



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών

Τομέας Μελέτης Πλοίου Και Θαλάσσιων Μεταφορών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Μελέτη της επίδρασης διάταξης για τη βελτίωση της
πρόωσης πλοίου με χρήση επιχειρησιακών δεδομένων**

ΣΚΡΕΤΑΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΘΕΜΕΛΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΑΘΗΝΑ 2024

ΣΥΝΟΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στην εκτίμηση της αποδοτικότητας μιας διάταξης που είναι εγκατεστημένη στην προπέλα ενός πλοίου, με σκοπό τη βελτίωση της πρόωσης, χρησιμοποιώντας επιχειρησιακά δεδομένα. Για τον σκοπό αυτό, διεξάγεται συγκριτική μελέτη της απόδοσης δύο αδελφών πλοίων, εκ των οποίων το ένα διαθέτει τη διάταξη (Πλοίο 1), ενώ το άλλο όχι (Πλοίο 2). Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν καλύπτουν χρονική περίοδο ενός έτους μετά τον δεξαμενισμό του κάθε πλοίου.

Αρχικά, συγκεντρώθηκαν και επεξεργάστηκαν τα απαραίτητα δεδομένα, τα οποία στη συνέχεια διορθώθηκαν για την κατάσταση ανέμου και κυματισμού. Αυτή η διόρθωση είναι κρίσιμη για την εξασφάλιση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων, καθώς επιτρέπει τη σύγκριση των δεδομένων σε συνθήκες που είναι όσο το δυνατόν πιο ομοιογενείς. Η διαδικασία περιλάμβανε την κανονικοποίηση της ισχύος, ώστε όλα τα δεδομένα να αναφέρονται σε μια κοινή κατάσταση. Αυτό το βήμα είναι σημαντικό για να εξαχθούν σωστά συμπεράσματα σχετικά με τη βελτίωση της απόδοσης του πλοίου.

Στη συνέχεια, δημιουργήθηκε ένα πολλαπλό μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης, το οποίο συσχετίζει την ισχύ του πλοίου με διάφορες παραμέτρους που επηρεάζουν τη λειτουργία του, όπως η ταχύτητα, το μέσο βύθισμα, η διαγωγή και τα στοιχεία του καιρού. Το μοντέλο αυτό παρέχει μια εκτίμηση της μεταβολής της ισχύος του πλοίου για διάφορες ταχύτητες και βυθίσματα, όπως προκύπτουν από τα ληφθέντα δεδομένα. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει τη λεπτομερή ανάλυση της επίδρασης των διαφόρων παραμέτρων στην απόδοση του πλοίου.

Τέλος, υπολογίστηκαν τρεις δείκτες απόδοσης (KPI) για τη σύγκριση της απόδοσης των δύο πλοίων. Οι δείκτες αυτοί περιλαμβάνουν την κατανάλωση καυσίμου, την εκπομπή ρύπων και την συνολική αποδοτικότητα της πρόωσης. Η ανάλυση των δεικτών αυτών στοχεύει στο να καθορίσει εάν η εγκατεστημένη διάταξη στην προπέλα του Πλοίου 1 έχει οδηγήσει σε βελτίωση της απόδοσής του σε σχέση με το Πλοίο 2.

Η παρούσα εργασία αποσκοπεί στο να απαντήσει κατά πόσο η εγκατεστημένη διάταξη έχει θετική επίδραση στην απόδοση του πλοίου. Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης μπορούν να προσφέρουν σημαντικές πληροφορίες για τη λήψη αποφάσεων σχετικά με την εφαρμογή τέτοιων διατάξεων σε άλλα πλοία, με στόχο τη βελτίωση της αποδοτικότητας και τη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και των εκπομπών ρύπων. Η διεξοδική ανάλυση των δεδομένων και η εφαρμογή μεθόδων στατιστικής επεξεργασίας διασφαλίζουν την αξιοπιστία των συμπερασμάτων, καθιστώντας την εργασία αυτή χρήσιμη τόσο για την ακαδημαϊκή κοινότητα όσο και για τη βιομηχανία της ναυτιλίας.

ABSTRACT

This thesis focuses on estimating the efficiency of a device installed on a ship's propeller to improve its propulsion, using operational data. A comparative study is conducted on the performance of two sister ships, one of which has the system installed (Vessel 1) and the other does not (Vessel 2). The data used were collected over a one-year period after the dry-docking of each ship.

Initially, the necessary data were collected and processed, followed by corrections for wind and wave conditions. This correction is crucial to ensure the accuracy of the results, as it allows the comparison of data under conditions that are as homogeneous as possible. The process included power normalization so that all data refer to a common state. This step is important for drawing correct conclusions regarding the ship's performance improvement.

Subsequently, a multiple linear regression model was created, correlating the ship's power with various parameters affecting its operation, such as speed, average draft, trim, and weather conditions. This model provides an estimate of the ship's power variation for different speeds and drafts, as derived from the collected data. This approach allows for a detailed analysis of the impact of various parameters on the ship's performance.

Finally, three key performance indicators (KPIs) were calculated to compare the performance of the two vessels. These indicators include fuel consumption, pollutant emissions, and overall propulsion efficiency. The analysis of these indicators aims to determine whether the installed device on Vessel 1 has led to an improvement in its performance compared to Vessel 2.

The objective of this thesis is to determine whether and to what extent the device positively impacts the ship's performance. The results of this study can provide significant insights for decision-making regarding the implementation of such devices on other ships, aiming to improve efficiency and reduce fuel consumption and emissions. The thorough data analysis and the application of statistical processing methods ensure the reliability of the conclusions, making this thesis useful both for the academic community and the maritime industry.

[This page is intentionally left blank]

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Καταρχάς, θα ήθελα να εκφράσω την ειλικρινή μου ευγνωμοσύνη στον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Νικόλαο Θεμελή, για την αμέριστη υποστήριξη και καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας. Η εμπειρία και οι γνώσεις του υπήρξαν ανεκτίμητες.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την εταιρεία Union Commercial Incorporated και κυρίως τα μέλη του τεχνικού τμήματος για την ευγενική παραχώρηση των απαραίτητων στοιχείων και δεδομένων, που συνέβαλαν καθοριστικά στην ολοκλήρωση της εργασίας μου.

Τέλος, νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου για την αδιάκοπη στήριξη, την κατανόηση και την ενθάρρυνση που μου προσέφεραν καθ' όλη τη διάρκεια αυτής της πορείας. Η αγάπη και η πίστη τους αποτέλεσαν την κινητήρια δύναμή μου.

[This page is intentionally left blank]

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΣΥΝΟΨΗ.....	2
ABSTRACT	3
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	5
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	12
1.1 ΙΜΟ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΠΛΟΙΟΥ.....	12
1.2 ΡΒCF (PROPELLER BOSS CAP FINS).....	13
1.3 ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΕΡΓΑΣΙΩΝ.....	14
1.4 ΣΤΟΧΟΣ ΚΑΙ ΔΟΜΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	15
2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΠΛΟΙΩΝ.....	17
2.1 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	17
2.2 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ.....	17
2.3 ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	19
2.4 ΑΡΧΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΙΚΗ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	20
3 ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΙΣΧΥΟΣ ΠΡΟΩΣΗΣ ΕΞΑΙΤΙΑΣ ΚΑΙΡΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ.....	25
3.1 ΠΡΟΣΘΕΤΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΑΝΕΜΟΥ.....	26
3.1.1 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΑΝΕΜΟΥ (ΜΕΘΟΔΟΣ FUJIWARA)	28
3.2 ΠΡΟΣΘΕΤΗ ΑΝΤΙΤΑΣΗ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥ.....	33
3.2.1 ΠΡΟΣΘΕΤΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥ (STAWAVE-1).....	33
3.2.2 ΠΡΟΣΘΕΤΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥ (STAWAVE-2).....	34
3.3 ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΙΣΧΥΟΣ	41
4 Μοντέλο Παλινδρόμησης.....	46
4.1 Πολλαπλό μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης.....	46
4.2 Βασικά Χαρακτηριστικά και Μεταβλητές	47
4.2.1 Συντελεστής Προσδιορισμού.....	47
4.2.2 Τυπική Απόκλιση.....	48
4.2.3 Τυπικό Σφάλμα Συντελεστή.....	49
4.3 Δημιουργία Μοντέλου Γραμμικής Παλινδρόμησης.....	49
4.4 Τελική Σύγκριση.....	52
5 Key Performance Indicators (KPIs)	54
5.1 KPI 1 (Propeller Loading Coefficient): Δείκτης Απόδοσης Περιτροφής Έλικας	54

5.2	ΚΡΙ 2 (Speed Loss): Απώλεια ταχύτητας.....	55
5.3	ΚΡΙ 3 (Carbon Intensity Indicator – CII): Δείκτης Έντασης Άνθρακα	55
6	Αποτελέσματα και Ανάλυση των ΚΡΙs	57
6.1	ΚΡΙ 1 (Propeller Loading Coefficient): Δείκτης Απόδοσης Περιτροφής Έλικας	57
6.2	ΚΡΙ 2 (Speed Loss): Απώλεια ταχύτητας.....	58
6.3	ΚΡΙ 3 (Carbon Intensity Indicator – CII): Δείκτης Έντασης Άνθρακα	59
7	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	60
8	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	61
9	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	62
9.1	ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΑΝΕΜΟΥ (FUJIWARA)	62
9.2	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΟΤΕΛΟΥ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗΣ	64

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1 Στάδια απανθρακοποίησης της ναυτιλίας κατά IMO [4]	13
Εικόνα 1.2 Σύγκριση σπηλαίωσης με και χωρίς PBCF αριστερά και δεξιά αντίστοιχα [5].....	14
Τέλος, υπολογίστηκαν κάποιοι δείκτες KPIs (Key Performance Indicators) με σκοπό τη σύγκρισή των δυο πλοίων. Η παραπάνω διαδικασία παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.3.	15
Εικόνα 1.3 Διάγραμμα ροής διαδικασίας.....	16
Εικόνα 2.1 Τυπικό Noon Report.....	20
Εικόνα 2.2. Εγκατάσταση PBCF στο Πλοίο 1.....	21
Εικόνα 2.3. Εγκατάσταση PBCF στο Πλοίο 1.....	21
Εικόνα 3.1 Σύμβαση της κατεύθυνση του πλοίου [8]	26
Εικόνα 3.2 Σύμβαση των κατευθύνσεων των ανέμων [8].....	27
Εικόνα 3.3 Σχηματική απεικόνιση παραμέτρων μεθόδου Fujiwara [8]	30
Εικόνα 3.4 Μήκος L_{BWL} (ITTC - 2021) [6]	34

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 5.1 Κατασκευαστικά στοιχεία υπό μελέτη πλοίων	17
Πίνακας 5.2 Στοιχεία καταστάσεων φόρτωσης	18
Πίνακας 5.3 Χρονολογία και πλήθος δεδομένων	20
Πίνακας 5.4 Μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις Για το Πλοίο 1.....	24
Πίνακας 5.5 Μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις για το Πλοίο 2	24
Πίνακας 6.1 Αδιάστατοι Συντελεστές [8]	30
Πίνακας 6.2 Συγκεντρωτικά στοιχεία παραμέτρων για τη μέθοδο Fujiwara	31
Πίνακας 9.1 Αποτελέσματα ΚΡΙ 1.....	57
Πίνακας 9.2 Μέσες τιμές απώλειας ταχύτητας	58
Πίνακας 9.3 Υπολογισμός CII - Πλοίο 1	59
Πίνακας 9.4 Υπολογισμός CII - Πλοίο 2	59
Πίνακας 12.1 Συντελεστές αντίστασης ανέμου (Fujiwara)	62

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 2.1. Καμπύλες αναφοράς Ισχύος [kW] - Ταχύτητας [kn]	18
Διάγραμμα 2.2 Ιστόγραμμα ταχυτήτων των 2 πλοίων	22
Διάγραμμα 2.3. Ιστόγραμμα μέσων βυθισμάτων των 2 πλοίων.....	22
Διάγραμμα 2.4. Ιστόγραμμα φορτίου μηχανής των 2 πλοίων	23
Διάγραμμα 2.5. Ιστόγραμμα ανέμου των 2 πλοίων.....	23
Διάγραμμα 3.1 Κατανομή συντελεστή CDA για γωνίες πρόσπτωσης [0°, 180°] - Καταστάσεις Ballast, Design & Scantling.....	31
Διάγραμμα 3.2 Επίδραση ανέμου στην Ισχύ	32
Διάγραμμα 3.3 Μεταβολή ταχύτητας και κατεύθυνσης του ανέμου	33
Διάγραμμα 3.4 Γραφική απεικόνιση πρόσθετης αντίστασης κυματισμού Stawave-2 (ITTC - 2021) [8] ...	36
Διάγραμμα 3.5 Response Function	37
Διάγραμμα 3.6 Επίδραση Κυματισμού στην Ισχύ (Πλοίο 1)	38
Διάγραμμα 3.7 Επίδραση ανέμου στη ισχύ (Πλοίο 1)	39
Διάγραμμα 3.8 Επίδραση κυματισμού στην ισχύ (Πλοίο 1).....	39
Διάγραμμα 3.9 Επίδραση ανέμου στην ισχύ (Πλοίο 2).....	40
Διάγραμμα 3.10 Επίδραση κυματισμού στην ισχύ (Πλοίο 2).....	40
Διάγραμμα 3.11 Σύγκριση Κανονικοποιημένης με Αρχική Ισχύ (Κατάσταση Ballast) - Πλοίο 1.....	42
Διάγραμμα 3.12 Σύγκριση Κανονικοποιημένης με Αρχική Ισχύ (Κατάσταση Ballast) - Πλοίο 2.....	42
Διάγραμμα 3.13 Σύγκριση Κανονικοποιημένης με Αρχική Ισχύ (Κατάσταση Design) - Πλοίο 1.....	43
Διάγραμμα 3.14 Σύγκριση Κανονικοποιημένης με Αρχική Ισχύ (Κατάσταση Design) - Πλοίο 2.....	43
Διάγραμμα 3.15 Σύγκριση Κανονικοποιημένης με Αρχική Ισχύ (Κατάσταση Scantling) - Πλοίο 1.....	44
Διάγραμμα 3.16 Σύγκριση Κανονικοποιημένης με Αρχική Ισχύ (Κατάσταση Scantling) - Πλοίο 2.....	44
Διάγραμμα 4.1 Κατανομή Σημείων Παλινδρόμηση - Πλοίο 1.....	51
Διάγραμμα 4.2 Κατανομή Σημείων Παλινδρόμηση - Πλοίο 2.....	51
Διάγραμμα 4.3 Αναμενόμενη Ισχύς για εύρος ταχυτήτων 9-14 kn σε βύθισμα ερματισμού	52
Διάγραμμα 4.4 Αναμενόμενη Ισχύς για εύρος ταχυτήτων 9-14 kn σε βύθισμα σχεδίασης.....	53
Διάγραμμα 4.5 Αναμενόμενη Ισχύς για εύρος ταχυτήτων 9-14 kn σε μέγιστο βύθισμα	53
Διάγραμμα 6.1 Αποτελέσματα KPI 1.....	57
Διάγραμμα 6.2 Απώλεια ταχύτητας Πλοίο 1 και Πλοίο 2	58
Διάγραμμα 9.1 Συντελεστές αντίστασης ανέμου	63
Διάγραμμα 9.2 Αποτελέσματα Minitab για το Πλοίο 1	64
Διάγραμμα 9.3 Αποτελέσματα Minitab για το Πλοίο 2	65

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΙΜΟ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΠΛΟΙΟΥ

Ένα από τα πιο πολυσυζητημένα θέματα του 21ου αιώνα αποτελεί η απανθρακοποίηση της ναυτιλίας. Ο ΙΜΟ (International Maritime Organization) μέσα από την ΜΕΡC (Marine Environment Protection Committee) έχει θέσει κάποιους στόχους που στοχεύουν στην μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά 50% σε σχέση με το 2008 έως το 2050, μέσω της μείωσης εκπομπών CO₂ [1]. Αναλυτικά τα στάδια φαίνονται στο παρακάτω γράφημα [Εικόνα 1.1]. Για να επιτευχθούν αυτά έχουν εισαχθεί σχεδιαστικά μέτρα για την βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας του πλοίου.

Τα μέτρα αυτά κινούνται σε δύο άξονες: τη χρήση εναλλακτικών καυσίμων και την εγκατάσταση συστημάτων βελτίωσης της αποδοτικότητας.

1. Εναλλακτικά καύσιμα

Μέχρι σήμερα έχουν προταθεί εναλλακτικά καύσιμα τα οποία κατά τη χρήση τους δεν εκπέμπουν CO₂. Αυτά είναι τα εξής [2]:

- Μεθανόλη
- Αμμωνία
- Υδρογόνο

Οι μεγαλύτεροι κατασκευαστές ναυτικών κινητήρων (MAN, WinGD, Mitsubishi) έχουν ήδη αναπτύξει και δοκιμάσει τέτοιους κινητήρες σε νέα πλοία.

2. Συστήματα βελτίωσης αποδοτικότητας

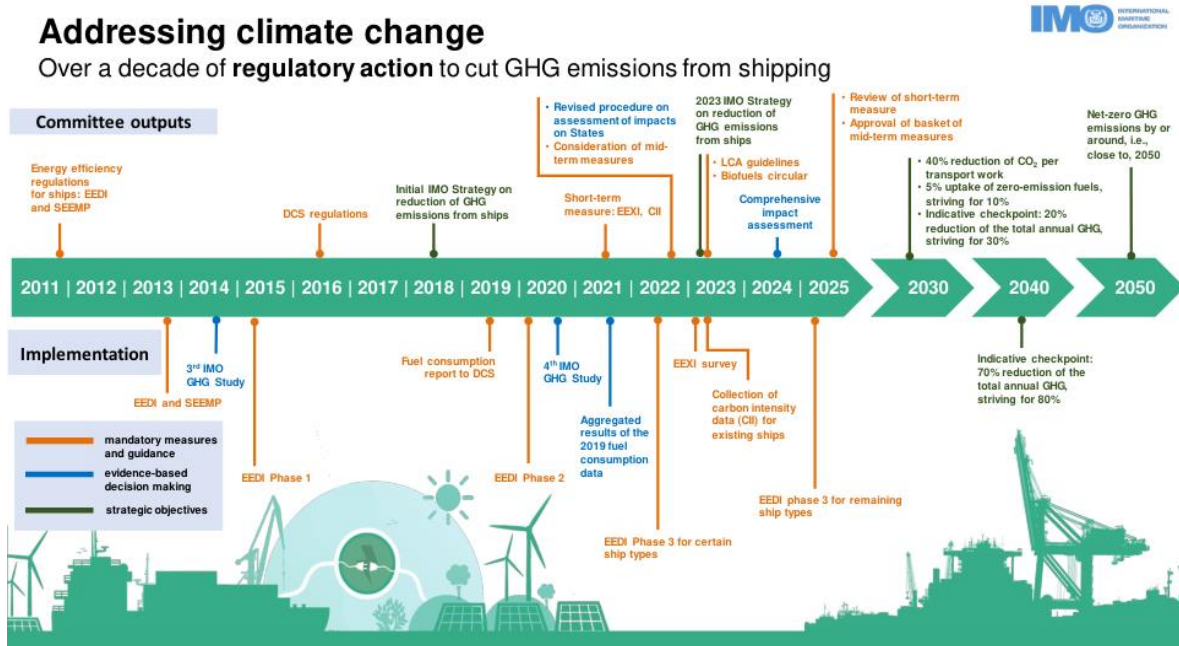
Το πλοίο αποτελεί μια τεράστια κατασκευή με πολλά επιμέρους μηχανήματα τα οποία πρέπει να λειτουργούν αρμονικά και απρόσκοπτα. Για να πραγματοποιηθεί αυτό, απαιτούνται τεράστιες ποσότητες ενέργειας. Έτσι, εισάγεται η έννοια της αποδοτικότητας του πλοίου, δηλαδή η κάλυψη των αναγκών ενέργειας με όσο το δυνατόν μικρότερη κατανάλωση πόρων (καυσίμου). Παράλληλα, το πλοίο κατά τη διάρκεια του ταξιδιού του, επηρεάζεται από τις εκάστοτε καιρικές συνθήκες. Συνυπολογίζοντας τα παραπάνω, η αποδοτικότητα πρέπει να επιτυγχάνεται τόσο επιχειρησιακά όσο και λειτουργικά (κατάσταση λειτουργίας γάστρας – έλικας).

Σκοπός, λοιπόν, όλων των εμπλεκόμενων πλευρών (ΙΜΟ, πλοιοκτήτες, κατασκευαστές) είναι η μέγιστη αποδοτικότητα. Έχουν πραγματοποιηθεί πολλές μελέτες και έχουν αναπτυχθεί συστήματα με σκοπό την αύξηση της αποδοτικότητας των πλοίων. Κάποια από αυτά τα συστήματα είναι τα εξής [3]:

- Hull Air Lubrication System
- Mewis Duct
- Schneekluth Duct
- Rotor Sails
- Hull Cleaning and application of silicon paints
- PBCF (Propeller Boss Cap Fins)

Στην παρούσα εργασία γίνεται συγκριτική μελέτη δύο αδερφών πλοίων εκ των οποίων το ένα έχει εγκατεστημένο το σύστημα PBCF (Πλοίο 1) και το άλλο όχι (Πλοίο 2). Τα δύο πλοία μελετώνται για μια περίοδο περίπου 6 μηνών μετά το δεξαμενισμό τους ενώ έχουν χρησιμοποιηθεί τα ίδια προϊόντα κατά τη βαφή της γάστρας και προπέλας. Για τη μελέτη χρησιμοποιούνται υπηρεσιακά δεδομένα (ταχύτητα,

διανυόμενη απόσταση κλπ. όπως αναλύονται πιο λεπτομερώς παρακάτω) και σκοπός είναι η παρατήρηση πως το σύστημα αυτό επηρεάζει την αποδοτικότητα ενός πλοίου.



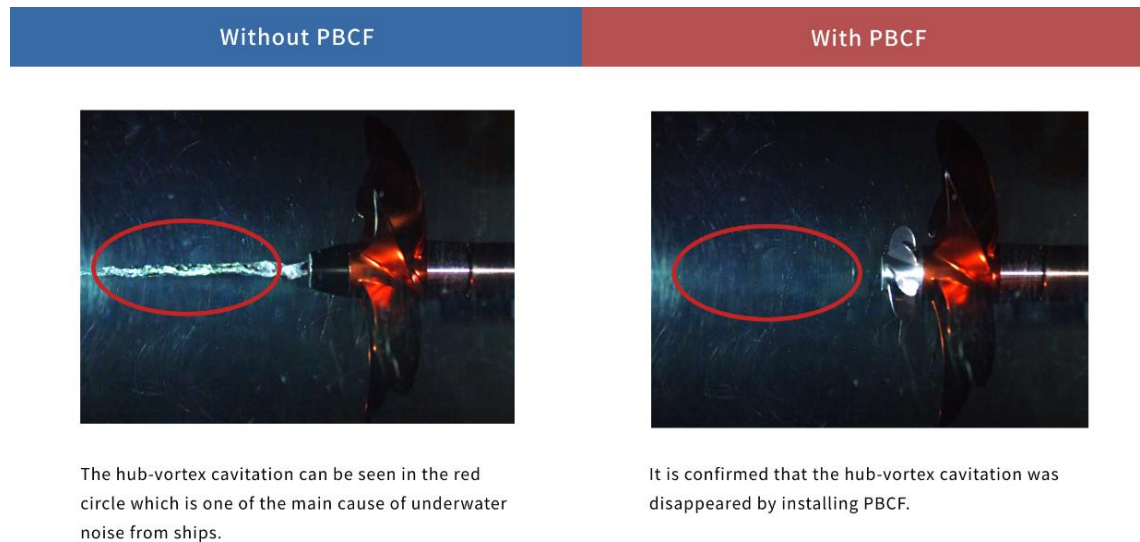
Εικόνα 1.1 Στάδια απανθρακοποίησης της ναυτιλίας κατά IMO [4]

1.2 PBCF (PROPELLER BOSS CAP FINS)

Το σύστημα Propeller Boss Cap Fins (από εδώ και στο εξής θα αναφέρεται ως PBCF για συντομία) [5] αποτελεί μια μικρότερη προπέλα η οποία εγκαθίσταται στην πλήμνη της προπέλας με σκοπό την βελτίωση της αποδοτικότητάς της. Αυτό επιτυγχάνεται με την τροποποίηση της ροής του νερού γύρω από τις λεπίδες, μειώνοντας την τυρβώδη ροή και βελτιώνοντας την υδροδυναμική απόδοση της προπέλας. Παρακάτω παρουσιάζονται τα βασικότερα οφέλη του συστήματος:

1. Αύξηση της ώσης: Με τη μείωση της τυρβώδους ροής και την βελτίωση της ροής γύρω από την προπέλα αυξάνεται η ώση που παράγεται από την προπέλα για μια δεδομένη ισχύ.
2. Μείωση σπηλαιώσης: Η σπηλαιώση εμφανίζεται όταν η πίεση του νερού πέσει κάτω από την πίεση βρασμού, οδηγώντας στη δημιουργία φυσαλίδων και κατ' επέκταση μείωση αποδοτικότητας και ζημιά στα πτερύγια της προπέλας. Το PBCF αποτρέπει τη δημιουργία σπηλαιώσης [Εικόνα 2].
3. Εξοικονόμηση καυσίμου: Με τη μείωση απαιτήσεως σε ισχύ, το φορτίο της μηχανής είναι μικρότερο και η απαίτηση καυσίμου μειώνεται.

