



**Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο**  
**Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών**  
**Τομέας Μελέτης Πλοίου Και Θαλάσσιων Μεταφορών**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**  
**Αξιολόγηση Συστήματος για τη Βελτίωση της**  
**Πρόωσης Πλοίου με Χρήση Επιχειρησιακών**  
**Δεδομένων**

**ΦΑΡΔΗΣ ΕΥΣΤΡΑΤΙΟΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΘΕΜΕΛΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ**

**ΑΘΗΝΑ 2024**

## Σύνοψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται μία προσπάθεια εκτίμησης της απόδοσης ενός πλοίου το οποίο υπέστη μετασκευή και εγκαταστάθηκε ένα σύστημα PBCF, κάνοντας χρήση των επιχειρησιακών δεδομένων του πλοίου. Τα σύνολο των δεδομένων λήφθηκε για μία περίοδο 3.5 χρόνων μέσα στα οποία το πλοίο ολοκλήρωσε 2 διαδοχικούς δεξαμενισμούς, στον δεύτερο εκ των οποίων έγινε η εγκατάσταση του συστήματος.

Σε πρώτο στάδιο γίνεται ο καθορισμός των δεδομένων που θα χρησιμοποιηθούν και η επεξεργασία τους. Η εκτίμηση της απόδοσης βασίζεται σε δύο μοντέλα, ένα θεωρητικό και ένα στατιστικό οπότε γίνεται η κατάλληλη επεξεργασία των δεδομένων για κάθε μοντέλο. Για το θεωρητικό μοντέλο, ακολουθεί η εφαρμογή της διόρθωσης λόγω ανέμου και κυμάτων. Για το λόγο αυτό υπολογίζεται η χρονική ιστορία δύο δεικτών απόδοσης KPI και γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων για τις δύο περιόδους. Οι δείκτες KPI βασίζονται στα αποτελέσματα του θεωρητικού μοντέλου και παρέχουν την βάση για την αξιολόγηση της αλλαγής στην απόδοση του πλοίου

Το στατιστικό μοντέλο, που είναι ένα πολλαπλό μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης, συνδέει τα ακατέργαστα δεδομένα της φόρτωσης και της πλεύσης του πλοίου για να εξάγει μια εκτίμηση της μεταβολής της ισχύος ανάλογα με την ταχύτητα του πλοίου στο νερό. Τα αποτελέσματα του μοντέλου για τις δύο περιόδους συγκρίνονται μεταξύ τους υπό ίδιες συνθήκες λειτουργίας.

Ο τελικός σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η εκτίμηση της βελτίωσης της απόδοσης του πλοίου μετά την εγκατάσταση του συστήματος PBCF. Αυτό επιχειρείται με τη χρήση δύο διαφορετικών μοντέλων, ενός θεωρητικού και ενός στατιστικού. Αυτή η προσέγγιση ακολουθήθηκε για λόγους πληρότητας, δηλαδή για να παραχθεί μία διαδικασία η οποία θα μπορεί να εφαρμοστεί κατά τη λειτουργία και σε κάθε μετασκευή πλοίου για να αξιολογηθούν τυχόν αλλαγές στην απόδοση του πλοίου.

## Abstract

In this thesis an attempt is made to assess the performance of a ship that has a PBCF system installed, using the ship's operational data. The data set was taken over a period of 3.5 years during which the ship completed 2 consecutive dry-dockings, at the second of which the PBCF system was installed.

The first step is to define the data to be used and to process them. The performance assessment is based on two models, one theoretical and one statistical, so the data is prepared appropriately for each model. For the theoretical model, the wind and wave correction are applied to the measured resistance. For this purpose, the progression through time of two KPIs (Key Performance Indicators) is calculated and the results for the two periods are compared. The KPIs are based on the results of the theoretical model and provide the basis for assessing the change in ship performance

The statistical model, which is a multiple linear regression model, links the raw data of the ship's loading and sailing to derive an estimate of the change in power as a function of the ship's speed through water. The model results for the two periods are compared with each other under identical operating conditions.

The final purpose of the thesis is to evaluate the improvement of the ship's performance after the installation of the PBCF system. This is attempted by using two different models, one theoretical and one statistical. This approach was taken for completeness, i.e. to produce a procedure that can be applied for the ship's normal operation and after a retrofit to evaluate any changes in ship's performance.

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω βαθύτατα τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Νικόλαο Θεμελή για την βοήθεια και την καθοδήγηση του στην εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας. Η εμπειρία και οι γνώσεις του ήταν εφελθήριες καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την εταιρία Kyla Shipping & Trading και τους εργαζόμενους της, για την διάθεση των απαραίτητων στοιχείων και δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την εργασία.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω βαθύτατα την οικογένειά μου και τους φίλους μου για την αδιάκοπη στήριξη, την ψυχολογική συμπαράσταση και την ενθάρρυνση τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών και της εκπόνησης αυτής της εργασίας.

## Περιεχόμενα

Σύνοψη.....	1
Abstract.....	2
Ευχαριστίες.....	3
1.Εισαγωγή.....	8
1.1. Ενεργειακή Αποδοτικότητα Πλοίου.....	8
1.2. Propeller Boss Cap Fins (PBCF).....	9
1.3. Ανασκόπηση Προηγούμενων Μελετών.....	10
1.4. Σκοπός και Δομή της Μελέτης.....	11
2. Παρουσίαση Δεδομένων.....	13
2.1. Πλοίο Υπό Μελέτη.....	13
2.2. Απόκτηση και Ανάλυση Δεδομένων.....	14
2.3. Στατιστική Ανάλυση Περιόδου Λειτουργίας.....	15
3. Διόρθωση Ισχύος ως προς την Επίδραση Καιρικών Φαινομένων.....	19
3.1. Πρόσθετη Αντίσταση Ανέμου.....	19
3.1.1 Υπολογισμός Συντελεστών Αντίστασης Ανέμου (Μέθοδος Fujiwara).....	21
3.1.2. Αποτελέσματα Διόρθωσης λόγω Ανέμου.....	25
3.2. Πρόσθετη Αντίσταση Κυματισμών.....	26
3.3. Κανονικοποίηση Ισχύος.....	30
3.4 Τελική πρόσθετη ισχύς.....	31
4. Key Performance Indicators (KPIs).....	34
4.1. Ανάλυση KPIs.....	34
4.2. Αποτελέσματα των KPIs.....	35
4.2.1. KPI 1 (Propeller Loading Coefficient): Δείκτης Απόδοσης Έλικας.....	35
4.2.2. KPI 2 (Speed Loss): Απώλεια ταχύτητας.....	37
5. Μοντέλο Γραμμικής Παλινδρόμησης.....	39
5.1. Πολλαπλό Μοντέλο Γραμμικής Παλινδρόμησης.....	39
5.2. Χαρακτηριστικά Μοντέλου Παλινδρόμησης.....	39
5.2.1. Συντελεστής Προσδιορισμού.....	40
5.2.2. Τυπική Απόκλιση.....	41
5.2.3. Τυπικό Σφάλμα Συντελεστή.....	41
5.2.4. P-value.....	41
5.3. Κατασκευή Μοντέλου Παλινδρόμησης.....	42
5.4. Σύγκριση Μοντέλων για τις Δύο Περιόδους.....	45
6. Συμπεράσματα.....	46

7. Βιβλιογραφία .....47

## Περιεχόμενα Εικόνων

Εικόνα 1. Προπέλα πλοίου μαζί με το σύστημα PBCF της εταιρίας MOL Techno[4].	9
Εικόνα 2. Σχηματική ανάλυση εργασίας .....	12
Εικόνα 3. Προφίλ Λειτουργίας του Υπό Μελέτη Πλοίου .....	15
Εικόνα 4. Κατανομή Μέσου Βυθίσματος.....	16
Εικόνα 5. Κατανομή Διαγωγής.....	17
Εικόνα 6. Κατανομή Μέσης Ταχύτητας .....	17
Εικόνα 7. Κατανομή Μέσης Ισχύος Κύριας Μηχανής.....	18
Εικόνα 8. Σύμβαση Κατευθύνσεων Κατά την Πλεύση .....	20
Εικόνα 9. Αδιάστατοι Συντελεστές της Μεθόδου Fujiwara[7] .....	22
Εικόνα 10. Σχηματική Απεικόνιση των παραμέτρων της μεθόδου Fujiwara.....	23
Εικόνα 11. Κατανομή συντελεστή CDA για γωνίες πρόσπτωσης $[0^\circ, 180^\circ]$ - Καταστάσεις Ballast, Design & Scantling.....	23
Εικόνα 12. Επίδραση Ανέμου στην Ισχύ .....	25
Εικόνα 13. Μεταβολή Ταχύτητας και Σχετικής Γωνίας του Ανέμου .....	25
Εικόνα 14. Response Function.....	28
Εικόνα 15. Επίδραση Κυμάτων στην Ισχύ .....	29
Εικόνα 16. Μεταβολή Σημαντικού Ύψους και Σχετικής Γωνίας του Κύματος.....	29
Εικόνα 17. Σύγκριση Διορθωμένης Ισχύος με Αρχική Ισχύ   Ballast Draft .....	32
Εικόνα 18. Σύγκριση Διορθωμένης Ισχύος με Αρχική Ισχύ   Design Draft.....	32
Εικόνα 19. Σύγκριση Διορθωμένης Ισχύος με Αρχική Ισχύ   Scantling Draft .....	33
Εικόνα 20. Αποτελέσματα KPI 1 .....	35
Εικόνα 21. Αποτελέσματα KPI 2.....	37
Εικόνα 22. Κατανομή Σημείων Παλινδρόμησης   1η Περίοδος.....	44
Εικόνα 23. Κατανομή Σημείων Παλινδρόμησης   2η Περίοδος.....	44
Εικόνα 24. Αναμενόμενες Τιμές Ισχύος για Βύθισμα Scantling.....	45

## Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 1. Κύρια χαρακτηριστικά του πλοίου υπό μελέτη .....	13
Πίνακας 2. Χαρακτηριστικά των καταστάσεων φόρτωσης.....	13
Πίνακας 3. Βασικά επιχειρησιακά δεδομένα.....	15
Πίνακας 4. Στατιστικά Στοιχεία Μέσου Βυθίσματος.....	16
Πίνακας 5. Στατιστικά Στοιχεία Διαγωγής.....	17
Πίνακας 6. Στατιστικά Στοιχεία Μέσης Ταχύτητας.....	18
Πίνακας 7. Στατιστικά Στοιχεία της Μέσης Ισχύος Κύριας Μηχανής ως Ποσοστό του MCR.....	18
Πίνακας 8. Συντελεστές Fujiwara και Εμβαδά Επιφανειών.....	23
Πίνακας 9. Αποτελέσματα Μεθόδου Fujiwara.....	24
Πίνακας 10. Χαρακτηριστικά Κατάστασης Φόρτωσης.....	28
Πίνακας 11. Στατιστικά Στοιχεία KPI 1 .....	36
Πίνακας 12. Στατιστικά Στοιχεία KPI 1   2η περίοδος.....	36
Πίνακας 13. Στατιστικά Στοιχεία KPI 2 .....	37
Πίνακας 14. Στατιστικά Στοιχεία KPI 2   2 <sup>η</sup> περίοδος.....	38
Πίνακας 15. Χαρακτηριστικά Μοντέλου   1η Περίοδος.....	43
Πίνακας 16. Χαρακτηριστικά Μοντέλου   2η Περίοδος.....	43



## 1.Εισαγωγή

### 1.1. Ενεργειακή Αποδοτικότητα Πλοίου

Η παγκόσμια ναυτιλία οφείλεται για τη συντριπτική πλειοψηφία του μεταφερόμενου όγκου πρώτων υλών καθώς και προϊόντων σε σχεδόν κάθε λιμάνι. Για τον λόγο αυτό ο IMO (International Maritime Organization) έχει εφαρμόσει και συνεχίζει να προτείνει μέτρα για τον περιορισμό του περιβαλλοντικού αντίκτυπου στο άμεσο μέλλον[1], τόσο με την κατασκευή νέων πλοίων, και μετασκευή των ήδη υπαρχόντων, ώστε να είναι περισσότερο φιλικά προς το περιβάλλον. Το κανονιστικό πλαίσιο τέθηκε αρχικά το 2018 στην 72<sup>η</sup> συνεδρία της Επιτροπής για την MEPC (Maritime Environment Protection Committee). Ο στόχος που τέθηκε είναι ο περιορισμός των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου έως το 2050 κατά 50% σε σχέση με το 2008 και περαιτέρω προσθήκες και αλλαγές έλαβαν χώρα το 2023. Οι προσπάθειες έχουν επικεντρωθεί μέχρι σήμερα στον περιορισμό της εκπομπής CO<sub>2</sub> και κινούνται σε δύο άξονες: την εισαγωγή εναλλακτικών καυσίμων και την εγκατάσταση συστημάτων βελτίωσης της αποδοτικότητας. Οι μεγαλύτεροι κατασκευαστές μηχανών εργάζονται πάνω στον σχεδιασμό κινητήρων με τη δυνατότητα καύσης μεθανόλης, αμμωνίας ή υδρογόνου. Η προσπάθεια αυτή όμως έχει βρει πολλά εμπόδια καθώς υπάρχουν προβλήματα στην αποθήκευση αλλά και την καύση τους, καθώς επίσης δεν υπάρχουν υποδομές που να μπορούν να υποστηρίξουν την παγκόσμια εφαρμογή τους. Επιπλέον, η αύξηση στην παραγωγή βιοκαυσίμων θα είναι μια μεγάλη βοήθεια στο εγχείρημα αυτό καθώς το αποτύπωμα άνθρακα της χρήσης των καυσίμων αυτών τείνει στο μηδέν.

Η λειτουργία του πλοίου απαιτεί τεράστιες ποσότητες ενέργειας, οι οποίες έχουν το ανάλογο περιβαλλοντικό αντίκτυπο. Στη ναυτιλία έχει εισαχθεί τα τελευταία χρόνια η έννοια της αποδοτικότητας, δηλαδή η εκμετάλλευση όσο το δυνατόν περισσότερης ενέργειας από τη διαθέσιμη. Η βελτίωση της αποδοτικότητας επικεντρώνεται στη μείωση της απαιτούμενης ισχύος πρόωσης αλλά και στη βελτίωση της πρόωσης που παράγει η έλικα. Παρακάτω παρατίθενται ορισμένα συστήματα βελτίωσης της αποδοτικότητας [2]:

Μείωση απαιτούμενης ισχύος:

- Rotor Sails
- Air Lubrication System - ALS
- Silicon Paints

Βελτίωση της πρόωσης:

- Mewis Duct
- Schneekluth Duct
- Propeller Boss Cap Fins - PBCF

Η παρούσα εργασία σκοπεύει να ελέγξει την αποδοτικότητα ενός συστήματος PBCF συγκρίνοντας τη λειτουργία ενός υπό μελέτη πλοίου, πριν και μετά την εγκατάσταση του συστήματος. Γίνεται μελέτη μιας περιόδου 12 περίπου μηνών αμέσως μετά από δύο διαδοχικούς δεξαμενισμούς του πλοίου, όπου στον δεύτερο έγινε και η

εγκατάσταση του συστήματος PBCF. Η μελέτη βασίζεται στα επιχειρησιακά δεδομένα του πλοίου, όπως η ταχύτητα στο νερό και η παραγόμενη ισχύς από την κύρια μηχανή, με σκοπό τον έλεγχο της επίδρασης του συστήματος στην αποδοτικότητα.

## 1.2. Propeller Boss Cap Fins (PBCF)

Τα συστήματα βελτίωσης της πρόωσης αποτελούνται από ειδικές διατάξεις οι οποίες εγκαθίστανται στον ομόρου της έλικας με σκοπό την βελτίωση της πρόωσης. Τα συστήματα αυτά παράγουν παραπάνω όση δουλεύοντας στο τυρβώδες νερό που προκαλείται από την κίνηση της προπέλας.

Επιπλέον πλεονεκτήματα από την εγκατάσταση τέτοιων συστημάτων είναι η μείωση της σπηλαιώσης της έλικας και ο περιορισμός της διάβρωσης της προπέλας. Τα συστήματα βελτίωσης της πρόωσης μειώνουν την απαίτηση για κατανάλωση καυσίμου καθώς αυξάνεται η αποδιδόμενη ενέργεια για να επιτευχθεί μια συγκεκριμένη ταχύτητα του πλοίου.

Το Propeller Boss Cap Fins (PBCF) αναπτύχθηκε από την εταιρία MOL Techno το 1987 και έχει βρει ευρεία εφαρμογή σε πολλά είδη πλοίων. Αποτελείται από πτερόγια τα οποία εγκαθίστανται στην πλήμνη της προπέλας. Η βελτίωση της πρόωσης από το σύστημα αυτό προέρχεται από τη μείωση των απωλειών που συνδέονται με υψηλή περιστροφή και τη δημιουργία ισχυρής δίνης στο στην περιοχή αυτή [3].



Εικόνα 1. Προπέλα πλοίου μαζί με το σύστημα PBCF της εταιρίας MOL Techno[4]

### 1.3. Ανασκόπηση Προηγούμενων Μελετών

Με τη μελέτη βελτίωση της απόδοσης από την εγκατάσταση συστήματος PBCF έχουν ασχοληθεί παλαιότερα οι Kazuyuki et al [5]. Στη μελέτη αυτή χρησιμοποιήθηκαν διάφορες μέθοδοι για την εκτίμηση της απόδοσης του συστήματος. Συγκεκριμένα έγιναν πειράματα Flow Visualization, Propeller Open Test, Self-Propulsion Test και On Ship Test και μετρήθηκε κέρδος από 3% έως 7% στην απόδοση της προπέλας.

