_u

Συντελεστής γάστρας C_b	Κατάσταση φορτώσεως	Συντελεστής μείωσης ταχύτητας C_u
0.55	Κανονική	$1.7-1.4F_n-7.4F_n^2$
0.60	Κανονική	$2.2-2.5F_n-9.7F_n^2$
0.65	Κανονική	$2.6-3.7F_n-11.6F_n^2$
0.70	Κανονική	$3.1-5.3F_n-12.4F_n^2$
0.75	Μέγιστη ή κανονική	$2.4-10.6F_n-9.5F_n^2$
0.80	Μέγιστη ή κανονική	$2.6-13.1F_n-15.1F_n^2$
0.85	Μέγιστη ή κανονική	$3.1-18.7F_n+28.0F_n^2$
0.75	Ερματισμού	$2.6-12.5F_n-13.5F_n^2$
0.80	Ερματισμού	$3.0-16.3F_n-21.6F_n^2$
0.85	Ερματισμού	$3.4-20.9F_n+31.8F_n^2$

Πίνακας 4.8: Τιμές του συντελεστή κατεύθυνσης C_β

Κατεύθυνση καιρού σε σχέση με την πλώρη(°)	Συντελεστής κατεύθυνσης C_β
0-30	$C_\beta=1$
30-60	$C_\beta = \frac{1.7 - 0.03((BN - 4)^2)}{2}$
60-150	$C_\beta = \frac{0.9 - 0.06((BN - 6)^2)}{2}$
150-180	$C_\beta = \frac{0.4 - 0.04((BN - 8)^2)}{2}$

Πίνακας 4.9: Τιμές του συντελεστή μορφής C_{form}

Είδος πλοίου	Συντελεστής μορφής του πλοίου C_{form}
Όλα τα είδη πλοίων(εκτός των πλοίων κοντέινερ) στην μέγιστη κατάσταση φορτώματος	$0.5BN + \frac{BN^{6.5}}{(2.7\Delta^{\frac{2}{3}})}$
Όλα τα είδη πλοίων(εκτός των πλοίων κοντέινερ) στην κατάσταση ερματισμού	$0.7BN + \frac{BN^{6.5}}{(2.7\Delta^{\frac{2}{3}})}$
Πλοία κοντέινερ	$0.7BN + \frac{BN^{6.5}}{(22\Delta^{\frac{2}{3}})}$

Υπολογίζοντας τους 3 συντελεστές για το είδος του πλοίου, το εκτόπισμα του, τον συντελεστή γάστρας του, την κατάσταση φορτώσεώς του αλλά και για τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν, μπορούμε με βάση την εξίσωση [4.57] να υπολογίσουμε την απώλεια της ταχύτητας.

4.2.7 Υπολογισμός των διορθωμένων τιμών ισχύος και ταχύτητας πλεύσης του πλοίου

Έχοντας υπολογίσει την πρόσθετη αντίσταση λόγω κυμάτων και αέρα αλλά και την απώλεια ταχύτητας λόγω βάθους του νερού και των καιρικών συνθηκών μπορούμε πλέον να υπολογίσουμε τις τελικές διορθωμένες τιμές της ισχύος και της ταχύτητας του πλοίου.

Όσον αφορά την πρόσθετη αντίσταση λόγω των κυμάτων, από τις τέσσερις διαθέσιμες μεθόδους διαλέγουμε την τιμή της αντίστασης εκείνη που είναι η πιο ακριβής, με την σειρά ακρίβειας να είναι ως εξής:

- 1) Η μέθοδος STAwave-2 από την εξίσωση [4.26]
- 2) Η τροποποιημένη μέθοδος STAwave-2 από την εξίσωση [4.37]

3) Η μέθοδος STAwave-1 από την εξίσωση [4.19]

4) Η μέθοδος Kreitner από την εξίσωση [4.16]

Διαλέγοντας την τιμή της αντίστασης την μετατρέπουμε σε ισχύ που φτάνει στην έξοδο του κινητήρα με την εξής εξίσωση:

$$P_{SW} = \frac{R_{wave} V_{TW}}{\eta_D} 10^{-3} \quad [4.58]$$

με τις εξής μεταβλητές:

- P_{SV} : Η πρόσθετη ισχύς λόγω κυμάτων στην έξοδο του κινητήρα σε kW.
- R_{wave} : Η πρόσθετη αντίσταση λόγω κυμάτων σε N.
- V_{TW} : Η ταχύτητα του πλοίου σε σχέση με το νερό σε m/s.
- η_D : Η απόδοση της πρόωσης του πλοίου για την ταχύτητα V_{TW} .

Η πρόσθετη αντίσταση του αέρα μετατρέπεται σε ισχύ που φτάνει στην έξοδο του κινητήρα με την εξής εξίσωση:

$$P_{SA} = \frac{R_{air} V_{TW}}{\eta_D} 10^{-3} \quad [4.59]$$

με τις εξής μεταβλητές:

- P_{SA} : Η πρόσθετη ισχύς λόγω αέρα στην έξοδο του κινητήρα σε kW.
- R_{air} : Η πρόσθετη αντίσταση λόγω αέρα σε N από την εξίσωση [4.38].
- V_{TW} : Η ταχύτητα του πλοίου σε σχέση με το νερό σε m/s.
- η_D : Η απόδοση της πρόωσης του πλοίου για την ταχύτητα V_{TW} .

Η διορθωμένη τιμή της ισχύος προκύπτει από την εξής εξίσωση:

$$P_0 = P_D - P_{SW} - P_{SA} \quad [4.60]$$

με τις εξής μεταβλητές:

- P_0 : Η διορθωμένη τιμή της ισχύος σε kW.
- P_D : Η τιμή της ισχύος του πλοίου κατά την λειτουργία του σε kW.
- P_{SV} : Η πρόσθετη ισχύς λόγω κυμάτων στην έξοδο του κινητήρα σε kW.
- P_{SA} : Η πρόσθετη ισχύς λόγω αέρα στην έξοδο του κινητήρα σε kW.

Η διορθωμένη τιμή της ταχύτητας του πλοίου δίνεται από την εξής εξίσωση:

$$V_s = \frac{(V_{TW} + \Delta V_{swallow} + \Delta V_{weather})}{0.51444} \quad [4.61]$$

με τις εξής μεταβλητές:

- V_s : Η διορθωμένη ταχύτητα του πλοίου σε knots.
- V_{TW} : Η ταχύτητα του πλοίου σε σχέση με το νερό σε m/s.
- $\Delta V_{swallow}$: Η απώλεια ταχύτητας λόγω βάθους του νερού σε m/s από την εξίσωση [4.55].
- $\Delta V_{weather}$: Η απώλεια ταχύτητας λόγω καιρικών συνθηκών σε m/s από την εξίσωση [4.57].

Κεφάλαιο 5

5. Εφαρμογή της μεθόδου διορθώσεως και σύγκριση με τα δεδομένα των μετρήσεων

5.1 Γενικά χαρακτηριστικά των πλοίων από τα οποία λήφθηκαν τα δεδομένα των μετρήσεων

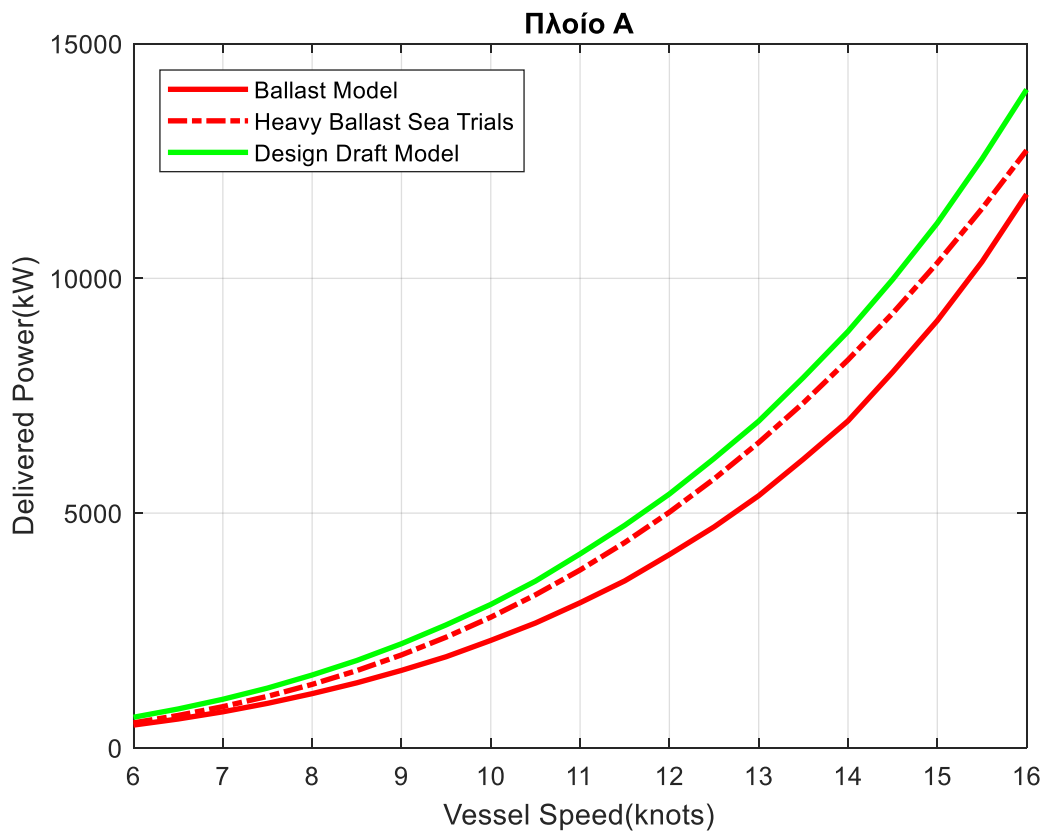
Για να ελεγχθεί η λειτουργία του λογισμικού, το οποίο είναι βασισμένο στην μέθοδο διορθώσεως που αναπτύχθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, λήφθηκαν δεδομένα λειτουργίας από δύο πλοία προκειμένου αυτά να επεξεργαστούν. Τα πλοία έχουν τα εξής γενικά χαρακτηριστικά:

Όνομασία	Πλοίο Α	Πλοίο Β
Είδος	Πλοίο μεταφοράς χύδην φορτίου(Bulk Carrier)	Πλοίο μεταφοράς χύδην φορτίου(Bulk Carrier)
Χωρητικότητα εκτοπίσματος(tons)	114500	180000
Συνολικό μήκος(m)	249.99	292.00
Πλάτος(m)	43	45
Ύψος(m)	21.3	24.9
Βύθισμα σχεδιασμού(m)	14.5	16.1
Μέγιστο Βύθισμα(m)	15	18.3
Όγκος φορτίου στο βύθισμα σχεδιασμού(m ³)	125977.8	175332.9
Όγκος φορτίου στο μέγιστο βύθισμα(m ³)	130860.4	202106.4
Είδος Κινητήρα	MAN B&W 7S60MC-C7	MAN B&W 6G70ME-C
Μέγιστη Ισχύς Κινητήρα(kW)	15820	15748
Διάμετρος Προπέλας(m)	7.48	8.8
Βήμα Προπέλας	Σταθερό	Σταθερό