Γενικότερα, το PBCF αποτελεί μια δημοφιλή λύση για τους πλοιοκτήτες που αναζητούν ένα σύστημα το οποίο θα βελτιώσει την απόδοση του πλοίου τους χωρίς να δαπανήσουν υπέρογκα ποσά και να πραγματοποιήσουν μεγάλες μετατροπές στο υπάρχον καράβι.



Εικόνα 1.2 Σύγκριση σπηλαιώσης με και χωρίς PBCF αριστερά και δεξιά αντίστοιχα [5]

1.3 ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΕΡΓΑΣΙΩΝ

Με τη μελέτη βελτίωσης απόδοσης πλοίου με χρήση PBCF έχουν ασχοληθεί παλαιότερα οι Kazuyuki et al [6]. Στη μελέτη χρησιμοποιήθηκαν Flow Visualization, Propeller Open Test, Self-Propulsion Test και On Ship Test και μετρήθηκε κέρδος από 3% έως 7% στην απόδοση της προπέλας.

Σε νέα μελέτη των Takafumi Kawamura, Kazuyuki Ouchi το 2012 [7] μελετήθηκε μέσω CFD η επίδραση του συστήματος σε μοντέλο και full scale (Reynolds) με διαφορετικές καταστάσεις ροής. Ο μεγάλος αριθμός Reynolds και η παρουσία γάστρας έδωσαν αποτελέσματα που δείχνουν καλύτερη απόδοση της προπέλας με PBCF σε σχέση με το model test. Η λεπτομερής έρευνα των αποτελεσμάτων υποδήλωσε ότι η αντίσταση της πτέρυγας γίνεται μικρότερη και η μείωση της αντίστασης της πλήμνης γίνεται μεγαλύτερη στην πλήρη κλίμακα. Ωστόσο, το προβλεπόμενο κέρδος είναι ακόμα μικρότερο από τις τιμές που αναφέρονται sea trials. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στη διαφορά στην εκτιμώμενη και πραγματική κατανομή του οριακού στρώματος ή σε άλλους παράγοντες όπως οι αλληλεπιδράσεις με τη γάστρα και το πηδάλιο, η μη λεία επιφάνεια, η αστάθεια και η σπηλαιώση.

Για τη σύγκριση των δύο πλοίων χρειάστηκε τα δεδομένα να φιλτραριστούν και τροποποιηθούν ώστε να ταιριάζουν σε κατάσταση όπως αυτή των sea trials. Πραγματοποιήθηκαν διορθώσεις ανέμου και κυματισμού σύμφωνα με τις οδηγίες του IMO για τα sea trials όπως αναλύονται στο ITTC – 2021 [8].

Παράλληλα για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων της μελέτης χρησιμοποιήθηκε μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης το οποίο αναλύεται στις διπλωματικές των Ξουρίδα (2023) [9] και Ζαλαχώρης (2020) [10]. Το μοντέλο βασίζεται στην υπόθεση ότι υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ της εξαρτημένης μεταβλητής και των επεξηγηματικών/ανεξάρτητων μεταβλητών. Κάθε συντελεστής των ανεξάρτητων μεταβλητών αντιπροσωπεύει τη μεταβολή στη μέση απόκριση, όταν αυξάνεται η σχετική ανεξάρτητη μεταβλητή και οι άλλοι παράγοντες διατηρούνται σταθεροί.

Τέλος παράχθηκαν συντελεστές απόδοσης Key Performance Indicators (KPIs) οι οποίοι αναλύονται στη διπλωματική του Κόντη (2023) [11] και στον Class NK (2023) [12].

1.4 ΣΤΟΧΟΣ ΚΑΙ ΔΟΜΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρακολούθηση της απόδοσης του πλοίου προσφέρει πολλά οφέλη καθώς διευκολύνει τον έλεγχο της κατάστασης της γάστρας και της προωστήριας εγκατάστασης και συγκρίνει με τα sea trials που θεωρούνται η βέλτιστη λειτουργία αμέσως μετά την κατασκευή του πλοίου (χωρίς ρύπανση γάστρας και προπέλας και πτώση απόδοσης της μηχανής). Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται επιχειρησιακά δεδομένα ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με την βελτίωση της απόδοσης με το σύστημα PBCF. Τα δεδομένα που μελετώνται αντιστοιχούν σε περίοδο περίπου δώδεκα μηνών μετά το δεξαμενισμό του κάθε πλοίου. Το «Πλοίο 1» δεξαμενίστηκε τον Αύγουστο του 2022, όταν και εγκαταστάθηκε το σύστημα, και το «Πλοίο 2» το Νοέμβριο του 2022. Μεγαλύτερη ανάλυση των δεδομένων και των χαρακτηριστικών των πλοίων γίνεται στο επόμενο κεφάλαιο.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε περιλαμβάνει τα παρακάτω στάδια:

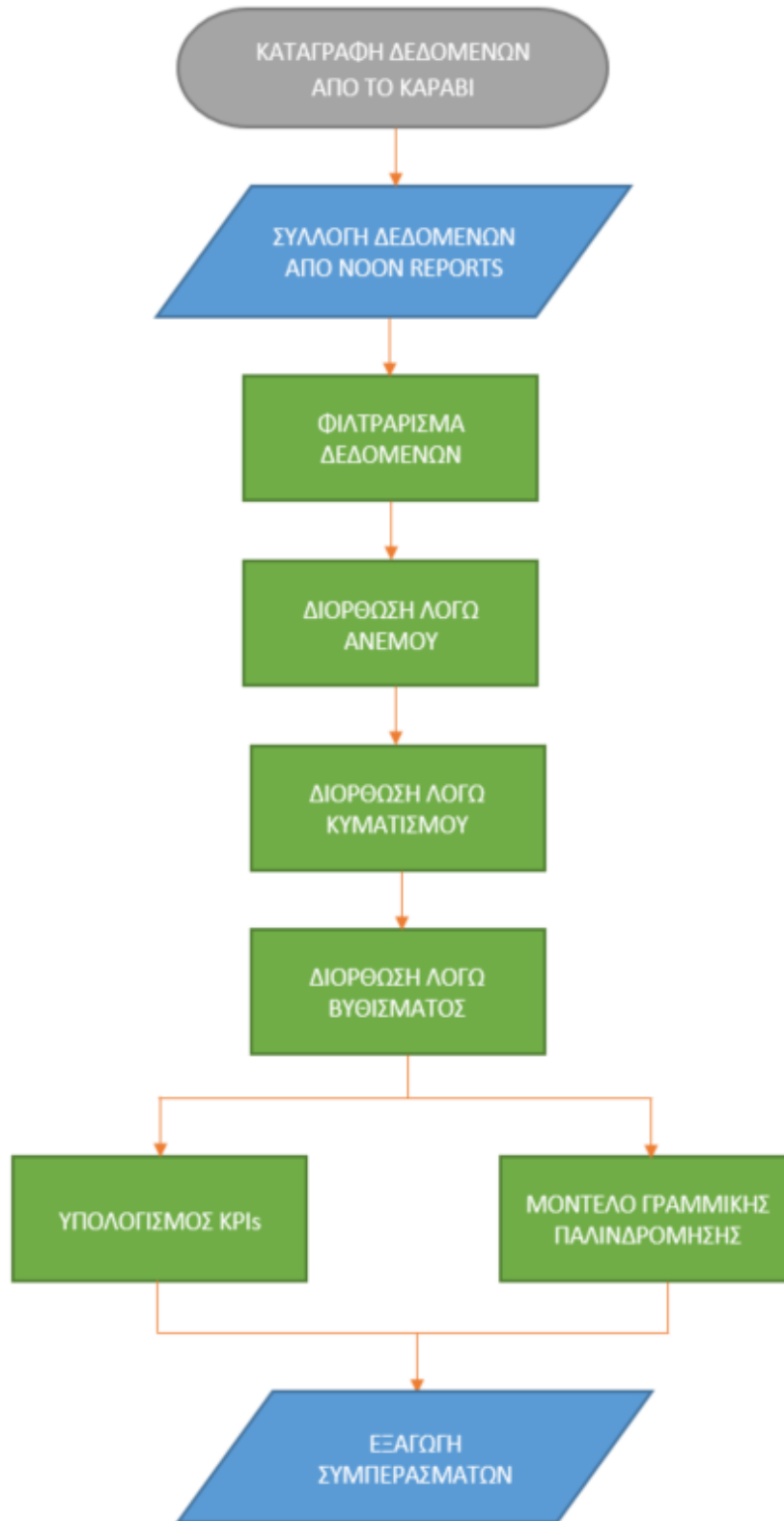
1. Συγκέντρωση επιχειρησιακών δεδομένων.
2. Φιλτράρισμα δεδομένων και χρήση αυτών που ικανοποιούν τα κριτήρια που θέτει η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται.
3. Διόρθωση ισχύος λόγω ανέμου
4. Διόρθωση ισχύος λόγω κυματισμού.
5. Κανονικοποίηση ισχύος λόγω βυθίσματος
6. Δημιουργία μοντέλου γραμμικής παλινδρόμησης.
7. Χρήση των διορθωμένων δεδομένων για την παραγωγή συντελεστών Key Performance Indicators (KPIs).

Πιο συγκεκριμένα, συγκεντρώθηκαν δεδομένα ισχύος, ταχύτητας, κατεύθυνσης, βυθίσματος, καιρού τα οποία καταγράφηκαν σε αρχείο excel. Αυτά τα δεδομένα αντιστοιχούν σε περίοδο περίπου έξι μηνών μετά τον δεξαμενισμό κάθε πλοίου. Με βάση την ITTC 2021 [6] τα δεδομένα αυτά φιλτραρίστηκαν ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην διαδικασία διόρθωσης.

Έπειτα, σύμφωνα πάλι με την ITTC 2021 [6] έγιναν οι διορθώσεις ισχύος λόγω ανέμου και κυματισμού ώστε να υπολογιστεί η ισχύς που θα χρειαζόταν για την ίδια ταχύτητα σε κατάσταση ήρεμης θάλασσας. Επίσης, λόγω της επιρροής του βυθίσματος στην ισχύ που μετράται, γίνεται κανονικοποίηση της ισχύος για βυθίσματα για τα οποία υπάρχουν διαθέσιμες οι καμπύλες P-V από τα sea trials.

Παράλληλα, χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα αυτά ώστε να κατασκευαστεί ένα μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης και την σύγκριση των δύο πλοίων σε συγκεκριμένες συνθήκες/περιπτώσεις.

Τέλος, υπολογίστηκαν κάποιοι δείκτες KPIs (Key Performance Indicators) με σκοπό τη σύγκρισή των δυο πλοίων. Η παραπάνω διαδικασία παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.3.



Εικόνα 1.4 Διάγραμμα ροής διαδικασίας

2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΠΛΟΙΩΝ

2.1 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Τα πλοία που μελετώνται στην παρούσα εργασία είναι αδερφά Bulk Carriers με έτος κατασκευής το 2012 και έχουν χαρακτηριστικά όπως αυτά φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΙΜΗ	ΜΟΝΑΔΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ
Συνολικό Μήκος	L _{OA}	196	m
Μήκος μεταξύ καθέτων	L _{BP}	192.5	m
Πλάτος	B	32.26	m
Κοίλο	D	18.6	m
Βύθισμα Ερματισμού	T _B	5.564	m
Βύθισμα Σχεδίασης	T _D	11.1	m
Μέγιστο Βύθισμα	T _S	13	m
Deadweight	DWT	58518.1	mt
C _B στο βύθισμα σχεδίασης	-	0.8362	-
Ταχύτητα Υπηρεσίας	V _S	14.25	kn
Μέγιστη Ισχύς	P _{MCR}	9960	kW
Ονομαστική Ισχύς	P _{NCR}	8964	kW
Διάμετρος Προπέλας	D _P	5.9	m
Βήμα Προπέλας (@ 0.7R)	A	0.6904	-

Πίνακας 2.1 Κατασκευαστικά στοιχεία υπό μελέτη πλοίων

2.2 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

Στο επόμενο διάγραμμα παρουσιάζονται οι καμπύλες Ισχύος – Ταχύτητας των πλοίων όπως αυτές έχουν υπολογιστεί από τα sea trials. Συγκεκριμένα ήταν διαθέσιμες οι καμπύλες για βυθίσματα ερματισμού και μέγιστης φόρτωσης. Με χρήση του Συντελεστή Ναυαρχείου υπολογίστηκε η αντίστοιχη καμπύλη για βύθισμα Design. Παρακάτω παρατίθεται η αντίστοιχη εξίσωση και ο υπολογισμός.

$$C_{adm} = \frac{\Delta^{2/3} * V^3}{P}$$

Όπου,

Δ: το εκτόπισμα

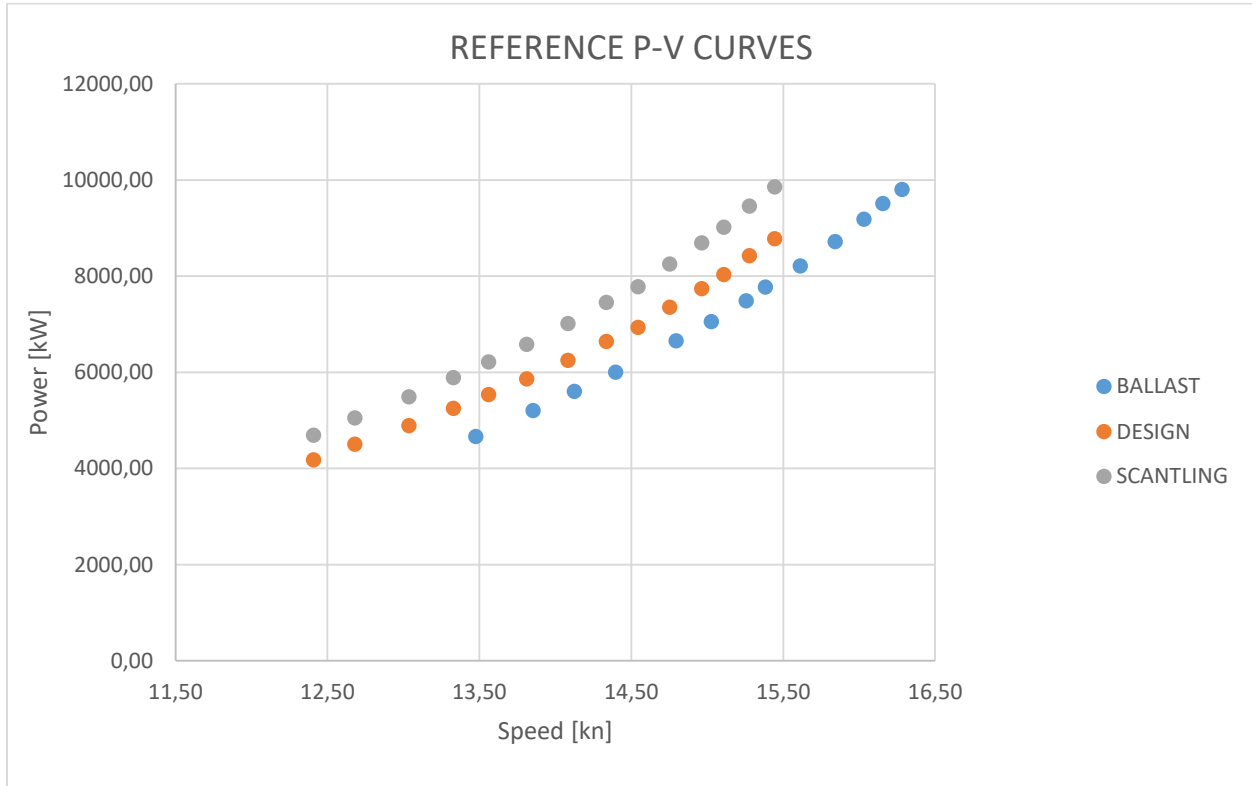
V: η ταχύτητα υπηρεσίας

P: η αντίστοιχη ισχύς

Αυτός ο συντελεστής θεωρείται σταθερός. Επομένως εφαρμόζοντας την παραπάνω εξίσωση χρησιμοποιώντας το εκτόπισμα στο βύθισμα σχεδίασης προέκυψε η καμπύλη αναφοράς για αυτό το βύθισμα.

	ΒΥΘΙΣΜΑ	ΕΚΤΟΠΙΣΜΑ	ΔΙΑΓΩΓΗ
ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΡΜΑΤΙΣΜΟΥ	5.564 m	27625 mt	2.58 m
ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ	11.1 m	59240.6 mt	1.919 m
ΜΕΓΙΣΤΗ ΦΟΡΤΩΣΗ	13 m	70433.3 mt	0.437 m

Πίνακας 2.2 Στοιχεία καταστάσεων φόρτωσης



Διάγραμμα 2.1. Καμπύλες αναφοράς Ισχύος [kW] - Ταχύτητας [kn]

2.3 ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Για την εκτίμηση και ποσοτικοποίηση της απόδοσης ενός πλοίου είναι πολύ χρήσιμο ένα μοντέλο πρόβλεψης ισχύος. Για την ανάπτυξη ενός τέτοιου μοντέλου απαιτούνται δεδομένα που αφορούν τη λειτουργία του πλοίου και λαμβάνονται είτε από συσκευές καταγραφής είτε από το πλήρωμα.

Η πιο διαδεδομένη μέθοδος καταγραφής δεδομένων είναι τα Noon Reports. Αυτά προετοιμάζονται κάθε μέρα από τους μηχανικούς και τους αξιωματικούς του πλοίου και περιλαμβάνουν στοιχεία σχετικά με τη λειτουργία του πλοίου (ταχύτητα, απόστασή που διανύθηκε, καταναλώσεις κλπ.), τις καιρικές συνθήκες και άλλες πληροφορίες που απαιτούνται από την εκάστοτε διαχειρίστρια εταιρεία και αφορούν στο τελευταίο εικοσιτετράωρο. Αφού αυτή η αναφορά προετοιμαστεί αποστέλλεται με E-MAIL στην εταιρεία.

Ένα τυπικό Noon Report περιλαμβάνει τα εξής:

- Ώρα και Ημερομηνία
- Θέση με συντεταγμένες και κατεύθυνση
- Steaming Time
- Απόσταση που Διανύθηκε
- Ταχύτητα και slip
- Άνεμος (Κατεύθυνση και ένταση), Sea waves (Κατεύθυνση και ύψος), Swell (Κατεύθυνση και ύψος)
- Έμφορτη/Αφορτη κατάσταση (Laden/Ballast)
- Επόμενο Λιμάνι και εκτιμώμενη ώρα άφιξης
- Κατανάλωση Καυσίμου
- ROBs καυσίμου
- Κατανάλωση Λιπαντικών
- ROBs Λιπαντικών
- Γλυκό νερό (Παραγωγή/Κατανάλωση/ROBs)
- Sludge/Bilge
- Garbage
- Στροφές Μηχανής – Ισχύς Μηχανής
- Θερμοκρασίες Καυσαερίων
- Θερμοκρασίες Σάρωσης
- Θερμοκρασίες Αέρα (Turbo charger/Air Cooler)
- Ηλεκτρομηχανές
- Διάφορα Σχόλια

Η συγκεκριμένη εργασία για τη συλλογή δεδομένων βασίστηκε σε Noon Reports και συγκεκριμένα σε κάποια από τα παραπάνω στοιχεία που παραλαμβάνονται κάθε μέρα από την εταιρεία.

Παρακάτω φαίνεται ένα παράδειγμα Noon Report.

NOON REPORT	
1.	Date/Time: 06-03-2024 /1200H (UTC-1)
2.	Position: 08-56.0N (lat) / 020-50.0W (long) Course: 287T
3.	S/Time (Noon/Total): 24.0HRS / 163.5HRS
4.	Distance (Noon/Total/ToGo): 280NM / 1853NM / 4436NM
5.	Speed (Noon/Slip/Avg): 11.67kts/ 12.5%/ 11.33kts
6.	Wind-Sea-Swell: S/4-S/4-S/4(direction/force)
7.	Laden/Ballast(L/B): Cargo /Qty: 43611.35MT
8.	Port/ETA: GALVESTON,USA / 21-03-2024 2100LT agw/wp bss : 11.89Kn
9.	Bunker Cons: VLSFO: 25.078MT / LSMGO: ...MT
10.	Bunker ROBs: VLSFO: 642.36MT/LSMGO: 176.207MT
11.	Lubes Cons: CYLO(BN70/BN40): 113/ MELO: 0.0/ GELO:50
12.	Lubes ROBs: CYLO_BN70: 12449/ CYLO_BN40: / MELO: 10850/ GELO: 3110
13.	F/Water (P/S/TOTAL): 83/125/208
14.	Sludge: 7.8 Bilge: 6.0 (Treated /ROBs/Capacity)
15.	Garbage: Cat. A/0.0 /0.4 Cat. C 0.0/0.4/ Cat. D 0.0/0.001/(Qty Disposed/ROB)
16.	M/E(Rpm/Counter/MCR): 101 RPM/ 145440/ 5162W
17.	M/E Exh Gas Temp (1-6):350/330/330/340/340/330/
18.	M/E Under Piston Temp (1-6):48/48/48/50/49/49/
19.	Air Temp(TC in/out / Cooler In/Out /Scav): TURBO CHARGER: 355/275 COOLER: 135/35 SCAV: 38
20.	D/G in-use: NO.1

Εικόνα 2.1 Τυπικό Noon Report

2.4 ΑΡΧΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΙΚΗ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Τα δύο αδελφά πλοία που μελετώνται είναι χτισμένα το 2012. Το «Πλοίο 1» δεξαμενίστηκε τον Αύγουστο του 2022 όταν και εγκαταστάθηκε το σύστημα PBCF. Παρακάτω υπάρχουν ενδεικτικές φωτογραφίες κατά την εγκατάσταση.

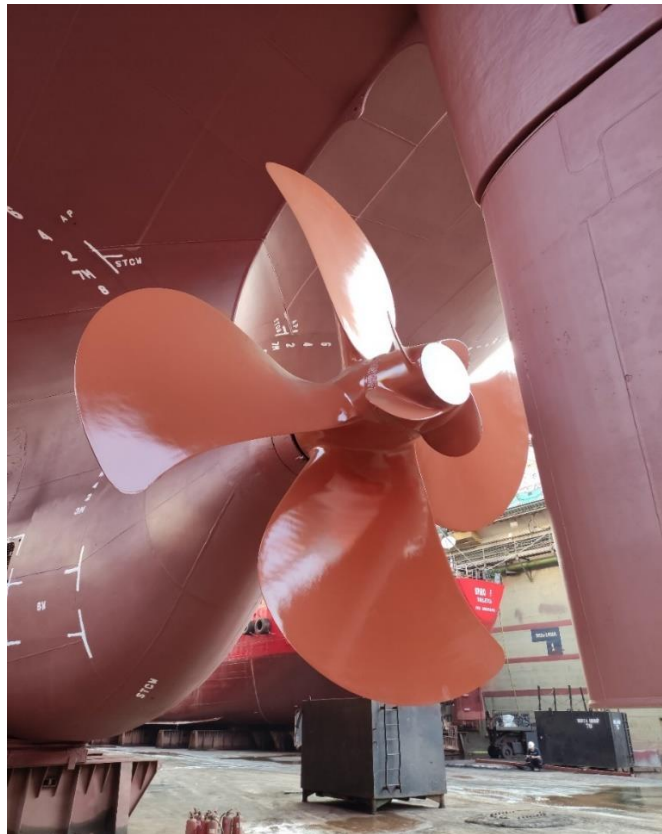
Το «Πλοίο 2» δεξαμενίστηκε τον Νοέμβριο του 2022. Σε αυτό δεν εγκαταστάθηκε το PBCF.