Το σύστημα μελετήθηκε εκ νέου στη μελέτη των Takafumi Kawamura, Kazuyuki Ouchi το 2012 [6] μέσω CFD σε μοντέλο και full scale (Reynolds) με διαφορετικές καταστάσεις ροής. Λόγω μεγάλου αριθμού Reynolds και παρουσίας της γάστρας τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν καλύτερη απόδοση της προπέλας με PBCF σε σχέση με το μοντέλο. 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 τραχεία επιφάνεια, η αστάθεια και η σπηλαιώση.

Στην ITTC – 2021 [7] δίνονται οι οδηγίες για την επεξεργασία των επιχειρησιακών δεδομένων ώστε να βρίσκονται όσο το δυνατόν πιο κοντά στην κατάσταση των sea trials. Αυτές οι οδηγίες του IMO δείχνουν πως πρέπει να γίνουν οι διορθώσεις ανέμου και κύματος. Τα επιχειρησιακά δεδομένα πλοίων έχουν χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν στις διπλωματικές εργασίες των Ξουρίδα[8], όπου μελετήθηκε η επίδραση της μεθόδου του trim optimization σε ένα από δύο αδερφά πλοία και Ζαλαχώρη[9], όπου μελετήθηκε η επίδραση της εγκατάστασης Mewis Duct σε ένα από δύο αδερφά πλοία. Επιπλέον, στη διπλωματική του Σκρέτα[10], όπου μελετάται η εγκατάσταση PBCF σε ένα από δύο αδερφά πλοία. Στις διπλωματικές των Ξουρίδα[8] και Σκρέτα[10] χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τα noon reports και στη διπλωματική του Ζαλαχώρη[9] δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν σε κατάλληλα μοντέλα για να αντλήσουν συμπεράσματα για την αλλαγή της απόδοσης των πλοίων υπό μελέτη.

#### 1.4. Σκοπός και Δομή της Μελέτης

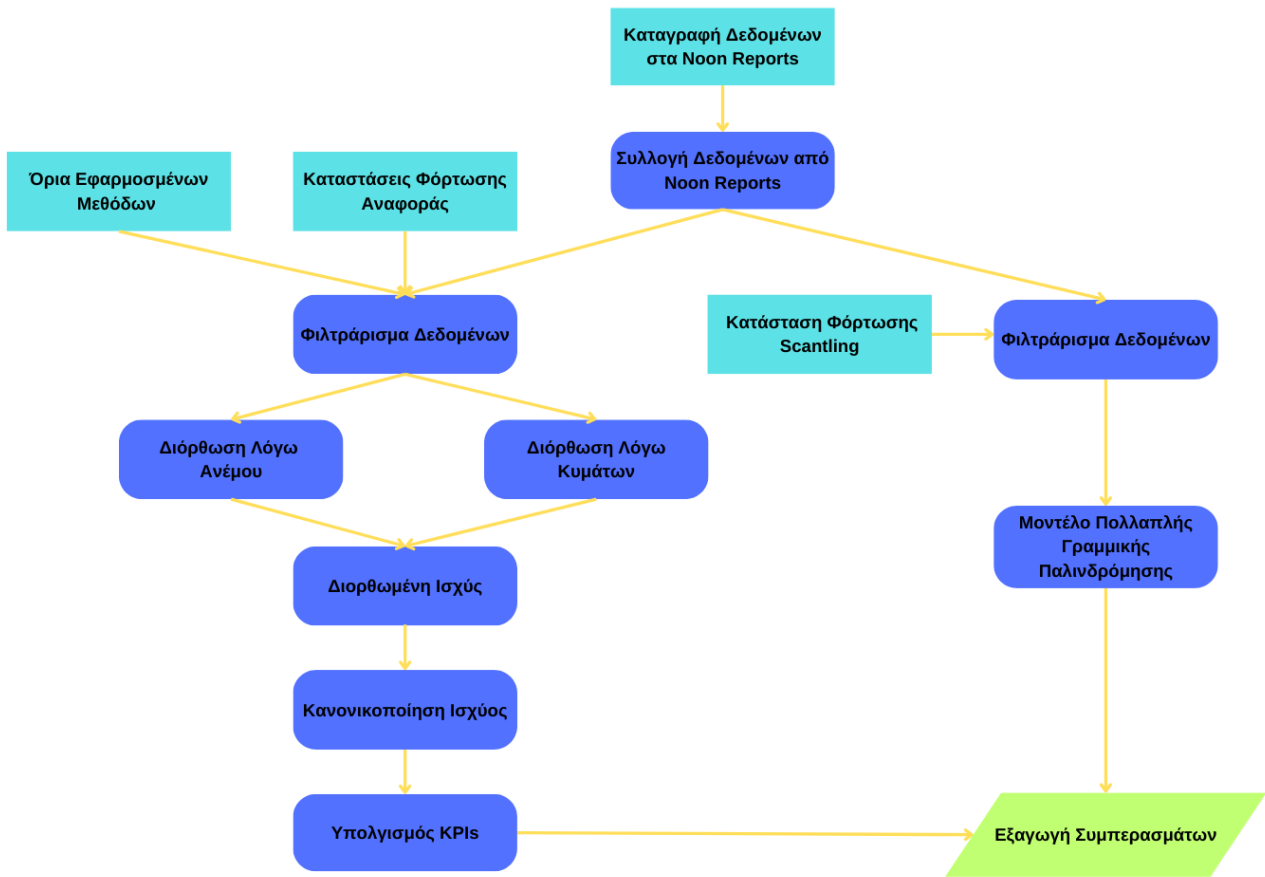
Η αξιολόγηση της απόδοσης ενός πλοίου είναι πλέον μία απαραίτητη και συνεχής διαδικασία για τις ναυτιλιακές εταιρίες καθώς ακόμα και ανεπαίσθητες αλλαγές στην απόδοση μπορούν να αυξήσουν σημαντικά το κόστος λειτουργίας. Η σύγκριση με τις καμπύλες λειτουργίας των sea trials, που θεωρούνται ως οι βέλτιστες καμπύλες αναφοράς, μπορεί να περιορίσει σε μεγάλο βαθμό την υπερκατανάλωση καυσίμου και την περιττή φόρτιση της κύριας μηχανής.

Η παρούσα εργασία επιχειρεί να συγκρίνει τις δύο περιόδους μεταξύ τους και να δημιουργήσει ένα μοντέλο για την πρόβλεψη της απόδοσης ενός πλοίου μετά την εγκατάσταση ενός συστήματος βελτίωσης της πρόωσης. Μια επισκόπηση της εργασίας παρουσιάζεται σχηματικά στην Εικόνα 2. Η λειτουργία του πλοίου χωρίζεται σε δύο περιόδους, που ορίζονται από δύο διαδοχικούς δεξαμενισμούς. Ο πρώτος δεξαμενισμός του πλοίου ολοκληρώθηκε στα τέλη Αυγούστου του 2020 και ο δεύτερος, όπου εγκαταστάθηκε και το σύστημα, έλαβε χώρα τον Απρίλιο του 2023. Παρακάτω θα ακολουθήσει λεπτομερής ανάλυση του προφίλ λειτουργίας του πλοίου.

Η σύγκριση των δύο περιόδων γίνεται με βάση τα λειτουργικά δεδομένα που συλλέγονται από τα noon reports καθημερινά. Τα δεδομένα χωρίζονται σε τρεις καταστάσεις φόρτωσης και φιλτράρονται σύμφωνα με την ITTC 2021. Στη συνέχεια υπολογίζονται οι αντιστάσεις που προκύπτουν από τον άνεμο και τα κυματικά φαινόμενα. Τα καιρικά φαινόμενα αυξάνουν ή μειώνουν την ισχύ που απαιτείται για να επιτευχθεί η δεδομένη ταχύτητα του πλοίου. Στο τέλος, η ισχύς που προκύπτει κανονικοποιείται και ως προς το βύθισμα για να είναι εφικτή η σύγκριση με τις καμπύλες των sea trials. Τέλος, τα αποτελέσματα των παρακάτω υπολογισμών χρησιμοποιούνται για την παραγωγή συντελεστών Key Performance Indicators (KPIs) και παρακολουθείται η χρονική εξέλιξη τους.

Τα ακατέργαστα δεδομένα χρησιμοποιούνται επίσης για την δημιουργία μοντέλου πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης στο κεφάλαιο 4, για την πρόβλεψη της ισχύος που αποδίδεται από τη μηχανή για συγκεκριμένη ταχύτητα. Το μοντέλο πρόβλεψης παράγεται με βάση την ισχύ, την ταχύτητα, το βύθισμα και ορισμένα χαρακτηριστικά των καιρικών φαινομένων για δύο περιόδους 12 περίπου μηνών ακριβώς μετά από κάθε δεξαμενισμό. Δημιουργείται ένα μοντέλο για κάθε περίοδο και συγκρίνονται οι προβλέψεις τους για μία κατάσταση η οποία είναι αντιπροσωπευτική για τα δεδομένα από τα οποία παράχθηκαν.

Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται τα διαθέσιμα δεδομένα και γίνεται επιλογή των περιόδων ελέγχου. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το θεωρητικό μοντέλο για τη σύγκριση της απόδοσης του υπό μελέτη πλοίου, στο κεφάλαιο 3. Τα αποτελέσματα του μοντέλου αυτού παρουσιάζονται και αναλύονται στο κεφάλαιο 4, υπό μορφή δεικτών απόδοσης KPI. Τέλος, εφαρμόζεται ένα στατιστικό μοντέλο που χρησιμοποιεί μοντέλα πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης για την πρόβλεψη της ισχύος του πλοίου σε κάθε περίοδο ελέγχου, στο κεφάλαιο 5. Τα τελικά συμπεράσματα της εργασίας παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 6.



Εικόνα 2. Σχηματική ανάλυση εργασίας

## 2. Παρουσίαση Δεδομένων

### 2.1. Πλοίο Υπό Μελέτη

Το υπό μελέτη πλοίο είναι ένα Cape Size Bulk carrier με έτος κατασκευής το 2008. Τα κύρια χαρακτηριστικά του φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Μέγεθος	Σύμβολο	Μονάδα	Τιμή
Συνολικό Μήκος	LOA	m	287.5
Μήκος μεταξύ καθέτων	LBP	m	279
Κοίλο	D	m	24.1
Πλάτος	B	m	45
Μέγιστη Ισχύς Κύριας Μηχανής	P <sub>ME</sub>	kW	17091.7
Ταχύτητα Υπηρεσίας	V <sub>s</sub>	kts	14.6

Πίνακας 1. Κύρια χαρακτηριστικά του πλοίου υπό μελέτη

Επιπλέον, στα δεδομένα παρατηρείται ότι το πλοίο λειτουργεί ως επί το πλείστον σε τρεις καταστάσεις φόρτωσης. Τα χαρακτηριστικά των τριών καταστάσεων φόρτωσης φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

	T (m)	Trim (m)	Displacement (mt)	Cb
Μέγιστο Βύθισμα, TSC	17.7	0	180000	0.8507
Βύθισμα Σχεδίασης, TD	15.5	-1.3	167721	0.8408
Βύθισμα Ερματισμού, TB	9.62	-2.361	98765.5	0.8101

Πίνακας 2. Χαρακτηριστικά των καταστάσεων φόρτωσης

Οι δοκιμές θαλάσσης (Sea Trials) είναι η τελική διαδικασία ελέγχου της σωστής λειτουργίας των ζωτικότερων μηχανημάτων του πλοίου, όπως η κύρια μηχανή, βοηθήματα πλοήγησης κ.α. Κατά τη διάρκεια τους πραγματοποιούνται μετρήσεις για τα διάφορα μηχανήματα και ιδιαίτερα παράγονται οι καμπύλες Ισχύος-Ταχύτητας που αντιπροσωπεύουν την λειτουργία του πλοίου σε διάφορες καταστάσεις φόρτωσης.

Ομοίως και για το πλοίο υπό μελέτη στην παρούσα εργασία, δίνονται από την κατασκευάστρια εταιρία οι καμπύλες Sea Trials για τις καταστάσεις Scantling Draft και Ballast Draft. Στη συνέχεια χρησιμοποιείται ο συντελεστής Αγγλικού Ναυαρχείου για να παραχθεί η καμπύλη για Design Draft, με βάση την κατάσταση Scantling Draft.

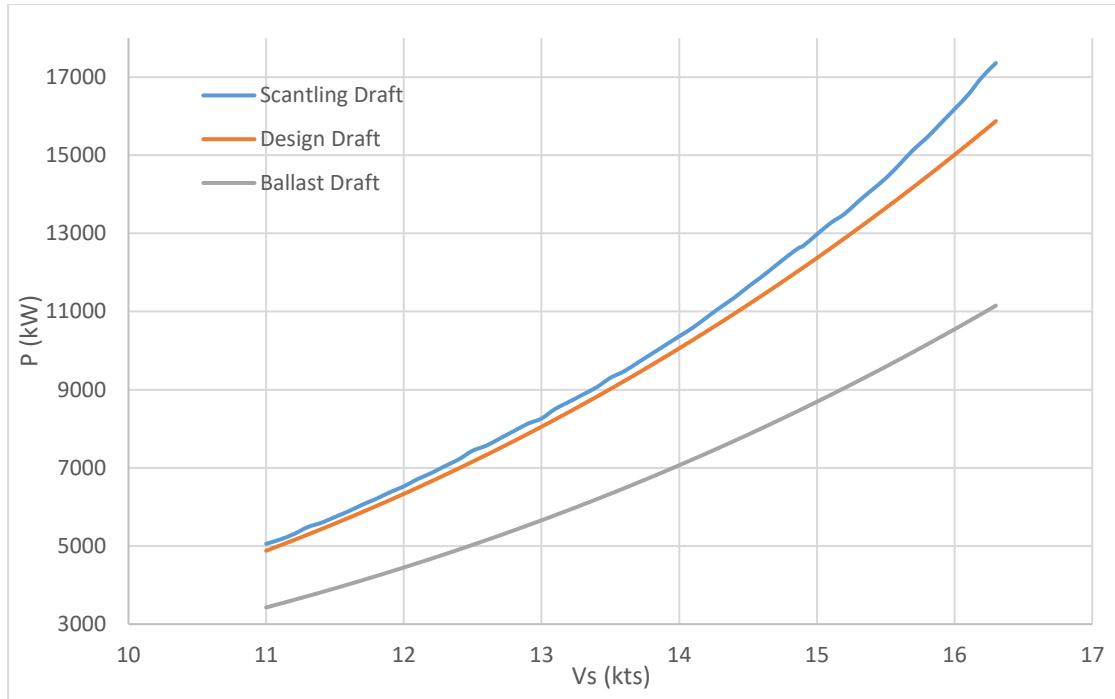
Ο συντελεστής Αγγλικού Ναυαρχείου:  $C_{AD} = \frac{\Delta^{2/3} V^3}{P}$ ,

Όπου Δ: το εκτόπισμα του πλοίου (mt),

V: η ταχύτητα μέσα στο νερό  $s_{tw}$ , (m/s),

P: η ισχύς της Κ.Μ. στο δεδομένο εκτόπισμα για να επιτευχθεί η ταχύτητα V<sub>s</sub> (kW)

Ο συντελεστής Αγγλικού Ναυαρχείου θεωρείται σταθερός για το πλοίο και υπολογίζεται με βάση το σημείο εγγύησης όπως αυτό δίνεται στα Sea Trials. Χρησιμοποιώντας το εκτόπισμα του πλοίου για το βύθισμα σχεδίασης παράγεται η καμπύλη. Στο παρακάτω γράφημα φαίνονται οι καμπύλες Sea Trials του πλοίου για τρία βυθίσματα ballast, design και scantling με τη μορφή  $P=c \cdot V_s^n$



Εικόνα 3. Καμπύλες Αναφοράς (Sea Trials)

## 2.2. Απόκτηση και Ανάλυση Δεδομένων

Η αξιολόγηση της απόδοσης ενός πλοίου βασίζεται στην ανάλυση των δεδομένων λειτουργίας του πλοίου που μπορούν να ληφθούν. Τα δεδομένα συλλέγονται σύμφωνα με τις ενδείξεις των διάφορων αισθητήρων που υπάρχουν στο πλοίο και από παρατηρήσεις του πληρώματος στην περίπτωση των καιρικών συνθηκών.

Ο αρχιμηχανικός του πλοίου προετοιμάζει καθημερινά μία αναφορά η οποία περιλαμβάνει όλα τα απαραίτητα δεδομένα που θα δώσουν μια αντιπροσωπευτική εικόνα για την λειτουργία του πλοίου. Οι αναφορές αυτές ονομάζονται συνήθως Noon Reports και περιλαμβάνουν τουλάχιστον τα εξής δεδομένα:

- Μέση ταχύτητα ως προς το έδαφος
- Βύθισμα
- Μέση ενδεικνύομενη ισχύς κύριας μηχανής
- Μέση ένδειξη στροφών της μηχανής
- Συνολική κατανάλωση κύριας μηχανής ανά κατηγορία καυσίμου
- Propeller Slip
- Καιρικές συνθήκες (κατεύθυνση και δύναμη ανέμου, κυμάτων και κατάσταση θάλασσας)
- Θέση πλοίου
- Εκτιμώμενη ώρα άφιξης στο επόμενο λιμάνι
- Απόθεμα καυσίμων, λιπαντικών και γλυκού νερού

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται δύο τρόποι εκτίμησης της απόδοσης του πλοίου, οι οποίοι βασίζονται στα δεδομένα που συλλέγονται από τα Noon Reports.