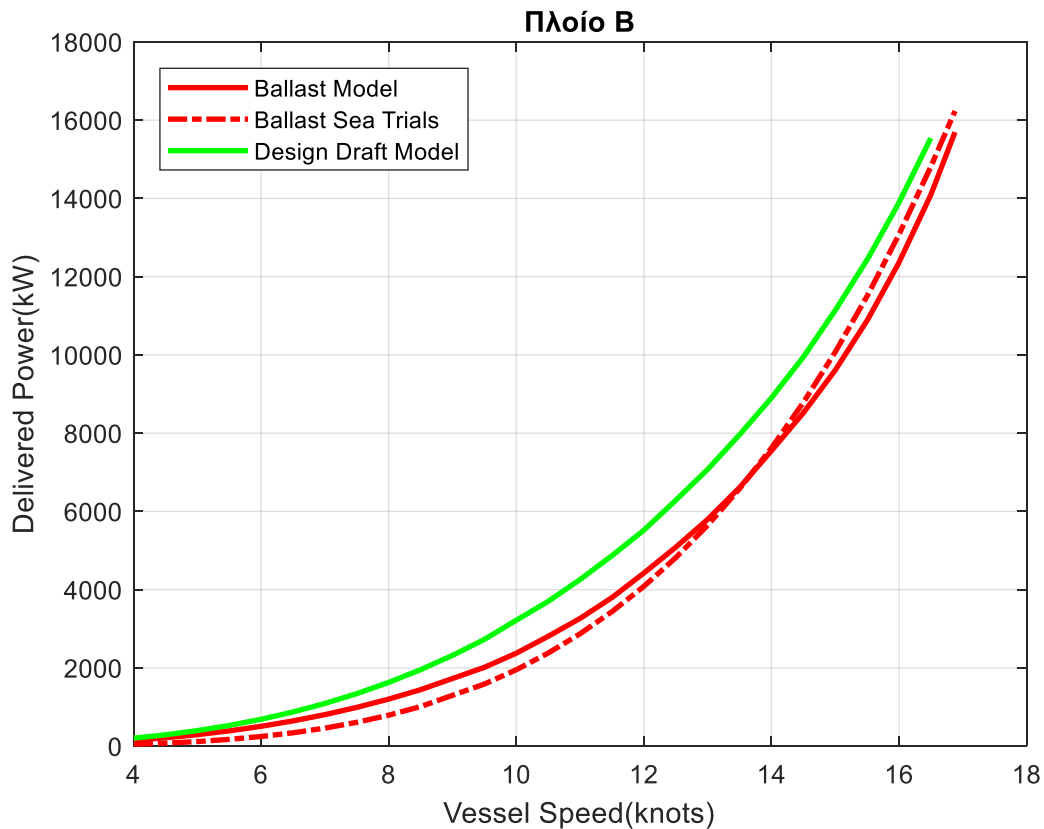
Πίνακας 5.1: Γενικά χαρακτηριστικά των πλοίων Α,Β.

Οι κατασκευάστριες εταιρείες επίσης μας παρεχώρησαν τις καμπύλες ισχύος και ταχύτητας του πλοίου που προέκυψαν από τις δοκιμές θάλασσας και από τις δοκιμές των

μοντέλων των πλοίων. Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται αυτές οι καμπύλες, για κάθε πλοίο ξεχωριστά:



Διάγραμμα 5.1: Καμπύλες ισχύος και ταχύτητας πλεύσης του πλοίου Α.



Διάγραμμα 5.2: Καμπύλες ισχύος και ταχύτητας πλεύσης του πλοίου Β.

5.2 Περιγραφή των δεδομένων των μετρήσεων

Για επεξεργασία με το λογισμικό που αναπτύχθηκε δόθηκαν λειτουργικά δεδομένα των δύο πλοίων που καλύπτουν την λειτουργία τους για ένα εύρος περίπου τεσσάρων μηνών. Τα λειτουργικά δεδομένα είναι αυτά που παρουσιάστηκαν στον πίνακα [4.1] στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Έχοντας αυτό το μεγάλο όγκο δεδομένων έπρεπε να τεθούν κάποιες προϋποθέσεις στα λειτουργικά δεδομένα εισόδου προκειμένου να καταλήξουμε στα επιθυμητά αποτελέσματα. Τα δεδομένα εισόδου παίρνουν διακεκριμένες τιμές ανά λεπτό της ώρας. Για αυτό το λόγο θεωρήσαμε ότι οι προϋποθέσεις που θα θέσουμε θα πρέπει να ισχύουν για ένα συνεχόμενο χρονικό διάστημα ώστε να έχουμε μια συνεχή ροή τιμών και όχι 4-5 σημεία σε διάστημα 8 ωρών που θα παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά. Για αυτό το λόγο η επεξεργασία έγινε σε πακέτα των 40 ή περισσότερων σημείων.

Επειδή η απόδοση του πλοίου εκφράζεται σε ισχύ και στην ταχύτητα του πλοίου σε σχέση με το νερό, η διόρθωση της θα πρέπει να είναι σε συνθήκες που η ροή του νερού στην προπέλα του πλοίου θα είναι η παρόμοια με αυτήν που λαμβάνουν τα speed logs του πλοίου. Με βάση το παραπάνω συμπέρασμα τα λειτουργικά δεδομένα εισόδου θα πρέπει να αντιστοιχούν στις εξής συνθήκες:

- Απουσία επιβραδύνσεων και επιταχύνσεων του πλοίου
- Απουσία αλλαγών πορείας
- Απουσία drift

Την πρώτη συνθήκη την διασφαλίζουμε θέτοντας προϋποθέσεις σε κάθε πακέτο τιμών αναφορικά με τις στροφές της προπέλας του πλοίου και της ισχύος που καταναλώνει.

Την δεύτερη συνθήκη την διασφαλίζουμε θέτοντας προϋποθέσεις σε κάθε πακέτο τιμών που αφορούν τις τιμές που παίρνει η κατεύθυνση του πλοίου.

Όσον αφορά την τρίτη συνθήκη, το φαινόμενο του drift χωρίζεται σε 2 συνιστώσες. Στο drift που προκαλείται λόγω των επιφανειακών ρευμάτων και το drift που προκαλείται λόγω των καιρικών φαινομένων. Για να διασφαλίσουμε αυτήν την συνθήκη θέτουμε προϋποθέσεις που αφορούν την διαφορά μεταξύ κατεύθυνσης και πορείας του πλοίου αλλά και το πόσο σταθερές είναι οι καιρικές συνθήκες. Το μέτρο σταθερότητας των καιρικών συνθηκών είναι ο αριθμός των Beaufort.

Ανακεφαλαιώνοντας οι προϋποθέσεις που θέσαμε στα πακέτα δεδομένων εισόδου είναι τα εξής:

Δεδομένα εισόδου	Προϋποθέσεις
Πλήθος τιμών	> 40 σημεία
Αριθμός Beaufort	Σταθερός
Πορεία πλοίου(°)	$\frac{C_{max} - C_{min}}{C_{max}} \leq 1\%$
Ταχύτητα περιστροφής κινητήρα(rpm)	$\frac{n_{max} - n_{min}}{n_{max}} \leq 1\%$
Ισχύς κινητήρα(kW)	$\frac{P_{max} - P_{min}}{P_{max}} \leq 5\%$
Διαφορά κατεύθυνσης και πορείας πλοίου(°)	$ (H - C)_{max} \leq 3$ $ Μέσος \ \acute{o}ρος \ (H - C) \leq 2$

Πίνακας 5.2: Προϋποθέσεις δεδομένων εισόδου

Με βάση τις παραπάνω προϋποθέσεις καταλήξαμε στα εξής σημεία προς διόρθωση:

	Πλοίο A			Πλοίο B	
Αρχικός αριθμός σημείων	119644			202343	
Σημεία προς διόρθωση	2836			2959	
Αριθμός Beaufort σημείων προς διόρθωση	2 έως 7			3 έως 8	
Περίπτωση μελέτης	A1	A2	B1	B2	B3
Βύθισμα πλοίου(m)	7.62	14.70	8.02	9.88	18.30

Πίνακας 5.3: Ανάλυση σημείων προς διόρθωση

Με βάση τον πίνακα [5.3] μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι για το πλοίο A αναλύθηκαν περίπου 120000 σημεία, τα οποία αντιστοιχούν σε περίπου 2000 ώρες λειτουργίας, ενώ για το πλοίο B αναλύθηκαν περίπου 200000 σημεία, τα οποία με την σειρά τους αντιστοιχούν σε περίπου 3333 ώρες λειτουργίας. Από αυτά τα σημεία, ξεχωρίσαμε περίπου 3000 σημεία προς διόρθωση για κάθε πλοίο, τα οποία ικανοποιούν τις προϋποθέσεις που περιγράφονται στον πίνακα [5.2]. Αυτά τα σημεία προς διόρθωση καλύπτουν ένα εύρος καιρικών συνθηκών από 2 έως 7 Beaufort για το πλοίο A και ένα εύρος από 3 έως 8 Beaufort για το πλοίο B. Επιπρόσθετα με βάση αυτά τα σημεία προς διόρθωση είχαμε δύο περιπτώσεις μελέτης για το πλοίο A, οι οποίες αντιστοιχούν σε δύο διαφορετικά βυθίσματα και τρεις περιπτώσεις μελέτης για το πλοίο B, οι οποίες με την σειρά τους αντιστοιχούν σε τρία διαφορετικά βυθίσματα.

5.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων της διόρθωσης των σημείων που επλέχθηκαν

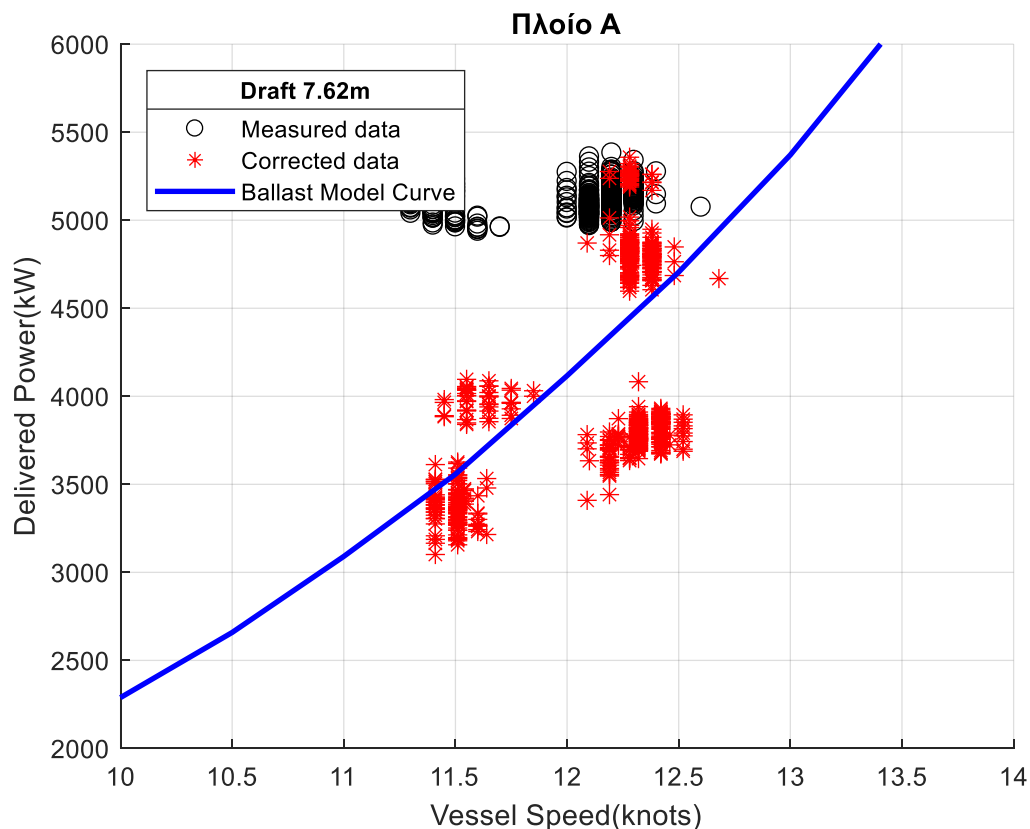
Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα για τις διάφορες περιπτώσεις μελέτης του κάθε πλοίου, οι οποίες και αντιστοιχούν σε διαφορετικά βυθίσματα, στα οποία γίνεται η απεικόνιση των δεδομένων που μετρήθηκαν αλλά και των αποτελεσμάτων της διόρθωσης μετά την εφαρμογή του μοντέλου και γίνεται η σύγκριση τους με τις καμπύλες ταχύτητας πλεύσης και ισχύος που δίνει η κατασκευάστρια εταιρεία.

Στα διαγράμματα που ακολουθούν τα μαύρα σημεία είναι τα δεδομένα που μετρήθηκαν, με κόκκινο είναι οι διορθωμένες τιμές τους μετά την εφαρμογή του μοντέλου διόρθωσης και με μπλε είναι οι καμπύλες της κατασκευάστριας εταιρείας.