	ΧΡΟΝΟΛΟΓΙΕΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	ΠΛΗΘΟΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ
ΠΛΟΙΟ 1	21/9/2022 – 24/9/2023	131
ΠΛΟΙΟ 2	13/3/2023 – 11/12/2023	123

Πίνακας 2.3 Χρονολογία και πλήθος δεδομένων

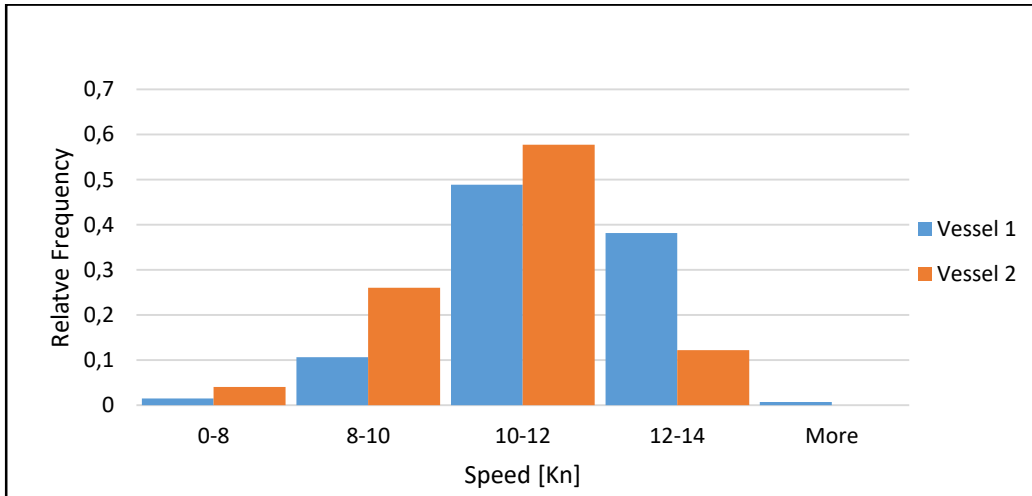


Εικόνα 2.2. Εγκατάσταση ΡΒCF στο Πλοίο 1

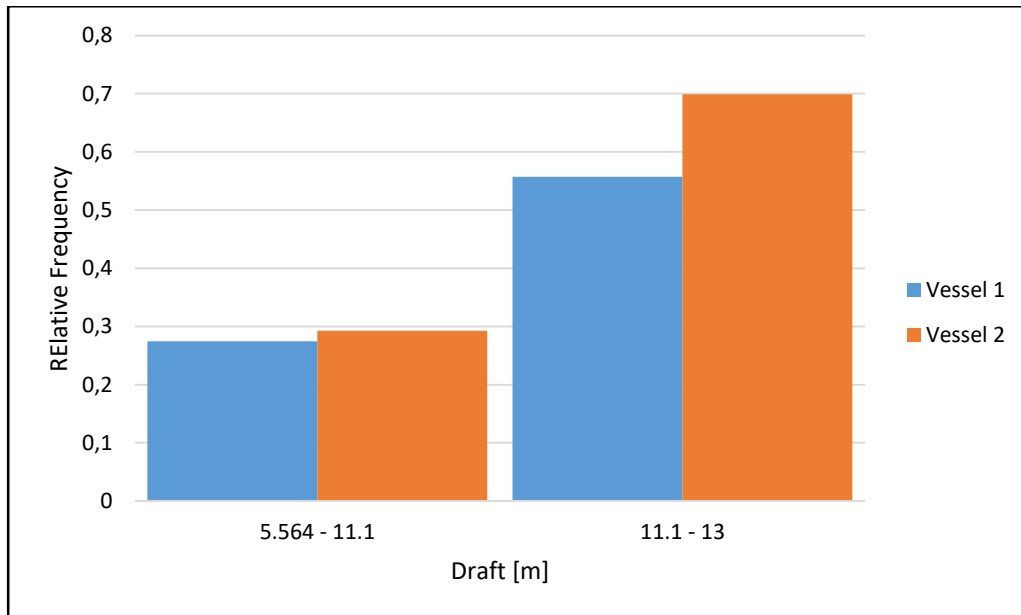


Εικόνα 2.3. Εγκατάσταση ΡΒCF στο Πλοίο 1

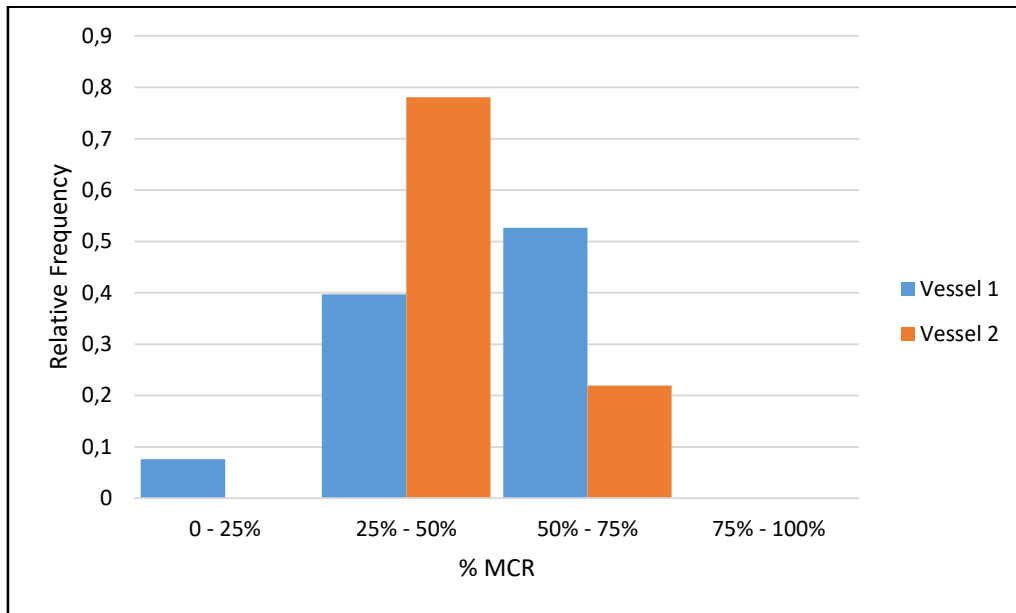
Στα παρακάτω ιστογράμματα παρουσιάζονται τα αρχικά δεδομένα σχετικά με ταχύτητα, βύθισμα, φορτίο μηχανής και άνεμο για το κάθε πλοίο. Σκοπός αυτής της στατιστικής ανάλυσης είναι η σύγκριση των δύο πλοίων σχετικά με το επιχειρησιακό προφίλ του καθενός. Πιο συγκεκριμένα σε κάθε διάγραμμα στον κατακόρυφο άξονα φαίνεται η συχνότητα εμφάνισης τιμών στο αντίστοιχο εύρος του οριζόντιου άξονα.



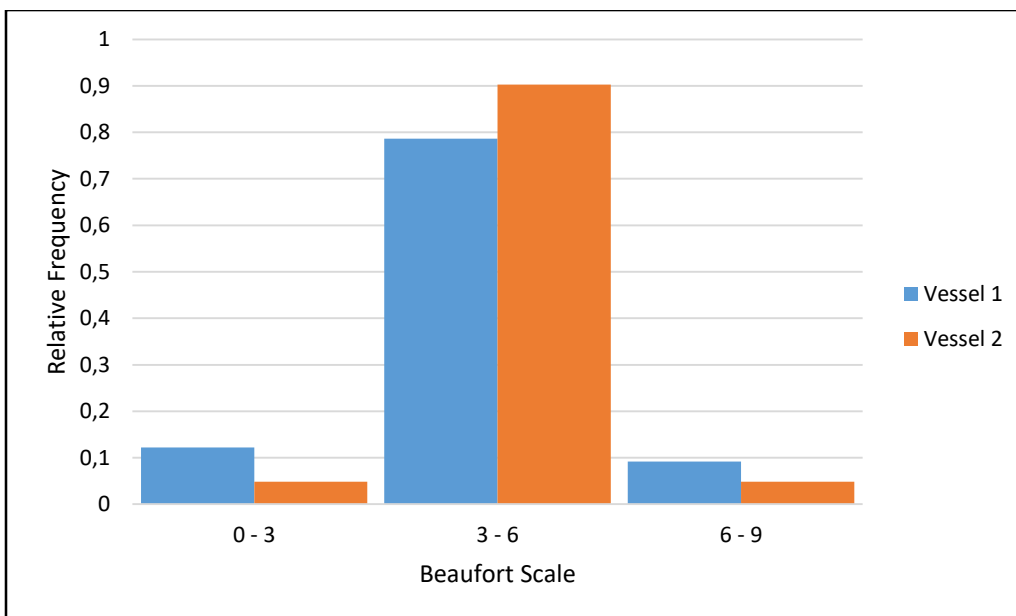
Διάγραμμα 2.2 Ιστόγραμμα ταχυτήτων των 2 πλοίων



Διάγραμμα 2.3. Ιστόγραμμα μέσων βυθισμάτων των 2 πλοίων



Διάγραμμα 2.4. Ιστόγραμμα φορτίου μηχανής των 2 πλοίων



Διάγραμμα 2.5. Ιστόγραμμα ανέμου των 2 πλοίων

Ακολουθούν δύο πίνακες με τις μέσες τιμές και τις τυπικές αποκλίσεις για καθεμία από τις παραπάνω παραμέτρους. Παρατηρείται ότι τα δύο πλοία λειτουργούν σε σχετικά παρόμοιες καταστάσεις όσον αφορά τον άνεμο, ενώ το Πλοίο 2 έχει ελαφρώς πιο μειωμένη ισχύ και ταχύτητα σε σχέση με το Πλοίο 1.

ΠΛΟΙΟ 1	ΤΑΧΥΤΗΤΑ [kn]	ΒΥΘΙΣΜΑ [m]	ΑΝΕΜΟΣ [bft]	ΙΣΧΥΣ ΜΗΧΑΝΗΣ [kW]
ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	11.46	9.90	4.68	4860.25
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	1.37	2.79	1.19	876.51

Πίνακας 2.4 Μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις Για το Πλοίο 1

ΠΛΟΙΟ 2	ΤΑΧΥΤΗΤΑ [kn]	ΒΥΘΙΣΜΑ [m]	ΑΝΕΜΟΣ [bft]	ΙΣΧΥΣ ΜΗΧΑΝΗΣ [kW]
ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	10.6	11.7	5.0	4632.5
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	1.3	1.3	0.9	507.2

Πίνακας 2.5 Μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις για το Πλοίο 2

3 ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΙΣΧΥΟΣ ΠΡΩΣΗΣ ΕΞΑΙΤΙΑΣ ΚΑΙΡΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ

Η αύξηση της αντίστασης λόγω των καιρικών συνθηκών είναι ένα από τα κύρια ζητήματα που επηρεάζουν την απόδοση των πλοίων, οδηγώντας σε διακυμάνσεις στην ταχύτητά τους. Αυτή η αυξημένη αντίσταση προκαλείται κυρίως από την επίδραση του ανέμου και των ανεμογενών κυμάτων, τα οποία οδηγούν σε αλλαγές στην απαιτούμενη ισχύ και, με τη σειρά τους, επηρεάζουν την κατανάλωση της κύριας μηχανής που απαιτείται για τη διατήρηση της επιθυμητής ταχύτητας.

Το πλοίο αντιμετωπίζει αντίσταση από τον άνεμο, η οποία επηρεάζεται από την ταχύτητα αυτού και την εκτεθειμένη επιφάνεια της γάστρας. Αυτή η επιφάνεια καθορίζεται κυρίως από τις υπερκατασκευές του πλοίου και το τμήμα της γάστρας που δεν είναι βυθισμένο. Η διακύμανση σε αυτό το εμβαδόν επιφάνειας λόγω αλλαγών στο βύθισμα του πλοίου χωρίζει τη μελέτη σε τρία διαφορετικά σενάρια: Ballast, Design και Scantling.

Σε σχέση με τα κύματα, περιγράφονται ως ανεμογενή επειδή προέρχονται από την ενέργεια που αντλούν από τον άνεμο. Τα χαρακτηριστικά τους, συμπεριλαμβανομένου του μήκους κύματος, του ύψους και της περιόδου, αλλάζουν με βάση τα χαρακτηριστικά του ανέμου και κυρίως την ταχύτητά του. Το βάθος νερού επίσης επηρεάζει τα χαρακτηριστικά των κυμάτων. Σε αυτή τη μελέτη, τα κύματα αφορούν σε βαθύ νερό και ανεπτυγμένη θάλασσα (η διάρκεια του ανέμου σε συνδυασμό με την μεγάλη επιφάνεια της θάλασσας είναι ικανή να δημιουργήσει πλήρως ανεπτυγμένα κύματα). Με αυτόν τον τρόπο τα κύματα έχουν σημαντικό αντίκτυπο στην αντίσταση του πλοίου.

Τελικά, ο υπολογισμός της αντίστασης κυμάτων περιλαμβάνει και μια τιμή φάσματος ανύψωσης κύματος, υποδεικνύοντας την κατανομή ενέργειας σε τυχαία κυματικά μοτίβα για διαφορετικές τιμές συχνότητας και συνθήκες θάλασσας. Αυτό ισχύει και πάλι για πλήρως ανεπτυγμένη θάλασσα.

Για να διαμορφωθεί η τελική ισχύς και ταχύτητα κάθε πλοίου μελετήθηκαν οι αντιστάσεις που επιδρούν στο πλοίο και ιδίως αυτές που αφορούν τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Συνεπώς, η συνολική πρόσθετη αντίσταση προκύπτει ως άθροισμα της πρόσθετης αντίστασης λόγω ανέμου και λόγω κυματισμού [8]:

$$\Delta R = R_{wind} + R_{wave} \quad (3.1)$$

Έπειτα η αντίσταση αυτή μετατρέπεται από μέγεθος αντίστασης σε μέγεθος ισχύος μέσω της παρακάτω σχέσης:

$$\Delta P = \frac{\Delta R \cdot V_S}{\eta_{D0}} + P_D \left(1 - \frac{\eta_{DM}}{\eta_{D0}} \right) \quad (3.2)$$

Όπου,

η_{DM} : συντελεστής απόδοσης πρόωσης σε κατάσταση λειτουργίας

η_{D0} : συντελεστής απόδοσης πρόωσης σε ήρεμες συνθήκες

(και οι δύο παραπάνω συντελεστές λαμβάνονται ίσοι με τη 0.7 στη συγκεκριμένη μελέτη)

Συνεπώς για τον υπολογισμό της συνολικής διορθωμένης ισχύος ($P_{D,corr}$), αφαιρείται από την μετρημένη ισχύ που φτάνει στο πλοίο η πρόσθετη ισχύς (ΔP), όπως αυτή υπολογίζεται παραπάνω, σύμφωνα με τη σχέση:

$$P_{D,corr} = P_D - \Delta P \quad (3.3)$$

Όπου,

$$P_D = 0.99 \cdot BHP \quad (3.4)$$

Όπου ο συντελεστής 0.99 αναφέρεται στο βαθμό απόδοσης του αξονικού συστήματος.

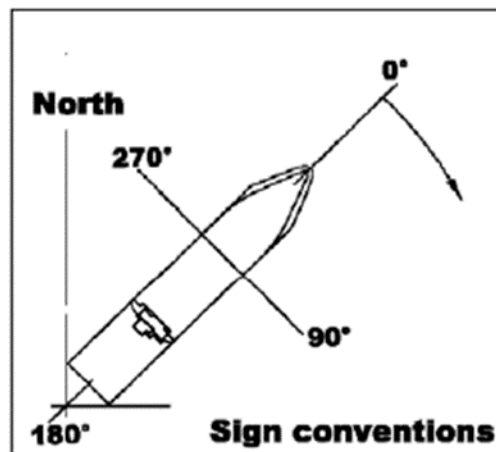
3.1 ΠΡΟΣΘΕΤΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΑΝΕΜΟΥ

Για τον υπολογισμό της πρόσθετης αντίστασης ανέμου η παρούσα μελέτη βασίστηκε στην ITTC – 2021 [6].

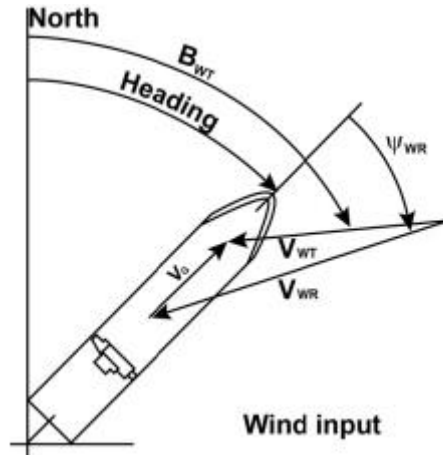
Οι βασικές μεταβλητές της διαδικασίας είναι οι παρακάτω:

- V_g : σχετική ταχύτητα πλοίου-εδάφους μετρούμενη σε [m/s]
- Ψ_0 : κατεύθυνση του πλοίου μετρούμενη σε μοίρες
- V_{wt} : πραγματική ταχύτητα του ανέμου μετρούμενη σε [m/s]
- Ψ_{wt} : πραγματική κατεύθυνση του ανέμου μετρούμενη σε μοίρες
- V_{wr} : σχετική ταχύτητα του ανέμου μετρούμενη σε [m/s]
- Ψ_{wr} : σχετική κατεύθυνση του ανέμου μετρούμενη σε μοίρες

Στα παρακάτω γραφήματα απεικονίζονται οι παραπάνω μεταβλητές ώστε να γίνουν κατανοητές οι συσχετίσεις των κατευθύνσεων.



Εικόνα 3.1 Σύμβαση της κατεύθυνση του πλοίου [8]



Εικόνα 3.2 Σύμβαση των κατευθύνσεων των ανέμων [8]

Για τον υπολογισμό της αντίστασης ανέμου, πραγματοποιούνται με τη σειρά οι παρακάτω υπολογισμοί.

Αρχικά για την πραγματική ταχύτητα και κατεύθυνση ανέμου γίνεται χρήση των παρακάτω σχέσεων στις οποίες συνυπολογίζεται η κατακόρυφη θέση του ανεμόμετρου όπως αυτή έχει μετρηθεί από το General Arrangement Plan του πλοίου:

$$V_{wt} = \sqrt{V_{wr}^2 + V_g^2 - 2 \cdot V_{wr} \cdot V_g \cdot \cos(\Psi_{wr})} \quad (3.5)$$

$$\Psi_{wt} = \left(\frac{V_{wr} \cdot \sin(\Psi_{wr} + \Psi_0) - V_g \cdot \sin(\Psi_0)}{V_{wr} \cdot \cos(\Psi_{wr} + \Psi_0) - V_g \cdot \cos(\Psi_0)} \right),$$

όταν $V_{wr} \cdot \cos(\Psi_{wr} + \Psi_0) - V_g \cdot \cos(\Psi_0) \geq 0$ (3.6)

$$\Psi_{wt} = \left(\frac{V_{wr} \cdot \sin(\Psi_{wr} + \Psi_0) - V_g \cdot \sin(\Psi_0)}{V_{wr} \cdot \cos(\Psi_{wr} + \Psi_0) - V_g \cdot \cos(\Psi_0)} \right) + 180,$$

όταν $V_{wr} \cdot \cos(\Psi_{wr} + \Psi_0) - V_g \cdot \cos(\Psi_0) < 0$ (3.7)

Στη συνέχεια πραγματοποιείται μετατροπή της πραγματικής ταχύτητας και κατεύθυνσης του ανέμου με βάση το ύψος αναφοράς, το οποίο λαμβάνεται ίσο με 10m. Ο μετασχηματισμός αυτός είναι αναγκαίος καθώς οι συντελεστές αντίστασης υπολογίζονται σύμφωνα με αυτό το ύψος.

Αρχικά υπολογίζεται το ύψος αναφοράς με γνώμονα το οποίο θα εκτιμηθεί η αντίσταση του ανέμου:

$$Z_{ref} = \frac{A_{des} \cdot (Z_{ref,des} + \Delta T) + \frac{1}{2} \cdot B \cdot \Delta T^2}{A} \quad (3.8)$$

Ενώ για την πραγματική ταχύτητα στο ύψος αναφοράς εφαρμόζεται η σχέση:

$$V_{wt,ref} = V_{wt} \cdot \left(\frac{Z_{ref}}{Z_a} \right)^{\frac{1}{7}} \quad (3.9)$$

Όπου,

- $V_{wt,ref}$: η πραγματική ταχύτητα ανέμου μετασηματισμένη στο ύψος αναφοράς [m/s]
- Z_{ref} : το ύψος αναφοράς πάνω από τη στάθμη της θάλασσας (λαμβάνεται ίσο με 10m)
- Z_a : το ύψος του ανεμόμετρου πάνω από τη στάθμη της θάλασσας
- $\Delta T = T_{des} - T$, η διαφορά του εκάστοτε βυθίσματος (T) από το βύθισμα σχεδίασης (T_{des})
- $A = A_{des} + \Delta T \cdot B$, με A_{des} η προβλεβλημένη εγκάρσια επιφάνεια του πλοίου στην αντίστοιχη κατάσταση φόρτωσης και B το πλάτος του πλοίου
- $Z_a = Z_{a,des} + \Delta T$, με $Z_{a,des}$ το κατακόρυφο ύψος σχεδιασμού του ανεμόμετρου από την επιφάνεια της θάλασσας
- $Z_{ref,des}$: το κατακόρυφο ύψος αναφοράς σχεδιασμού από την επιφάνεια της θάλασσας

Για τη σχετική ταχύτητα και κατεύθυνση ανέμου στο ύψος αναφοράς της εκάστοτε κατάστασης ισχύουν τα εξής:

$$V_{wr,ref} = \sqrt{V_{wt,ref}^2 + V_g^2 - 2 \cdot V_{wt,ref} \cdot V_g \cdot \cos(\Psi_{wt} - \Psi_0)} \quad (3.10)$$

$$\Psi_{wr,ref} = \left(\frac{V_{wt,ref} \cdot \sin(\Psi_{wt} - \Psi_0)}{V_g + V_{wt,ref} \cdot \cos(\Psi_{wt} - \Psi_0)} \right),$$

όταν $V_g + V_{wt,ref} \cdot \cos(\Psi_{wt} - \Psi_0) \geq 0$ (3.11)

$$\Psi_{wr,ref} = \left(\frac{V_{wt,ref} \cdot \sin(\Psi_{wt} - \Psi_0)}{V_g + V_{wt,ref} \cdot \cos(\Psi_{wt} - \Psi_0)} \right) + 180,$$

όταν $V_g + V_{wt,ref} \cdot \cos(\Psi_{wt} - \Psi_0) < 0$ (3.12)

3.1.1 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΑΝΕΜΟΥ (ΜΕΘΟΔΟΣ FUJIWARA)

Ο υπολογισμός του συντελεστή αντίστασης ανέμου, πραγματοποιείται βάση της μεθόδου Fujiwara, η οποία προέκυψε από πειράματα αεροσήραγγας, όπως αυτή αναλύεται στο παράρτημα F.3 της ITTC - 2021 [6], από το οποίο λαμβάνεται ο παρακάτω τύπος:

$$C_{DA} = C_{LF} \cos \psi_{wr} + C_{XLI} \left(\sin \psi_{wr} - \frac{1}{2} \sin \psi_{wr} \cos^2 \psi_{wr} \right) \sin \psi_{wr} \cos \psi_{wr} + C_{ALF} \sin \psi_{wr} \cos^3 \psi_{wr} \quad (3.13)$$

Όπου:

Για $0 \leq \psi_{wr} < 90^\circ$,

$$C_{LF} = \beta_{10} + \beta_{11} \frac{A_{YV}}{L_{OA} B} + \beta_{12} \frac{C_{MC}}{L_{OA}} \quad (3.14)$$

$$C_{XLI} = \delta_{10} + \delta_{11} \frac{A_{YV}}{L_{OA} h_{BR}} + \delta_{12} \frac{A_{XV}}{B h_{BR}} \quad (3.15)$$

$$C_{ALF} = \varepsilon_{10} + \varepsilon_{11} \frac{A_{OD}}{A_{YV}} + \varepsilon_{12} \frac{B}{L_{OA}} \quad (3.16)$$