Παρακάτω παρουσιάζονται τα ακατέργαστα δεδομένα στα οποία βασίζεται ο κάθε τρόπος αξιολόγησης.

Μέγεθος	Σύμβολο	Μονάδα
Ταχύτητα προς το έδαφος	Vg	kts
Ισχύς Κύριας Μηχανής	PME	kW
Πρωραίο Βύθισμα	TF	m
Πρυμναίο Βύθισμα	TA	m
Κατεύθυνση Πλοίου	$\psi_0$	Comp. points
Δύναμη Ανέμου	vwt	Bft
Κατεύθυνση Ανέμου	$\psi_{wt}$	Comp. points
Σημαντικό Ύψος Κύματος	Hs	m
Κατεύθυνση Κύματος	$\psi_w$	Comp. points
Ταχύτητα Ρευμάτων	sc	kts
Κατεύθυνση Ρευμάτων	$\psi_c$	deg

Πίνακας 3. Βασικά επιχειρησιακά δεδομένα

Τα παραπάνω δεδομένα επεξεργάζονται κατά τις ανάγκες του κάθε μοντέλου. Ενδεικτικά υπολογίζεται το μέσο βύθισμα  $T_M$ , η διαγωγή trim, η δύναμη ανέμου σε m/s και οι κατευθύνσεις σε deg.

Η δύναμη του ανέμου μετατρέπεται σε ταχύτητα σε κόμβους σύμφωνα με τον Πίνακα 4 που αντιστοιχεί την δύναμη ανέμου σε κλίμακα Bft με τη μέση τιμή της ταχύτητας ανέμου σε kts. Στη συνέχεια γίνεται μετατροπή της ταχύτητας ανέμου σε m/s

Bft. scale	Aver. wind speed [kts]
0	0.5
1	2
2	5
3	8.5
4	13.5
5	19
6	24.5
7	30.5
8	37
9	44
10	51.5

Πίνακας 4. Πίνακας Μετατροπής Bft σε kts.

### 2.3. Στατιστική Ανάλυση Περιόδου Λειτουργίας

Στο παρακάτω σχεδιάγραμμα παρουσιάζεται το προφίλ λειτουργίας του πλοίου για το συνολικό διάστημα των διαθέσιμων δεδομένων:



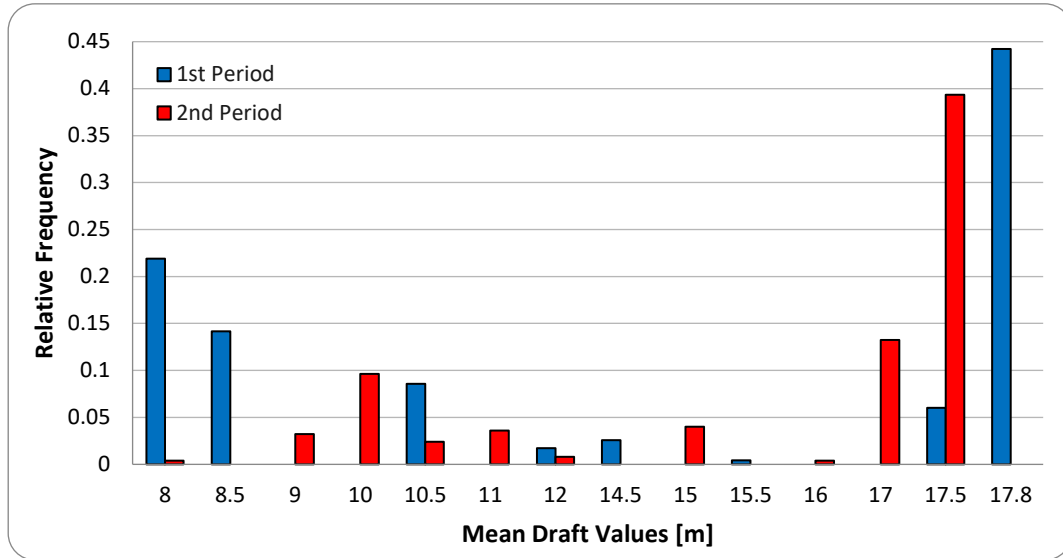
Εικόνα 4. Προφίλ Λειτουργίας του Υπό Μελέτη Πλοίου

Θα επιλεγθούν για εξέταση και σύγκριση οι περίοδοι 28/8/2020-6/9/2021, μια περίοδος με 234 μέρες ταξιδιού, και 7/4/2023-10/4/2023, μια περίοδος με 250 μέρες



ταξιδιού. Τα παραπάνω επιλέγονται θεωρώντας ότι για ένα χρόνο περίπου η γάστρα του πλοίου παραμένει σε σχετικά καθαρή κατάσταση, οπότε οποιαδήποτε απόκλιση από την κατάσταση αναφοράς οφείλεται στην επίδραση των καιρικών φαινομένων.

Παρακάτω εμφανίζονται σε μορφή ραβδογράμματος η σχετική συχνότητα των μεγεθών: Μέσο βύθισμα, Διαγωγή, Μέση Ημερήσια Ταχύτητα, Μέση Ημερήσια Ισχύς Κ.Μ. Στον οριζόντιο άξονα βρίσκεται το άνω όριο του εύρους και στον κατακόρυφο άξονα η σχετική συχνότητα εμφάνισης τιμών στο εύρος αυτό.

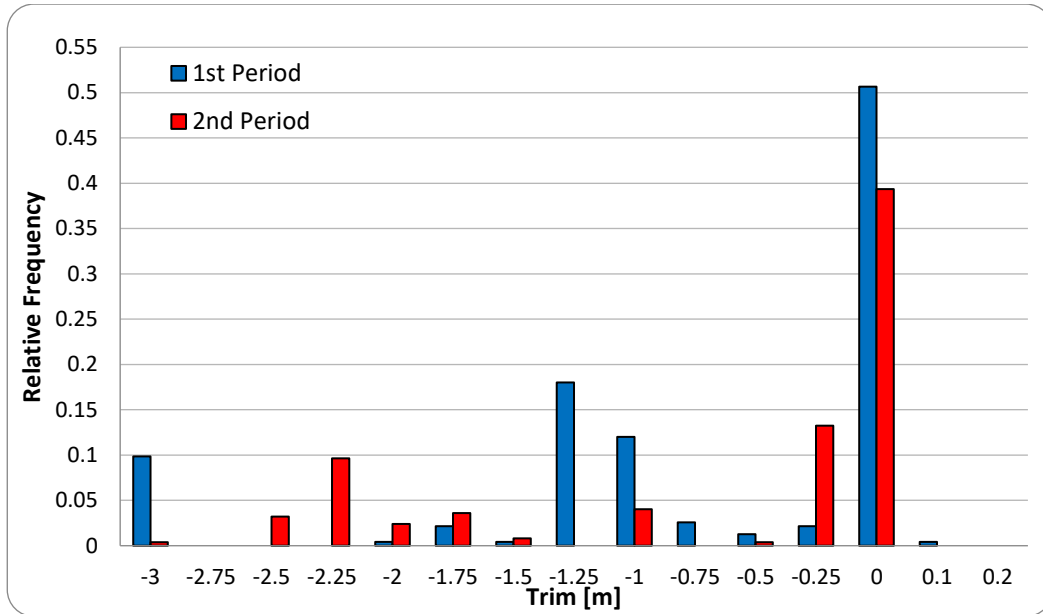


Εικόνα 5. Κατανομή Μέσου Βυθίσματος

	1η Περίοδος	2η Περίοδος
<b>Μέση Τιμή</b>	13.29m	13.37m
<b>Τυπική Απόκλιση</b>	4.61m	3.82m

Πίνακας 5. Στατιστικά Στοιχεία Μέσου Βυθίσματος

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε την πόλωση της λειτουργίας του πλοίου στις καταστάσεις Scantling και Ballast και για τις δύο περιόδους λειτουργίας του πλοίου. Η κατανομή του μέσου βυθίσματος στις δύο περιόδους είναι σχετικά διαφορετική και με κατάλληλο φιλτράρισμα των δεδομένων θα προκύψουν σημεία δεδομένων και για τις τρεις προαναφερθείσες καταστάσεις φόρτωσης.

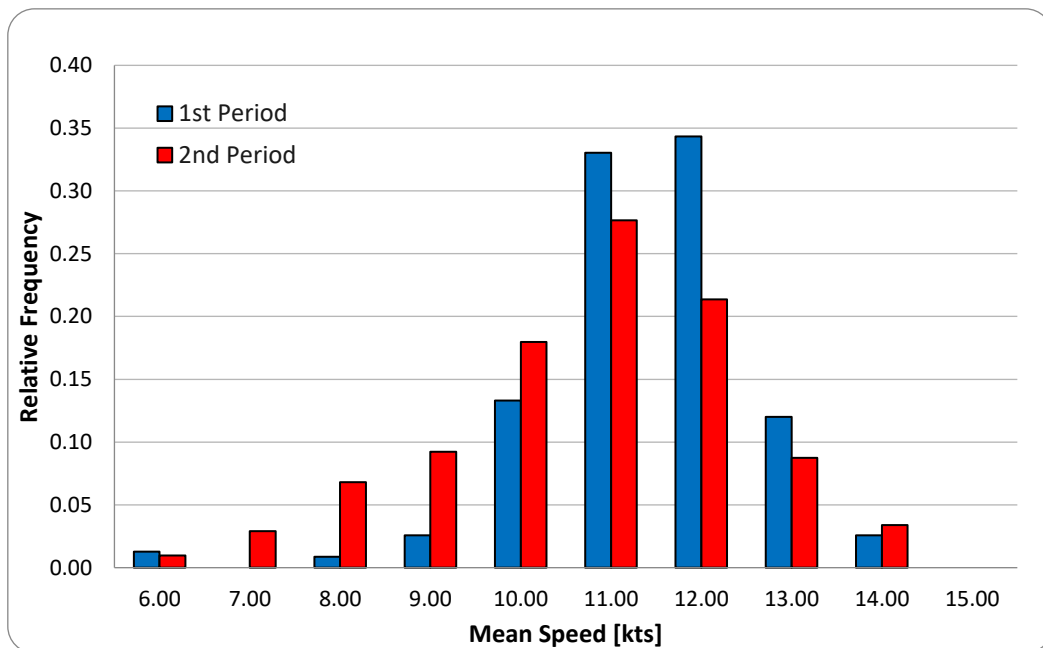


Εικόνα 6. Κατανομή Διαγωγής

	1η Περίοδος	2η Περίοδος
Μέση Τιμή	-0.85m	-0.92m
Τυπική Απόκλιση	1.15m	0.97m

Πίνακας 6. Στατιστικά Στοιχεία Διαγωγής

Στο παραπάνω γράφημα παρατηρείται ότι η κατανομή της διαγωγής για τις δύο περιόδους είναι αρκετά διαφορετική για τις καταστάσεις Ballast και Design, όπου  $trim < 0$ . Όμως στην πλειοψηφία παρατηρείται διαγωγή κοντά στο 0, η οποία συνάδει στην κατάσταση Scantling.

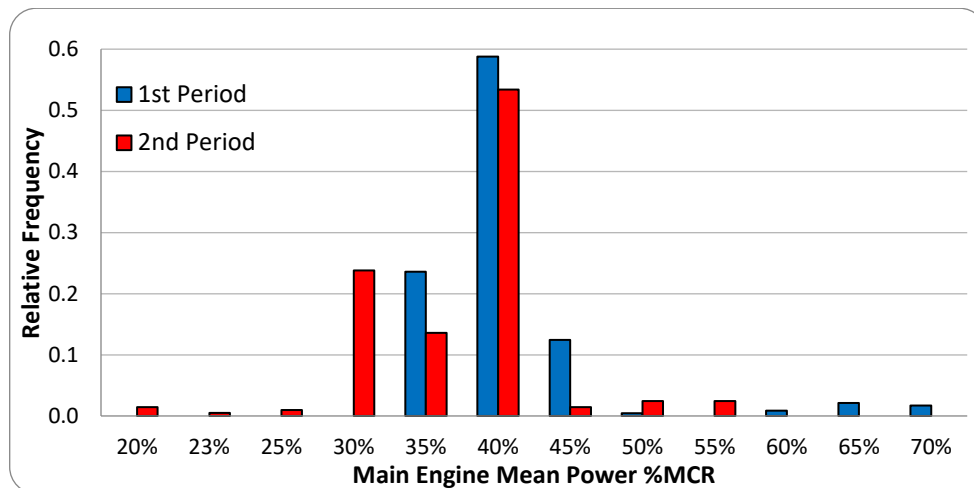


Εικόνα 7. Κατανομή Μέσης Ταχύτητας

	1η Περίοδος	2η Περίοδος
<b>Μέση Τιμή</b>	10.91kts	10.30kts
<b>Τυπική Απόκλιση</b>	1.22kts	1.61kts

Πίνακας 7. Στατιστικά Στοιχεία Μέσης Ταχύτητας

Στο παραπάνω γράφημα παρουσιάζεται η κατανομή της μέσης ταχύτητας του πλοίου ως προς το έδαφος. Η κατανομή είναι παρόμοια και για τις δύο περιόδους. Όμως όπως είναι εμφανές και από τα στατιστικά στοιχεία υπάρχει μια μικρή πτώση της μέσης ταχύτητας στη δεύτερη περίοδο κάτι που μπορεί να οφείλεται στην αλλαγή των απαιτήσεων από τους ναυλωτές. Επιπλέον, συγκρίνοντας με τις καμπύλες αναφοράς, παρατηρούμε αρκετές τιμές κάτω από τους 11kts, που είναι η ελάχιστη τιμή ταχύτητας για την οποία υπάρχουν τιμές στις καμπύλες αναφοράς.



Εικόνα 8. Κατανομή Μέσης Ισχύος Κύριας Μηχανής

	1η Περίοδος	2η Περίοδος
<b>Μέση Τιμή</b>	39.0%	34.5%
<b>Τυπική Απόκλιση</b>	6.0%	5.2%

Πίνακας 8. Στατιστικά Στοιχεία της Μέσης Ισχύος Κύριας Μηχανής ως Ποσοστό του MCR

Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ότι το πλοίο λειτουργεί σε χαμηλή ισχύ ως προς το MCR της Κύριας Μηχανής. Από τα στατιστικά στοιχεία είναι εμφανής μια σημαντική μείωση της ισχύος για τη 2<sup>η</sup> περίοδο σε σχέση με την 1<sup>η</sup>.

### 3. Διόρθωση Ισχύος ως προς την Επίδραση Καιρικών Φαινομένων

Τα δεδομένα που συλλέγονται από τα συστήματα μέτρησης είναι ενδεικτικά για τη λειτουργία του τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή και για αυτό το λόγο είναι επηρεασμένα από τα καιρικά φαινόμενα στα οποία βρίσκεται το πλοίο. Ο άνεμος, τα ανεμογενή και θαλάσσια κύματα καθώς και τα υποθαλάσσια ρεύματα επηρεάζουν και αυξάνουν ή μειώνουν την απαιτούμενη ισχύ που πρέπει να αποδοθεί στην έλικα για την επίτευξη της απαιτούμενης ταχύτητας. Ο υπολογισμός των επιπρόσθετων αντιστάσεων που δέχεται το πλοίο έχουν αποτελέσει μεγάλο θέμα μελέτης για την επιστήμη της ναυπηγικής. Υπάρχουν μοντέλα τα οποία μπορούν να εκτιμήσουν με ικανοποιητική ακρίβεια την επιπρόσθετη αντίσταση λόγω ανέμου και κυματισμών, ανάλογα τα φυσικά χαρακτηριστικά των καιρικών φαινομένων και τα χαρακτηριστικά του πλοίου. Στην παρούσα εργασία θα ακολουθηθεί η διαδικασία που περιγράφεται από την ITTC 2021 [6] για τον υπολογισμό της αντίστασης ανέμου και η εμπειρική μέθοδος STAWAVE-2 για τον υπολογισμό της αντίστασης λόγω κυματισμών.

#### 3.1. Πρόσθετη Αντίσταση Ανέμου

Παρακάτω ακολουθεί η διαδικασία που περιγράφεται στην ITTC 2021 [6] για τον υπολογισμό της πρόσθετης ισχύος  $P_w$  λόγω της επίδρασης του ανέμου. Σε αυτό το σημείο είναι απαραίτητο να καθοριστεί η πρόσθετη αντίσταση λόγω ανέμου στη τυχαία σχετική γωνία ανέμου και πλοίου,  $R_{rw}$  και στη μηδενική σχετική γωνία  $R_{0w}$ .

Η πρόσθετη ισχύς λόγω ανέμου  $P_{w,corr}$  δίνεται από τον τύπο:

$$P_{w,corr} = \frac{(R_{rw} - R_{r0})v_g}{\eta_{DO}} * \frac{1}{1000} \text{ (kW)} \quad (3.5)$$

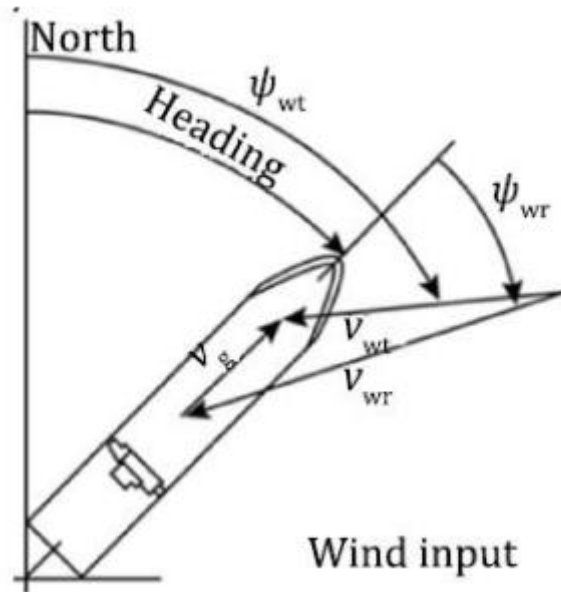
$$\text{όπου : } R_{rw} = 0.5 * \rho_A * v_{wr}^2 * A * C_{rw}(\psi_{wr}) \text{ (N)} \quad (3.6)$$

$$R_{0w} = 0.5 * \rho_A * v_g^2 * A * C_{rw}(0) \text{ (N)} \quad (3.7)$$

Για την εφαρμογή των παραπάνω σχέσεων οι ταχύτητες μετατρέπονται σε m/s.