5.3.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων της μεθόδου διόρθωσης για το πλοίο A

Αρχικά για το πλοίο A έχουμε τα εξής διαγράμματα:

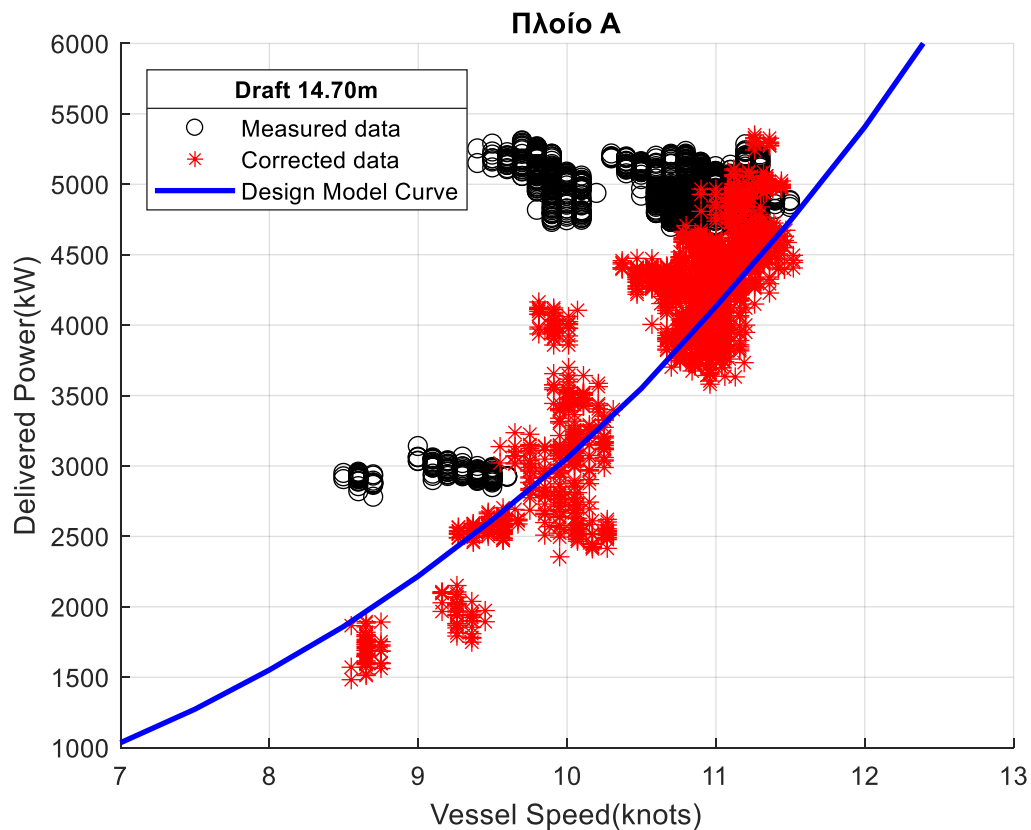
1) Περίπτωση μελέτης A1,για βύθισμα ίσο με 7.62m.



Διάγραμμα 5.3: Σύγκριση measured data, διορθωμένων σημείων ισχύος και ταχύτητας πλεύσης σε σχέση με την καμπύλη ισχύος και ταχύτητας του μοντέλου του πλοίου που δίνει η κατασκευάστρια εταιρία για την περίπτωση μελέτης A1

Παρατηρώντας το διάγραμμα 5.3 μπορούμε να δούμε ότι η διασπορά των σημείων της μέτρησης είναι πολύ μικρή, καθώς σχεδόν όλα τα σημεία είναι συγκεντρωμένα σε ένα εύρος ισχύος 500 kW (μαύρα σημεία). Μετά την διόρθωση παρατηρούμε ότι αυτή η διασπορά γίνεται πολύ μεγαλύτερη καθώς για το ίδιο εύρος τιμών ταχύτητας πλεύσης, τα διορθωμένα κόκκινα σημεία βρίσκονται σε ένα εύρος ισχύος σχεδόν 2500 kW. Επίσης μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η διασπορά των διορθωμένων τιμών δεν είναι τυχαία αλλά ακολουθεί την πορεία της μπλε γραμμής, η οποία είναι η καμπύλη ισχύος του πλοίου A από τις δοκιμές μοντέλου σε δεξαμενή σε κατάσταση ερματισμού (ballast).

2) Περίπτωση μελέτης A2,για βύθισμα ίσο με 14.70m.



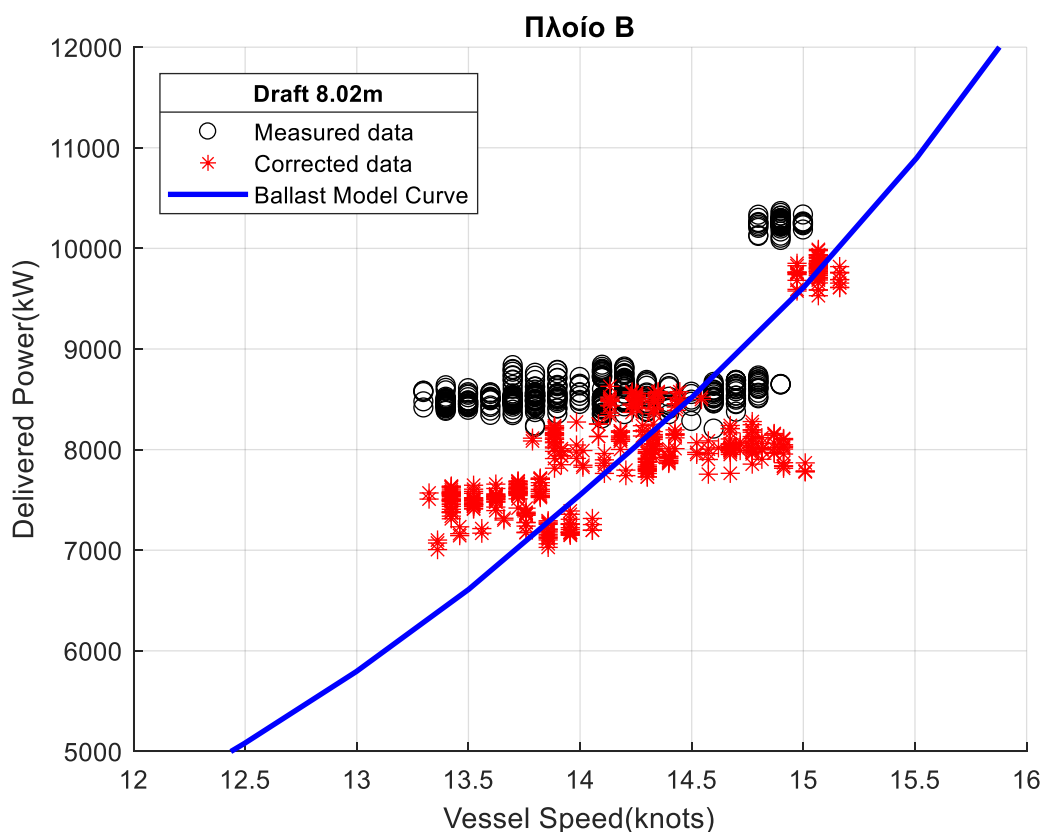
Διάγραμμα 5.4: Σύγκριση measured data, διορθωμένων σημείων ισχύος και ταχύτητας σε σχέση με την καμπύλη ισχύος και ταχύτητας του μοντέλου του πλοίου που δίνει η κατασκευάστρια εταιρία για την περίπτωση μελέτης A2

Παρατηρώντας το διάγραμμα 5.4 μπορούμε να δούμε ότι η διασπορά των σημείων της μέτρησης είναι πολύ μικρή, καθώς σχεδόν όλα τα σημεία είναι συγκεντρωμένα σε ένα εύρος ισχύος 500 kW (μαύρα σημεία). Μετά την διόρθωση παρατηρούμε ότι αυτή η διασπορά γίνεται πολύ μεγαλύτερη καθώς για το ίδιο εύρος τιμών ταχύτητας πλεύσης, τα διορθωμένα κόκκινα σημεία βρίσκονται σε ένα εύρος ισχύος σχεδόν 4000 kW. Επιπρόσθετα μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η διασπορά των διορθωμένων τιμών δεν είναι τυχαία αλλά ακολουθεί την πορεία της μπλε γραμμής, η οποία είναι η καμπύλη ισχύος του πλοίου A από τις δοκιμές μοντέλου σε δεξαμενή στο βύθισμα σχεδιασμού (design draft).

5.3.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων της μεθόδου διόρθωσης για το πλοίο B

Δευτερευόντως για το πλοίο B έχουμε τα εξής διαγράμματα με βάση το βύθισμα του :

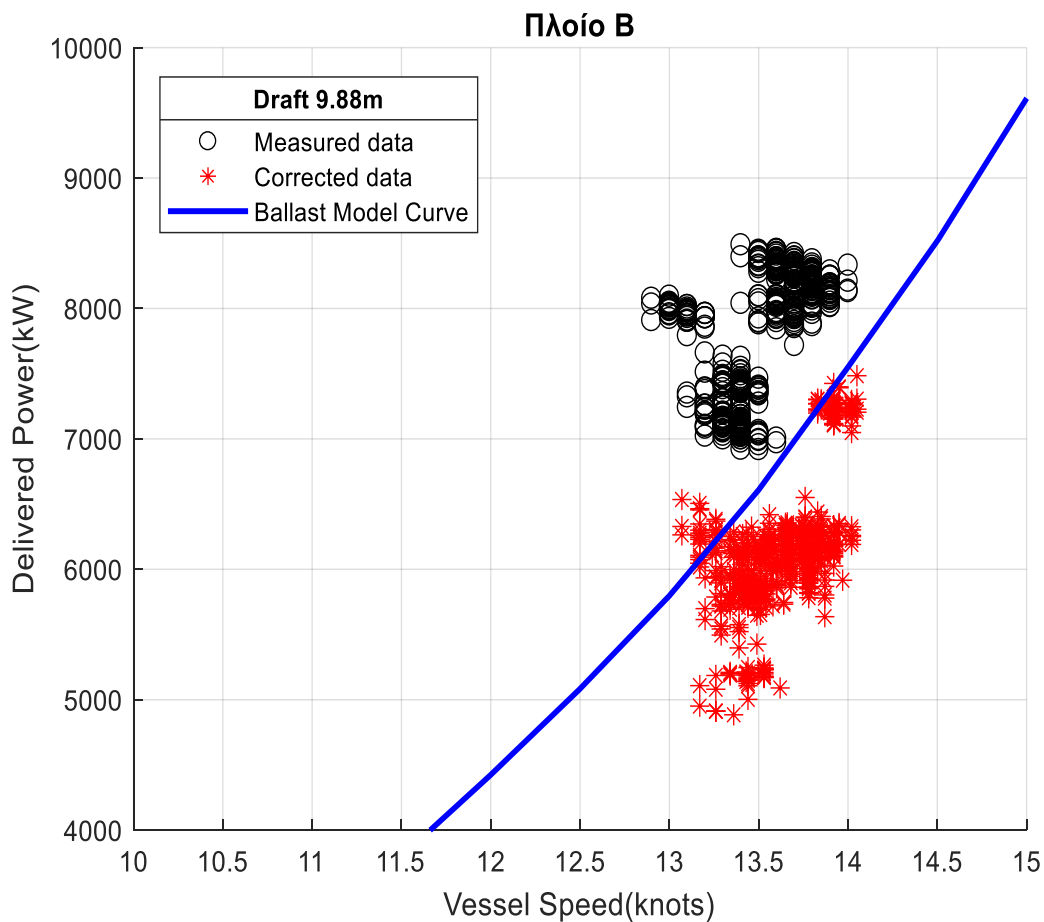
1) Περίπτωση μελέτης B1,για βύθισμα ίσο με 8.02m.