Για $90 < \psi_{wr} \leq 180^\circ$,

$$C_{LF} = \beta_{20} + \beta_{21} \frac{B}{L_{OA}} + \beta_{22} \frac{h_C}{L_{OA}} + \beta_{23} \frac{A_{OD}}{L_{OA}^2} + \beta_{24} \frac{A_{XV}}{B^2} \quad (3.17)$$

$$C_{XLI} = \delta_{20} + \delta_{21} \frac{A_{YV}}{L_{OA} h_{BR}} + \delta_{22} \frac{A_{XV}}{A_{YV}} + \delta_{23} \frac{B}{L_{OA}} + \delta_{24} \frac{A_{XV}}{B h_{BR}} \quad (3.18)$$

$$C_{ALF} = \varepsilon_{20} + \varepsilon_{21} \frac{A_{OD}}{A_{YV}} \quad (3.19)$$

Για $\psi_{wr} = 90^\circ$,

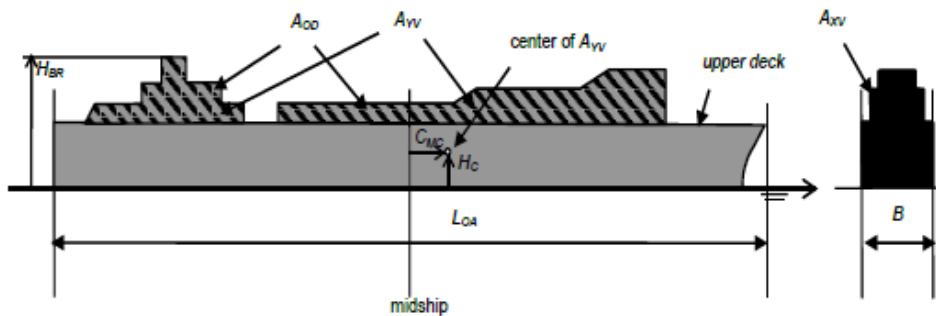
$$C_{DA, \psi_{wr}=90^\circ} = \frac{1}{2} (C_{DA, \psi_{wr}=90^\circ - \mu} + C_{DA, \psi_{wr}=90^\circ + \mu}) \quad (3.20)$$

Όπου,

- A_{OD} : η πλευρική προβεβλημένη επιφάνεια των υπερκατασκευών
- A_{XV} : η επιφάνεια της μέγιστης εγκάρσιας όψης που είναι εκτεθειμένη στον άνεμο
- A_{YV} : η πλευρική προβεβλημένη επιφάνεια πάνω από την ίσαλο πλεύσης
- B : το πλάτος του πλοίου
- C_{DA} : συντελεστής αντίστασης ανέμου
- C_{MC} : οριζόντια απόσταση από τη μέση τομή μέχρι το κέντρο της επιφάνειας A_{YV}
- h_{BR} : η κατακόρυφη απόσταση από την κορυφή των υπερκατασκευών μέχρι την ίσαλο πλεύσης
- h_C : η κατακόρυφη απόσταση από την ίσαλο πλεύσης μέχρι το κέντρο της επιφάνειας A_{YV}
- L_{OA} : το ολικό μήκος του πλοίου
- μ : εύρος εξομάλυνσης, λαμβάνεται ίσο με 10°
- ψ_{WR} : η σχετική κατεύθυνση του ανέμου
- $\beta, \delta, \varepsilon$: αδιάστατοι συντελεστές, οι τιμές των οποίων λαμβάνονται από τον παρακάτω πίνακα όπως λήφθηκε από την ITTC – 2021 [6]:

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

Πίνακας 3.1 Αδιάστατοι Συντελεστές [8]



Εικόνα 3.3 Σχηματική απεικόνιση παραμέτρων μεθόδου Fujiwara [8]

Τελικά η πρόσθετη αντίσταση κυματισμού προκύπτει από τη σχέση:

$$R_{AA} = \frac{1}{2} \rho_{\alpha} V_{WR}^2 A_{XV} C_{DA} (\Psi_{wr,ref}) - \frac{1}{2} \rho_{\alpha} V_g^2 A_{XV} C_{DA} (0) \quad (3.21)$$

με ρ_{α} την πυκνότητα του αέρα και λαμβάνεται ίση με $\rho_{\alpha}=1.192 \text{ kg/m}^3$

Στα υπό μελέτη πλοία παρουσιάζονται τρεις καταστάσεις φόρτωσης βάση του μέσου βυθίσματος των πλοίων σε κάθε μετρούμενη χρονική στιγμή, οι Ballast, Design και Scantling.

Για βύθισμα με απόκλιση έως 10% από κάποια από τις παραπάνω τιμές χρησιμοποιείται η αντίστοιχη τιμή αναφοράς.

Για τους υπολογισμούς των επιφανειών και των κατακόρυφων και οριζόντιων αποστάσεων που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο Fujiwara, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις και χρησιμοποιήθηκαν και τιμές απευθείας από το General Arrangement Plan.

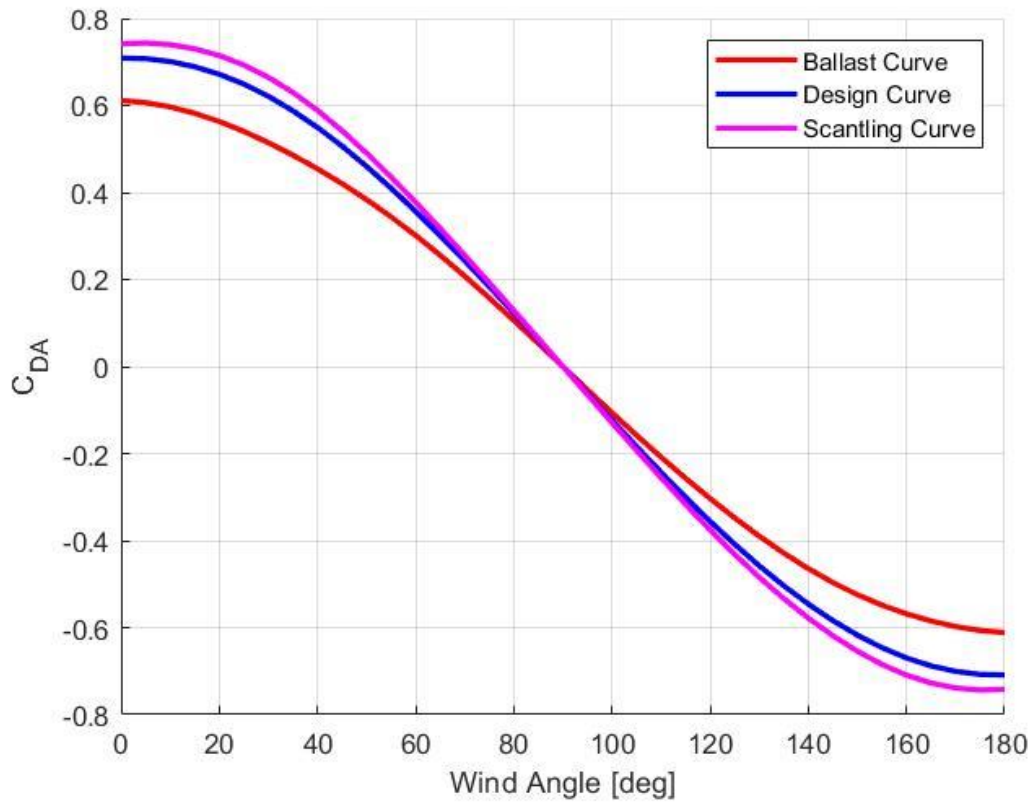
Συγκεκριμένα το General Arrangement Plan εισάχθηκε σε αρχείο AutoCAD και βρέθηκαν τα αντίστοιχα στοιχεία εμβαδού, κέντρου επιφάνειας κλπ.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα στοιχεία που υπολογίστηκαν για τη μέθοδο:

	BALLAST		DESIGN		SCANTLING	
$A_{OD} [m^2]$	405.75		405.75		405.75	
$A_{XV} [m^2]$	841.02		662.23		600.96	
$A_{YV} [m^2]$	3165.11		2112.18		1739.79	
$C_{MC} [m]$	9.556		7.39		6.87	
$h_{BR} [m]$	29.136		23.6		21.7	
$h_c [m]$	-5.63		-8.99		-10.54	
ANGLE	[0°,90°]	(90°,180°]	[0°,90°]	(90°,180°]	[0°,90°]	(90°,180°]
C_{LF}	0.612	1.425	0.709	1.544	0.742	1.606
C_{XLI}	-0.230	0.243	-0.097	0.172	-0.046	-0.209
C_{ALF}	0.168	0.457	0.226	0.529	0.263	0.575

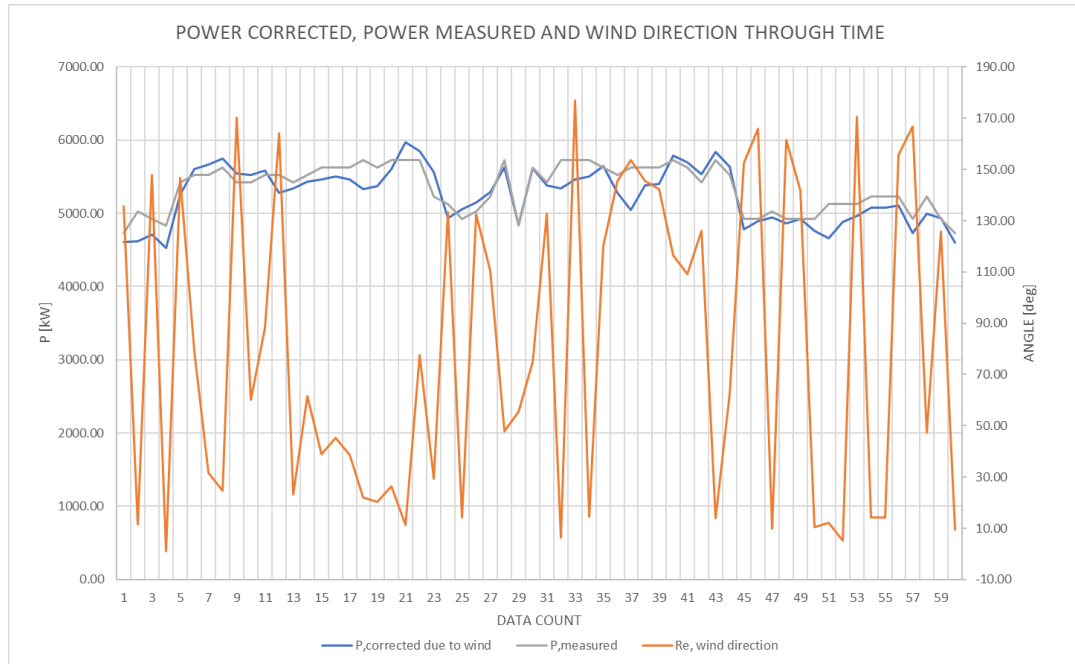
Πίνακας 3.2 Συγκεντρωτικά στοιχεία παραμέτρων για τη μέθοδο Fujiwara

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται οι τιμές των τελικών συντελεστών ανέμου C_{DA} για κάθε τιμή γωνίας πρόσπτωσης του ανέμου. Ο μετωπικός άνεμος καθορίζεται στις 0°



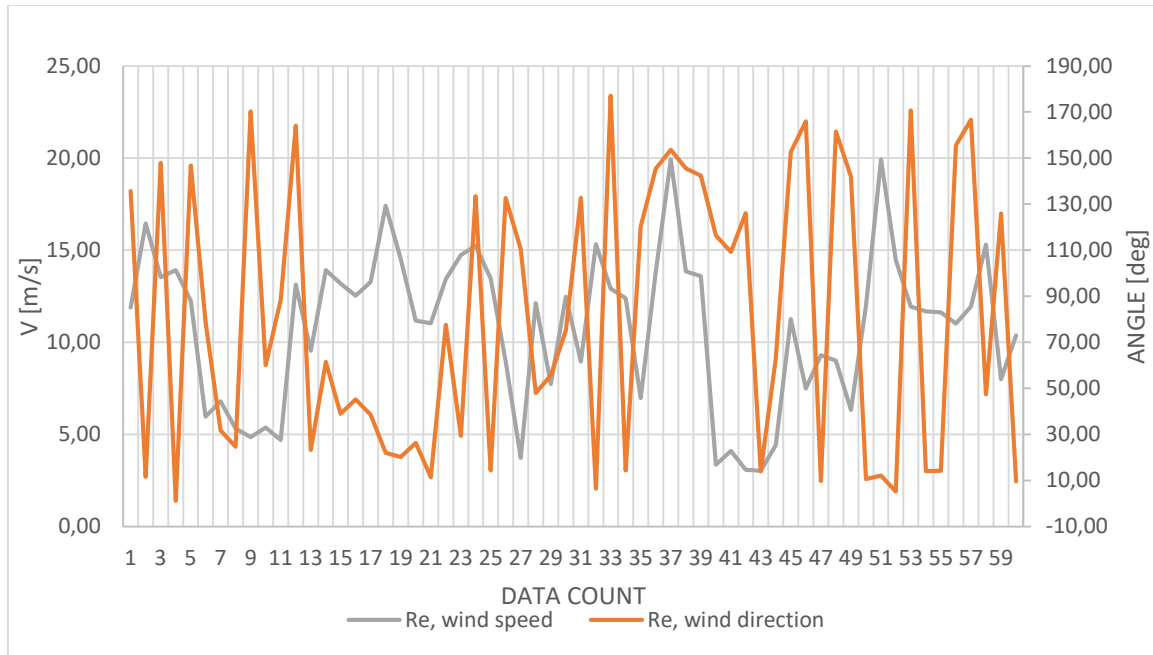
Διάγραμμα 3.1 Κατανομή συντελεστή C_{DA} για γωνίες πρόσπτωσης $[0^\circ, 180^\circ]$ - Καταστάσεις Ballast, Design & Scantling

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η σχηματική απεικόνιση της μεταβολής της αρχικής ισχύος λόγω της επίδρασης του ανέμου για το Πλοίο 1.



Διάγραμμα 3.2 Επίδραση ανέμου στην Ισχύ

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η σχηματική απεικόνιση του ανέμου ως προς την ταχύτητα και την ένταση για το ίδιο χρονικό διάστημα που αναφέρεται και το παραπάνω Διάγραμμα 6.2 για το Πλοίο 1.



Διάγραμμα 3.3 Μεταβολή ταχύτητας και κατεύθυνσης του ανέμου

3.2 ΠΡΟΣΘΕΤΗ ΑΝΤΙΤΑΣΗ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥ

Για τον υπολογισμό της πρόσθετης αντίστασης κυματισμού, γίνεται χρήση δύο μεθόδων. Αρχικά υπολογίζεται με τη μέθοδο STAWAVE-1, και στη συνέχεια με μια δεύτερη μέθοδο, τη STAWAVE-2. Και οι δύο μέθοδοι περιγράφονται στην ΙΤΤC – 2021 [6]. Η βασική διαφορά των δύο αυτών υπολογισμών είναι το μέγεθος των κινήσεων του πλοίου που προκαλούνται λόγω των μετωπικών κυματισμών που επιδρούν στο πλοίο.

3.2.1 ΠΡΟΣΘΕΤΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥ (STAWAVE-1)

Η πρώτη μέθοδος αφορά σε ήρεμες καταστάσεις θάλασσας και περιορισμένα ύψη κύματος. Για μικρού ύψους κύματα, η συχνότητα συνάντησης είναι μεγάλη με αποτέλεσμα να προκαλεί αμελητέες πρόσθετες κινήσεις στο πλοίο. Ως αποτέλεσμα η πρόσθετη αντίσταση του πλοίου κατά την εφαρμογή αυτής της θεωρίας, προκύπτει κυρίως από την ανάκλαση των κυμάτων στην γάστρα του πλοίου, και η σχέση υπολογισμού παρουσιάζεται παρακάτω:

$$R_{AWL} = \frac{1}{16} \rho_s g H_{W1/3}^2 B \sqrt{\frac{B}{L_{BWL}}} \quad (3.22)$$

Όπου,

B : πλάτος πλοίου σε [m]

ρ_s : πυκνότητα νερού σε [kg/m³]

g : επιτάχυνση της βαρύτητας σε [m/s²]

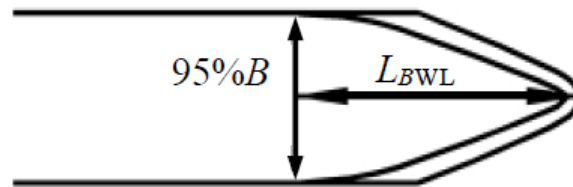
$H_{W1/3}$: σημαντικό ύψος κύματος λόγω ανέμου σε [m]

L_{BWL} : το μήκος του πλοίου μετρημένο από την πλώρη μέχρι το σημείο που αντιστοιχεί στο 95% του μέγιστου πλάτους στην ίσαλο πλευσης του πλοίου σε [m]

Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε περιπτώσεις στις ακόλουθες περιπτώσεις:

- για κατακόρυφη επιτάχυνση στην περιοχή της πλώρης που δεν ξεπερνάει το 0.05g
- για κατεύθυνση των κυματισμών στην περιοχή της πλώρης που λαμβάνουν τιμές $[-45^\circ, +45^\circ]$
- Το σημαντικό ύψος κύματος πρέπει να είναι μικρότερο από την παρακάτω τιμή

$$H_{w1/3} \leq 1.5 * \sqrt{\frac{LBP}{100}} \quad (3.23)$$



Εικόνα 3.4 Μήκος L_{BWL} (ITTC - 2021) [6]

3.2.2 ΠΡΟΣΘΕΤΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥ (STAWAVE-2)

Η δεύτερη μέθοδος, υπολογίζει την αντίσταση κυματισμού συνυπολογίζοντας τις κινήσεις στις οποίες υπόκειται το πλοίο κατά τη διάρκεια της πλευσης του μέσω της συνάρτησης μεταφοράς της μέσης πρόσθετης αντίστασης σε συμμετρικούς μετωπικούς κυματισμούς, βάση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του πλοίου. Η αντίσταση χωρίζεται σε δύο συνιστώσες, την πρώτη που αφορά στην ανάκλαση των κυμάτων στην πλώρη του πλοίου, R_{AWRL} , και στη δεύτερη που αποτελεί την επαγόμενη αντίσταση από την κίνηση του κυματισμού, R_{AWML} . Συνολικά η αντίσταση κυματισμού δίνεται από το άθροισμα:

$$R_{wave} = R_{AWRL} + R_{AWML} \quad (3.24)$$

Παρακάτω δίνονται οι σχέσεις για τον αναλυτικό υπολογισμό των δύο παραπάνω όρων

Πρώτος όρος:

$$R_{AWRL} = \frac{1}{2} \cdot \rho_s \cdot g \cdot \zeta_A^2 \cdot B \cdot \alpha_1(\omega) \quad (3.25)$$

$$\alpha_1(\omega) = \frac{\pi^2 \cdot I_1^2 \cdot (1.5 \cdot k \cdot T_M)}{\pi^2 \cdot I_1^2 \cdot (1.5 \cdot k \cdot T_M) + K_1^2 (1.5 \cdot k \cdot T_M)} f_1 \quad (3.26)$$

$$f_1 = 0.692 \cdot \left(\frac{V_S}{\sqrt{T_M \cdot g}} \right)^{0.769} + 1.81 \cdot C_B \quad (3.27)$$

Δεύτερος όρος:

$$R_{AWML} = \frac{4 \cdot \rho_s \cdot g \cdot \zeta_A^2 \cdot B^2}{L_{PP} \cdot \bar{r}_{aw}(\omega)} \quad (3.28)$$

$$\bar{r}_{aw}(\omega) = \bar{\omega}^{b_1} \cdot \exp\left[\frac{b_1}{d_1} \cdot (1 - \bar{\omega}^{b_1})\right] \cdot \alpha_1 \cdot Fr^{1.50} \cdot \exp(-3.50 \cdot Fr) \quad (3.29)$$

$$\bar{\omega} = \frac{\sqrt{\frac{L_{PP}}{g}} \cdot \sqrt[3]{k_{yy}}}{1.17 \cdot Fr^{-0.143}} \cdot \omega \quad (3.30)$$

$$\alpha_1 = 60.3 \cdot C_B^{1.34} \quad (3.31)$$

$$b_1 = \begin{cases} 11.0 & , \bar{\omega} < 1 \\ -8.50 & , \text{αλλιως} \end{cases} \quad (3.32)$$

$$d_1 = \begin{cases} 14.0 & , \bar{\omega} < 1 \\ -566 \cdot \left(\frac{L_{PP}}{B}\right)^{-2.66} & , \text{αλλιως} \end{cases} \quad (3.33)$$

Όπου,

ρ_s : η πυκνότητα του νερού στην πραγματική θερμοκρασία και περιεκτικότητα σε αλάτι [kg/m^3]

L_{PP} : το μήκος του πλοίου [m]

g : η επιτάχυνση της βαρύτητας [m/s^2]

ζ_a : το πλάτος του κύματος [m]

B : το πλάτος του πλοίου

I_1 : τροποποιημένη συνάρτηση Bessel πρώτης τάξης με όρισμα το 1

K_1 : τροποποιημένη συνάρτηση Bessel δεύτερης τάξης με όρισμα το 1

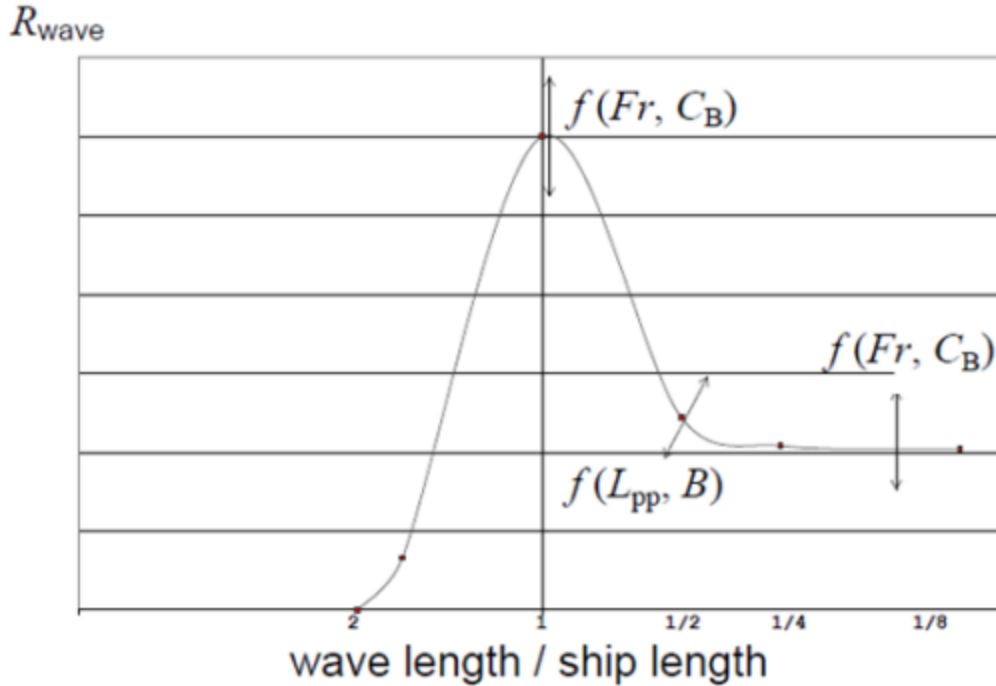
T_M : το βύθισμα στο μέσο του πλοίου [m]

C_B : ο συντελεστής εκτοπίσματος του πλοίου

k_{yy} : αδιάστατος συντελεστής της ακτίνας περιστροφής στην εγκάρσια κατεύθυνση

ω : γωνιακή συχνότητα κυματισμού.

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η καμπύλη της συνάρτησης μεταφοράς, το οριζόντιο κομμάτι της οποίας αποτελεί την αντίσταση λόγω ανάκλασης ενώ το υπόλοιπο τμήμα από την αντίσταση κίνησης του κυματισμού



Διάγραμμα 3.4 Γραφική απεικόνιση πρόσθετης αντίστασης κυματισμού Stawave-2 (ITTC - 2021) [8]

Για την εφαρμογή της μεθόδου αυτής, υπάρχουν οι εξής περιορισμοί:

- $50 \text{ m} < L_{pp} < 400 \text{ m}$
- $4.0 < L_{pp}/B < 9.0$
- $2.2 < B/TM < 9.0$
- $0.1 < Fr < 0.30$
- $0.39 < CB < 0.90$

Κατεύθυνση κυματισμών μεταξύ 0 και $\pm 45^\circ$ από την πλώρη

Για τη μέση πρόσθετη αντίσταση σε τυχαίους κυματισμούς η μέθοδος Stawave-2 βρίσκει εφαρμογή μέσω της εξής σχέσης:

$$R_{AWL} = 2 \int_0^\infty \frac{R_{wave}(\omega; Vs)}{\zeta_A^2} S_\eta(\omega) d\omega \quad (3.34)$$

Όπου S , το κυματικό φάσμα κατά Jonswar, το οποίο περιγράφεται από την επόμενη σχέση και χρησιμοποιείται για ανοιχτές θάλασσες σε κατάσταση κυματισμού.