Παρατίθενται τα δεδομένα που λαμβάνονται από noon report και χρησιμοποιούνται για τη διόρθωση της αντίστασης λόγω ανέμου.

- $V_{wt}$ : Πραγματική ταχύτητα ανέμου (m/s)
- $\psi_{wt}$ : Πραγματική γωνία ανέμου (deg)
- Heading ( $\psi_0$ ): Κατεύθυνση πλοίου (deg)
- $v_g$ : Ταχύτητα πλοίου προς το έδαφος (m/s)
- current speed ( $s_c$ ): ταχύτητα ρεύματος (m/s)
- current direction( $\psi_c$ ): πραγματική γωνία ρεύματος (deg)
- $T_{mean}(T)$ : Μέσο βύθισμα πλοίου (m)



Εικόνα 9. Σύμβαση Κατευθύνσεων Κατά την Πλεύση

Παρατίθενται τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για κανονικοποίηση στις καταστάσεις σχεδίασης του πλοίου.

- $T_{ref}$ : Βύθισμα σχεδίασης για τρεις καταστάσεις (Ballast, Design, Scantling) (m)
- $A_{ref}$ : εγκάρσια προβεβλημένη επιφάνεια ( $m^2$ )

Υπολογίζεται η ταχύτητα του πλοίου στο νερό,  $s_{tw}$  προσθέτοντας αλγεβρικά την συνιστώσα της ταχύτητας του ρεύματος που είναι συγγραμμική με την ταχύτητα του πλοίου.

$$\text{Σχετική γωνία κατεύθυνσης ρεύματος } (\psi_{rc}): \psi_{rc} = \psi_c - \psi_{wt} \text{ (deg)} \quad (3.8)$$

$$s_{tw} = s_g + s_c * \cos(\psi_{rc}) \text{ (kts)} \quad (3.9)$$

Στη συνέχεια υπολογίζεται η ταχύτητα του ανέμου στο ύψος αναφοράς. Εφόσον δεν γνωρίζουμε το ύψος αναφοράς για τον συντελεστή αντίστασης  $C_{da}$ , θα θεωρηθεί ότι όλα τα μεγέθη αναφέρονται στο ίδιο ύψος.

$$\text{Σχετική ταχύτητα ανέμου: } v_{wr} = \sqrt{v_{wt}^2 + v_g^2 + 2 * v_{wt} v_g \cos(\psi_{wt} - \psi_0)} \text{ (kts)} \quad (3.10)$$

$$\psi_{wr} = \tan^{-1} \left\{ \frac{v_{wt} \sin(\psi_{wt} - \psi_0)}{v_g + v_{wt} \cos(\psi_{wt} - \psi_0)} \right\}, \text{ for } v_g + v_{wt} \cos(\psi_{wt} - \psi_0) \geq 0 \text{ (deg)} \quad (3.11)$$

$$\psi_{wr} = \tan^{-1} \left\{ \frac{v_{wt} \sin(\psi_{wt} - \psi_0)}{v_g + v_{wt} \cos(\psi_{wt} - \psi_0)} \right\} + 180, \text{ for } v_g + v_{wt} \cos(\psi_{wt} - \psi_0) < 0 \quad (3.12)$$

Το εμβαδόν  $A$  αντιστοιχεί στο εμβαδόν της εγκάρσιας προβεβλημένης επιφάνειας στην εκάστοτε κατάσταση. Βρίσκεται από τον παρακάτω τύπο

$$A = A_{ref} + \Delta T(m^2) \quad (3.13)$$

όπου  $A_{ref}$  είναι το εμβαδόν της εγκάρσιας προβεβλημένης επιφάνειας στην κάθε κατάσταση σχεδίασης και  $\Delta T = T_{ref} - T(m)$  είναι η διαφορά από το βύθισμα σχεδίασης.

$\rho_A$  η πυκνότητα αέρα λαμβάνεται ίση με  $1.225 \text{kg/m}^3$

$\eta_{DO}$ ,  $\eta_{DM}$ : συντελεστής απόδοσης πρόωσης στην ήρεμη και στην παρούσα κατάσταση, λαμβάνεται ίσος με 0.7

Για τους υπολογισμούς και την συσχέτιση της κάθε κατάστασης με μία κατάσταση σχεδίασης έχει οριστεί το όριο  $abs\left(\frac{T - T_{ref}}{T_{ref}}\right) < 0.1$  (3.14)

### 3.1.1 Υπολογισμός Συντελεστών Αντίστασης Ανέμου (Μέθοδος Fujiwara)

Οι συντελεστές αντίστασης του πλοίου στον άνεμο υπολογίζονται σύμφωνα με τη μέθοδο Fujiwara. Πρόκειται για μια επαναληπτική διαδικασία που αναπτύχθηκε από τους Fujiwara et al (2005).

$$C_{DA} = C_{LF} \cos(\psi_{wr}) + C_{XLI} * (\sin(\psi_{wr}) - 0.5 * \sin(\psi_{wr}) \cos^2(\psi_{wr})) * \sin(\psi_{wr}) * \cos(\psi_{wr}) + C_{ALF} * \sin(\psi_{wr}) \cos^3(\psi_{wr}) \quad (3.15)$$

Όπου:

Για  $0 \leq \psi_{wr} \leq 90$ ,

$$C_{LF} = \beta_{10} + \beta_{11} \frac{A_{YV}}{L_{OAB}} + \beta_{11} \frac{C_{MC}}{L_{OA}} \quad (3.16)$$

$$C_{XLI} = \delta_{10} + \delta_{11} \frac{A_{YV}}{L_{OA} h_{BR}} + \delta_{12} \frac{A_{XV}}{B h_{BR}} \quad (3.17)$$

$$C_{ALF} = \varepsilon_{10} + \varepsilon_{11} \frac{A_{OD}}{A_{YV}} + \varepsilon_{12} \frac{B}{L_{OA}} \quad (3.18)$$

Για  $90 \leq \psi_{wr} \leq 180$ ,

$$C_{LF} = \beta_{20} + \beta_{21} \frac{B}{L_{OA}} + \beta_{22} \frac{h_c}{L_{OA}} + \beta_{23} \frac{A_{OD}}{L_{OA}^2} + \beta_{24} \frac{A_{XV}}{B h_{br}} \quad (3.19)$$

$$C_{XLI} = \delta_{20} + \delta_{21} \frac{B}{L_{OA} h_{BR}} + \delta_{22} \frac{A_{XV}}{A_{YV}} + \delta_{23} \frac{B}{L_{OA}} + \delta_{24} \frac{A_{XV}}{B^2} \quad (3.20)$$

$$C_{ALF} = \varepsilon_{20} + \varepsilon_{21} \frac{A_{OD}}{A_{YV}} \quad (3.21)$$

Για  $\psi_{wr} = 90$ ,

$$C_{DA|\psi_{wr}=90(deg)} = \frac{1}{2}(C_{DA|\psi_{wr}=90(deg)-\mu} + C_{DA|\psi_{wr}=90(deg)+\mu} \quad (3.22)$$

Όπου,

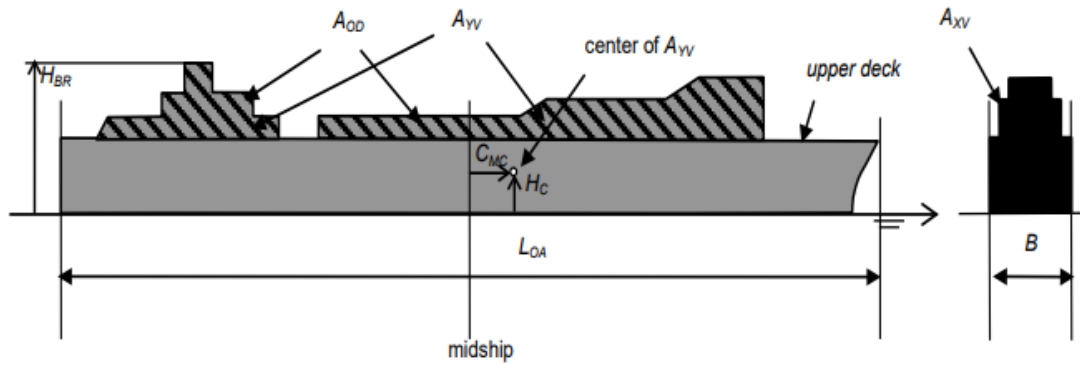
- $A_{OD}$  : η πλευρική προβεβλημένη επιφάνεια των υπερκατασκευών
- $A_{XV}$  : η επιφάνεια της μέγιστης εγκάρσιας όψης που είναι εκτεθειμένη στον άνεμο
- $A_{YV}$  : η πλευρική προβεβλημένη επιφάνεια πάνω από την ίσαλο πλεύσης
- $B$  : το πλάτος του πλοίου
- $C_{DA}$  : συντελεστής αντίστασης ανέμου
- $C_{MC}$  : 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
- $\mu$  : εύρος εξομάλυνσης, λαμβάνεται ίσο με 100
- $\psi_{WR}$ : η σχετική κατεύθυνση του ανέμου
- $\beta, \delta, \varepsilon$  : αδιάστατοι συντελεστές, οι τιμές των οποίων λαμβάνονται από τον παρακάτω πίνακα:

Table F-2 Non-dimensional parameters

	$i$	$j$				
		0	1	2	3	4
$\beta_{ij}$	1	0.922	-0.507	-1.162	-	-
	2	-0.018	5.091	-10.367	3.011	0.341
$\delta_{ij}$	1	-0.458	-3.245	2.313	-	-
	2	1.901	-12.727	-24.407	40.310	5.481
$\varepsilon_{ij}$	1	0.585	0.906	-3.239	-	-
	2	0.314	1.117	-	-	-

Εικόνα 10. Αδιάστατοι Συντελεστές της Μεθόδου Fujiwara[7]

Τα εμβαδά που αναφέρονται παραπάνω παρουσιάζονται σχηματικά στο παρακάτω σχήμα που παρέχεται από την ITTC-2021, ως επεξήγηση για την εφαρμογή της μεθόδου Fujiwara.



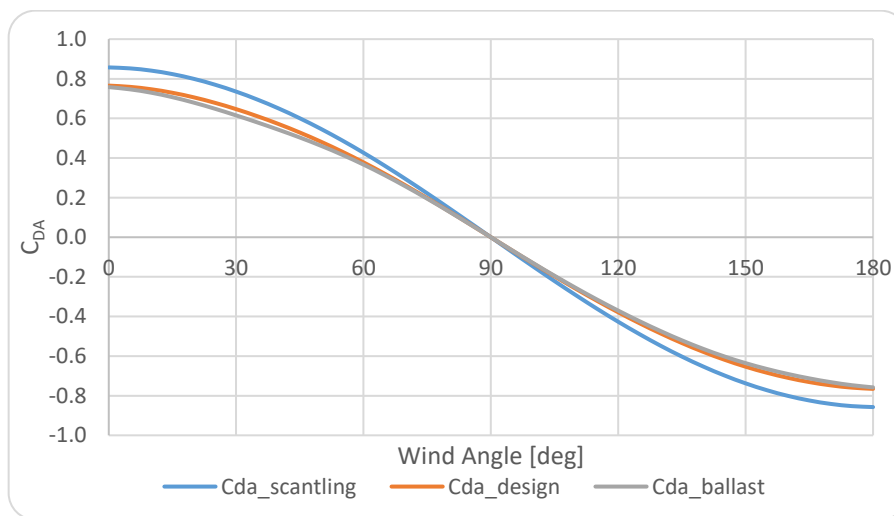
Εικόνα 11. Σχηματική απεικόνιση των παραμέτρων της μεθόδου Fujiwara

Τα παραπάνω εμβαδά μπορούν να μετρηθούν από το σχέδιο General Arrangement του πλοίου υπό μελέτη, καθώς πρόκειται για τις προβεβλημένες επιφάνειες. Τα αποτελέσματα για το πλοίο υπό μελέτη παρουσιάζονται στον Πίνακα 8. Για τον υπολογισμό έχουν ληφθεί υπόψιν τα χαρακτηριστικά των τριών καταστάσεων που παρατίθενται προηγουμένως στον Πίνακα 2.

	Ballast		Design		Scantling	
$A_{OD}$ [m <sup>2</sup> ]	914.63		914.63		914.63	
$A_{XV}$ [m <sup>2</sup> ]	1149.69		1149.69		843.99	
$A_{YV}$ [m <sup>2</sup> ]	4997.64		3687.25		2710.09	
$C_{MC}$ [m <sup>2</sup> ]	-4.98		28.40		-10.26	
$h_{BR}$ [m]	40.37		34.00		31.20	
$h_c$ [m]	-4.08		-3.60		4.97	
Angle	[0,90]	[90,180]	[0,90]	[90,180]	[0,90]	[90,180]
$C_{LF}$	0.7579	0.9578	0.7655	1.1761	0.8573	0.7749
$C_{XLI}$	-0.3915	0.5839	-0.1305	0.2926	-0.0479	0.059
$C_{ALF}$	0.2438	0.5184	0.3028	0.5911	0.3838	0.691

Πίνακας 9. Συντελεστές Fujiwara και Εμβαδά Επιφανειών

Τα αποτελέσματα της μεθόδου Fujiwara για τις τρεις καταστάσεις παρουσιάζονται παρακάτω σε μορφή πίνακα και γραφήματος:



Εικόνα 12. Κατανομή συντελεστή CDA για γωνίες πρόσπτωσης [0°, 180°] - Καταστάσεις Ballast, Design & Scantling

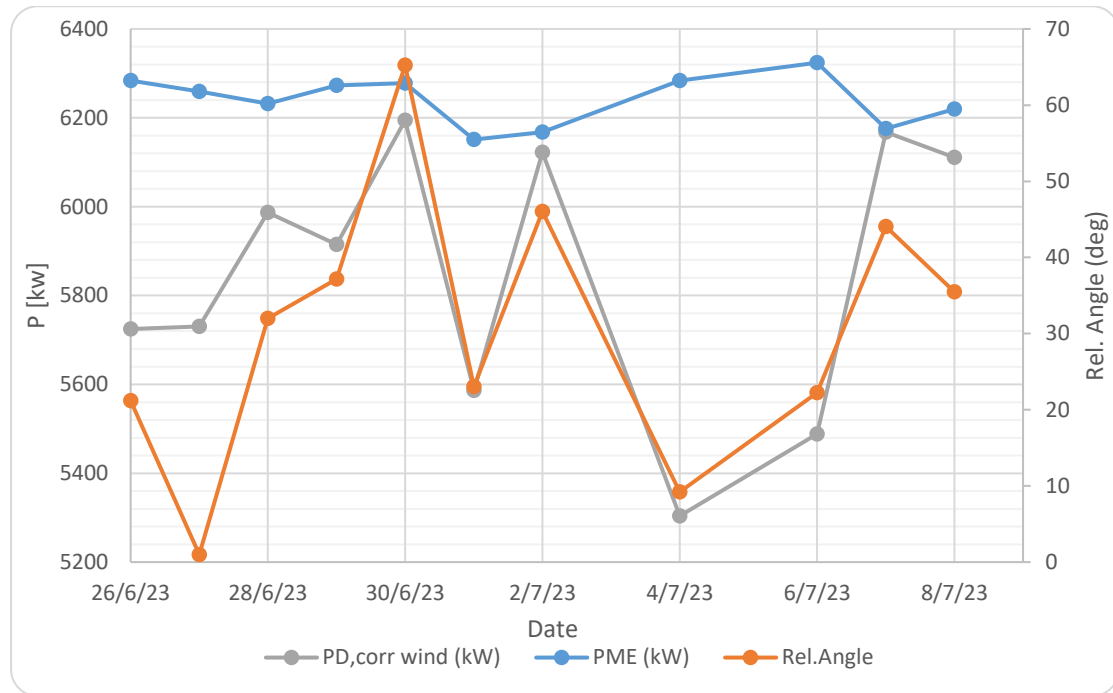


$\varphi$ (deg)	Cda_scantling	Cda_design	Cda_ballast
0	0.8573	0.7655	0.7579
5	0.8524	0.7591	0.7466
10	0.8411	0.7470	0.7296
15	0.8234	0.7293	0.7070
20	0.7997	0.7063	0.6797
25	0.7702	0.6786	0.6487
30	0.7352	0.6467	0.6150
35	0.6951	0.6109	0.5796
40	0.6501	0.5715	0.5425
45	0.6005	0.5285	0.5034
50	0.5465	0.4819	0.4615
55	0.4884	0.4317	0.4161
60	0.4264	0.3778	0.3666
65	0.3609	0.3205	0.3129
70	0.2925	0.2602	0.2554
75	0.2216	0.1974	0.1945
80	0.1488	0.1327	0.1311
85	0.0747	0.0667	0.0660
90	0.0000	0.0000	0.0000
95	-0.0747	-0.0667	-0.0660
100	-0.1488	-0.1327	-0.1311
105	-0.2216	-0.1975	-0.1946
110	-0.2925	-0.2604	-0.2559
115	-0.3611	-0.3211	-0.3146
120	-0.4269	-0.3791	-0.3706
125	-0.4893	-0.4342	-0.4238
130	-0.5481	-0.4861	-0.4739
135	-0.6026	-0.5343	-0.5207
140	-0.6527	-0.5785	-0.5635
145	-0.6978	-0.6183	-0.6019
150	-0.7377	-0.6535	-0.6357
155	-0.7722	-0.6841	-0.6650
160	-0.8010	-0.7099	-0.6905
165	-0.8241	-0.7311	-0.7125
170	-0.8413	-0.7476	-0.7315
175	-0.8524	-0.7592	-0.7469
180	-0.8573	-0.7655	-0.7579