Διάγραμμα 5.5: Σύγκριση measured data, διορθωμένων σημείων ισχύος και ταχύτητας σε σχέση με την καμπύλη ισχύος και ταχύτητας του μοντέλου του πλοίου που δίνει η κατασκευάστρια εταιρία για την περίπτωση μελέτης B1

Παρατηρώντας το διάγραμμα 5.5 μπορούμε να δούμε ότι οι διορθώσεις είναι σχετικά μικρές, δηλαδή η διασπορά των σημείων των μετρήσεων (μαύρα σημεία) δεν έχει μεγάλη διαφορά από την διασπορά των κόκκινων διορθωμένων σημείων. Αυτό οφείλεται στο ότι τα συγκεκριμένα δεν είχαμε έντονα καιρικά φαινόμενα αλλά και στο ότι τα μετρημένα σημεία ήταν λίγα στον αριθμό. Παρόλα αυτά το εύρος της ισχύος των κόκκινων διορθωμένων σημείων είναι διπλάσιο από αυτό των μαύρων σημείων της μέτρησης ενώ παράλληλα έχουν καλύτερο ταίριασμα με την μπλε καμπύλη ισχύος και ταχύτητας, η οποία έχει προκύψει από τις δοκιμές του μοντέλου του πλοίου σε δεξαμενή σε κατάσταση ερματισμού (ballast).

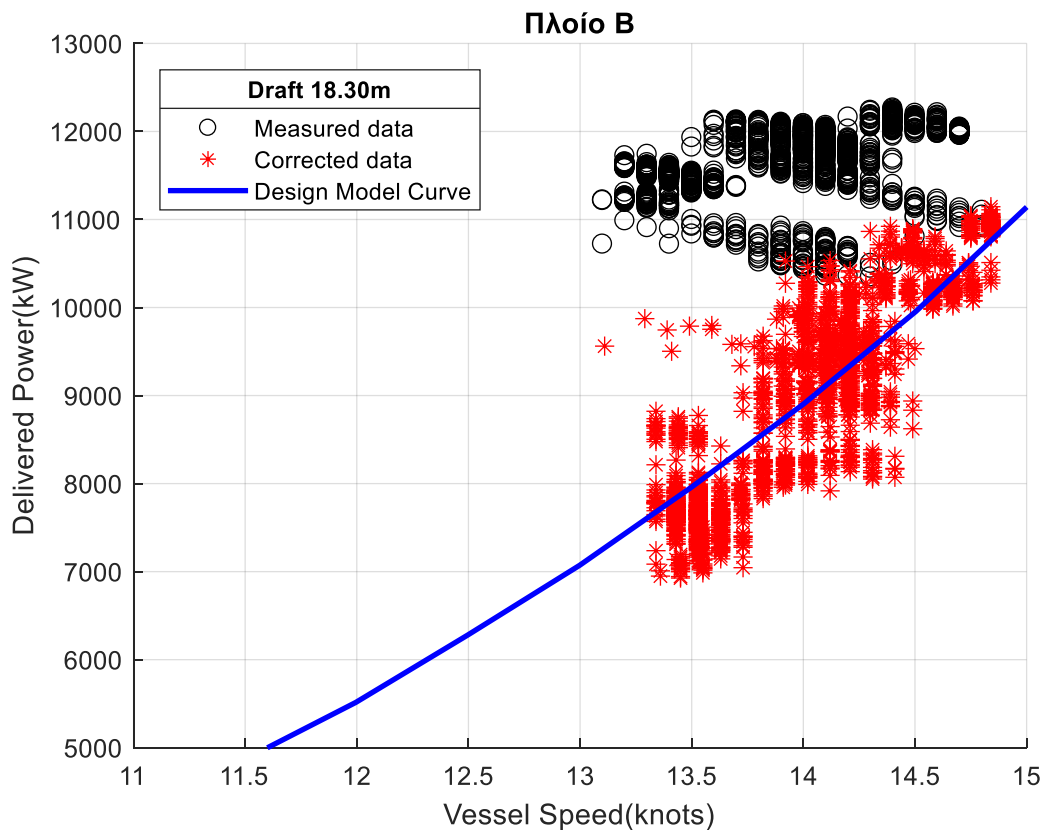
2) Περίπτωση μελέτης B2,για βύθισμα ίσο με 9.88m.



Διάγραμμα 5.6: Σύγκριση measured data, διορθωμένων σημείων ισχύος και ταχύτητας σε σχέση με την καμπύλη ισχύος και ταχύτητας του μοντέλου του πλοίου που δίνει η κατασκευάστρια εταιρία για την περίπτωση μελέτης B2

Παρατηρώντας το διάγραμμα 5.6 μπορούμε να δούμε ότι η διασπορά των σημείων των μετρήσεων (μαύρα σημεία) δεν έχει μεγάλη διαφορά από την διασπορά των κόκκινων διορθωμένων σημείων, όσον αφορά το εύρος της ισχύος στο οποίο είναι κατανομημένα τα σημεία πριν και μετά την διόρθωση. Παρόλα αυτά έχουν καλύτερο ταίριασμα με την μπλε καμπύλη ισχύος και ταχύτητας, η οποία έχει προκύψει από τις δοκιμές του μοντέλου του πλοίου σε δεξαμενή σε κατάσταση ερματισμού (ballast).

3) Περίπτωση μελέτης B3,για βύθισμα ίσο με 18.30m



Διάγραμμα 5.7: Σύγκριση measured data, διορθωμένων σημείων ισχύος και ταχύτητας σε σχέση με την καμπύλη ισχύος και ταχύτητας του μοντέλου του πλοίου που δίνει η κατασκευάστρια εταιρία για την περίπτωση μελέτης B3

Παρατηρώντας το διάγραμμα 5.7 μπορούμε να δούμε ότι η διασπορά των σημείων της μέτρησης είναι πολύ μικρή, καθώς σχεδόν όλα τα σημεία είναι συγκεντρωμένα σε ένα εύρος ισχύος περίπου 1000 kW (μαύρα σημεία). Μετά την διόρθωση παρατηρούμε ότι αυτή η διασπορά γίνεται πολύ μεγαλύτερη καθώς για το ίδιο εύρος τιμών ταχύτητας πλεύσης, τα διορθωμένα κόκκινα σημεία βρίσκονται σε ένα εύρος ισχύος σχεδόν 4000 kW. Επιπρόσθετα μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η διασπορά των διορθωμένων τιμών δεν είναι τυχαία αλλά ακολουθεί την πορεία της μπλε γραμμής, η οποία είναι η καμπύλη ισχύος του πλοίου Α από τις δοκιμές μοντέλου σε δεξαμενή στο βύθισμα σχεδιασμού (design draft).

Κεφάλαιο 6

6. Συμπεράσματα-Επίλογος

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η ανάπτυξη ενός λογισμικού διόρθωσης των τιμών ισχύος και ταχύτητας, το οποίο λαμβάνει πραγματικά δεδομένα λειτουργίας από δύο πλοία χύδην φορτίου και έχει σαν στόχο να εξαλείψει την επιρροή των καιρικών φαινομένων και να συγκρίνει τα αποτελέσματα των διορθωμένων τιμών με τις τιμές που δίνονται από την κατασκευάστρια εταιρεία.

Εφαρμόζοντας το λογισμικό το οποίο επεξεργάζεται τις τιμές ισχύος και ταχύτητας διαπιστώσαμε ότι οι διορθωμένες τιμές έχουν μεγάλη ταύτιση με τις καμπύλες που δίνει η κατασκευάστρια εταιρεία για τα διάφορα βύθισμα του εκάστοτε πλοίου. Ειδικότερα διαπιστώσαμε ότι για το βύθισμα σχεδίασης του κάθε πλοίου, στο οποίο άλλωστε υπάρχει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον και επακόλουθα και τα περισσότερα πραγματικά λειτουργικά δεδομένα, έχουμε την καλύτερη ταύτιση με τις τιμές της κατασκευάστριας εταιρείας.

Μπορεί κάποιος να παρατηρήσει ότι στα πραγματικά λειτουργικά δεδομένα του πλοίου Α στο βύθισμα σχεδίασης σε ένα εύρος ισχύος χιλίων κιλοβάτ αντιστοιχεί ένα εύρος ταχύτητας τεσσάρων κόμβων. Μετά την διόρθωση των τιμών σε ένα εύρος ισχύος τεσσάρων χιλιάδων κιλοβάτ αντιστοιχεί ένα εύρος ταχύτητας 5 κόμβων. Αντίστοιχα στα πραγματικά λειτουργικά δεδομένα του πλοίου Β στο βύθισμα σχεδίασης ένα εύρος ισχύος δύο χιλιάδων κιλοβάτ αντιστοιχεί ένα εύρος ταχύτητας δύο κόμβων. Ακολουθώντας την διόρθωση των τιμών σε ένα εύρος ισχύος τεσσάρων χιλιάδων κιλοβάτ αντιστοιχεί ένα εύρος ταχύτητας δύο κόμβων. Δηλαδή για ένα δεδομένο εύρος ταχύτητας η διόρθωση επιτυγχάνει να μεγαλώσει το εύρος της ισχύος ακολουθώντας βέβαια και τις καμπύλες λειτουργίας που δίνει η κατασκευάστρια εταιρεία.

Η χρήση του λογισμικού διόρθωσης σε δύο διαφορετικά πλοία και σε μια πληθώρα βυθισμάτων, για όλο το εύρος των καιρικών συνθηκών που μπορεί να αντιμετωπίσει ένα πλοίο, υποδεικνύει πως η μέθοδος διόρθωσης είναι σωστά δομημένη, ικανή να χρησιμοποιηθεί σε οποιοδήποτε τύπο πλοίου και να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Ολοκληρώνοντας τη διπλωματική μου εργασία ,αξίζει να αναφέρω μερικές κατευθύνσεις για την βελτίωση του λογισμικού διόρθωσης που παρουσιάστηκε στην παρούσα εργασία.

Η αναλυτική γνώση της μορφής της γάστρας του πλοίου μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τα αποτελέσματα του υπολογισμού της πρόσθετης αντίστασης λόγω κυμάτων, καθώς δίνει την δυνατότητα εφαρμογής ημι-εμπειρικών μεθόδων ή ρευστοδυναμικών μοντέλων μεγαλύτερης ακρίβειας από αυτά που χρησιμοποιήθηκαν. Η πρόσθετη αντίσταση λόγω κυμάτων είναι η μεγαλύτερη πρόσθετη αντίσταση που δέχεται το πλοίο κατά την πλεύση του και η χρησιμοποίηση μεθόδων υπολογισμού μεγαλύτερης ακρίβειας μπορεί να βελτιώσει κατά πολύ τα αποτελέσματα της διόρθωσης.

Επιπρόσθετα η γνώση του βαθμού απόδοσης του συστήματος πρόωσης από πειράματα μοντέλων πλοίου σε δεξαμενή και πως αυτός επηρεάζεται από την φόρτιση της έλικας, την διαγωγή του πλοίου αλλά και από τις αλλαγές του βυθίσματος, θα αύξανε την ακρίβεια της διόρθωσης των τιμών της ισχύος, καθώς συμμετέχει στην μετατροπή της πρόσθετης αντίστασης σε πρόσθετη ισχύ. Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε μια προσέγγιση των τιμών του βαθμού απόδοσης του συστήματος πρόωσης, με βάση τις γνωστές τιμές του από τις δοκιμές θαλάσσης του κάθε πλοίου, για τις ταχύτητες πλεύσης που μας ενδιέφεραν.

Τέλος η γνώση της τραχύτητας των επιφανειών της γάστρας και της προπέλας του πλοίου θα αύξανε την ακρίβεια της διόρθωσης, καθώς θα μπορούσαμε να μετατρέψουμε αυτήν την αύξηση της τραχύτητας σε πρόσθετη αντίσταση, κάτι το οποίο δεν εφαρμόζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία κατά την διόρθωση των τιμών της ισχύος και της ταχύτητας πλεύσης του πλοίου.