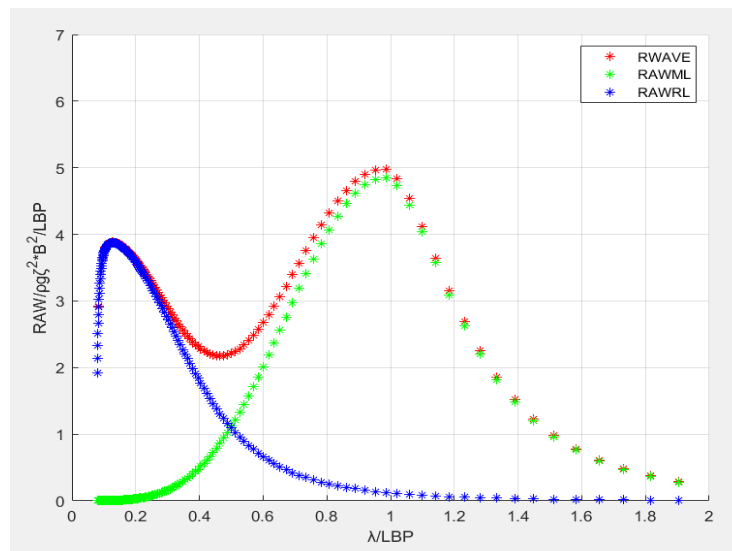
$$S(\omega) = \frac{a'' * H_S^2}{\omega_p^{-4}} * \exp\left[\frac{-5}{4} \left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{-4}\right] \gamma \exp\left[\frac{-(\omega - \omega_p)^2}{2\sigma^2 \omega_p^2}\right] \quad (3.35)$$

$$a'' = \frac{0.0624}{0.23 + 0.0336\gamma - 0.185/(1.9 + \gamma)} \quad (3.36)$$

Ο υπολογισμός της R_{AWL} ελέγχεται για την περίοδο κορυφής για διάστημα από 7 έως 15s. Στο διάστημα αυτό και ενδιάμεσο βήμα 0.05s υπολογίζεται η χρονική στιγμή εκείνη της περιόδου κορυφής στην οποία η τιμή RAWL μεγιστοποιείται. Η κατανομή αυτή παρουσιάζεται σχηματικά παρακάτω.

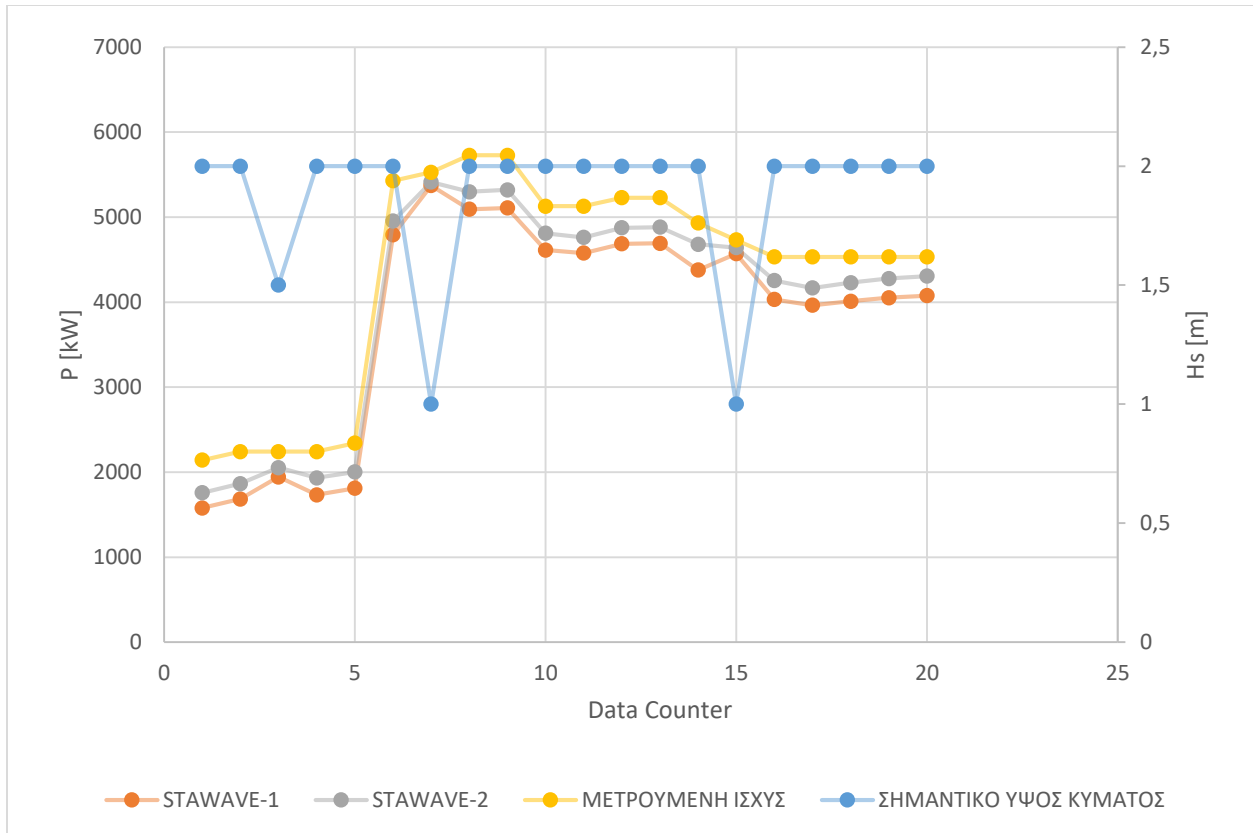
Στη συνέχεια για το σημείο αυτό, επιλέγεται εύρος γωνιακής ταχύτητας από 0.05 έως 2.01 rad/s με ενδιάμεσο βήμα 0.01. Για κάθε μία από αυτές τις τιμές, υπολογίζεται η R_{wave} και το κυματικό φάσμα όπως αυτά αναλύθηκαν παραπάνω, και προκύπτει η τελική τιμή της αντίστασης RAWL που θα χρησιμοποιηθεί εν τέλει για τη διόρθωση κυματισμού.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται σε αδιαστατοποιημένη μορφή η response function της συγκεκριμένης μεθόδου, η οποία αποτελεί μια εμπειρική συνάρτηση μεταφοράς που καλύπτει τόσο την μέση αύξηση της αντίστασης λόγω της ανάκλασης των κυμάτων αλλά και της αντίσταση που επάγεται από την κίνηση του πλοίου [8].



Διάγραμμα 3.5 Response Function

Στη συνέχεια παρουσιάζονται σχηματικά τα αποτελέσματα της επίδρασης κυματισμού και των δύο μεθόδων, ενδεικτικά για το Πλοίο 1 και για ένα πραγματικό σύνολο αρχικών δεδομένων.



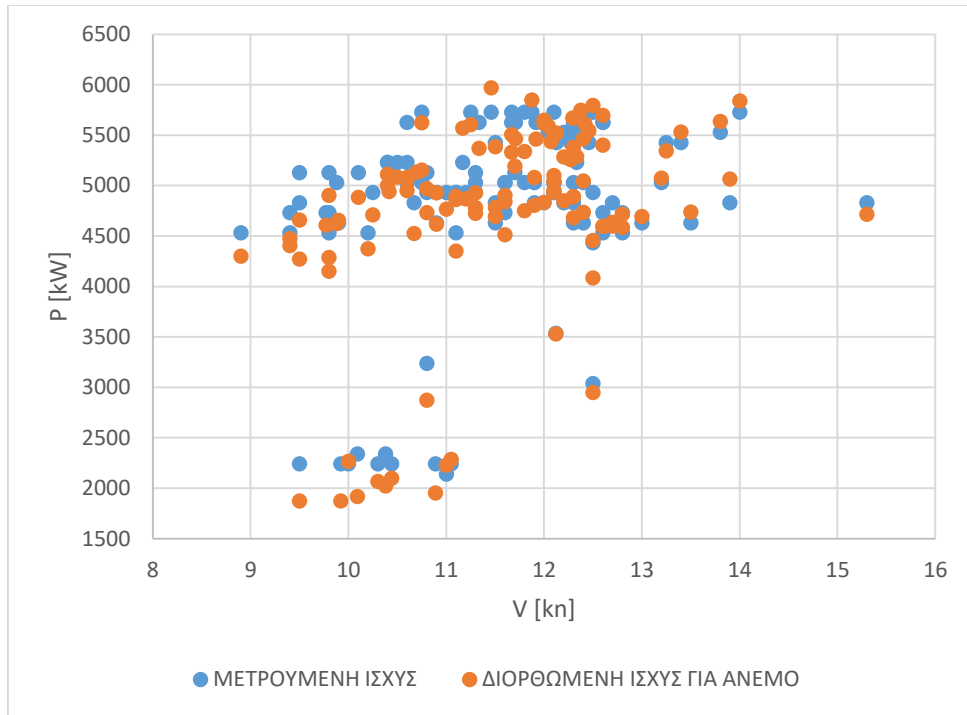
Διάγραμμα 3.6 Επίδραση Κυματισμού στην Ισχύ (Πλοίο 1)

Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζεται η μεταβολή της μετρούμενης ισχύος και της ισχύος όπως αυτή προέκυψε μετά τις STAWAVE-1 και STAWAVE-2 λόγω των κυματισμών συναρτήσει του σημαντικού ύψους κύματος. Το κύμα σε κάθε περίπτωση προκαλεί δυσμενή κατάσταση στο πλοίο. Από την άλλη πλευρά ο άνεμος σε ορισμένες περιπτώσεις δρα ευνοϊκά. Πιο συγκεκριμένα για μεγαλύτερα ύψη κύματος η μείωση της ισχύος είναι σημαντικά μεγαλύτερη από ότι σε χαμηλότερα ύψη.

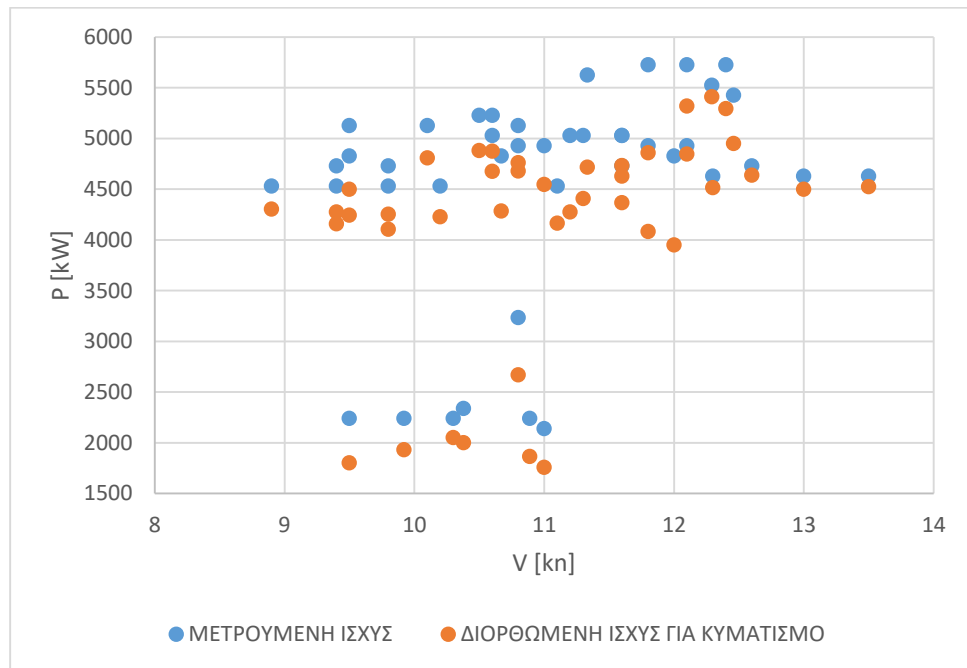
Τελικά, στους υπολογισμούς διατηρείται μόνο η συνιστώσα της αντίστασης κατά STAWAVE-2, και αυτό διότι έχει μεγαλύτερη ακρίβεια στους υπολογισμούς, αφού λαμβάνει υπόψιν στοιχεία σχεδίασης του πλοίου όπως ο αριθμός Froude καθώς και τις βασικές του διαστάσεις.

Από την άλλη πλευρά η STAWAVE-1 χρησιμοποιεί μόνο την γεωμετρία της ισάλου στην πλήρη.

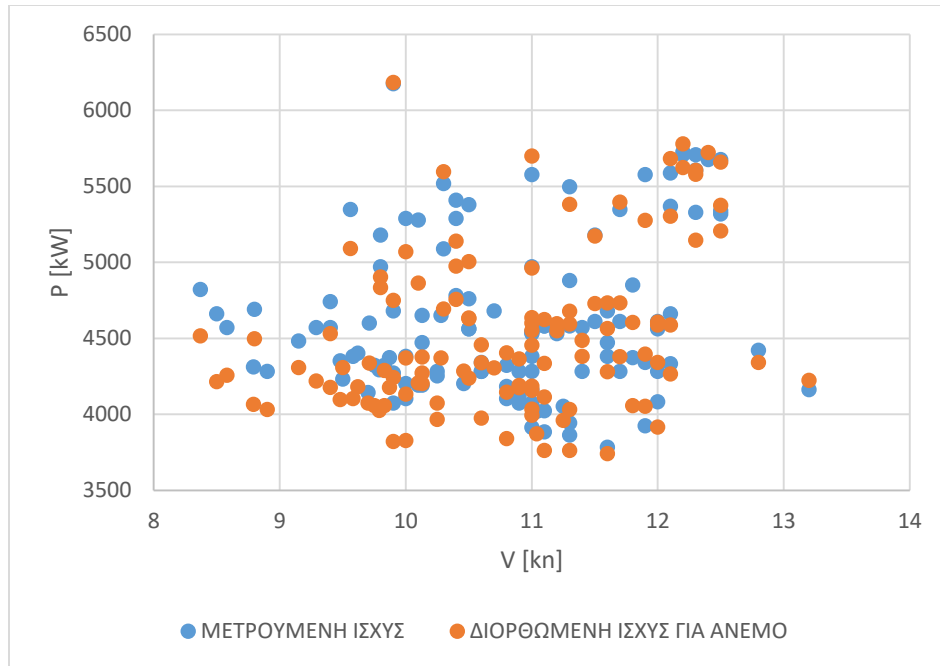
Στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζονται σημειακά για κάθε πλοίο τα διαγράμματα Ισχύος - Ταχύτητας πριν και μετά τις διορθώσεις για κύμα και άνεμο.



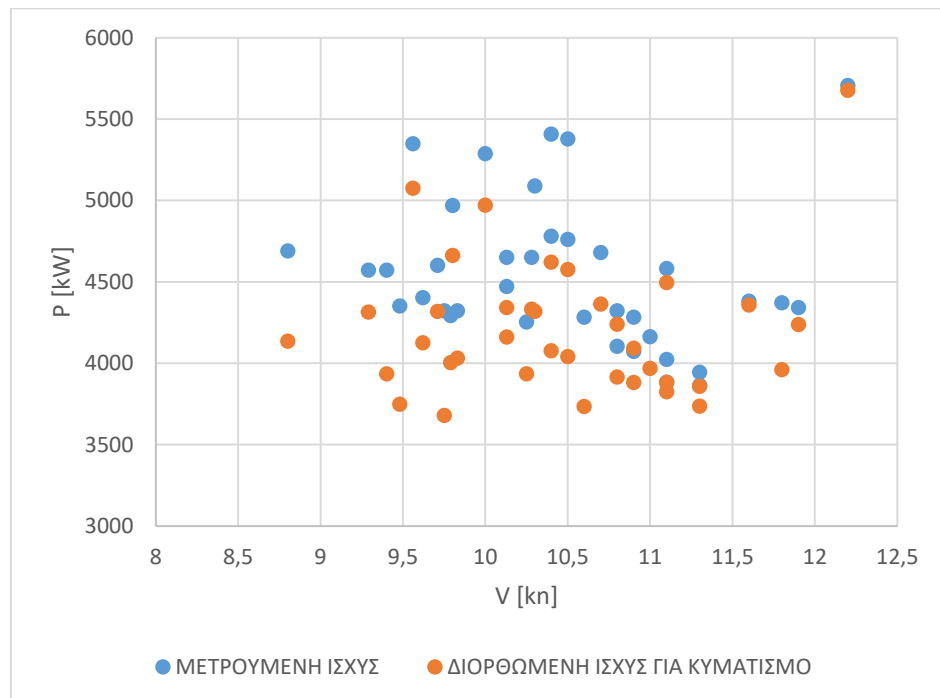
Διάγραμμα 3.7 Επίδραση ανέμου στη ισχύ (Πλοίο 1)



Διάγραμμα 3.8 Επίδραση κυματισμού στην ισχύ (Πλοίο 1)



Διάγραμμα 3.9 Επίδραση ανέμου στην ισχύ (Πλοίο 2)



Διάγραμμα 3.10 Επίδραση κυματισμού στην ισχύ (Πλοίο 2)

3.3 ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΙΣΧΥΟΣ

Στη συνέχεια, πριν την επεξεργασία των δεδομένων, πραγματοποιείται η κανονικοποίηση αυτών, για να διορθωθεί η ισχύς, έτσι ώστε τα δεδομένα να αναφέρονται όλα σε μια κοινή κατάσταση, δηλαδή αυτή του ερματισμού, σε κατάσταση που αντιστοιχεί στο βύθισμα σχεδίασης και αυτή της φορτωμένης κατάστασης του πλοίου με αναγωγή στα αντίστοιχα βυθίσματα που έχουν αναφερθεί παραπάνω.

Η κανονικοποίηση πραγματοποιείται βάση της παρακάτω σχέσης, και εφαρμόζεται μόνο σε όσα δεδομένα πληρούν τους περιορισμούς που έχουν αναφερθεί παραπάνω.

$$P = P_{ref} \left(\frac{\Delta_{act}}{\Delta_{ref}} \right)^{2/3} \quad (3.37)$$

Στην προκειμένη περίπτωση P_{ref} είναι η τελική διορθωμένη ισχύς ανέμου και κύματος, Δ_{ref} το εκάστοτε εκτόπισμα υπολογισμένο από το αρχικό σύνολο δεδομένων και Δ_{ref} το εκτόπισμα για τα βυθίσματα για $T_{Ballast}$, T_{Design} , $T_{Scantling}$ για το κάθε πλοίο αντίστοιχα.

Για ακρίβεια στα αποτελέσματα, ο συντελεστής μορφής που εμπεριέχεται στο εκτόπισμα του πλοίου, για την τιμή του Δ_{act} υπολογίζεται βάση της κάτωθι σχέσης:

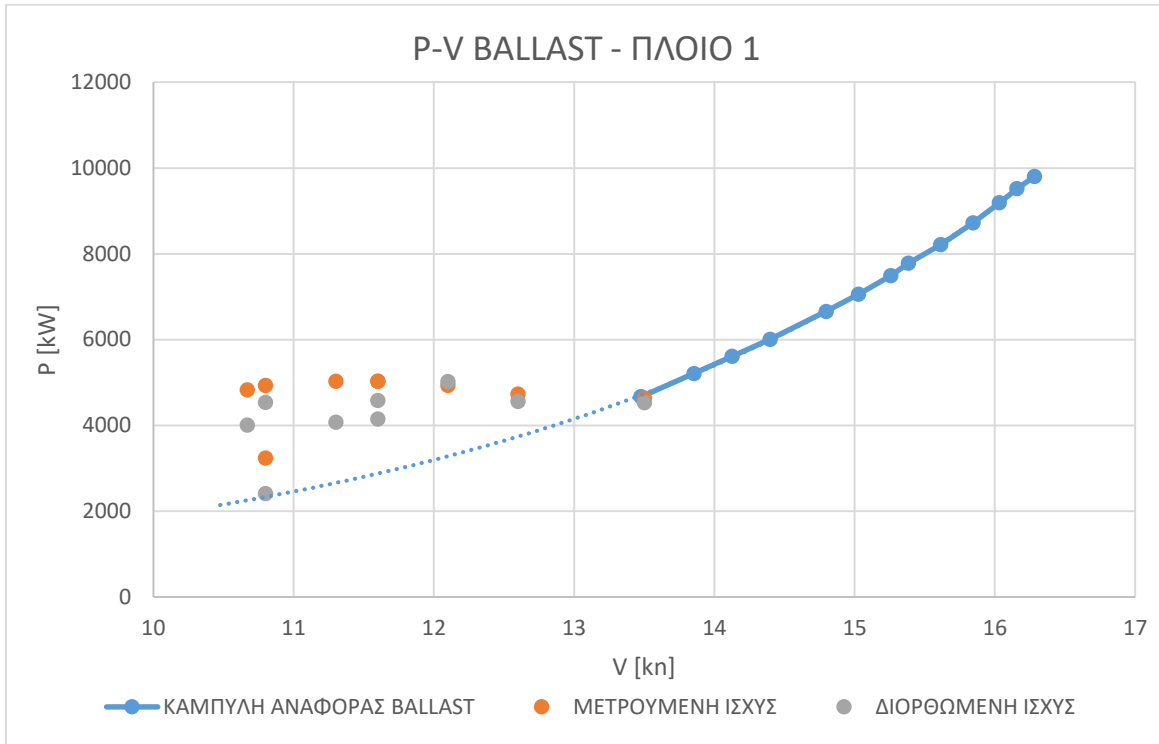
$$c_{B(act)} = 1 - (1 - c_{B(ref)}) \left(\frac{T_{d(ref)}}{T_{act}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.38)$$

Όπου $c_{B(act)}$, ο συντελεστής μορφής υπολογισμένος για κάθε βύθισμα αναφοράς (δύο πλοία, τρεις καταστάσεις φόρτωσης).

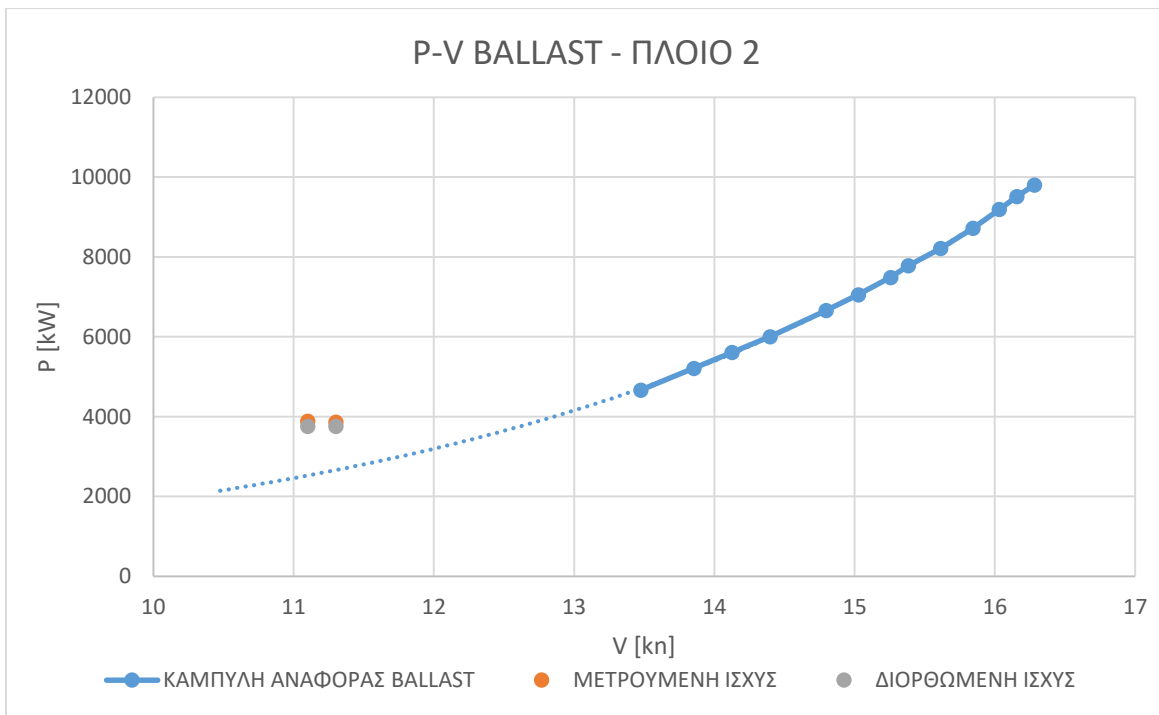
Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται οι αρχικές τιμές ισχύος με τις διορθωμένες για άνεμο, κύμα και κανονικοποίηση βυθίσματος αντίστοιχα, μαζί με τις καμπύλες αναφοράς για βυθίσματα $T_{Ballast}$, T_{Design} και $T_{Scantling}$ όπως αυτές έχουν αντληθεί από τα sea trials των δύο πλοίων.