Πίνακας 10. Αποτελέσματα Μεθόδου Fujiwara

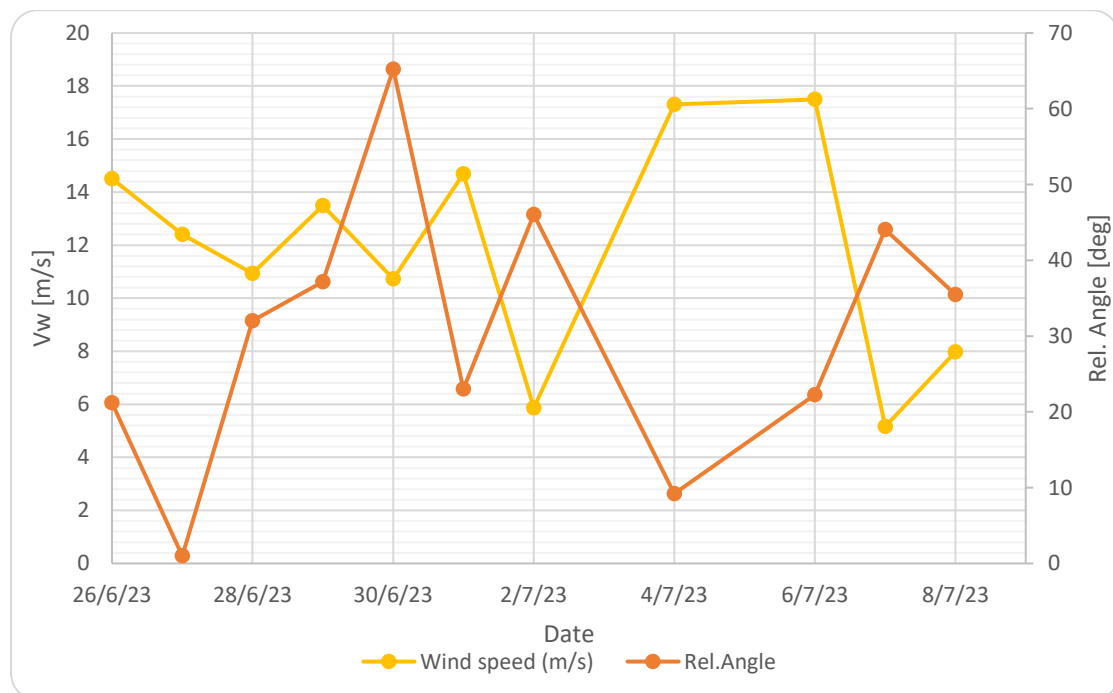
### 3.1.2. Αποτελέσματα Διόρθωσης λόγω Ανέμου

Παρακάτω παρουσιάζεται για μια ενδεικτική περίοδο η διορθωμένη ισχύς λόγω αντίστασης ανέμου και η σχετική γωνία ανέμου.



Εικόνα 13. Επίδραση Ανέμου στην Ισχύ

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η σχηματική απεικόνιση του ανέμου ως προς την ταχύτητα και την σχετική γωνία για το ίδιο χρονικό διάστημα που αναφέρεται και η παραπάνω Εικόνα 12.



Εικόνα 14. Μεταβολή Ταχύτητας και Σχετικής Γωνίας του Ανέμου

### 3.2. Πρόσθετη Αντίσταση Κυματισμών

Η πρόσθετη αντίσταση λόγω κυματισμών υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την εμπειρική μέθοδο STAWAVE-2 του Boom (2013). Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε για την προσέγγιση της συνάρτησης μεταφοράς της αύξησης της μέσης αντίστασης όταν το πλοίο συναντά πρωαία κύματα και βασίζεται στις κύριες διαστάσεις του πλοίου και την ταχύτητα του.

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 απόκριση του πλοίου εξαιτίας της επίδρασης του κυματισμού,  $R_{AWML}$ . Συνολικά η αντίσταση κυματισμού δίνεται από το άθροισμα:

$$R_{wave} = R_{AWRL} + R_{AWML} \quad (3.23)$$

Οι δύο συνιστώσες υπολογίζονται ως εξής:

$$R_{AWML} = 4\rho_S * g * \zeta_\alpha^2 * B^2 / L_{PP} \bar{r}_{aw}(\omega) \quad (3.24)$$

$$\text{όπου } \bar{r}_{aw}(\omega) = \bar{\omega}^{b_1} \exp\left\{\frac{b_1}{d_1}(1 - \bar{\omega}^{d_1})\right\} a_1 Fr^{1.5} \exp(-350Fr) \quad (3.25)$$

$$\bar{\omega} = \frac{\sqrt{\frac{L_{PP}^3}{g}} \sqrt{k_{yy}}}{1.17Fr^{-0.143}} \omega_4 \quad (3.26)$$

$$a_1 = 60.3 C_B^{1.34} \quad (3.27)$$

$$b_1 = \begin{cases} 11.0 & \text{for } \bar{\omega} < 1 \\ -8.50 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (3.28)$$

$$d_1 = \begin{cases} 14.0 & \text{for } \bar{\omega} < 1 \\ -566 \left(\frac{L_{PP}}{B}\right)^{-2.66} & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (3.29)$$

$$R_{AWRL} = \frac{1}{2} * \rho_S * g * \zeta_\alpha^2 * B * a_1(\omega) \quad (3.30)$$

$$a_1(\omega) = \frac{\pi^2 l_1^2 (1.5kTM)}{\pi^2 l_1^2 (1.5kTM) + K_1^2 (1.5kTM)} f_1 \quad (3.31)$$

$$f_1 = 0.692 * \left(\frac{v_s}{\sqrt{TMg}}\right)^{0.769} + 1.81 C_B^{6.95} \quad (3.32)$$

Η μέθοδος βρίσκει εφαρμογή μόνο για πλοία με χαρακτηριστικά στο παρακάτω εύρος:

- 50 m < LPP < 400 m
- 4.0 m < LPP/B < 9.0m
- 2.2 < B/TM < 9
- 0.1 < Fr < 0.30
- 0.39 < CB < 0.9

Επιπλέον, για τη μέθοδο STAWAVE-2 η μέση αντίσταση λόγω τυχαίων κυματισμών  $R_{AWL}$  υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση και η εφαρμογή της περιορίζεται σε πρωραίους κυματισμούς με γωνία πρόσπτωσης στο εύρος  $\pm 45^\circ$ .

$$R_{AWL} = 2 \int_0^\infty \frac{R_{wave}(\omega; V_s)}{\zeta_a^2} S_\eta(\omega) d\omega \quad (3.33)$$

Όπου  $S_\eta$  το κυματικό φάσμα κατά Jonswap, το οποίο περιγράφεται από την επόμενη σχέση και χρησιμοποιείται για ανοιχτές θάλασσες σε κατάσταση κυματισμού.

$$S_\eta(\omega) = \frac{\alpha'' * H_s^2}{\omega_p^{-4}} * \exp\left[\frac{-5}{4} \left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{-4}\right] \gamma \exp\left[\frac{-(\omega - \omega_p)^2}{2\sigma^2 \omega_p^2}\right] \quad (3.34)$$

$$\alpha'' = \frac{0.0624}{0.23 + 0.0336\gamma - 0.185/(1.9 + \gamma)} \quad (3.35)$$

Όπου,

$\rho_s$  : η πυκνότητα του νερού [kg/m<sup>3</sup>]

$L_{PP}$  : το μήκος του πλοίου [m]

$g$  : η επιτάχυνση της βαρύτητας [m/s<sup>2</sup>]

$\zeta_a$  : το πλάτος του κύματος θεωρείται ίσο με 1m [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 στην κατάσταση πλεύσης

$$c_{B(act)} = 1 - (1 - c_{B(ref)}) * \left(\frac{T(ref)}{T}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (3.36)$$

$$K_{yy} = 0.25 * L, \text{ αδιάστατη ακτίνα περιστροφής} \quad (3.37)$$

$\omega$  : γωνιακή συχνότητα κυματισμού (rad/s)

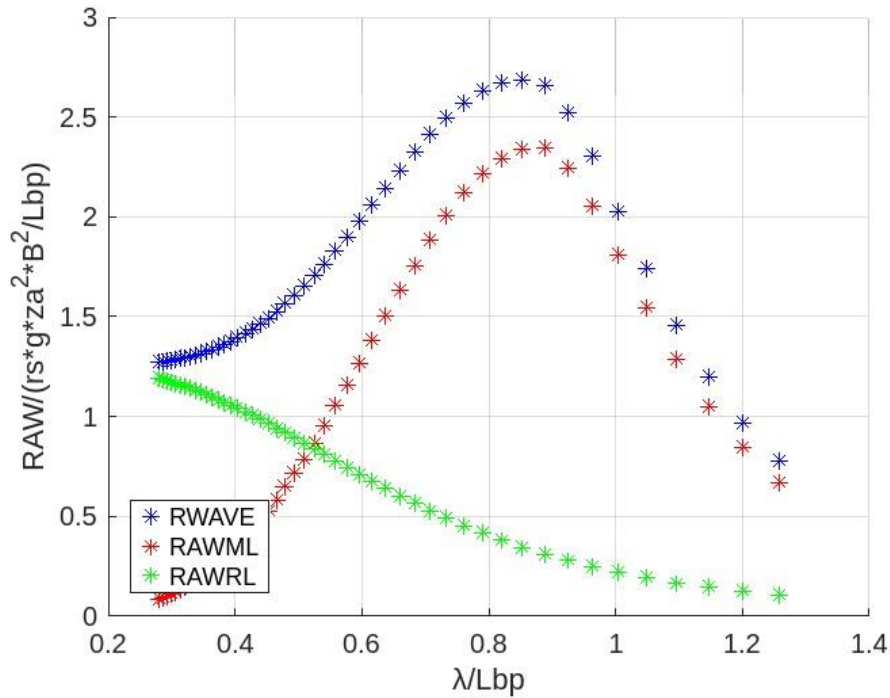
Στη συνέχεια υπολογίζεται η σχετική γωνία κύματος-πλοίου. Η σχετική γωνία προκύπτει με απλή αφαίρεση της κατεύθυνσης των δύο.

$$\psi_{rw} = \psi_c - \psi_0 \text{ (deg)} \quad (3.38)$$

Με την εφαρμογή της STAWAVE-2 προκύπτει η αντίσταση λόγω κύματος για διάφορες τιμές περιόδου από 7s έως 15s. Επειδή η περίοδος κύματος δεν είναι γνωστή από τα ποσοτήματα, θεωρείται ότι ο μέσος όρος για το εύρος περιόδων δίνει την αντίσταση του πλοίου για τη μέρα:  $R_{wave,i} = \text{mean}(R_{AWL}), 7s < T < 15s$

Για τους υπολογισμούς και την συσχέτιση της κάθε κατάστασης με μία κατάσταση σχεδίασης έχει οριστεί το όριο  $abs\left(\frac{T - T_{ref}}{T_{ref}}\right) < 0.1$  (3.39)

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται σε αδιαστατοποιημένη μορφή η συνάρτηση μεταφοράς 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 αντίστασης που επάγεται από την κίνηση του πλοίου.



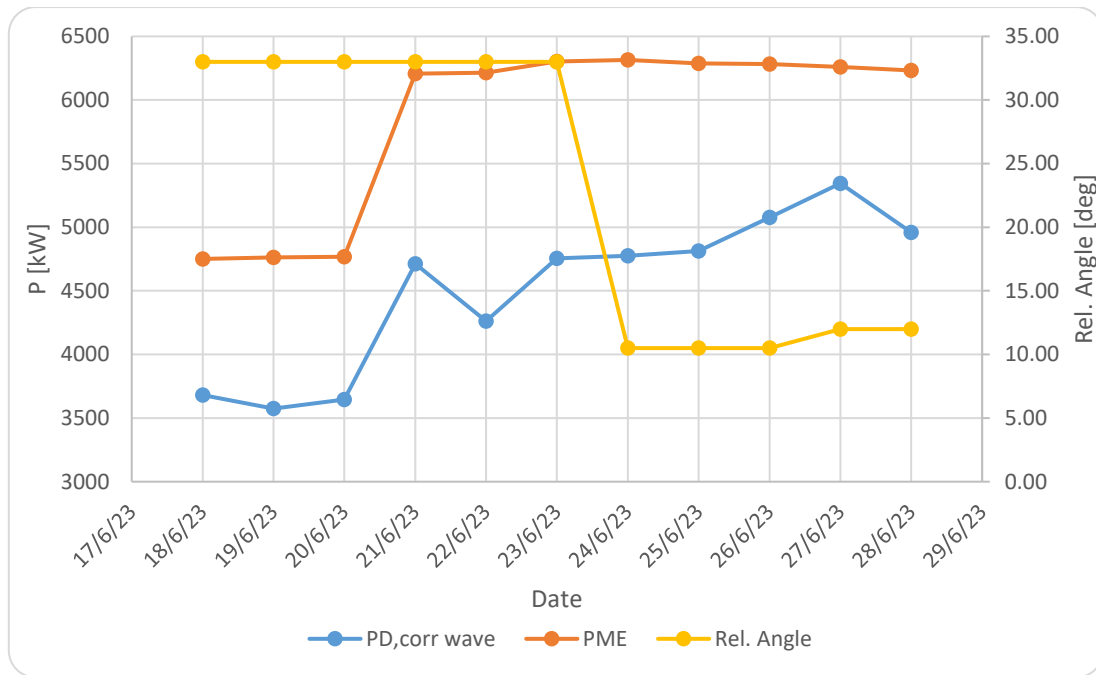
Εικόνα 15. Response Function

Οι παραπάνω καμπύλες είναι ενδεικτικές για την κατάσταση φόρτωσης με χαρακτηριστικά όπως φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Μέγεθος	LBP [m]	T [m]	hs [m]	Vs [m/s]
Τιμή	279	14.1	3.3	4.1

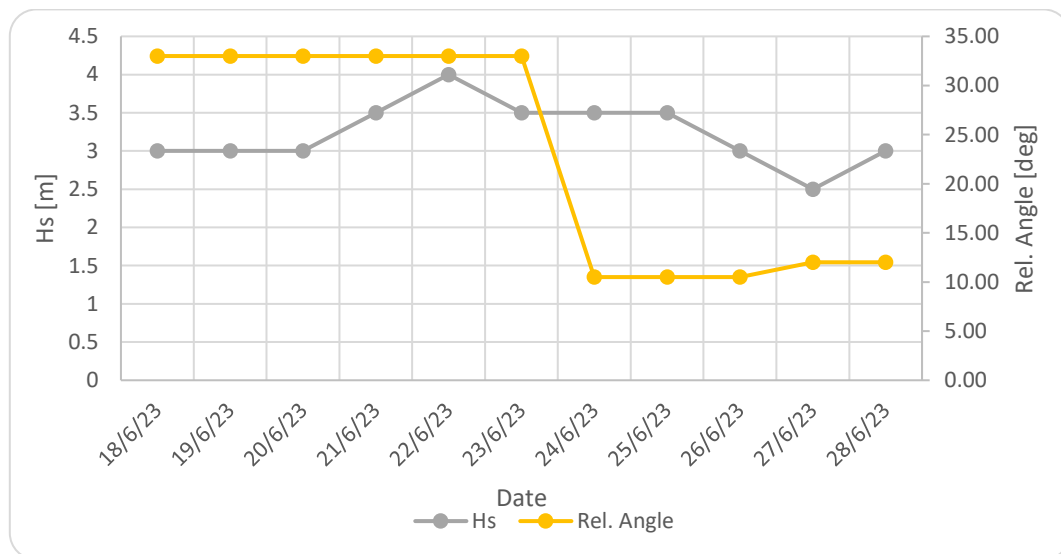
Πίνακας 11. Χαρακτηριστικά Κατάστασης Φόρτωσης

Παρακάτω παρουσιάζεται για μια ενδεικτική περίοδο η διορθωμένη ισχύς λόγω αντίστασης κυματισμών και οι η σχετική ως προς το πλοίο γωνία του κύματος και το ύψος κύματος.



Εικόνα 16. Επίδραση Κυμάτων στην Ισχύ

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η σχηματική απεικόνιση του ανέμου ως προς το σημαντικό ύψος κύματος και την γωνία για το ίδιο χρονικό διάστημα που αναφέρεται και η παραπάνω Εικόνα 15.