Παράρτημα-Υπολογιστικός κώδικας

Παρακάτω παρατίθεται ο υπολογιστικός κώδικας σε γλώσσα Fortran. Τα μέρη που τον αποτελούν είναι τα εξής:

- 1) Κυρίως πρόγραμμα
- 2) Υποπρογράμματα

Το κυρίως πρόγραμμα διαβάζει τα δεδομένα εισόδου και καλεί διαδοχικά, αφού ελέγξει την καταλληλότητα τους, τα διάφορα υποπρογράμματα τα οποία διορθώνουν τις τιμές ισχύος και ταχύτητας του πλοίου.

```
C PASTROUMAS KONSTANTINOS
C 2018
C DIPLOMA THESIS
C Development of a Methodology for the Correction of Ship's Speed and Delivered Power due
C to External Factors Using Measured Data
```

```
program corrections
```

```
C This program evaluates the ship's performance in terms of ship's speed and delivered power
C using on board obtained data. For each run of this program, the user gets the desired
C number of corrected points, that contain a corrected value of the ship's delivered power and
C a corrected value of the ship's speed. In order to do so, it reads the operational
C and geometrical characteristics of the ship, and calls successively a number of subroutines,
C which calculate the total resistance increase due to environmental and weather conditions.
```

```
C Initializing the program parameters
```

```
dimension ded(100),Vs(300),Cg(300),Vra(300),Dra(300),nd(300),Ps(300),awave(300),
+ H13(300),Tw(300),za(300),wavel(300),w(300),lratio(300),Vta(300),Dta(300),head(300),
+ Vtaref(300),Caa(300),Vreref(300),Dreref(300),isher(300),input(300),isherangle(300),
+ A0(300),A00(300),A1(300),A10(300), A2(300),A20(300), A3(300),A30(300),A4(300),
+ A40(300),A5(300), A50(300),A6(300),A60(300),Rawlst1(300),Rawlrefl(300),Rair(300),
+ Rawlst2(300),Rawladd(300),Rhead(300),Rdiff(300),Pew(300),Psw(300),Pwv(300),Psv(300),
+ Po(300),Peba(300),Psba(300),Ps1(300),Vswm(300),DV(300),Fr(300),deep(300),Pwv2(300),
+ Ps2(300),fuji(300),BN(300),V2(300),Vcor(300),V3(300),Vcor3(300)
```

```
integer k,n,input,isherangle
```

```
double precision pi,dtrad,rtdeg,ded,Vs,Vswm,wd,wdref,Lwl,v,vref,Rto,g,H13,B,Le,awave,
+ Fr,T,vol,za,Cb,Lpp,kyy,Cg,Vra,Dra,Vta,Dta,href,hnem,Vtaref,Dreref,Vreref,Alv,Loa,Cmc,isher,
+ Hbr,Axv,Aod,Caa,Caa0,ahead,airden,Rair,KN,Hc,Am,Hw,DV,dispa,Ta,Tw,Sp,C,M,A0,A1,A2,
+ A3,A4,A5,A6,A00,A10,A20,A30,A40,A50, A60,Rawlst1,Rawlst2,Rawladd,Rhead,Rdiff,nd,
```

+ Cm,Pew,Psw,Pwv,Psv,Ps,Po,Psba,Peba,Ps1,Rawlrefl,wavel,lratio,w,head,deep,Pwv2,Psv2,

+ Po2, Ps2,fuji,BN,V2,ldcon,shipcat,Vcor,disp,V3,Vcor3,ns

parameter (KN=1000.0d0)

C Conversion degrees to rads

pi=4.0d0*atan(1.0d0)

dtrad=(pi/180.0d0)

rtdeg=(180.0d0/pi)

C Initializing the number of runs. Number of points to be corrected

n=45

C The program reads the input data from the files

C The ship's speed over ground in knots

open(40,**file**="inputVs.dat")

rewind(40)

do k=1,n

read(40,*****,**END**=51) Vs(k)

51 enddo

C The ship's speed through water in knots

open(30,**file**="inputVswm.dat")

rewind(30)

do k=1,n

read(30,*****,**END**=39) Vswm(k)

39 enddo

C The ship's heading in degrees

open(41,**file**="inputCg.dat")

rewind(41)

do k=1,n

read(41,*****,**END**=52) Cg(k)

52 enddo

C The relative wind speed in m/s

open(42,**file**="inputVra.dat")

rewind(42)

```
do k=1,n
read(42,*,END=53) Vra(k)
```

53 enddo

C The relative wind direction in degrees

```
open(43,file="inputDra.dat")
rewind(43)
do k=1,n
read(43,*,END=54) Dra(k)
```

54 enddo

C The ship's quasi propulsive efficiency

```
open(44,file="inputnd.dat")
rewind(44)
do k=1,n
read(44,*,END=55) nd(k)
```

55 enddo

C The ship's measured power in kW

```
open(45,file="inputPs.dat")
rewind(45)
do k=1,n
read(45,*,END=56) Ps(k)
```

56 enddo

C The encounter wave direction in degrees

```
open(46,file="inputawave.dat")
rewind(46)
do k=1,n
read(46,*,END=57) awave(k)
```

57 enddo

C The encounter wave significant wave height in meters

```
open(47,file="inputH13.dat")
rewind(47)
do k=1,n
```


C The encounter wave period in secs

```
open(48,file="inputTw.dat")
rewind(48)
do k=1,n
read(48,*,END=59) Tw(k)
```

59 enddo

C The geometrical characteristics of the vessel

```
open(49,file="vesselinput.dat")
rewind(49)
do k=1,35
read(49,*,END=50) ded(k)
enddo
```

C Declaration of vessel's geometrical characteristics used in this program

C Loa: Overall ship length in meters

50 Loa=ded(1)

C Lwl: Waterline length in meters

Lwl=ded(2)

C Lpp: Length between perpendiculars in meters

Lpp=ded(3)

C B: Breadth in meters

B=ded(4)

C Alv: Longitudinal(lateral) projected area in square meters

Alv=ded(5)

C Axv: Windage area in square meters

Axv=ded(6)

C Am : Midship section area under waterline in square meters

Am=ded(7)

C T: Draught/Draft in meters

T=ded(8)

C Cb : Block coefficient

Cb=ded(9)

C Cm: Midship section coefficient

Cm=ded(10)

C vol: Corresponding volume of the vessel in cubic meters

vol=ded(11)

C Le: Distance of the bow to 95% of maximum beam on the waterline in meters

Le=ded(12)

C Cmc : Horizontal distance of midship section to center of lateral projected area in meters

Cmc=ded(13)

C Hc: Height from waterline to center of lateral projected area in meters

Hc=ded(14)

C Hbr: Height of the top of the superstructures (bridge etc.) in meters

Hbr=ded(15)

C Aod: Longitudinal projected area of superstructures on deck in square meters

Aod=ded(16)

C Sp: Length of the perimeter of the longitudinal projected area in meters

Sp=ded(17)

C C: Distance from bow to centroid of longitudinal projected area in meters

C=ded(18)

C M: Number of district groups of masts or kingports

M=ded(19)

C href: The reference height for the wind resistance coefficients in meters

href=ded(20)

C hanem: The height of the anemometer in meters

hanem=ded(21)

C wd: The seawater density in kilograms divided by cubic meters

wd=ded(22)

C wdref: The reference seawater density in kilograms divided by cubic meters

wdref=ded(23)

C v: The seawater kinematic viscosity in square meters divided by seconds

v=ded(24)

C vref: The reference kinematic viscosity in square meters divided by seconds

vref=ded(25)

C Hw: The depth of water in meters

Hw=ded(26)

C dispa: The displacement of the ship at an operation point in kilograms

dispa=ded(27)

C Ta: The draft of the ship at an operation point in meters

Ta=ded(28)

C airden: The air density in kilograms divided by cubic meters

airden=ded(29)

C g:The acceleration of gravity in square meters divided my seconds

g=ded(30)

C Rto: The total resistance for the reference calm water based on Holtrop and Mennen method

Rto=ded(31)

C kyy: The non-dimensional radius of gyration in the lateral direction

kyy=ded(32)

C Idcon: The ship's loading condition,1 for normal,2 for loaded and 3 for ballast

Idcon=ded(33)

C shipcat: The ship's category,1 stands for non container and 2 stands for container

shipcat=ded(34)

C disp: Ship's displacement in kilograms

disp=ded(35)

C ns: Ship's transmission shaft efficiency

ns=ded(36)

C Calculation of parameters that are used as input requirements when the program calls the

C subroutines to correct the power and speed

C Calculation of Midship section area under water when Cm is given

if ((Am.eq.0d0).and.(Cm.ne.0d0)) then

Am=Cm*B*T

else

write(*,*) 'The midship section area under water is given'

endif

C Calculation of incoming wave amplitude(za)

```

do k=1,n
za(k)=(1.0d0/2.0d0)*(H13(k))

if (k.eq.n) then
write(*,*) 'Calculation of incoming wave amplitude complete'
write(*,*)
endif

enddo

```

C Calculation of incoming wavelength(wavel) for deep water

```

do k=1,n
wavel(k)=(g/(2.0d0*pi))*(Tw(k)**2.0d0)

deep(k)=Hw/wavel(k)

if (k.eq.n) then
write(*,*) 'Calculation of incoming wavelength for deep water theory complete'
write(*,*)
endif

enddo

```

C Calculation of the ratio between wavelength and ship's length(lratio)

```

do k=1,n
lratio(k)=(wavel(k)/Loa)

if (k.eq.n) then
write(*,*) 'Calculation of ratio wavelength/Loa complete'
write(*,*)
endif

enddo

```

C Calculation of incoming wave circular frequency(w)

```

do k=1,n
w(k)=(2.0d0*pi)/Tw(k)

if (k.eq.n) then
write(*,*) 'Calculation of incoming wave circular frequency complete'
write(*,*)
endif

```

```

endif
enddo
C Conversion from knots to m/s
do k=1,n
Vs(k)=0.51444d0*(Vs(k))
Vswm(k)=0.51444d0*(Vswm(k))
if (k.eq.n) then
write(*,*) 'Conversion of ships speed(sog-stw) complete'
write(*,*)
endif
enddo
C Calls the subroutine to correct the ship's speed due to shallow water
C It calculates DV,the decrease in ship's speed
if ((Am/(Hw**2.0d0)).ge.0.05d0) then
do k=1,n
call lackenby(Am,Hw,g,Vswm(k),DV(k))
Vswm(k)=Vswm(k)-DV(k)
enddo
else
DV(k)=0.0d0
if (k.eq.n) then
write(*,*) 'Correction of ships speed due to depth is complete'
write(*,*)
endif
endif
C Checks if the wave height(or significant wave height) is within limits.
C Then,it calls the appropriate subroutine in order to find the resistance increase due to waves
do k=1,n
if (((H13(k).le.2.25d0*(Lpp/100.0d0)**0.5d0)).and.(Le.gt.0.0d0))
+ then
C Calls the subroutine that uses the method STAwave-1

```

C Calculates the added resistance Rawlst1 in Newtons

```

call stwave1(wd,g,H13(k),B,Le,Rawlst1(k))
  if ((awave(k).le.45.0d0).or.(awave(k).ge.315.0d0)) then
Rawlst1(k)=Rawlst1(k)
  else
Rawlst1(k)=0.0d0
  endif
else
Rawlst1(k)=0.0d0
endif
if (k.eq.n) then
write(*,*) 'Calculation of resistance STA-wave1 complete'
write(*,*)
endif
enddo

```

C Based on the ratio of wavelength to the overall ship's length it calls the modified

C STAwave-2 method that calculates the added resistance due to waves reflection

C (added resistance due to wave induced motion is neglected)

```

do k=1,n
if (lratio(k).lt.0.5d0) then

```

C Calculation of Froude number for the ship's speed through water

```
Fr(k)=Vswm(k)/((g*Lwl)**(0.5d0))
```

C Checking the necessary conditions for this method

```

if( ((Lpp.lt.75.0d0) .or.
+ (Lpp.gt.350.0d0)).or. ((Lpp/B.lt.4.0d0).or.(Lpp/B.gt.9.0d0)).or.
+ ((Fr(k).lt.0.1d0).or.(Fr(k).gt.0.3d0)) .or. ((Cb.lt.0.5d0).or.
+ (Cb.gt.0.9d0)) .or. ((B/T.lt.2.2d0).or.(B/T.gt.5.5d0)) .or.
+ ((awave(k).gt.45.0d0).and.(awave(k).lt.315.0d0)) ) then