Όπως παρατηρείται και στα παρακάτω διαγράμματα το εύρος των καμπυλών από τα sea trials είναι επί το πλείστο υψηλότερο από τα επιχειρησιακά δεδομένα που μελετήθηκαν. Επομένως έγινε προεκβολή των καμπυλών αυτών ώστε να φαίνεται σχηματικά η τιμή της μετρούμενης και της διορθωμένης ισχύος σε σχέση με την προβλεπόμενη ισχύ για αυτές τις ταχύτητες.

Βύθισμα Ballast (5.564 m):

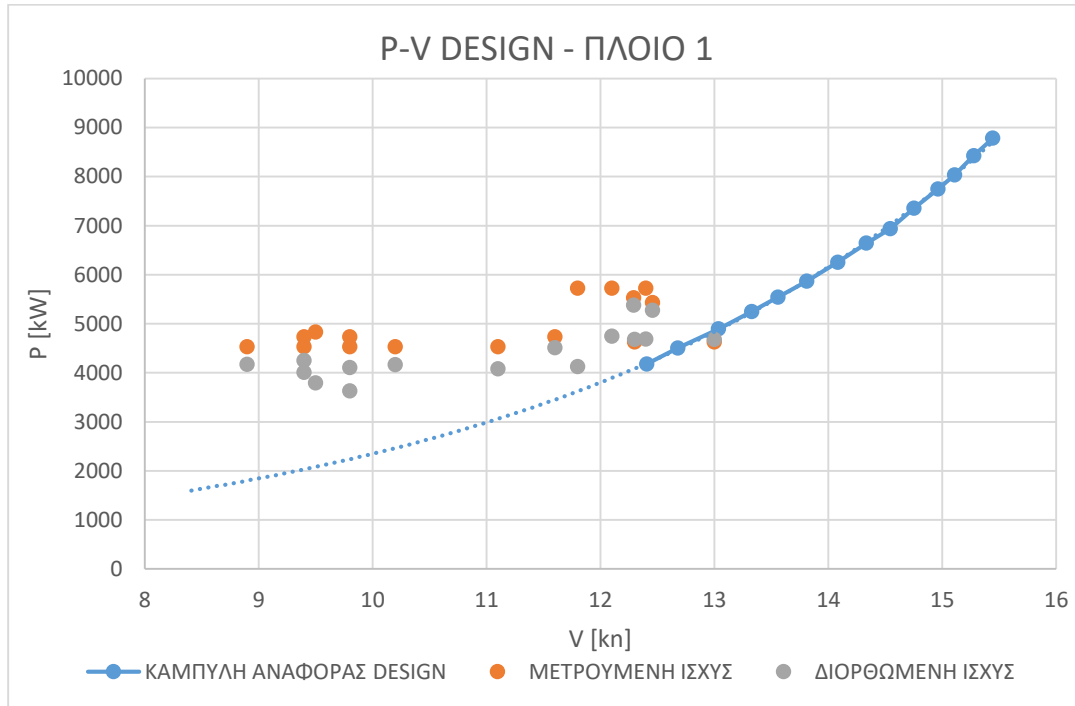


Διάγραμμα 3.11 Σύγκριση Κανονικοποιημένης με Αρχική Ισχύ (Κατάσταση Ballast) - Πλοίο 1

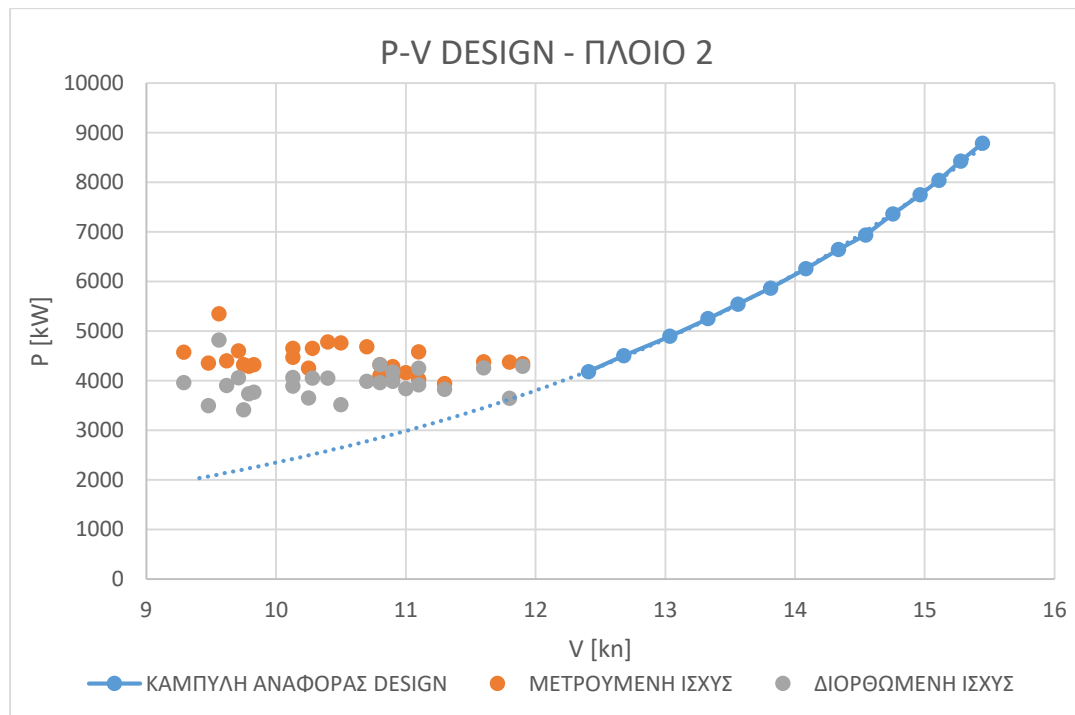


Διάγραμμα 3.12 Σύγκριση Κανονικοποιημένης με Αρχική Ισχύ (Κατάσταση Ballast) - Πλοίο 2

Βύθισμα Design (11.1 m):

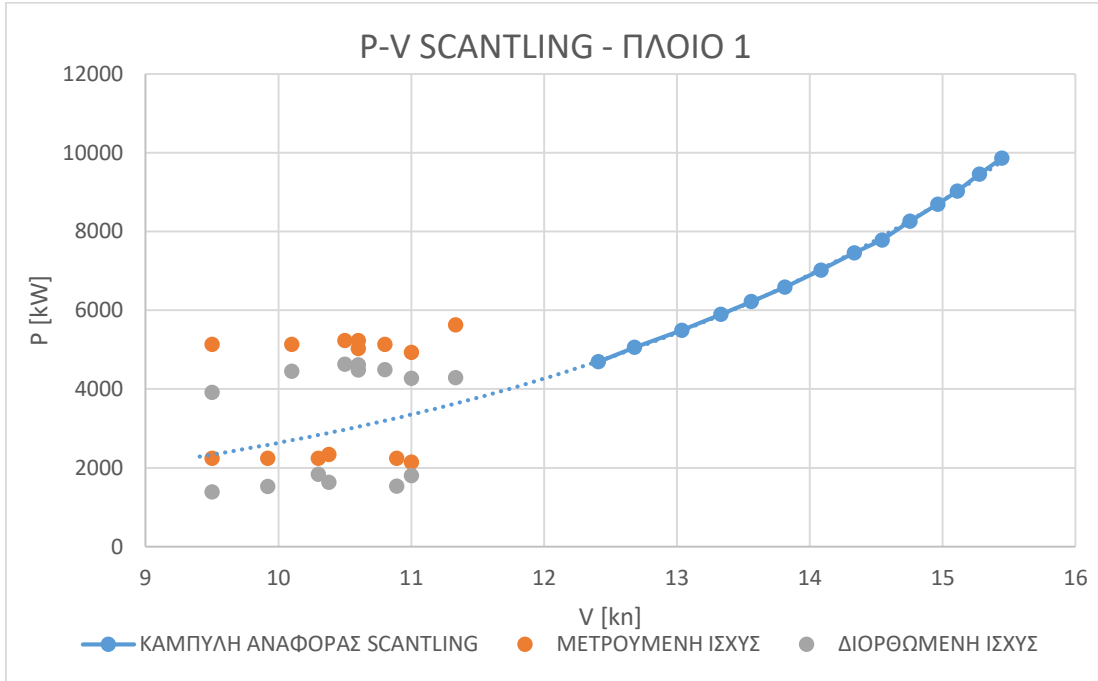


Διάγραμμα 3.13 Σύγκριση Κανονικοποιημένης με Αρχική Ισχύ (Κατάσταση Design) - Πλοίο 1

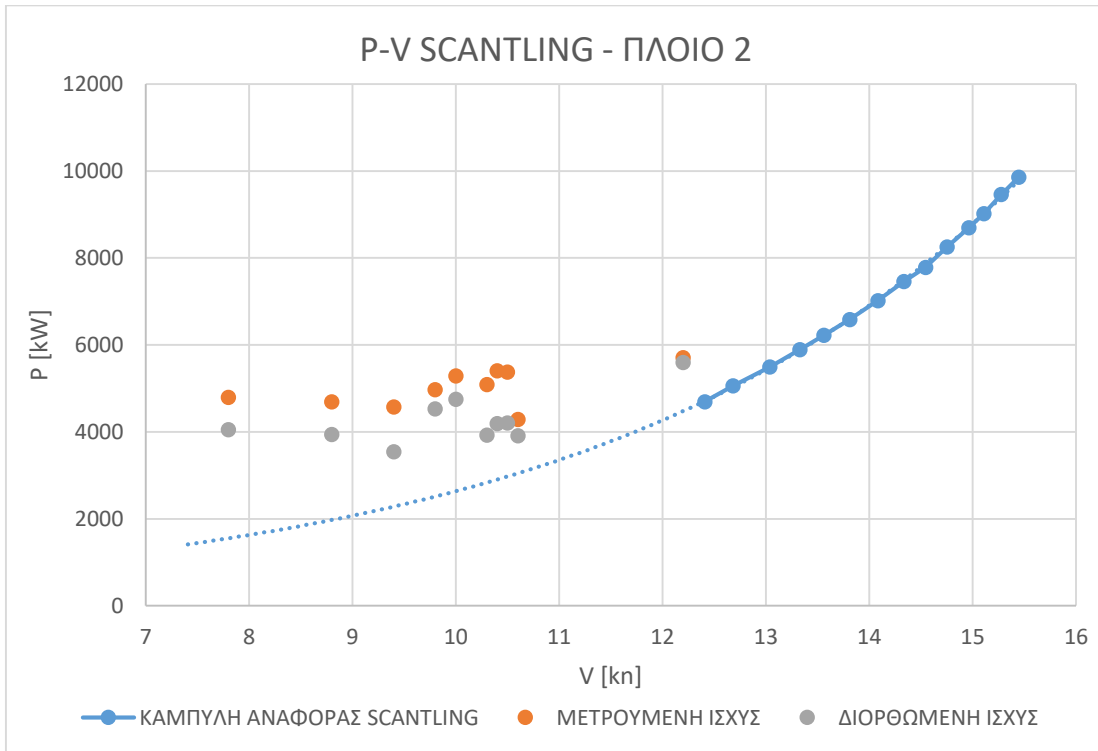


Διάγραμμα 3.14 Σύγκριση Κανονικοποιημένης με Αρχική Ισχύ (Κατάσταση Design) - Πλοίο 2

Βύθισμα Scantling (13 m):



Διάγραμμα 3.15 Σύγκριση Κανονικοποιημένης με Αρχική Ισχύ (Κατάσταση Scantling) - Πλοίο 1



Διάγραμμα 3.16 Σύγκριση Κανονικοποιημένης με Αρχική Ισχύ (Κατάσταση Scantling) - Πλοίο 2

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται το πλήθος των σημείων που έχουν διορθωθεί για κάθε κατάσταση φόρτωσης και για κάθε πλοίο.

	ΠΛΟΙΟ 1	ΠΛΟΙΟ 2
BALLAST	9	2
DESIGN	16	26
SCANTLING	14	10

Με βάση τον παραπάνω πίνακα συμπεραίνεται ότι για την κατάσταση ballast υπάρχουν λιγότερα στοιχεία σε σχέση με τις άλλες δυο καταστάσεις φόρτωσης και έτσι αυτές θεωρούνται πιο αξιόπιστες.

4 Μοντέλο Παλινδρόμησης

Η ανάλυση μέσω μοντέλου παλινδρόμησης αποτελεί μια διαδικασία για την εκτίμηση της σχέσης ανάμεσα σε μια εξαρτημένη μεταβλητή που αποτελεί την απόκριση του συστήματος και μία η περισσότερες εξαρτημένες μεταβλητές που αποτελούν τους δείκτες πρόβλεψης, όπως αναλύεται στις εργασίες Ζαλαχώρη [10] και Ξουρίδα [9], καθώς επίσης και από τις σημειώσεις του Πανεπιστημίου Πειραιά, κεφάλαιο 6 «Πολλαπλό Μοντέλο Γραμμικής Παλινδρόμησης» [13]. Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μια προσπάθεια να παραχθεί ένα μοντέλο πρόβλεψης της εξάρτησης της ισχύος του πλοίου (απόκριση) κάνοντας χρήση παραμέτρων που σχετίζονται με το ταξίδι δια θαλάσσης, δηλαδή της ταχύτητας του πλοίου, του βυθίσματος, της διαγωγής του και την επίδραση του κυματισμού και του ανέμου.

Επιλέγεται να γίνει χρήση ενός μοντέλου παλινδρόμησης για να γίνει η σύνδεση μεταξύ αυτών των μεγεθών. Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται, είναι αυτά που συγκεντρώθηκαν από τα Noon Reports.

4.1 Πολλαπλό μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης

Αρχικά, η σχέση μεταξύ της απόκρισης και των δεικτών πρόβλεψης ενός μοντέλου πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i,1} + \beta_2 x_{i,2} + \dots + \beta_p x_{i,p} + \varepsilon_i \quad (4.1)$$

Όπου,

y_i : η i -οστή τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής y

x_{ij} : η i -οστή τιμή της j -οστής ανεξάρτητης μεταβλητής x_j

β_0 : τεταγμένη (intercept) της παλινδρόμησης

β_j : κλίση (slope) της παλινδρόμησης

ε_i : ανεξάρτητη τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί κανονική κατανομή

Είναι προφανές ότι το μοντέλο βασίζεται στην υπόθεση ότι υπάρχει γραμμική σχέση ανάμεσα στην εξαρτημένη μεταβλητή y και τις ανεξάρτητες τιμές πρόβλεψης x . Η τεταγμένη β_0 αντιπροσωπεύει τη μέση απόκριση του συστήματος όταν όλες οι ανεξάρτητες τιμές x είναι ίσες με το μηδέν. Κάθε ένας από τους συντελεστές β αντιπροσωπεύει την αλλαγή στη μέση απόκριση του συστήματος ανά μονάδα αύξησης στην αντίστοιχη τιμή x όταν όλες οι άλλες τιμές παραμένουν σταθερές.

Η παραπάνω σχέση για τον υπολογισμό της γραμμικής παλινδρόμησης μπορεί να εκφραστεί και με τον παρακάτω τρόπο :

$$\hat{y}_i = b_0 + b_1 x_{i,1} + b_2 x_{i,2} + \dots + b_p x_{i,p} \quad (4.2)$$

Όπου:

y_i : η τιμή πρόβλεψης του i -οστού σημείου των εξαρτημένων δεδομένων

x_{ij} : η i -οστή τιμή της j -οστής ανεξάρτητης μεταβλητής x_j

b_0 : οι δειγματολογικές εκτιμήσεις των συντελεστών β_j που υπολογίζονται βάση των κάτωθι

Έστω σύστημα δύο μεταβλητών πρόβλεψης ενός μοντέλου γραμμικής παλινδρόμησης. Τότε το μοντέλο εκφράζεται ως

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i,1} + \beta_2 x_{i,2} + \varepsilon_i \quad (4.3)$$

Το οποίο μετατρέπεται σε μορφή πινάκων:

$$Y = X \cdot B + E \Rightarrow \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{i,1} & x_{i,2} \\ 1 & x_{i+1,1} & x_{i+1,2} \\ \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \dots \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \dots \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$$B = (X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T \cdot Y \hat{y}_i \quad (4.5)$$

Όπου X είναι οι ανεξάρτητες μεταβλητές και ονομάζεται πίνακας σχεδιασμού και Y είναι η παρατηρούμενη εξαρτημένη μεταβλητή.

Το υπολειπόμενο σφάλμα μπορεί να υπολογιστεί για κάθε σεντ τιμών ως:

$$e_i = y_i - \hat{y}_i \quad (4.6)$$

4.2 Βασικά Χαρακτηριστικά και Μεταβλητές

Στη συνέχεια ορίζονται και αναλύονται τα βασικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα των μοντέλων γραμμικής παλινδρόμησης καθώς και οι κύριες μεταβλητές οι οποίες το ορίζουν. Βάση των μεταβλητών αυτών θα πραγματοποιηθεί και η επιλογή του τελικού μοντέλου που θα χρησιμοποιηθεί τελικά για τη σύγκριση ανάμεσα στα δύο πλοία και την εξαγωγή των τελικών συμπερασμάτων.

4.2.1 Συντελεστής Προσδιορισμού

Ο συντελεστής προσδιορισμού που συμβολίζεται με R^2 είναι ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό του μοντέλου γραμμικής παλινδρόμησης και υποδηλώνει πόση από τη διακύμανση της απόκρισης μπορεί να εξηγηθεί από τη διακύμανση της ανεξάρτητης μεταβλητής. Με άλλα λόγια εξηγεί πόσα από τα υπό μελέτη δεδομένα εφάπτονται στην καμπύλη του μοντέλου παλινδρόμησης. Για παράδειγμα $R^2 = 80\%$ σημαίνει ότι το 80% της διακύμανσης των τιμών γύρω από τη μέση τιμή εξηγούνται από τις αντίστοιχες τιμές x, άρα το 80% βρίσκονται πάνω στην καμπύλη.

Έστω ότι y είναι η εξαρτημένη μεταβλητή και f η προσαρμοσμένη τιμή της υπολογισμένη από το μοντέλο παλινδρόμησης. Εάν \hat{y} είναι η μέση τιμή του y, το R^2 υπολογίζεται από τη σχέση:

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{RES}}{SS_{TOT}} \quad (4.7)$$

- $SS_{TOT} = \sum (y_i - \hat{y})^2$, το σύνολο των τετραγώνων των εξαρτημένων μεταβλητών
- $SS_{RES} = \sum (y_i - f_i)^2$, το υπόλοιπο σύνολο των τετραγώνων των εξαρτημένων μεταβλητών

Ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 λαμβάνει τιμές στο διάστημα $[0,1]$ το οποίο εκφράζει την προσαρμογή στο μοντέλο παλινδρόμησης κατά τρόπο:

- $R^2 = 0$ → Το μοντέλο προβλέπει πάντα τη μέση τιμή \hat{y} και η έκβαση δεν μπορεί να προβλεφθεί από καμία από τις ανεξάρτητες μεταβλητές
- $R^2 = 1$ → Το μοντέλο πάντα προβλέπει την τιμή y_i και δεν υπάρχουν υπόλοιπα, ενώ το αποτέλεσμα μπορεί να προβλεφθεί από τις ανεξάρτητες μεταβλητές χωρίς κανένα λάθος.

Όσο πιο πολλές μεταβλητές πρόβλεψης εισέρχονται στο μοντέλο, τόσο πιο πολύ τείνει η τιμή του R^2 στη μονάδα, χωρίς όμως αυτό να σημαίνει ότι τα αποτελέσματα θα είναι πιο ακριβή παρά την αύξηση του R^2 . Όσο πιο πολλές μεταβλητές πρόβλεψης εισάγονται στο μοντέλο, αυτό γίνεται υπερβολικά προσαρμοσμένο για να ταιριάξει στην απόκριση, γεγονός που σημαίνει ότι αυτό καθίσταται πολύ ευαίσθητο σε οποιαδήποτε τυχαία αλλαγή. Η υπέρ-προσαρμοστικότητα αυτή αποτελεί και το πιο συνηθισμένο πρόβλημα εφαρμογής πολλαπλού μοντέλου γραμμικής παλινδρόμησης. Όταν εισάγονται επιπλέον δεδομένα πρόβλεψης το R^2 υπολογίζεται μέσω της παρακάτω σχέσης έτσι ώστε να γίνει η σωστή ρύθμιση της λανθασμένης αυτής αύξησης της τιμής του.

$$R_{ADJ}^2 = 1 - (1 - R^2) \cdot \frac{n-1}{n-p-1} \quad (4.8)$$

- p , οι ανεξάρτητες μεταβλητές
- n , ο συνολικός αριθμός των δεδομένων

Τελικά ο προβλέψιμος συντελεστής R^2 υπολογίζεται:

$$R_{PRED}^2 = 1 - \frac{PRESS}{SS_{TOT}} \quad (4.9)$$

Όπου το άθροισμα τετραγώνων προγνωστικού υπολειπόμενου σφάλματος (Predictive Residual Error Sum of Squares, PRESS) υπολογίζεται ως το σύνολο των τετραγώνων όλων των λαθών των προβλέψεων που προκύπτουν.

4.2.2 Τυπική Απόκλιση

Η ανάλυση της παλινδρόμησης περιλαμβάνει τον υπολογισμό της τυπικής απόκλισης S της απόστασης ανάμεσα στις τιμές των δεδομένων (y) και τις προσαρμοσμένες τιμές (f) (τυπικό σφάλμα). Η τυπική απόκλιση S , υπολογίζεται στις μονάδες της απόκρισης του συστήματος

$$S = \sqrt{\frac{\sum_1^N (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (4.13)$$

Όπου $x = y - f$ και n το πλήθος των τιμών του παραδείγματος.

4.2.3 Τυπικό Σφάλμα Συντελεστή

Σε μοντέλο παλινδρόμησης το τυπικό σφάλμα συντελεστή (SE) υπολογίζεται για κάθε μεταβλητή πρόβλεψης x βάση της σχέσης:

$$SE = \frac{S}{\sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2}} \quad (4.14)$$

Όπου S η τυπική απόκλιση του μοντέλου.

Το τυπικό σφάλμα του μοντέλου είναι πάντα θετικό και υπολογίζει με πόση ακρίβεια το μοντέλο εκτιμάει την άγνωστη τιμή του συντελεστή. Όσο μικρότερο το τυπικό σφάλμα, τόσο ακριβέστερη η εκτίμηση.

4.3 Δημιουργία Μοντέλου Γραμμικής Παλινδρόμησης

Παρακάτω παρουσιάζονται οι προς εξέταση καταστάσεις της παρούσας εργασίας για κάθε πλοίο.

Οι μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι εξής:

- T : το μέσο βύθισμα μετρημένο σε μέτρα [m],
- $Trim$: η διαγωγή του πλοίου,
- V_s : η ταχύτητα του πλοίου μετρημένη σε κόμβους [kn].
- $V_{wind} \cdot \cos(DIR)$: η ταχύτητα του ανέμου πολλαπλασιασμένη με τα συνημίτονο της κατεύθυνσης αυτού.
- $H_s \cdot \cos(DIR)$: το σημαντικό ύψος κύματος πολλαπλασιασμένο με τα συνημίτονο της κατεύθυνσης αυτού.
- Η ισχύς του πλοίου υπολογίζεται σε [kW].