Εικόνα 17. Μεταβολή Σημαντικού Ύψους και Σχετικής Γωνίας του Κύματος

### 3.3. Κανονικοποίηση Ισχύος

Η ισχύς που υπολογίστηκε από την παραπάνω διαδικασία, διορθωμένη δηλαδή από την επίδραση των καιρικών φαινομένων, αντιστοιχεί στην συγκεκριμένη κατάσταση φόρτωσης που βρίσκεται το πλοίο. Για τον λόγο αυτό είναι απαραίτητο να γίνει κανονικοποίηση ως προς τις καταστάσεις αναφοράς που αναφέρθηκαν προηγουμένως, δηλαδή Scantling, Design και Ballast. Το όριο για να είναι αποδεκτά τα δεδομένα σε μία φόρτωση βασίζεται στο μέσο βύθισμα  $T_M$  καθώς είναι το μόνο σχετικό δεδομένο που μπορεί να ληφθεί από τα noon reports. Το όριο που εφαρμόζεται είναι:  $abs\left(\frac{T_M - T_{ref}}{T_{ref}}\right) < 0.1$  (3.40)

Η κανονικοποίηση γίνεται με τον παρακάτω τύπο ο οποίος βασίζεται στον Συντελεστή Ναυαρχείο όπως αναλύεται και στην διπλωματική εργασία του Ζαλαχώρη (2020) [9] :

$$P_{ref} = P * \left(\frac{\Delta_{act}}{\Delta_{ref}}\right)^{\frac{3}{2}}, \quad (3.41)$$

όπου  $P$  είναι η αποδιδόμενη ισχύς στην έλικα,

$\Delta_{act}$ : το εκτόπισμα του πλοίου εκείνη τη χρονική στιγμή,

$\Delta_{ref}$ : το εκτόπισμα του πλοίου στο βύθισμα αναφοράς

Το εκτόπισμα του πλοίου για κάθε χρονική στιγμή υπολογίζεται με βάση το εκτόπισμα αναφοράς με τον παρακάτω τύπο:  $\Delta_{act} = \frac{c_{B(act)} T_{act}}{c_{B(ref)} T_{ref}} \Delta_{ref}$ , (3.42)

όπου  $c_{B(ref)}$ , ο συντελεστής γάστρας της κατάστασης αναφοράς,

$T_{ref}$ : το βύθισμα αναφοράς

$T_{act}$ : το βύθισμα του πλοίου εκείνη τη χρονική στιγμή

Και ο συντελεστής γάστρας για το βύθισμα  $T_{act}$  υπολογίζεται ως εξής:

$$c_{B(act)} = 1 - (1 - c_{B(ref)}) \left(\frac{T_{d(ref)}}{T_{act}}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.43)$$

### 3.4 Τελική πρόσθετη ισχύς

Στα προηγούμενα κεφάλαια παρουσιάστηκε ο τρόπος υπολογισμού της προστιθέμενης αντίστασης λόγω καιρικών φαινομένων. Οι δύο διαδικασίες είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους οπότε για τον τελικό υπολογισμό της αντίστασης εφαρμόζεται ο παρακάτω τύπος:  $\Delta R = R_{wind} + R_{wave}$ , (3.44)

Η προστιθέμενη ισχύς τελικά υπολογίζεται με τον παρακάτω τύπο:

$$\Delta P = \frac{\Delta R \cdot V_s}{\eta_{D0}} + P_D \left( 1 - \frac{\eta_{DM}}{\eta_{D0}} \right) \quad (3.45)$$

όπου  $\eta_{DM}$ : συντελεστής απόδοσης πρόωσης στην κατάσταση λειτουργίας

$\eta_{D0}$ : συντελεστής απόδοσης πρόωσης σε ήρεμη θάλασσα

$V_s$ : η ταχύτητα του πλοίου ως προς το νερό

Οι δύο συντελεστές  $\eta_{DM}$  και  $\eta_{D0}$  λαμβάνονται ίσοι με 0.7.

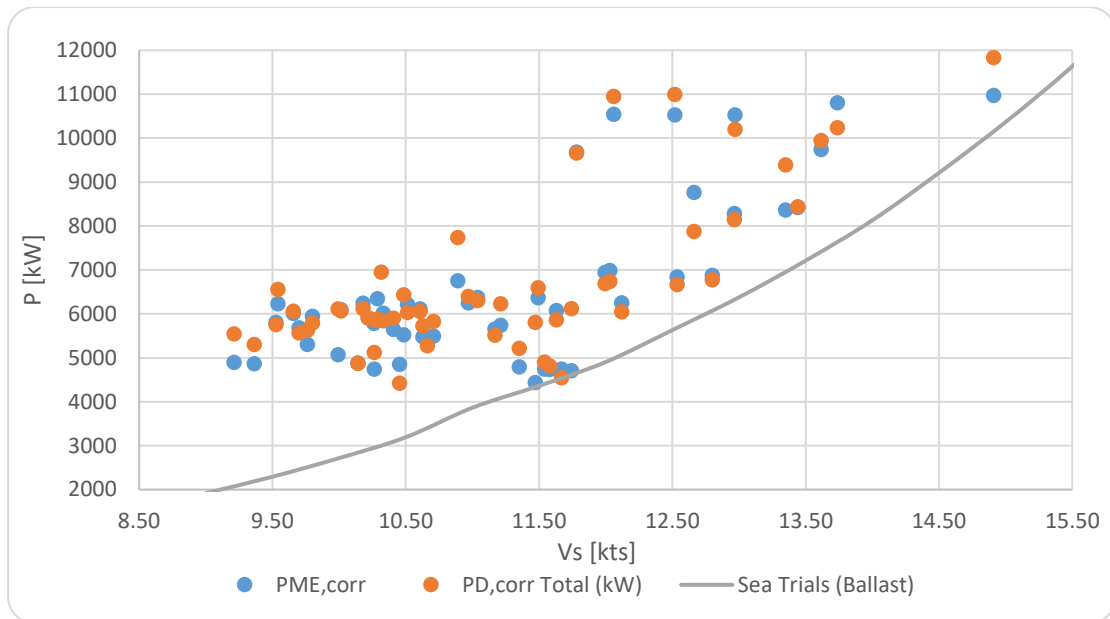
Η τελική διορθωμένη ισχύς,  $P_{D,CORR}$  υπολογίζεται από τη διαφορά της αποδιδόμενης ισχύος στην έλικα,  $P_D$  με την συνολική διόρθωση της ισχύος,  $P_{CORR}$  :  $P_{D,CORR} = P_D - P_{CORR}$ .

$$\text{όπου } P_D = 0.99 P_{ME} \text{ (N)} \quad (3.46)$$

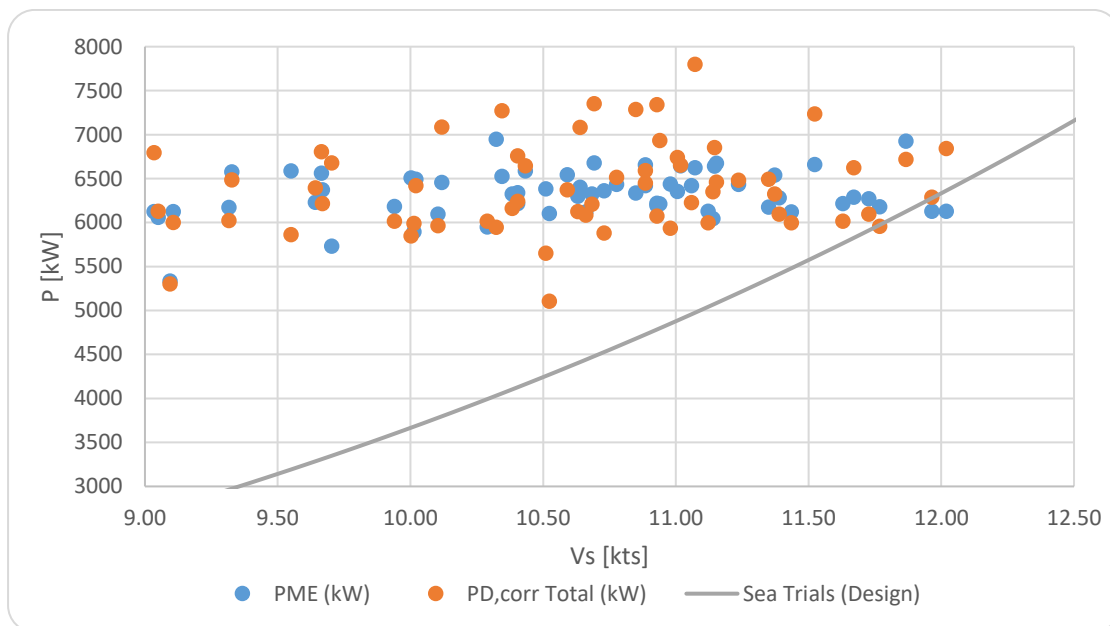
Παρακάτω παρουσιάζεται η σύγκριση της μετρούμενης της διορθωμένης ισχύος για τις τρεις καταστάσεις αναφοράς. Σε αυτή την φάση δεν γίνεται διαχωρισμός των περιόδων λειτουργίας και τα δεδομένα προέρχονται από τα τέσσερα τελευταία χρόνια λειτουργίας του πλοίου.

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι καμπύλες αναφοράς των Sea Trials έχουν παραχθεί από για το εύρος [11kts-17kts]. Για τους σκοπούς της εργασίας όμως έχει γίνει προεκβολή και για μικρότερες ταχύτητες, καθώς πλέον το πλοίο λειτουργεί σε αρκετά χαμηλότερες ταχύτητες.

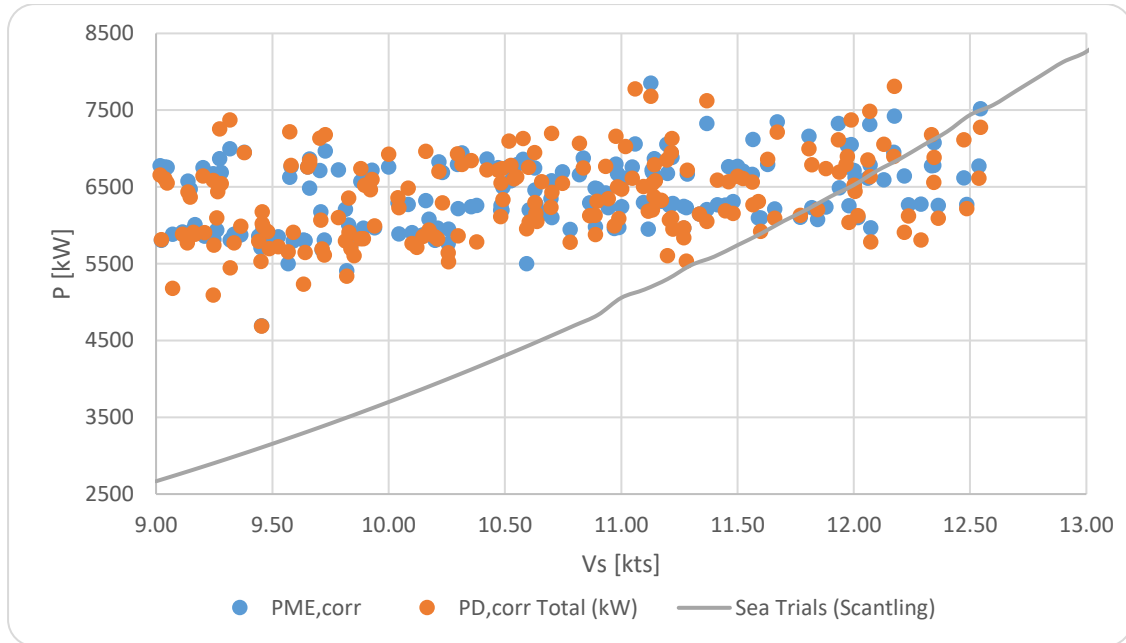




Εικόνα 18. Σύγκριση Διορθωμένης Ισχύος με Αρχική Ισχύ | Ballast Draft



Εικόνα 19. Σύγκριση Διορθωμένης Ισχύος με Αρχική Ισχύ | Design Draft



Εικόνα 20. Σύγκριση Διορθωμένης Ισχύος με Αρχική Ισχύ | Scantling Draft

## 4. Key Performance Indicators (KPIs)

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι δείκτες απόδοσης (KPIs) που θα χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της μεταβολής της απόδοσης του πλοίου ανάμεσα στις δύο περιόδους, πριν και μετά την εγκατάσταση του PBCF. Η μελέτη της απόδοσης του πλοίου με την χρήση KPIs είναι αρκετά διαδεδομένη στη ναυτιλία καθώς καθιστά εύκολη την ποσοτική σύγκριση δύο ή και περισσότερων ομάδων δεδομένων

### 4.1. Ανάλυση KPIs

Ο πρώτος δείκτης που θα χρησιμοποιηθεί, KPI 1 (Propeller Loading Coefficient): Δείκτης Απόδοσης Έλικας συσχετίζει την ισχύ που αποδίδεται στην έλικα και την ταχύτητα περιστροφής της έλικας.

Η αποδιδόμενη ισχύς στην έλικα σχετίζεται άμεσα με την ταχύτητα περιστροφής της έλικας με τον τύπο  $P=c \cdot n^3$ . Η σχέση αυτή ονομάζεται νόμος της έλικας (Κυρτάτος Ν., 2007) [13]. Ο νόμος της έλικας δεν είναι σταθερός και μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της ζωής του πλοίου. Οι κύριοι λόγοι της μεταβολής είναι η ρύπανση της γάστρας, η αλλαγή της απόδοσης της προπέλας λόγω διάβρωσης ή ατυχήματος και τυχόν μετασκευές του πλοίου. Η σταθερά  $c$  ανάμεσα σε δύο δεξαμενισμούς συνήθως αυξάνεται εκτός αν υπάρξει κάποιος καθαρισμός της γάστρας. Επομένως, αυξάνεται η απαιτούμενη ισχύς για να επιτευχθεί συγκεκριμένη ταχύτητα περιστροφής

Μετά από έναν δεξαμενισμό του πλοίου, η σταθερά  $c$  μειώνεται και μπορεί να θεωρηθεί ότι έχει την ίδια τιμή κάθε φορά, εφόσον το πλοίο καθαρίζεται και βάφεται πλήρως. Αυτό επιβεβαιώνεται, καθώς μειώνεται η απαιτούμενη ισχύς για να επιτευχθεί συγκεκριμένη ταχύτητα περιστροφής.

Ο δείκτης KPI 1: Δείκτης Απόδοσης Περιστροφής Έλικας παράγεται από το νόμο της έλικας ως εξής:

$$KPI1 = \frac{P}{n^3} \quad (4.1)$$

όπου:  $P$ , η αποδιδόμενη ισχύς στην έλικα (kW)

$n$ , η ταχύτητα περιστροφής της έλικας (rpm)

Ο δεύτερος δείκτης απόδοσης της γάστρας, KPI 2 (Speed Loss): Απώλεια ταχύτητας συγκρίνει την μετρούμενη ταχύτητα με την ταχύτητα αναφοράς για δεδομένη ισχύ στην κατάσταση φόρτωσης του πλοίου. Η ταχύτητα αναφοράς αντλείται από τις καμπύλες αναφοράς των Sea Trials για την ισχύ που αποδίδεται στη έλικα μετά την διόρθωση λόγω καιρικών φαινομένων και την κανονικοποίηση στο βύθισμα αναφοράς.

Ο δείκτης KPI 2 (Speed Loss) υπολογίζεται σύμφωνα με το ISO 19030 από τον παρακάτω τύπο:

$$KPI 2 = V_d = 100 \cdot \frac{V_m - V_e}{V_e} \quad (4.2)$$

όπου:  $V_m$ , η μετρούμενη ταχύτητα του πλοίου στο νερό (m/s)

$V_e$ , η αναμενόμενη ταχύτητα στο νερό για το βύθισμα αναφοράς και την κανονικοποιημένη ισχύ.

Ο δείκτης KPI 1 αναμένεται να αυξάνεται κατά τη διάρκεια της ζωής του πλοίου, λόγω της ρύπανσης της γάστρας και της έλικας καθώς αυξάνεται η αντίσταση του πλοίου. Μετά από έναν δεξαμενισμό του πλοίου, ο δείκτης KPI 2 μειώνεται εφόσον το πλοίο καθαρίζεται και βάφεται πλήρως και παράγει λιγότερη αντίσταση.

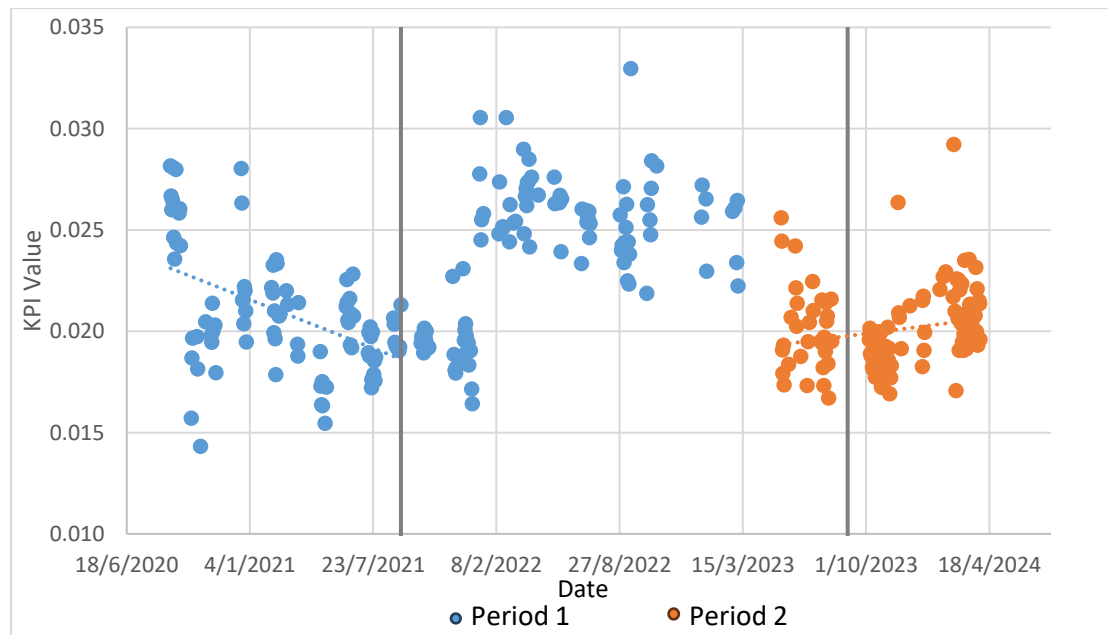
## 4.2. Αποτελέσματα των KPIs

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τους δείκτες KPI 1 και KPI 2 που αναλύθηκαν προηγουμένως. Για τον υπολογισμό των δεικτών χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τις δύο περιόδους μετά από κάθε δεξαμενισμό, που αντιστοιχούν σε περίπου 12 μήνες μετά από τον κάθε δεξαμενισμό.