```

```
Rawlrefl(k)=0.0d0
```

```
else
```

C It calls the subroutine for the calculation of added resistance in waves

```

C   due to reflection.The output is Rawrefl in Newtons
call modstawave2(w(k),T,Vswm(k),g,Cb,wd,B,za(k),pi,Rawlrefl(k))
endif
else
Rawlrefl(k)=0.0d0
endif
if (k.eq.n) then
write(*,*) 'Calculation of modified STA-wave2 complete'
write(*,*)
endif
enddo

C   If the non dimensional radius of gyration in the lateral direction(kyy)
C   is available it calls the subroutine that uses the method STAwave-2
do k=1,n
if (kyy.gt.0d0) then
C   Calculation of Froude number for the ship's speed through water
Fr(k)=Vswm(k)/((g*Lwl)**(0.5d0))
C   Checking the necessary conditions for this method
if( ((Lpp.lt.75.0d0) .or.
+ (Lpp.gt.350.0d0)).or. ((Lpp/B.lt.4.0d0).or.(Lpp/B.gt.9.0d0))
+ .or. ((Fr(k).lt.0.1d0).or.(Fr(k).gt.0.3d0)) .or. ((Cb.lt.0.5d0)
+ .or.(Cb.gt.0.9d0)) .or. ((B/T.lt.2.2d0).or.(B/T.gt.5.5d0)) .or.
+ ((awave(k).gt.45.0d0).or.(awave(k).lt.315.0d0)) ) then
Rawlst2(k)=0.0d0
else
C   It calls the subroutine for the calculation of added resistance in waves.The output
C   is Rawlst2 in Newtons
call stwave2(Fr(k),w(k),g,Cb,Lpp,kyy,B,T,pi,Vswm(k),wd,za(k),
+ Rawlst2(k))
endif
C   If the length of Le and kyy is not available it uses another ITTC method
C   to calculate the added resistance in waves

```

```
else
```

```
Rawlst2(k)=0.0d0
```

C The output in this method is Rawladd in newtons.

```
call addwave(Cb,Lwl,B,wd,H13(k),g,awave(k),Rawladd(k))
```

```
endif
```

```
if (k.eq.n) then
```

```
write(*,*) 'Calculation of STAwave-2 or ITTC method complete'
```

```
write(*,*)
```

```
endif
```

```
enddo
```

C Evaluation of the wind data. Given the input values of the relative wind speed and direction

C the program calls the subroutine to calculate the true wind velocity and direction on

C anemometer height.

C Vta: True wind velocity on anemometer height in meters per seconds

C Dta: True wind direction in degrees

```
do k=1,n
```

```
call truewind2(Vs(k),Cg(k),Vra(k),Dra(k),Vta(k),Dta(k))
```

```
if (k.eq.n) then
```

```
write(*,*) 'Calculation of true wind vector complete'
```

```
write(*,*)
```

```
endif
```

```
enddo
```

C Calls the subroutine to correct the relative wind velocity and direction due to the new

C true wind vector calculated above and due to the height of the anemometer.

C Vraref: Relative wind velocity on reference height in meters per seconds

C Draref: Relative wind direction on reference height in degrees

C Vtaref: True wind velocity on reference height in meters per seconds.Used to determine

C the Beaufort number in question

```
do k=1,n
```

```
call refheight(Vta(k),href,hanem,Vs(k),Dta(k),Cg(k),Vtaref(k),
```

```
+ Vraref(k),Draref(k))
```



```

if (k.eq.n) then
  write(* ,*) 'Correction of Vwr,Dwr due to anemometer H complete'
  write(* ,*)
endif
enddo

```

- C If the necessary particulars of the vessel are known it calls the subroutine which uses
- C the Fujiwara method, to calculate the wind resistance coefficient for the relative wind
- C directions calculated above.

- C Checks if the particulars are known

```

if ((Cmc.gt.0d0).and.(Hbr.gt.0d0).and.(Aod.gt.0d0)) then

```

- C If the particulars are known it calls the subroutine, firstly in order to calculate the wind
- C resistance coefficient for head winds.

- C Caa0: The wind resistance coefficient for head winds

- C Caa: The wind resistance coefficient for the relative wind directions calculated above

```

  ahead=0.0d0

```

```

  call fujiwara(ahead,Alv,Loa,B,Cmc,Hbr,Hc,Axv,Aod,Caa0)

```

```

  write(* ,*) 'Wind coefficient for head winds'

```

```

  write(* ,*) Caa0

```

```

  write(* ,*)

```

- C Secondly it calculates the wind resistance coefficients for the various values of the relative
- C wind direction calculated above

```

  do k=1,n

```

```

    fuji(k)=Draref(k)

```

```

    call fujiwara(fuji(k),Alv,Loa,B,Cmc,Hbr,Hc,Axv,Aod,Caa(k))

```

```

  if (k.eq.n) then

```

```

    write(* ,*) 'Calculation with Fujiwara is complete'

```

```

    write(* ,*)

```

```

  endif

```

```

enddo

```

- C If the above particulars are not available, it checks if other geometrical particulars are
- C available in order to calculate the wind resistance coefficient based on the Isherwood
- C regression analysis

```
else if ((Sp.gt.0d0).and.(C.gt.0d0).and.(M.gt.0d0)) then
```

C If the particulars are known it calls the subroutine, firstly to calculate the wind resistance

C coefficient for head wind

```
open(10,file="isherwoodhead.dat")
```

```
rewind(10)
```

```
do k=1,7
```

```
read(10,*,END=19) head(k)
```

```
19 enddo
```

```
call isherwood(head(1),head(2),head(3),head(4),head(5),head(6),
```

```
+ head(7),Alv,Axv,Loa,B,Sp,C,M,Caa0)
```

```
write(*,*) 'Wind coefficient for head winds'
```

```
write(*,*) Caa0
```

```
write(*,*)
```

C Secondly it calculates the wind resistance coefficient for the relative wind direction

```
do k=1,n
```

```
if ((Draref(k).ge.0d0).and.(Draref(k).le.180.0d0)) then
```

```
isher(k)=Draref(k)
```

```
else if (Draref(k).gt.180.0d0) then
```

```
isher(k)=abs(Draref(k)-360.0d0)
```

```
else
```

```
isher(k)=abs(Draref(k))
```

```
endif
```

```
input(k)=int(isher(k))
```

```
isherangle(k)=int((input(k)/5.0d0))
```

```
enddo
```

C The program reads the values of Isherwood regression analysis based on the relative wind

C direction calculated above.

```
open(51,file="A00.dat")
```

```
rewind(51)
```

```
do k=1,36
```

```
read(51,*,END=15) A00(k)
```

```
15 enddo
```

```

do k=1,n
A0(k)=A00(isherangle(k))
enddo

open(52,file="A10.dat")
rewind(52)
do k=1,36
read(52,*,END=21) A10(k)
21 enddo

do k=1,n
A1(k)=A10(isherangle(k))
enddo

open(53,file="A20.dat")
rewind(53)
do k=1,36
read(53,*,END=22) A20(k)
22 enddo

do k=1,n
A2(k)=A20(isherangle(k))
enddo

open(54,file="A30.dat")
rewind(54)
do k=1,36
read(54,*,END=23) A30(k)
23 enddo

do k=1,n
A3(k)=A30(isherangle(k))
enddo

open(55,file="A40.dat")
rewind(55)
do k=1,36
read(55,*,END=24) A40(k)
24 enddo

```

```

do k=1,n
A4(k)=A40(isherangle(k))
enddo
open(56,file="A50.dat")
rewind(56)
do k=1,36
read(56,*,END=25) A50(k)
25 enddo
do k=1,n
A5(k)=A50(isherangle(k))
enddo
open(57,file="A60.dat")
rewind(57)
do k=1,36
read(57,*,END=26) A60(k)
26 enddo
do k=1,n
A6(k)=A60(isherangle(k))
enddo
do k=1,n
call isherwood(A0(k),A1(k),A2(k),A3(k),A4(k),A5(k),A6(k),Alv,Axv,
+ Loa,B,Sp,C,M,Caa(k))
if (k.eq.n) then
write(*,*) 'Calculation with Isherwood is complete'
write(*,*)
endif
enddo
endif
C Calls the subroutine to calculate the resistance due to wind. The output value is Rair and is
C calculated in newtons
do k=1,n

```

```

call resair(airden,Caa(k),Caa0,Vreref(k),Vs(k),Axv,Rhead(k),
+ Rair(k),Rdiff(k))
if (k.eq.n) then
write(*,*)'Calculation of air resistance is complete'
write(*,* )
endif
enddo

C Conversion,of added resistance values, from N to kN

do k=1,n
Rawlst1(k)=Rawlst1(k)/KN
Rawlrefl(k)=Rawlrefl(k)/KN
Rawlst2(k)=Rawlst2(k)/KN
Rawladd(k)=Rawladd(k)/KN
Rair(k)=Rair(k)/KN
Rhead(k)=Rhead(k)/KN
if (k.eq.n) then
write(*,*)'Conversion of resistance values to kN is complete'
write(*,* )
endif
enddo

C Calls the subroutine in order to calculate the delivered power using the quasi propulsive
C efficiency.
C Pew(k):The wind and air effective power in kW
C Psw(k):The wind and air shaft power in kW
C Pwv(k):The wave effective power in kW
C Psv(k):The wave shaft power in kW
C Po(k):No wind,no wave shaft power in kW
C Peba(k):The basic air effective power in kW
C Psba(k):The basic air shaft power in kW
C Ps1(k):The corrected still air shaft power in kW

do k=1,n
if (Rawlst1(k).gt.0d0) then

```

```

call sws(ns,Vs(k),Vswm(k),Rair(k),nd(k),Rawlst1(k),Pew(k),Psw(k),
+ ,Pwv(k),Psv(k),Ps(k),Po(k),Rhead(k),Peba(k),Psba(k),Ps1(k))
else
call sws(ns,Vs(k),Vswm(k),Rair(k),nd(k),Rawladd(k),Pew(k),Psw(k),
+ Pwv(k),Psv(k),Ps(k),Po(k),Rhead(k),Peba(k),Psba(k),Ps1(k))
endif
if (Rawlrefl(k).gt.Od0) then
call sws(ns,Vs(k),Vswm(k),Rair(k),nd(k),Rawlrefl(k),Pew(k),Psw(k),
+ Pwv2(k),Psv2(k),Ps(k),Po2(k),Rhead(k),Peba(k),Psba(k),Ps2(k))
endif
if (k.eq.n) then
write(* ,*) 'Calculation of corrected still air power is complete'
write(* ,*)
endif
enddo

```

- C Calls the subroutine in order to calculate the corrected speed of the ship, due to weather
- C disturbances, using the Kwon empirical method.
- C The output of the method is Vcor and is calculated in knots
- C Checking the Beaufort Number

```

do k=1,n
call Beaufort(Vtaref(k),BN(k))
if (k.eq.n) then
write(* ,*) 'Checking of Beaufort Number is complete'
write(* ,*)
endif
enddo

```

- C Initializing the speed of the vessel to be corrected

```

do k=1,n
V2(k)=Vswm(k)
enddo

```

C Calling the subroutine to calculate the corrected ship's speed

```

do k=1,n
call kwon(V2(k),Dta(k),BN(k),g,Lwl,ldcon,Cb,shipcat,disp,Vcor(k))

if (k.eq.n) then
write(*,*) 'Correction of vessel speed stw is complete'
write(*,*)
endif
enddo

```

C Printing the corrected power and speed

```

open(80,file="outputPs.dat")
do k=1,n
write(80,*) Ps1(k)
enddo
close(80)
open(71,file="outputPs2.dat")
do k=1,n
write(71,*) Ps2(k)
enddo
close(71)
open(75,file="outputVcor.dat")
do k=1,n
write(75,*) Vcor(k)
enddo
close(75)

```

C End of program.

```

write(*,*)
write(*,*)'Program has finished! Press Enter.'
read(*,*)
stop
end

```

```

C -----
C Subroutines block
C The main program has finished.The subroutines ,that are called in the main program, are
C presented below.
C This subroutine calculates the corrected ship's speed based on the empirical method from
C Kwon
subroutine kwon(V2,Dta,BN,g,Lwl,ldcon,Cb,shipcat,disp,Vcor)
double precision V2,Dta,BN,g,Lwl,ldcon,Cb,shipcat,disp,Vcor,Cbb,
+ Cu,Cform,Fr
C Normalize the weather input
if (Dta.lt.0.0d0) then
Dta=Dta+360.0d0
else
Dta=Dta+0d0
endif
C Bringing the weather input to fit the kwon model
if ((Dta.ge.0d0).and.(Dta.le.180.0d0)) then
Dta=Dta
else
Dta=abs(Dta-360.0d0)
endif
C Calculating the Froude number
Fr=V2/((g*Lwl)**(0.5d0))
C Calculating the speed reduction coefficient
if (ldcon.eq.1.0d0) then
if ((Cb.ge.0.55d0).and.(Cb.lt.0.60d0)) then
Cu=1.7d0-1.4d0*(Fr)-7.4d0*((Fr)**2.0d0)
elseif ((Cb.ge.0.60d0).and.(Cb.lt.0.65d0)) then
Cu=2.2d0-2.5d0*(Fr)-9.7d0*((Fr)**2.0d0)
elseif ((Cb.ge.0.65d0).and.(Cb.lt.0.70d0)) then
Cu=2.6d0-3.7d0*(Fr)-11.6d0*((Fr)**2.0d0)

```



```

elseif ((Cb.ge.0.70d0).and.(Cb.lt.0.75d0)) then
Cu=3.1d0-5.3d0*(Fr)-12.4d0*((Fr)**2.0d0)
elseif ((Cb.ge.0.75d0).and.(Cb.lt.0.80d0)) then
Cu=2.4d0-10.6d0*(Fr)-9.5d0*((Fr)**2.0d0)
elseif ((Cb.ge.0.80d0).and.(Cb.lt.0.85d0)) then
Cu=2.6d0-13.1d0*(Fr)-15.1d0*((Fr)**2.0d0)
elseif (Cb.ge.0.85d0) then
Cu=3.1d0-18.7d0*(Fr)+28.0d0*((Fr)**2.0d0)
else
Cu=0.0d0
endif
elseif (ldcon.eq.2.0d0) then
if ((Cb.ge.0.75d0).and.(Cb.lt.0.80d0)) then
Cu=2.4d0-10.6d0*(Fr)-9.5d0*((Fr)**2.0d0)
elseif ((Cb.ge.0.80d0).and.(Cb.lt.0.85d0)) then
Cu=2.6d0-13.1d0*(Fr)-15.1d0*((Fr)**2.0d0)
elseif (Cb.ge.0.85d0) then
Cu=3.1d0-18.7d0*(Fr)+28.0d0*((Fr)**2.0d0)
else
Cu=0.0d0
endif
else
if ((Cb.ge.0.75d0).and.(Cb.lt.0.80d0)) then
Cu=2.6d0-12.5d0*(Fr)-13.5d0*((Fr)**2.0d0)
elseif ((Cb.ge.0.80d0).and.(Cb.lt.0.85d0)) then
Cu=3.0d0-16.3d0*(Fr)-21.6d0*((Fr)**2.0d0)
elseif (Cb.ge.0.85d0) then
Cu=3.4d0-20.9d0*(Fr)+31.8d0*((Fr)**2.0d0)
else
Cu=0.0d0
endif
endif
endif

```

```

if ((Dta.ge.0.0d0).and.(Dta.lt.30.0d0)) then
    Cbb=1.0d0
elseif ((Dta.ge.30.0d0).and.(Dta.lt.60.0d0)) then
    Cbb=(1.7d0-0.03d0*((BN-4.0d0)**2.0d0))/2.0d0
elseif ((Dta.ge.60.0d0).and.(Dta.lt.150.0d0))then
    Cbb=(0.9d0-0.06d0*((BN-6.0d0)**2.0d0))/2.0d0
elseif ((Dta.ge.150.0d0).and.(Dta.lt.180.0d0)) then
    Cbb=(0.4d0-0.03d0*((BN-8.0d0)**2.0d0))/2.0d0
else
    Cbb=0.0d0
endif

if (shipcat.eq.1.0d0) then
    if (ldcon.eq.2.0d0) then
        Cform=0.5d0*BN+((BN**6.5d0)/(2.7d0*(disp**(2.0d0/3.0d0))))
    elseif (ldcon.eq.3.0d0) then
        Cform=0.7d0*BN+((BN**6.5d0)/(2.7d0*(disp**(2.0d0/3.0d0))))
    else
        Cform=0.0d0
    endif
else
        Cform=0.7d0*BN+((BN**6.5d0)/(22.0d0*(disp**(2.0d0/3.0d0))))
    endif
    Vcor=(V2/(1.0d0-Cu*Cbb*Cform*0.01d0))/0.51444d0
return
end

```

C This subroutine calculates the Beaufort Number on the reference height

```

subroutine Beaufort(Vtaref,BN)
double precision Vtaref,BN
if ((Vtaref.ge.0d0).and.(Vtaref.lt.0.3d0)) then
    BN=0d0

```

```

else if ((Vtoref.ge.0.3d0).and.(Vtoref.lt.1.59d0)) then
BN=1d0
else if ((Vtoref.ge.1.6d0).and.(Vtoref.lt.3.39d0)) then
BN=2d0
else if ((Vtoref.ge.3.4d0).and.(Vtoref.lt.5.49d0)) then
BN=3d0
else if ((Vtoref.ge.5.5d0).and.(Vtoref.lt.7.99d0)) then
BN=4d0
else if ((Vtoref.ge.8.0d0).and.(Vtoref.lt.10.79d0)) then
BN=5d0
else if ((Vtoref.ge.10.8d0).and.(Vtoref.lt.13.89d0)) then
BN=6d0
else if ((Vtoref.ge.13.9d0).and.(Vtoref.lt.17.19d0)) then
BN=7d0
else if ((Vtoref.ge.17.2d0).and.(Vtoref.lt.20.79d0)) then
BN=8d0
else if ((Vtoref.ge.20.8d0).and.(Vtoref.lt.24.49d0)) then
BN=9d0
else if ((Vtoref.ge.24.5d0).and.(Vtoref.lt.28.4d0)) then
BN=10d0
endif
return
end

```

C This subroutine calculates the resistance due to the effect of water temperature

C and salt content. The output is Ra1 and is calculated in newtons.

subroutine reswsal(wad,wadr,vw,vwr,Sa,Vsw,Lwtl,Cf1,Cfo1,Rto,Ras1)

double precision wad,wadr,Sa,Vsw,Cf1,Cfo1,Rf,Rfo,Rto,Ras1,vw,

+ Lwtl,Re1,Reo,vwr

Re1=(Vsw*Lwtl)/vw

Reo=(Vsw*Lwtl)/vwr

Cf1=0.075d0/(((log10(Re1)-2.0d0))**2.0d0)

```

Cfo1=0.075d0/(((log10(Reo)-2.0d0))**2.0d0)
Rf=0.5d0*wad*Sa*(Vsw**2.0d0)*Cf1
Rfo=0.5d0*wad*Sa*(Vsw**2.0d0)*Cfo1
Ras1=Rto*((wad/wadr)-1.0d0)-Rf*((Cfo1/Cf1)-1.0d0)

return
end

```

C This subroutine calculates the resistance due to waves using the method STAWave-1

```

subroutine stwave1(den,g,H,B,Lbwl,Rawl)
double precision den,g,B,Lbwl,Rawl,H
Rawl=(1.0d0/16.0d0)*den*g*(H**2.0d0)*B*(B/Lbwl)**0.5d0
return
end

```

C This subroutine calculates the resistance due to waves when the above STAWave-1 method

C is not available due to the input values requested.

```

subroutine addwave(Cb,L,Br,dens,Wh,gr,a,Rwave)
double precision Cb,L,Br,dens,Wh,gr,Rwave,a,angle,pi,dtrad,rtdeg
pi=4.0d0*atan(1.0d0)
dtrad=(pi/180.0d0)
rtdeg=(180.0d0/pi)
angle=(cos(a*dtrad)*0.333d0)+0.667d0
Rwave=(((0.64d0)*(Wh**2.0d0)*(Br**2.0d0)*(Cb*dens*gr))/L)*angle
return
end

```

C The following subroutine calculate the resistance due to waves using the STAWave-2

C method. This subroutine calculates the resistance due to wave reflection and the motion

C induced resistance. The output rawmr is calculated in newtons.

```

subroutine stwave2(Fr,we,g,Cbl,Lpp,Kyy,Bs,Tm,pii,Vs,wd,za,rawmr)
double precision wd,Cbl,Bs,g,Kyy,Lpp,Fr,rawr,Vs,Tm,ke,we,a1,
+ wm,b1,d1,rawm,ar,b1r,cr,dr,rawmr,or,pii,za

```

C Firstly the motion induced resistance

```

ke=(we**2.0d0)/g

```

```

a1=60.30d0*((Cbl)**1.34d0)
wm=((((Lpp/g)**(1.0d0/2.0d0))*((Kyy**(1.0d0/3.0d0))*we))/((1.17d0*(
+ Fr)**(-0.143d0))
if (wm.lt.1.0d0) then
b1=11.0d0
d1=14.0d0
else
b1=-8.5d0
d1=-566.0d0*((Lpp/Bs)**(-2.66d0))
endif
rawm=(wm**b1)*exp((1.0d0-wm**d1)*(b1/d1))*a1*(Fr**1.50d0)*exp(
+ -3.50d0*Fr)
C Secondly the wave reflection resistance
or=(1.5d0)*ke*Tm
ar=(pii**2.0d0)*(bessi1(or))**2.0d0
b1r=(bessk1(or))**2.0d0
cr=0.692d0*(Vs/((Tm*g)**(1.0d0/2.0d0)))**0.769d0 +1.81d0*(Cbl)**
+ (6.95d0)
dr=(ar*cr)/(ar+b1r)
rawr=wd*g*Bs*dr*(0.5d0)*(za**2.0d0)
C Addition and multiplication
rawmr=((4.0d0*wd*(za**2.0d0)*g*(Bs**2.0d0))/(Lpp*rawm))+rawr
return
end
C Modified STAwave-2 subroutine. It calculates the added resistance due to wave reflection
C only. It neglects the motion induced resistance.The output is rawr and is calculated in
C newtons.
subroutine modstawave2(we,Tm,Vs,g,Cbl,wd,Bs,za,pii,rawr)
double precision we,Tm,Vs,g,Cbl,wd,Bs,za,ar,pii,b1r,cr,dr,rawr,
+ ke
real or
ke=(we**2.0d0)/g

```

```

or=(1.5d0)*ke*Tm
ar=(pii**2.0d0)*(bessi1(or))**2.0d0
b1r=(bessk1(or))**2.0d0
cr=0.692d0*(Vs/((Tm*g)**(1.0d0/2.0d0)))**0.769d0 +1.81d0*(Cbl)**
+ (6.95d0)
dr=(ar*cr)/(ar+b1r)
rawr=wd*g*Bs*dr*(0.5d0)*(za**2.0d0)

return
end

```

C Returns the modified Bessel function $I_1(x)$ for any real x .

```

function bess1(x)
real bess1,x
real ax
double precision p1,p2,p3,p4,p5,p6,p7,q1,q2,q3,q4,q5,q6,q7,
+ q8,q9,y

```

C Accumulate polynomials in double precision.

```

save p1,p2,p3,p4,p5,p6,p7,q1,q2,q3,q4,q5,q6,q7,q8,q9
data p1,p2,p3,p4,p5,p6,p7/0.5d0,0.87890594d0,0.51498869d0,
+ 0.15084934d0,0.2658733d-1,0.301532d-2,0.32411d-3/
data q1,q2,q3,q4,q5,q6,q7,q8,q9/0.39894228d0,-0.3988024d-1,
+ -0.362018d-2,0.163801d-2,-0.1031555d-1,0.2282967d-1,
+ -0.2895312d-1,0.1787654d-1,-0.420059d-2/
if (abs(x).lt.3.75) then

```

C Polynomial fit

```

y=(x/3.75)**2
bessi1=x*(p1+y*(p2+y*(p3+y*(p4+y*(p5+y*(p6+y*p7))))))
y=3.75/ax
bessi1=(exp(ax)/sqrt(ax))*(q1+y*(q2+y*(q3+y*(q4+
+ y*(q5+y*(q6+y*(q7+y*(q8+y*q9))))))
if(x.lt.0.)bessi1=-bessi1
endif
return

```

END

C Returns the modified Bessel function $K_1(x)$ for positive real x .

C It uses the modified Bessel function $I_1(x)$

function bessk1(x)

real bessk1,x

real bessi1

double precision p1,p2,p3,p4,p5,p6,p7,q1,

+ q2,q3,q4,q5,q6,q7,y

C Accumulate polynomials in double precision.

save p1,p2,p3,p4,p5,p6,p7,q1,q2,q3,q4,q5,q6,q7

data p1,p2,p3,p4,p5,p6,p7/1.0d0,0.15443144d0,-0.67278579d0,

+ -0.18156897d0,-0.1919402d-1,-0.110404d-2,-0.4686d-4/

data q1,q2,q3,q4,q5,q6,q7/1.25331414d0,0.23498619d0,-0.3655620d-1,

+ 0.1504268d-1,-0.780353d-2,0.325614d-2,-0.68245d-3/

if (x.le.2.0) **then**

C Polynomial fit

y=x*x/4.0

bessk1=(log(x/2.0)*bessi1(x)+(1.0/x)*(p1+y*(p2+

+ y*(p3+y*(p4+y*(p5+y*(p6+y*p7))))))

else

y=2.0/x

bessk1=(exp(-x)/sqrt(x))*(q1+y*(q2+y*(q3+

+ y*(q4+y*(q5+y*(q6+y*q7))))))

endif

return

end

C It calculates the true wind velocity and direction in meters per seconds an degrees

C Output values: Vwt,awt

subroutine truwind2(Vg,cog,Vrw,arw,Vwt,awt)

double precision Vg,Vrw,Vwt,cog,arw,awt,pi,dtrad,rtdeg,a,b,c

```

pi=4.0d0*atan(1.0d0)
dtrad=(pi/180.0d0)
rtdeg=(180.0d0/pi)
Vwt=((Vrw**2.0d0)+(Vg**2.0d0)-2.0d0*Vrw*Vg*cos(arw*dtrad))**0.5d0
a=Vrw*sin(arw*dtrad+cog*dtrad) -Vg*sin(cog*dtrad)
b=Vrw*cos(arw*dtrad+cog*dtrad) -Vg*cos(cog*dtrad)
c=a/b
if (b.ge.0.0d0)then
awt=atan(c)*rtdeg
else
awt=(atan(c))*rtdeg+180.0d0
endif
return
end

```

- C** This subroutine corrects the relative wind velocity and direction due to the effect of the
C anemometer height

```

subroutine refheight(Vtwm,zref,zanem,Vg,atwm,cog,Vtwref,
+ Vrwref,arwref)
double precision Vtwm,zref,zanem,Vg,atwm,cog,pi,dtrad,rtdeg,
+ Vrwref,Vtwref,a,b,c,arwref
pi=4.0d0*atan(1.0d0)
dtrad=(pi/180.0d0)
rtdeg=(180.0d0/pi)
Vtwref=Vtwm*((zref/zanem)**(1.0d0/7.0d0))
Vrwref=((Vtwref**2.0d0)+(Vg**2.0d0)+2.0d0*Vtwref*Vg*cos((atwm-cog)
+ *dtrad ))**0.5d0
a=Vtwref*sin(atwm*dtrad-cog*dtrad)
b=Vg+Vtwref*cos(atwm*dtrad-cog*dtrad)
c=a/b
if (b.ge.0.0d0) then
arwref=(atan(c)*rtdeg)+0.0d0

```



```
else
```

```
arwref=(atan(c)*rtdeg)+180.0d0
```

```
endif
```

```
return
```

```
end
```

C Regression formula by Fujiwara based on wind tunnel tests.It calculates the wind resistance

C coefficient using the relative wind direction and the ship's geometrical characteristics

```
subroutine fujiwara(rwa,Alv,Loa,B,Cmc,Hbr,Hc,Axv,Aod,Ca)
```

```
double precision rwa,Alv,Loa,B,Cmc,Hbr,Axv,Aod,Ca,pi,dtrad,rtdeg,
```

```
+ b10,b11,b12,b20,b21,b22,b23,b24,d10,d11,d12,d20,d21,d22,d23,d24,
```

```
+ e10,e11,e12,e20,e21,Clf,Cxli,Calf,a1,a2,Hc
```

```
save b10,b11,b12,b20,b22,b23,b24,d10,d11,d12,d20,d21,d22,d23,d24,
```

```
+ e10,e11,e12,e20,e21
```

```
data b10,b11,b12,b20,b21,b22,b23,b24,d10,d11,d12,d20,d21,d22,d23,
```

```
+ d24e10,e11,e12,e20,e21 / 0.922d0,-0.507d0,-1.162d0,-0.018d0,
```

```
+ 5.091d0,-10.367d0,3.011d0,0.341d0,-0.458d0,-3.245d0,2.313d0,
```

```
+ 1.901d0,-12.727d0,-24.407d0,40.310d0,5.481d0,0.585d0,0.906d0,
```

```
+ -3.239d0,0.314d0,1.117d0/
```

```
pi=4.0d0*atan(1.0d0)
```

```
dtrad=(pi/180.0d0)
```

```
rtdeg=(180.0d0/pi)
```

```
rwa=abs(rwa)
```

```
if ((rwa.ge.0d0).and.(rwa.lt.90.0d0)) then
```

```
rwa=rwa*dtrad
```

```
a1=cos(rwa)
```

```
a2=sin(rwa)
```

```
Clf=b10+b11*(Alv/(Loa*B))+b12*(Cmc/Loa)
```

```
Cxli=d10+d11*(Alv/(Loa*Hbr))+d12*(Axv/(B*Hbr))
```

```
Calf=e10+e11*(Aod/Alv)+e12*(B/Loa)
```

```
else
```

```
rwa=rwa*dtrad
```

```
a1=cos(rwa)
```

```

a2=sin(rwa)
Clf=b20+b21*(B/Loa)+b22*(Hc/Loa)+b23*(Aod/(Loa**2.0d0))+ b24*
+ (Axv/(B**2.0d0))
Ckli=d20+d21*(Alv/(Loa*Hbr))+d22*(Axv/Alv)+d23*(B/Loa)+d24*(Axv/
+ (B*Hbr))
Calf=e20+e21*(Aod/Alv)
endif
Ca=Clf*a1+Ckli*(a2-0.5d0*a2*(a1**2.0d0))*a2*a1+Calf*a2*(a1**3.0d0)
return
end

```

- C This subroutine calculates the wind resistance coefficient based on the Isherwood's regression analysis.

```

subroutine isherwood(aa0,aa1,aa2,aa3,aa4,aa5,aa6,Al,At,L,B,Ssp,CC,
+ MM,Cxa)
double precision aa1,aa2,aa3,aa4,aa5,aa6,Al,At,L,B,Ssp,CC,MM,Cxa,
+ aa0
Cxa= aa0+aa1*(2.0d0*Al/(L**2.0d0))+aa2*(2.0d0*At/(B**2.0d0))+
+ aa3*(L/B)+aa4*(Ssp/L)+aa5*(CC/L)+aa6*MM
return
end

```

- C This subroutine calculates the wind resistance based on the calculation of the wind resistance coefficients and the relative wind velocity.

```

subroutine resair(da,Cx,Cx0,Vwr,Vg,Axv,Rhead,Raa,Rd)
double precision da,Cx,Cx0,Vwr,Vg,Axv,Rhead,Raa,Rd
Rhead=((1.0d0/2.0d0)*da*(Vg**2.0d0)*Cx0*Axv)
Raa=((1.0d0/2.0d0)*da*(Vwr**2.0d0)*Cx*Axv)
Rd=Raa-Rhead
return
end

```

- C Corrects the ship's speed through water due to effect of shallow water.

```

subroutine lackenby(A,H,g,V,DV)

```

double precision A,H,g,V,DV,a1,b1

real or1

$a1=A/(H**2.0d0)$

$or1=(g*H)/(V**2.0d0)$

$b1=1.0d0-(\tanh(or1))**0.5d0$

$DV=(0.1242d0*(a1-0.05d0)+b1)*V$

return

end

C Calculates the effective and shafts power given the ship's quasi propulsive efficiency.

C The final output is the corrected delivered power in kW

subroutine sws(ns,Vg,Vtw,Rair,nd,Rwav,Pew,Psw,Pwv,Psv,Ps,Po,Rhead,
+ Peba,Psba,Ps1)

double precision Vg,Vtw,Rair,nd,Rwav,Pew,Psw,Pwv,Psv,Ps,Po,Peba,
+ Psba,Ps1,Rhead,ns

C 3 steps of correction.No wind ,no wave and still air

C No wind

$Pew=Rair*Vg$

$Psw=Pew/(nd*ns)$

C No wave

$Pwv=Rwav*Vtw$

$Psv=Pwv/(nd*ns)$

$Po=Ps-Psw-Psv$

C Power Correction to still air condition

$Peba=Rhead*Vg$

$Psba=Peba/(nd*ns)$

$Ps1=Po+Psba$

return

end

Βιβλιογραφία

- [1] J S Carlton, *Marine Propellers and Propulsion*. Elsevier,2007.
- [2] Eric C. Tupper, *Introduction to Naval Architecture*. Elsevier,2013.
- [3] Doug Woodyard, *Pounders Marine Diesel Engines and Gas Turbines*. Elsevier,2009.
- [4] Anthony F.Molland, Stephen R.Turnock, Dominic A.Hudson, *Ship Resistance and Propulsion*. Cambridge University Press,2011.
- [5] ISO 15016:2015, *Guidelines for the assessment of speed and power performance by analysis of speed trial data*.
- [6] *Basic principles of ship propulsion*. MAN B&W Diesel,2013.
- [7] Ν.Π. Κυρτάτος, *Βασικές αρχές πρόωσης πλοίων*. Αθήνα,2007.
- [8] ITTC, *Speed and Power Trials Part 1 Preparation and Conduct*, 2014.
- [9] ITTC, *Speed and Power Trials Part 2 Analysis of Speed/Power Trial Data*, 2014.
- [10] R.M Isherwood, *Wind Resistance of Merchant Ships*. The Royal Institution of Naval Architects, 1972.
- [11] ITTC, *Prediction of Power Increase in Irregular Waves from Model Test*, 2011.
- [12] ITTC, *Fresh Water and Seawater Properties* , 2011.
- [13] Ruihua Lu, Osman Turan, Evangelos Boulougouris, Charlotte Banks, Atilla Incecik, *A semi-empirical ship operational performance prediction model for voyage optimization towards energy efficient shipping*. Elsevier Ocean Engineering Journal,2015.
- [14] J.Holtrop, *A Statistical Re-Analysis of Resistance and Propulsion Data*, 1984.
- [15] Jorgen Strom-Tejsen, Hugh Y.H Yeh, David D. Moran, *Added Resistance in Waves*. The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1973
- [16] Κ.Δ Ρακόπουλος, Ε.Γ Γιακουμής, *Εναλλαγή Αερίων και Υπερπλήρωση Μ.Ε.Κ*, FountasBooks, 2011.
- [17] William Z.Black, James G.Hartley, *Thermodynamics, SI Version*, Pearson Education Inc, 2008.
- [18] Κ.Ρακόπουλος, *Αρχές Εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ*, Εκδόσεις Φούντας, 1988.

[19] ISO 15016:2002, *Guidelines for the assessment of speed and power performance by analysis of speed trial data.*