Πλοίο 1

$$P = 777.2 \cdot V_s - 28.4 \cdot T + 16.92 \cdot V_{wind} \cdot \cos(DIR) - 73.1 \cdot H_s \cdot \cos(DIR) - 158.7 \cdot trim - 27.28 V_s \cdot V_s$$

Όρος	Συντελεστής	Τιμή P	Τυπικό Σφάλμα
V_s	777.2	0	83.8 kn
T	-28.4	0.372	31.7 m
$V_{wind} \cdot \cos(DIR)$	16.92	0	4.11 kn
$H_s \cdot \cos(DIR)$	-73.1	0	27.5 m
$trim$	-158.7	0.081	90 m
$V_s \cdot V_s$	-27.28	0	4.97 kn ²

R^2	R^2 adj	Τυπικό Σφάλμα
99.62%	99.59%	328.172 kW

Πηγή	Βαθμοί Ελευθερίας	SS _{ADJ REG}	MS _{ADJ REG}
Παλινδρόμηση	6	2622915137	437152523
Υπόλοιπο	94	10123490	107697
Σύνολο	100	2633038628	

Πλοίο 2

$$P = 369 \cdot V_s + 88.5 \cdot T - 92.3 \cdot trim + 12.28 \cdot V_{wind} \cdot \cos(DIR) - 0.5 \cdot H_s \cdot \cos(DIR) - 4.56 V_s \cdot V_s$$

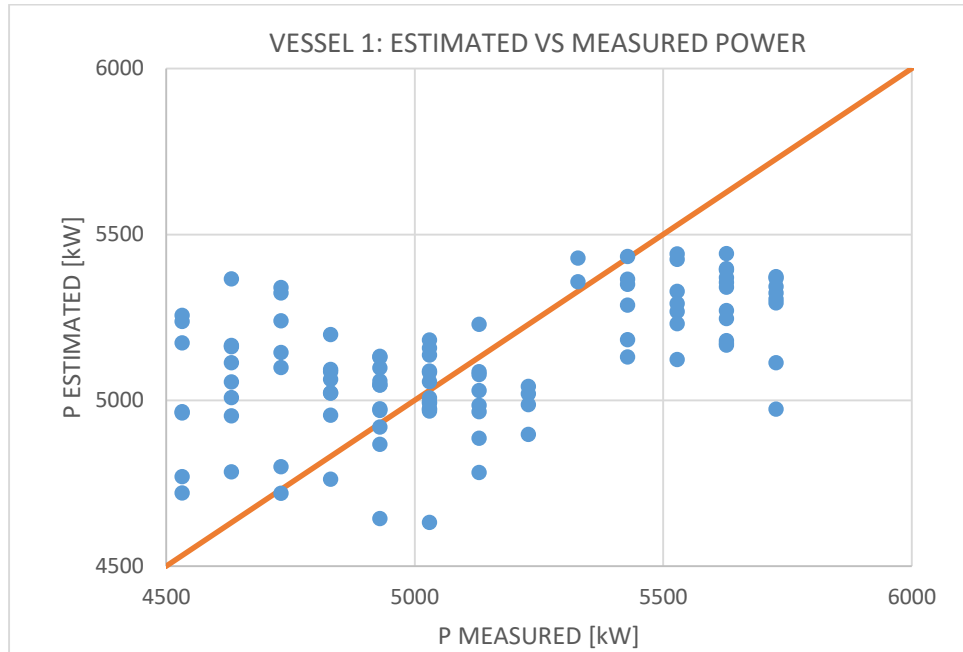
Όρος	Συντελεστής	Τιμή P	Τυπικό Σφάλμα
V _s	369	0.03	167 kn
T	88.5	0.195	67.7 m
trim	-92.3	0.256	80.5 m
V _{wind} ·cos(DIR)	12.28	0.002	3.83 kn
H _s ·cos(DIR)	-0.5	0.999	34.8 m
V _s ·V _s	-4.56	0.626	9.31 kn ²

R ²	R ² adj	Τυπικό Σφάλμα
99.18%	99.11%	434.816 kW

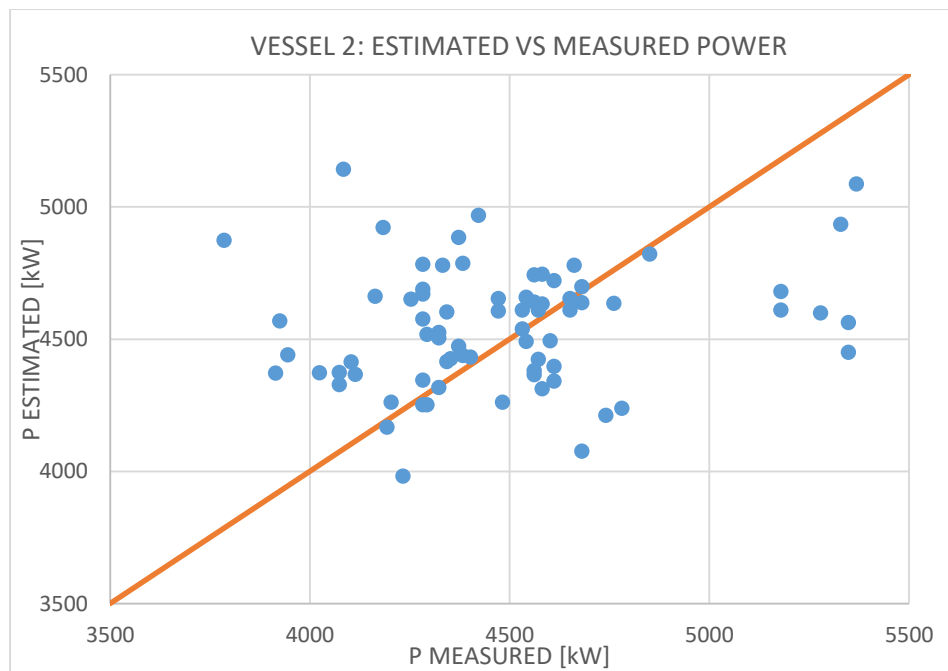
Πηγή	Βαθμοί Ελευθερίας	SS _{ADJ REG}	MS _{ADJ REG}
Παλινδρόμηση	6	1735893885	289315647
Υπόλοιπο	76	14368950	189065
Σύνολο	82	1750262834	

Παρακάτω παρουσιάζεται γραφικά η εφαρμογή του επιλεγμένου μοντέλου για κάθε πλοίο. Η τετμημένη των σημείων του διαγράμματος αντιστοιχεί στην ισχύ των δεδομένων, ενώ η τεταγμένη στην ισχύ που αναμένεται μέσω του μοντέλου.

Για να φανεί καλύτερα η εφαρμογή του μοντέλου, στα διαγράμματα συμπεριλαμβάνεται και η καμπύλη $y=x$ με πορτοκαλί χρώμα.



Διάγραμμα 4.1 Κατανομή Σημείων Παλινδρόμηση - Πλοίο 1

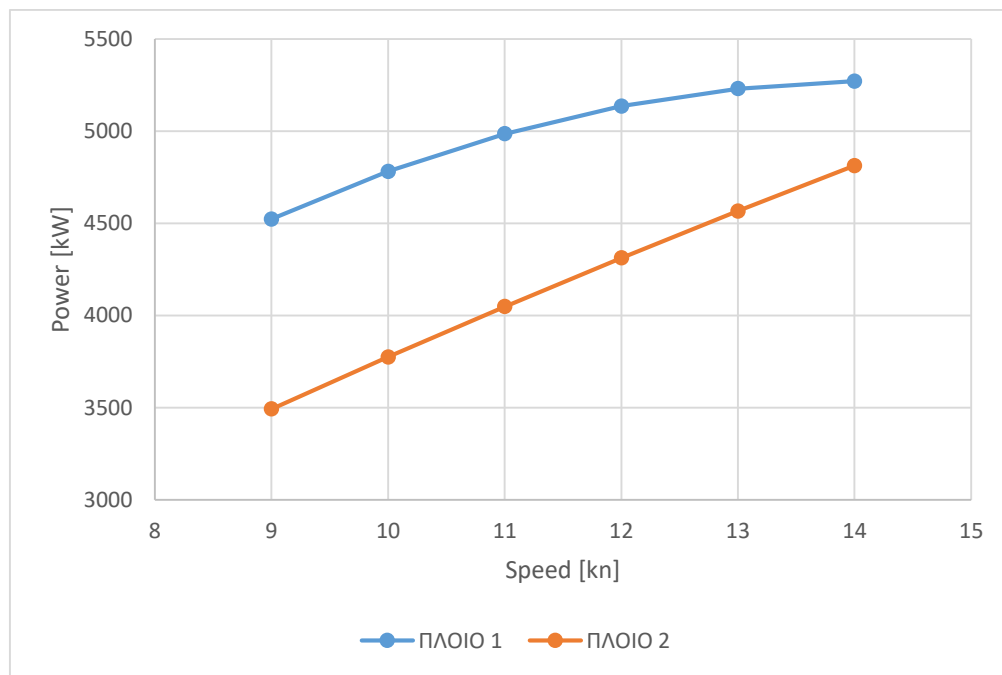


Διάγραμμα 4.2 Κατανομή Σημείων Παλινδρόμηση - Πλοίο 2

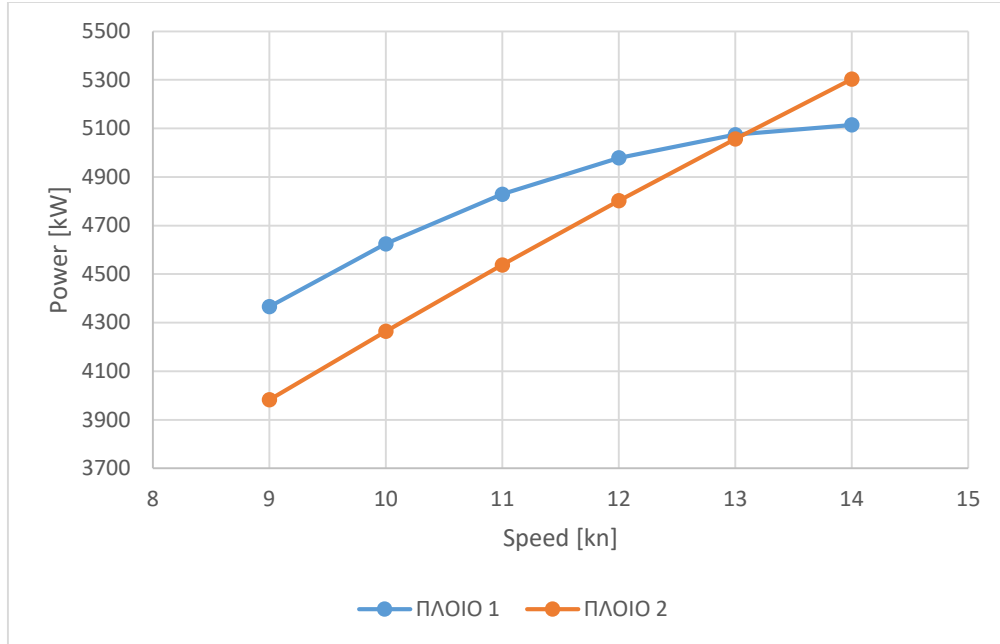
4.4 Τελική Σύγκριση

Κάνοντας χρήση του μοντέλου γραμμικής παλινδρόμησης που παράχθηκε σε προηγούμενη υπό-παράγραφο για κάθε πλοίο παράγονται διαγράμματα τα οποία δίνουν τη μεταβολή της ισχύος για ένα εύρος ταχυτήτων για τα βυθίσματα ερματισμού, σχεδίασης και μέγιστο βύθισμα καθώς και σταθερές τις τιμές των παραμέτρων καιρού και διαγωγής όπως αναφέρονται στον παρακάτω πίνακα.

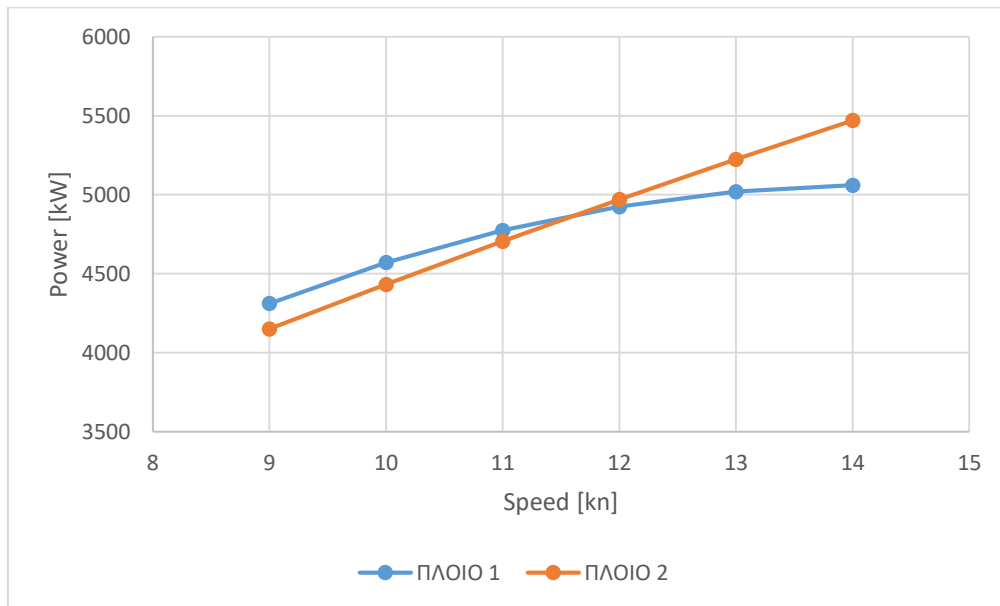
Ταχύτητα	$9 \leq V_s \leq 14 \text{ kn}$		
Βύθισμα	5.564 m	11.1 m	13 m
Διαγωγή	0.8 m		
$V_{\text{wind}} \cdot \cos(\text{DIR})$	10 kn		
$H_s \cdot \cos(\text{DIR})$	2 m		



Διάγραμμα 4.3 Αναμενόμενη Ισχύς για εύρος ταχυτήτων 9-14 kn σε βύθισμα ερματισμού



Διάγραμμα 4.4 Αναμενόμενη Ισχύς για εύρος ταχυτήτων 9-14 kn σε βύθισμα σχεδίασης



Διάγραμμα 4.5 Αναμενόμενη Ισχύς για εύρος ταχυτήτων 9-14 kn σε μέγιστο βύθισμα

Με βάση τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται ότι το Πλοίο 1 απαιτεί όλο και λιγότερη ισχύ ώστε να αυξήσει την ταχύτητα του, ειδικότερα μετά τους 11 κόμβους. Παράλληλα, συγκριτικά με το Πλοίο 2, σε μεγαλύτερες ταχύτητες και σε καταστάσεις μέγιστου φορτίου το Πλοίο 1 είναι πιο αποδοτικό.

5 Key Performance Indicators (KPIs)

Σκοπός του κεφαλαίου είναι να υπολογιστούν κάποιοι δείκτες απόδοσης που θα υποδεικνύουν τις διαφορές στην απόδοση μεταξύ των δύο πλοίων. Γενικότερα, αυτοί οι δείκτες απόδοσης (KPIs) χρησιμοποιούνται με σκοπό την ποσοτικοποίηση της απόδοσης ενός πλοίου. Μια μελέτη με KPIs θα πρέπει να είναι ικανή να προβάλλει διαφοροποιήσεις στην απόδοση των πλοίων και να καταλήγει σε συμπέρασμα σχετικά με την ευεργετική επίπτωση του PBCF στο Πλοίο 1.

5.1 KPI 1 (Propeller Loading Coefficient): Δείκτης Απόδοσης Περιστροφής Έλικας

Για την καλύτερη μελέτη της συμπεριφοράς της έλικας ως προς την αποδιδόμενη ισχύ, αναπτύχθηκε ο Δείκτης Απόδοσης Περιστροφής της έλικας ο οποίος βασίζεται στον νόμο της έλικας. Σύμφωνα με τον νόμο της έλικας, η ισχύς που καταλήγει στην έλικα είναι ανάλογη με την τρίτη δύναμη του ρυθμού περιστροφής της ως εξής, (Κυρτάτος Ν., 2007) [12]:

$$P = c \cdot n^3 \quad (5.1)$$

Κατά τη λειτουργία του πλοίου η σταθερά c μεταβάλλεται εξαιτίας της ρύπανσης, της διάβρωσης, των μηχανικών καταπονήσεων της έλικας (π.χ. από κάποιο ατύχημα) και στην προκειμένη περίπτωση με την εγκατάσταση του PBCF. Πιο συγκεκριμένα, μεταξύ δύο γεγονότων (π.χ. μεταξύ δύο δεξαμενισμών) παρατηρείται αύξηση της σταθεράς c η οποία σημαίνει αύξηση της απαιτούμενης ισχύος για την επίτευξη δεδομένης ταχύτητας περιστροφής της έλικας οπότε και μείωση της απόδοσης του πλοίου.

Αντιθέτως, ύστερα από κάποια επισκευή ή κάποιον καθαρισμό της έλικας παρατηρείται ή κάποια μετατροπή (όπως η εγκατάσταση PBCF) αναμένεται μείωση της σταθεράς c , δηλαδή μείωση της απαιτούμενης ισχύος για επίτευξη δεδομένης ταχύτητας περιστροφής της έλικας και τελικά βελτίωση της απόδοσης της έλικας και του πλοίου. Έτσι, η σταθερά c μπορεί να αναπτυχθεί σε δείκτη αξιολόγησης απόδοσης ώστε να εκτιμά τα φαινόμενα αυτά. Τελικά, ο Δείκτης Απόδοσης Περιστροφής της Έλικας KPI 1 (*Propeller Loading Coefficient*) εκφράζεται ως ο λόγος της ισχύος που αποδίδεται στην έλικα προς την τρίτη δύναμη του ρυθμού περιστροφής της έλικας:

$$KPI\ 1\ (Propeller\ Loading\ Coefficient) = \frac{P}{n^3} \quad (5.2)$$

Όπου:

- P [kW]: Αποδιδόμενη ισχύς στην έλικα
- n [rpm]: Στροφές του άξονα

5.2 KPI 2 (Speed Loss): Απώλεια ταχύτητας

Ο Δείκτης Απώλειας της Ταχύτητας KPI 2 (*Speed Loss Indicator*) εκτιμά το ποσοστό μείωσης της κανονικοποιημένης ταχύτητας στην πάροδο του χρόνου για δεδομένη ισχύ, συγκριτικά με τις αναμενόμενες τιμές ταχύτητας για τη δεδομένη διορθωμένη από τις πρόσθετες αντιστάσεις ισχύ στην κατάσταση αναφοράς που αντλούνται από τις καμπύλες Ισχύος-Ταχύτητας (P-V) των Sea Trials για κάθε κατάσταση φόρτωσης ξεχωριστά.

Για κάθε δεδομένη χρονική στιγμή και διορθωμένη από τις πρόσθετες αντιστάσεις ισχύ $P_{D,Corr}$ ο δείκτης KPI 2 μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με το ISO 19030 (ISO,2015) [13] ως εξής:

$$KPI\ 2\ (Speed\ Loss\ Indicator) = 100 \cdot \frac{V_m - V_e}{V_e} \quad (5.3)$$

Όπου:

- V_m [m/s]: Μετρούμενη κανονικοποιημένη ταχύτητα πλοίου ως προς το νερό.
- V_e [m/s]: Αναμενόμενη ταχύτητα πλοίου για τη διορθωμένη από τις πρόσθετες αντιστάσεις ισχύ, αντλούμενη από τις καμπύλες αναφοράς P-V των Sea Trials.

Παρακάτω παρουσιάζεται η σχέση υπολογισμού της Απώλειας Ταχύτητας (Speed Loss) για τα δύο πλοία και τα αντίστοιχα γραφήματα. Υπολογίζεται για κάθε data point στο σετ δεδομένων και αναφέρεται ως ποσοστό, εκφράζοντας την απόκλιση της πραγματικής ταχύτητας από την αναμενόμενη ταχύτητα που προκύπτει από τις καμπύλες αναφοράς του πλοίου.

Μεταξύ δύο γεγονότων (π.χ. δύο δεξαμενισμών, είτε ενός δεξαμενισμού και ενός καθαρισμού γάστρας και έλικας με δύτες κ.α.) παρατηρείται μείωση του δείκτη KPI 2 εφόσον αυξάνεται η ρύπανση της γάστρας και της έλικας και επομένως αυξάνεται η αντίσταση του πλοίου και μειώνεται η ταχύτητα για δεδομένη ισχύ.

Αντιθέτως, ύστερα από κάποιον καθαρισμό γάστρας και έλικας παρατηρείται αύξηση του δείκτη KPI 2 και επομένως βελτίωση της απόδοσης του πλοίου εφόσον το πλοίο δέχεται λιγότερη αντίσταση και η συμπεριφορά του συνδυασμού ισχύος ταχύτητας πλησιάζει την καμπύλη αναφοράς.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, που γίνεται σύγκριση των 2 πλοίων με το ένα να έχει το PBCF ενώ το άλλο όχι, αναμένεται ο δείκτης κατά μέσο όρο να είναι μεγαλύτερος στο Πλοίο 1.

5.3 KPI 3 (Carbon Intensity Indicator – CII): Δείκτης Έντασης Άνθρακα

Ο Δείκτης Έντασης Άνθρακα (CII) είναι ένας δείκτης που χρησιμοποιείται για να μετρήσει την ένταση του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) που εκπέμπει ένα πλοίο σε σχέση με την απόδοσή του. Συγκεκριμένα, ο CII εκφράζει τις εκπομπές CO₂ ανά μονάδα φορτίου που μεταφέρεται και ανά ναυτικό μίλι που διανύεται (Class NK, 2023) [10].

Ο CII υπολογίζεται με βάση τις συνολικές ετήσιες εκπομπές CO₂ ενός πλοίου, το συνολικό φορτίο που μεταφέρεται και την απόσταση που διανύεται. Εκφράζεται σε γραμμάρια CO₂ ανά τόνο-μίλι (g CO₂/t-nm).

$$KPI\ 3\ (CII) = \frac{Fuel\ Consumption \cdot CO_2\ factor}{Distance\ Travelled \cdot Capacity\ (DWT)} \quad (5.4)$$

6 Αποτελέσματα και Ανάλυση των KPIs

Σε αυτή την υποενότητα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών των Δεικτών Αξιολόγησης της Απόδοσης KPIs οι μεθοδολογίες των οποίων αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 5 της παρούσας εργασίας. Για όλους τους δείκτες χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα που αντιστοιχούν σε διάστημα περίπου ενός χρόνου μετά το δεξαμενισμό του κάθε καραβιού.

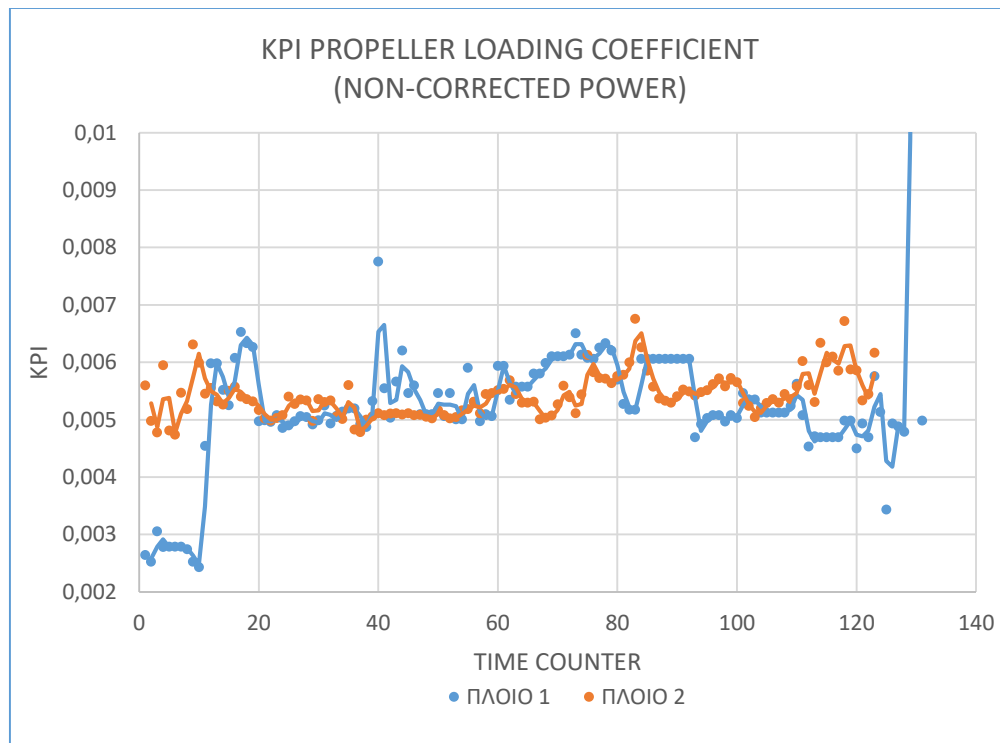
6.1 KPI 1 (Propeller Loading Coefficient): Δείκτης Απόδοσης Περιστροφής Έλικας

Αυτός ο δείκτης υπολογίστηκε για κάθε σημείο του διορθωμένου data set για τα 2 πλοία. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται κατά μέσο όρο ο δείκτης για κάθε πλοίο για το σύνολο των δεδομένων.

ΠΛΟΙΟ	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ KPI 1	STANDARD DEVIATION KPI 1
[1]	0.005479171	0.002876945
[2]	0.005413629	0.000378755

Πίνακας 6.1 Αποτελέσματα KPI 1

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η εξέλιξη του δείκτη χρονικά για τα δύο πλοία.

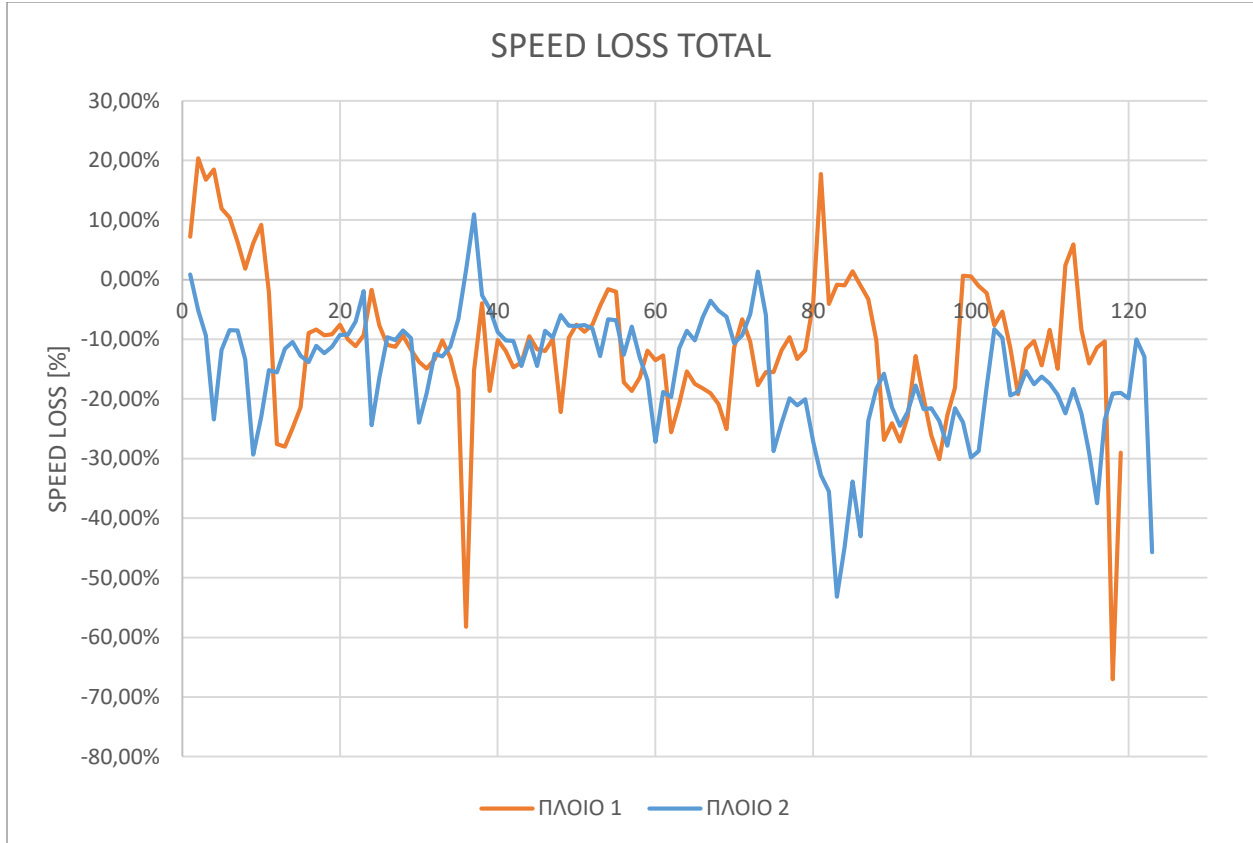


Διάγραμμα 6.1 Αποτελέσματα KPI 1

Με βάση τα παραπάνω δεν μπορεί να εξαχθεί ασφαλές συμπέρασμα για την επίδραση του συστήματος PBCF στην απόδοση του πλοίου.

6.2 KPI 2 (Speed Loss): Απώλεια ταχύτητας

Αυτός ο δείκτης υπολογίστηκε για κάθε σημείο του διορθωμένου data set για τα 2 πλοία. Παρακάτω παρατίθεται συγκεντρικό γράφημα και για τα δύο πλοία:



Διάγραμμα 6.2 Απώλεια ταχύτητας Πλοίο 1 και Πλοίο 2

Η κατά μέσο όρο μείωση της ταχύτητας για κάθε πλοίο παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα:

Πλοίο	% Μείωση Ταχύτητας
[1]	-11.00 %
[2]	-15.84 %

Πίνακας 6.2 Μέσες τιμές απώλειας ταχύτητας

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω ποσοστά προκύπτει ότι το Πλοίο 1 παρουσιάζει κατά μέσο όρο μικρότερη τιμή απώλειας ταχύτητας συγκριτικά με το Πλοίο 2 και επομένως είναι πιο αποδοτικό.

6.3 ΚΡΙ 3 (Carbon Intensity Indicator – CII): Δείκτης Έντασης Άνθρακα

Για τον υπολογισμό του δείκτη ΚΡΙ 3 χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα καταναλώσεων και απόστασης που έχει διανυθεί όπως αυτά αντλήθηκαν από τα Noon Reports. Αυτά παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στους παρακάτω πίνακες.

ΠΛΟΙΟ 1					
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΕΣ ΤΑΞΙΔΙΩΝ	ΜΙΛΙΑ [nm]	HFO [mt]	LFO [mt]	MGO [mt]	ATTAINED CII [g CO ₂ / mt*nm]
21/9/22-1/10/22	1705	151.4	0	1.4	4.77
27/11/22-5/12/22	2626	204.7	0	0	4.15
29/12/22-11/1/23	3591	283	0	48.2	4.93
7/2/23-16/2/23	2891	169.7	0	69.2	4.44
1/4/23-11/4/23	2412	193.5	0	69.2	4.27
9/5/23-16/5/23	2287	173.2	0	0	4.03
30/5/23-7/6/23	2389	106.4	61.2	0	3.75
26/6/23-1/7/23	1627	0	109.65	0	3.63
20/7/23-28/7/23	2092	0	186.07	0	4.79
30/8/23-10/9/23	3126	0	208.58	60.3	4.65
17/9/23-24/9/23	1694	0	62.018	84.56	4.71
ΣΥΝΟΛΟ	32332	1596.3	684.598	355.86	4.34

Πίνακας 6.3 Υπολογισμός CII - Πλοίο 1

ΠΛΟΙΟ 2					
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΕΣ ΤΑΞΙΔΙΩΝ	ΜΙΛΙΑ [nm]	HFO [mt]	LFO [mt]	MGO [mt]	ATTAINED CII [g CO ₂ / mt*nm]
13/3/23-18/3/23	1416	114.92	0	1.2	4.37
4/4/23-19/4/23	4112	305.82	19.17	0	4.21
6/5/23-14/5/23	2372	0	199.97	0	4.54
5/6/23-21/6/23	4265	0	331.281	17.86	4.41
28/7/23-14/8/23	4708	0	279.962	69.483	4.01
2/10/23-1/11/23	6718	638.602	0	0	5.06
24/11/23-29/11/23	1330	118.67	0	0	4.75
1/12/23-11/12/23	2412	233.72	0	0	5.16
ΣΥΝΟΛΟ	29446	1459.048	883.922	156.843	4.54

Πίνακας 6.4 Υπολογισμός CII - Πλοίο 2

Σύμφωνα με τους παραπάνω πίνακες ο συνολικός δείκτης του CII για την περίοδο που μελετήθηκε είναι μικρότερος για το Πλοίο 1 σε σχέση με το Πλοίο 2. Οι εκπομπές CO₂ ήταν λιγότερες και η συνολική κατανάλωση σε σχέση με τα μίλια που διανύθηκαν ήταν μικρότερη. Επομένως, το Πλοίο 1 είναι πιο αποδοτικό από το Πλοίο 2.

7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία μελετάται η επίδραση της εγκατάστασης του PBCF στην ισχύ της κύριας μηχανής, παρακολουθώντας την απόδοση. Η μελέτη αυτή πραγματοποιείται μέσω της σύγκρισης δύο πλοίων και των επιχειρησιακών δεδομένων τους για διάστημα ενός έτους μετά το δεξαμενισμό του καθενός, ένα εκ των οποίων κατά τη διάρκεια της πλεύσης του έχει τη συγκεκριμένη διάταξη ενώ το άλλο όχι. Το πρόβλημα εξετάζεται μέσω της δημιουργίας Μοντέλων Πολλαπλής Γραμμικής Παλινδρόμησης και παραγωγής δεικτών απόδοσης (KPIs) για κάθε πλοίο.

Για να είναι εφικτός και αξιόπιστος ο υπολογισμός των δεικτών KPI είναι μεγάλης σημασίας η σωστή προετοιμασία και επεξεργασία των επιχειρησιακών δεδομένων. Αρχικά, πρέπει να ελέγχεται εάν είναι διαθέσιμα όλα τα επιχειρησιακά δεδομένα που είναι απαραίτητα για τη δημιουργία του μοντέλου πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης και τον υπολογισμό των δεικτών KPIs τα οποία αντλούνται από τα ποσοφ reports καθώς και τα δεδομένα αναφοράς τα οποία λαμβάνονται από τις δοκιμές θαλάσσης (Sea Trials). Για τα επόμενα βήματα επεξεργασίας είναι σκόπιμο τα δεδομένα να χωρίζονται στις αντίστοιχες καταστάσεις φόρτωσης οι οποίες οφείλουν να είναι παραπλήσιες των δεδομένων αναφοράς (Sea Trials). Τα επιχειρησιακά δεδομένα, οφείλουν να έχουν το ίδιο εύρος τιμών με τα δεδομένα αναφοράς των θαλάσσιων δοκιμών (Sea Trials) το οποίο επιτυγχάνεται με τη διαδικασία φιλτραρίσματος (filtering) και κανονικοποίησης ισχύος. Τέλος, πρέπει να διαγράφονται μη φυσιολογικές τιμές δεδομένων (outliers) με μια διαδικασία επικύρωσης δεδομένων (validation).

Το πλοίο κατά την πορεία του δεν βρίσκεται συνήθως σε συνθήκες καλού καιρού, χωρίς άνεμο και θαλάσσιους κυματισμούς. Έτσι, οφείλεται να διορθωθεί η αποδιδόμενη ισχύς για τις πρόσθετες αντιστάσεις που επιφέρουν αυτές οι συνθήκες (Κεφάλαιο 6).

Έπειτα ακολούθησε η κατασκευή των Μοντέλων Πολλαπλής Γραμμικής Παλινδρόμησης η οποία προβλέπει την ισχύ του κάθε πλοίου βάση της ταχύτητας που αυτό επιτυγχάνει, του βυθίσματος, της διαγωγής και των καιρικών συνθηκών στα οποία αυτό πλέει στην κάθε περίπτωση. Από τα διαγράμματα που παράγονται με χρήση του μοντέλου γίνεται αντιληπτό πως το Πλοίο 1 εμφανίζει βελτιωμένη συμπεριφορά σε μεγαλύτερα βυθίσματα και ταχύτητες.

Έπειτα υπολογίστηκαν τρεις συντελεστές απόδοσης (KPIs). Αυτοί είναι ο δείκτης απόδοσης περιστροφής έλικας, ο δείκτης απώλεια ταχύτητας και ο δείκτης CII. Με βάση τα αποτελέσματα του πρώτου δείκτη δεν μπορούμε να εξάγουμε ασφαλή συμπεράσματα για την επίδραση του συστήματος. Από την άλλη πλευρά παρατηρούμε μέσω του δεύτερου δείκτη ότι η μείωση ταχύτητας είναι μικρότερη για το Πλοίο 1 και η απόδοση του πλοίου χαρακτηρίζεται βελτιωμένη. Τέλος, ο δείκτης CII για το Πλοίο 1 είναι μικρότερος από τον αντίστοιχο δείκτη του Πλοίου 2. Αυτό σημαίνει ότι η κατανάλωση καυσίμων ήταν μικρότερη για το Πλοίο 1 σε σχέση με το Πλοίο 2 αναλογικά με τα μίλια που διένυσε το καθένα και επομένως χαρακτηρίζεται πιο αποδοτικό.

8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

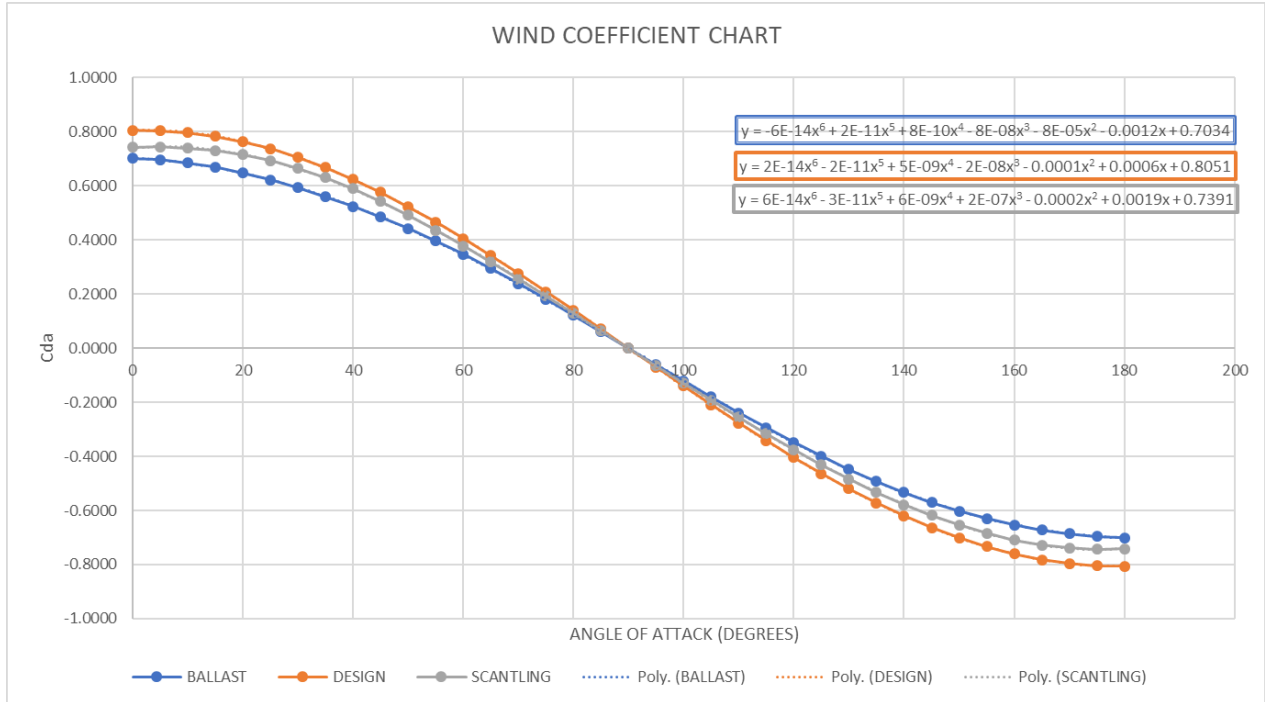
- [1] International Maritime Organization, IMO's work to cut GHG emissions from ships
<https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Cutting-GHG-emissions.aspx>
- [2] ABS (2013) Ship energy efficiency measures: Status and guidance, American Bureau of Shipping, Houston, USA, 2013
- [3] Lloyd's Register - Fuel for thought – alternative fuel choices for shipping
- [4] IMO, (2023), Resolution MEPC.377(80), 2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships, International Maritime Organization
- [5] MOL Techno-Trade Ltd., PBCF & Wind propulsion department
https://www.pbcf.jp/research/advanced_PBCF/
- [6] K. Ouchi, M. Ogura, (1988), A research and development of PBCF (propeller boss cap fins). Improvement of flow from propeller boss.
- [7] Takafumi Kawamura, Kazuyuki Ouchi, Takeo Nojiri, (2012), Model and full scale CFD analysis of propeller boss cap fins (PBCF)
- [8] ITTC – Recommended Procedures and Guidelines, Preparation, Conduct and Analysis of Speed/Power Trials
- [9] Ξουρίδα, Ε. (2023), Διπλωματική εργασία ΕΜΠ, Επίδραση της βελτιστοποίησης της διαγωγής στην αποδοτικότητα των πλοίων με χρήση επιχειρησιακών δεδομένων.
- [10] Zalachoris, Α. (2020) “Evaluation of the Efficiency of a Mewis Duct by performance monitoring”, Diploma Thesis NTUA
- [11] Κόντης, Χ. (2023), Διπλωματική εργασία ΕΜΠ, Μελέτη της επίδρασης της βιο-ρυπανσης της γάστρας και της έλικας στην απόδοση του πλοίου με χρήση δεικτών αξιολόγησης της απόδοσης.
- [12] CII (Carbon Intensity Indicator), (2023), Class NK, Marine GHG Certification Department
- [13] University of Piraeus, SPSS Lessons, Chapter 6, “Multiple Linear Regression Models”
- [14] Κυρτάτος, Ν., (2007), Βασικές Αρχές Πρόωσης Πλοίων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
- [15] ISO (2015), ISO 19030: Ships and marine technology - Measurement of changes in hull and propeller performance. Part 2: Default method, International Organization for Standardization

9 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

9.1 ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΑΝΕΜΟΥ (FUJIWARA)

ANGLE OF ATTACK (°)	BALLAST CONDITION	DESIGN CONDITION	SCANTLING CONDITION
0	0.7016	0.8059	0.7418
5	0.6962	0.8043	0.7436
10	0.6853	0.7966	0.7398
15	0.6691	0.7829	0.7303
20	0.6478	0.7630	0.7149
25	0.6221	0.7372	0.6932
30	0.5925	0.7053	0.6650
35	0.5595	0.6675	0.6301
40	0.5234	0.6241	0.5890
45	0.4841	0.5756	0.5422
50	0.4416	0.5226	0.4908
55	0.3957	0.4655	0.4356
60	0.3465	0.4051	0.3777
65	0.2940	0.3419	0.3175
70	0.2387	0.2763	0.2558
75	0.1810	0.2089	0.1929
80	0.1217	0.1400	0.1291
85	0.0611	0.0703	0.0647
90	0.0000	0.0000	0.0000
95	-0.0611	-0.0703	-0.0647
100	-0.1217	-0.1400	-0.1291
105	-0.1811	-0.2089	-0.1928
110	-0.2389	-0.2762	-0.2556
115	-0.2948	-0.3416	-0.3167
120	-0.3483	-0.4044	-0.3756
125	-0.3994	-0.4641	-0.4317
130	-0.4476	-0.5203	-0.4844
135	-0.4924	-0.5724	-0.5333
140	-0.5334	-0.6202	-0.5782
145	-0.5701	-0.6633	-0.6186
150	-0.6023	-0.7014	-0.6543
155	-0.6299	-0.7341	-0.6848
160	-0.6530	-0.7610	-0.7093
165	-0.6717	-0.7818	-0.7275
170	-0.6862	-0.7963	-0.7388
175	-0.6963	-0.8043	-0.7435
180	-0.7016	-0.8059	-0.7418

Πίνακας 9.1 Συντελεστές αντίστασης ανέμου (Fujiwara)

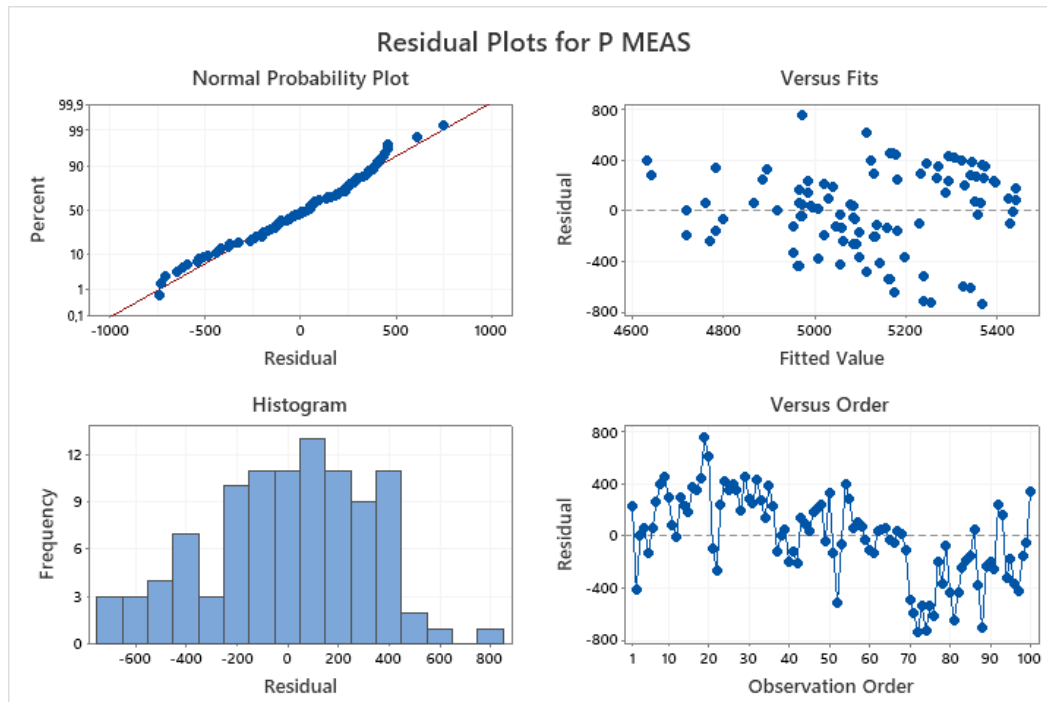


Διάγραμμα 9.1 Συντελεστές αντίστασης ανέμου

9.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΟΤΕΛΟΥ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗΣ

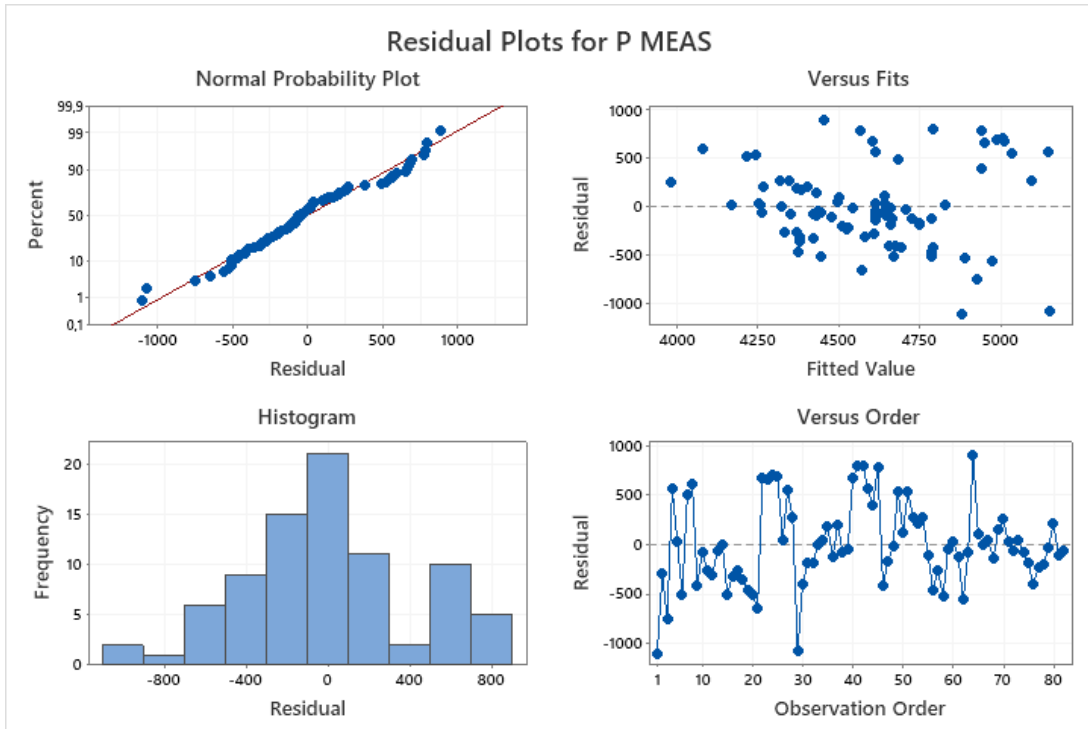
Για την δημιουργία του μοντέλου γραμμικής παλινδρόμησης χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Minitab. Παρακάτω παρατίθενται διαγράμματα για την ανάλυση σφαλμάτων κατά τη διαδικασία υπολογισμού των μοντέλων γραμμικής παλινδρόμησης.

Για το πλοίο 1:



Διάγραμμα 9.2 Αποτελέσματα Minitab για το Πλοίο 1

Για το πλοίο 2:



Διάγραμμα 9.3 Αποτελέσματα Minitab για το Πλοίο 2