### 4.2.1. KPI 1 (Propeller Loading Coefficient): Δείκτης Απόδοσης

#### Έλικας

Ο δείκτης KPI 1 υπολογίστηκε για κάθε διορθωμένο σημείο των δύο περιόδων. Δεν έχει γίνει διαφοροποίηση στις τρεις καταστάσεις φόρτωσης Ballast, Design και Scantling. Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη του δείκτη KPI 1. Η πρώτη κάθετη γραμμή οριοθετεί την 1<sup>η</sup> Περίοδο 28/8/2020-6/9/2021, δηλαδή περίπου 1 χρόνος μετά τον δεξαμενισμό.



Εικόνα 21. Αποτελέσματα KPI 1

Οι γραμμές τάσης για την 1<sup>η</sup> Περίοδο δείχνουν πτώση της τιμής του KPI, πράγμα αδύνατο καθώς βέλτιστη τιμή επιτυγχάνεται με καθαρή γάστρα μετά τον δεξαμενισμό. Το παραπάνω γεγονός ενδέχεται να οφείλεται στο μικρό δείγμα δεδομένων. Ο παρακάτω πίνακας περιέχει την μέση τιμή και την τυπική απόκλιση των δεδομένων για τις δύο περιόδους όπως έχουν οριστεί και φαίνονται στο σχήμα:

<i>KPI 1 (Propeller Loading Coefficient)</i>		
	1st Period	2nd Period
<b>Mean</b>	0.02082	0.02006
<b>Standard Deviation</b>	0.00298	0.00203

Πίνακας 12. Στατιστικά Στοιχεία KPI 1

Συμπεραίνεται ότι η τιμή του δείκτη μειώνεται μεταξύ των δύο περιόδων. Συγκεκριμένα η μέση τιμή παρουσιάζει μείωση της τάξης του 3.63%. Με τα παραπάνω αποτελέσματα η εγκατάσταση του PBCF αξιολογείται ως ωφέλιμη για την απόδοση του πλοίου.

Επιπλέον, για την 2<sup>η</sup> περίοδο υπάρχει ένα μεγάλο διάστημα κατά το οποίο το πλοίο παρέμεινε ακινητοποιημένο και στο γράφημα ορίζεται από τη δεύτερη κάθετη γραμμή. Παρακάτω παρουσιάζονται η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση του KPI 1.

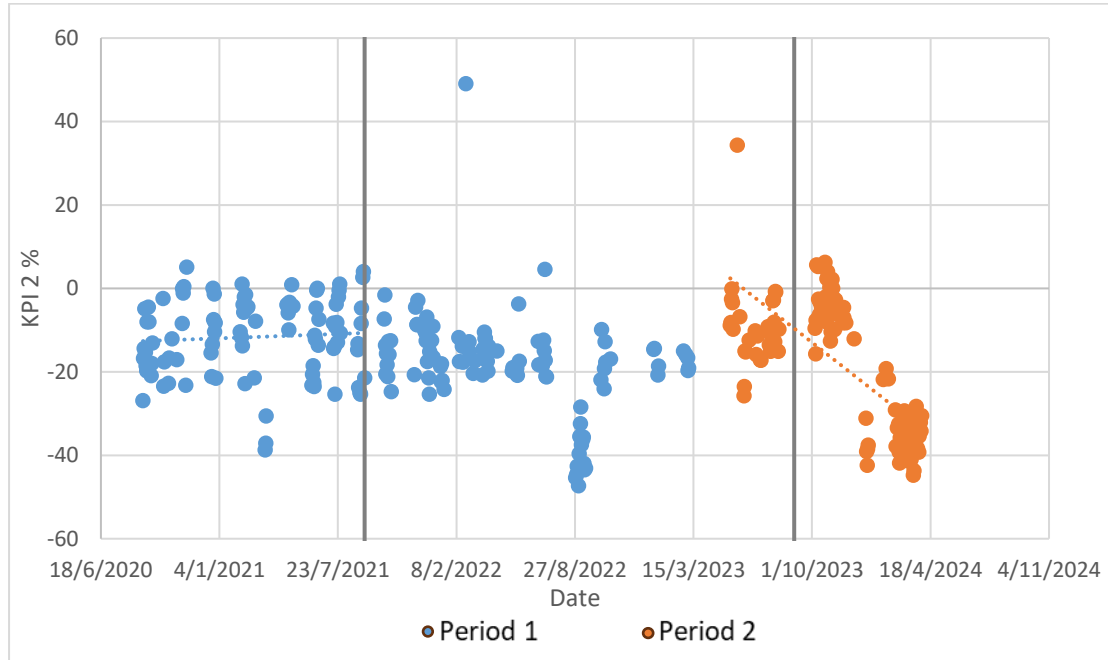
<i>KPI 1 (Propeller Loading Coefficient)</i>		
	Before Long Stay	After Long Stay
<b>Mean</b>	0.02011	0.02005
<b>Standard Deviation</b>	0.00213	0.00201

Πίνακας 13. Στατιστικά Στοιχεία KPI 1 | 2η περίοδος

Η τιμή του δείκτη μειώνεται κατά 0.3%. Συνεπώς η τιμή του KPI 2 για την 2<sup>η</sup> περίοδο δεν επηρεάστηκε από την παραμονή του πλοίου στο λιμάνι.

#### 4.2.2. KPI 2 (Speed Loss): Απώλεια ταχύτητας

Ο δείκτης KPI 2 υπολογίστηκε για κάθε διορθωμένο σημείο των δύο περιόδων. Δεν έχει γίνει διαφοροποίηση στις τρεις καταστάσεις φόρτωσης Ballast, Design και Scantling. Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη του δείκτη KPI 2.



Εικόνα 22. Αποτελέσματα KPI 2

Ο παρακάτω πίνακας περιέχει την μέση τιμή και την τυπική απόκλιση των δεδομένων για περίπου 12 μήνες μετά από κάθε δεξαμενισμό:

KPI 2 (Speed Loss)		
	1st Period	2nd Period
<b>Mean</b>	-11.64%	-18.04%
<b>Standard Deviation</b>	9.38%	15.68%

Πίνακας 14. Στατιστικά Στοιχεία KPI 2

Συμπεραίνεται ότι η τιμή του δείκτη μειώνεται μεταξύ των δύο περιόδων. Συγκεκριμένα η μέση τιμή παρουσιάζει μείωση κατά 7 ποσοστιαίες μονάδες. Από αυτό το γεγονός συμπεραίνεται ότι με την εγκατάσταση του PBCF το πλοίο γίνεται λιγότερο αποδοτικό. Ωστόσο λόγω της μεγάλης τυπικής απόκλισης σε σχέση με τη μέση τιμή, τα αποτελέσματα του KPI 2 είναι αμφίβολα. Επιπλέον, η γραμμή τάσης για την 1<sup>η</sup> Περίοδο δείχνει ανοδική πορεία, αντίθετη δηλαδή από την αναμενόμενη.

Είναι εμφανής μια απότομη πτώση στην τιμή του KPI 2, πριν και μετά την παραμονή του πλοίου σε λιμάνι. Παρακάτω παρουσιάζονται τα στατιστικά στοιχεία για τις δύο περιόδους, πριν και μετά την παραμονή στο λιμάνι.

<i>KPI 2 (Speed Loss)</i>		
	Before Long Stay	After Long Stay
<b>Mean</b>	-9.12%	-21.32%
<b>Standard Deviation</b>	10.04%	16.15%

Πίνακας 15. Στατιστικά Στοιχεία KPI 2 | 2<sup>η</sup> περίοδος

Ο KPI 2 παρουσιάζει μείωση 12 ποσοστιαίων μονάδων η αλλιώς 133.7%. Είναι προφανές ότι η παραμονή στο λιμάνι επηρέασε σημαντικά την τιμή του KPI 2. Συνεπώς, η μέση τιμή του KPI 2 για την 2<sup>η</sup> περίοδο, επηρεάστηκε λόγω της παραμονής στο λιμάνι.

## 5. Μοντέλο Γραμμικής Παλινδρόμησης

Τα μοντέλα παλινδρόμησης χρησιμοποιούνται γενικά για να παραχθεί μια σχέση η οποία υπολογίζει μία εκτίμηση μίας εξαρτημένης μεταβλητής απόκρισης με βάση μία ή περισσότερες εξαρτημένες μεταβλητές που αποτελούν τους δείκτες πρόβλεψης, όπως αναλύεται στις διπλωματικές εργασίες των Σκρέτα[10] και Ξουρίδα[8] καθώς και στις σημειώσεις του Πανεπιστημίου Πειραιά, κεφάλαιο 6 «Πολλαπλό Μοντέλο Γραμμικής Παλινδρόμησης» [11]. Στην παρούσα εργασία γίνεται μια προσπάθεια παραγωγής ενός πολλαπλού μοντέλου γραμμικής παλινδρόμησης με μεταβλητή απόκριση τη μετρούμενη ισχύ στη μηχανή και δείκτες πρόβλεψης την ταχύτητα του πλοίου στο νερό, το βύθισμα και τη διαγωγή καθώς και τις επιρροές του ανέμου και των κυμάτων. Τα δεδομένα αυτά προέρχονται από τα Noon Reports.

### 5.1. Πολλαπλό Μοντέλο Γραμμικής Παλινδρόμησης

Το πολλαπλό μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης έχει τη μορφή:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_{p-1} X_{p-1} + \varepsilon, \quad (5.1) \quad \text{για κάποιες για κάποιες παραμέτρους } b_0, b_1, \dots, b_{p-1}.$$

Για να διερευνηθεί η σχέση μεταξύ της  $Y$  και των  $X_1, X_2, \dots, X_{p-1}$  λαμβάνεται δείγμα μμεγέθους  $n$  και για κάθε άτομο του δείγματος καταγράφονται οι τιμές των συγκεκριμένων μμεταβλητών. Π.χ. για το  $i$ -άτομο του δείγματος καταγράφονται οι τιμές  $(Y_i, X_{i1}, \dots, X_{i,p-1}), i=1, 2, \dots, n$ .

Εφαρμόζουμε λοιπόν το μοντέλο  $Y_i = b_0 + b_1 X_{i1} + b_2 X_{i2} + \dots + b_{p-1} X_{i,p-1} + \varepsilon_i, i = 1, 2, \dots, n$ , όπου τα «σφάλματα»  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$  θεωρούνται ανεξάρτητες τ.μ. από την  $N(0,1)$  ενώ οι ερμηνευτικές μεταβλητές  $X_1, X_2, \dots, X_{p-1}$  δεν θεωρούνται τυχαίες. Το παραπάνω μοντέλο γράφεται με τη βοήθεια πινάκων στην απλούστερη μορφή:  $\mathbf{Y} = \mathbf{X}\mathbf{b} + \boldsymbol{\varepsilon}$ , όπου

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix}, \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1 & X_{11} & \dots & X_{1,p-1} \\ 1 & X_{21} & & X_{2,p-1} \\ \vdots & & & \\ 1 & X_{n1} & \dots & X_{n,p-1} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_{p-1} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}.$$

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 σεν τιμών ως:  $e_i = y_i - \hat{y}_i$

### 5.2. Χαρακτηριστικά Μοντέλου Παλινδρόμησης

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



### 5.2.1. 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 πέφτουν στην καμπύλη του μοντέλου παλινδρόμησης. Για παράδειγμα  $R^2 = 80\%$  σημαίνει ότι το 80% της διακύμανσης των τιμών  $y$  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  $\bar{y}$  είναι η μέση τιμή του  $y$ , το  $R^2$  υπολογίζεται από τη σχέση:

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{RES}}{SS_{TOT}} \quad (5.2)$$

- $SS_{TOT} = \sum (y_i - \bar{y})^2$ , 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  $\bar{y}$  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 ταιριάζει 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. Με την αύξηση των δεδομένων πρόβλεψης το  $R^2$  υπολογίζεται μέσω της παρακάτω σχέσης έτσι ώστε να γίνει η σωστή ρύθμιση της λανθασμένης αυτής αύξησης της τιμής του.

$$R_{ADJ}^2 = 1 - (1 - R^2) \cdot \frac{n-1}{n-p-1} \quad (5.3)$$

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

Τελικά ο προβλέψιμος συντελεστής  $R^2$  υπολογίζεται:

$$P_{PRED}^2 = 1 - \frac{PRESS}{SS_{TOT}} \quad (5.4)$$

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.

### 5.2.2. 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

$$S = \sqrt{\frac{\sum_1^N (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (5.5)$$

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

### 5.2.3. Τυπικό Σφάλμα Συντελεστή

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

$$SE = \frac{S}{\sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2}} \quad (5.6)$$

όπου  $S$  είναι 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 γίνεται η εκτίμηση.

### 5.2.4. P-value

Η τιμή  $P$  είναι μια πιθανότητα που μετράει τα στοιχεία κατά της μηδενικής υπόθεσης. Μικρότερες πιθανότητες παρέχουν ισχυρότερα στοιχεία κατά της μηδενικής υπόθεσης.

Για να καθοριστεί εάν κάθε κύρια επίδραση και η επίδραση της αλληλεπίδρασης έχει στατιστική σημασία, η τιμή  $P$  για κάθε όρο συγκρίνεται σε ένα επίπεδο σημασίας  $\alpha$  το οποίο ορίζεται συνήθως ίσο με 0.05. Η τιμή του  $\alpha$  υποδεικνύει το ποσοστό της διακινδύνευσης που ενυπάρχει στην υπόθεση της ύπαρξης ενός αποτελέσματος όταν αυτό δεν υπάρχει όντως. Εάν η τιμή  $P$  είναι μεγαλύτερη από την επιλεγμένη τιμή του επιπέδου τότε η επίδραση δεν είναι στατιστικά σημαντική ενώ όταν ισούται ή είναι μικρότερη τότε είναι στατιστικά σημαντική.

Η τιμή  $P$  του μοντέλου όπως και κάθε μεταβλητής πρόβλεψης υπολογίζεται με τη βοήθεια της τιμής  $T$  βάση του παρακάτω τύπου:

$$P - value = 2 \cdot (1 - T(x|v)) = 2 \cdot \left( 1 - \int_{-\infty}^x \frac{\Gamma\left(\frac{v+1}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{v}{2}\right)} \cdot \frac{1}{\sqrt{v\pi}} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{t^2}{v}\right)^{\frac{v+1}{2}}} dt \right) \quad (5.7)$$

Όπου,

- $x=T\text{-value}$  , η απόλυτη t τιμή του μοντέλου ή της ανεξάρτητης μεταβλητής
- $v=n-1-p$ , οι βαθμοί ελευθερίας του σφάλματος για μοντέλο με n πλήθος δεδομένων και p μεταβλητές πρόβλεψης
- T, η αθροιστική συνάρτηση κατανομής της T- κατανομής
- $\Gamma(x)=(x-1)!$  , η συνάρτηση γάμμα

Εναλλακτικά η τιμή P του μοντέλου αλλά και κάθε μιας από τις μεταβλητές πρόβλεψης υπολογίζεται με τη βοήθεια της F-τιμής βάση του παρακάτω τύπου:

$$P - value = 1 - F(x|v_1, v_2) = 1 - \int_0^x \frac{\Gamma\left(\frac{v_1+v_2}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{v_1}{2}\right) \cdot \Gamma\left(\frac{v_2}{2}\right)} \cdot \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\frac{v_1}{2}} \cdot \frac{1}{\left[1+\left(\frac{v_1}{v_2}\right) \cdot t\right]^{\frac{v_1+v_2}{2}}} dt \quad (5.8)$$

όπου,

- $x = F - value$ , η απόλυτη τιμή F του μοντέλου ή της ανεξάρτητης μεταβλητής
- $v_1$ , οι βαθμοί ελευθερίας του μοντέλου (ίσοι με το σύνολο των ανεξάρτητων μεταβλητών) ή της ανεξάρτητης μεταβλητής (ίσοι με τη μονάδα)
- $v_2=n-1-p$ , οι βαθμοί ελευθερίας του σφάλματος για μοντέλο με πλήθος n δεδομένων και p μεταβλητών πρόβλεψης
- F, η αθροιστική συνάρτηση κατανομής της F- κατανομής
- $\Gamma(x)=(x-1)!$  , η συνάρτηση γάμμα

### 5.3. Κατασκευή Μοντέλου Παλινδρόμησης

Παρακάτω παρουσιάζονται τα μοντέλα που παράγονται για τις δύο περιόδους του πλοίου. Τα μοντέλα αυτά βασίζονται μόνο σε δεδομένα φόρτωσης σε βύθισμα Scantling και έχουν εύρος 12 περίπου μήνες μετά τον κάθε δεξαμενισμό. Επιλέχθηκε μόνο αυτή η κατάσταση φόρτωσης σε σχέση με τις υπόλοιπες διότι δεν υπάρχουν αρκετά δεδομένα για να παραχθεί μοντέλο με ικανοποιητική ακρίβεια πρόβλεψης. Στο παρόν μοντέλο γίνεται πρόβλεψη της εξάρτισης της ισχύος της κύριας μηχανής από μεγέθη που σχετίζονται με το ταξίδι του πλοίου, όπως είναι η ταχύτητα, το βύθισμα και η επίδραση των κυματισμών και του ανέμου. Οπότε ως εξαρτημένη μεταβλητή απόκρισης ορίζεται η ισχύς κύριας μηχανής  $P_{ME}$  και ως μεταβλητές πρόβλεψης οι εξής:

- T: το μέσο βύθισμα μετρημένο σε μέτρα [m],
- $Vs^3$ : ο κύβος της ταχύτητας του πλοίου [ $kn^3$ ].
- $V_{wind} \cdot \cos(DIR)$ : η διαμήκης συνιστώσα της ταχύτητας του ανέμου [kts]
- $H_s \cdot \cos(DIR)$ : η διαμήκη συνιστώσα του σημαντικού ύψους κύματος [m]
- Η ισχύς του πλοίου υπολογίζεται σε [kW].

Παρακάτω ακολουθούν τα αποτελέσματα για το Μοντέλο Πολλαπλής Γραμμικής Παλινδρόμησης που παράχθηκε για την 1<sup>η</sup> Περίοδο:

$$\text{Εξίσωση Μοντέλου: } P=0.0591V_s^3+369.9T-20.8H_s*\cos(DIR)+2.75V_{\text{wind}}*\cos(DIR) \quad (5.9)$$

Όρος	Συντελεστής	Τιμή P	Τυπικό Σφάλμα
$V_s^3$	0.0591	0.121	33.9
T	369.9	0	0.016
$H_s*\cos(DIR)$	-20.8	0.002	0.197
$V_{\text{wind}}*\cos(DIR)$	2.75	0.368	0.426

R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>(adj)</sub>	Τυπικό Σφάλμα
99.98%	99.98%	102.02

Πηγή	Βαθμοί Ελευθερίας	SS <sub>ADJ REG</sub>	MS <sub>ADJ REG</sub>
Παλινδρόμηση	4	3630927076	907731769
Υπόλοιπο	78	814737	10445
Σύνολο	82	3631741812	

Πίνακας 16. Χαρακτηριστικά Μοντέλου | 1η Περίοδος

Παρακάτω ακολουθούν τα αποτελέσματα για το Μοντέλο Πολλαπλής Γραμμικής Παλινδρόμησης που παράχθηκε για τη 2<sup>η</sup> Περίοδο:

$$\text{Εξίσωση Μοντέλου: } P=0.0855V_s^3+341.08T+9.09H_s*\cos(Dir)+4.61V_{\text{wind}}*\cos(Dir) \quad (5.10)$$

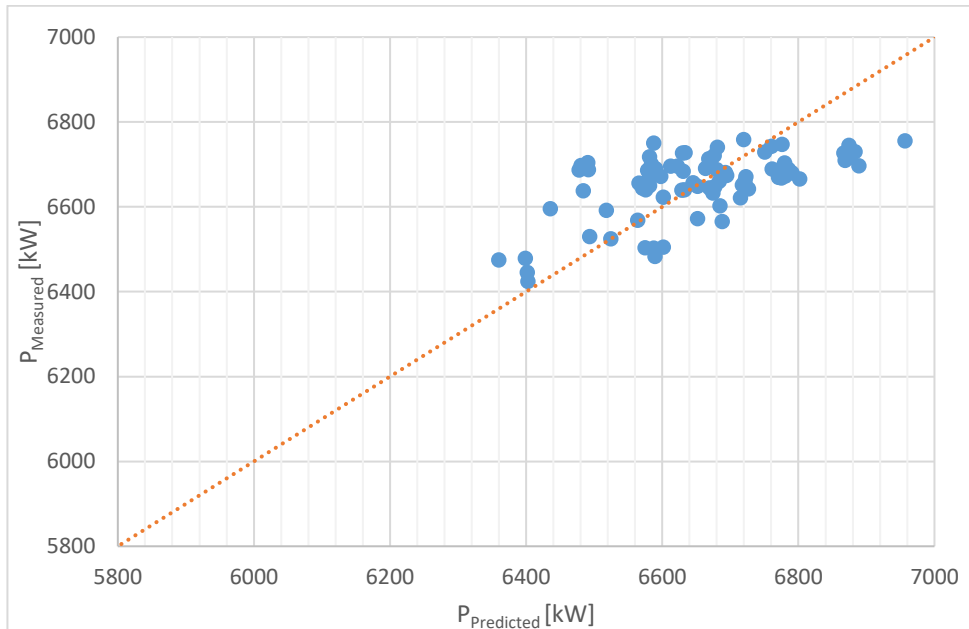
Όρος	Συντελεστής	Τιμή P	Τυπικό Σφάλμα
$V_s^3$	0.0855	0.197	24.3
T	341.08	0	0.0125
$H_s*\cos(DIR)$	9.09	0.194	0.219
$V_{\text{wind}}*\cos(DIR)$	4.61	0.097	0.509

R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>(adj)</sub>	Τυπικό Σφάλμα
99.98%	99.98%	97.67

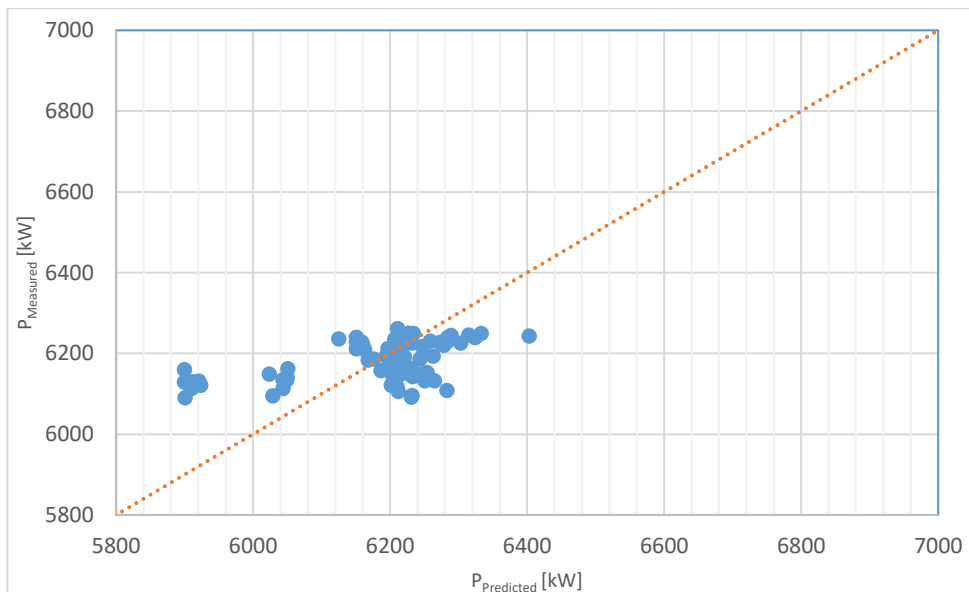
Πηγή	Βαθμοί Ελευθερίας	SS <sub>ADJ REG</sub>	MS <sub>ADJ REG</sub>
Παλινδρόμηση	4	2942888660	735722165
Υπόλοιπο	73	696478	9539
Σύνολο	77	2943585038	

Πίνακας 17. Χαρακτηριστικά Μοντέλου | 2η Περίοδος

Στα παρακάτω γραφήματα τοποθετούνται οι εκτιμώμενες τιμές σε σχέση με τις μετρούμενες τιμές ισχύος της κύριας μηχανής για να παραχθεί ένα γράφημα X-Y. Για τα σημεία που βρίσκονται κοντύτερα στην γραμμή  $y=x$  το μοντέλο έχει κάνει καλύτερη εκτίμηση και βρίσκεται πιο κοντά στην μετρούμενη τιμή. Για τα σημεία που βρίσκονται πάνω ή κάτω από την γραμμή, το μοντέλο έχει κάνει υποτίμηση ή υπερεκτίμηση αντίστοιχα.



Εικόνα 23. Κατανομή Σημείων Παλινδρόμησης | 1η Περίοδος

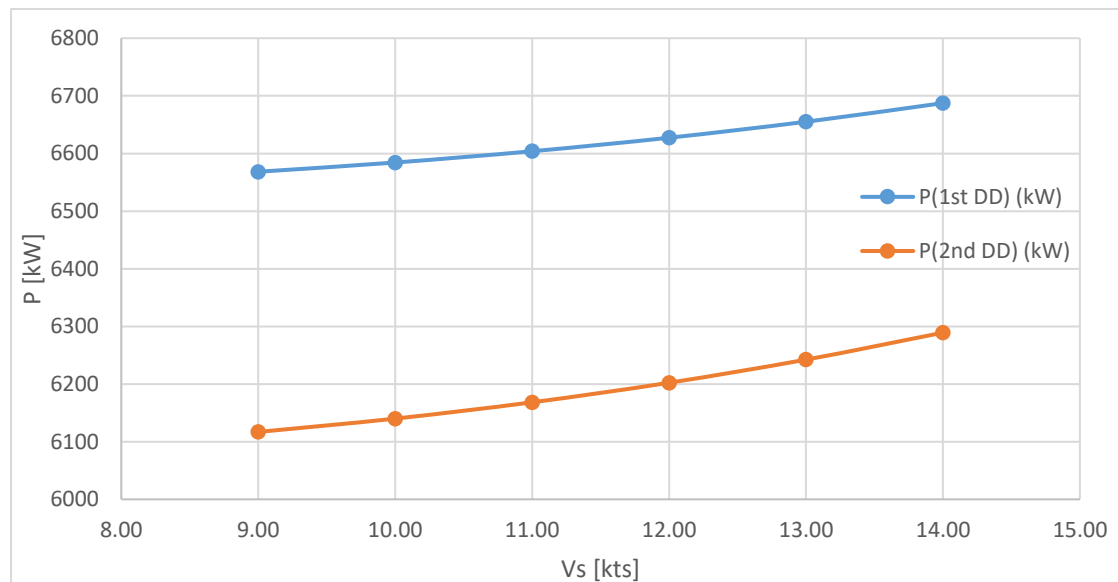


Εικόνα 24. Κατανομή Σημείων Παλινδρόμησης | 2η Περίοδος

#### 5.4. Σύγκριση Μοντέλων για τις Δύο Περιόδους

Με βάση τις σχέσεις που παράχθηκαν για τα μοντέλα πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης για τις δύο περιόδους, μπορεί να γίνει σύγκριση της ισχύος που προβλέπεται. Η σύγκριση γίνεται πάνω σε όμοιες καταστάσεις καιρικών συνθηκών και βυθίσματος, για ένα εύρος ταχυτήτων που αντιπροσωπεύει και τις δύο περιόδους υπό μελέτη. Στο παρακάτω γράφημα φαίνονται τα αποτελέσματα και στον πίνακα οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν:

Μέγεθος	Τιμή
Vs	[9kts,14kts]
T	17.6 m
Hs,rel	0.6 m
Vw,rel	10 kts



Εικόνα 25. Αναμενόμενες Τιμές Ισχύος για Βύθισμα Scantling

Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται πως η εγκατάσταση του PBCF μειώνει την απαιτούμενη ισχύ πρόωσης του πλοίου για το Scantling Draft. Το μέσο ποσοστό μείωσης για τις ενδεικνύμενες τιμές είναι -6.46% ως προς τις τιμές της πρώτης περιόδου. Δεδομένου ότι η μελέτη έχει γίνει για ένα φάσμα ταχυτήτων που καλύπτει το μεγαλύτερο εύρος ταχύτητας λειτουργίας του, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η απόδοση του πλοίου βελτιώθηκε.

## 6. Συμπεράσματα

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία μελετάται η επίδραση ενός συστήματος PBCF στην απόδοση του πλοίου, μελετώντας την ισχύ της κύριας μηχανής. Η μελέτη αυτή βασίζεται στα επιχειρησιακά δεδομένα ενός πλοίου για ένα έτος μετά από δύο δεξαμενισμούς, όπου στο δεύτερο εγκαταστάθηκε το σύστημα. Το πρόβλημα εξετάζεται μέσω της δημιουργίας Μοντέλων Πολλαπλής Γραμμικής Παλινδρόμησης και παραγωγής δεικτών απόδοσης (KPIs) για κάθε περίοδο.

Οι δύο τρόποι μελέτης απαιτούν τη συλλογή των επιχειρησιακών δεδομένων του πλοίου από τις μετρήσεις των εγκατεστημένων οργάνων και του πλήρωματος. Η διαδικασία αυτή γίνεται εύκολη, καθώς τα λειτουργικά και καιρικά δεδομένα συγκεντρώνονται καθημερινά και αποστέλλονται από το πλήρωμα. Για τη μελέτη με δείκτες απόδοσης επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν δεδομένα που μπορούν να συγκριθούν με τις καμπύλες αναφοράς των δοκιμών θαλάσσης. Για το λόγο αυτό τα καταγεγραμμένα δεδομένα επεξεργάστηκαν κατάλληλα απαλείφοντας τις αποκλίνουσες τιμές. Στη συνέχεια τα δεδομένα φιλτράρονται και χωρίζονται σε καταστάσεις φόρτωσης που αντιστοιχούν στις καταστάσεις που αναφέρονται και στις δοκιμές θαλάσσης. Τέλος, εφαρμόζονται μοντέλα για να καθαριστούν τα δεδομένα από την επίδραση των καιρικών φαινομένων. Στο σημείο αυτό μπορεί να γίνει κανονικοποίηση των δεδομένων ως προς τις προαναφερθείσες καταστάσεις φόρτωσης και συνεπώς υπάρχει άμεση σύγκριση με τις τιμές των δοκιμών θαλάσσης.

Οι δείκτες απόδοσης υπολογίστηκαν για τις δύο περιόδους και έγινε σύγκριση των χαρακτηριστικών στατιστικών. Ο δείκτης απόδοσης περιστροφής της έλικας μειώνεται στη 2<sup>η</sup> Περίοδο σε σχέση με την 1<sup>η</sup>, το οποίο δείχνει ότι η απόδοση του πλοίου βελτιώθηκε με την εγκατάσταση του συστήματος. Αντιθέτως, ο δείκτης απώλειας ταχύτητας μειώνεται για τη 2<sup>η</sup> Περίοδο σε σχέση με τη 1<sup>η</sup>, το οποίο δείχνει μείωση στην απόδοση του πλοίου. Η αντίφαση των δεδομένων ενδέχεται να οφείλεται στον μικρό αριθμό δεδομένων. Επιπλέον, η ανάλυση με Noon Reports δεν μπορεί να είναι απόλυτα αντιπροσωπευτική για την κάθε μέρα άρα υπάρχει μεγάλη αβεβαιότητα.

Ακόμη, κατασκευάστηκαν Μοντέλα Πολλαπλής Γραμμικής Παλινδρόμησης για κάθε μία από τις δύο περιόδους με βάση τα ακατέργαστα επιχειρησιακά δεδομένα. Τα δύο μοντέλα αναφέρονται μόνο στην κατάσταση φόρτωσης Scantling. Από τα διαγράμματα που παράγονται για όμοιες καταστάσεις λειτουργίας, συμπεραίνεται ότι η απόδοση του πλοίου βελτιώνεται.

Τέλος, είναι σημαντικό να σημειωθεί πως η ανάλυση των επιχειρησιακών δεδομένων από τα noon report υστερεί σημαντικά ως προς τον αριθμό δεδομένων. Αυτό συμβαίνει διότι τα επιχειρησιακά δεδομένα μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστα για περίοδο μικρότερη του ενός χρόνου. Επιπλέον, ο αποκλεισμός ημερών λόγω αντίξοων καιρικών συνθηκών που θα αποκλίνουν από τα όρια των μεθόδων που εφαρμόστηκαν, περιορίζει ακόμα περισσότερο το αρχικό δείγμα δεδομένων. Συν τοις άλλοις, ο συμψηφισμός των δεδομένων για μία ολόκληρη ημέρα σίγουρα αποκλίνει αρκετά από την πραγματικότητα, αφού μέσα σε ένα εικοσιτετράωρο, οι καιρικές συνθήκες και η πορεία του πλοίου μπορούν να αλλάξουν σημαντικά.

## 7. Βιβλιογραφία

- [1] International Maritime Organization, IMO’s work to cut GHG emissions from ships
- [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] Mol Techno Trade, Ltd.  
<https://www.motech.co.jp>
- [5] K. Ouchi, M. Ogura, (1988), A research and development of PBCF (propeller boss cap fins). Improvement of flow from propeller boss.
- [6] Takafumi Kawamura, Kazuyuki Ouchi, Takeo Nojiri, (2012), Model and full scale CFD analysis of propeller boss cap fins (PBCF)
- [7] ITTC – Recommended Procedures and Guidelines, Preparation, Conduct and Analysis of Speed/Power Trials
- [8] Ξουρίδα, Ε. (2023), Διπλωματική εργασία ΕΜΠ, Επίδραση της βελτιστοποίησης της διαγωγής στην αποδοτικότητα των πλοίων με χρήση επιχειρησιακών δεδομένων.
- [9] Zalachoris, Α. (2020) “Evaluation of the Efficiency of a Mewis Duct by performance monitoring”, Diploma Thesis NTUA
- [10] Σκρέτας, Χ. (2024), Διπλωματική εργασία ΕΜΠ, Μελέτη της επίδρασης διάταξης για τη βελτίωση της πρόωσης πλοίου με χρήση επιχειρησιακών δεδομένων
- [11] CII (Carbon Intensity Indicator), (2023), Class NK, Marine GHG Certification Department
- [12] University of Piraeus, SPSS Lessons, Chapter 6, “Multiple Linear Regression Models”
- [13] Κυρτάτος, Ν., (2007), Βασικές Αρχές Πρόωσης Πλοίων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο