



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΛΟΙΟΥ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΒΙΟ-ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΤΗΣ ΓΑΣΤΡΑΣ
ΚΑΙ ΤΗΣ ΕΛΙΚΑΣ ΣΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΟΥ ΠΛΟΙΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΔΕΙΚΤΩΝ
ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ**

ΧΡΗΣΤΟΣ ΚΟΝΤΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Ν. ΘΕΜΕΛΗΣ, ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2023

[Αυτή η σελίδα αφήνεται σκοπίμως κενή]

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να εκφράσω την βαθιά μου ευγνωμοσύνη στον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Νικόλαο Θεμελή για την ουσιαστική καθοδήγηση και υποστήριξη κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας. Οι συμβουλές και η βοήθειά του ήταν πολύτιμες και τον ευχαριστώ θερμά.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την ναυτιλιακή εταιρεία Laskaridis Shipping Co. Ltd για την παροχή των δεδομένων.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου και τους φίλους μου, για την υποστήριξή τους ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας αλλά και γενικότερα σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περίληψη

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία γίνεται μελέτη εφαρμογής δεικτών αξιολόγησης της απόδοσης (KPI) για την εκτίμηση της επίδρασης της ανάπτυξης βιο-ρύπανσης στην γάστρα και στην έλικα του πλοίου στην απόδοσή του. Η μελέτη βασίζεται σε ένα αρχείο δεδομένων χρονικού εύρους 14 μηνών από πλοίο τύπου Bulk Carrier που συλλέχθηκε από αισθητήρες υψηλής συχνότητας δειγματοληψίας (ανά 1 λεπτό) και συμπληρώθηκε από ημερήσιες αναφορές για όσες παραμέτρους έλειπαν.

Αρχικά, γίνεται η επιλογή των απαραίτητων παραμέτρων από τα διαθέσιμα επιχειρησιακά δεδομένα καθώς επίσης και τα αρχεία δεδομένων αναφοράς από τις δοκιμές θαλάσσης και από τις δοκιμές μοντέλου σε δεξαμενή ρυμούλκησης. Για να είναι εφικτή και αξιόπιστη η χρήση των επιχειρησιακών δεδομένων για τους υπολογισμούς των δεικτών KPI οφείλεται να γίνει η απαραίτητη επεξεργασία τους. Έτσι, τα δεδομένα περιορίζονται στα εύρη των τιμών των δεδομένων αναφοράς, διορθώνονται-κανονικοποιούνται οι τιμές της ταχύτητας για την απόκλιση των μετρούμενων βυθισμάτων από τα βυθίσματα των καταστάσεων φόρτωσης αναφοράς, ξεχωριστά για τις 4 καταστάσεις φόρτωσης που παρατηρούνται και αφαιρούνται κενά και μη φυσιολογικές τιμές με μια διαδικασία επικύρωσης δεδομένων.

Στη συνέχεια, διορθώνονται οι τιμές της ισχύος για τις πρόσθετες αντιστάσεις από τις συνθήκες του καιρού. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται διόρθωση της ισχύος για την πρόσθετη αντίσταση που επιφέρουν ο άνεμος και οι θαλάσσιοι ανεμογενείς κυματισμοί και εφόσον παρατηρήθηκε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών θάλασσας (από 0 °C έως 35 °C), γίνεται διόρθωση και για τις επιδράσεις της απόκλισης της θερμοκρασίας θάλασσας από τη θερμοκρασία θάλασσας αναφοράς (15 °C).

Τελικά, υπολογίζονται οι δείκτες αξιολόγησης της απόδοσης KPIs για την εκτίμηση της επίδρασης της βιο-ρύπανσης της γάστρας και της έλικας στην απόδοση του πλοίου. Οι δείκτες KPI υπολογίζονται ως το ποσοστό απόκλισης των πραγματικών μετρούμενων τιμών από τις τιμές των δεδομένων αναφοράς. Οι δείκτες που επιλέχθηκαν είναι τρεις συμβατικοί δείκτες που χρησιμοποιούνται εκτενώς για την μελέτη της απόδοσης της γάστρας και της έλικας αλλά και δύο δείκτες οι οποίοι μελετούν πιο στοχευμένα τις επιδράσεις της ρύπανσης στην απόδοση χωρίς να επηρεάζονται από μεταβολές της απόδοσης από άλλες πηγές (π.χ. από την απόδοση των μηχανών και των συστημάτων του μηχανοστασίου) και προτείνονται από τη μελέτη των Carchen A., Atlar M. (2020). Ο πρώτος συμβατικός δείκτης είναι ο KPI 1 (Propeller Loading Coefficient) ο οποίος βασίζεται στο νόμο της έλικας, του οποίου η σταθερά μεταβάλλεται εξαιτίας της ρύπανσης της έλικας. Οι δύο επόμενοι συμβατικοί δείκτες υπολογίζονται σύμφωνα με το πρότυπο ISO 19030 (ISO, 2015) και είναι ο KPI 2 (Speed Loss Indicator) ο οποίος εκτιμά την απώλεια ταχύτητας για δεδομένες τιμές αποδιδόμενης ισχύος στο πέρασμα του χρόνου και ο KPI 3 (Power Increase Indicator) ο οποίος εκτιμά αντίστοιχα την προσαύξηση της απαιτούμενης ισχύος για την επίτευξη δεδομένων τιμών ταχύτητας στο πέρασμα του χρόνου, με βασική αιτία μείωσης της απόδοσης την ανάπτυξη της βιο-ρύπανσης στη γάστρα και στην έλικα. Όμως, αυτοί οι δείκτες δεν είναι ικανοί να εκτιμούν την πηγή μείωσης της απόδοσης και έτσι υπολογίστηκαν συμπληρωματικά δύο επιπλέον δείκτες, ο KPI 4 (Wake Fraction Gain Indicator) για την εκτίμηση της απόδοσης γάστρας και της έλικας και ο KPI 5 (Propeller Fouling Indicator) για την εκτίμηση απόδοσης της έλικας, οι οποίοι βασίζονται στον υπολογισμό του ποσοστού ομόρου.

Abstract

In this thesis, a study of the application of Key Performance Indicators (KPIs) is conducted to assess the impact of bio-fouling on the performance of the ship's hull and propeller. The study is based on a 14-month time series dataset from a Bulk Carrier vessel, collected from high-frequency sampling sensors (every 1 minute) and supplemented with noon reports for the missing parameters.

Firstly, the selection of necessary parameters is made from the available operational data, as well as data reference files from Sea Trials and Towing Tank Model Test. To enable the feasible and reliable use of operational data for KPI calculations, necessary data processing is required. Thus, the data is constrained to the ranges of values of the reference data (data filtering) and the velocity values are corrected and normalized to account the deviations in measured drafts from the drafts of reference loading conditions, separately for the four observed loading conditions. Additionally, gaps and outliers are removed through a data validation process.

Next, the power values are corrected for additional resistance due to weather conditions. Specifically, the power is corrected for the additional resistance caused by wind and sea-induced waves. Additionally, considering a wide range of sea temperatures measurements (from 0 °C to 35 °C), corrections are made for the effects of sea temperature deviation from the reference sea temperature (15 °C).

Finally, Key Performance Indicators (KPIs) are calculated to assess the impact of bio-fouling on the performance of the ship's hull and propeller. The KPIs are calculated as the percentage of the deviation of actual measured values from the values of reference data. The selected KPIs consist of three conventional indicators extensively used for observe hull and propeller performance, as well as two indicators that specifically study the effects of bio-fouling on performance without being affected by changes in performance from other sources (e.g., engine and machinery system performance) and are proposed by the study of Carchen A., Atlar M. (2020). The first conventional indicator is KPI 1 (Propeller Loading Coefficient), which is based on the propeller law, where the constant changes due to propeller fouling. The next two conventional indicators are calculated according to the standard ISO 19030 (ISO, 2015) and are the KPI 2 (Speed Loss Indicator), which estimates speed loss for given values of delivered power over time, and the KPI 3 (Power Increase Indicator), which estimates the increase in required power to achieve specific speed values over time, with the primary cause of performance reduction being the development of bio-fouling on the hull and the propeller. However, these indicators are not capable of identifying the source of performance reduction. Therefore, two additional supplementary indicators were calculated: KPI 4 (Wake Fraction Gain Indicator) for the assessment of hull and propeller performance and KPI 5 (Propeller Fouling Indicator) for the assessment of propeller performance, both of which are based on the calculation of the wake fraction.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή	7
1.1 Το πρόβλημα της βιο-ρύπανσης της γάστρας και της έλικας του πλοίου	7
1.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση	8
1.3 Σκοπός και δομή της εργασίας	9
2. Αρχικά Δεδομένα	12
2.1 Χαρακτηριστικά πλοίου - κύριας μηχανής – έλικας	12
2.2 Δεδομένα αναφοράς.....	13
2.2.1 Δοκιμές Θαλάσσης (Sea Trials).....	14
2.2.2 Towing Tank Model Test	17
2.3 Συλλογή δεδομένων	19
2.4 Επιχειρησιακά δεδομένα.....	21
3. Επεξεργασία και ανάλυση επιχειρησιακών δεδομένων	23
3.1 Συμπλήρωση αρχείου υψίσυχνων δεδομένων με ημερήσια (noon reports)	23
3.2 Συμπλήρωση και αφαίρεση κενών	25
3.3 Χωρισμός δεδομένων σε καταστάσεις φόρτωσης	28
3.4 Περιγραφική στατιστική δεδομένων	32
3.5 Περιορισμός δεδομένων στα εύρη τιμών αναφοράς - Διαδικασία filtering & normalization.....	43
3.6 Στατιστική απαλοιφή μη φυσιολογικών τιμών – Διαδικασία Validation	50
4. Πρόσθετες αντιστάσεις.....	56
4.1 Πρόσθετη αντίσταση ανέμου	56
4.1.1 Υπολογισμός φαινόμενης ταχύτητας και διεύθυνσης ανέμου στο ύψος αναφοράς	56
4.1.2 Συντελεστής αντίστασης ανέμου – Μέθοδος Fujiwara	59
4.1.3 Υπολογισμός πρόσθετης αντίστασης ανέμου	62
4.2 Πρόσθετη αντίσταση κυματισμού θάλασσας STAWAVE-1.....	63
4.3 Πρόσθετη αντίστασης λόγω θερμοκρασίας θάλασσας.....	65
4.4 Διόρθωση Ισχύος & Συνεισφορά επιμέρους πρόσθετων αντιστάσεων.....	67
5. Δείκτες αξιολόγησης της απόδοσης (KPIs).....	70
5.1 KPI 1 (Propeller Loading Coefficient): Δείκτης Απόδοσης Περιστροφής της Έλικας..	70
5.2 KPI 2 (Speed Loss Indicator): Δείκτης Απώλειας της Ταχύτητας.....	72
5.3 KPI3 (Power Increase Indicator): Δείκτης Προσαύξησης της Ισχύος.....	73
5.4 KPI 4 (Wake Fraction Gain Indicator): Δείκτης Προσαύξησης Ποσοστού Ομόρου	75
5.5 KPI 5 (Propeller Fouling Indicator): Δείκτης Ρύπανσης Έλικας	76

6. Αποτελέσματα και ανάλυση των KPIs	79
6.1 Χρονοδιαγράμματα, ιστογράμματα και ανάλυση των KPIs πριν και μετά από ενέργειες επισκευής και συντήρησης.....	79
6.2 Σύγκριση των συμβατικών KPIs Speed Loss και Power Increase με τους πιο στοχευμένους στη ρύπανση KPIs	86
7. Συμπεράσματα και περαιτέρω μελέτη	90
7.1 Συμπεράσματα.....	90
7.2 Περαιτέρω μελέτη.....	91
Βιβλιογραφία	93

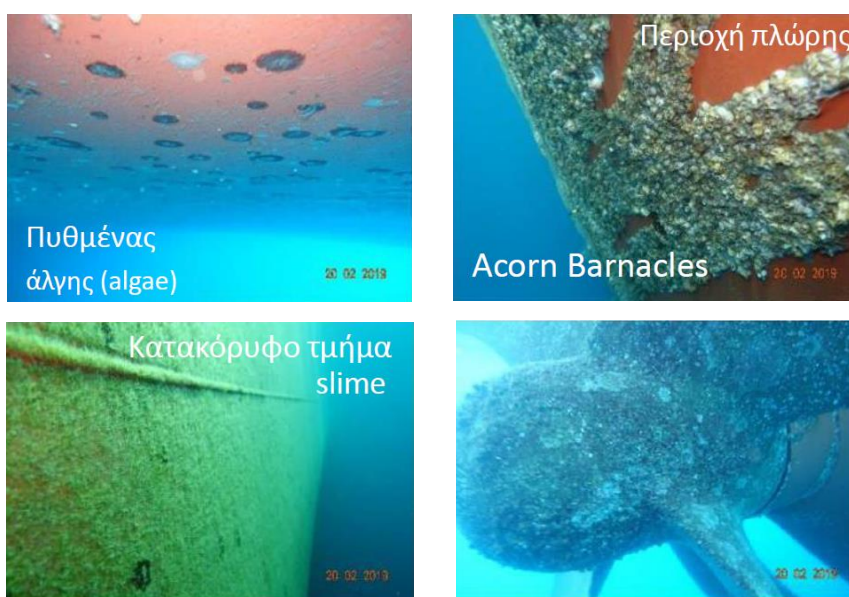
1. Εισαγωγή

1.1 Το πρόβλημα της βιο-ρύπανσης της γάστρας και της έλικας του πλοίου

Η παρακολούθηση της απόδοσης των πλοίων έχει γίνει πιο επιτακτική από ποτέ άλλοτε, λόγω των αυξανόμενων πιέσεων και περιορισμών που ασκούνται από τις διεθνείς νομοθεσίες, με σκοπό τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της ναυτιλίας. Ήδη από το 2011 ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO) υιοθέτησε μέτρα υποχρεωτικά για όλους τους πλοιοκτήτες διεθνώς, με σκοπό τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής αποδοτικότητας των πλοίων. Έκτοτε, ο IMO λαμβάνει περαιτέρω μέτρα με πιο πρόσφατα αυτά που αναφέρονται στην αναθεωρημένη στρατηγική του Ιουλίου του 2023.

Σύμφωνα με την αναθεωρημένη στρατηγική του IMO (2023), οι νέοι στόχοι περιλαμβάνουν 20% μείωση των εκπομπών των πλοίων μέχρι το 2030, 70% μείωση μέχρι το 2040 (συγκριτικά με τα επίπεδα εκπομπών του 2008), με ύψιστο στόχο την επίτευξη σχεδόν μηδενικών εκπομπών μέχρι το 2050. Για τον έλεγχο συμμόρφωσης των ναυτιλιακών εταιρειών από τον IMO, έχουν αναπτυχθεί οι δείκτες EEXI (Energy Efficiency Existing Ship Index) και CII (Carbon Intensity Indicator) και στην περίπτωση υπέρβασής τους ασκείται το αντίστοιχο πρόστιμο. Έτσι, οι πλοιοκτήτες και οι ναυτιλιακές εταιρείες έχουν στρέψει το βλέμμα τους σε εφαρμογή μεθόδων βελτιστοποίησης της απόδοσης των πλοίων για να βρίσκονται σε συμμόρφωση με τους κανονισμούς με τον λιγότερο δαπανηρό τρόπο.

Ο περιορισμός της επίδρασης της βιο-ρύπανσης στην απόδοση του πλοίου αποτελεί ένα από τα βασικότερα προβλήματα βελτιστοποίησης της απόδοσης των πλοίων. Η ανάπτυξη της βιο ρύπανσης στη γάστρα και στην έλικα έχει σημαντική επίδραση στη συνολική υδροδυναμική απόδοση ενός πλοίου με σχετικές έρευνες να δείχνουν ότι το λεπτό στρώμα βιοφίλμ και η ανάπτυξη άλγεων (slime algae & biofilm) προκαλούν μείωση της απόδοσης ισχύος που υπερβαίνει το 10%, ενώ η ανάπτυξη οστρακοειδών (barnacles) μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση ισχύος κατά 80% (Carchen A. & Atlar M., 2020). Η μείωση της απόδοσης είναι επακόλουθο της αύξησης της τραχύτητας της βρεχόμενης επιφάνειας της γάστρας αλλά και των πτερυγίων της έλικας.



Εικόνα 1: Κατηγορίες βιο-ρύπανσης

Η αύξηση της τραχύτητας της γάστρας, προκαλεί αύξηση του πάχους του οριακού στρώματος με αποτέλεσμα την αύξηση της αντίστασης τριβής που δέχεται το πλοίο από το νερό. Επιπρόσθετα, η αύξηση του πάχους του οριακού στρώματος μειώνει την ταχύτητα ροής του νερού που καταλήγει στην έλικα και επομένως επιτυγχάνεται μείωση του ποσοστού ομόρου μειώνοντας περαιτέρω την απόδοση του πλοίου. Τέλος, η ανάπτυξη βιο-ρύπανσης στην έλικα του πλοίου, προκαλεί αύξηση της αντίστασης των πτερυγίων και επομένως αύξηση της ροπής της έλικας αλλάζοντας έτσι τα χαρακτηριστικά της σε ελεύθερη ροή με αποτέλεσμα να μειώνεται η απόδοσή της.

Η παρακολούθηση της επίδρασης ανάπτυξης βιο-ρύπανσης στην απόδοση του πλοίου επιτυγχάνεται με τον υπολογισμό Δεικτών Αξιολόγησης της Απόδοσης (Key Performance Indicators) γνωστοί ως KPIs. Οι δείκτες KPIs λειτουργούν ως μέτρο σύγκρισης της πραγματικής απόδοσης του πλοίου (χρησιμοποιώντας δεδομένα από εγκατεστημένους αισθητήρες) με την ιδανική απόδοση αναφοράς που συνήθως λαμβάνεται από τα Sea Trials και τα Shop Test. Έτσι, έχοντας ορίσει κρίσιμες τιμές των KPIs, ο αρχιμηχανικός του πλοίου είναι σε θέση να οργανώνει τους καθαρισμούς (γάστρας και έλικας) και τους δεξαμενισμούς καθώς και τις έκτακτες επισκευές στον βέλτιστο χρόνο.

1.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Η Διεθνής Ένωση Προτύπων (ISO) έχει αναπτύξει το πρότυπο ISO 19030 (ISO, 2015) για τη μέτρηση των αλλαγών στην απόδοση της γάστρας και της έλικας και τον υπολογισμό βασικών Δεικτών Αξιολόγησης της Απόδοσης (KPIs). Κύριες μετρούμενες παράμετροι αποτελούν η ταχύτητα του πλοίου ως προς το νερό (STW) και η αποδιδόμενη ισχύς στην έλικα (Propeller Shaft Power) και δευτερεύοντες οι συνθήκες καιρού (διεύθυνση και ταχύτητα ανέμου, διεύθυνση και ύψος σημαντικού ύψους κύματος, θερμοκρασία και πυκνότητα θαλασσινού νερού, βάθος θάλασσας). Στο πρότυπο ISO 19030 (ISO, 2015) περιγράφονται όλα τα στάδια επεξεργασίας των δεδομένων, από την απόκτηση των δεδομένων προδιαγράφοντας τους απαραίτητους αισθητήρες, στην αποθήκευσή τους μέχρι και την απαραίτητη επεξεργασία τους και τελικά τον υπολογισμό των δεικτών KPI. Εφόσον, επικυρωθούν (validation) τα δεδομένα αφαιρώντας μη φυσιολογικές τιμές (outliers) και κενά, μέσω μιας διαδικασίας φιλτραρίσματος (filtering) και κανονικοποιήσεων-διορθώσεων (normalization) τα δεδομένα διορθώνονται για την πρόσθετη αντίσταση ανέμου και για την απόκλιση των βυθισμάτων των κάθε καταστάσεων φόρτωσης για την κατάσταση καιρού και φόρτωσης αναφοράς (καιρός χωρίς άνεμο και βυθίσματα κατάστασης αναφοράς). Τελικά υπολογίζονται οι δείκτες KPI απώλειας ταχύτητας για δεδομένη αποδιδόμενη ισχύ (Speed Loss Indicator) και προσαύξησης της ισχύος για δεδομένη ταχύτητα (Power Increase Indicator).

Στις προτεινόμενες διαδικασίες της ITTC (2017) Preparation, Conduct and Analysis of Speed/Power Trials αναλύονται οι μέθοδοι που εφαρμόζονται για να οριστεί τελικά η απόδοση του πλοίου ως προς την ταχύτητα, την ισχύ και τις στροφές του άξονα σε συνθήκες αναφοράς καλού καιρού (χωρίς άνεμο, χωρίς κύμα, σε μεγάλο βάθος και σε θερμοκρασία θάλασσας 15 °C) από μετρήσεις των εν λόγω παραμέτρων κατά τις δοκιμές θαλάσσης (Sea Trials). Για να επιτευχθεί αυτό, γίνονται διορθώσεις των μετρούμενων παραμέτρων για τις συνθήκες που επικρατούν κατά τη διεξαγωγή των δοκιμών θαλάσσης ανάγοντας έτσι τα δεδομένα στις ιδανικές συνθήκες πλεύσης. Διορθώσεις γίνονται για τον άνεμο, τους θαλάσσιους κυματισμούς, την απόκλιση της θερμοκρασίας θάλασσας από τη θερμοκρασία

αναφοράς, το βάθος του νερού καθώς και για την απόκλιση του βυθίσματος από το βύθισμα αναφοράς.

Στο άρθρο των Carchen A. & Atlar M. (2020) παρουσιάζονται τέσσερις δείκτες KPIs για την εκτίμηση της επίδρασης της βιο-ρύπανσης στην απόδοση του πλοίου από τους οποίους στην παρούσα εργασία υπολογίστηκαν οι τρεις πρώτοι. Ο πρώτος δείκτης που παρουσιάζεται είναι ο δείκτης Προσαύξησης της Ισχύος (Power Increase Indicator) ο οποίος αποτελεί βασικός δείκτης στα πιο ανεπτυγμένα συστήματα Ship Performance Monitoring System (SPMS) για τη μελέτη της μείωσης της απόδοσης εξαιτίας της ρύπανσης της γάστρας και της έλικας και έχει εφαρμοστεί εκτενώς στη βιβλιογραφία όπως επίσης και στο ISO 19030 (ISO, 2015). Όμως, το ελάττωμα αυτού του δείκτη έγκειται στο γεγονός ότι δεν μπορεί να εκτιμήσει την πηγή της μείωσης της απόδοσης η οποία μπορεί να οφείλεται πέρα από τη ρύπανση της γάστρας και της έλικας, στη μείωση της απόδοσης των συστημάτων και μηχανημάτων του μηχανοστασίου. Για τον λόγο αυτόν, μελετώνται στο άρθρο τρεις επιπλέον δείκτες KPIs που εκτιμούν πιο στοχευμένα την επίδραση της ρύπανσης. Έτσι, ο δεύτερος δείκτης KPI που αναλύεται είναι ο δείκτης Προσαύξησης του Ποσοστού Ομόρου (Wake Fraction Gain Indicator) ο οποίος υπολογίζοντας το ποσοστό ομόρου ως προς τη ροπή εκτιμά την μείωση της ταχύτητας ροής που καταλήγει στην έλικα ως αποτέλεσμα της αύξησης του πάχους του οριακού στρώματος λόγω της αύξησης της τραχύτητας που επιφέρει η ρύπανση. Η ρυπασμένη έλικα επιδρά και εκείνη στην αύξηση του ποσοστού ομόρου ως προς τη ροπή και επομένως ο δείκτης εκτιμά συνολικά την κατάσταση της γάστρας και της έλικας. Με τον τρίτο δείκτη KPI (Propeller Fouling Indicator) υπολογίζεται ξεχωριστά η κατάσταση της έλικας εισάγοντας την ώση στους υπολογισμούς η οποία επηρεάζεται αμελητέα από τη ρύπανση. Έτσι, υπολογίζεται το φαινόμενο ποσοστό ομόρου ως αποτέλεσμα της διαφοράς του ποσοστού ομόρου ως προς τη ροπή από το ποσοστό ομόρου ως προς την ώση. Για τους υπολογισμούς των δύο προαναφερθέντων δεικτών KPI είναι απαραίτητο να είναι γνωστά τα χαρακτηριστικά της έλικας, το διάγραμμα ελεύθερης ροής της έλικας και το ποσοστό ομόρου που έχει υπολογιστεί από τα πειράματα δεξαμενής (Towing Tank Model Test). Ο τέταρτος δείκτης KPI εκτιμά την αύξηση της αντίστασης τριβής της γάστρας.

1.3 Σκοπός και δομή της εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η στοχευμένη εκτίμηση της μεταβολής της απόδοσης εξαιτίας της ανάπτυξης βιο-ρύπανσης στην γάστρα και στην έλικα ενός πλοίου κατηγορίας Bulk Carrier, με χρήση μεγάλου αρχείου υψίσυχνων επιχειρησιακών δεδομένων από εγκατεστημένους αισθητήρες, με συμπληρωματικά ημερήσια δεδομένα, σε ένα χρονικό εύρος 14 μηνών. Για τον σκοπό αυτό, εφόσον επιλέχθηκαν τα δεδομένα αναφοράς από τις δοκιμές θαλάσσης (Sea Trials) και από τα πειράματα δεξαμενής (Towing Tank Model Test) και αφού έγινε η απαραίτητη επεξεργασία των επιχειρησιακών δεδομένων, υπολογίστηκαν πέντε δείκτες KPI, οι δύο εκ των οποίων κάνουν πιο στοχευμένη εκτίμηση της ρύπανσης της γάστρας και της έλικας.

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται τα αρχικά δεδομένα που χρησιμοποιούνται στη μελέτη. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του υπό μελέτη πλοίου, της κύριας μηχανής και της έλικας, τα δεδομένα αναφοράς που αντλούνται από τις δοκιμές θαλάσσης (Sea Trials) και τα πειράματα δεξαμενής (Towing Tank Model Test). Επιπλέον, παρουσιάζονται τα επιχειρησιακά υψίσυχνα δεδομένα και τα συμπληρωματικά ημερήσια δεδομένα καθώς

επίσης και οι αισθητήρες που είναι εγκατεστημένοι στο πλοίο για τη δειγματοληψία αυτών των δεδομένων.

Στο *Κεφάλαιο 3* αναλύεται η επεξεργασία των επιχειρησιακών δεδομένων. Η επεξεργασία περιλαμβάνει τη μεταφορά στο αρχείο υψίσυχνων δεδομένων, των συμπληρωματικών από τα ημερήσια δεδομένα (noon reports), την συμπλήρωση και αφαίρεση των κενών και τον χωρισμό των δεδομένων σε καταστάσεις φόρτωσης που αντιστοιχούν στις καταστάσεις φόρτωσης αναφοράς των Sea Trials. Τελικά, τα δεδομένα υπόκεινται σε φιλτράρισμα (filtering) και επικύρωση (validation) όπου περιορίζονται στο εύρος των τιμών των παραμέτρων των δεδομένων αναφοράς, αφαιρούνται μη φυσιολογικές τιμές, και κανονικοποιούνται τα δεδομένα της ταχύτητας για την απόκλιση των μετρούμενων βυθισμάτων από τα βυθίσματα αναφοράς.

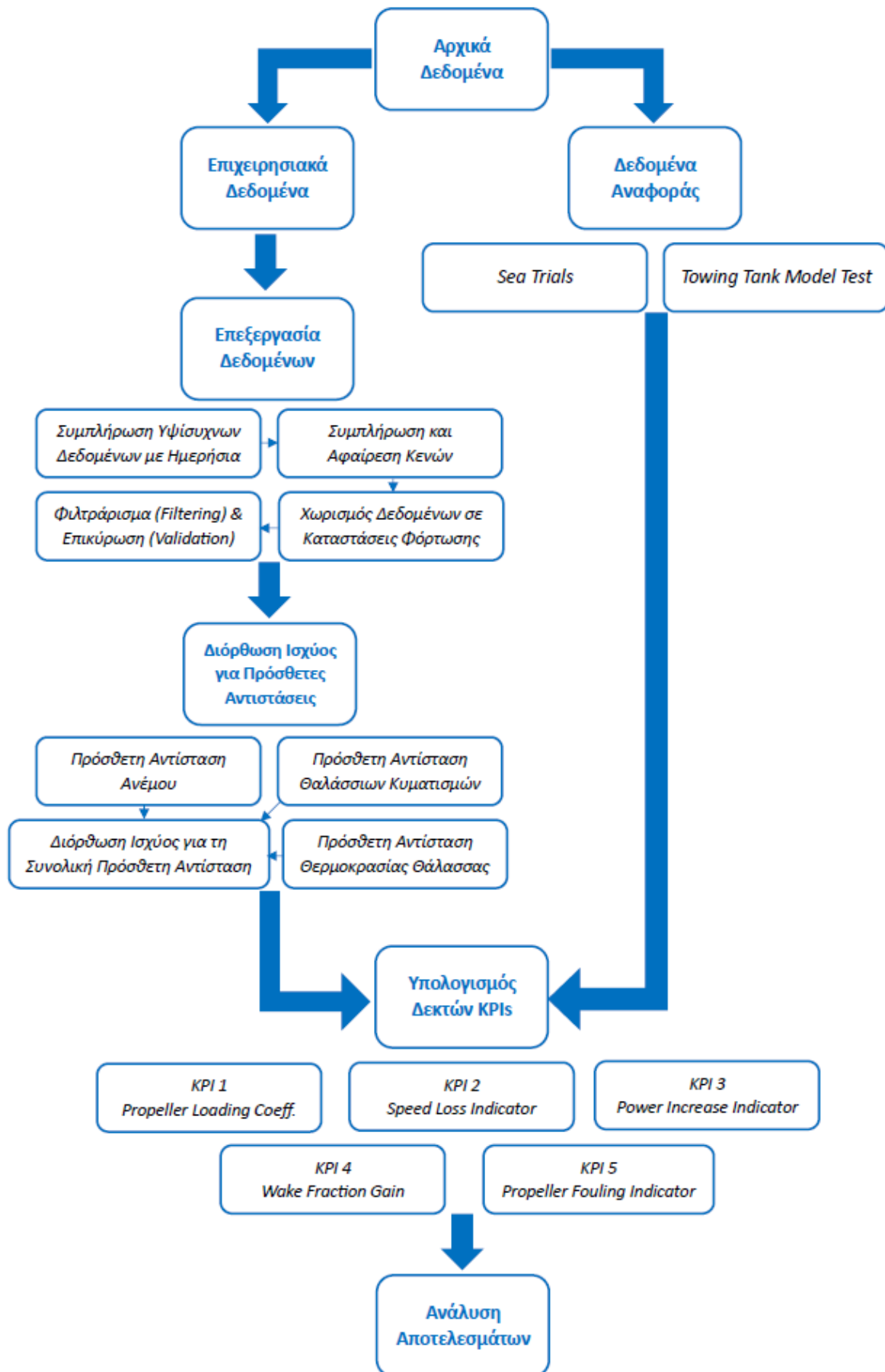
Στο *Κεφάλαιο 4* παρουσιάζονται οι μεθοδολογίες υπολογισμού των πρόσθετων αντιστάσεων που δέχεται το πλοίο από το περιβάλλον του (πρόσθετες αντιστάσεις ανέμου, θαλάσσιων μετωπικών κυματισμών και θερμοκρασίας θάλασσας) και διορθώνεται η αποδιδόμενη ισχύς στην έλικα (Propeller Shaft Power) για την επίδρασή τους. Επίσης, παρουσιάζεται η συνεισφορά των επιμέρους αντιστάσεων στην συνολική πρόσθετη αντίσταση.

Στο *Κεφάλαιο 5* αναλύονται οι μεθοδολογίες υπολογισμού των Δεικτών Αξιολόγησης της Απόδοσης KPIs, ο συνδυασμός των οποίων αποσκοπεί στην στοχευμένη παρακολούθηση της κατάστασης της γάστρας και της έλικας. Ο πρώτος δείκτης KPI 1 (Propeller Loading Coefficient) υπολογίστηκε με σκοπό να μελετηθεί η αλλαγή συμπεριφοράς της έλικας, κατά τη σχέση αποδιδόμενης ισχύος στην έλικα – ταχύτητα περιστροφής έλικας, η οποία παρατηρήθηκε κατά την επεξεργασία των επιχειρησιακών δεδομένων και βασίζεται στο νόμο της έλικας. Ο δεύτερος και ο τρίτος δείκτης KPI 2 (Speed Loss Indicator) και KPI 3 (Power Increase Indicator) υπολογίστηκαν ως οι συμβατικοί δείκτες που χρησιμοποιούνται εκτενώς για την παρακολούθηση της κατάστασης της γάστρας και της έλικας. Ο τέταρτος και ο πέμπτος δείκτης KPI 4 (Wake Fraction Gain) και KPI 5 (Propeller Fouling Indicator) υπολογίστηκαν ως πιο στοχευμένοι δείκτες για την παρακολούθηση της απόδοσης της γάστρας και της έλικας.

Στο *Κεφάλαιο 6* παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των KPIs με αντίστοιχα χρονοδιαγράμματα ιστογράμματα και πίνακες, αναλύονται οι επιπτώσεις των γεγονότων επισκευής και συντήρησης που λαμβάνουν χώρο στο χρονικό εύρος της μελέτης καθώς και η επίδραση της ρύπανσης μεταξύ αυτών των γεγονότων. Επίσης γίνεται σύγκριση των συμβατικών δεικτών KPI με τους πιο στοχευμένους στη ρύπανση KPI.

Στο *Κεφάλαιο 7* αναφέρονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας και παρατίθενται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Στην *Εικόνα 2* παρατίθεται το διάγραμμα ροής των διαδικασιών που ακολουθήθηκαν στην εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

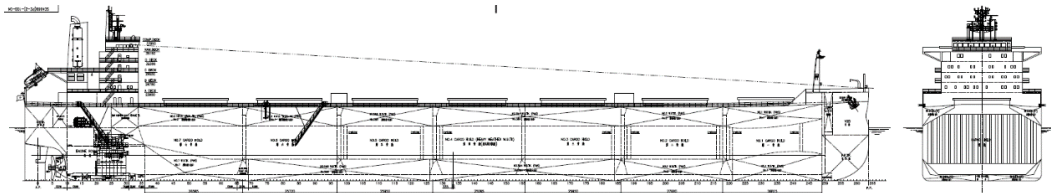


Εικόνα 2: Διάγραμμα ροής διαδικασιών (Flow Chart) της διπλωματικής εργασίας

2. Αρχικά Δεδομένα

2.1 Χαρακτηριστικά πλοίου - κύριας μηχανής – έλικας

Για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκαν επιχειρησιακά δεδομένα για πλοίο μεταφοράς φορτίου χύδην (Bulk Carrier) του οποίου η ναυπήγησή του ολοκληρώθηκε στις αρχές του έτους 2020.



Εικόνα 3: Διαμήκης και μέση τομή του υπό μελέτη πλοίου

Τα κύρια χαρακτηριστικά του υπό μελέτη πλοίου παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 1: Κύρια χαρακτηριστικά του υπό μελέτη πλοίου

PRINCIPAL PARTICULARS	
LENGTH O.A.	229 [m]
LENGTH B.P.	225,5 [m]
BREADTH (MLD.)	32,26 [m]
DEPTH (MLD.)	20,05 [m]
DESIGN DRAFT	12,2 [m]
SCANTLING DRAFT	14,45 [m]
DEADWEIGHT (AT SCANTLING DRAFT)	81600 [t]
SERVICE SPEED (AT C.S.R., T=12,2M WITH 15%S.M.)	14,3 [kn]
ENDURANCE	25000 [n.mile]
COMPLEMENT	25 P.

Στο υπό μελέτη πλοίο είναι εγκατεστημένη μηχανή εσωτερικής καύσης HYUNDAI – MAN B&W 6S60ME-C8.5 της οποίας τα χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά κύριας μηχανής του υπό μελέτη πλοίου

MAIN ENGINE	
HYUNDAI MAN B&W 6S60ME-C8.5	
NUMBER OF CYLINDERS	6
DIAMETER OF CYLINDER	600 mm
STROKE	2400 mm

M.C.R. Brake Power	9930 kW
M.C.R. Speed	90,4 rpm

Επίσης, στο πλοίο είναι εγκατεστημένη η έλικα No. TM1376A με τα εξής χαρακτηριστικά:

Πίνακας 3: Χαρακτηριστικά έλικας του υπό μελέτη πλοίου

PROPELLER	
No. TM1376A	
Diameter	6,95 m
Expended area ratio	0,52
Pitch ratio	0,8429
Number of blades	5
Pitch type	Fixed
Direction of turning	Right-handed

2.2 Δεδομένα αναφοράς

Για τον υπολογισμό των Δεικτών Αξιολόγησης της Απόδοσης KPIs είναι απαραίτητο να είναι διαθέσιμα κάποια δεδομένα αναφοράς. Τα δεδομένα αναφοράς λειτουργούν ως τα ιδανικά δεδομένα με τα οποία συγκρίνονται τα πραγματικά δεδομένα λειτουργίας με σκοπό να εκτιμηθούν οι αυξομειώσεις στην απόδοση κατά τη διάρκεια ζωής του πλοίου. Βελτίωση της απόδοσης παρατηρούμε έπειτα από επισκευές ή συντηρήσεις σε διάφορα τμήματα του πλοίου όπως για παράδειγμα ύστερα από κάποιον δεξαμενισμό, κάποιον καθαρισμό της γάστρας και της έλικας με δύτες, κάποιας μηχανικής επισκευής και συντήρησης, επιδιορθώσεις στη γάστρα του πλοίου κλπ. Μεταξύ όμως δύο τέτοιων γεγονότων παρατηρείται μείωση της απόδοσης του πλοίου και υπολογίζοντας τους δείκτες KPIs μπορούν οι επιβλέποντες του πλοίου (π.χ. ο αρχιμηχανικός του πλοίου, είτε το τμήμα Performance της Ναυτιλιακής εταιρείας) να εκτιμούν ποια είναι η κατάλληλη στιγμή για συντήρηση και επισκευή.

Ως δεδομένα αναφοράς μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε τα δεδομένα που μετρήθηκαν και διορθώθηκαν κατά τα Sea Trials του πλοίου είτε μια περίοδος ύστερα από κάποιον δεξαμενισμό ή καθαρισμό της γάστρας (ανάγοντας τα δεδομένα σε συνθήκες καλού καιρού, χωρίς άνεμο, κύμα, θαλάσσιο ρεύμα κλπ). Στην εργασία αυτή ως δεδομένα αναφοράς χρησιμοποιήθηκαν αυτά των Sea Trials για τον υπολογισμό των δεικτών KPI 1 (Propeller Loading Coefficient), KPI 2 (Speed Loss Indicator), KPI 3 (Power Increase Indicator) και για τον υπολογισμό των πιο στοχευμένων στη ρύπανση της γάστρας και της έλικας KPI 4 (Wake Fraction Gain Indicator) και KPI 5 (Propeller Fouling Indicator) χρησιμοποιήθηκαν συνδυαστικά δεδομένα από τα Sea Trials και τα Towing Tank Model Test.

2.2.1 Δοκιμές Θαλάσσης (Sea Trials)

Τα Sea Trials διενεργούνται κατά την τελευταία φάση ναυπήγησης του πλοίου, ύστερα από την καθέλκυσή του από το ναυπηγείο, κατά την οποία γίνονται δοκιμές των συστημάτων και των επιδόσεων ενός πλοίου και μετριέται η απόδοση και η γενική αξιοπλοΐα του. Επιπλέον, Sea Trials γίνονται και έπειτα από δεξαμενισμούς αλλά και από τροποποιήσεις οι οποίες απαιτούν επιβεβαίωση της απόδοσης του πλοίου και της συμμόρφωσής του με τις προδιαγραφές που καθορίζονται με βάση τους κανονισμούς. Πιο συγκεκριμένα, διεξάγονται δοκιμές της ταχύτητας, της ικανότητας ελιγμών, του εξοπλισμού και των χαρακτηριστικών ασφαλείας ενός πλοίου. Είναι αρκετά τυποποιημένες χρησιμοποιώντας τεχνικά δελτία που δημοσιεύονται από την ITTC και τον IMO.

Από τις δοκιμές των Sea Trials τα δεδομένα που χρειάζονται για την συγκεκριμένη εργασία είναι οι μετρήσεις των speed-power trials. Ο πρωταρχικός σκοπός των speed-power trials είναι ο προσδιορισμός της απόδοσης του πλοίου ως προς την ταχύτητα, την ισχύ και τις περιστροφές της έλικας υπό προκαθορισμένες συνθήκες πλοίου, και με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται επαλήθευση της ικανοποιητικής επίτευξης της συμβατικής καθορισμένης ταχύτητας και ισχύος του πλοίου και η παροχή της ταχύτητας και ισχύος του πλοίου για τον υπολογισμό του Energy Efficiency Design Index (EEDI) που απαιτείται από τον IMO (ITTC, 2017).

Σύμφωνα με την 28th ITTC (2017) κατά τη διάρκεια των speed-power trials οι συνθήκες καιρού πρέπει να επηρεάζουν όσο το δυνατόν λιγότερο το πλοίο ώστε να αποφευχθούν απρόσμενες επιδράσεις στις μετρήσεις. Έτσι, πρέπει να επιλέγονται τοποθεσίες χωρίς έντονους ανέμους και κυματισμούς καθώς επίσης χωρίς έντονη κυκλοφορία από άλλα σκάφη. Παρόλο που υπάρχουν μεθοδολογίες διόρθωσης για τις αποκλίσεις από την συμβατική κατάσταση, είναι έγκυρες μέχρι κάποια όρια τιμών.

➤ Άνεμος

Για πλοία μήκους μεγαλύτερων των 100 μέτρων, κατηγορία στην οποία ανήκει το υπό μελέτη πλοίο, ο άνεμος δεν πρέπει να ξεπερνά τον αριθμό 6 κλίμακας Beaufort.

➤ Κατάσταση θάλασσας

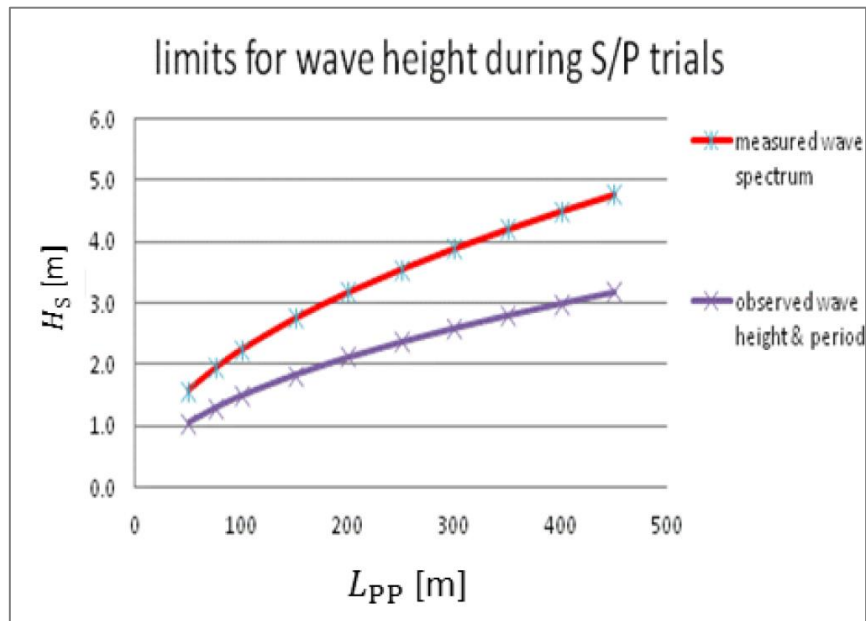
Το συνολικό σημαντικό ύψος κύματος $H_{1/3}$ υπολογίζεται από το σημαντικό ύψος κύματος των τοπικών ανεμογενών κυμάτων $H_{W1/3}$ (wind waves) και από το σημαντικό ύψος των αποθαλασσών $H_{S1/3}$ (swells) ως εξής:

$$H_{1/3} = \sqrt{H_{W1/3}^2 + H_{S1/3}^2} \quad (2.2.1.1)$$

Οι τιμές που λαμβάνει το σημαντικό ύψος κύματος $H_{1/3}$ κατά τη διάρκεια των speed-power trials πρέπει να ικανοποιούν τα εξής:

$$H_{1/3} \leq 1,5 \cdot x, \text{ όταν το σημαντικό ύψος εκτιμάται από οπτικές παρατηρήσεις}$$
$$H_{1/3} \leq 1,5 \cdot x, \text{ με } x = \sqrt{L_{PP}/100} \quad (2.2.1.2), \text{ όταν το σημαντικό ύψος μετριέται.}$$

Στην *Εικόνα 4* παρουσιάζεται ενδεικτικά ένα διάγραμμα όπου μπορεί να παρατηρηθεί πως τα speed-power trials γίνονται με κυματισμούς εντός των ορίων.



Εικόνα 4: Όρια επιτρεπτού σημαντικού ύψους κύματος, ITTC (2017)

➤ Βάθος νερού

Υπάρχουν μεθοδολογίες διόρθωσης για πλεύση σε ρηχό νερό, παρόλα αυτά είναι προτιμότερο να αποφεύγονται και να διενεργούνται τα speed-power trials σε τιμή βάθους μικρότερη από τη μεγαλύτερη που προκύπτει από τις παρακάτω σχέσεις:

$$h = 3 \cdot \sqrt{B \cdot T_M} \quad (2.4.1.2), \quad h = 2,75 \frac{V_s^2}{g} \quad (2.2.1.3)$$

όπου

- h Βάθος του νερού [m]
- B Πλάτος του πλοίου [m]
- T_M Βύθισμα του πλοίου στο midship [m]
- V_s Ταχύτητα του πλοίου [m/s]
- g Επιτάχυνση της βαρύτητας [m/s²]

Η τιμή του βάθους νερού που θα διορθωθεί δεν πρέπει να είναι μικρότερη από τη μεγαλύτερη που προκύπτει από τις παρακάτω σχέσεις:

$$h = 2 \cdot \sqrt{B \cdot T_M} \quad (2.4.1.4), \quad h = 2 \frac{V_s^2}{g} \quad (2.2.1.5)$$

Επίσης, πρέπει να αποφεύγονται περιοχές με απότομες αλλαγές βάθους.

➤ Θαλάσσιο ρεύμα

Ιδανικά τα speed-power trials πρέπει να γίνονται σε περιοχές όπου η ταχύτητα και η κατεύθυνση του θαλάσσιου ρεύματος είναι σχετικά σταθερές. Έχει παρατηρηθεί ότι αν η αλλαγή της ταχύτητας του θαλασσιού ρεύματος σε μία ώρα είναι μεγαλύτερη των 0,5 kn δεν μπορεί να γίνει διόρθωση των μετρήσεων.

Το υπό μελέτη πλοίο εκτέλεσε τα Sea Trials σε κατάσταση Normal Ballast με πρυμναίο βύθισμα 4,9 m και πωρραίο βύθισμα 7,4 m.

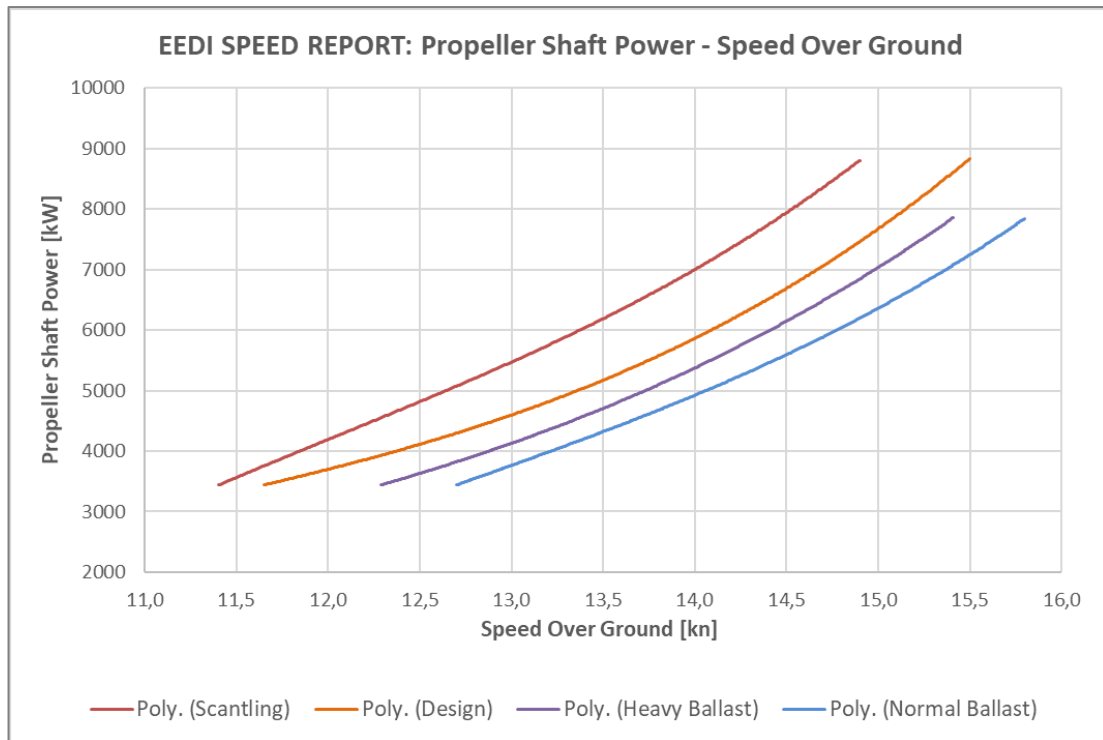
Οι διορθωμένες από τον καιρό τιμές ισχύος και ταχύτητας παρουσιάζονται στους Πίνακες 4 και 5 και στο διάγραμμα της Εικόνας 5 και αποτελούν τα δεδομένα αναφοράς για τον υπολογισμό του KPI 2 (Speed Loss Indicator) και του KPI 3 (Power Increase Indicator). Τα δεδομένα έχουν αναχθεί από το ναυπηγείο και στις υπόλοιπες καταστάσεις φόρτωσης με χρήση των καμπυλών ισχύος-ταχύτητας των model test.

Πίνακας 4: Τιμές αναφοράς για την ισχύ της Κ.Μ την ταχύτητα του πλοίου και τις περιστροφές του άξονα από τα Sea Trials, για τις καταστάσεις Scantling και Design

EEDI SPEED REPORT: Reference Curve Vs-Pd-Ns Corrected - Sea Trials p.84					
				Scantling Draught Tm = 14,45m Displacement = 94796,2t Trim = 0m	Design Draught Tm = 12,20m Displacement = 78711,9t Trim = 0m
M/E load [%]	Brake Power [kW]	M/E Speed [rpm]	Propeller Power [kW]	Vessel Speed Corrected from weather conditions [kn]	Vessel Speed Corrected from weather conditions [kn]
110%CMCR	10923	90,3	10814	-	-
100%CMCR	9930	90,4	9831	-	-
90%CMCR	8937	87,3	8848	14,9	15,5
85%CMCR	8440	85,6	8356	14,7	15,3
80%CMCR	7944	83,9	7865	14,5	15,1
75%CMCR	7448	82,1	7374	14,22	14,86
71.6%CMCR	7110	80,9	7039	14	14,7
65%CMCR	6454	78,3	6389	13,6	14,3
50%CMCR	4965	71,8	4915	12,6	13,3
35%CMCR	3476	63,7	3441	11,4	11,65
25%CMCR	2483	56,9	2458	-	-

Πίνακας 5: Τιμές αναφοράς για την ισχύ της Κ.Μ την ταχύτητα του πλοίου και τις περιστροφές του άξονα από τα Sea Trials, για τις καταστάσεις Normal Ballast και Heavy Ballast

EEDI SPEED REPORT: Reference Curve Vs-Pd-Ns Corrected - Sea Trials p.84					
				Normal Ballast Draught Tm=6,15m Displacement = 37116,3t Trim = 2,5m	Added Heavy Ballast Draught Tm=8,27m Displacement =51324,3 t Trim = 2,3m
M/E load [%]	Brake Power [kW]	M/E Speed [rpm]	Propeller Power [kW]	Vessel Speed Corrected from weather conditions [kn]	Vessel Speed Corrected from weather conditions [kn]
110%CMCR	10923	90,3	10814	-	-
100%CMCR	9930	90,4	9831	-	-
90%CMCR	8937	87,3	8848	-	-
85%CMCR	8440	85,6	8356	-	-
80%CMCR	7944	83,9	7865	15,8	15,411
75%CMCR	7448	82,1	7374	15,58	15,178
71.6%CMCR	7110	80,9	7039	15,4	15,0015
65%CMCR	6454	78,3	6389	15	14,642
50%CMCR	4965	71,8	4915	14	13,6655
35%CMCR	3476	63,7	3441	12,7	12,2895
25%CMCR	2483	56,9	2458	-	-



Εικόνα 5: Διάγραμμα αναφοράς ισχύος - ταχύτητας από τις μετρήσεις των Sea Trials

2.2.2 Towing Tank Model Test

Η πιο ολοκληρωμένη αξιολόγηση των απαιτήσεων ισχύος για μία νέα σχεδίαση πλοίου επιτυγχάνεται με τη διεξαγωγή πειραμάτων με μοντέλο γάστρας και έλικας σε δεξαμενή ρυμούλκησης. Τα παραδοσιακά model test πλοίων παρέχουν, μέχρι στιγμής, πιο ακριβείς προβλέψεις για την απόδοση του πλοίου συγκριτικά με τις υπάρχουσες μεθόδους υπολογιστικής δυναμικής ρευστών (CFD). Πραγματοποιούνται διάφορες δοκιμές για την αξιολόγηση της αντίστασης του πλοίου, της πρόωσης, των ελιγμών και της συμπεριφοράς του πλοίου σε κυματισμούς. Η μεθοδολογία δοκιμών, η ανάλυση μετά τη δοκιμή και η αναγωγή σε φυσική κλίμακα γίνονται όπως ορίζονται από τις συνιστώμενες διαδικασίες της ITTC (2011).

Τα model test που απαιτούνται για μια πρόβλεψη απόδοσης φυσικής κλίμακας περιλαμβάνουν τη δοκιμή αντίστασης, τη δοκιμή αυτοπρόωσης και τη δοκιμή έλικας σε ελεύθερη ροή.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι πίνακες οι οποίοι περιλαμβάνουν δεδομένα αναφοράς που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των πιο στοχευμένων στη ρύπανση της γάστρας και της έλικας KPIs, όπου V_S η ταχύτητα του πλοίου, w_S το ποσοστό ομόρου του πλοίου, C_{TS} ο συντελεστής της συνολικής αντίστασης, C_{RS} ο συντελεστής της υπόλοιπης αντίστασης και R_S η αντίσταση του πλοίου.

Πίνακας 6: Τιμές αναφοράς για το ποσοστό ομόρου, τους συντελεστές αντίστασης και τη δύναμη της αντίστασης από τα Model Test, για την κατάσταση Scantling

Model Test: Scantling Condition				
$T_F = 14,45m / T_A = 14,45m$				
V_s [kN]	w_s	C_{TS} (10^3)	C_{RS} (10^3)	R_s [kN]
11,5	0,261	2,019	0,810	455,53
12	0,255	2,041	0,840	501,44
12,5	0,253	2,069	0,875	551,53
13	0,253	2,101	0,915	605,82
13,5	0,253	2,136	0,957	664,3
14	0,251	2,174	1,001	727
14,5	0,248	2,213	1,047	793,9
15	0,254	2,253	1,093	865,03

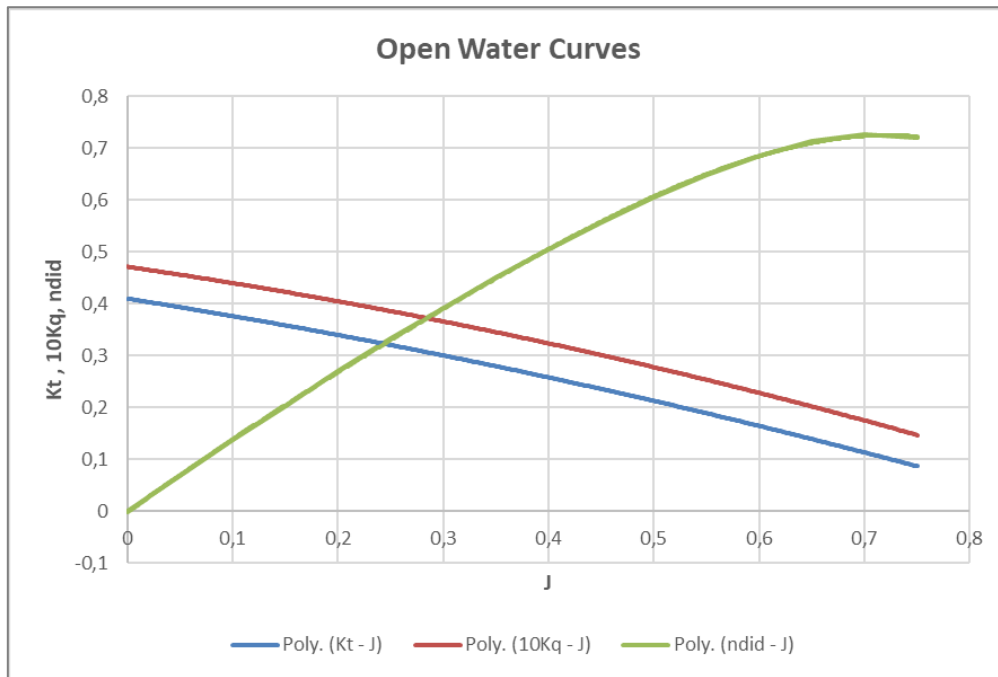
Πίνακας 7: Τιμές αναφοράς για το ποσοστό ομόρου, τους συντελεστές αντίστασης και τη δύναμη της αντίστασης από τα Model Tests, για την κατάσταση Design

Model Test: Design Condition				
$T_F = 12,20m / T_A = 12,20m$				
V_s [kN]	w_s	C_{TS} (10^3)	C_{RS} (10^3)	R_s [kN]
11,5	0,268	2,007	0,758	415,56
12	0,272	1,994	0,753	449,44
12,5	0,272	1,976	0,743	483,39
13	0,268	1,978	0,752	523,39
13,5	0,265	1,983	0,763	565,63
14	0,269	1,989	0,776	610,11
14,5	0,274	2,014	0,807	662,87
15	0,273	2,078	0,877	731,73
15,5	0,264	2,175	0,981	818,11

Πίνακας 8: Τιμές αναφοράς για το ποσοστό ομόρου, τους συντελεστές αντίστασης και τη δύναμη της αντίστασης από τα Model Tests, για την κατάσταση Normal Ballast

Model Test: Normal Ballast				
$T_F = 4,9m / T_A = 7,4m$				
V_s [kN]	w_s	C_{TS} (10^3)	C_{RS} (10^3)	R_s [kN]
12	0,329	2,165	0,765	358,23
12,5	0,328	2,205	0,813	395,83
13	0,327	2,255	0,87	437,83
13,5	0,325	2,312	0,934	484,22
14	0,323	2,376	1,004	535
14,5	0,323	2,443	1,078	590,18
15	0,321	2,513	1,155	649,77
15,5	0,317	2,586	1,233	713,77
16	0,318	2,659	1,312	782,17

Επιπλέον, για τον υπολογισμό των πιο στοχευμένων στη ρύπανση KPIs χρησιμοποιήθηκε το διάγραμμα ελεύθερης ροής της έλικας:



Εικόνα 6: Διάγραμμα ελεύθερης ροής της έλικας από τα Model Tests

2.3 Συλλογή δεδομένων

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι αισθητήρες που είναι εγκατεστημένοι στο πλοίο και καταγράφουν τις τιμές για τις παραμέτρους που χρησιμοποιούνται.

Πίνακας 9: Εγκατεστημένοι αισθητήρες και μετρούμενες παράμετροι

Αισθητήρες	Παράμετροι
Global Positioning System (GPS)	Speed Over Ground
Speed Log	Speed Through Water
Pressure Sensor	Mean Draft, Trim
Shaft Torque Meter	Propeller Shaft Power, Shaft Torque, M/E Speed
Propeller Thrust Sensor	Shaft Thrust
Anemometer	Relative Wind Direction, Relative Wind Speed
Gyrocompass	Vessel Heading

➤ Global Positioning System (GPS)

Το GPS δέχεται πληροφορίες σχετικά με την τοποθεσία του πλοίου σε γεωγραφικές συντεταγμένες (γεωγραφικό μήκος, γεωγραφικό πλάτος). Η ταχύτητα του πλοίου Speed Over Ground (SOG) προκύπτει από την απόσταση που έχει διανύσει ως προς το έδαφος προς τον

χρόνο που χρειάστηκε για να διανύσει την απόσταση αυτή. Η λειτουργία του GPS απαιτεί συνεχή επικοινωνία με ένα σύστημα δορυφόρων, για τον εντοπισμό της θέσης των πλοίων και έχει σφάλμα λίγων μέτρων.

➤ **Speed Logs**

Για την μέτρηση της ταχύτητας Speed Through Water (STW) μπορούν να χρησιμοποιηθούν τρεις αισθητήρες:

1. *Doppler log*: Βασίζονται στο φαινόμενο Doppler κατά το οποίο τα μήκη κύματος των κινούμενων αντικειμένων φαίνεται να μετατοπίζονται σε σχέση με τον παρατηρητή. Αυτή η μετατόπιση μπορεί να μεταφραστεί σε ταχύτητα παράγοντας έτσι ακριβή αποτελέσματα. Λειτουργούν με την εκπομπή στο νερό υψηλής ισχύος ακουστική ενέργεια, της οποίας η ηχώ λαμβάνεται πίσω αντανακλώμενη από τον πυθμένα. Η μετατόπιση Doppler από την επιστρεφόμενη ηχώ σχετίζεται με την ταχύτητα του νερού που περνά από τον αισθητήρα. Το οριακό στρώμα του νερού (η ταχύτητα του οποίου μετριέται) βρίσκεται 2-7 μέτρα κάτω από τον αισθητήρα ο οποίος τοποθετείται περίπου στο 1/3 του μήκους του πλοίου πλώρα κατά τον διαμήκη άξονα. Με τον ίδιο αισθητήρα μετριέται και η διανυόμενη απόσταση και το βάθος του νερού.
2. *Electromagnetic log*: Βασίζεται στο ότι η κίνηση του αγωγού (θαλασσινό νερό) μέσα από το μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί ο αισθητήρας δημιουργεί ρεύμα κάθετα στο πεδίο και στην κίνηση. Έτσι, η μετατόπιση του πλοίου στο νερό δημιουργεί ρεύμα το οποίο μετατρέπεται σε ταχύτητα. Τοποθετούνται πλώρα (π.χ. κοντά στον βολβό) όπου το οριακό στρώμα είναι λεπτό.
3. *Acoustic correlation log*: Βασίζεται στη συσχέτιση των ανακλώμενων παλμών (ήχου – ενέργειας) στο νερό σε μια δεδομένη απόσταση. Έτσι, μετριέται η χρονική καθυστέρηση δύο όμοιων παλμών και υπολογίζεται η ταχύτητα του πλοίου.

➤ **Pressure Sensor**

Το βύθισμα του πλοίου μπορεί να εκτιμηθεί από την υδροστατική πίεση στην κάτω επιφάνεια της γάστρας. Οι αισθητήρες που μετρούν την πίεση τοποθετούνται στην εξωτερική επιφάνεια του πυθμένα της γάστρας και μπορούν να υπολογίσουν το στιγμιαίο βύθισμα της γάστρας στη θέση που είναι εγκατεστημένα. Από τη μέτρηση του βυθίσματος σε δύο διαφορετικές διαμήκεις θέσεις της γάστρας, μπορεί να υπολογιστεί η διαγωγή του πλοίου.

➤ **Shaft Torque Meter**

Το Shaft Torque Meter είναι ένα όργανο που μετρά τη ροπή και την ταχύτητα περιστροφής του άξονα και τις πολλαπλασιάζει για να εκτιμήσει την τιμή της μεταδιδόμενης ισχύος. Το όργανο αποτελείται από μετρητές καταπόνησης (strain gauges), διατεταγμένους σε δακτύλιο και τοποθετημένους απευθείας πάνω στον άξονα για τη συνεχή παρακολούθηση και καταγραφή των προαναφερθέντων τιμών. Η βασική αρχή λειτουργίας είναι ότι τυχόν παραμορφώσεις των μετρητών καταπόνησης μεταφέρονται σε απόκλιση τάσεων που καθορίζουν την καταπόνηση του άξονα.

➤ **Propeller Thrust Sensor**

Όταν ένας άξονας παράγει ώση και ροπή υπόκεινται σε μια μικρή θλίψη και στρέψη. Η αρχή λειτουργίας του αισθητήρα βασίζεται στη μέτρηση της θλίψης και της στρέψης του άξονα σε τμήμα του άξονα μήκους 200 mm. Αυτή η σχετικά μακρά μετρήσιμη περιοχή του άξονα, σε σύγκριση για παράδειγμα με μετρητές καταπόνησης (strain gauges), αυξάνει πολύ την ακρίβεια μέτρησης. LED και εξαιρετικά ακριβείς οπτικοί αισθητήρες ανιχνεύουν τις μικρές μετατοπίσεις του μήκους του άξονα, τόσο κατά μήκος του άξονα όσο και εφάπτομενικά του, που αντιστοιχούν στη θλίψη (ώση) και στη στρέψη (ροπή) του άξονα της προπέλας. Εφόσον για σταθερή ταχύτητα πλεύσης η αντίσταση της γάστρας του πλοίου ισούται κατά μέτρο με την ώση που παράγει η έλικα μπορεί να γίνει εκτίμηση της αύξησης της αντίστασης στην πάροδο του χρόνου.

➤ **Anemometer**

Το ανεμόμετρο είναι ένα όργανο που παρέχει τόσο τη φαινόμενη ταχύτητα όσο και την φαινόμενη κατεύθυνση του ανέμου ως προς την κατεύθυνση του πλοίου. Τα μέρη που αποτελούν το ανεμόμετρο είναι μια ελικοειδής έλικα και ένα πτερύγιο που μετρούν την ταχύτητα και την κατεύθυνση του ανέμου, αντίστοιχα. Η γωνιακή μετατόπιση του πτερυγίου βοηθά στην εκτίμηση της φαινόμενης κατεύθυνσης του ανέμου, ενώ η ταχύτητα περιστροφής της ελικοειδούς προπέλας βοηθά στην εκτίμηση της φαινόμενης ταχύτητας του ανέμου.

➤ **Gyrocompass**

Η γυροσκοπική πυξίδα είναι μια μορφή γυροσκοπίου (μη μαγνητική πυξίδα) που χρησιμοποιείται στα πλοία για την παρακολούθηση του προσανατολισμού τους. Βασίζεται σε έναν δίσκο που περιστρέφεται γρήγορα και στην περιστροφή της Γης, για να βρίσκει αυτόματα τη γεωγραφική κατεύθυνση. Έχει τη δυνατότητα να δείχνει πάντα τον αληθινό βορρά και έτσι η πορεία του πλοίου εκτιμάται με ακρίβεια με αυτήν την κατεύθυνση.

2.4 Επιχειρησιακά δεδομένα

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν κυρίως υψηλής συχνότητας δεδομένα ανά ένα λεπτό τα οποία συμπληρώθηκαν, για τις παραμέτρους που έλειπαν, με δεδομένα από ημερήσιες αναφορές (noon reports). Τα δεδομένα δόθηκαν σε μορφή csv τα οποία μετατράπηκαν σε Excel Workbook για τη μελέτη, την επεξεργασία και την ανάλυσή τους και καλύπτουν ένα χρονικό εύρος ενός έτους και δύο μηνών, από τις 6/1/2021 μέχρι και τις 6/3/2022 και αριθμούν στα 594331.

Όλες οι τιμές των παραμέτρων για μια συγκεκριμένη χρονική σφραγίδα αποτελεί ένα data point και όλα τα data points συνολικά αποτελούν ένα data set. Οι παράμετροι των οποίων οι μετρήσεις αποτελούν το αρχείο δεδομένων (data set) προβάλλονται στον Πίνακα 10, στον οποίον φαίνεται και η πηγή άντλησης των δεδομένων:

Πίνακας 10: Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία και η πηγή άντλησής τους

Παράμετροι	Μονάδες	Πηγή άντλησης δεδομένων	
		Υψίσυχνα δεδομένα	Ημερήσιες αναφορές
Time	DD/MM/YYYY HH:MM	✓	
Speed Over Ground	Knots [kn]	✓	
Speed Though Water	Knots [kn]	✓	
Propeller Shaft Power	Kilo Watts [kW]	✓	
Shaft Torque	Kilo Newton · Meters [kNm]	✓	
Shaft Thrust	Kilo Newton [kN]	✓	
M/E Speed	Revolution per munute [rpm]	✓	
M/E Loading Percentage	Percentage [%]	✓	
Mean Draft	Meters [m]	✓	✓
Trim	Meters [m]	✓	✓
Displacement	Tonnes [t]		✓
Vessel Heading	Degrees [deg.]	✓	
Relative Wind Direction	Degrees [deg.]	✓	
Relative Wind Speed	Meters per seconds [m/sec]	✓	
Significant Wave Direction	Degrees [deg.]		✓
Significant Wave Height	Meters [m]		✓
Sea Temperature	Degree Celcius [°C]		✓
Air Temperature	Degree Celcius [°C]		✓
Air Pressure	Bar [bar]		✓

3. Επεξεργασία και ανάλυση επιχειρησιακών δεδομένων

Τα πραγματικά δεδομένα τα οποία αντλούνται μέσω αισθητήρων κατά τη λειτουργία του πλοίου περιέχουν κενά και μη φυσιολογικές τιμές (outliers) λόγω δυσλειτουργίας των αισθητήρων. Επίσης, τα δεδομένα περιλαμβάνουν όλο το φάσμα λειτουργίας του πλοίου (πλεύση σε ανοιχτή θάλασσα, ελιγμούς και στάσεις σε λιμάνια), ενώ στη συγκεκριμένη εργασία το ενδιαφέρον περιορίζεται στην πλεύση σε ανοιχτή θάλασσα και πιο συγκεκριμένα στα όρια κάθε παραμέτρου που καθορίζονται από τα δεδομένα αναφοράς, ώστε να είναι σε επόμενο στάδιο εφικτή η σύγκριση των πραγματικών δεδομένων με τα δεδομένα αναφοράς. Έτσι, είναι φανερό ότι τα δεδομένα χρήζουν επεξεργασίας η οποία καθιστά τα δεδομένα ικανά για ανάλυση και περαιτέρω μελέτη.

Για την επεξεργασία, την ανάλυση και τη μελέτη των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Excel της σουίτας Microsoft Office το οποίο αποτελεί βασικό και εύκολα προσβάσιμο εργαλείο σε κάθε ναυτιλιακή εταιρεία.

Όπως προαναφέρθηκε και στο *Κεφάλαιο 2*, τα δεδομένα αριθμούν στα 594331 και ο μεγάλος αυτός όγκος δεδομένων καθιστά δύσκολη την επεξεργασία τους. Έτσι, σαν πρώτο βήμα επιλέγεται ο περιορισμός των δεδομένων σε πλεύση σε ανοιχτή θάλασσα περιορίζοντας την ταχύτητα του πλοίου ως εξής:

- Speed Over Ground > 6 knots
- Speed Through Water > 5 knots

Ύστερα από τον περιορισμό των δεδομένων στο εύρος ενδιαφέροντος, επιτυγχάνεται μείωση των δεδομένων κατά 53% καθιστώντας την περαιτέρω επεξεργασία τους με τη χρήση του προγράμματος Excel αρκετά πιο γρήγορη και αποδοτική.

3.1 Συμπλήρωση αρχείου υψίσυχνων δεδομένων με ημερήσια (noon reports)

Οι παράμετροι που έλειπαν από τα υψίσυχνα δεδομένα (εκτόπισμα, σημαντικό ύψος κύματος, κατεύθυνση σημαντικού ύψους κύματος, θερμοκρασία θάλασσας, θερμοκρασία ανέμου, πίεση ανέμου) αντλήθηκαν από τις διαθέσιμες ημερήσιες αναφορές. Πιο συγκεκριμένα, αντλήθηκε από τις ημερήσιες αναφορές κάθε τιμή μιας παραμέτρου που αντιστοιχεί σε μια ολόκληρη ημέρα και τοποθετήθηκε σε όλα τα κελιά που αντιστοιχούν στην παράμετρο για την ημέρα αυτή. Αυτό επιτεύχθηκε με τον συνδυασμό δύο λειτουργιών (functions) του Excel ως εξής:

Λειτουργία *MATCH*:

$$= MATCH(lookup_value; lookup_array; [match_type]) \quad (3.1.1)$$

Όπου:

lookup_value: Η τιμή που θέλουμε το πρόγραμμα να αναζητήσει

lookup_array: Η περιοχή στην οποία θέλουμε το πρόγραμμα να αναζητήσει την τιμή

[*match_type*]: Ο βαθμός της αντιστοιχίας που απαιτούμε από το πρόγραμμα
0 για ακριβή αντιστοιχία,
1 η αμέσως μεγαλύτερη πλησιέστερη τιμή στην τιμή αναζήτησης,
-1 η αμέσως μικρότερη πλησιέστερη τιμή στην τιμή αναζήτησης

Λειτουργία *INDEX*:

$$= INDEX(array; row_{num}; [column_{num}]) \quad (3.1.2)$$

Όπου:

array: Η περιοχή από την οποία θα αντληθεί η τιμή
row_num: Η γραμμή στην οποία εντοπίζεται η τιμή που πρόκειται να αντληθεί
[column_num]: Η στήλη στην οποία εντοπίζεται η τιμή που πρόκειται να αντληθεί

Η λειτουργία *MATCH* εντοπίζει την τιμή που θα αντληθεί από τις ημερήσιες αναφορές και η λειτουργία *INDEX* την αντλεί και την αναγράφει. Έτσι, συνδυάζοντας τις δύο αυτές λειτουργίες καταφέρνουμε να αντλήσουμε την τιμή μιας παραμέτρου από τις ημερήσιες αναφορές και να την περάσουμε σε όλα τα κελιά που αντιστοιχούν σε μια συγκεκριμένη ημερομηνία στα υψίσυχνα δεδομένα.

Ο συνδυασμός των δύο λειτουργιών είναι ο εξής:

$$= INDEX(array; MATCH(lookup_{value}; lookup_{array}; 0); [column_{num}]) \quad (3.1.3)$$

Παρακάτω παρατίθεται ένα παράδειγμα χρήσης του συνδυασμού των δύο λειτουργιών για την άντληση των τιμών της θερμοκρασίας του αέρα (Air Temp. [°C]) από τις ημερήσιες αναφορές (noon reports) στα υψίσυχνα δεδομένα (high frequency data).

High Frequency Data			Noon Reports	
DATE - TIME	DATE	Air Temp [C]	Date	Air Temp [C]
6/1/2021 15:41	6/1/2021	15	1/1/2021	16
6/1/2021 15:42	6/1/2021	15	2/1/2021	18
6/1/2021 15:43	6/1/2021	16	3/1/2021	17
6/1/2021 15:44	6/1/2021	16	4/1/2021	10
6/1/2021 15:45	6/1/2021	16	5/1/2021	12
6/1/2021 15:46	6/1/2021	16	6/1/2021	16
6/1/2021 15:47	6/1/2021	16	7/1/2021	17
6/1/2021 15:48	6/1/2021	16	8/1/2021	16
6/1/2021 15:49	6/1/2021	16	9/1/2021	15
6/1/2021 15:50	6/1/2021	16	10/1/2021	15
6/1/2021 15:51	6/1/2021	16	11/1/2021	14
6/1/2021 15:52	6/1/2021	16	12/1/2021	15
6/1/2021 15:53	6/1/2021	16	13/1/2021	16
6/1/2021 15:54	6/1/2021	16	14/1/2021	14
6/1/2021 15:55	6/1/2021	16	15/1/2021	15

Εικόνα 7: Συνδυασμός λειτουργιών *index* και *match* στο Excel για άντληση δεδομένων από τα Noon Reports στα High Frequency Data

Κάνοντας την ίδια διαδικασία και για τις υπόλοιπες παραμέτρους που λείπουν από τα υψίσυχα δεδομένα υπάρχει πλέον ένα ολοκληρωμένο αρχείο δεδομένων (data set) με όλες τις παραμέτρους που απαιτούνται για τον υπολογισμό των δεικτών απόδοσης και της μελέτης τους. Απόσπασμα του αρχείου δεδομένων παρατίθεται παρακάτω:

	A	C	E	F	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V
1		Vessel Sailing Condition			M/E - Shaft - Speed Values							Weather Conditions							
2	DATE - TIME	Mean Draft [m]	Displacement (Noon) [t]	Trim by Stern [m]	ME-Loading-percent [%]	M/E Speed [rpm]	Propeller-Shaft-Power [kW]	Shaft Torque [kNm]	Shaft Thrust [kN]	Speed-Over-Ground [kn]	Speed-Through-Water [kn]	Vessel-Heading [deg]	Rel-Wind-Direction [deg]	Rel-Wind-Speed [m/sec]	Significant Wave Direction (Noon) [deg]	Significant Wave Height (Noon) [m]	Sea Temp (Noon) [C]	Air Temp (Noon) [C]	Air Pressure (Noon) [bar]
55505	17/3/2021 14:57	14,2	91984	0,8	66	73	6515	873	657	10,5	11,2	113	250	10,8	135	2,0	5	6	1,032
55506	17/3/2021 14:58	14,1	91984	0,4	66	72	6598	887	675	10,7	10,9	103	259	12,9	135	2,0	5	6	1,032
55507	17/3/2021 14:59	14,1	91984	0,7	67	70	6618	892	683	10,8	11,0	99	285	12,3	135	2,0	5	6	1,032
55508	17/3/2021 15:00	14,0	91984	0,7	66	70	6573	896	675	10,9	11,2	100	287	11,8	135	2,0	5	6	1,032
55509	17/3/2021 15:01	14,1	91984	-0,3	66	71	6566	897	674	11,2	11,4	100	282	11,8	135	2,0	5	6	1,032
55510	17/3/2021 15:02	14,0	91984	0,7	67	71	6605	897	673	11,3	11,5	100	289	11,3	135	2,0	5	6	1,032
55511	17/3/2021 15:03	14,1	91984	0,6	66	69	6560	896	675	11,5	11,6	102	293	11,8	135	2,0	5	6	1,032
55512	17/3/2021 15:04	14,1	91984	0,5	66	71	6560	893	673	11,6	11,8	102	284	12,9	135	2,0	5	6	1,032
55513	17/3/2021 15:05	14,0	91984	0,4	67	72	6630	898	680	11,7	12,0	102	281	11,8	135	2,0	5	6	1,032
55514	17/3/2021 15:06	14,2	91984	0,9	68	72	6726	910	680	11,8	12,1	102	282	11,8	135	2,0	5	6	1,032
55515	17/3/2021 15:07	14,1	91984	0,8	68	72	6733	901	676	11,9	12,4	102	280	10,8	135	2,0	5	6	1,032
55516	17/3/2021 15:08	14,0	91984	1,0	67	71	6630	889	680	12,1	12,3	102	288	11,3	135	2,0	5	6	1,032
55517	17/3/2021 15:09	14,1	91984	0,9	68	73	6784	905	664	12,2	12,3	102	286	11,3	135	2,0	5	6	1,032
55518	17/3/2021 15:11	14,1	91984	0,9	68	72	6720	896	672	12,1	12,4	101	289	9,8	135	2,0	5	6	1,032
55519	17/3/2021 15:12	14,0	91984	0,4	68	71	6771	900	707	12,1	12,7	102	290	11,3	135	2,0	5	6	1,032
55520	17/3/2021 15:13	14,0	91984	0,1	69	73	6854	912	690	12,2	12,5	102	293	11,8	135	2,0	5	6	1,032
55521	17/3/2021 15:14	14,0	91984	1,0	71	72	7002	926	680	12,2	12,7	101	284	12,9	135	2,0	5	6	1,032
55522	17/3/2021 15:15	14,1	91984	0,6	69	73	6810	902	663	12,3	12,7	102	288	12,9	135	2,0	5	6	1,032

Εικόνα 8: Ολοκληρωμένο αρχείο δεδομένων (data set) με όλες τις απαραίτητες παραμέτρους για τον υπολογισμό των KPIs. Με κίτρινο χρώμα παρουσιάζονται τα υψίσυχα δεδομένα ενώ με μπλε χρώμα αυτά που έχουν αντληθεί από τα Noon Reports

Οι παράμετροι με μπλε χρώμα είναι αυτές που έχουν αντλήσει τις τιμές τους από τις ημερήσιες αναφορές ενώ οι παράμετροι με κίτρινο χρώμα αποτελούν τα υψίσυχα δεδομένα.

3.2 Συμπλήρωση και αφαίρεση κενών

Στο αρχείο δεδομένων παρατηρούνται κενά που μπορεί να οφείλονται σε δυσλειτουργία των αισθητήρων που προκύπτει στιγμιαία είτε λόγω φθοράς που έχει επέλθει στους αισθητήρες με την πάροδο του χρόνου τα οποία μπορούν να προκαλέσουν ανακρίβειες στα αποτελέσματα της μελέτης. Για αυτόν τον λόγο είναι σκόπιμο να συμπληρωθούν και να αφαιρεθούν.

Παρατηρούνται δύο κατηγορίες κενών στα δεδομένα, τα μεμονωμένα και τα διαδοχικά και αντιμετωπίζονται με διαφορετικό τρόπο. Για τα μεμονωμένα δεδομένα υπολογίστηκε η μέση τιμή της προηγούμενης και της επόμενης τιμής με την χρήση της παρακάτω λειτουργίας-συνθήκης του Excel:

$$= IF(ISBLANK(cell_{value}); AVERAGE(previous_{value}; next_{value}); cell_{value}) \quad (3.2.1)$$

Όπου:

ISBLANK(cell_value):

Η συνθήκη η τιμή του κελιού να είναι κενή

AVERAGE(previous_value; next_value):

Υπολογισμός της μέσης τιμής σε περίπτωση που το κελί είναι κενό

cell_value:

Αναγραφή της τιμής που προϋπάρχει σε περίπτωση που υπάρχει τιμή στο κελί

Παρακάτω φαίνεται ένα παράδειγμα συμπλήρωσης των μεμονωμένων κενών:

AB238979													
	A	C	E	F	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1		Vessel Sailing Condition			M/E - Shaft - Speed Vallues								
2	DATE - TIME	Mean Draft [m]	Displacement (Noon) [t]	Trim by Stern [m]	ME-Loading-percent [%]	M/E Speed [rpm]	Propeller-Shaft-Power [kW]	Shaft Torque [kNm]	Shaft Thrust [kN]	Speed-Over-Ground [kn]	Speed-Through Water [kn]	Vessel-Heading [deg]	Rel-Wind-Directio [deg]
238942	11/12/2021 13:11	11,3	72484	0,3	52	73	5210	684	521	12,0	12,0	318	92
238943	11/12/2021 13:12	11,3	72484	0,3	52	0	5146	678	486	11,5	11,9	317	95
238944	11/12/2021 13:13	11,3	72484	0,3	52	72	5197	687	523	11,9	11,8	319	97
238945	11/12/2021 13:14	11,3	72484	0,3	53	72	5210	686	500	11,9	11,8	319	88
238946	11/12/2021 13:15	11,3	72484	0,3	52	74	5235	691	523	11,9	12,0	322	91
238947	11/12/2021 13:16	11,3	72484	0,3	53	73	5190	686	485	11,8	11,8	322	85
238948	11/12/2021 13:17	11,3	72484	0,3	53		5248	694	517	11,7	11,8	322	83
238949	11/12/2021 13:18	11,3	72484	0,3	53	72	5261	695	531	11,6	11,4	323	84
238950	11/12/2021 13:19	11,3	72484	0,3	53	73	5299	700	518	11,8	11,5	323	84
238951	11/12/2021 13:20	11,3	72484	0,3	52	73	5306	697	513	11,7	11,9	323	83
238952	11/12/2021 13:21	11,3	72484	0,3	52	73	5171	678	504	11,9	11,8	322	83
238953	11/12/2021 13:22	11,3	72484	0,3	52	72	5158	682	509	11,8	11,8	322	85
238954	11/12/2021 13:23	11,3	72484	0,3	54	73	5210	682	508	11,8	11,5	323	83
238955	11/12/2021 13:24	11,3	72484	0,3	53	72	5325	701	529	11,8	11,8	322	84
238956	11/12/2021 13:25	11,3	72484	0,3		72	5229	690	511	11,7	11,8	322	83
238957	11/12/2021 13:26	11,3	72484	0,3	53	73	5242	688	520	11,5	11,4	322	80

Εικόνα 9: Παράδειγμα μεμονωμένων κενών στο αρχικό αρχείο δεδομένων

SUM													
	A	C	E	F	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1		Vessel Sailing Condition			M/E - Shaft - Speed Vallues								
2	DATE - TIME	Mean Draft [m]	Displacement (Noon) [t]	Trim by Stern [m]	ME-Loading-percent [%]	M/E Speed [rpm]	Propeller-Shaft-Power [kW]	Shaft Torque [kNm]	Shaft Thrust [kN]	Speed-Over-Ground [kn]	Speed-Through Water [kn]	Vessel-Heading [deg]	Rel-Wind-Directio [deg]
238942	11/12/2021 13:11	11,3	72484	0,3	52	73	5210	684	521	12,0	12,0	318	92
238943	11/12/2021 13:12	11,3	72484	0,3	52	=IF(ISBLANK(I238943);AVERAGE(I238942;I238944);I238943)	5146	678	486	11,5	11,9	317	95
238944	11/12/2021 13:13	11,3	72484	0,3	52	72	5197	687	523	11,9	11,8	319	97
238945	11/12/2021 13:14	11,3	72484	0,3	53	72	5210	686	500	11,9	11,8	319	88
238946	11/12/2021 13:15	11,3	72484	0,3	52	74	5235	691	523	11,9	12,0	322	91
238947	11/12/2021 13:16	11,3	72484	0,3	53	73	5190	686	485	11,8	11,8	322	85
238948	11/12/2021 13:17	11,3	72484	0,3	53	73	5248	694	517	11,7	11,8	322	83
238949	11/12/2021 13:18	11,3	72484	0,3	53	72	5261	695	531	11,6	11,4	323	84
238950	11/12/2021 13:19	11,3	72484	0,3	53	73	5299	700	518	11,8	11,5	323	84
238951	11/12/2021 13:20	11,3	72484	0,3	52	73	5306	697	513	11,7	11,9	323	83
238952	11/12/2021 13:21	11,3	72484	0,3	52	73	5171	678	504	11,9	11,8	322	83
238953	11/12/2021 13:22	11,3	72484	0,3	52	72	5158	682	509	11,8	11,8	322	85
238954	11/12/2021 13:23	11,3	72484	0,3	54	73	5210	682	508	11,8	11,5	323	83
238955	11/12/2021 13:24	11,3	72484	0,3	53	72	5325	701	529	11,8	11,8	322	84
238956	11/12/2021 13:25	11,3	72484	0,3	53	72	5229	690	511	11,7	11,8	322	83
238957	11/12/2021 13:26	11,3	72484	0,3	53	73	5242	688	520	11,5	11,4	322	80

Εικόνα 10: Παράδειγμα συμπλήρωσης μεμονωμένων κενών με τις λειτουργίες if, isblank και average του Excel

Η συνθήκη (3.2.1) είναι ικανή να συμπληρώνει τα μεμονωμένα κενά, όχι όμως και τα διαδοχικά. Τα διαδοχικά δεδομένα αποτελούν πιθανή φθορά των αισθητήρων και στη συγκεκριμένη εργασία διαγράφηκαν. Η διαγραφή των διαδοχικών κενών πρακτικά είναι διαγραφή των αντίστοιχων data points, δηλαδή διαγραφή των τιμών όλων των παραμέτρων που ανήκουν στην σειρά όπου παρουσιάζεται το κενό. Ένα παράδειγμα διαδοχικών κενών φαίνεται παρακάτω όπου τα κενά πλέον έχουν την μορφή #DIV/0! ως αποτέλεσμα της συνθήκης που εφαρμόστηκε:

	A	C	E	F	H	I	J	K
1	Vessel Sailing Condition				M/E - Sha			
	DATE - TIME	Mean Draft [m]	Displacement (Noon) [t]	Trim by Stern [m]	ME-Loading-percent [%]	M/E Speed [rpm]	Propeller-Shaft-Power [kW]	Shaft Torque [kNm]
88538	4/5/2021 7:04	6,3	37608	2,9	71,0	77,2	7046,4	887,5
88539	4/5/2021 7:05	6,3	37608	2,9	71,0	76,6	7046,4	889,0
88540	4/5/2021 7:06	#DIV/0!	37608	#DIV/0!	#DIV/0!	77,2	#DIV/0!	895,0
88541	4/5/2021 7:07	#DIV/0!	37608	#DIV/0!	#DIV/0!	76,5	#DIV/0!	891,0
88542	4/5/2021 7:08	#DIV/0!	37608	#DIV/0!	#DIV/0!	77,1	#DIV/0!	897,0
88543	4/5/2021 7:09	#DIV/0!	37608	#DIV/0!	#DIV/0!	77,1	#DIV/0!	896,0
88544	4/5/2021 7:10	#DIV/0!	37608	#DIV/0!	#DIV/0!	77,1	#DIV/0!	891,0
88545	4/5/2021 7:11	#DIV/0!	37608	#DIV/0!	#DIV/0!	77,1	#DIV/0!	886,0
88546	4/5/2021 7:12	#DIV/0!	37608	#DIV/0!	#DIV/0!	77,1	#DIV/0!	892,0
88547	4/5/2021 7:13	#DIV/0!	37608	#DIV/0!	#DIV/0!	77,1	#DIV/0!	894,0
88548	4/5/2021 7:14	#DIV/0!	37608	#DIV/0!	#DIV/0!	77,1	#DIV/0!	890,0
88549	4/5/2021 7:15	#DIV/0!	37608	#DIV/0!	#DIV/0!	76,4	#DIV/0!	889,0
88550	4/5/2021 7:16	#DIV/0!	37608	#DIV/0!	#DIV/0!	76,9	#DIV/0!	897,0
88551	4/5/2021 7:17	#DIV/0!	37608	#DIV/0!	#DIV/0!	77,0	#DIV/0!	895,0
88552	4/5/2021 7:18	#DIV/0!	37608	#DIV/0!	#DIV/0!	77,0	#DIV/0!	897,0
88553	4/5/2021 7:19	#DIV/0!	37608	#DIV/0!	#DIV/0!	77,0	#DIV/0!	895,0
88554	4/5/2021 7:20	#DIV/0!	37608	#DIV/0!	#DIV/0!	77,0	#DIV/0!	891,0
88555	4/5/2021 7:21	#DIV/0!	37608	#DIV/0!	#DIV/0!	77,0	#DIV/0!	888,0

Εικόνα 11: Παράδειγμα συνεχόμενων κενών. Με #DIV/0! παρουσιάζονται τα δεδομένα που παρέμειναν μετά την εφαρμογή διαγραφής των μεμονωμένων κενών

Στον Πίνακα 11 παρουσιάζονται τα στατιστικά των κενών. Ο συνολικός αριθμός κενών είναι 2724 που αποτελεί το 0,97% των συνολικών δεδομένων. Όμως, τα μεμονωμένα κενά συμπληρώνονται με την συνθήκη (3.2.1) και τα data points που διαγράφονται οφείλονται στην απαλοιφή των διαδοχικών κενών με ποσοστό 0,31%.

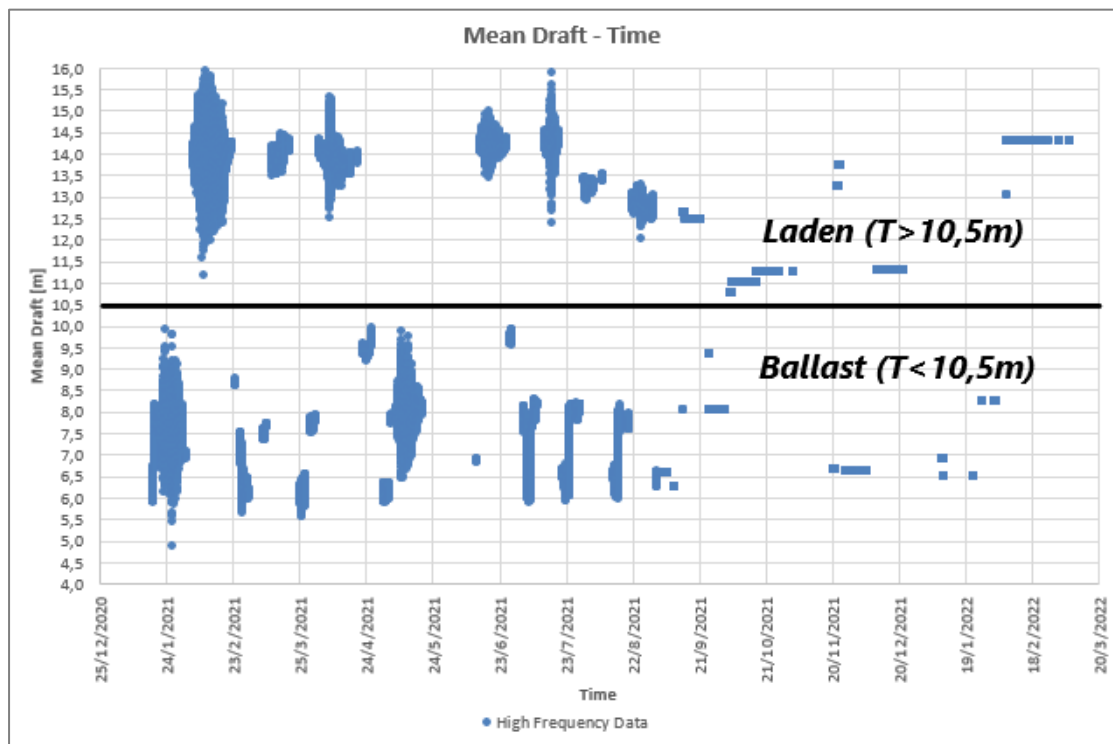
Πίνακας 11: Ποσοστά κενών του αρχείου δεδομένων

Στατιστικά Κενών			
Αρχικά δεδομένα: 280421	Είδος κενών		Σύνολο κενών
	Μεμονωμένα	Διαδοχικά	
Αριθμός κενών	1849	875	2724
Ποσοστό κενών ως προς τον αρχικό αριθμό δεδομένων	0,66%	0,31%	0,97%

3.3 Χωρισμός δεδομένων σε καταστάσεις φόρτωσης

Για να είναι εφικτή η χρήση των επιχειρησιακών δεδομένων για τους υπολογισμούς των δεικτών αξιολόγησης της απόδοσης KPIs, απαιτείται ο χωρισμός των δεδομένων σε καταστάσεις φόρτωσης οι οποίες πρέπει να είναι συγκρίσιμες με τις καταστάσεις φόρτωσης των δεδομένων αναφοράς.

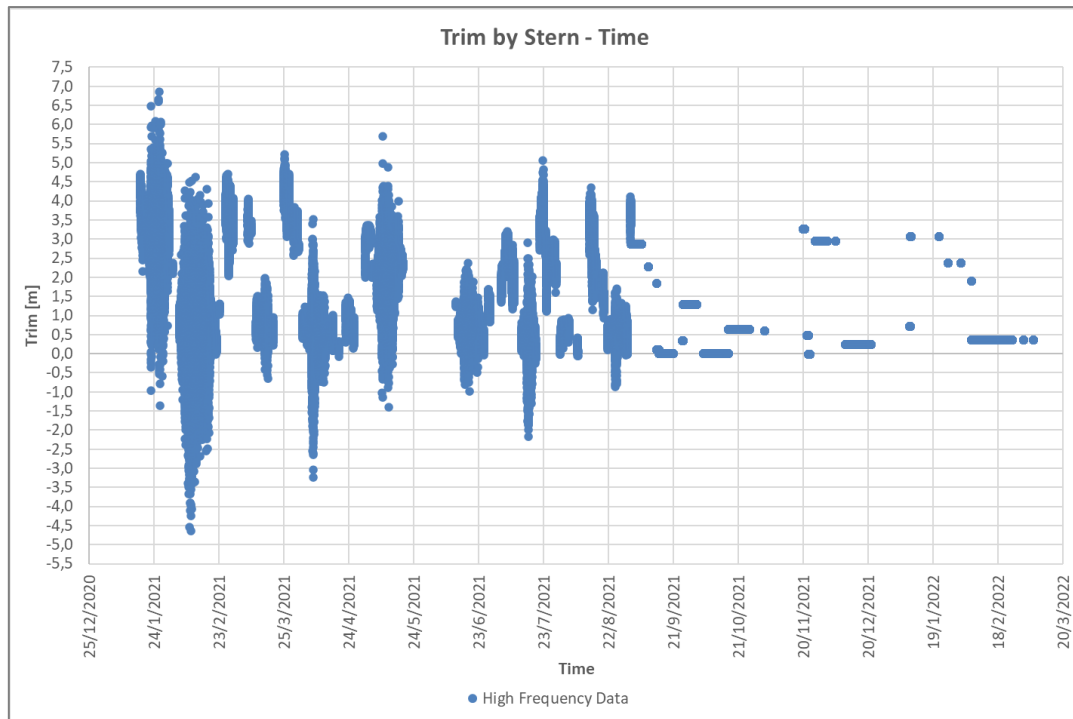
Στην *Εικόνα 12* παρουσιάζεται το χρονοδιάγραμμα των τιμών του μέσου βυθίσματος στο οποίο μπορούν να παρατηρηθούν δύο ξεχωριστά νέφη δεδομένων (data clusters), το ένα για βυθίσματα μεγαλύτερα των 10,5 m όπου αντιστοιχεί στην έμφορτη κατάσταση του πλοίου (Laden Condition) και το άλλο μικρότερα των 10,5 m τα οποία αντιστοιχούν στην κατάσταση έρματος (Ballast Condition).



Εικόνα 12: Χρονοδιάγραμμα Μέσου Βυθίσματος όπου διακρίνονται οι καταστάσεις Laden και Ballast

Μπορεί να παρατηρηθεί ότι μέχρι και τον Αύγουστο οι τιμές του βυθίσματος έχουν μεγάλη διακύμανση ανά ταξίδι και από τον Σεπτέμβρη το βύθισμα λαμβάνει σταθερές τιμές ανά ταξίδι. Μικρές διακυμάνσεις στις τιμές του μέσου βυθίσματος μπορεί να οφείλονται στην επίδραση έντονων κυματισμών, όμως οι μεγάλες διακυμάνσεις χρήζουν περαιτέρω παρακολούθησης και μελέτης. Οι σταθερές τιμές από τον Σεπτέμβρη και μετά πιθανό να οφείλονται είτε σε επιδιόρθωση των αισθητήρων πίεσης που μετρούν το βύθισμα και την διαγωγή είτε σε διαφορετικό τρόπο καταγραφής των δεδομένων (π.χ. λαμβάνοντας μέσους όρους για μια ημέρα ή περνώντας τις τιμές από τις ημερήσιες αναφορές).

Ίδια συμπεριφορά στα δεδομένα παρατηρείται και στις τιμές της διαγωγής ως προς τον χρόνο όπως φαίνεται στο διάγραμμα της *Εικόνας 13*.



Εικόνα 13: Χρονοδιάγραμμα Διαγωγής

Για να επιτευχθεί ομογενοποίηση των δεδομένων για τις τιμές του μέσου βυθίσματος και της διαγωγής έγινε χρήση των δεδομένων αυτών από τις ημερήσιες αναφορές. Πιο συγκεκριμένα, οι τιμές του μέσου βυθίσματος και της διαγωγής αντλήθηκαν από τις ημερήσιες αναφορές και μεταφέρθηκαν στα υψίσυχνα με διαδικασία που έχει αναλυθεί στην υπο-ενότητα 3.1.. Πριν χρησιμοποιηθούν τα δεδομένα από τις ημερήσιες αναφορές έγινε σύγκριση βασικών στατιστικών μεγεθών με τα υψίσυχνα δεδομένα ώστε να ελεγχθεί ότι δεν υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ τους. Η σύγκριση έγινε για όλο το χρονικό εύρος δεδομένων αλλά και ξεχωριστά για τη χρονική περίοδο στην οποία παρατηρούνται μεγάλες διακυμάνσεις ανά ταξίδι και για τη χρονική περίοδο που οι παράμετροι βυθίσματος και διαγωγής λαμβάνουν σταθερές τιμές. Στους Πίνακες 12, 13, 14 παρατηρείται ότι τα στατιστικά μεγέθη μεταξύ των υψίσυχνων δεδομένων και των ημερήσιων αναφορών είναι παραπλήσια και έτσι επιλέγεται η χρήση των ημερήσιων δεδομένων για το βύθισμα και την διαγωγή.

Πίνακας 12: Στατιστικά Μέσου Βυθίσματος και Διαγωγής για ολόκληρη την χρονική περίοδο μελέτης

Statistics for all data: 17/1/2021 – 6/3/2022					
High Freq. Data:	Mean Draft [m]	Trim by Stern [m]	Data obtained from Noon Reports:	Mean Draft [m]	Trim by Stern[m]
Mean	11,1	1,2	Mean	11,2	1,0
Standard Deviation	3,0	1,2	Standard Deviation	3,0	1,1
Sample Variance	8,8	1,5	Sample Variance	9,1	1,1
Range	11,0	11,5	Range	8,4	4,0
Minimum	4,9	-4,6	Minimum	6,1	0,0
Maximum	15,9	6,9	Maximum	14,5	4,0
Count	280421	280421	Count	280421	280421

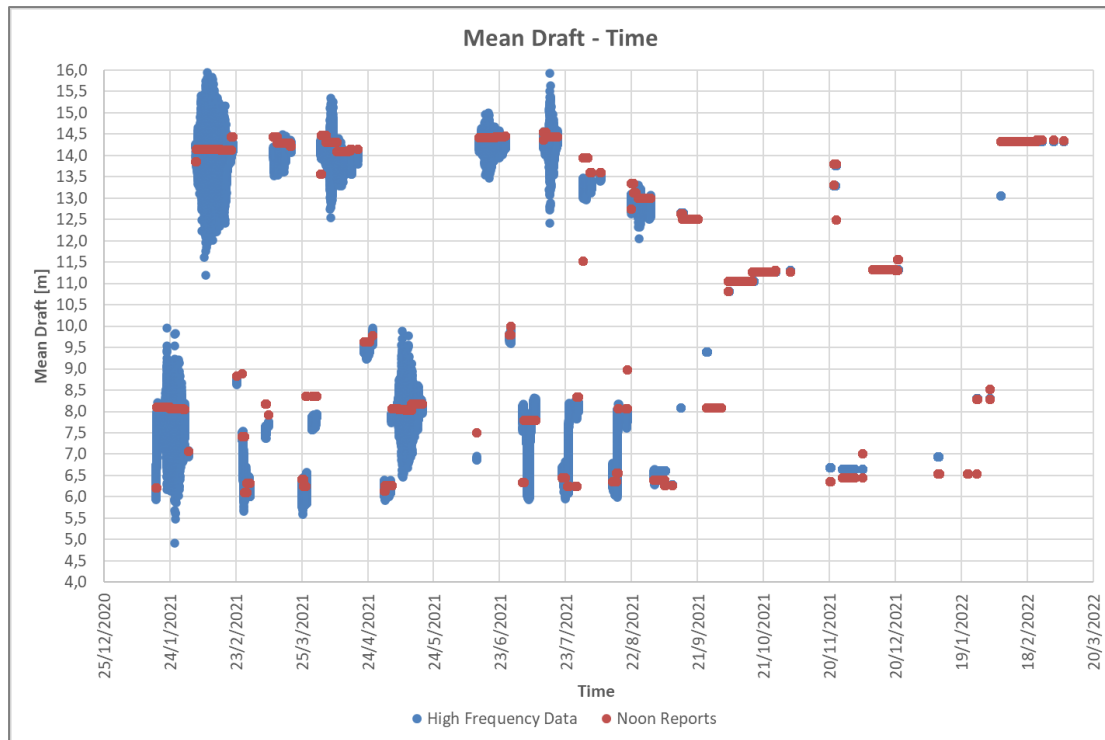
Πίνακας 13: Στατιστικά Μέσου Βυθίσματος και Διαγωγής για την χρονική περίοδο όπου παρατηρείται μεγάλη διακύμανση των παραμέτρων βυθίσματος και διαγωγής ανά ταξίδι

Statistics: 17/1/2021 - 30/8/2021					
High Freq. Data:	Mean Draft [m]	Trim by Stern [m]	HFD obtained from Noon Reports:	Mean Draft [m]	Trim by Stern [m]
Mean	11,0	1,3	Mean	11,2	1,1
Standard Deviation	3,2	1,3	Standard Deviation	3,3	1,1
Sample Variance	10,3	1,6	Sample Variance	10,6	1,2
Range	11,0	11,5	Range	8,4	4,0
Minimum	4,9	-4,6	Minimum	6,1	0,0
Maximum	15,9	6,9	Maximum	14,5	4,0
Count	167800	167800	Count	167800	167800

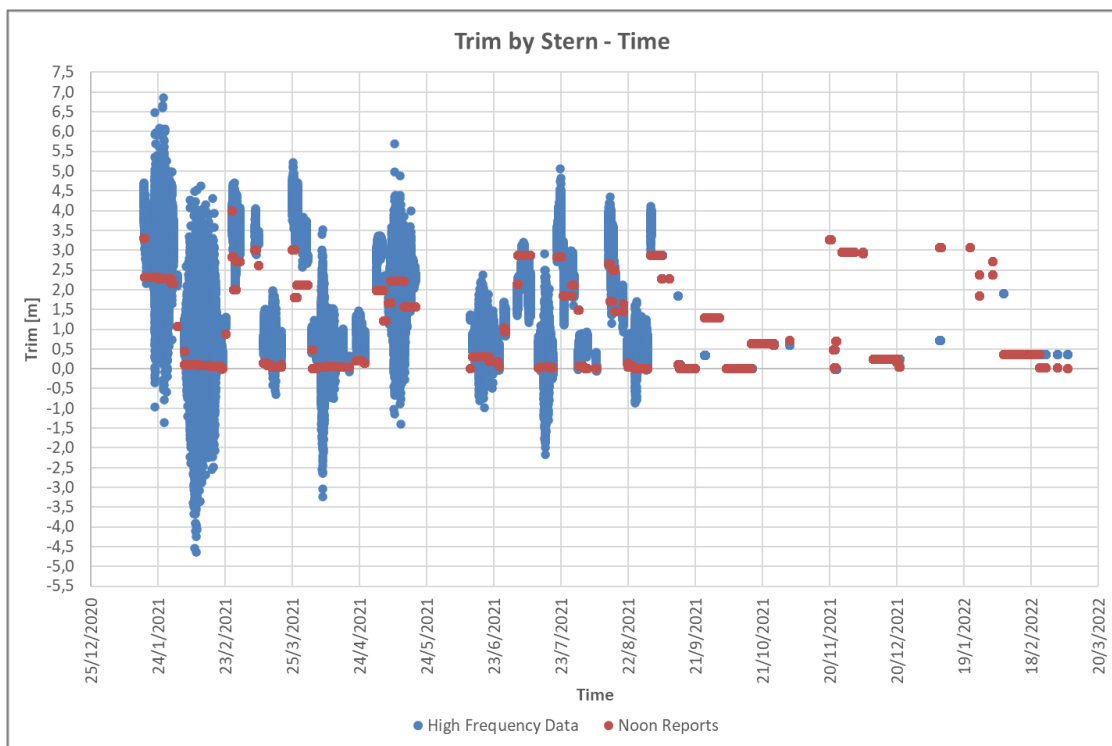
Πίνακας 14: Στατιστικά Μέσου Βυθίσματος και Διαγωγής για την χρονική περίοδο που οι παράμετροι βυθίσματος και διαγωγής λαμβάνουν σταθερές τιμές

Statistics: 1/9/2021 - 6/3/2022					
High Freq. Data:	Mean Draft [m]	Trim by Stern [m]	HFD obtained from Noon Reports:	Mean Draft [m]	Trim by Stern [m]
Mean	11,1	0,8	Mean	11,1	0,8
Standard Deviation	2,6	1,0	Standard Deviation	2,6	1,0
Sample Variance	6,6	1,0	Sample Variance	6,9	1,0
Range	8,0	4,1	Range	8,1	3,3
Minimum	6,3	0,0	Minimum	6,3	0,0
Maximum	14,3	4,1	Maximum	14,4	3,3
Count	112621	112621	Count	112621	112621

Παρακάτω παρουσιάζονται τα χρονοδιαγράμματα του μέσου βυθίσματος και της διαγωγής με τα υψίσχυρα δεδομένα (μπλε χρώμα) και τις ημερήσιες αναφορές (κόκκινο χρώμα):



Εικόνα 14: Χρονοδιάγραμμα Μέσου Βυθίσματος όπου με μπλε χρώμα παρουσιάζονται τα υψίσυχα δεδομένα και με κόκκινο τα Noon Reports

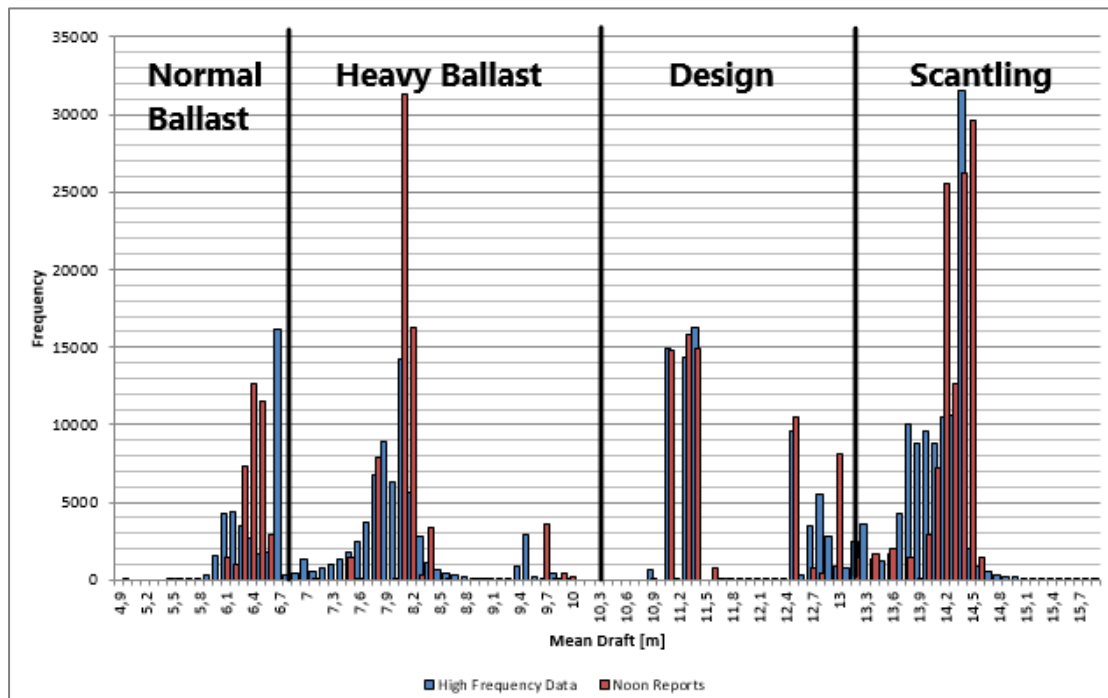


Εικόνα 15: Χρονοδιάγραμμα Διαγωγής συναρτήσεϊ όπου με μπλε χρώμα παρουσιάζονται τα υψίσυχα δεδομένα και με κόκκινο τα Noon Reports

Για τον περαιτέρω χωρισμό των καταστάσεων φόρτωσης τα χρονοδιαγράμματα το μέσου βυθίσματος δεν μπορούν να μας δώσουν κάποια πληροφορία. Έτσι, παράχθηκε ιστόγραμμα όπου μπορούν να χωριστούν οι καταστάσεις φόρτωσης με βάση τη συχνότητα που

παρατηρούνται οι διάφορες τιμές μέσου βυθίσματος. Από το ιστόγραμμα της Εικόνας 16 διακρίνονται 4 καταστάσεις φόρτωσης οι οποίες είναι οι εξής:

- ❖ Normal Ballast: $T_m = 6,1 - 6,8$ [m]
- ❖ Heavy Ballast: $T_m = 6,8 - 10,3$ [m]
- ❖ Design: $T_m = 10,3 - 13,2$ [m]
- ❖ Scantling: $T_m = 13,2 - 14,5$ [m]



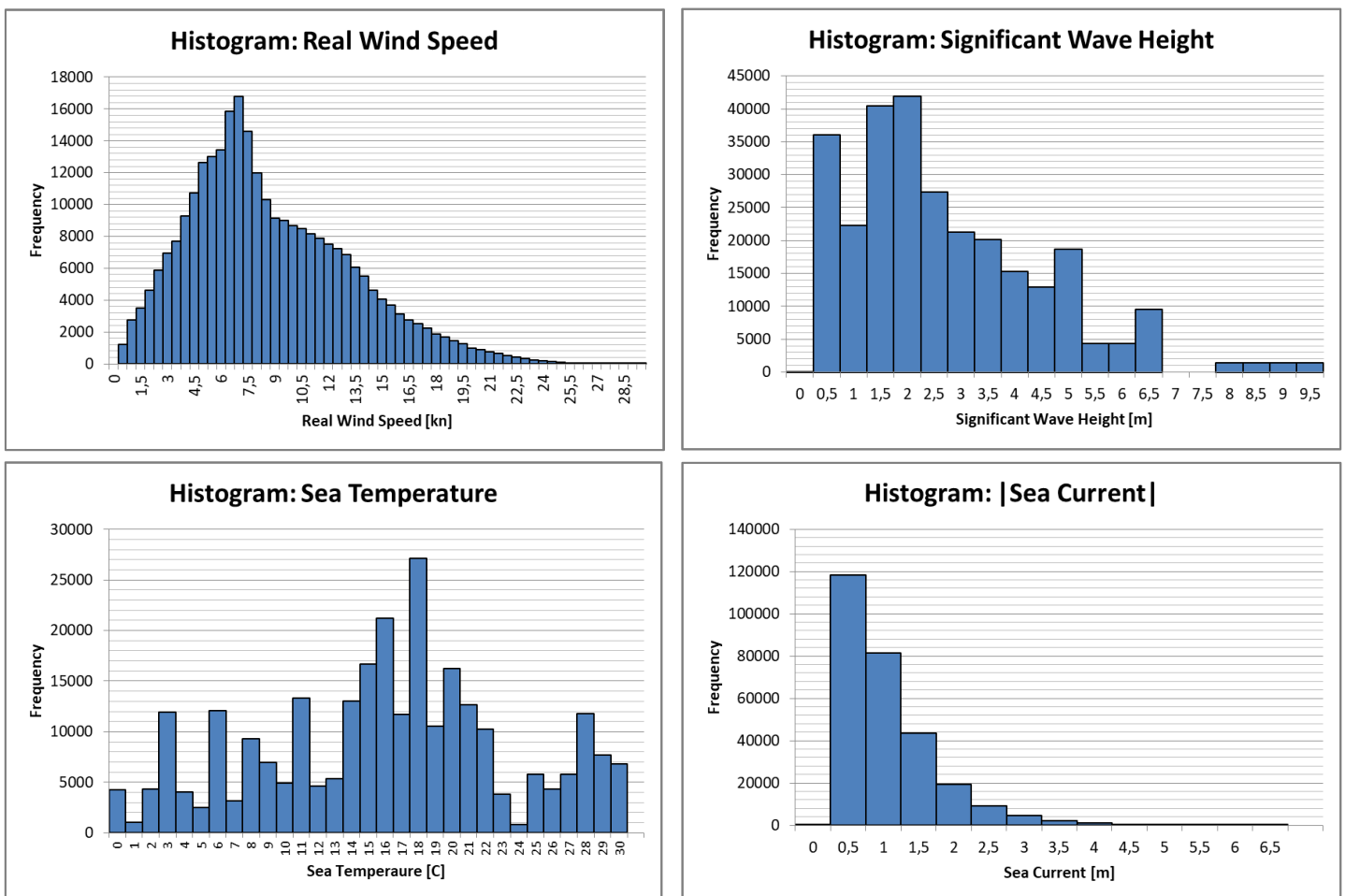
Εικόνα 16: Ιστόγραμμα Μέσου Βυθίσματος στο οποίο διακρίνονται οι καταστάσεις φόρτωσης του πλοίου. Με μπλε χρώμα παρουσιάζονται τα υψίσυχνα δεδομένα ενώ με κόκκινο τα Noon Reports

3.4 Περιγραφική στατιστική δεδομένων

Σε αυτήν την υπο-ενότητα παρουσιάζεται μια στατιστική περιγραφή των συνθηκών πλεύσης του υπό μελέτη πλοίου που αποσκοπεί στον σχηματισμό μιας σφαιρικής εικόνας για τις συνθήκες λειτουργίας του. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται το ποσοστό, ως προς τον συνολικό χρόνο, παραμονής του πλοίου σε λιμάνια και του ταξιδιού, οι συνθήκες καιρού κατά τις οποίες εκτελούσε τα ταξίδια του το πλοίο καθώς επίσης γίνεται και ξεχωριστή παρουσίαση για κάθε κατάσταση φόρτωσης με στατιστικά και ιστογράμματα των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή των δεικτών αξιολόγησης της απόδοσης (KPIs).

Από τις ημερήσιες αναφορές προκύπτει ότι το υπό μελέτη πλοίο βρισκόταν σε λιμάνι για το 54% του χρόνου και σε ταξίδι για το 46%. Το μεγάλο ποσοστό παραμονής του πλοίου σε λιμάνι δικαιολογείται καθώς το πλοίο εκτελούσε μικρά σε απόσταση ταξίδια και επομένως έκανε συχνές στάσεις. Ο μέσος χρόνος παραμονής σε λιμάνι υπολογίστηκε στις 7,9 μέρες ενώ ο μέσος χρόνος ταξιδιού στις 6,8 μέρες. Ο μεγάλος χρόνος παραμονής σε λιμάνια είναι ένας σημαντικός παράγοντας στην αύξηση της ρύπανσης της γάστρας με συνέπεια την μείωση της απόδοσης του πλοίου (IMO, 2012).

Κατά την διάρκεια των ταξιδιών το πλοίο βρίσκεται κατά 26% σε κακοκαιρία (άνω των 6 Beaufort για πραγματική ταχύτητα ανέμου και άνω των 3,4 μέτρων σημαντικού ύψους κύματος). Η μέση ταχύτητα ανέμου είναι 8,5 m/s όπου αντιστοιχεί σε αριθμό 5 κλίμακας Beaufort (Fresh Breeze) ενώ η μέγιστη τιμή είναι 29,4 m/s όπου αντιστοιχεί σε αριθμό 11 κλίμακας Beaufort (Violent Storm). Η μέση τιμή σημαντικού ύψους κύματος είναι 2,5 m (Scale 5, Rough) ενώ η μέγιστη τιμή είναι 9,2m (Scale 8, Very High). Η μέση θερμοκρασία θάλασσας (κοντά στην επιφάνεια) είναι 16,3 °C και η ελάχιστη θερμοκρασία είναι 0 που σημαίνει ότι πολύ πιθανό το πλοίο να συνάντησε πάγο. Τέλος, το θαλάσσιο ρεύμα (σε απόλυτη τιμή) κυμαίνεται από 0 έως 6,3 kn με μέση τιμή 0,8 kn. Οι ακραίες τιμές στις μέγιστες των παραμέτρων του καιρού μπορεί να οφείλονται σε στιγμιαίες ακραίες μετρήσεις (π.χ. σε ριπές ανέμου) είτε σε σφάλματα των αντίστοιχων αισθητήρων. Οι κατανομές συχνότητας των παραμέτρων του καιρού φαίνονται στα ιστογράμματα της *Εικόνας 17* και τα στατιστικά μεγέθη στους *Πίνακες 15* και *16*.



Εικόνα 17: Ιστογράμματα παραμέτρων του καιρού

Πίνακας 15: Στατιστικά στοιχεία παραμέτρων καιρού

Statistics	Relative Wind Speed [m/s]	Significant Wave Height [m]	Sea Temperature [°C]	 Sea Current [kn]
Mean	8,5	2,5	16,3	0,8
Standard Deviation	4,5	1,8	7,8	0,7
Range	29,4	9,2	35,0	6,3
Minimum	0,0	0,0	0,0	0,0
Maximum	29,4	9,2	35,0	6,3
Count	280421	280421	280421	280421

Πίνακας 16: Ποσοστά παραμέτρων καιρού τα οποία ξεπερνούν τα επιτρεπτά όρια της μελέτης & συνολικό ποσοστό κοκοκαιρίας

Weather parameter's limits				
Relative Wind Speed	Significant Wave Height	Sea Temperature	 Sea Current 	Bad Weather (Wind & Waves)
Wind Speed > 13,8 m/s (Beaufort Scale 6)	Hs > 3,4 m (Sea State Scale 5)	Sea Temp. < 2 °C	S.C. > 1 kn	
13%	20%	3%	29%	26%

Στον παρακάτω πίνακα διακρίνεται το ποσοστό κάθε κατάστασης φόρτωσης ως προς τον συνολικό χρόνο ταξιδιών σε ανοιχτή θάλασσα.

Πίνακας 17: Ποσοστά των καταστάσεων φόρτωσης

Percentage of each Loading Condition			
Normal Ballast	Heavy Ballast	Design	Scantling
13%	23%	24%	39%

Στους Πίνακες 18 & 19, 21 & 22, 24 & 25, 27 & 28 παρουσιάζονται δεδομένα αναφοράς για την κατάσταση φόρτωσης και ζεύγη τιμών ισχύος και ταχύτητας από τα Sea Trials για κάθε κατάσταση φόρτωσης αντίστοιχα. Στους Πίνακες 20, 23, 26, 29, παρουσιάζονται κάποια στατιστικά μεγέθη για τις παραμέτρους που χρησιμοποιούνται στην συγκεκριμένη ανάλυση για κάθε κατάσταση φόρτωσης ξεχωριστά. Επίσης, παρατίθενται ιστογράμματα των παραμέτρων, καθώς και διαγράμματα συνδυασμών παραμέτρων στις Εικόνες 18, 19, 20, 21. Έτσι, έχουμε πλέον σαφή εικόνα για την κατάσταση πλεύσης και λειτουργίας σε κάθε κατάσταση φόρτωσης.

- Κατάσταση φόρτωσης **Normal Ballast** με Mean Draft = 6,1 – 6,8 [m]

Πίνακας 18: Δεδομένα αναφοράς κατάστασης Normal Ballast από τα Sea Trials για το μέσο βύθισμα, το εκτόπισμα και τη διαγωγή

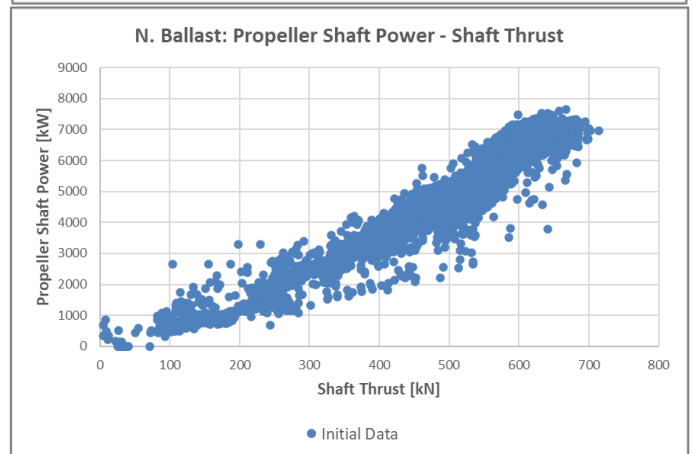
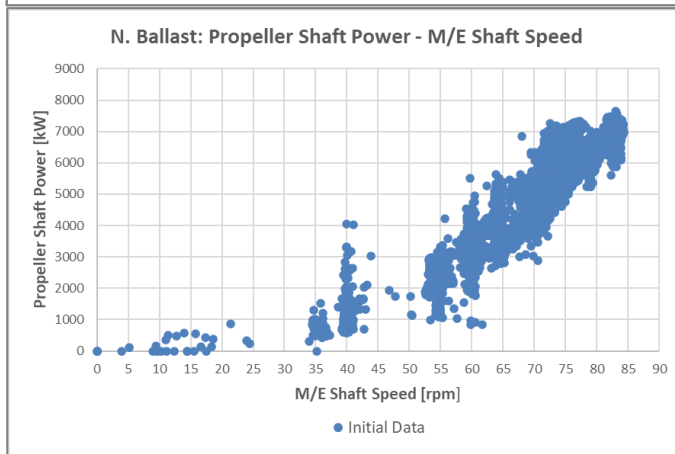
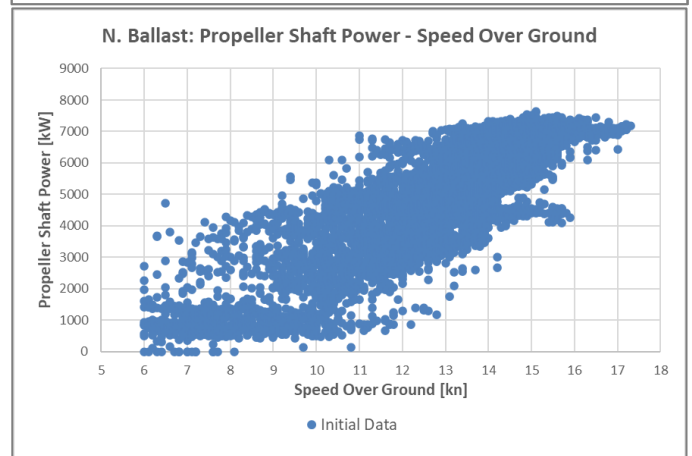
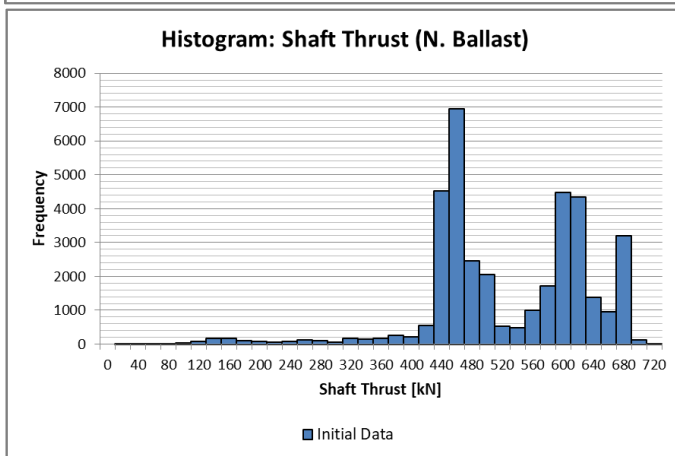
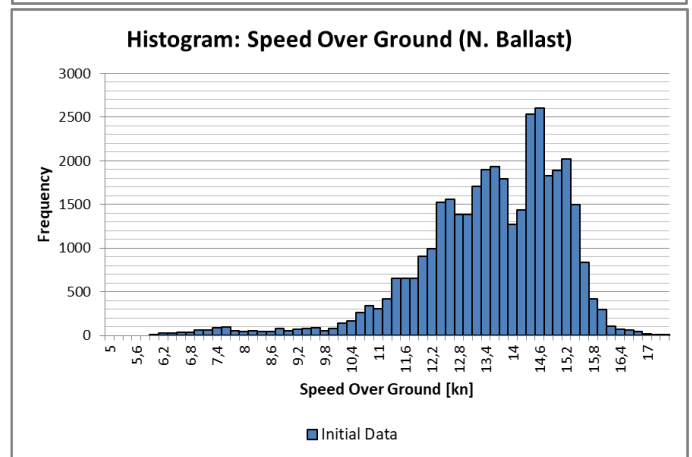
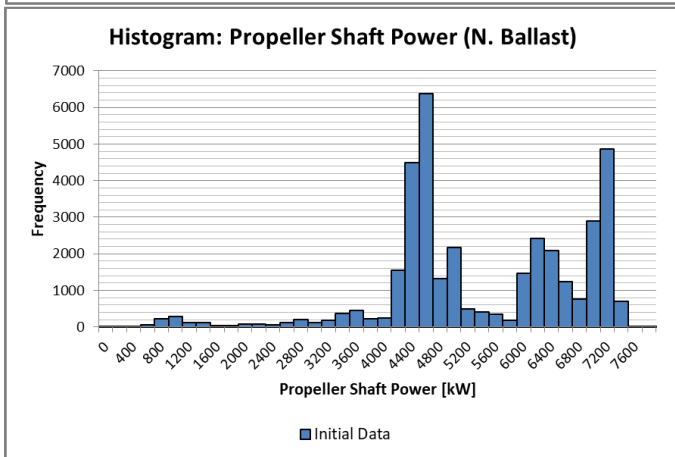
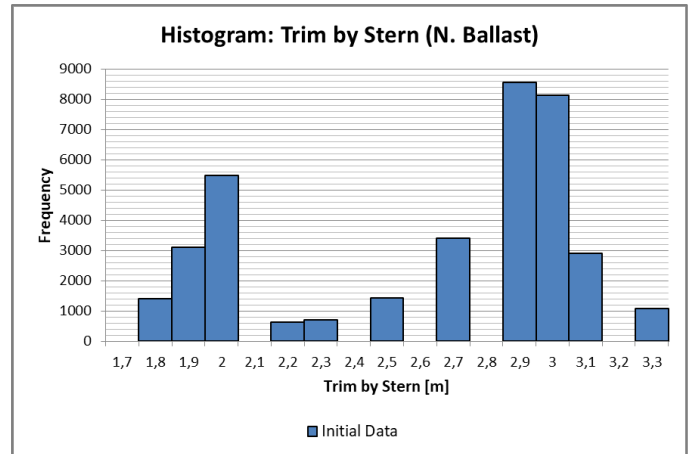
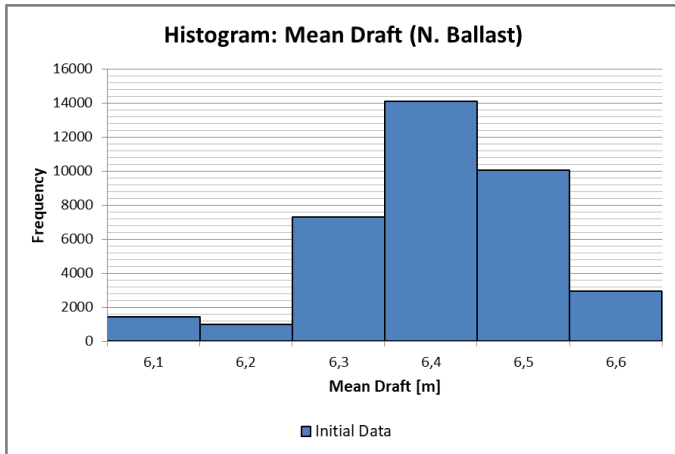
Normal Ballast: Reference Values from Sea Trials		
Draft [m]	Displacement [t]	Trim by Stern [m]
6,15	37116,3	2,5

Πίνακας 19: Δεδομένα αναφοράς κατάστασης Normal Ballast από τα Sea Trials για την ισχύ και την ταχύτητα

Normal Ballast: Reference Values from Sea Trials						
M/E Load %	35% MCR	50% MCR	65% MCR	71,6% MCR	75% MCR	80% MCR
Propeller Shaft Power [kW]	3441	4915	6389	7039	7374	7865
Vessel Speed [kn]	12,70	14,0	15,0	15,4	15,58	15,8

Πίνακας 20: Στατιστικά στοιχεία των βασικών παραμέτρων για την κατάσταση Normal Ballast

Normal Ballast: Initial Statistics	Mean Draft [m]	Trim by Stern [m]	M/E Loading Percentage [%MCR]	M/E Shaft Speed [rpm]	Propeller Shaft Power [kW]	Shaft Torque [kNm]	Shaft Thrust [kN]	Speed Through Water [kn]	Speed Over Ground [kn]
Mean	6,4	2,6	54	73	5316	692	517	13,5	13,5
Standard Deviation	0,105	0,465	14,127	7,791	1399,983	139,798	106,212	2,096	1,613
Range	0,5	1,6	77	84	7648	996	710	11,5	11,3
Minimum	6,1	1,7	0	0	0	0	5	5,1	6,0
Maximum	6,6	3,3	77	84	7648	958	715	16,6	17,3
Count	36800	36800	36800	36800	36800	36800	36800	36800	36800



Εικόνα 18: Ιστογράμματα παραμέτρων και διαγράμματα συνδυασμών παραμέτρων του αρχικού αρχείου δεδομένων για την κατάσταση Normal Ballast

- Κατάσταση φόρτωσης **Heavy Ballast** με Mean Draft = 6,8 – 10,3 [m]

Πίνακας 21: Δεδομένα αναφοράς κατάστασης Heavy Ballast από τα Sea Trials για το μέσο βύθισμα, το εκτόπισμα και τη διαγωγή

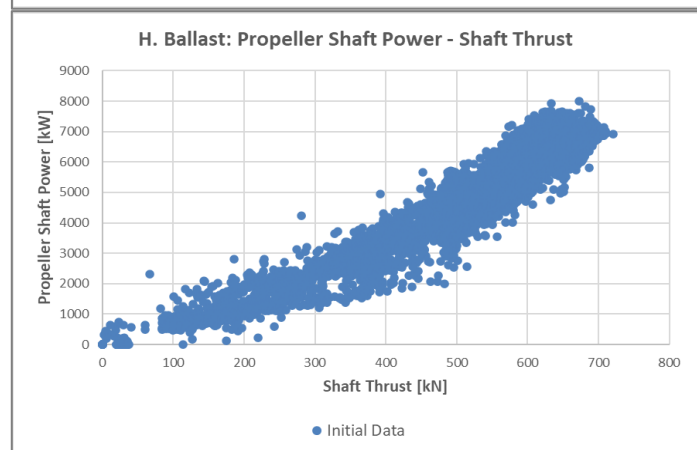
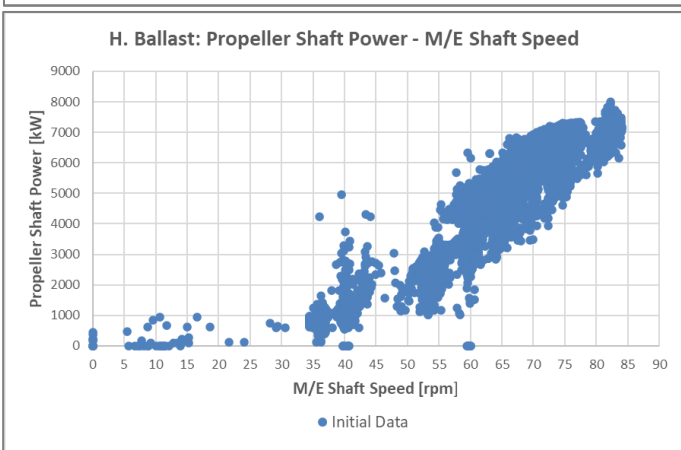
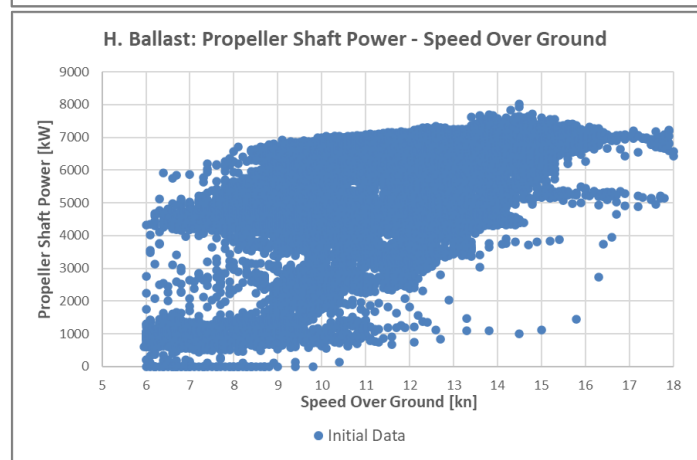
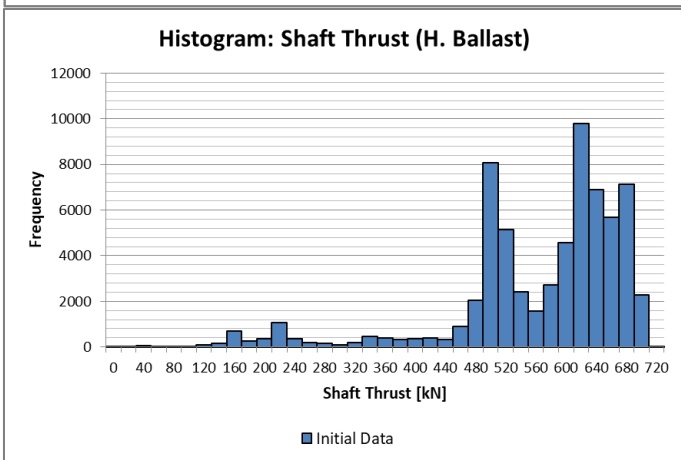
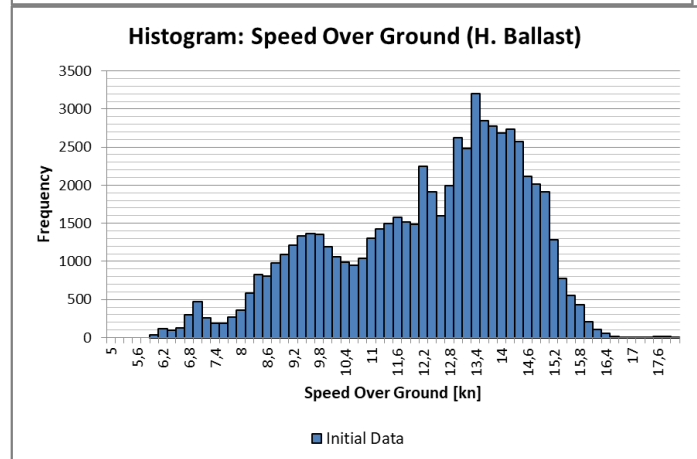
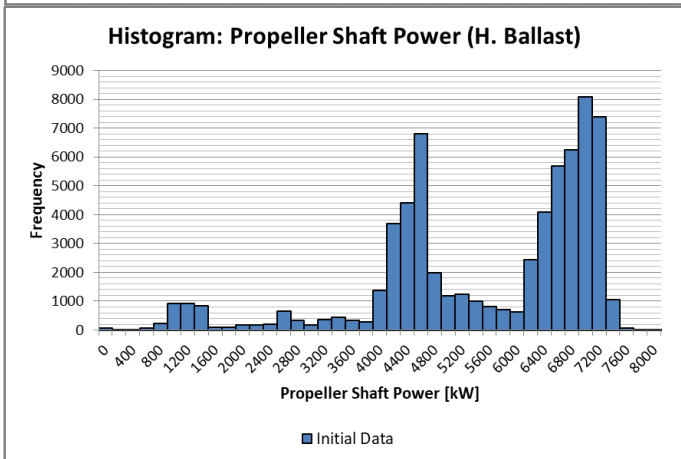
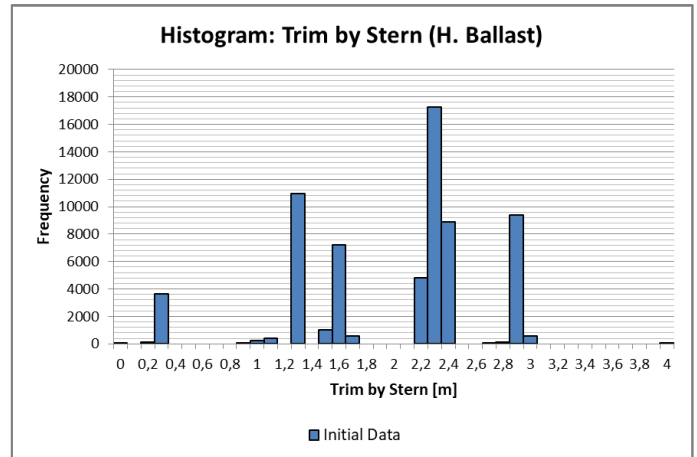
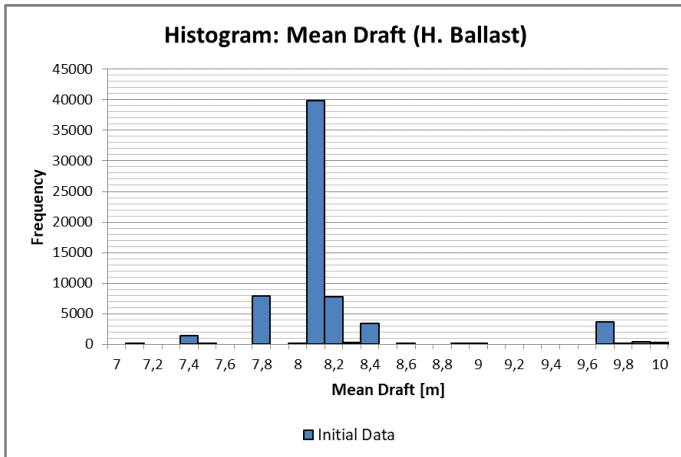
Heavy Ballast: Reference Values from Sea Trials		
Draft [m]	Displacement [t]	Trim by Stern [m]
8,27	51324,3	2,3

Πίνακας 22: Δεδομένα αναφοράς κατάστασης Heavy Ballast από τα Sea Trials για την ισχύ και την ταχύτητα

Heavy Ballast: Reference Values from Sea Trials						
M/E Load %	35% MCR	50% MCR	65% MCR	71,6% MCR	75% MCR	80% MCR
Propeller Shaft Power [kW]	3441	4915	6389	7039	7374	7865
Vessel Speed [kn]	12,3	13,7	14,6	15,0	15,18	15,4

Πίνακας 23: Στατιστικά στοιχεία των βασικών παραμέτρων για την κατάσταση Heavy Ballast

Heavy Ballast: Initial Statistics	Mean Draft [m]	Trim by Stern[m]	M/E Loading Percentage [%MCR]	M/E Shaft Speed [rpm]	Propeller Shaft Power [kW]	Shaft Torque [kNm]	Shaft Thrust [kN]	Speed Through Water [kn]	Speed Over Ground [kn]
Mean	8,2	2,0	55	69	5480	744,044	557	12,4	12,2
Standard Deviation	0,438	0,678	16,196	10,202	1607,981	155,446	117,596	2,291	2,181
Sample Variance	0,192	0,459	262,312	104,084	2585604,337	24163,372	13828,897	5,248	4,756
Range	3,0	4,0	81	84	8006	985	720,25	11,2	12,1
Minimum	7,0	0,0	0	0	0	0	0	5,0	6,0
Maximum	10,0	4,0	81	84	8006	953	720,25	16,2	18,0
Count	65240	65240	65240	65240	65240	65240	65240	65240	65240



Εικόνα 19: Ιστογράμματα παραμέτρων και διαγράμματα συνδυασμών παραμέτρων του αρχικού αρχείου δεδομένων για την κατάσταση Heavy Ballast

- Κατάσταση φόρτωσης **Design** με Mean Draft = 10,3 – 13,2 [m]

Πίνακας 24: Δεδομένα αναφοράς κατάστασης Design από τα Sea Trials για το μέσο βύθισμα, το εκτόπισμα και τη διαγωγή

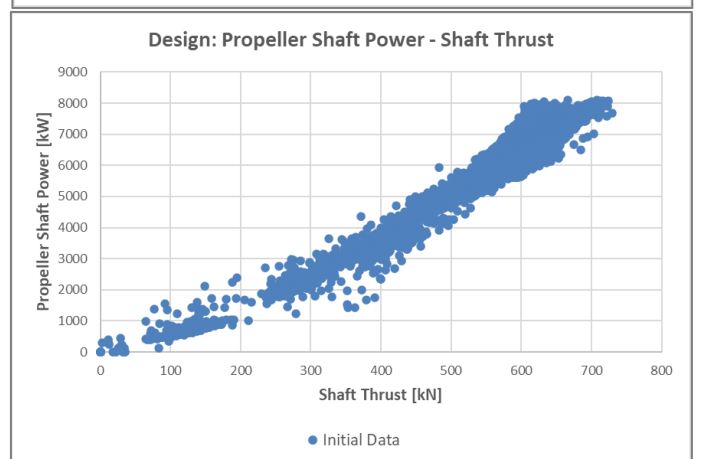
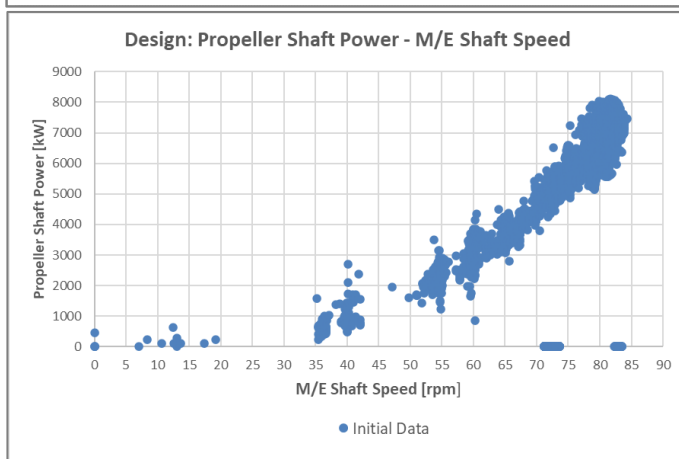
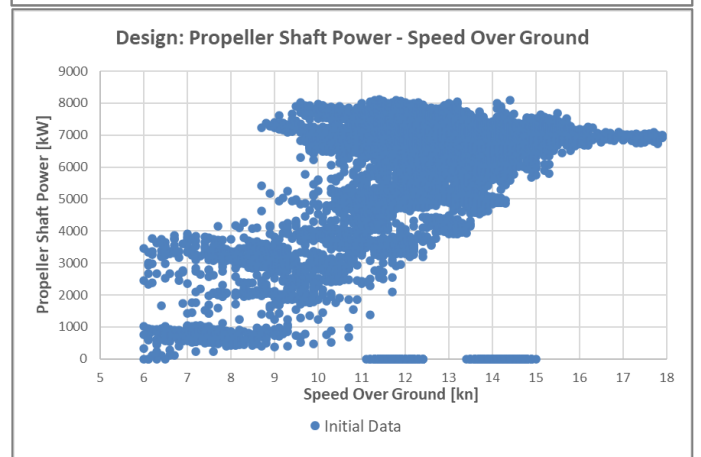
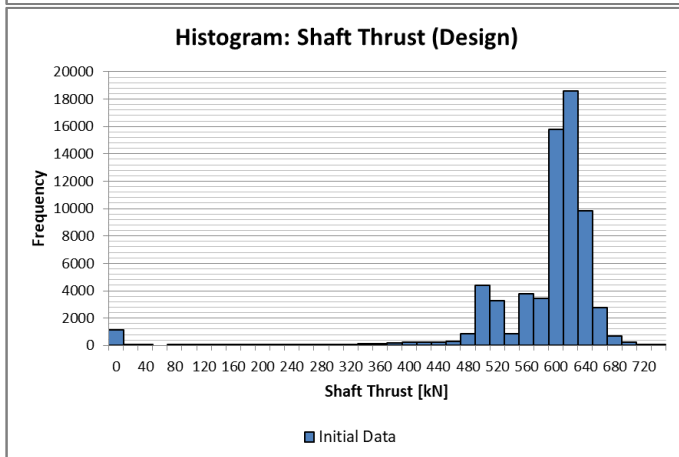
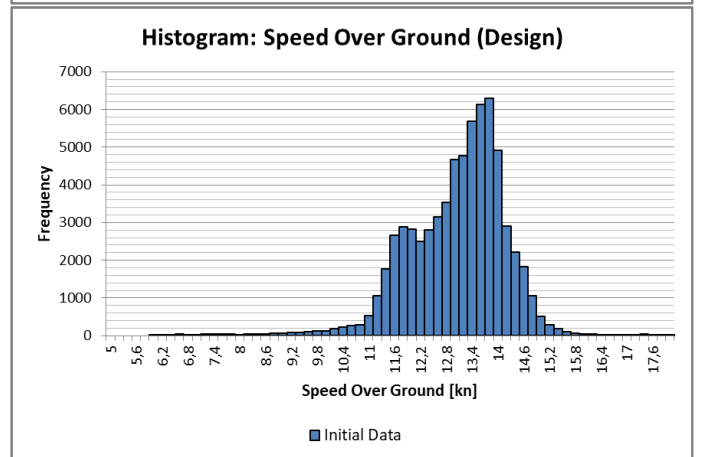
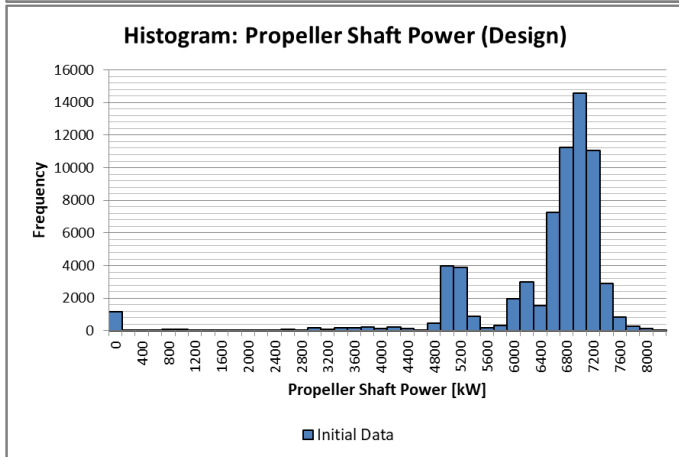
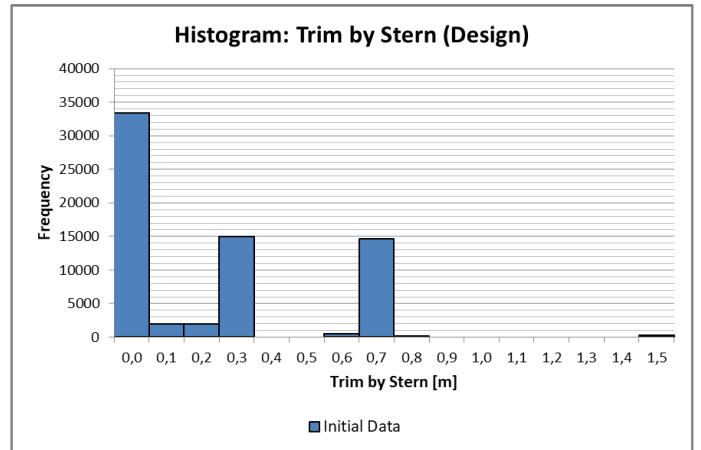
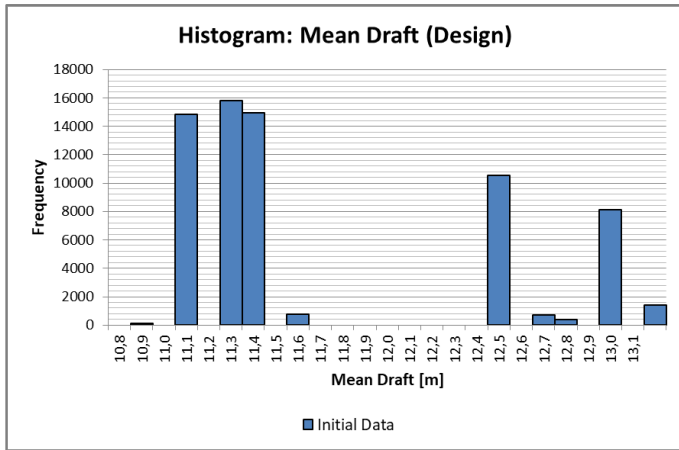
Design: Reference Loading Values from Sea Trials		
Draft [m]	Displacement [t]	Trim by Stern [m]
12,2	78711,9	0

Πίνακας 25: Δεδομένα αναφοράς κατάστασης Design από τα Sea Trials για την ισχύ και την ταχύτητα

Design: Reference Values from Sea Trials							
M/E Load %	35% MCR	50% MCR	65% MCR	71,6% MCR	75% MCR	80% MCR	85% MCR
Propeller Shaft Power [kW]	3441	4915	6389	7039	7374	7865	8356
Vessel Speed [kn]	11,65	13,2	14,3	14,7	14,86	15,1	15,3

Πίνακας 26: Στατιστικά στοιχεία των βασικών παραμέτρων για την κατάσταση Design

Design: Initial Statistics	Mean Draft [m]	Trim by Stern [m]	M/E Loading Percentage [%MCR]	M/E Shaft Speed [rpm]	Propeller Shaft Power [kW]	Shaft Torque [kNm]	Shaft Thrust [kN]	Speed Through Water [kN]	Speed Over Ground [kN]
Mean	11,7	0,2	64	77	6312	764	572	13,6	13,0
Standard Deviation	0,730	0,263	12,562	11,370	1247,469	129,988	97,920	1,279	1,168
Sample Variance	0,532	0,069	157,810	129,272	1556178,298	16896,757	9588,415	1,637	1,364
Range	2,3	1,5	82	83	8109	983	730	10,9	11,9
Minimum	10,8	0	0	0	0	0	0	5,5	6,0
Maximum	13,1	1,5	82	83	8109	956	730	16,4	17,9
Count	67715	67715	67715	67715	67715	67715	67715	67715	67715



Εικόνα 20: Ιστογράμματα παραμέτρων και διαγράμματα συνδυασμών παραμέτρων του αρχικού αρχείου δεδομένων για την κατάσταση Design

- Κατάσταση φόρτωσης **Scantling** με Mean Draft = 13,2 – 14,5 [m]

Πίνακας 27: Δεδομένα αναφοράς κατάστασης Scantling από τα Sea Trials για το μέσο βύθισμα, το εκτόπισμα και τη διαγωγή

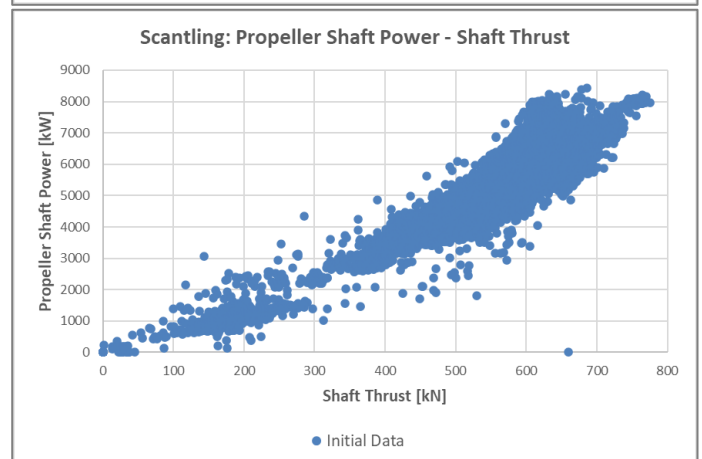
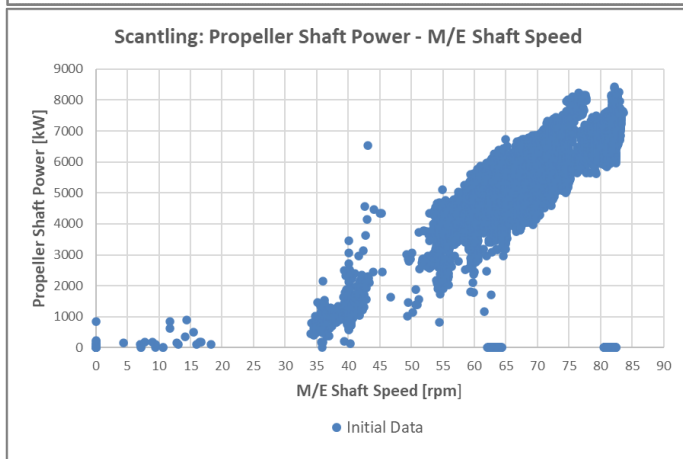
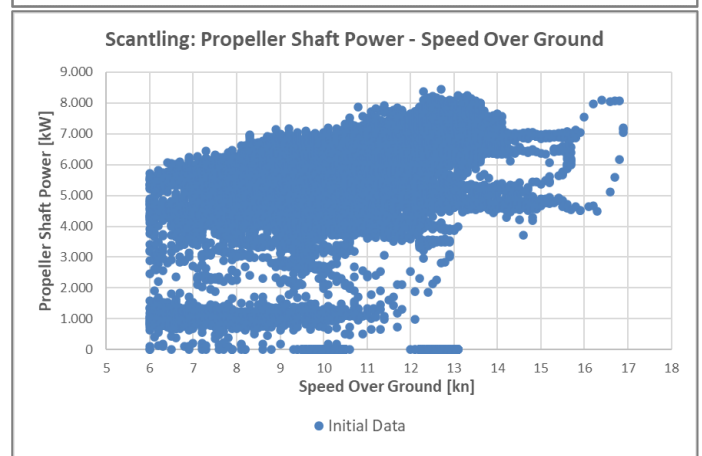
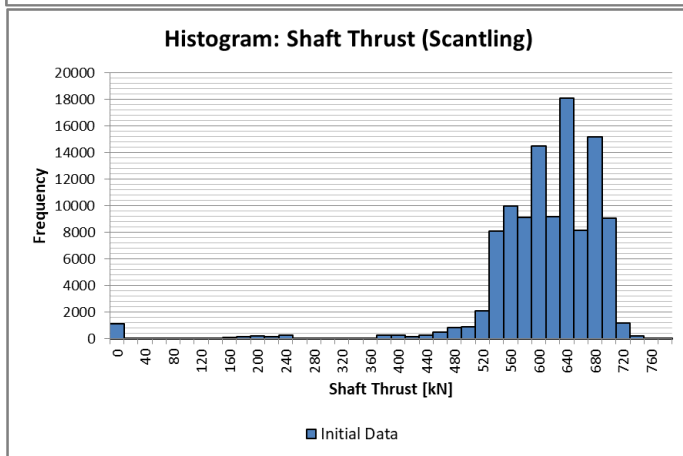
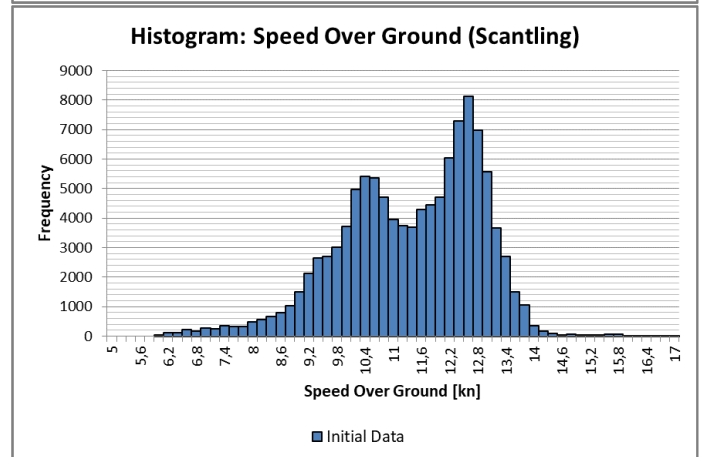
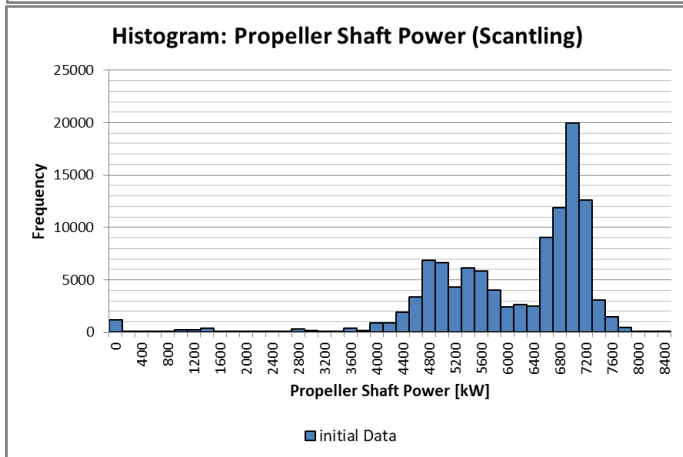
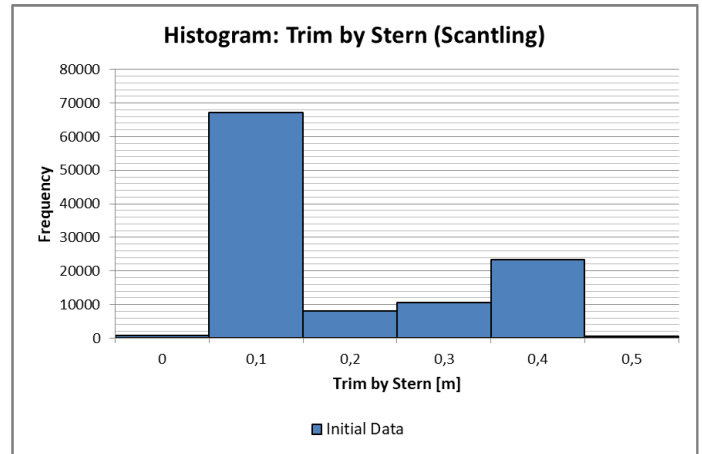
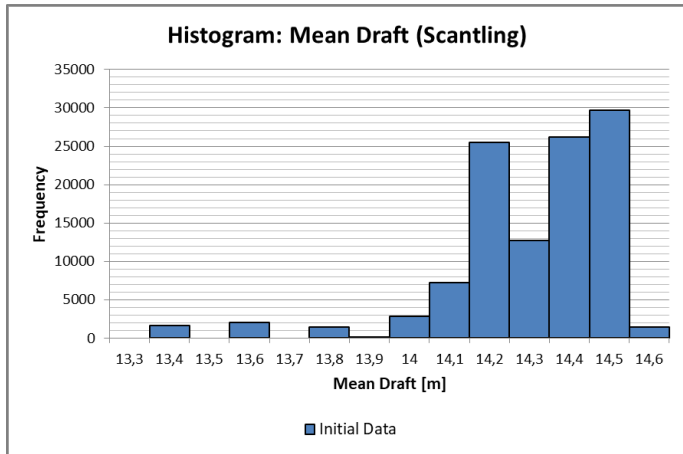
Scantling: Reference Values from Sea Trials		
Mean Draft [m]	Displacement [t]	Trim [m]
14,45	94796,2	0

Πίνακας 28: Δεδομένα αναφοράς κατάστασης Scantling από τα Sea Trials για την ισχύ και την ταχύτητα

Scantling: Reference Values from Sea Trials							
M/E Load %	35% MCR	50% MCR	65% MCR	71,6% MCR	75% MCR	80% MCR	85% MCR
Propeller Shaft Power [kW]	3441	4915	6389	7039	7374	7865	8356
Vessel Speed [kn]	11,4	12,6	13,6	14,0	14,22	14,5	14,7

Πίνακας 29: Στατιστικά στοιχεία των βασικών παραμέτρων για την κατάσταση Scantling

Scantling: Initial Statistics	Mean Draft [m]	Trim by Stern [m]	M/E Loading Percentage [%MCR]	M/E Shaft Speed [rpm]	Propeller Shaft Power [kW]	Shaft Torque [kNm]	Shaft Thrust [kN]	Speed Through Water [kN]	Speed Over Ground [kN]
Mean	14,2	0,2	60,1	70,1	5966	798	598	12,1	11,3
Standard Deviation	0,205	0,131	12,749	10,581	1268,934	125,512	94,432	1,786	1,479
Range	1,2	0,5	84,9	82,9	8435	1058,000	775	11,4	10,9
Minimum	13,3	0	0,0	0,0	0	0	0	5,0	6,0
Maximum	14,5	0,5	84,9	82,9	8435	1028	775	16,4	16,9
Count	110666	110666	110666	110666	110666	110666	110666	110666	110666



Εικόνα 21: Ιστογράμματα παραμέτρων και διαγράμματα συνδυασμών παραμέτρων του αρχικού αρχείου δεδομένων για την κατάσταση Scantling

3.5 Περιορισμός δεδομένων στα εύρη τιμών αναφοράς - Διαδικασία filtering & normalization

Για να είναι εφικτή η χρήση των επιχειρησιακών δεδομένων κατά τους υπολογισμούς των δεικτών αξιολόγησης της απόδοσης (KPIs) πρέπει να περιοριστούν στα εύρη των τιμών που ορίζονται από τα δεδομένα αναφοράς (διαδικασία filtering). Έτσι, τα επιχειρησιακά δεδομένα και τα δεδομένα αναφοράς έχουν ίδια εύρη τιμών και μπορούν πλέον να συγκριθούν μεταξύ τους. Επιπρόσθετα, για να μπορεί να αναχθεί η πραγματική ταχύτητα του πλοίου σε αυτήν που θα είχε εάν βρισκόταν στα βυθίσματα των καταστάσεων φόρτωσης αναφοράς, με χρήση του συντελεστή ναυαρχείου (διαδικασία normalization), ασκούνται δύο κριτήρια: το κριτήριο εκτοπίσματος και το κριτήριο διαγωγής. Τέλος, τα δεδομένα περιορίζονται σε συνθήκες καλού καιρού όπως έχει εφαρμοστεί και στα δεδομένα αναφοράς κατά τα Sea Trials με βάση το πρότυπο ISO 15016. Όλη η διαδικασία είχε ως βάση το πρότυπο ISO 19030 (ISO, 2015), το πρότυπο ISO 15016 (ISO, 2015) καθώς και τις προτεινόμενες διαδικασίες της ITTC (2017).

➤ Ισχύς πρόωσης

Τα δεδομένα περιορίστηκαν για ποσοστό ισχύος ως προς τη μέγιστη συνεχή ισχύ (MCR) όπως προκύπτει από τα Sea Trials ως εξής:

Normal Ballast & Heavy Ballast:	35 – 80 [%MCR]
Design & Scantling:	35 – 85 [%MCR]

➤ Ταχύτητα πλοίου

Από τα δεδομένα αναφοράς προκύπτουν οι εξής περιορισμοί για την ταχύτητα του πλοίου. Για τους περιορισμούς επιλέχθηκε η ταχύτητα ως προς το έδαφος SOG (Speed Over Ground) καθώς αυτή χρησιμοποιήθηκε και κατά τα Sea Trials.

Normal Ballast:	$SOG < 15,8 [kn]$
Heavy Ballast:	$SOG < 15,41 [kn]$
Design:	$SOG < 15,5 [kn]$
Scantling:	$SOG < 14,9 [kn]$

➤ Ταχύτητα ανέμου

Σύμφωνα με το πρότυπο ISO 15016 (ISO,2015) ο υπολογισμός των δεικτών αξιολόγησης της απόδοσης KPIs είναι αξιόπιστος για πραγματική ταχύτητα ανέμου μικρότερη του αριθμού 6 της κλίμακας Beaufort που αντιστοιχεί σε ταχύτητα ανέμου 13,8 [m/s]. Ο περιορισμός αυτός λαμβάνεται γιατί σε επόμενο στάδιο της επεξεργασίας των δεδομένων γίνεται διόρθωση της ισχύος για την αντίσταση που επιφέρει ο άνεμος και έχει διαπιστωθεί ότι διορθώσεις ισχύος για πραγματική ταχύτητα ανέμου άνω του αριθμού 6 της κλίμακας Beaufort δεν προκύπτουν αξιόπιστα αποτελέσματα. Έτσι τα δεδομένα περιορίζονται για πραγματική ταχύτητα ανέμου μικρότερη των 13,8 [m/s].

Τα διαθέσιμα επιχειρησιακά δεδομένα αφορούν την φαινόμενη ταχύτητα ανέμου και επομένως η πραγματική ταχύτητα ανέμου πρέπει να υπολογιστεί. Ο υπολογισμός της πραγματικής ταχύτητας ανέμου αναλύεται στην υπο-ενότητα 4.1.1.

➤ Σημαντικό ύψος κύματος

Όπως και στην ταχύτητα ανέμου έτσι και στο σημαντικό ύψος κύματος, υπάρχει κάποιο όριο μέχρι το οποίο έχουμε αξιόπιστα αποτελέσματα στους υπολογισμούς. Η ΙΤΤC (2017) προτείνει την ανίσωση (3.5.1) ως όριο για μετρούμενα σημαντικά ύψη κύματος:

$$H_{1/3} \leq 2,25 \cdot x, \text{ με } x = \sqrt{L_{PP}/100} \quad (3.5.1)$$

Άρα:

$$x = \sqrt{225,5/100} = 1,50167$$

$$H_{1/3} < 3,4 [m]$$

Επομένως τα δεδομένα περιορίζονται σε αυτά με σημαντικό ύψος κύματος $H_{1/3}$ μικρότερο των 3,4 μέτρων.

➤ Θαλάσσιο ρεύμα

Το θαλάσσιο ρεύμα (sea current) - και πιο συγκεκριμένα η συνιστώσα του θαλάσσιου ρεύματος στην κατεύθυνση του πλοίου - μπορεί να υπολογιστεί ως η απόκλιση της ταχύτητας ως προς το νερό (Speed Through Water) με την ταχύτητα ως προς το έδαφος (Speed Over Ground):

$$\text{Sea Current} = |\text{Speed Through Water} - \text{Speed Over Ground}| \quad (3.5.2)$$

Ως άνω όριο θαλάσσιου ρεύματος επιλέγεται ο 1 κόμβος κατά απόλυτη τιμή σύμφωνα με το ISO 19030. Έτσι τα δεδομένα περιορίζονται σε αυτά με θαλάσσιο ρεύμα μικρότερο του 1 κόμβου κατά απόλυτη τιμή.

➤ Θερμοκρασία θάλασσας

Τα δεδομένα περιορίζονται σε αυτά με θερμοκρασία θάλασσας μεγαλύτερη των 2 °C σύμφωνα με το ISO 19030 (ISO, 2015)

➤ Κριτήρια εκτόπισματος και διαγωγής

Επιτρεπτές διαφορές εκτόπισματος και διαγωγής ορίζονται από τους παρακάτω τύπους:

$$\left| 100 \cdot \frac{\Delta_{ref} - \Delta_{act}}{\Delta_{act}} \right| < 10 \quad (3.5.3)$$

$$|trim_{ref} - trim_{act}| < 0,4 \cdot \frac{L_{BP}}{100} \quad (3.5.4)$$

Όπου:

Δ_{ref}	[t]:	Εκτόπισμα αναφοράς
Δ_{act}	[t]:	Πραγματικό εκτόπισμα

$trim_{ref}$ [m]: Διαγωγή αναφοράς
 $trim_{act}$ [m]: Πραγματική διαγωγή
 L_{BP} [m]: Μήκος μεταξύ καθέτων

Εναπομείναντες διαφορές εκτόπισματος και διαγωγής διορθώνονται (normalization) με χρήση του συντελεστή Ναυαρχείου ανάγοντας έτσι την ταχύτητα στο μετρούμενο εκτόπισμα σε αυτήν που θα είχε στο εκτόπισμα αναφοράς:

$$V_{ref} = V_{act} \cdot \left(\frac{\Delta_{act}^{2/3}}{\Delta_{ref}^{2/3}} \right)^{1/3} \quad (3.5.5)$$

Όπου:

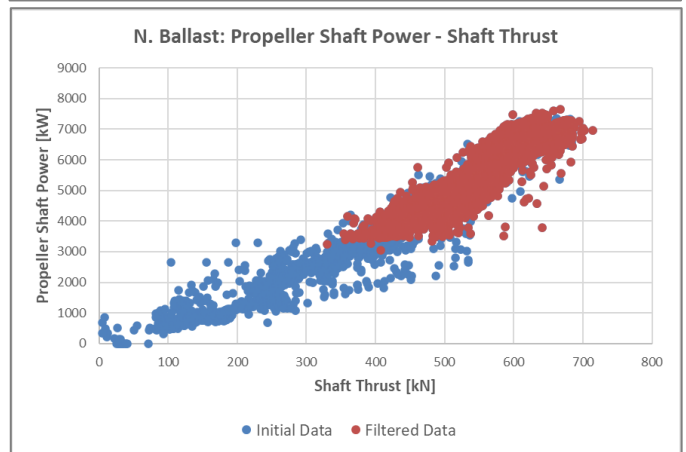
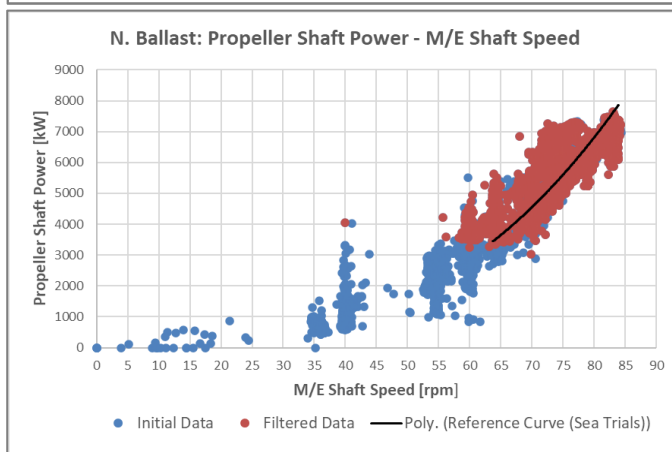
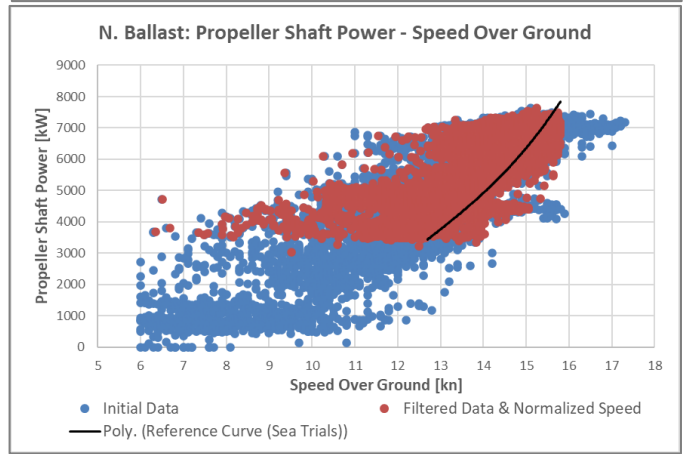
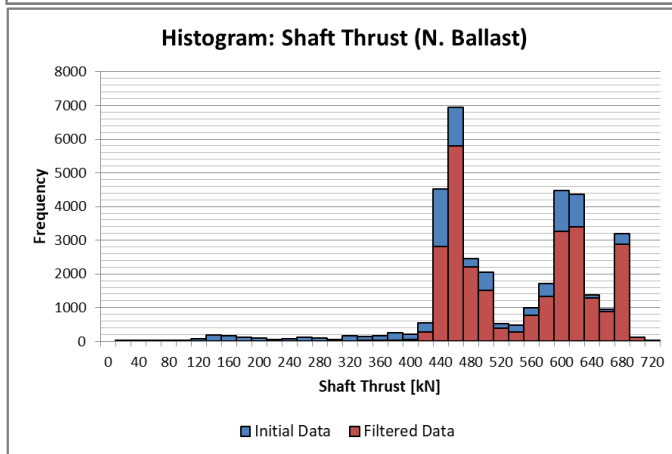
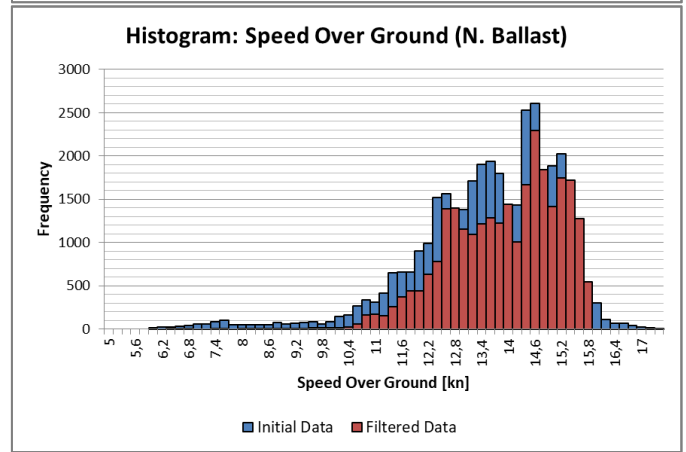
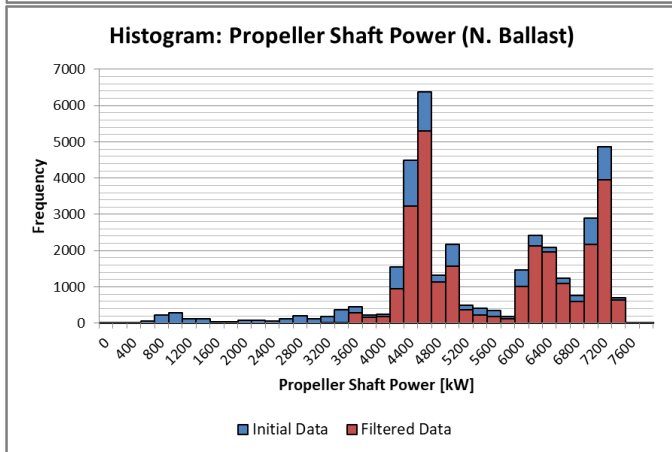
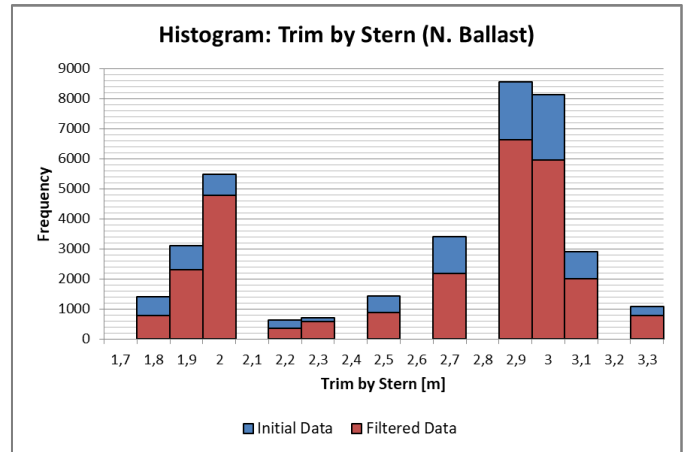
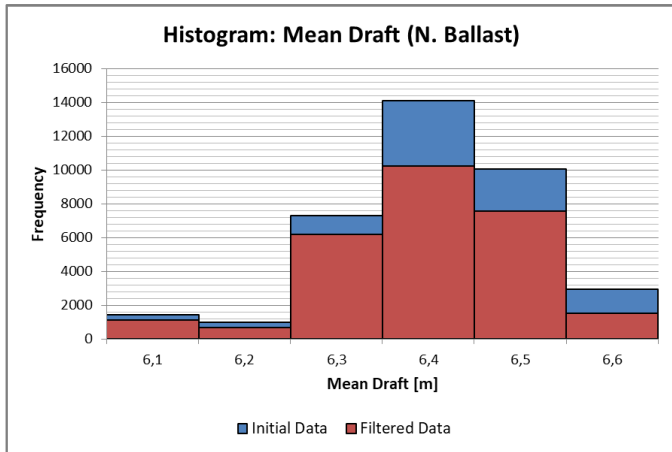
V_{act} [kn]: Η ταχύτητα στο μετρούμενο εκτόπισμα
 V_{ref} [kn]: Η ταχύτητα στο εκτόπισμα αναφοράς
 Δ_{act} [t]: Μετρούμενο εκτόπισμα
 Δ_{ref} [t]: Εκτόπισμα αναφοράς

Στον Πίνακα 30 φαίνονται τα ποσοστά των δεδομένων που πληρούν τους περιορισμούς και τα κριτήρια για όλες τις καταστάσεις φόρτωσης ξεχωριστά καθώς και το συνολικό ποσοστό για όλες τις καταστάσεις φόρτωσης. Τελικά, μετά τη διαδικασία filtering απομένει το 40% των αρχικών δεδομένων πλεύσης σε ανοιχτή θάλασσα.

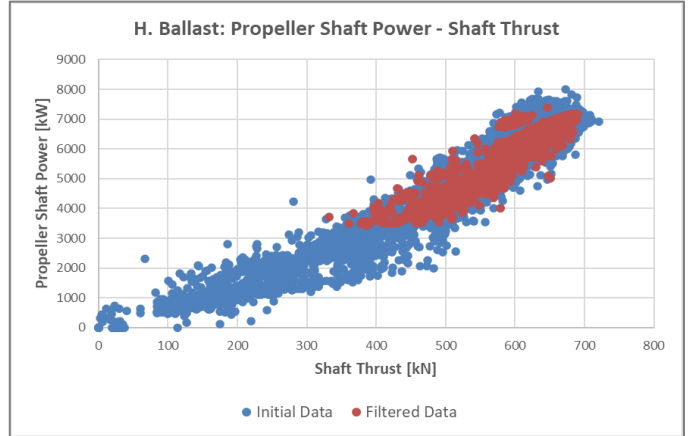
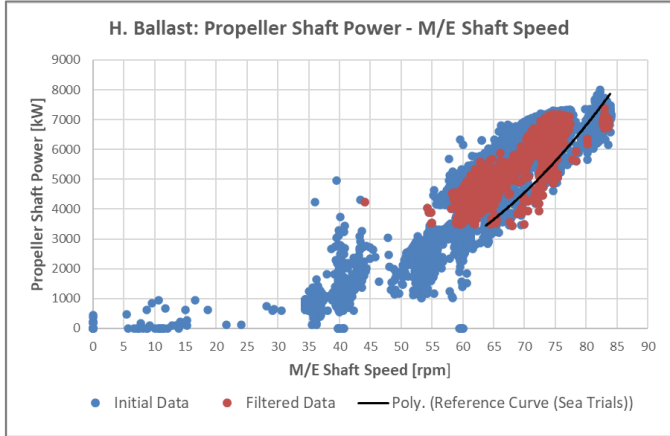
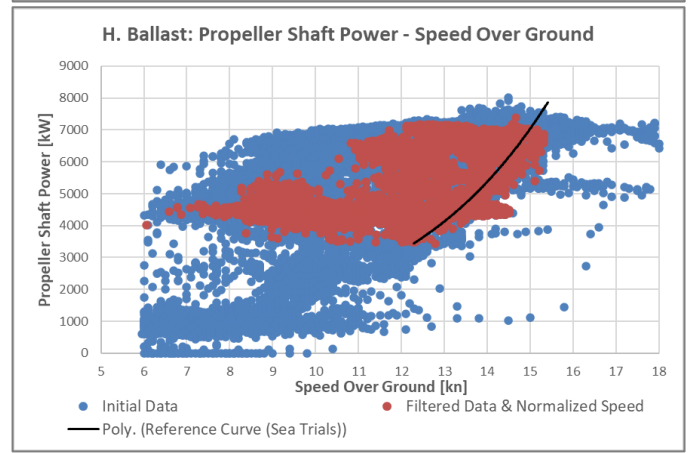
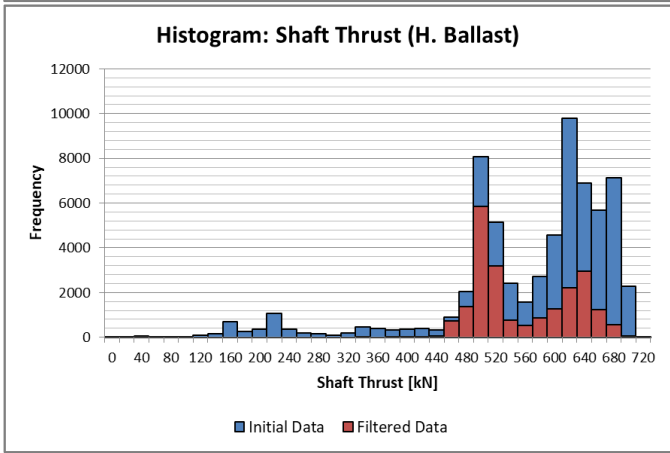
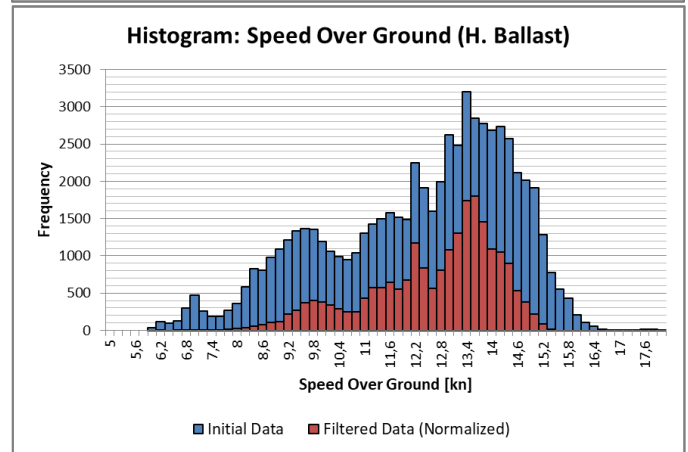
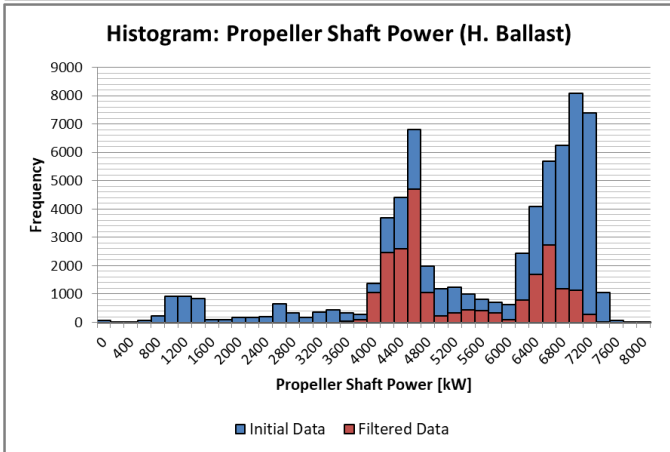
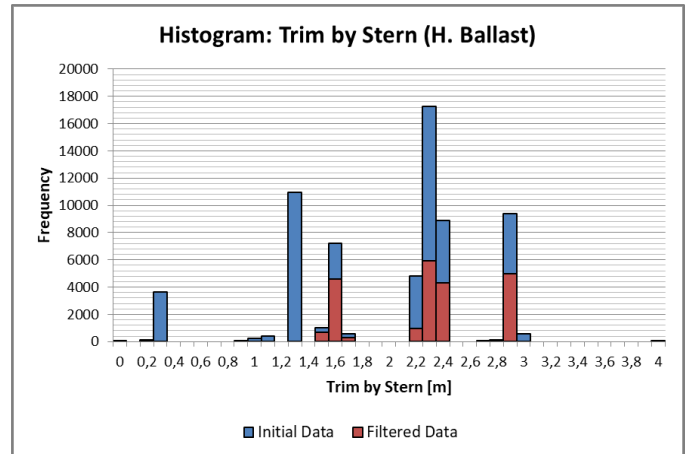
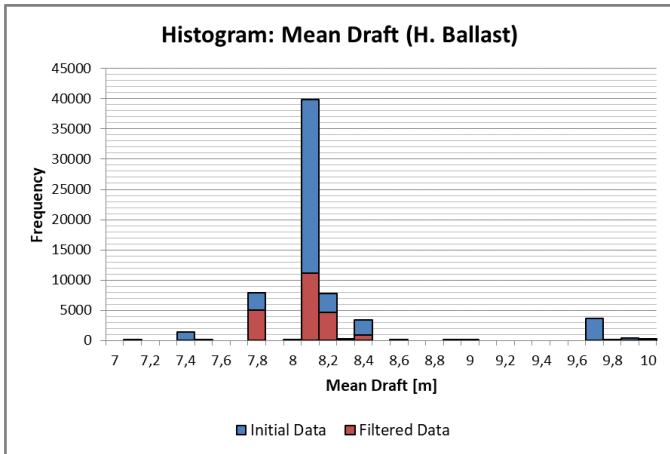
Πίνακας 30: Ποσοστά δεδομένων που πληρούν τους περιορισμούς και τα κριτήρια της διαδικασίας filtering

Loading Condition	Data Pass percentages after filtering procedure								
	Displ. Crit. Pass	Trim Crit. Pass	Power Within Limits	Speed Within Limits	Wind Speed < 13,8 m/s	Hs < 3,4 m	Sea Current < 1 Kn	Sea Temp > 2 C	Total PASS after filtering
Normal Ballast	100%	100%	94%	97%	95%	100%	88%	98%	74%
Heavy Ballast	87%	76%	91%	98%	87%	82%	87%	95%	33%
Design	78%	100%	97%	99%	92%	70%	70%	100%	39%
Scantling	100%	100%	97%	100%	81%	78%	57%	95%	33%
Total	91%	94%	95%	99%	87%	80%	72%	97%	40%

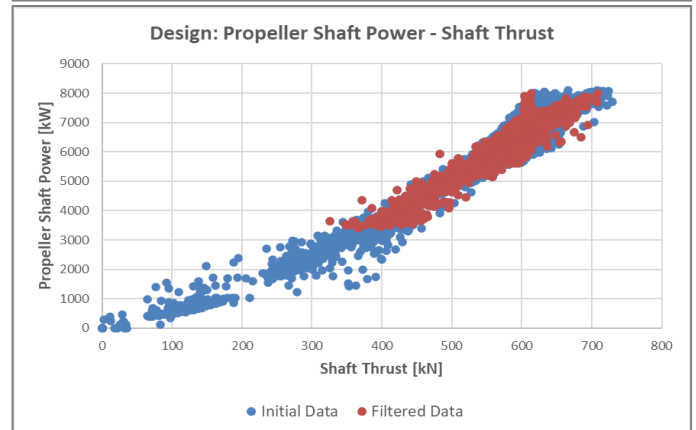
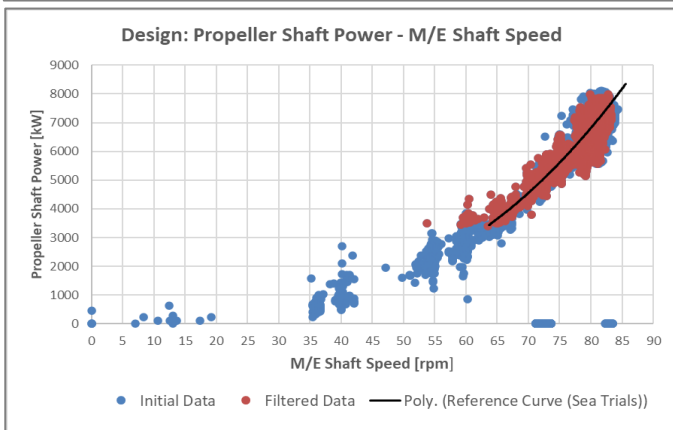
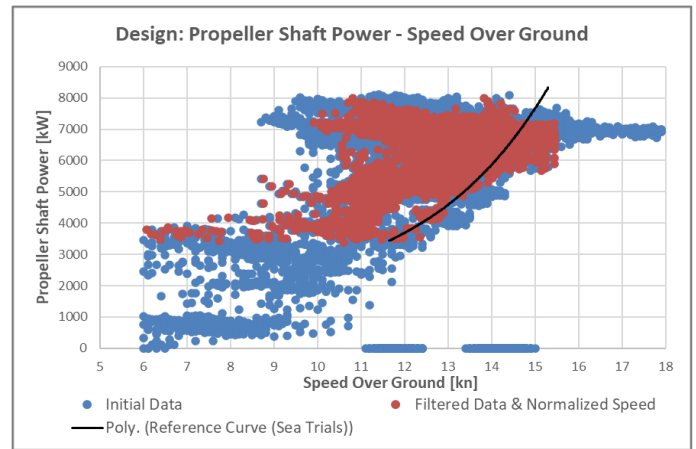
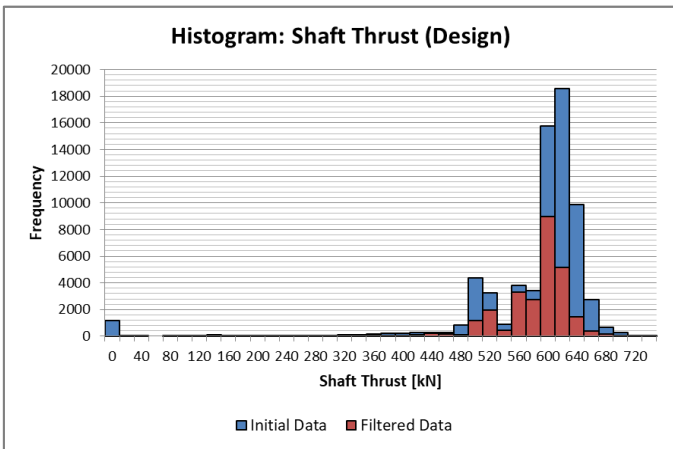
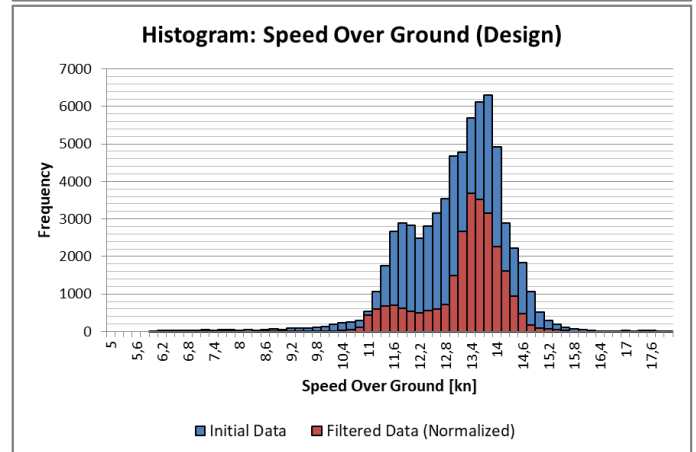
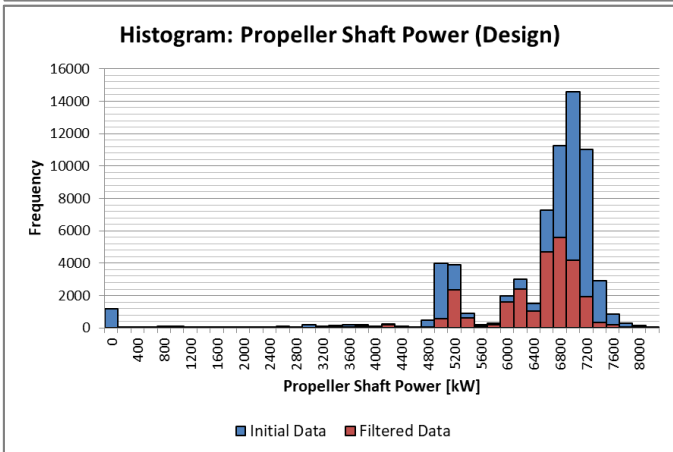
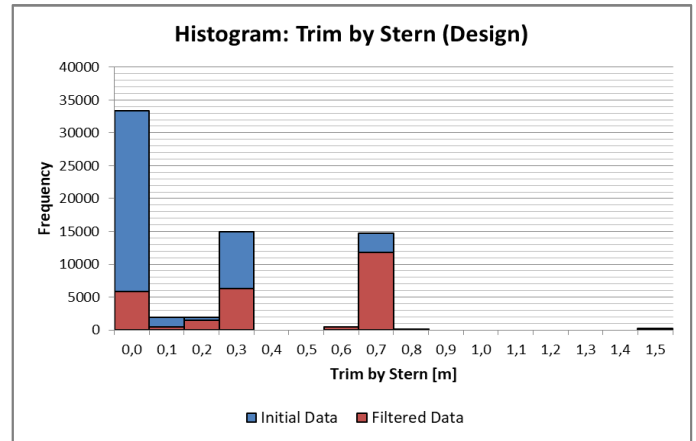
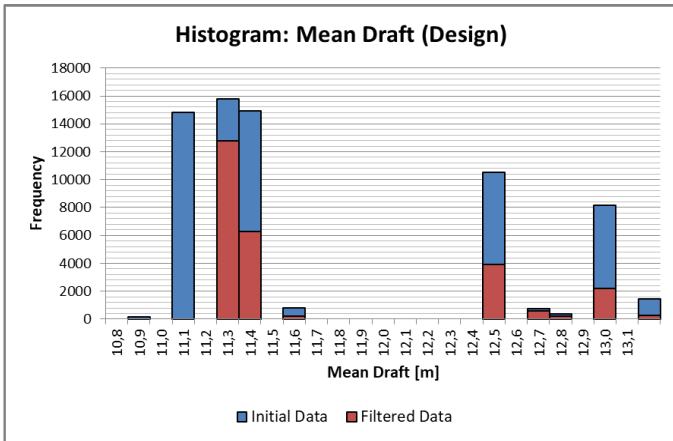
Παρακάτω παρουσιάζονται τα ιστογράμματα των παραμέτρων και τα διαγράμματα συνδυασμών παραμέτρων για όλες τις καταστάσεις φόρτωσης όπου φαίνονται τα δεδομένα που έχουν απομείνει μετά τη διαδικασία του filtering (Filtered Data) με κόκκινο χρώμα σε σχέση με τα αρχικά δεδομένα (Initial Data) με μπλε χρώμα.



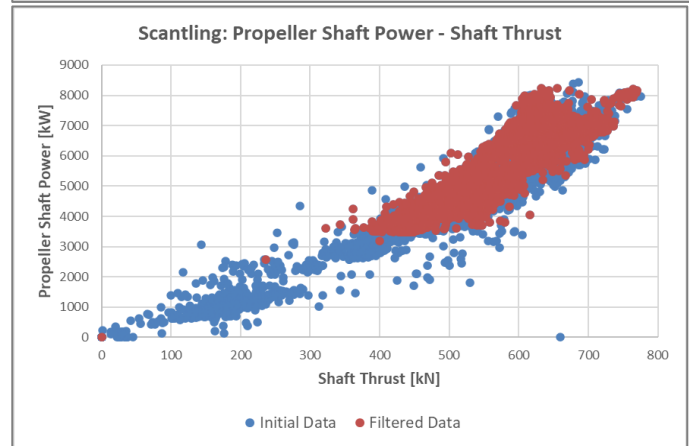
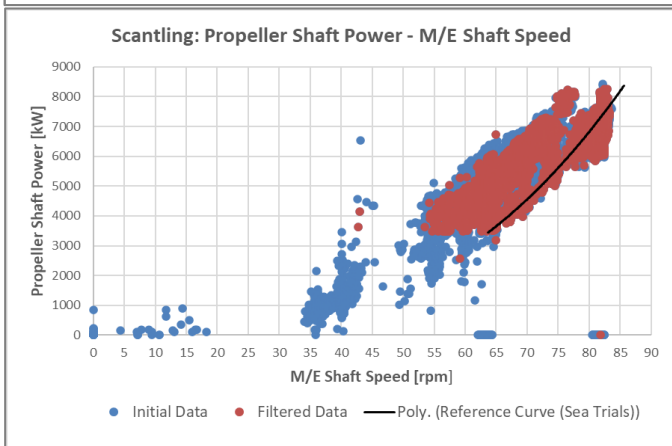
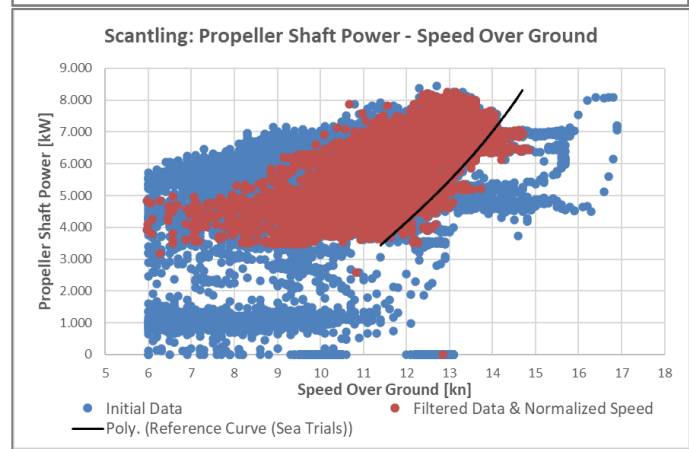
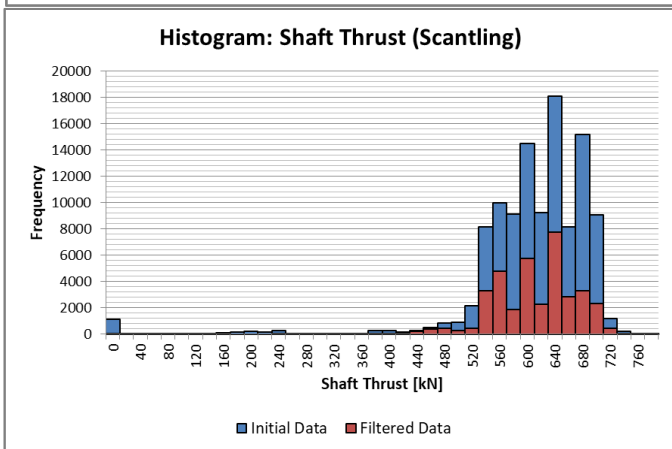
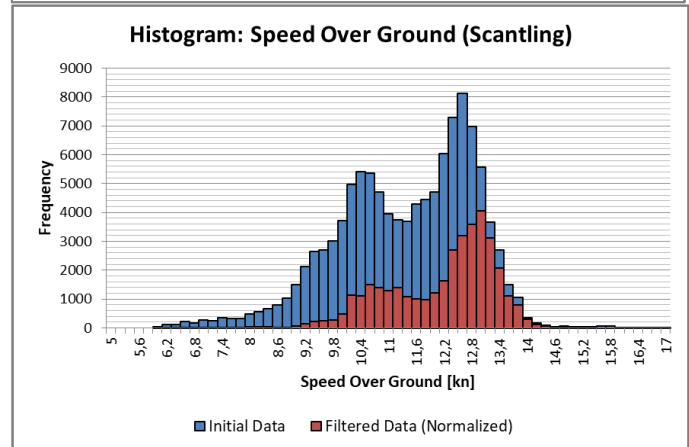
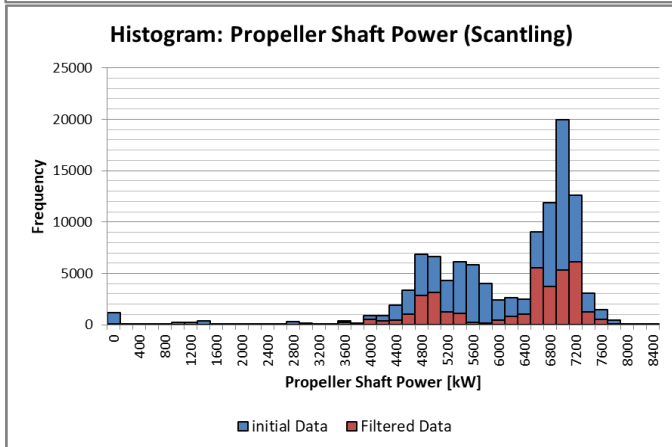
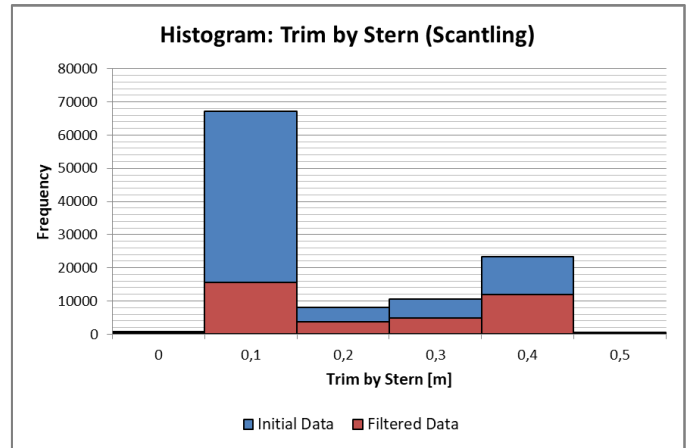
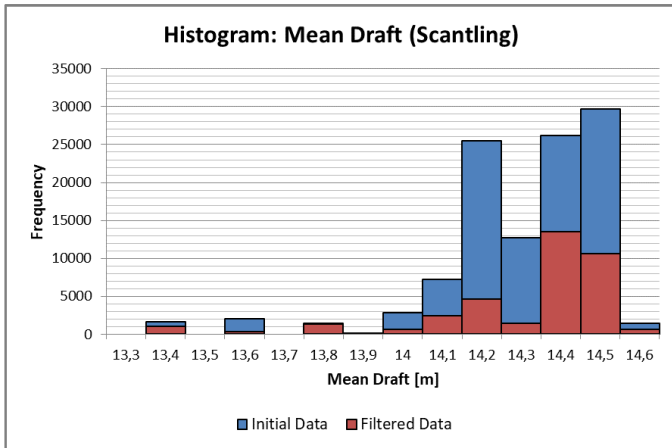
Εικόνα 22: Ιστογράμματα παραμέτρων και διαγράμματα συνδυασμών παραμέτρων του filtered αρχείου για την κατάσταση Normal Ballast. Με κόκκινο χρώμα παρουσιάζονται τα filtered data και με μπλε τα αρχικά



Εικόνα 23: Ιστογράμματα παραμέτρων και διαγράμματα συνδυασμένων παραμέτρων του filtered αρχείου για την κατάσταση Heavy Ballast. Με κόκκινο χρώμα παρουσιάζονται τα filtered data και με μπλε τα αρχικά



Εικόνα 24: Ιστογράμματα παραμέτρων και διαγράμματα συνδυασμών παραμέτρων του filtered αρχείου για την κατάσταση Design. Με κόκκινο χρώμα παρουσιάζονται τα filtered data και με μπλε τα αρχικά



Εικόνα 25: Ιστογράμματα παραμέτρων και διαγράμματα συνδυασμών παραμέτρων του filtered αρχείου για την κατάσταση Scantling. Με κόκκινο χρώμα παρουσιάζονται τα filtered data και με μπλε τα αρχικά

3.6 Στατιστική απαλοιφή μη φυσιολογικών τιμών – Διαδικασία Validation

Στα διαγράμματα των Εικόνων 22, 23, 24, 25, παρατηρούνται μη φυσιολογικές, παρεκτρεπόμενες τιμές (outliers) οι οποίες οφείλονται σε στιγμιαία σφάλματα των αισθητήρων. Οι μη φυσιολογικές τιμές επηρεάζουν την αξιοπιστία των μετέπειτα υπολογισμών για την διεξαγωγή των KPIs και για τον λόγο αυτό είναι σκόπιμο να αφαιρεθούν. Η διαδικασία αφαίρεσης των μη φυσιολογικών τιμών ονομάζεται validation και τα δεδομένα που απομένουν validated data. Η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για την αφαίρεση των μη φυσιολογικών δεδομένων αναλύεται στις παραγράφους που ακολουθούν.

Για τον εντοπισμό των μη φυσιολογικών τιμών κάθε παραμέτρου υπολογίστηκε ο κινητός μέσος όρος ανά δέκα τιμές και στη συνέχεια υπολογίστηκε η απόκλιση κάθε πραγματικής τιμής από αυτόν.

$$D = |y_{i,act} - y_{i,ma}| \leq k \quad (3.6.1)$$

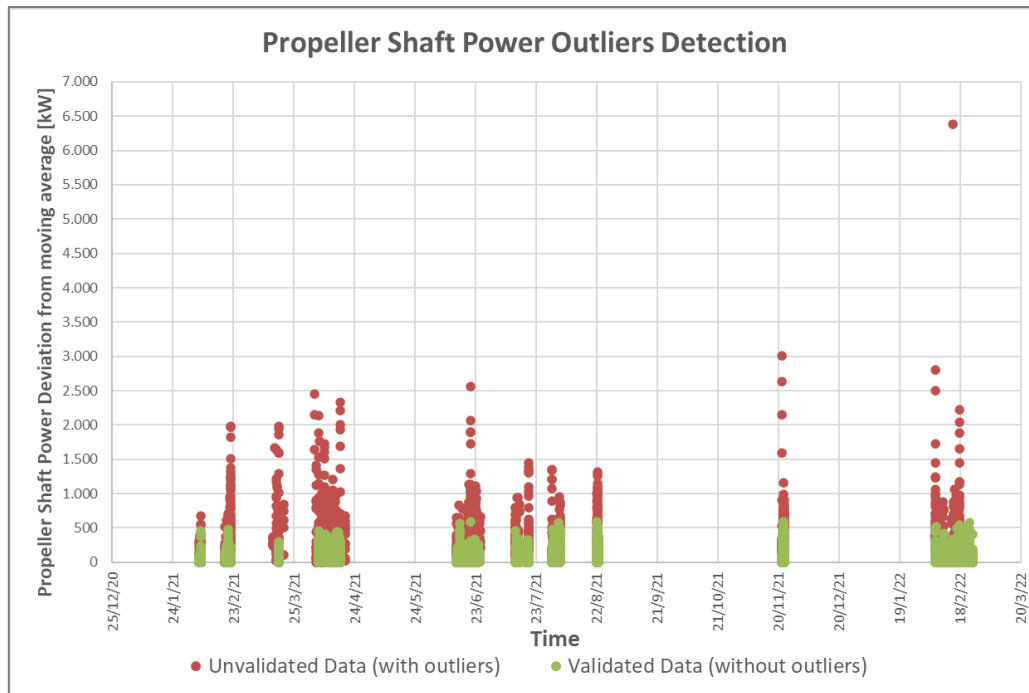
Όπου:

- D : Απόκλιση από τον κινητό μέσο όρο
- $y_{i,act}$: Πραγματική τιμή μιας παραμέτρου για συγκεκριμένη χρονική στιγμή
- $y_{i,ma}$: Τιμή κινητού μέσου όρου (μέση τιμή των 10 προηγούμενων τιμών)
- k : Όριο αποδεκτής απόκλισης πραγματικής τιμής από τον κινητό μέσο όρο

Έπειτα καθορίστηκαν όρια k για την απόκλιση κάθε πραγματικής τιμής από τον κινητό μέσο της αντίστοιχης παραμέτρου άνω των οποίων θεωρήθηκαν μη φυσιολογικές τιμές (outliers) και επομένως αφαιρέθηκαν. Για την εύρεση των κατάλληλων ορίων k δημιουργήθηκαν για κάθε παράμετρο χρονοδιαγράμματα της απόκλισης των πραγματικών τιμών από τον κινητό μέσο (Εικόνα 26). Η αφαίρεση των δεδομένων γίνεται για ολόκληρο το data point δηλαδή για ολόκληρη την σειρά του Excel που περιλαμβάνει μια μη φυσιολογική τιμή. Τα όρια καθορίστηκαν για κάθε κατάσταση φόρτωσης ως εξής:

Πίνακας 31: Όρια αποδεκτών αποκλίσεων των δεδομένων από τον κινητό μέσο όρο

Parameters	Upper limits k for deviation of real values from the moving average			
	Normal Ballast	Heavy Ballast	Design	Scantling
Speed Over Ground [kn]	0,4	0,4	0,4	0,4
Speed Through Water [kn]	0,5	0,6	0,6	0,6
Propeller Shaft Power [kW]	400	500	600	600
M/E Shaft Speed [rpm]	1,5	2	2	3
M/E %MCR	4	4	6	6
Shaft Torque [kNm]	30	40	50	80
Shaft Thrust [kN]	20	30	35	60
P/N ³ [kW/rpm ³]	0,0006	0,0007	0,0007	0,001
P/SOG ³ [kW/kn ³]	0,2	0,2	0,2	0,2
P/STW ³ [kW/kn ³]	0,25	0,25	0,25	0,25



Εικόνα 26: Χρονοδιάγραμμα απόκλισης δεδομένων ισχύος από τον κινητό μέσο όρο. Με κόκκινο παρουσιάζονται τα δεδομένα που περιλαμβάνουν μη φυσιολογικές τιμές και με πράσινο τα δεδομένα αυτά από τα οποία έχουν αφαιρεθεί

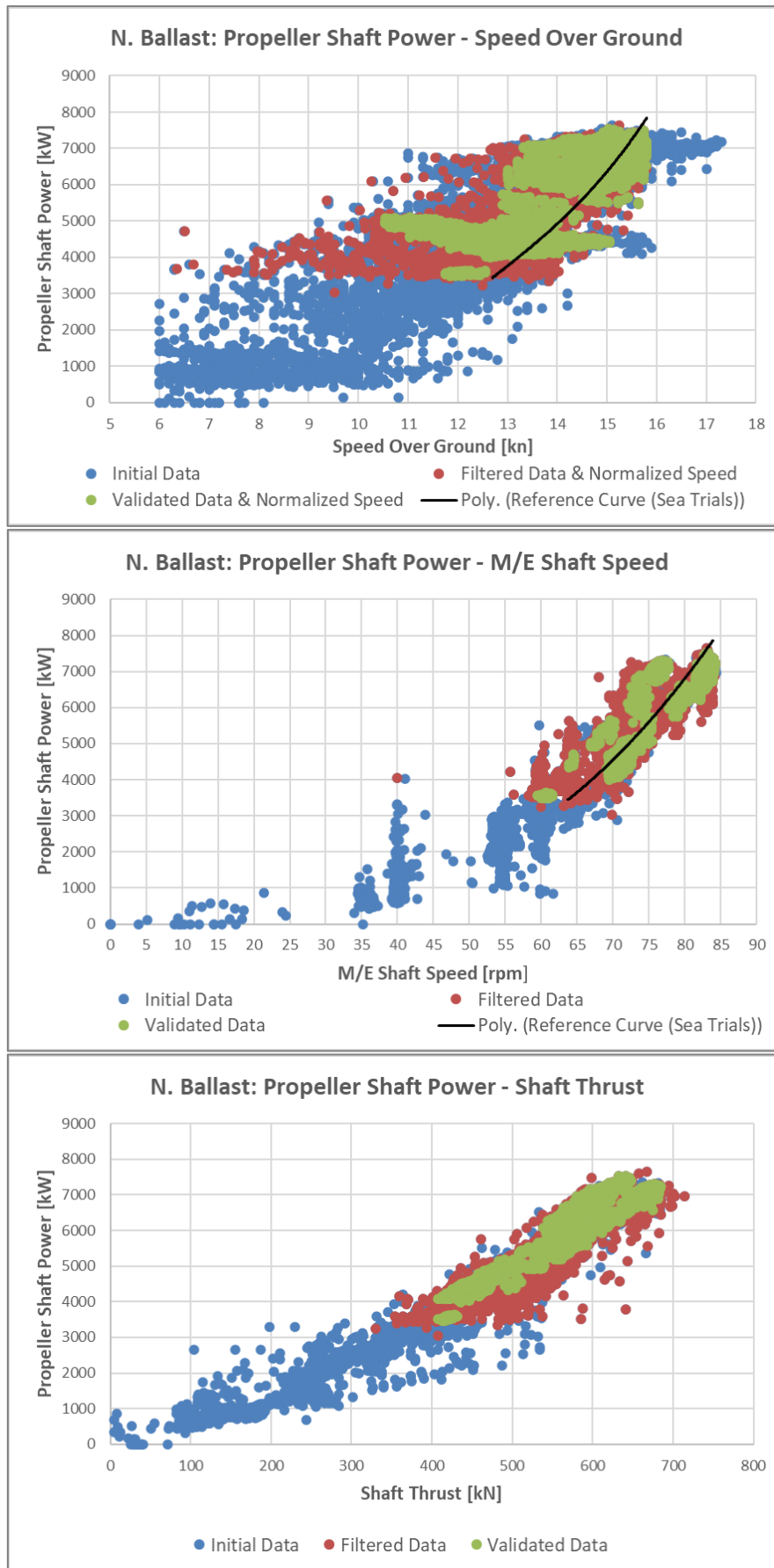
Με τη μεθοδολογία αυτή, πέραν της αφαίρεσης των μη φυσιολογικών τιμών (outliers) γίνεται αφαίρεση των δεδομένων για χρονικές περιόδους κατά τις οποίες παρατηρούνται μεγάλες μεταβολές στις τιμές των παραμέτρων (π.χ. επιτάχυνση του πλοίου, απότομη αύξηση της ισχύος και της περιστροφής της έλικας κ.λπ.). Έτσι, παραμένουν τα δεδομένα στα οποία δεν παρατηρούνται μεγάλες μεταβολές στις μετρούμενες παραμέτρους και επομένως βελτιώνεται η αξιοπιστία των υπολογισμών των δεικτών αξιολόγησης της απόδοσης KPIs.

Στον Πίνακα 32 παρατηρούμε ότι το ποσοστό των outliers στα filtered δεδομένα είναι 20%. Τελικά, τα δεδομένα που απομένουν έπειτα από τη διαδικασία filtering είναι 40% και έπειτα από τη διαδικασία validation στα filtered δεδομένα είναι 32%.

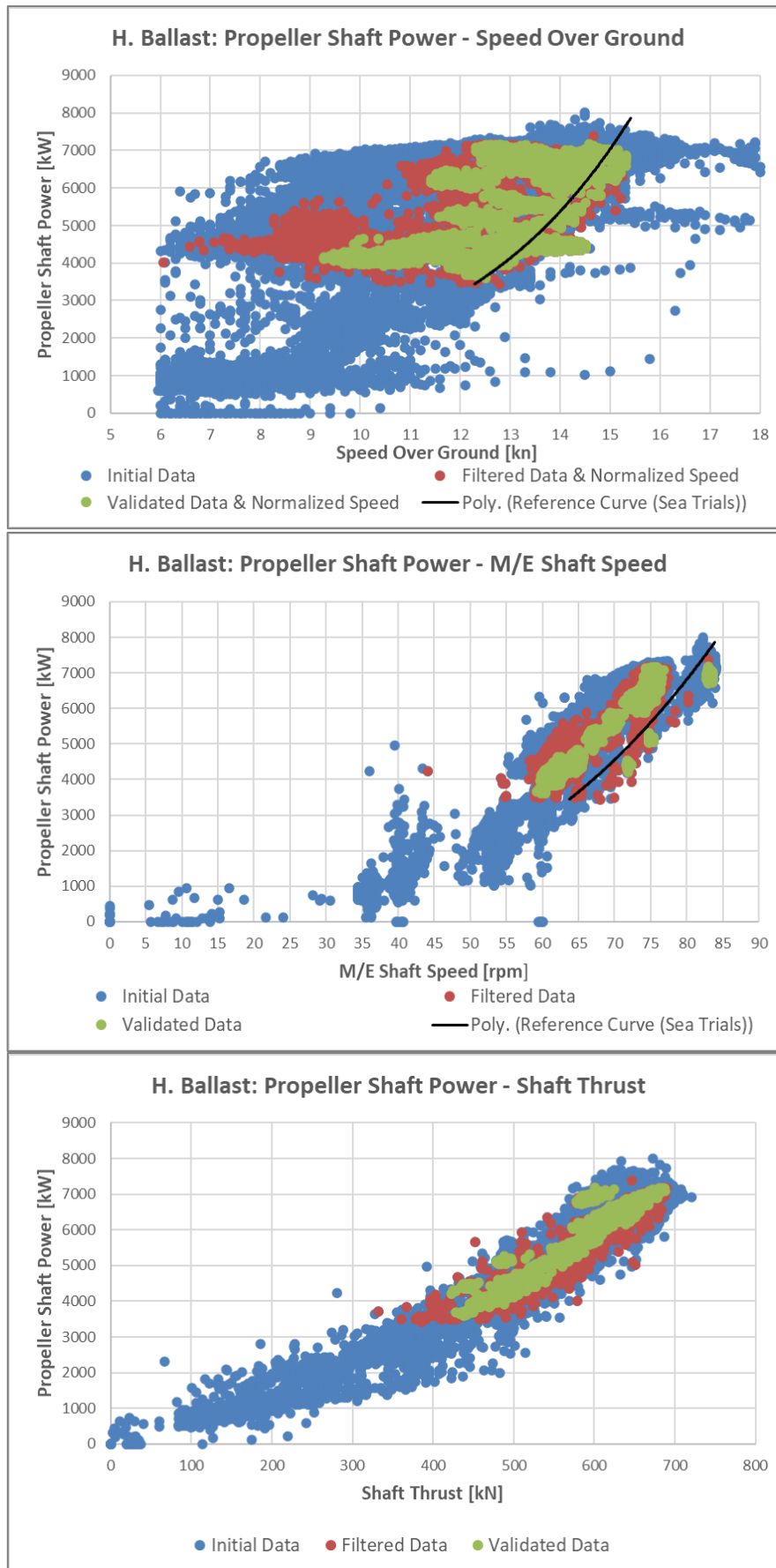
Πίνακας 32: Ποσοστά μη φυσιολογικών τιμών και εναπομεινέντων δεδομένων μετά τις διαδικασίες filtering και validation

	Excluded Outliers Percentages			
	Normal Ballast	Heavy Ballast	Design	Scantling
	14%	27%	13%	24%
Total Outliers	20%			
Remaining Data after Filtering	40%			
Remaining Data after Filtering & Validation	32%			

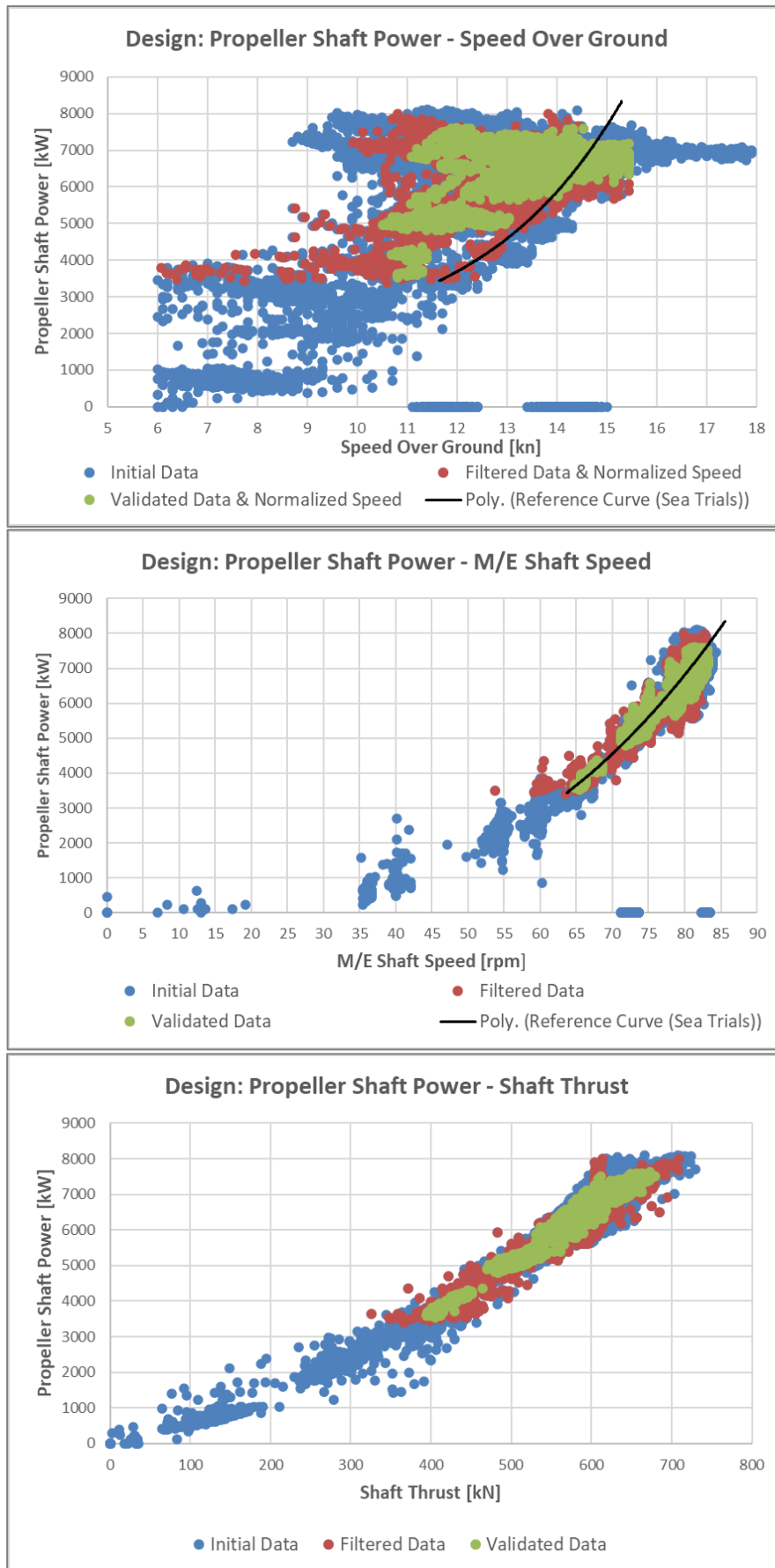
Παρακάτω παρουσιάζονται διαγράμματα συνδυασμών παραμέτρων για όλες τις καταστάσεις φόρτωσης στα οποία φαίνονται όλα τα στάδια επεξεργασίας των δεδομένων.



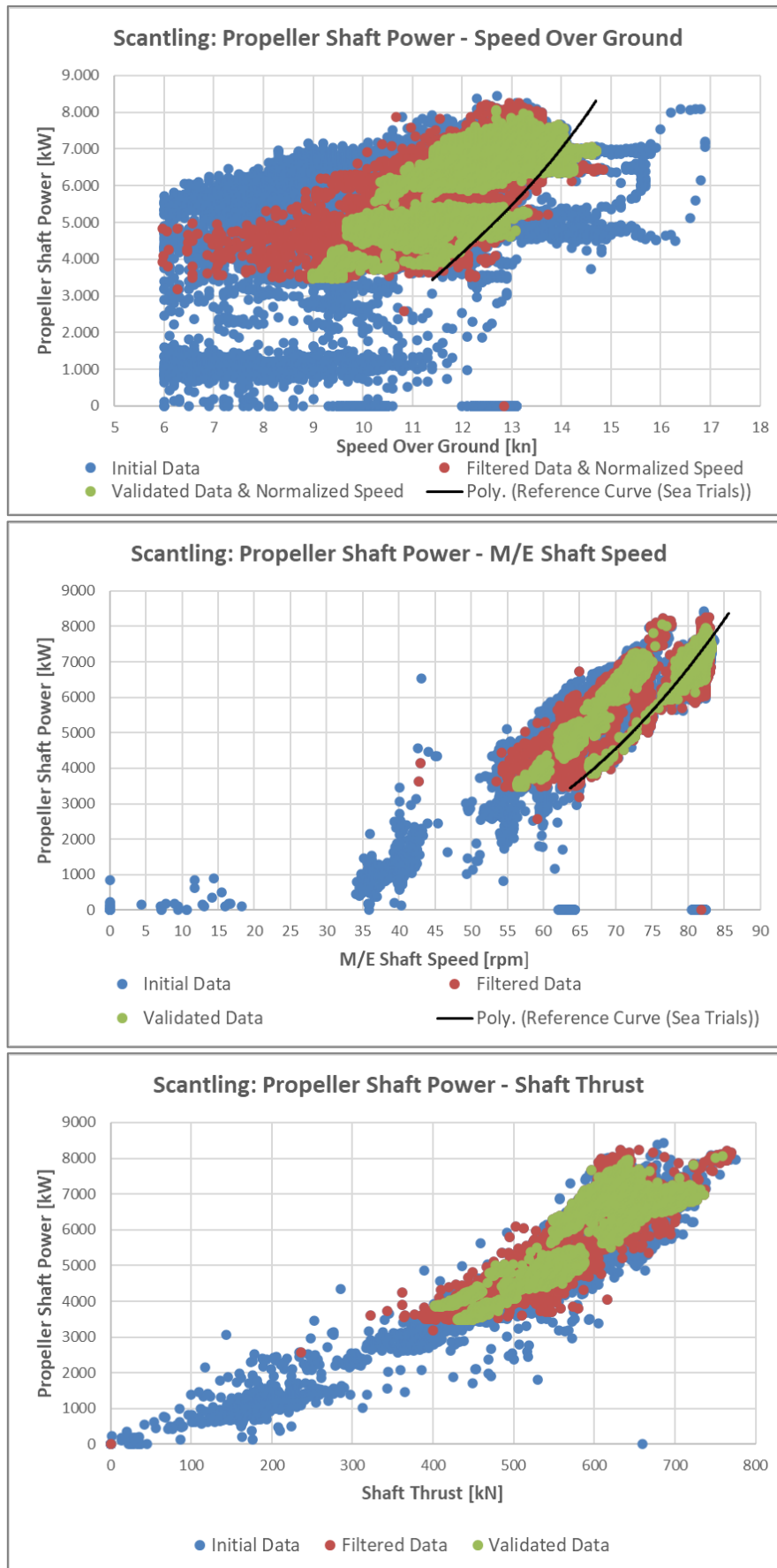
Εικόνα 27: Ιστογράμματα παραμέτρων και διαγράμματα συνδυασμών παραμέτρων του filtered αρχείου για την κατάσταση Normal Ballast.. Με πράσινο χρώμα παρουσιάζονται τα validated data, με κόκκινα τα filtered data και με μπλε τα αρχικά



Εικόνα 28: Ιστογράμματα παραμέτρων και διαγράμματα συνδυασμών παραμέτρων του filtered αρχείου για την κατάσταση Heavy Ballast. Με πράσινο χρώμα παρουσιάζονται τα validated data, με κόκκινο τα filtered data και με μπλε τα αρχικά



Εικόνα 29: Ιστογράμματα παραμέτρων και διαγράμματα συνδυασμένων παραμέτρων του filtered αρχείου για την κατάσταση Design. Με πράσινο χρώμα παρουσιάζονται τα validated data, με κόκκινο τα filtered data και με μπλε τα αρχικά



Εικόνα 30: Ιστογράμματα παραμέτρων και διαγράμματα συνδυασμών παραμέτρων του filtered αρχείου για την κατάσταση Scantling. Με πράσινο χρώμα παρουσιάζονται τα validated data, με κόκκινο τα filtered data και με μπλε τα αρχικά

4. Πρόσθετες αντιστάσεις

Κατά την πλεύση του πλοίου ασκούνται σε αυτό πρόσθετες δυνάμεις αντίστασης από το περιβάλλον του οι οποίες διαμορφώνουν τελικά την αποδιδόμενη ισχύ στην έλικα και την ταχύτητά του. Όπως και κατά τη διαδικασία των Sea Trials από τα οποία έχουν αντληθεί τα δεδομένα αναφοράς, έτσι και για τα επιχειρησιακά δεδομένα οφείλεται να γίνουν διορθώσεις της ισχύος για τις πρόσθετες αντιστάσεις που ασκούνται από το περιβάλλον του. Στην εργασία αυτή, γίνεται διόρθωση της ισχύος για την πρόσθετη αντίσταση που επιφέρει ο άνεμος καθώς και αυτής που επιφέρουν οι θαλάσσιοι ανεμογενείς κυματισμοί σύμφωνα με τις προτεινόμενες διαδικασίες της ITTC (2017) και του προτύπου ISO 19030 (ISO, 2015). Επιπλέον, εφόσον παρατηρήθηκε ότι το πλοίο στο χρονικό διάστημα που μελετάται βρίσκεται τόσο σε κρύα όσο και σε ζεστά νερά (από 0 °C έως και 35 °C), έγινε διόρθωση της ισχύος για τις πρόσθετες αντιστάσεις λόγω της απόκλισης της θερμοκρασίας της θάλασσας από αυτή της κατάστασης αναφοράς (15 °C), σύμφωνα με την ITTC (2017). Οι μεθοδολογίες είναι εφαρμόσιμες για ένα συγκεκριμένο όριο τιμών ταχύτητας ανέμου, ύψους κύματος και θερμοκρασίας θάλασσας και επομένως δεδομένα άνω αυτών των ορίων διαγράφηκαν κατά τη διαδικασία filtering που αναλύθηκε στην υπο-ενότητα 3.5. Με τις εν λόγω διορθώσεις, τα επιχειρησιακά δεδομένα αποκτούν παρόμοια επεξεργασία με τα δεδομένα αναφοράς από τα Sea Trials καθιστώντας τη χρήση των δύο για τον υπολογισμό των δεικτών απόδοσης της αξιολόγησης KPIs πιο αξιόπιστη.

4.1 Πρόσθετη αντίσταση ανέμου

Οι τιμές της αποδιδόμενης ισχύος (Propeller Shaft Power) διορθώνονται για να ληφθεί υπόψη η πρόσθετη αντίσταση λόγω ανέμου. Η διόρθωση είναι απαραίτητη έτσι ώστε να εξαιρεθεί η πρόσθετη ισχύς που απαιτείται για την επίτευξη μιας δεδομένης ταχύτητας πλοίου σε δεδομένες συνθήκες ανέμου. Η διόρθωση για την αντίσταση ανέμου γίνεται σύμφωνα με τις προτεινόμενες διαδικασίες της ITTC (2017) και του προτύπου ISO 19030 (ISO,2015).

4.1.1 Υπολογισμός φαινόμενης ταχύτητας και διεύθυνσης ανέμου στο ύψος αναφοράς

Αρχικά, εφόσον τα δεδομένα που διατίθενται είναι για τον φαινόμενο άνεμο και όχι για τον πραγματικό, υπολογίζεται η πραγματική ταχύτητα ανέμου v_{wt} [m/s] και η πραγματική διεύθυνση ψ_{wt} [deg] ανέμου στο ύψος του ανεμομέτρου ως εξής:

$$v_{wt} = \sqrt{v_{wr}^2 + v_g^2 - 2 \cdot v_{wr} \cdot v_g \cdot \cos(\psi_{wr})} \quad (4.1.1)$$

$$\psi_{wt} = \tan^{-1} \left\{ \frac{v_{wr} \cdot \sin(\psi_{wr} + \psi_0) - v_g \cdot \sin(\psi_0)}{v_{wr} \cdot \cos(\psi_{wr} + \psi_0) - v_g \cdot \cos(\psi_0)} \right\} \quad (4.1.2)$$

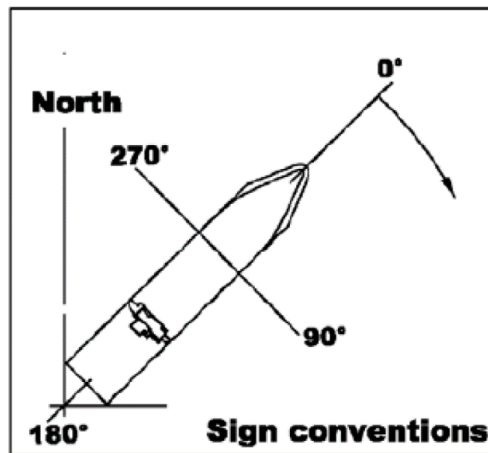
$$\text{για } v_{wr} \cdot \cos(\psi_{wr} + \psi_0) - v_g \cdot \cos(\psi_0) \geq 0$$

$$\psi_{wt} = \tan^{-1} \left\{ \frac{v_{wr} \cdot \sin(\psi_{wr} + \psi_0) - v_g \cdot \sin(\psi_0)}{v_{wr} \cdot \cos(\psi_{wr} + \psi_0) - v_g \cdot \cos(\psi_0)} \right\} + 180 \quad (4.1.3)$$

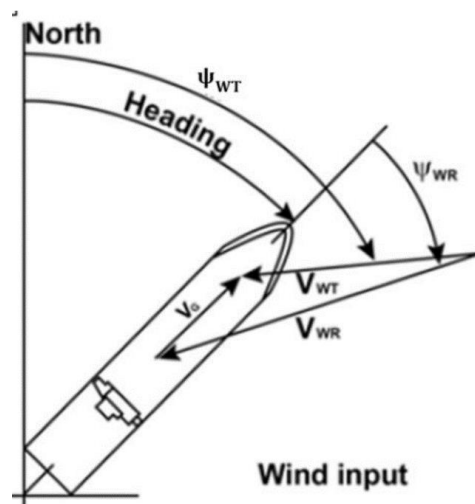
$$\text{για } v_{wr} \cdot \cos(\psi_{wr} + \psi_0) - v_g \cdot \cos(\psi_0) < 0$$

Όπου:

- v_{wt} [m/s]: Πραγματική ταχύτητα ανέμου στο ύψος του ανεμομέτρου
- v_{wr} [m/s]: Φαινόμενη ταχύτητα ανέμου στο ύψος του ανεμομέτρου
- v_g [m/s]: Ταχύτητα του πλοίου ως προς το έδαφος
- ψ_{wt} [deg]: Πραγματική διεύθυνση του ανέμου στο ύψος του ανεμομέτρου
- ψ_{wr} [deg]: Φαινόμενη διεύθυνση του ανέμου στο ύψος του ανεμομέτρου
- ψ_0 [deg]: Κατεύθυνση του πλοίου



Εικόνα 31: Σύμβαση της κατεύθυνσης του πλοίου κατά ISO 19030



Εικόνα 32: Σύμβαση διανυσμάτων ταχύτητας και γωνιών πρόπτωσης φαινομένου και πραγματικού ανέμου κατά ISO 19030

Ο υπολογισμός της αντίστασης γίνεται με την φαινόμενη ταχύτητα και διεύθυνση του ανέμου στο ύψος αναφοράς στο οποίο υπολογίζεται ο συντελεστής αντίστασης ανέμου (υπο-ενότητα 4.1.2). Έτσι, τα μεγέθη πρέπει να διορθωθούν για αυτό το ύψος το οποίο βρίσκεται στα 10 μέτρα από το βασικό επίπεδο αναφοράς. Οι διορθώσεις έχουν ως εξής:

$$v_{wt,ref} = v_{wt} \cdot \left(\frac{Z_{ref}}{Z_a} \right)^{\frac{1}{7}} \quad (4.1.4)$$

Όπου:

$v_{wt,ref}$	[m/s]:	Πραγματική ταχύτητα ανέμου στο ύψος αναφοράς
Z_{ref}	[m]:	Ύψος αναφοράς άνω της επιφάνειας ισάλου πραγματικής κατάστασης
Z_a	[m]:	Ύψος ανεμομέτρου άνω της επιφάνειας ισάλου πραγματικής κατάστασης

Το ύψος αναφοράς άνω της επιφάνειας ισάλου Z_{ref} καθώς και το ύψος του ανεμομέτρου Z_a προσδιορίζονται από τις παρακάτω σχέσεις:

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

$$Z_a = Z_{a,ref} + \Delta T$$

Με:

$$\Delta T = T_{ref} - T$$

$$A = A_{ref} + \Delta T \cdot B$$

Όπου:

$Z_{ref,ref}$	[m]:	Ύψος αναφοράς άνω της επιφάνειας ισάλου κατάστασης αναφοράς
$Z_{a,ref}$	[m]:	Ύψος ανεμομέτρου άνω της επιφάνειας ισάλου κατάστασης αναφοράς
A	[m ²]:	Εγκάρσια προβεβλημένη επιφάνεια πραγματικής κατάστασης
A_{ref}	[m ²]:	Εγκάρσια προβεβλημένη επιφάνεια κατάστασης αναφοράς
B	[m]:	Πλάτος πλοίου
ΔT	[m]:	Διαφορά μεταξύ βυθίσματος σχεδίασης και πραγματικού μετρούμενου βυθίσματος

Τελικά, η φαινόμενη ταχύτητα και διεύθυνση αναφοράς στο ύψος του ανεμομέτρου υπολογίζονται με τις παρακάτω σχέσεις:

$$v_{wr,ref} = \sqrt{v_{wt,ref}^2 + v_g^2 - 2 \cdot v_{wt,ref} \cdot v_g \cdot \cos(\psi_{wt} - \psi_0)} \quad (4.1.5)$$

$$\psi_{wr,ref} = \tan^{-1} \left\{ \frac{v_{wt,ref} \cdot \sin(\psi_{wt} - \psi_0)}{v_g + v_{wt,ref} \cdot \cos(\psi_{wt} - \psi_0)} \right\} \quad (4.1.6)$$

$$\text{για } v_g + v_{wt,ref} \cdot \cos(\psi_{wt} - \psi_0) \geq 0$$

$$\psi_{wr,ref} = \tan^{-1} \left\{ \frac{v_{wt,ref} \cdot \sin(\psi_{wt} - \psi_0)}{v_g + v_{wt,ref} \cdot \cos(\psi_{wt} - \psi_0)} \right\} + 180 \quad (4.1.7)$$

$$\text{για } v_g + v_{wt,ref} \cdot \cos(\psi_{wt} - \psi_0) < 0$$

Όπου:

$v_{wr,ref}$ [m/s]: Φαινόμενη ταχύτητα ανέμου στο ύψος αναφοράς

$\psi_{wr,ref}$ [deg]: Φαινόμενη διεύθυνση ανέμου στο ύψος αναφοράς

4.1.2 Συντελεστής αντίστασης ανέμου – Μέθοδος Fujiwara

Σύμφωνα με την ITTC (2017) εάν είναι διαθέσιμα δεδομένα για τον συντελεστή αντίστασης ανέμου C_{rw} από δοκιμές αντίστασης ανέμου σε πιστοποιημένη αεροσήραγγα (wind tunnel) τότε οφείλεται να ληφθούν από εκεί τα δεδομένα του συντελεστή C_{rw} . Στην παρούσα εργασία δεν ήταν διαθέσιμα τα δεδομένα αυτά οπότε ο συντελεστής αντίστασης ανέμου C_{rw} υπολογίστηκε με τη μέθοδο παλινδρόμησης Fujiwara που προτείνεται στην ITTC (2017).

Η μέθοδος παλινδρόμησης Fujiwara είναι μια γενικευμένη μέθοδος βασισμένη σε model tests σε αεροσήραγγες για διάφορα πλοία. Παρακάτω παρατίθενται οι μαθηματικοί τύποι που χρησιμοποιούνται στη μεθοδολογία αυτή για την εύρεση του συντελεστή.

$$C_{rw} = C_{LF} \cdot \cos(\psi_{WR}) + C_{XLI} \cdot \left[\sin(\psi_{WR}) - \frac{1}{2} \cdot \sin(\psi_{WR}) \cdot \cos^2(\psi_{WR}) \right] \cdot \sin(\psi_{WR}) \\ \cdot \cos(\psi_{WR}) + C_{ALF} \cdot \sin(\psi_{WR}) \cdot \cos^3(\psi_{WR})$$

Με:

Για $0 \leq \psi_{WR} < 90$ [deg]

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

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

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

Για $90 < \psi_{WR} \leq 180$ [deg]

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

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

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

Για $\psi_{WR} = 90 [deg]$

$$C_{rw} = \frac{1}{2} \cdot (C_{wr\psi_{WR}=90[deg]-\mu} + C_{wr\psi_{WR}=90[deg]+\mu})$$

Όπου:

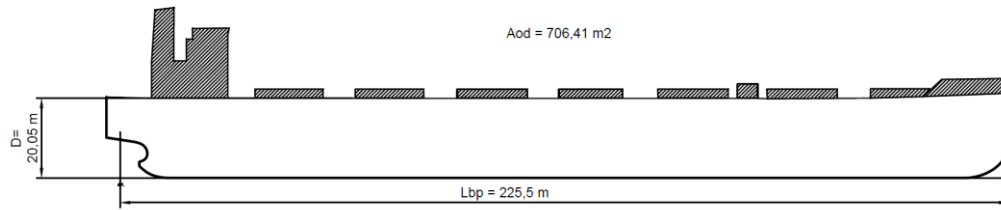
- A_{OD} [m²): Εμβαδόν πλευρικής προβεβλημένης επιφάνειας υπερκατασκευών του κύριου καταστρώματος
- A_{XV} [m²): Εμβαδόν εγκάρσιας προβεβλημένης επιφάνειας άνω της γραμμής ισάλου
- A_{YV} [m²): Εμβαδόν πλευρικής προβεβλημένης επιφάνειας άνω της γραμμής ισάλου
- B [m]: Πλάτος πλοίου
- C_{wr} [-]: Συντελεστής αντίστασης ανέμου
- C_{MC} [m]: Οριζόντια απόσταση του κέντρου επιφάνειας A_{YV} από το μέσον του πλοίου
- h_{BR} [m]: Μέγιστο ύψος υπερκατασκευών
- h_C [m]: Κατακόρυφη απόσταση κέντρου επιφάνειας A_{YV} από την ίσαλο γραμμή
- L_{OA} [m]: Ολικό μήκος πλοίου
- μ [deg]: Εύρος εξομάλυνσης, συνήθως 10 [deg]
- ψ_{WR} [deg]: Φαινόμενη διεύθυνση ανέμου, 0 [deg] για μετωπικούς κυματισμούς

Οι αδιάστατες παράμετροι β_{ij} , δ_{ij} και ε_{ij} που χρησιμοποιούνται στις παραπάνω σχέσεις παρατίθενται στον Πίνακα 33.

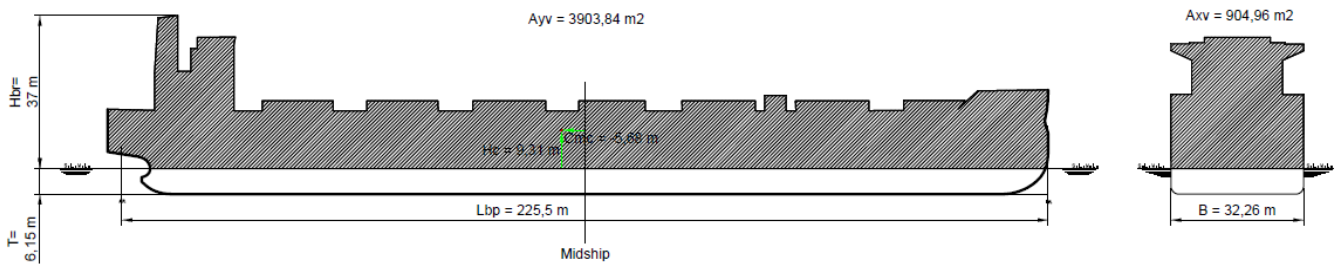
Πίνακας 33: Αδιάστατες παράμετροι β_{ij} , δ_{ij} και ε_{ij}

Table F-2 Non-dimensional parameters						
	i	j				
		0	1	2	3	4
β_{ij}	1	0,922	-0,507	-1,162	-	-
	2	-0,018	5,091	-10,367	3,011	0,341
δ_{ij}	1	-0,458	-3,245	2,313	-	-
	2	1,901	-12,727	-24,407	40,31	5,481
ε_{ij}	1	0,585	0,906	-3,239	-	-
	2	0,314	1,117	-	-	-

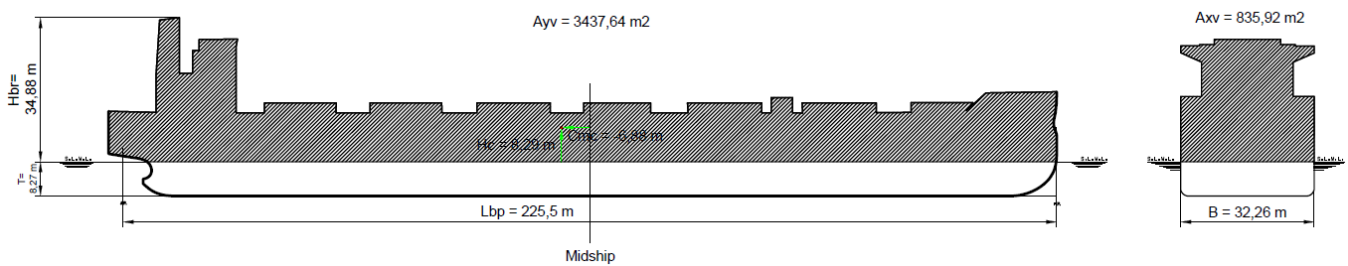
Για τον υπολογισμό των επιφανειών και των κέντρων τους από το σχέδιο γενικής διάταξης του υπό μελέτη πλοίου έγινε χρήση του σχεδιαστικού προγράμματος AutoCad. Τα αποτελέσματα για κάθε κατάσταση φόρτωσης φαίνονται στις Εικόνες 33 -37.



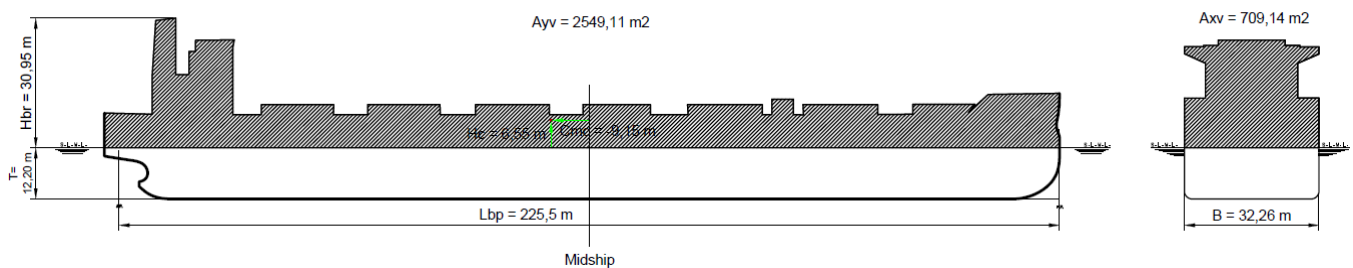
Εικόνα 33: Εμβαδόν πλευρικής προβεβλημένης επιφάνειας υπερκατασκευών του κύριου καταστρώματος (A_{OD})



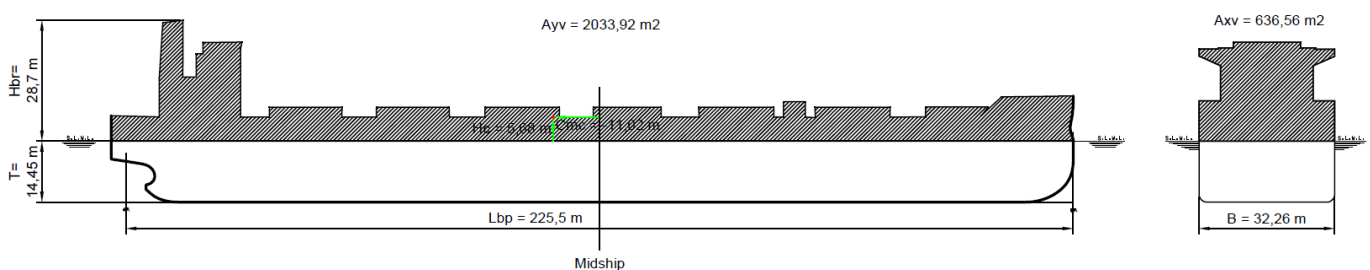
Εικόνα 34: Εμβαδόν και κέντρο πλευρικής προβεβλημένης επιφάνειας άνω της γραμμής ισάλου (A_{YV}) και εμβαδόν εγκάρσιας προβεβλημένης επιφάνειας άνω της γραμμής ισάλου (A_{XV}) για την κατάσταση φόρτωσης Normal Ballast



Εικόνα 35: Εμβαδόν και κέντρο πλευρικής προβεβλημένης επιφάνειας άνω της γραμμής ισάλου (A_{YV}) και εμβαδόν εγκάρσιας προβεβλημένης επιφάνειας άνω της γραμμής ισάλου (A_{XV}) για την κατάσταση φόρτωσης Heavy Ballast

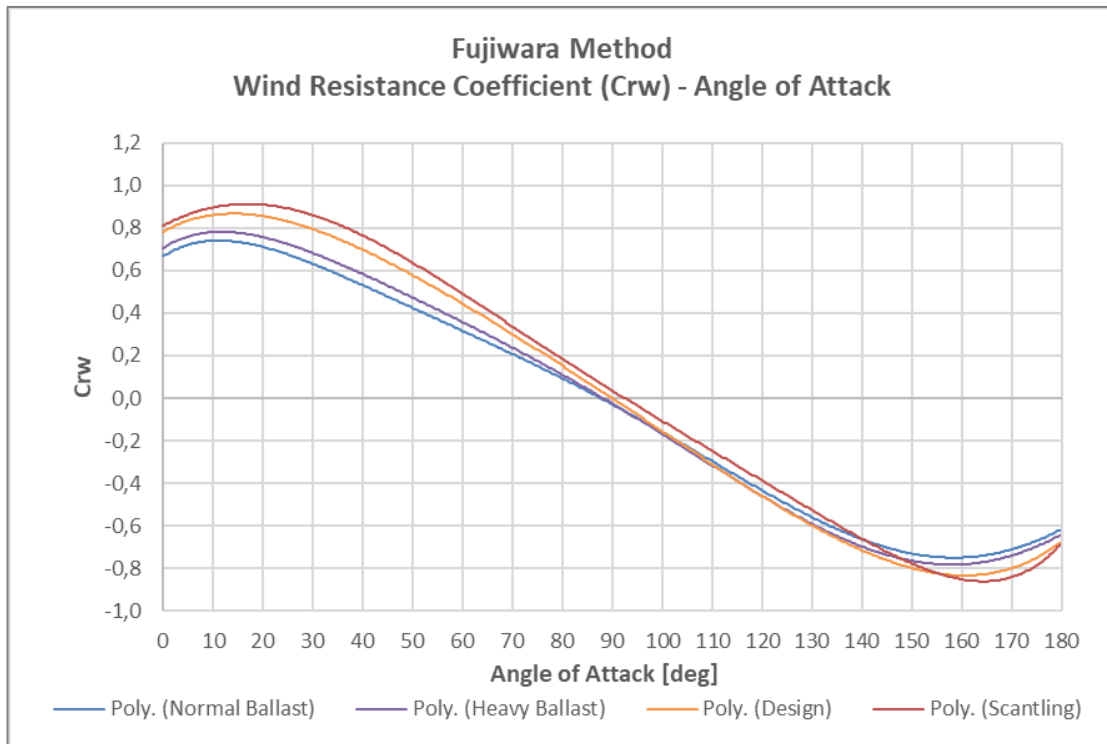


Εικόνα 36: Εμβαδόν και κέντρο πλευρικής προβεβλημένης επιφάνειας άνω της γραμμής ισάλου (A_{YV}) και εμβαδόν εγκάρσιας προβεβλημένης επιφάνειας άνω της γραμμής ισάλου (A_{XV}) για την κατάσταση φόρτωσης Design



Εικόνα 37: Εμβαδόν και κέντρο πλευρικής προβεβλημένης επιφάνειας άνω της γραμμής ισάλου (A_{YV}) και εμβαδόν εγκάρσιας προβεβλημένης επιφάνειας άνω της γραμμής ισάλου (A_{XV}) για την κατάσταση φόρτωσης Scantling

Στην Εικόνα 38 παρουσιάζεται το διάγραμμα με τα αποτελέσματα της μεθόδου Fujiwara για τον συντελεστή αντίστασης ανέμου C_{rw} για γωνίες φαινόμενου ανέμου (στο ύψος αναφοράς, στα 10 m) $0 \leq \psi_{WR} < 180 [deg]$ για όλες τις καταστάσεις φόρτωσης.



Εικόνα 38: Διάγραμμα συντελεστή αντίστασης ανέμου C_{rw} συναρτήσει της φαινόμενης γωνίας του ανέμου

4.1.3 Υπολογισμός πρόσθετης αντίστασης ανέμου

Τελικά, η πρόσθετη αντίσταση ανέμου R_{wind} υπολογίζεται αφαιρώντας από την αντίσταση λόγω της φαινόμενης ταχύτητας του ανέμου R_{rw} την αντίσταση ανέμου σε κατάσταση χωρίς άνεμο R_{0w} ως εξής:

$$R_{wind} = R_{rw} - R_{0w}$$

Με:

$$R_{rw} = \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot v_{wr,ref}^2 \cdot A \cdot C_{rw}(\psi_{wr,ref})$$

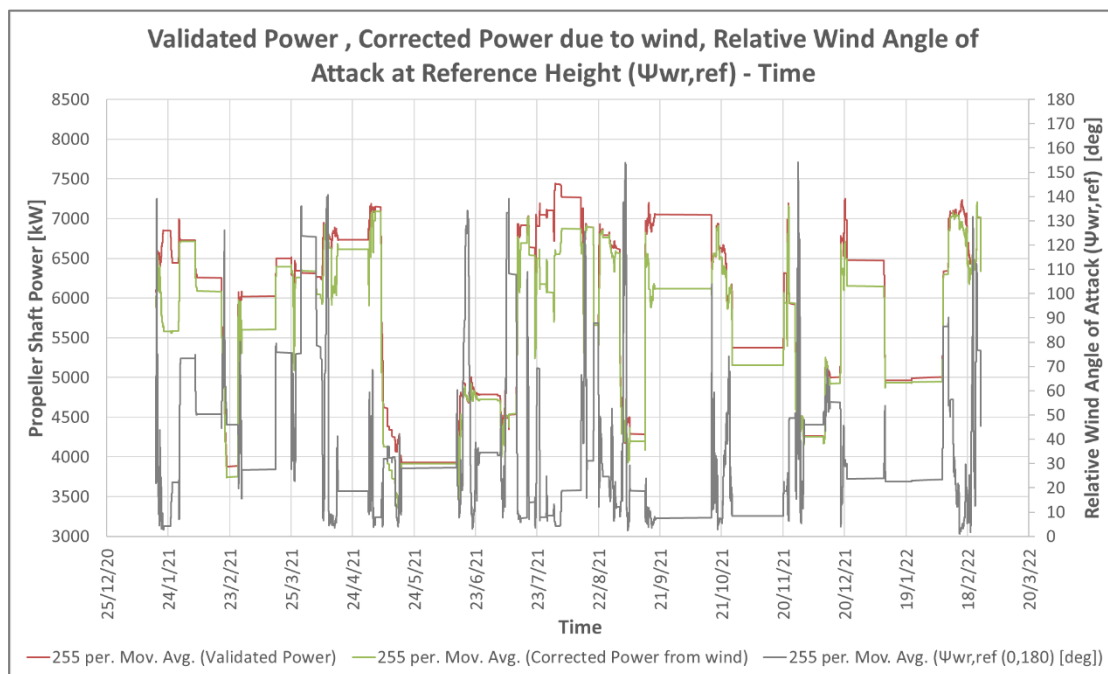
$$R_{0w} = \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot v_g^2 \cdot A \cdot C_{0w}(0)$$

Όπου:

R_{rw}	[N]:	Αντίσταση λόγω του φαινόμενου ανέμου
R_{0w}	[N]:	Αντίσταση ανέμου σε κατάσταση χωρίς άνεμο
v_g	[m/s]:	Ταχύτητα του πλοίου ως προς το έδαφος
$v_{wr,ref}$	[m/s]:	Φαινόμενη ταχύτητα του ανέμου στο ύψος αναφοράς

C_{rw}	[-]:	Συντελεστής αντίστασης ανέμου εξαρτώμενος από τη φαινόμενη διεύθυνσή του $\psi_{wr,ref}$
C_{0w}	[-]:	Συντελεστής αντίστασης ανέμου σε μετωπικό άνεμο [0 deg]
ρ_a	[kg/m ³]:	Πυκνότητα αέρα
A	[m ²]:	Εμβαδόν εγκάρσιας προβεβλημένης επιφάνειας

Στην *Εικόνα 39* παρουσιάζεται το χρονοδιάγραμμα με την αρχική ισχύ (validated, με κόκκινο), τη διορθωμένη ισχύ από τον άνεμο (corrected from wind με πράσινο), τη φαινόμενη διεύθυνση του ανέμου $\psi_{wr,ref}$ που δέχεται το πλοίο (με γκρι). Μπορεί να παρατηρηθεί ότι η διορθωμένη ισχύς είναι μικρότερη από την αρχική για γωνίες $0 \leq \psi_{WR,ref} < 90 [deg]$, δηλαδή το πλοίο αναπτύσσει μεγαλύτερη ισχύ από αυτή που απαιτείται σε καιρό χωρίς άνεμο για να αναπτύξει μία δεδομένη ταχύτητα. Αντίστοιχα, η διορθωμένη ισχύς είναι μεγαλύτερη από την αρχική για γωνίες $90 < \psi_{WR,ref} \leq 180 [deg]$, δηλαδή το πλοίο αναπτύσσει μικρότερη ισχύ από αυτή που απαιτείται σε καιρό χωρίς άνεμο.



Εικόνα 39: Χρονοδιάγραμμα αρχικής ισχύος (Validated Power), διορθωμένης από άνεμο ισχύος (Corrected Power from wind), φαινόμενης γωνίας πρόσπτωσης του ανέμου στο πλοίο ($\psi_{wr,ref}$).

4.2 Πρόσθετη αντίσταση κυματισμού θάλασσας STAWAVE-1

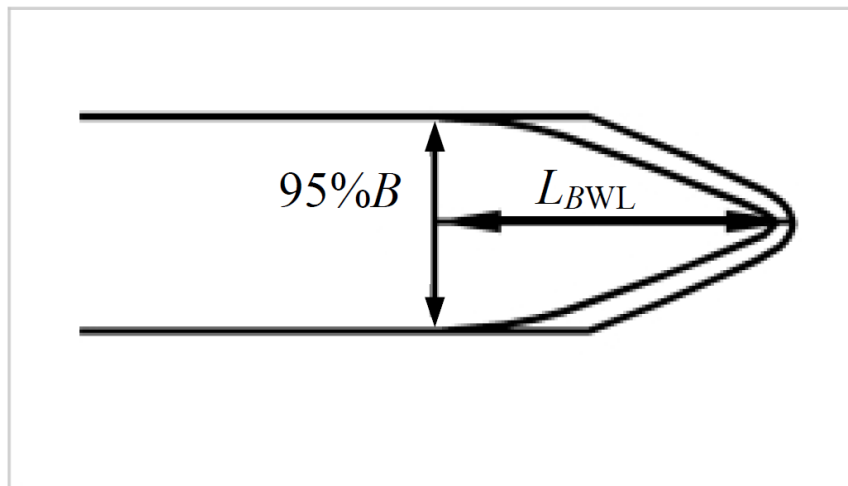
Για τον υπολογισμό της πρόσθετης αντίστασης εξαιτίας των θαλάσσιων ανεμογενών κυματισμών, έγινε χρήση της μεθοδολογίας STAWAVE-1 η οποία προτείνεται από την ITTC (2017). Η μεθοδολογία αυτή προτείνεται για τον υπολογισμό της πρόσθετης αντίστασης λόγω θαλάσσιων ανεμογενών κυματισμών όταν υπάρχουν περιορισμένα δεδομένα, όπως ισχύει και για αυτήν την εργασία. Επίσης, εφαρμόζεται σε περιπτώσεις στις οποίες η κατακόρυφη επιτάχυνση στην περιοχή της πλώρης δεν ξεπερνάει το 0,05g και για γωνία πρόσπτωσης των κυματισμών από -45° έως 45° μετωπικά. Για μικρού ύψους κύματα, η συχνότητα συνάντησης είναι μεγάλη και επομένως προκαλεί αμελητέες κινήσεις στο πλοίο. Έτσι, η πρόσθετη αντίσταση του πλοίου κατά την εφαρμογή αυτής της μεθοδολογίας προκύπτει κυρίως από την ανάκλαση των κυμάτων στη γάστρα του πλοίου σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$R_{wave} = R_{AWL} = \frac{1}{16} \cdot \rho_s \cdot g \cdot H_{W1/3} \cdot B \cdot \sqrt{\frac{B}{L_{BWL}}} \quad (4.2.1)$$

Όπου:

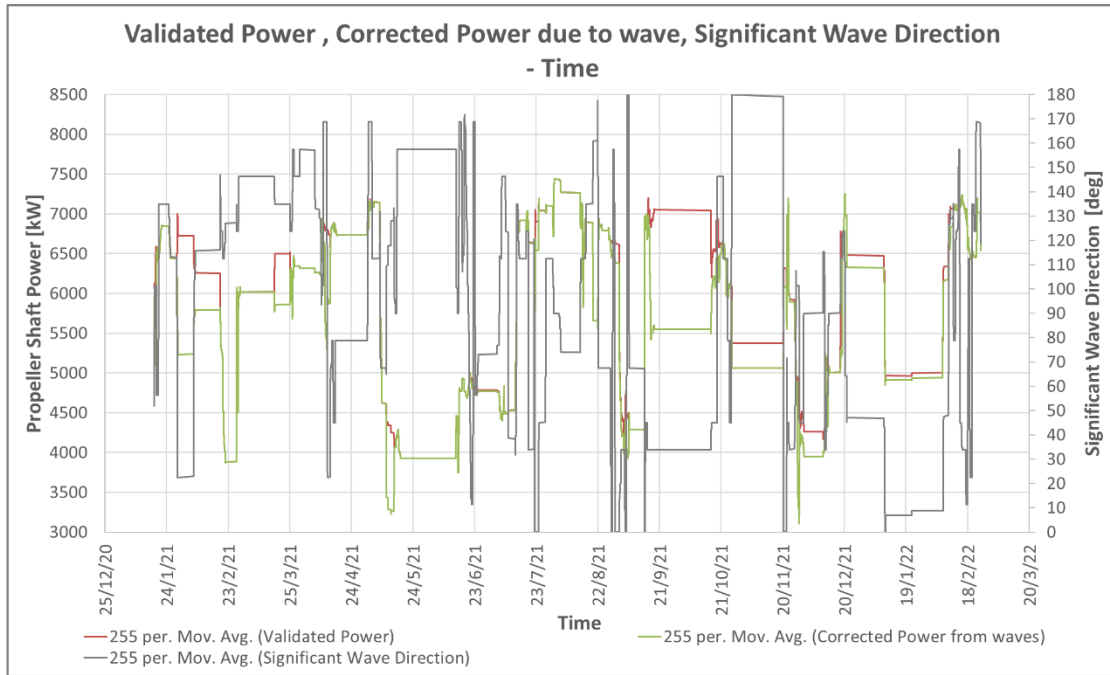
B	[m]:	Πλάτος του πλοίου
$H_{W1/3}$	[m]:	Σημαντικό ύψος κύματος για ανεμογενείς κυματισμούς
L_{BWL}	[m]:	Μήκος πλώρης στη γραμμή ισάλου στο 95% του πλάτους του πλοίου
ρ_s	[kg/m ³]:	Πυκνότητα θάλασσας για πραγματική θερμοκρασία θάλασσας
g	[m/sec ²]:	Επιτάχυνση της βαρύτητας

Το μήκος της πλώρης στη γραμμή ισάλου στο 95% του πλάτους του πλοίου μετρήθηκε από το σχέδιο γενικής διάταξης του πλοίου όπως φαίνεται στην *Εικόνα 40*.



Εικόνα 40: Υπολογισμός μήκους L_{BWL}

Στην *Εικόνα 41* παρουσιάζεται το χρονοδιάγραμμα με την αρχική ισχύ (validated, με κόκκινο), τη διορθωμένη ισχύ από τους θαλάσσιους κυματισμούς (corrected from waves, με πράσινο), τη γωνία πρόσπτωσης των κυματισμών που δέχεται το πλοίο. Παρατηρείται ότι για γωνίες πρόσπτωσης άνω των 45° δεν γίνεται κάποια διόρθωση ενώ για γωνίες μέχρι και 45° γίνονται οι αντίστοιχες διορθώσεις. Πιο συγκεκριμένα, η διορθωμένη ισχύς για γωνίες πρόσπτωσης μέχρι τις 45° είναι μικρότερη από την μετρούμενη που σημαίνει ότι το πλοίο ανέπτυξε περισσότερη ισχύ από αυτή που απαιτείται για να κινηθεί με μια δεδομένη ταχύτητα.



Εικόνα 41: Χρονοδιάγραμμα αρχικής ισχύος (Validated Data), διορθωμένης από τους θαλάσσιους ανεμογενείς κυματισμούς ισχύος (Corrected Power from waves), γωνίας πρόσπτωσης των κυματισμών στο πλοίο.

4.3 Πρόσθετη αντίσταση λόγω θερμοκρασίας θάλασσας

Για τον υπολογισμό της πρόσθετης αντίστασης λόγω της απόκλισης της πραγματικής θερμοκρασίας θάλασσας από τη θερμοκρασία θάλασσας αναφοράς, έγινε χρήση της μεθοδολογίας που προτείνεται από την ITTC (2017). Η θερμοκρασία θάλασσας και η περιεκτικότητα σε αλάτι επηρεάζουν την πυκνότητα του θαλασσινού νερού και επομένως την αντίσταση του πλοίου. Συνήθως, γίνεται διόρθωση για θερμοκρασία θάλασσας 15 °C και πυκνότητα 1026 kg/m³. Οι επιδράσεις στην αντίσταση που προκαλούνται λόγω απόκλισης της θερμοκρασίας και της πυκνότητας από αυτές τις τιμές υπολογίζονται από την εξής σχέση:

$$R_{temp} = R_{AS} = \left(R_{T0} \cdot \frac{\rho_S}{\rho_0} - 1 \right) - R_F \cdot \left(\frac{C_{F0} + \Delta C_{F0}}{C_F + \Delta C_F} - 1 \right) \quad (4.3.1)$$

Με:

$$R_F = \frac{1}{2} \cdot \rho_S \cdot S \cdot V_S^2 \cdot (C_F + \Delta C_F) \quad (4.3.2)$$

$$R_{F0} = \frac{1}{2} \cdot \rho_0 \cdot S \cdot V_S^2 \cdot (C_{F0} + \Delta C_{F0}) \quad (4.3.3)$$

$$R_{T0} = \frac{1}{2} \cdot \rho_0 \cdot S \cdot V_S^2 \cdot C_{T0} \quad (4.3.4)$$

Όπου:

C_F [-]: Συντελεστής αντίστασης τριβής για την πραγματική θερμοκρασία και αλατότητα θάλασσας

C_{F0}	[-]:	Συντελεστής αντίστασης τριβής για την θερμοκρασία και την αλατότητα θάλασσας αναφοράς
ΔC_F	[-]:	Συντελεστής συσχέτισης για αριθμό Reynolds που προκύπτει από την πραγματική θερμοκρασία και αλατότητα θάλασσας
ΔC_{F0}	[-]:	Συντελεστής συσχέτισης για αριθμό Reynolds που προκύπτει από την θερμοκρασία και αλατότητα θάλασσας αναφοράς
C_{T0}	[-]:	Συντελεστής συνολικής αντίστασης για θερμοκρασία και αλατότητα θάλασσας αναφοράς
R_{AS}	[N]:	Πρόσθετη αντίσταση εξαιτίας της απόκλισης της πραγματικής θερμοκρασίας και αλατότητας θάλασσας από την θερμοκρασία αναφοράς
R_F	[N]:	Αντίσταση τριβής για την πραγματική θερμοκρασία και αλατότητας θάλασσας
R_{F0}	[N]:	Αντίσταση τριβής για την θερμοκρασία και αλατότητας θάλασσας αναφοράς
R_{T0}	[N]:	Συνολική αντίσταση για θερμοκρασία και αλατότητα θάλασσας αναφοράς
S	[m ²):	Βρεχόμενη επιφάνεια
V_s	[m/sec]:	Ταχύτητα πλοίου ως προς το νερό
ρ_s	[kg/m ³):	Πυκνότητα θάλασσας για την πραγματική θερμοκρασία και αλατότητα θάλασσας
ρ_0	[kg/m ³):	Πυκνότητα θάλασσας για την θερμοκρασία θάλασσας αναφοράς

Ο συντελεστής αντίστασης τριβής C_F και ο συντελεστής συσχέτισης ΔC_F υπολογίστηκαν με τις σχέσεις από την ITTC (1957) και την (ITTC 1978) αντίστοιχα ως εξής:

$$C_F = \frac{0,075}{(\log_{10}(Re - 2))^2} \quad (3.4.5)$$

$$\Delta C_F = 0,044 \cdot \left[\left(\frac{k_s}{L_{WL}} \right)^{\frac{1}{3}} - 10 \cdot Re^{-\frac{1}{3}} \right] + 0,000125 \quad (3.4.6)$$

Ο αριθμός Reynolds Re υπολογίζεται ως εξής:

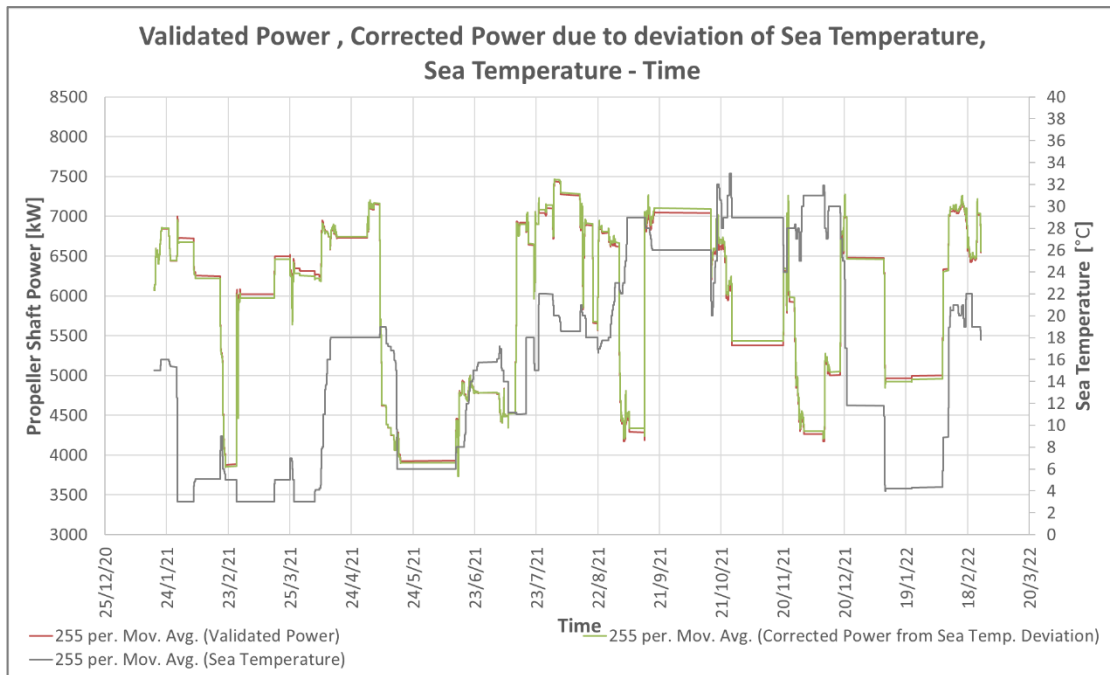
$$Re = \frac{V_s \cdot L_{WL}}{\nu}$$

Όπου:

V_s	[m/s]:	Ταχύτητα του πλοίου
L_{WL}	[m]:	Μήκος πλοίου στην ίσαλο γραμμή
ν	[m ² /sec]:	Κινηματικό ιξώδες

Στην παρούσα εργασία δεν ήταν διαθέσιμα τα δεδομένα για την αλατότητα της θάλασσας και επομένως υπολογίστηκε η πρόσθετη αντίσταση που οφείλεται αποκλειστικά στην θερμοκρασία θάλασσας. Οι υπολογισμοί της πυκνότητας ρ_s και του κινηματικού ιξώδους ν υπολογίστηκαν συναρτήσει της θερμοκρασίας (για την οποία υπήρχαν δεδομένα από τα noon reports) από πίνακα της ITTC (2011) (Fresh Water and Seawater Properties).

Στην Εικόνα 42 παρουσιάζεται το χρονοδιάγραμμα στο οποίο φαίνεται ότι η πραγματική ισχύς (validated, με κόκκινο) είναι μεγαλύτερη από την διορθωμένη για θερμοκρασία θάλασσας ισχύ (Corrected Power from Sea Temp. Deviation με πράσινο χρώμα) για θερμοκρασίες θάλασσας (με γκρι χρώμα) κάτω των 15 °C ενώ για θερμοκρασίες άνω των 15 °C παρατηρείται η αντίθετη συμπεριφορά. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι το πλοίο όταν βρίσκεται σε κρύες θάλασσες αναπτύσσει περισσότερη ισχύ, από αυτή που θα ανέπτυξε στη θερμοκρασία αναφοράς, για να ταξιδέψει με μια δεδομένη ταχύτητα εφόσον το νερό έχει μεγαλύτερη πυκνότητα και άρα το πλοίο δέχεται μεγαλύτερη αντίσταση από αυτό. Αντίστοιχα, σε θερμές θάλασσες εφόσον η πυκνότητα του νερού είναι μικρότερη το πλοίο δέχεται λιγότερη αντίσταση από το νερό και αναπτύσσει λιγότερη ισχύ από αυτήν που θα ανέπτυξε στην θερμοκρασία αναφοράς για να ταξιδέψει με μια δεδομένη ταχύτητα.



Εικόνα 42: Χρονοδιάγραμμα αρχικής ισχύος (Validated Data), διορθωμένης από την απόκλιση της θερμοκρασίας της θάλασσας από την θερμοκρασία αναφοράς ισχύος (Corrected Power from Sea Temperature), θερμοκρασία θάλασσας,.

4.4 Διόρθωση Ισχύος & Συνεισφορά επιμέρους πρόσθετων αντιστάσεων

Τελικά, η διορθωμένη αποδιδόμενη ισχύς $P_{D,corr}$ προκύπτει αφαιρώντας από τη μετρούμενη ισχύ P_D τη διόρθωση της ισχύος λόγω των πρόσθετων αντιστάσεων ΔP ως εξής:

$$P_{D,corr} = P_D - \Delta P$$

Με:

$$\Delta P = \frac{(R_{wind} + R_{wave} + R_{temp}) \cdot v_g}{n_{DO}} + P_D \cdot \left(1 - \frac{n_{DM}}{n_{DO}}\right)$$

Όπου:

$P_{D,corr}$	[W]:	Διορθωμένη από τις πρόσθετες αντιστάσεις αποδιδόμενη ισχύς
P_D	[W]:	Μετρούμενη αποδιδόμενη ισχύς
ΔP	[W]:	Διόρθωση ισχύος λόγω των πρόσθετων αντιστάσεων
R_{wind}	[N]:	Πρόσθετη αντίσταση ανέμου
R_{wave}	[N]:	Πρόσθετη αντίσταση κυματισμού θάλασσας
R_{temp}	[N]:	Πρόσθετη αντίσταση λόγω θερμοκρασίας θάλασσας
v_g	[m/s]:	Ταχύτητα πλοίου
n_{DO}	[-]:	Συντελεστής απόδοσης πρόωσης σε ήρεμη κατάσταση
n_{DM}	[-]:	Συντελεστής απόδοσης πρόωσης στην παρούσα κατάσταση

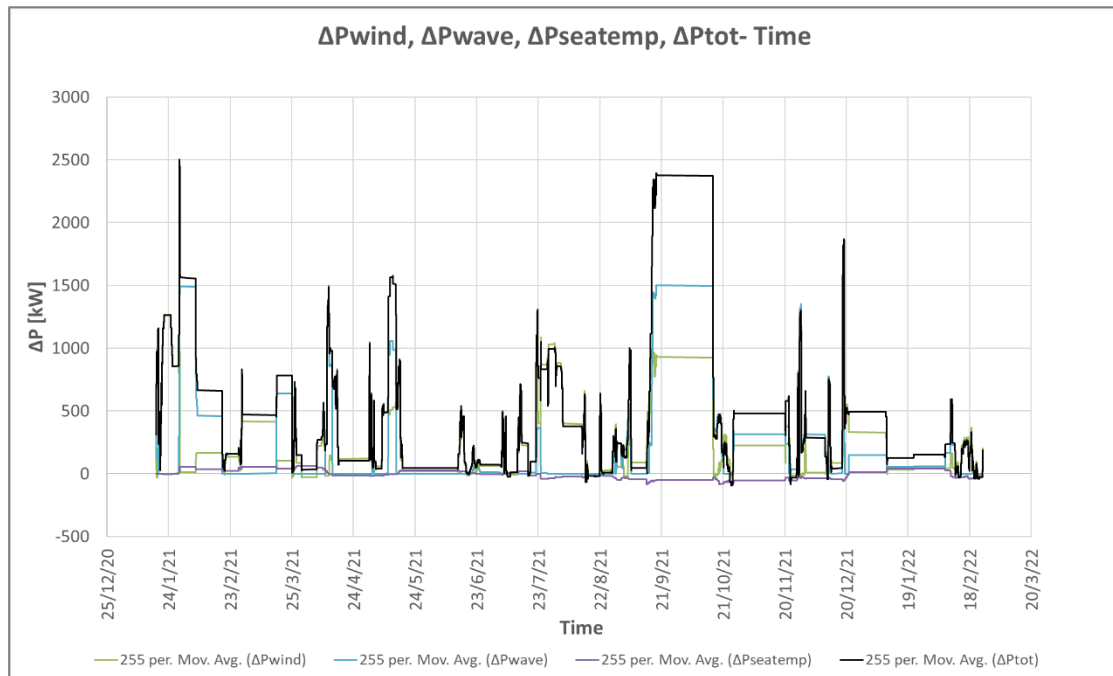
Οι συντελεστές απόδοσης πρόωσης n_{DO} , n_{DM} υπολογίζονται σύμφωνα με το ISO 15016 (ISO, 2015) ή ισούνται με 0,7. Στην εργασία αυτή θεωρήθηκαν ίσοι με 0,7.

Στον Πίνακα 34 παρουσιάζονται κάποια στατιστικά μεγέθη των επιμέρους διορθώσεων ισχύος ΔP λόγω των πρόσθετων αντιστάσεων. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι το μεγαλύτερο ποσοστό διόρθωσης ισχύος, ως αποτέλεσμα των μεθοδολογιών που εφαρμόστηκαν, επιτυγχάνεται λόγω αντίστασης ανέμου ΔP_{wind} με ποσοστό 58% επί της συνολικής διόρθωσης ΔP και με μέση τιμή τα 230kW. Δεύτερη σε επιρροή της συνολικής διόρθωσης είναι η διόρθωση ισχύος για ανεμογενείς θαλάσσιους κυματισμούς ΔP_{wave} με ποσοστό 47% επί της συνολικής διόρθωσης ΔP . Τέλος, τη μικρότερη επιρροή στη διόρθωση της ισχύος παρουσιάζει η διόρθωση ισχύος για απόκλιση θερμοκρασίας θάλασσας από τη θερμοκρασία αναφοράς (15 °C) $\Delta P_{sea temp}$ με ποσοστό -5%, όπου το αρνητικό πρόσημο δηλώνει ότι κατά μέση τιμή η θερμοκρασία θάλασσας έχει θετική επίπτωση στην απόδοση του πλοίου εφόσον παρατηρείται ότι το πλοίο ταξίδεψε κατά 70% σε θάλασσες με θερμοκρασία άνω των 15 °C. Τα ποσοστά αυτά επηρεάζονται διαφορετικά ανάλογα τις διαδρομές που ακολουθεί το πλοίο (κρύες ή ζεστές θάλασσες), τον χρόνο και την ένταση των ταξιδιών με κακοκαιρία καθώς και από το μέγεθος και τον τύπο του πλοίου. Αξίζει να σημειωθεί ότι το ποσοστό επί της συνολικής συνεισφοράς αντίστασης της θερμοκρασίας θάλασσας ήταν 17% για θερμοκρασία θάλασσας 2 °C και -24% για θερμοκρασία θάλασσας 30 °C τα οποία αποτελούν σημαντικά ποσοστά στη συνολική πρόσθετη αντίσταση.

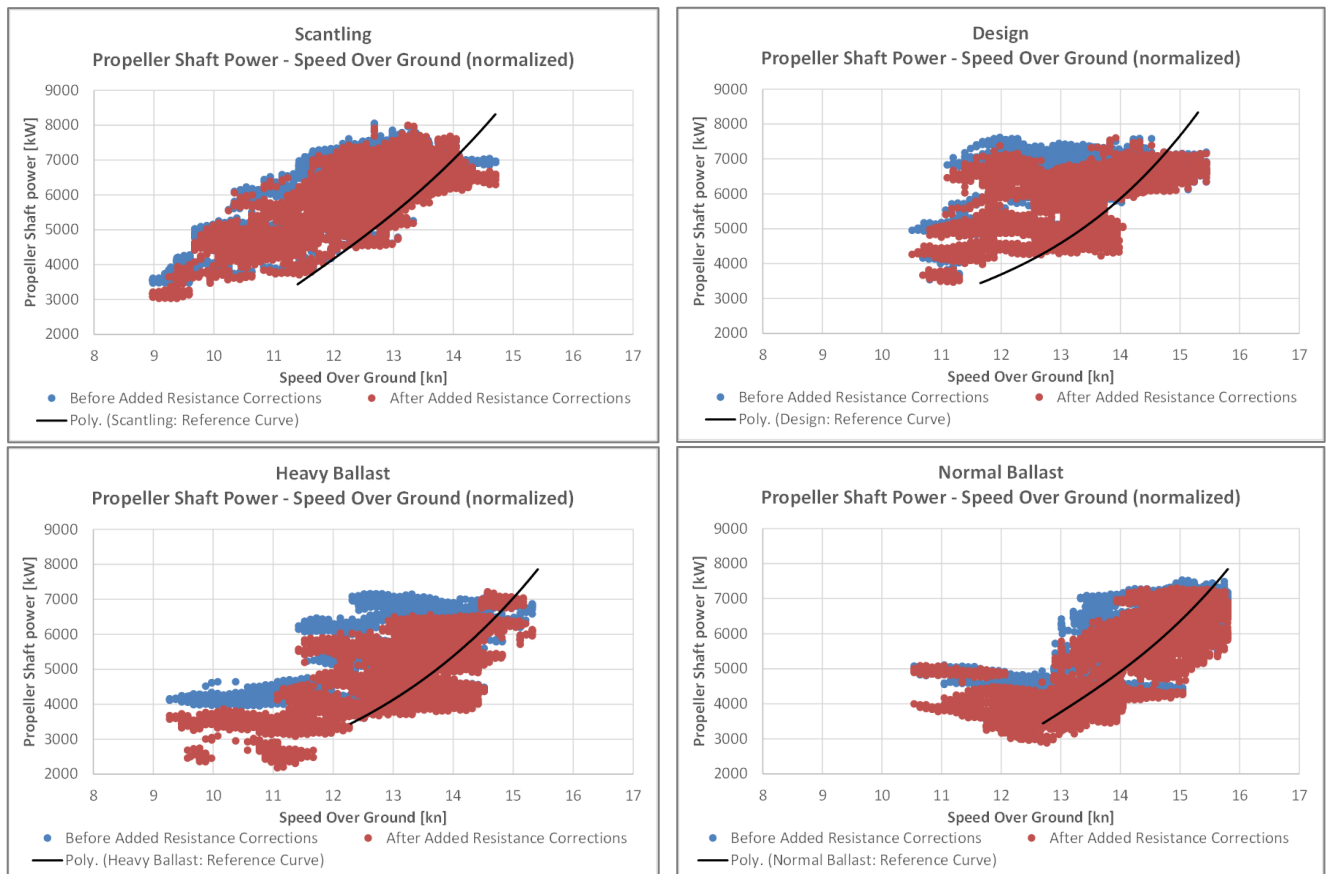
Πίνακας 34: Στατιστικά επιμέρους διορθώσεων ισχύος ΔP εξαιτίας των πρόσθετων αντιστάσεων

Statistics	Statistics for Power Corrections			
	ΔP_{wind} [kW]	ΔP_{wave} [kW]	$\Delta P_{sea temp}$ [kW]	ΔP [kW]
Mean	230,0	189,6	-19,6	399,9
Minimum	-45,05	0,0	-96,0	-111,2
Maximum	1743,61	3018,4	68,7	2988,4
Range	1788,66	3018,4	164,7	3099,6
Percentage per total ΔP	58%	47%	-5%	100%

Στην Εικόνα 43 παρουσιάζεται το χρονοδιάγραμμα των διορθώσεων ισχύος λόγω των επιμέρους πρόσθετων αντιστάσεων (ΔP_{wind} , ΔP_{wave} , $\Delta P_{sea,temp}$) καθώς και η συνολική διόρθωση ισχύος (ΔP_{tot}). Τέλος, στην Εικόνα 44 παρατίθενται τα διαγράμματα ισχύος – ταχύτητας πριν και μετά τη διόρθωση της ισχύος από τις πρόσθετες αντιστάσεις για κάθε κατάσταση φόρτωσης με χαραγμένες τις καμπύλες P-V αναφοράς από τα Sea Trials.



Εικόνα 43: Χρονοδιάγραμμα των διορθώσεων ισχύος λόγω πρόσθετων αντιστάσεων

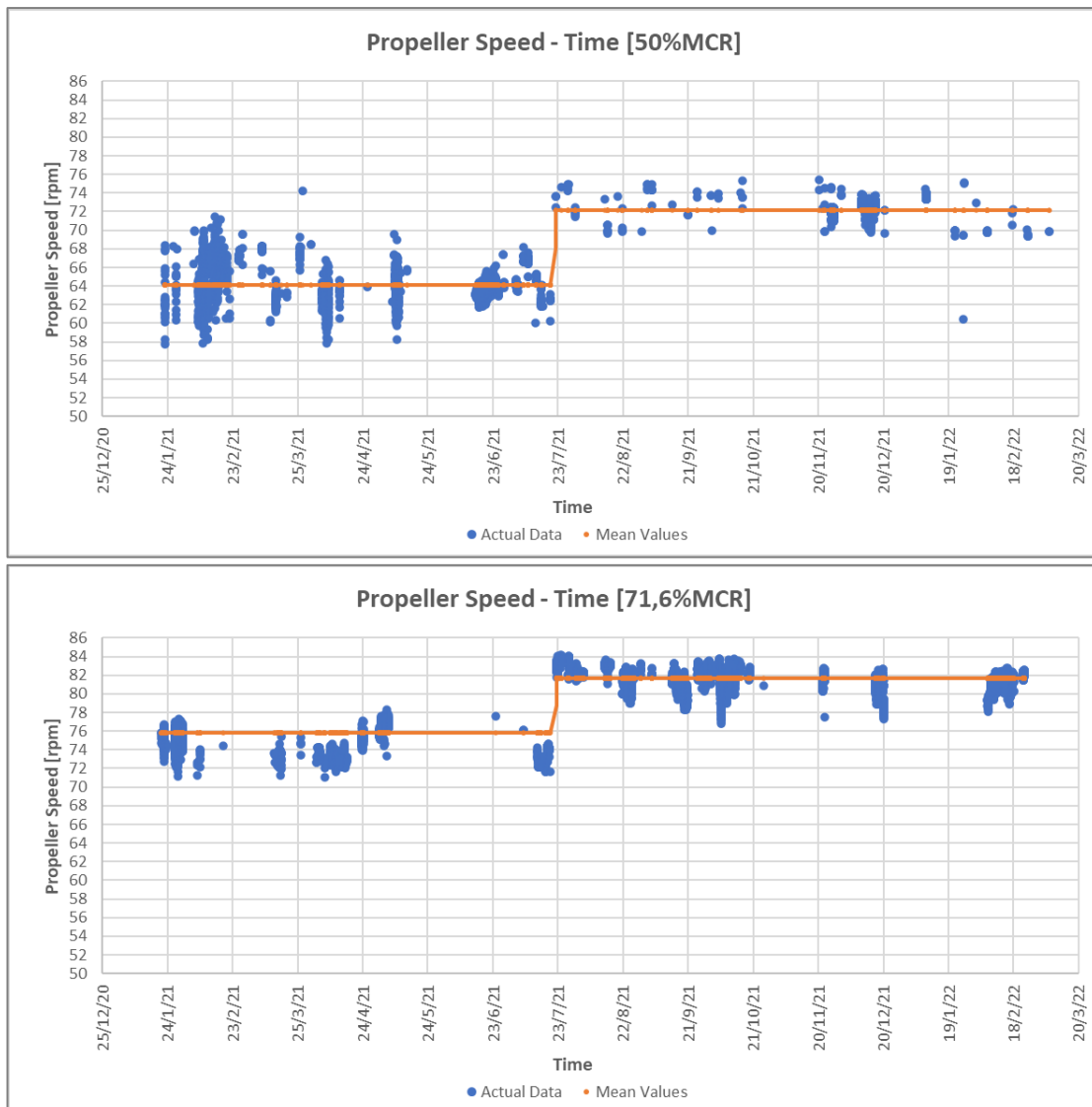


Εικόνα 44: Διαγράμματα Ισχύος - Ταχύτητας πριν και μετά τη διόρθωση της ισχύος από τις πρόσθετες αντιστάσεις, με κανονικοποιημένη ταχύτητα για τα θυδίσματα κάθε κατάστασης φόρτωσης

5. Δείκτες αξιολόγησης της απόδοσης (KPIs)

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

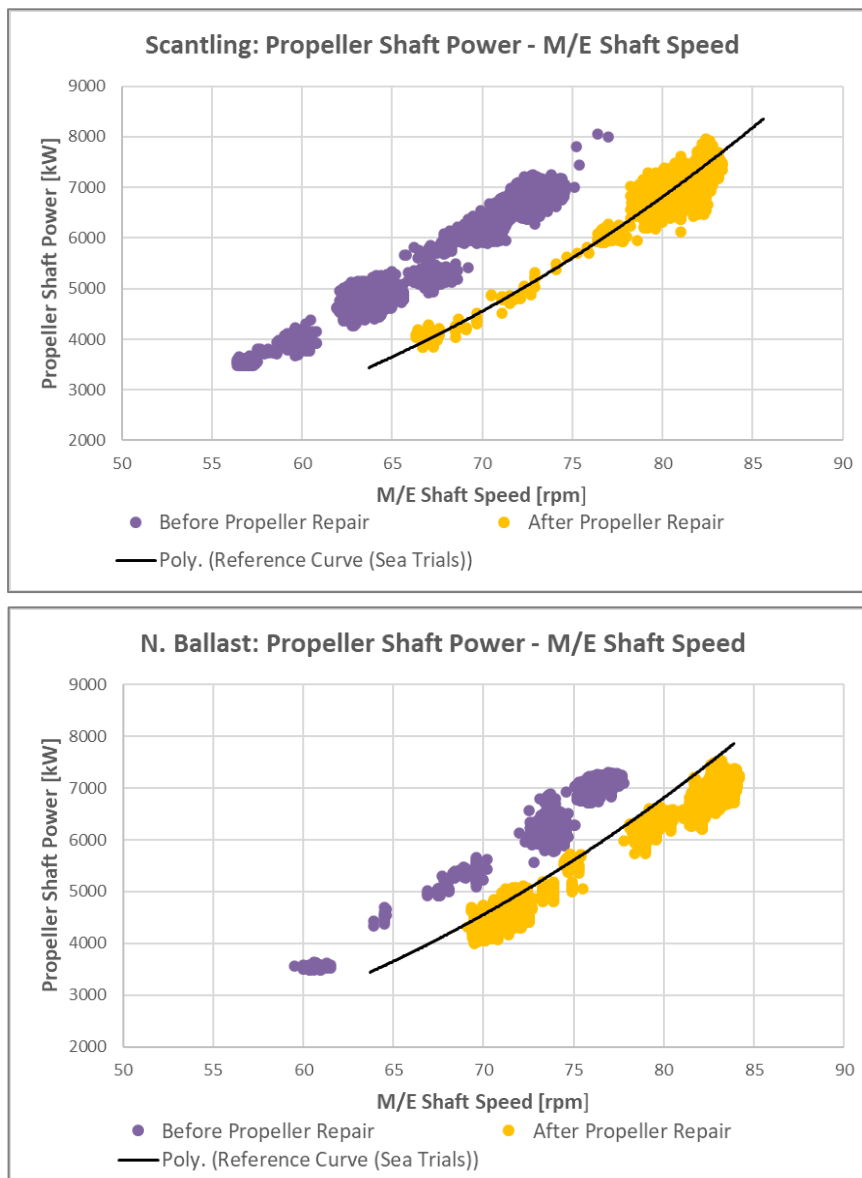
Κατά την επεξεργασία των δεδομένων παρατηρήθηκε μια απότομη αύξηση της ταχύτητας περιστροφής της έλικας για δεδομένες τιμές ισχύος από τις 20/7/2021 και μετά. Η απότομη αύξηση αυτή οφείλεται σε επισκευή της έλικας (Propeller Repair). Ενδεικτικά παρουσιάζονται τα χρονοδιαγράμματα των στροφών της έλικας για ισχύς 50%MCR και 71,6%MCR αντίστοιχα. Στα χρονοδιαγράμματα έχουν χαραχθεί οι μέσες τιμές στις δύο περιοχές ξεχωριστά (πριν και μετά την επισκευή).



Εικόνα 45: Χρονοδιάγραμμα στροφών της έλικας για ισχύ κύριας μηχανής 71,6%MCR και 50%MCR με χαραγμένες τις μέσες τιμές κατά τις περιόδους πριν και μετά την επισκευή της έλικας

Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται 13% αύξηση των τιμών rpm της έλικας για ισχύ 50% MCR και 8% αύξηση για ισχύ 71,6% MCR.

Η αλλαγή της συμπεριφοράς της ταχύτητας περιστροφής της έλικας μπορεί να παρατηρηθεί και στο διάγραμμα Propeller Shaft Power – M/E Shaft Speed μετά τη διαδικασία filtering και validation (πριν δεν μπορούν να διακριθούν οι δύο περιοχές). Στο εν λόγω διάγραμμα έχουν χωριστεί τα δεδομένα πριν και μετά την επισκευή της έλικας. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι μετά την επισκευή της έλικας (πορτοκαλί χρώμα) η ταχύτητα περιστροφής της έλικας είναι μεγαλύτερη συγκριτικά με αυτήν πριν της επισκευής (μωβ χρώμα) για δεδομένες τιμές αποδιδόμενης ισχύος. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα Propeller Shaft Power – M/E Shaft Speed ενδεικτικά για τις καταστάσεις Scantling και Normal Ballast.



Εικόνα 46: Διάγραμμα ποσοστού ισχύος κύριας μηχανής συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής της έλικας για τις καταστάσεις Scantling και Normal Ballast

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

$$P = c \cdot n^3 \quad (5.1.1)$$

Κατά τη λειτουργία του πλοίου η σταθερά c μεταβάλλεται εξαιτίας της ρύπανσης, της διάβρωσης και των μηχανικών καταπονήσεων της έλικας (π.χ. από κάποιο ατύχημα). 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 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:

$$KPI 1 (Propeller Loading Coefficient) = \frac{P}{n^3} \quad (5.1.2)$$

Όπου:

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

5.2 KPI 2 (Speed Loss Indicator): Δείκτης Απώλειας της 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.

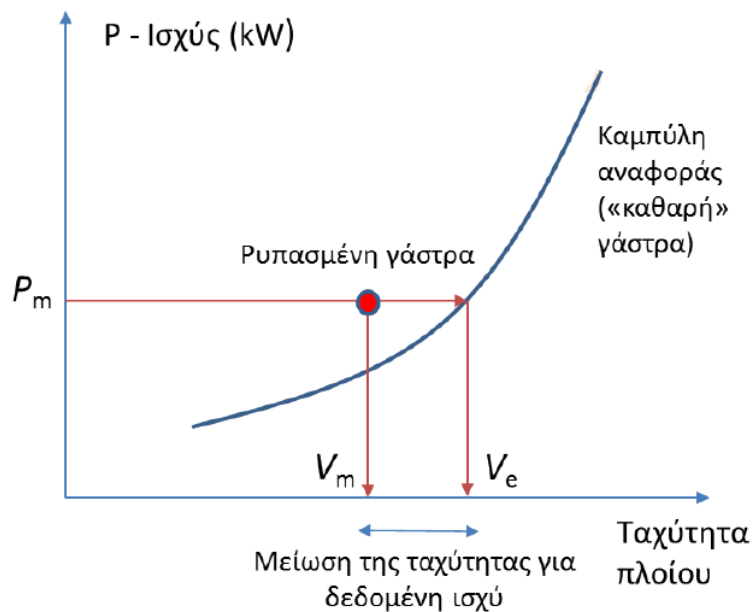
Για κάθε δεδομένη χρονική στιγμή και διορθωμένη από τις πρόσθετες αντιστάσεις ισχύ $P_{D,corr}$ ο δείκτης *KPI 1* μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με το ISO 19030 (ISO,2015) ως εξής:

$$KPI 2 (Speed Loss Indicator) = 100 \cdot \frac{V_m - V_e}{V_e} \quad (5.2.1)$$

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.

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 (Εικόνα 47). 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.



Εικόνα 47: Μείωση της ταχύτητας του πλοίου για δεδομένη ισχύ για ρυπασμένη γάστρα

Η κανονικοποίηση της ταχύτητας αναλύθηκε στην υπο-ενότητα 3.5 κατά την οποία έγινε χρήση του συντελεστή ναυαρχείου, εξίσωση (3.5.4).

5.3 *KPI3 (Power Increase Indicator): Δείκτης Προσαύξησης της Ισχύος*

Ο Δείκτης Προσαύξησης της Ισχύος *KPI 3 (Power Increase Indicator)* εκτιμά το ποσοστό αύξησης της διορθωμένης από τις πρόσθετες αντιστάσεις ισχύος στην πάροδο του χρόνου για δεδομένη κανονικοποιημένη ταχύτητα, συγκριτικά με την αναμενόμενη ισχύ που προκύπτει για τη δεδομένη κανονικοποιημένη ταχύτητα από τα ζεύγη Ισχύος – Ταχύτητας αναφοράς που αντλούνται από τις καμπύλες P-V των Sea Trials για κάθε κατάσταση φόρτωσης.

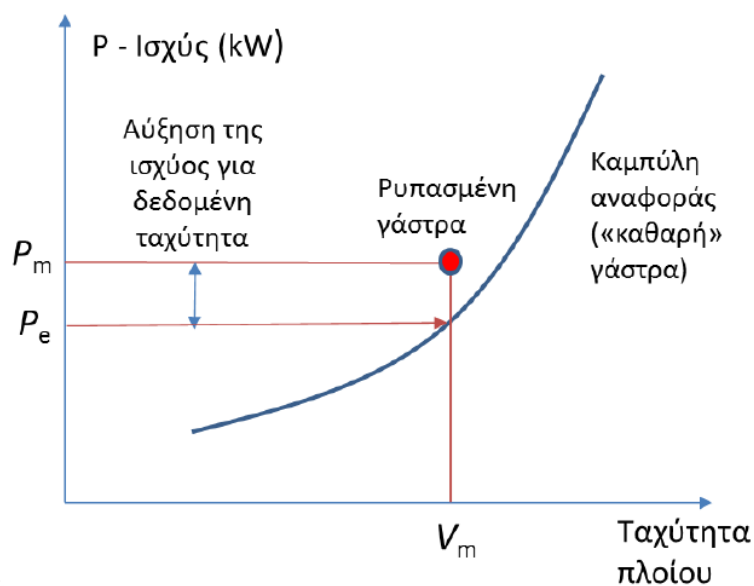
Για κάθε δεδομένη χρονική στιγμή ο δείκτης *KPI 3* υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση σύμφωνα με το ISO 19030 (ISO,2015):

$$KPI 3 (Power Increase Indicator) = 100 \cdot \frac{P_m - P_e}{P_e} \quad (5.3.1)$$

Όπου:

- P_m [kW]: Μετρούμενη και διορθωμένη από τις πρόσθετες αντιστάσεις αποδιδόμενη ισχύς.
 P_e [kW]: Αναμενόμενη ισχύς από τις καμπύλες αναφοράς Ισχύος – Ταχύτητας των Sea Trials για δεδομένη κανονικοποιημένη ταχύτητα του πλοίου

Μεταξύ δύο καθαρισμών της γάστρας και της έλικας παρατηρείται αύξηση του δείκτη *KPI 3* εφόσον αυξάνεται η ρύπανση της γάστρας και της έλικας και επομένως αυξάνεται η αντίσταση του πλοίου με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγαλύτερη απαίτηση αποδιδόμενης ισχύος για να ταξιδέψει το πλοίο με μια δεδομένη ταχύτητα (Εικόνα 48). Αντιθέτως, ύστερα από κάποιον καθαρισμό γάστρας και έλικας παρατηρείται μείωση του δείκτη *KPI 3* και επομένως βελτίωση της απόδοσης του πλοίου εφόσον το πλοίο δέχεται λιγότερη αντίσταση και η συμπεριφορά του συνδυασμού ισχύος ταχύτητας πλησιάζει την καμπύλη αναφοράς.



Εικόνα 48: Αύξηση της απαιτούμενης ισχύος για δεδομένη ταχύτητα για ρυπασμένη γάστρα

Η κανονικοποίηση της ταχύτητας αναλύθηκε στην υπο-ενότητα 3.5 κατά την οποία έγινε χρήση του συντελεστή ναυαρχείου, εξίσωση (3.5.4).

Οι δείκτες *KPI 2* (*Speed Loss Indicator*) και *KPI 3* (*Power Increase Indicator*) είναι δύο αξιόλογοι, με ευκολία στην παραγωγή και στην εκτίμησή τους δείκτες και με χαμηλή τιμή αβεβαιότητας (Carchen A. & Atlar M., 2020). Όμως, δεν είναι ιδανικοί στην εκτίμηση της ρύπανσης της γάστρας και της έλικας του πλοίου καθώς δεν είναι ικανοί να εντοπίσουν την πηγή της μείωσης της ταχύτητας και της αύξησης της ισχύος. Ωστόσο, μπορεί να μελετηθεί η μείωση της ταχύτητας και η αύξηση της ισχύος λόγω ρύπανσης μεταξύ δύο γεγονότων που απέχουν μικρή χρονική απόσταση μεταξύ τους π.χ. σύγκριση του δείκτη πριν και μετά από έναν δεξαμενισμό ή έναν καθαρισμό της έλικας με δύτες. Επίσης, δεδομένου ότι η ισχύς υπολογίζεται μέσω της ροπής της έλικας μπορεί να εκτιμηθεί η επίδραση της ρύπανσης της έλικας στην συνολική μείωση της απόδοσης ταχύτητας του πλοίου.

Δύο επιπλέον δείκτες μπορούν να υπολογιστούν συμπληρωματικά των *KPI 2* και *KPI 3* για μια πιο στοχευμένη εκτίμηση της ρύπανσης στη γάστρα και στην έλικα του πλοίου, οι οποίοι παρουσιάζονται στις επόμενες δύο υπο-ενότητες (5.4 και 5.5).

5.4 KPI 4 (Wake Fraction Gain Indicator): Δείκτης Προσαύξησης Ποσοστού Ομόρου

Ο Δείκτης Προσαύξησης Ποσοστού Ομόρου *KPI 4 (Wake Fraction Gain Indicator)* εκτιμά τη μείωση της ροής στην έλικα εξαιτίας της ρύπανσης της γάστρας. Η ρύπανση της γάστρας έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της τραχύτητάς της όπου εκτός από την αύξηση της αντίστασης συνεκτικότητας (Viscous Drag) προκαλεί αύξηση του πάχους του οριακού στρώματος της ροής γύρω από τη γάστρα και τελικά μείωση της ροής στην περιοχή της πρύμνης. Έτσι, ο δείκτης επηρεάζεται άμεσα από την τραχύτητα της γάστρας και είναι λιγότερο ευαίσθητος σε άλλες διαταραχές που προκαλούν αύξηση της ισχύος για επίτευξη συγκεκριμένης ταχύτητας. Η μεθοδολογία υπολογισμού του δείκτη *KPI 4* βασίζεται στη μελέτη των Carchen A., Atlar M. (2020).

Για κάθε δεδομένη χρονική στιγμή t και ταχύτητα του πλοίου V_s ο δείκτης *KPI 4* μπορεί να υπολογιστεί με την παρακάτω σχέση:

$$KPI\ 4\ (Wake\ Fraction\ Gain\ Indicator) = \frac{w_Q}{w_{Q,ref}} - 1 \quad (5.4.1)$$

Όπου:

- w_Q [-]: Ποσοστό ομόρου ως προς τη ροπή (Torque Identity Wake Fraction).
 $w_{Q,ref}$ [-]: Ποσοστό ομόρου αναφοράς ως προς τη ροπή

Το ποσοστό ομόρου (ως προς τη ροπή) w_Q μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$w_Q = 1 - \frac{n \cdot D \cdot J_Q}{V_s} \quad (5.4.2)$$

Όπου:

- n : [rps] Στροφές της έλικας
 D : [m] Διάμετρος της έλικας
 J_Q : [-] Συντελεστής προχώρησης ως προς τη ροπή
 V_s : [m/s] Ταχύτητα του πλοίου (Speed Through Water)

Ο συντελεστής προχώρησης J_Q υπολογίζεται συναρτήσει του συντελεστή ροπής K_Q από το διάγραμμα ελεύθερης ροής της έλικας. Ο συντελεστής ροπής K_Q υπολογίζεται ως εξής:

$$K_Q = \frac{Q \cdot \eta_r}{\rho \cdot n^2 \cdot D^5} \quad (5.4.3)$$

Όπου:

- Q : [N·m]: Ροπή της έλικας
 η_r : [-]: Βαθμός απόδοσης σχετικής περιστροφής
 ρ : [kg/m³]: Πυκνότητα του νερού
 n : [rps]: Στροφές της έλικας
 D : [m]: Διάμετρος της έλικας

Πρέπει να σημειωθεί ότι η σχέση (5.4.1) εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της ελεύθερης ροής στην έλικα και από τη ροπή της έλικας Q η οποία και αυτή επηρεάζεται από τη ρύπανση της έλικας. Επομένως, σε περίπτωση ρυπασμένης έλικας, γίνεται υπερεκτίμηση του ποσοστού ομόρου (ως προς τη ροπή) w_Q λόγω της αύξησης της αντίστασης των πτερυγίων και της μείωσης της αποδοτικότητάς της σε ελεύθερη ροή. Έτσι, ο δείκτης προσαύξησης ποσοστού ομόρου $KPI 4$ (*Wake Fraction Gain Indicator*) δεν πρέπει να λαμβάνεται με την απολυτότητα της έννοιάς του αλλά ως ένας σχετικός δείκτης του συνδυασμού των επιπτώσεων που επιφέρουν η ρυπασμένη γάστρα και έλικα στην απόδοση του πλοίου.

5.5 KPI 5 (Propeller Fouling Indicator): Δείκτης Ρύπανσης Έλικας

Ο δείκτης $KPI 5$ (*Propeller Fouling Indicator*), σύμφωνα με τη μελέτη των Carchen A., Atlar M. (2020), εκτιμά το ποσοστό της αύξησης ποσοστού ομόρου (ως προς τη ροπή) w_Q που οφείλεται στη ρύπανση της έλικας. Εάν υπολογιστεί σωστά, ο δείκτης $KPI 5$ θα τείνει στο μηδέν για καθαρή έλικα και θα αυξάνεται όσο αυτή ρυπαίνεται.

$$KPI 5 \text{ (Propeller Fouling Indicator)} = \frac{w_{app} - w_{app ref}}{w_{Q ref}} \quad (5.5.1)$$

Όπου:

w_{app}	[-]:	Φαινόμενο ποσοστό ομόρου
$w_{app ref}$	[-]:	Φαινόμενο ποσοστό ομόρου αναφοράς
$w_{Q ref}$	[-]:	Ποσοστό ομόρου ως προς τη ροπή

Η διάκριση των επιπτώσεων μεταξύ ρύπανσης της γάστρας και της έλικας στην αύξηση της ροπής της έλικας Q είναι εφικτή εάν είναι διαθέσιμες οι μετρήσεις της ώσης της έλικας T είτε εάν είναι διαθέσιμες οι μετρήσεις της τραχύτητας της έλικας με τις οποίες μπορεί να γίνει διόρθωση του διαγράμματος ελεύθερης ροής της έλικας για ρυπασμένη γάστρα.

Οι μετρήσεις της ώσης T μπορεί να θεωρούνται κάπως αβέβαιες, όμως μπορούν να μας παρέχουν μια καλή εκτίμηση της ρύπανσης της γάστρας. Ωστόσο, οι μετρήσεις ώσης της έλικας μπορεί να είναι ασταθείς, και η παραμικρή απόκλιση ευθυγράμμισης του αισθητήρα ώσης (strain gauge) με τον άξονα της έλικας συχνά παράγει αυτό που συχνά αναφέρεται ως «παρασιτική φόρτιση» (“parasitic load”), όπου ουσιαστικά αποτελεί μια εικονική καταπόνηση του άξονα, παραγόμενη από την στρεπτική τάση. Έτσι, είναι αναγκαία κάποια μορφή διόρθωσης της ώσης T ώστε να απαλειφθούν οποιαδήποτε συστηματικά σφάλματα από τις μετρήσεις. Ένας αξιολογος τρόπος για να επιτευχθεί αυτό είναι η χρήση του φαινομένου ποσοστού ομόρου που ορίζεται ως εξής:

$$w_{app} = w_Q - w_T \quad (5.5.2)$$

Όπου:

w_Q	[-]:	Ποσοστό ομόρου ως προς τη ροπή της έλικας Q
w_T	[-]:	Ποσοστό ομόρου ως προς την ώση της έλικας T

Το ποσοστό ομόρου (ως προς την ώση) w_T υπολογίζεται παρόμοια με το ποσοστό ομόρου (ως προς τη ροπή) w_Q , με τη χρήση της παρακάτω σχέσης:

$$w_T = 1 - \frac{n \cdot D \cdot J_T}{V_s} \quad (5.5.3)$$

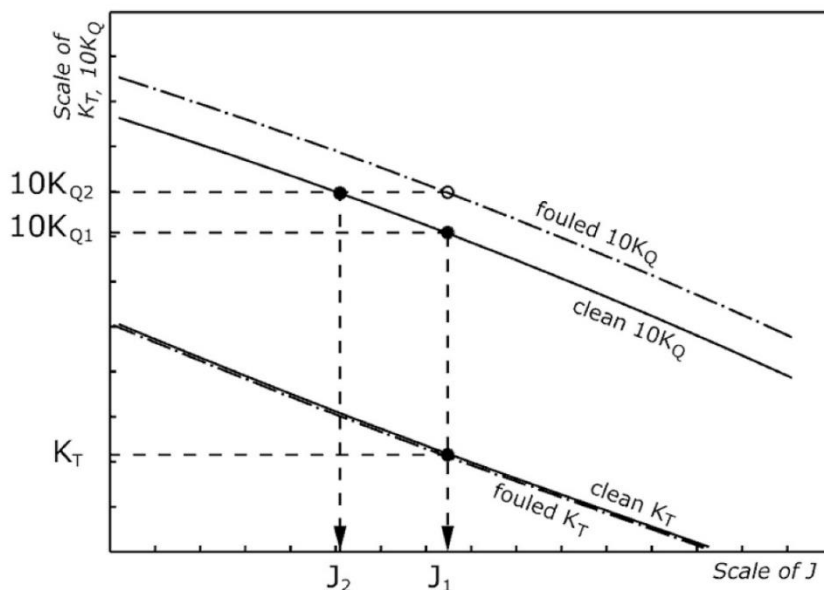
Όπου:

- n [rps]: Ταχύτητα περιστροφής της έλικας
- D [m]: Διάμετρος έλικας
- J_T [-]: Συντελεστής προχώρησης ως προς την ώση
- V_s [m/s]: Ταχύτητα πλοίου ως προς το νερό

Ο συντελεστής προχώρησης J_T υπολογίζεται συναρτήσει του συντελεστή ώσης K_T από το διάγραμμα ελεύθερης ροής της έλικας. Ο συντελεστής ώσης K_T υπολογίζεται ως εξής:

$$K_T = \frac{T}{\rho \cdot n^2 \cdot D^4} \quad (5.5.4)$$

Όπου T [N] η ώση.



Εικόνα 49: Εκτίμηση του συντελεστή προχώρησης J από τους συντελεστές K_T και K_Q με χρήση του διαγράμματος ελεύθερης ροής έλικας. $10K_Q1$ για καθαρή έλικα, $10K_Q2$ για ρυπασμένη έλικα (Carchen A.&Atlar M.,2020)

Στο διάγραμμα της Εικόνας 49 παρατηρείται ότι εάν η έλικα είναι ρυπασμένη γίνεται υπερεκτίμηση στο ποσοστό ομόρου w_Q , εφόσον υπερεκτιμάται ο συντελεστής προχώρησης J_Q στην περίπτωση που δεν είναι γνωστό το διάγραμμα ελεύθερης ροής για ρυπασμένη γάστρα, όπως συμβαίνει και στην παρούσα εργασία. Υποθέτοντας ότι ο συντελεστής ροπής $10K_Q$ υπολογίζεται από φυσικής κλίμακας μετρήσεις για καθαρή έλικα και θεωρώντας τον βαθμό απόδοσης σχετικής περιστροφής $\eta_r \approx 1$ ισχύει η ιδανική περίπτωση $J_Q \approx J_T = J_1$. Στην περίπτωση, όμως, όπου ο συντελεστής ροπής $10K_Q$ υπολογιστεί για ρυπασμένη έλικα

και ίδιο βαθμό απόδοσης σχετικής περιστροφής η_r , εφόσον δεν είναι γνωστό το διάγραμμα ροής της έλικας για ρυπασμένη γάστρα, θα βρεθεί ότι $J_Q = J_2 < J_T = J_1$.

Εφόσον η ώση θεωρείται ότι επηρεάζεται αμελητέα από τη ρύπανση, το πραγματικό ποσοστό ομόρου μπορεί να εκτιμηθεί σε ικανοποιητικό βαθμό από το ποσοστό ομόρου ως προς την ώση w_T (thrust identity wake fraction). Επομένως, το φαινόμενο ποσοστό ομόρου w_{app} είναι ένα φανταστικό κομμάτι που αποσκοπεί στην εισαγωγή της ροπής της ρυπασμένης έλικας σε διάγραμμα ελεύθερης ροής έλικας καθαρής έλικας.

Έμμεσα, το φαινόμενο ποσοστό ομόρου είναι ένας δείκτης του μεγέθους της ρύπανσης της έλικας. Ενώ θεωρητικά το w_{app} πρέπει να τείνει στο μηδέν για καθαρή έλικα και να αυξάνεται όσο αναπτύσσεται η ρύπανση, πρακτικά σπάνια είναι μηδέν λόγω της αστάθειας των μετρήσεων της ώσης που έχει προαναφερθεί. Για τον λόγο αυτόν, το w_{app} πρέπει να μετριέται κατά την περίοδο αναφοράς με χρήση της ταχύτητας του πλοίου (Speed Through Water) για να βρεθεί το διάγραμμα ελεύθερης ροής της έλικας αναφοράς.

6. Αποτελέσματα και ανάλυση των KPIs

6.1 Χρονοδιαγράμματα, ιστογράμματα και ανάλυση των KPIs πριν και μετά από ενέργειες επισκευής και συντήρησης

Σε αυτή την υποενότητα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών των Δεικτών Αξιολόγησης της Απόδοσης KPIs οι μεθοδολογίες των οποίων αναλύθηκαν στο *Κεφάλαιο 5*. Πιο συγκεκριμένα παρατίθενται, για κάθε δείκτη ξεχωριστά, τα χρονοδιαγράμματα και τα ιστογράμμά τους καθώς επίσης και πίνακας με τα ποσοστά μεταβολής των δεικτών μετά από 2 γεγονότα επισκευής-συντήρησης (maintenance events) και μεταξύ των γεγονότων που εντοπίζεται η μεταβολή των δεικτών εξαιτίας της επίδρασης της βιο-ρύπανσης της γάστρας και της έλικας. Τα γεγονότα που γίνονται κατά το χρονικό εύρος των 14 μηνών, για το οποίο είναι διαθέσιμα τα δεδομένα για την παρούσα εργασία, είναι η επισκευή της έλικας (Propeller Repair) στα μέσα του 7/2021 και ο καθαρισμός της γάστρας με επιπλέον καθαρισμό της έλικας (UHC & Propeller Polishing) στις αρχές του 2/2022.

Στις *Εικόνες 50, 53, 56, 59, 62* παρουσιάζονται τα χρονοδιαγράμματα των δεικτών KPI στα οποία έχει χαραχθεί ο κινητός μέσος όρος των πραγματικών τιμών (μαύρο χρώμα) με περίοδο 255 τιμών. Με τον τρόπο αυτόν, γίνεται εξομάλυνση των αποτελεσμάτων καθιστώντας πιο εύκολη την παρατήρηση της μεταβολής των δεικτών ως προς τον χρόνο. Επιπρόσθετα, οι πραγματικές τιμές των δεικτών έχουν χωριστεί σε τρεις περιοχές με διαφορετικά χρώματα τα οποία ορίζουν τη φάση του πλοίου. Πιο συγκεκριμένα, με μπλε χρώμα έχουν οριστεί τα αποτελέσματα των δεικτών πριν την επισκευή της έλικας (Propeller Repair), με πράσινο χρώμα τα αποτελέσματα μετά την επισκευή της έλικας (Propeller Repair) και πριν τον καθαρισμό της γάστρας και της έλικας (UHC & Propeller Polishing) και με μωβ χρώμα τα αποτελέσματα μετά τον καθαρισμό της γάστρας και της έλικας (UHC & Propeller Polishing). Τέλος, έχουν χαραχθεί οι ευθείες παρεμβολής των σημείων για κάθε περιοχή στην οποία οπτικοποιείται ο ρυθμός μεταβολής των δεικτών μεταξύ των γεγονότων και επομένως ο ρυθμός ανάπτυξης της ρύπανσης (το Excel χρησιμοποιεί τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων για να παρεμβάλει τα σημεία με μια ευθεία).

Στις *Εικόνες 51, 54, 57, 60, 63* στα διαγράμματα-κολώνες γίνεται καλύτερη οπτικοποίηση της επίδρασης της ρύπανσης της γάστρας και της έλικας και των γεγονότων επισκευής-συντήρησης στους δείκτες KPI. Πιο συγκεκριμένα, έχουν υπολογιστεί οι μέσες τιμές των δεικτών για τον 1^ο μήνα (αρχή περιόδου μελέτης), τον 6^ο μήνα (ένας μήνας έως πριν την επισκευή της έλικας), τον 7^ο μήνα (από την επισκευή της έλικας και για ένα μήνα), τον 13^ο μήνα (ένα μήνα έως τον καθαρισμό γάστρας και έλικας) και για τον 14^ο μήνα (από τον καθαρισμό γάστρας και έλικας και για ένα μήνα). Επίσης, σε κάθε κολώνα μέσης τιμής καταγράφεται και η τιμή της μέσης τιμής για κάθε μήνα. Έτσι, μπορεί εύκολα να παρατηρηθεί η επίδραση των συντηρήσεων-επισκευών και της ρύπανσης μεταξύ των γεγονότων.

Στις *Εικόνες 52, 55, 58, 61, 64* παρουσιάζονται τα ιστογράμματα στα οποία φαίνονται οι συχνότητες των τιμών των δεικτών KPI. Το πρώτο ιστογράμμα περιλαμβάνει όλη τη χρονική περίοδο μελέτης (14 μήνες) ενώ τα υπόλοιπα τρία αντιστοιχούν σε κάθε φάση του πλοίου (πριν την επισκευή της έλικας, μετά την επισκευή της έλικας και πριν τον καθαρισμό γάστρας και έλικας, μετά τον καθαρισμό γάστρας και έλικας).

Για τον δείκτη KPI 1 (Propeller Loading Coefficient) ο οποίος υπολογίστηκε για τον εντοπισμό της αλλαγής συμπεριφοράς ταχύτητας περιστροφής της έλικας, λόγω επισκευής της έλικας (Propeller Repair), παρατηρείται αύξηση κατά 12,5% (μείωση της απόδοσης) κατά το 1^ο εξάμηνο της μελέτης (πριν την επισκευή της έλικας) ενώ κατά το 2^ο εξάμηνο παρατηρείται αύξηση κατά 3,8% (μείωση της απόδοσης), μεταβολές που οφείλονται κατά κύριο λόγο στη ρύπανση της έλικας. Με την επισκευή της έλικας κατά τον 7^ο μήνα παρατηρείται μείωση του δείκτη κατά 31,4% (βελτίωση της απόδοσης) και με τον καθαρισμό της γάστρας και της έλικας τον 14^ο μήνα παρατηρείται αύξηση του δείκτη κατά 2,6% (μείωση της απόδοσης). Η λαθεμένη εκτίμηση του δείκτη για τον καθαρισμό της γάστρας και της έλικας κατά τον 14^ο μήνα οφείλεται στην ύπαρξη ελλειψών δεδομένων μετά του γεγονότος αυτού.

Για τον δείκτη KPI 2 (Speed Loss Indicator) παρατηρείται μείωση κατά 1,1% (μείωση της απόδοσης) το 1^ο εξάμηνο της μελέτης και μείωση κατά 9,8% (μείωση της απόδοσης) το 2^ο εξάμηνο με βασική αιτία την ανάπτυξη ρύπανσης στη γάστρα και στην έλικα. Με την επισκευή της έλικας κατά τον 7^ο μήνα παρατηρείται αύξηση του δείκτη (βελτίωση της απόδοσης) κατά 7,1% και με τον καθαρισμό της γάστρας και της έλικας τον 14^ο μήνα παρατηρείται αύξηση (βελτίωση της απόδοσης) κατά 5,2%.

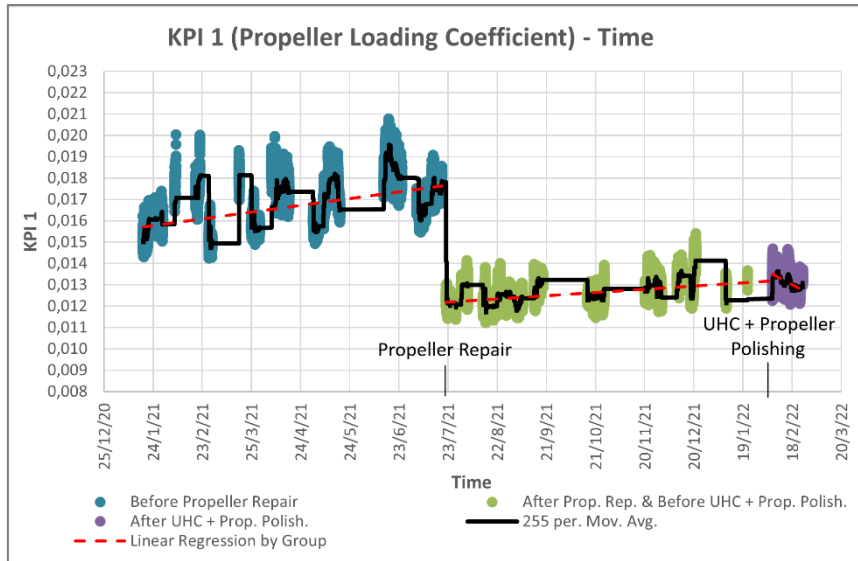
Για τον δείκτη KPI 3 (Power Increase Indicator) παρατηρείται αύξηση κατά 9,9% (μείωση της απόδοσης) το 1^ο εξάμηνο της μελέτης και αύξηση κατά 26,1% (μείωση της απόδοσης) το 2^ο εξάμηνο με βασική αιτία τη ρύπανση της γάστρας και της έλικας. Η επισκευή της έλικας τον 7^ο μήνα επέφερε μείωση του δείκτη (βελτίωση της απόδοσης) κατά 29% ενώ ο καθαρισμός της γάστρας και της έλικας τον 14^ο μήνα επέφερε μείωση του δείκτη (βελτίωση της απόδοσης) κατά 7,5%.

Για τον δείκτη KPI 4 (Wake Fraction Gain Indicator) παρατηρείται αύξηση κατά 29% (μείωση της απόδοσης) το 1^ο εξάμηνο της μελέτης και αύξηση κατά 9,6% (μείωση της απόδοσης) το 2^ο ως επίπτωση της ρύπανσης της γάστρας και της έλικας. Η επισκευή της έλικας τον 7^ο μήνα μείωσε τον δείκτη κατά 84,1% (βελτίωση της απόδοσης) ενώ με τον καθαρισμό της γάστρας και της έλικας τον 14^ο μήνα ο δείκτης μειώθηκε κατά 14,5% (βελτίωση της απόδοσης).

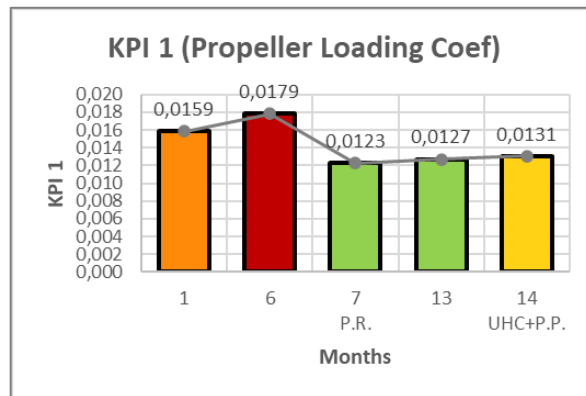
Για τον δείκτη KPI 5 (Propeller Fouling Indicator) παρατηρείται αύξηση κατά 18,8% (μείωση της απόδοσης) το 1^ο εξάμηνο της μελέτης και αύξηση κατά 15,1% (μείωση της απόδοσης) το 2^ο εξάμηνο ως αποτέλεσμα της ρύπανσης της έλικας στα διαστήματα αυτά. Με την επισκευή της έλικας τον 7^ο μήνα ο δείκτης μειώνεται κατά 47,2% (βελτίωση της απόδοσης) και με τον καθαρισμό της γάστρας και της έλικας τον 14^ο μήνα μειώνεται κατά 5,2% (βελτίωση της απόδοσης)

Στον Πίνακα 35 παρατίθενται συγκεντρωτικά οι μεταβολές των δεικτών KPI για τις επιδράσεις της ρύπανσης μεταξύ των γεγονότων επισκευής-συντήρησης και για τις επιδράσεις των ίδιων των γεγονότων.

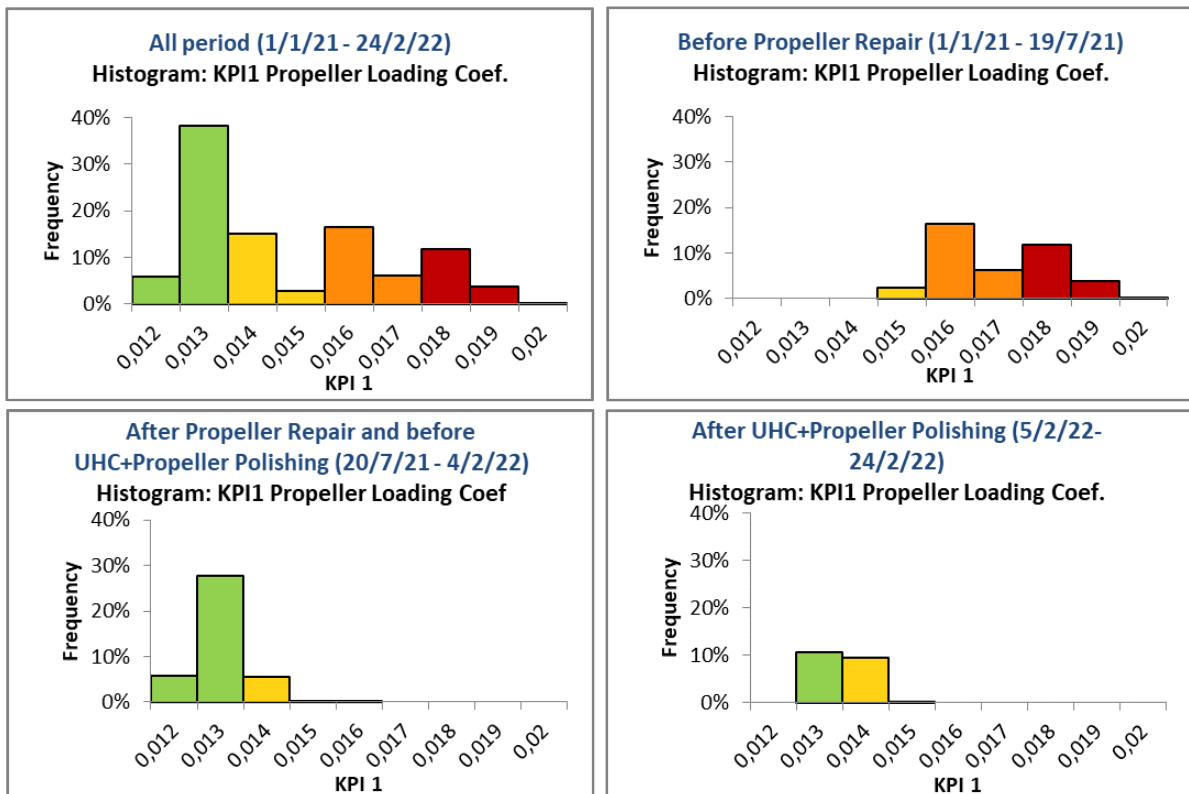
Παρατηρείται ότι για τον δείκτη KPI 4 (Wake Fraction Gain Indicator) γίνεται υπερεκτίμηση μετά από την επισκευή της έλικας. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην άμεση σύνδεση του δείκτη με την κατάσταση της έλικας τα χαρακτηριστικά και η συμπεριφορά της οποίας αλλάζουν μετά την επισκευή της (διαφοροποιήσεις στην απόδοση ροπής της έλικας, μετατόπιση του διαγράμματος ελεύθερης ροής της έλικας). Παρόλα αυτά, ο δείκτης είναι ακόμη ικανός να εντοπίζει τις επιδράσεις της ρύπανσης και των καθαρισμών.



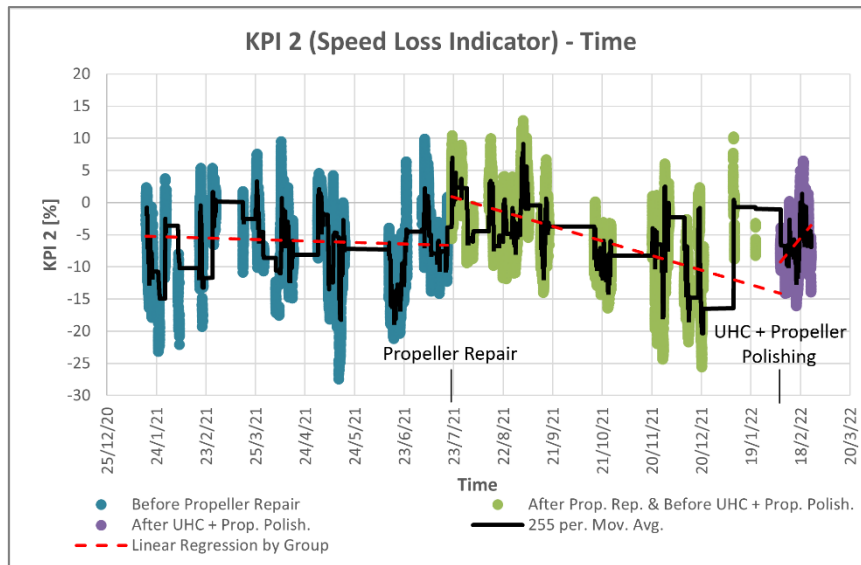
Εικόνα 50: Χρονοδιάγραμμα του δείκτη KPI 1



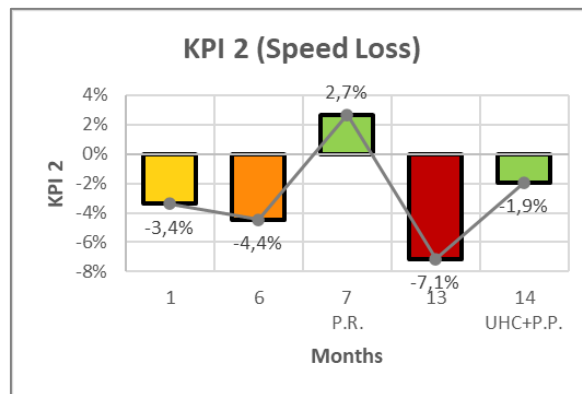
Εικόνα 51: Διάγραμμα με μηνιαίες μέσες τιμές του KPI 1



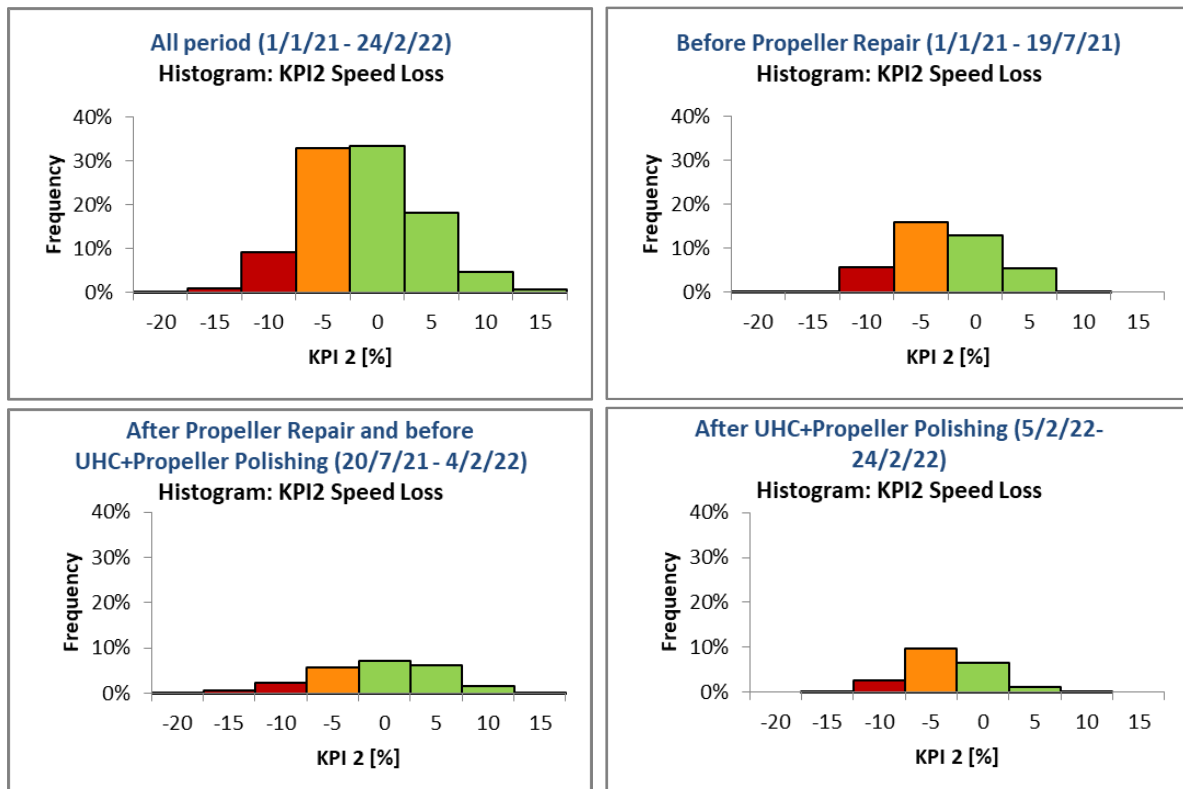
Εικόνα 52: Ιστογράμματα του δείκτη KPI 1 σε διαφορετικές χρονικές περιόδους



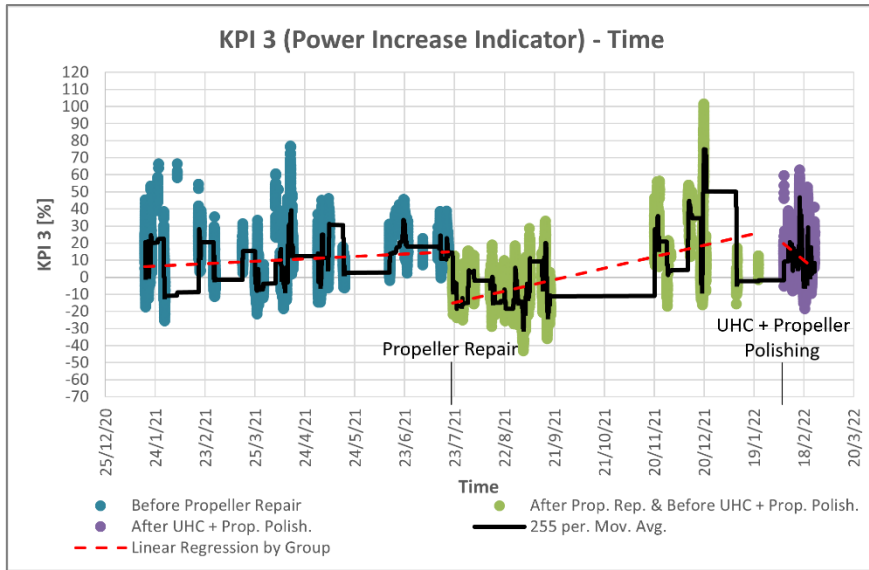
Εικόνα 53: Χρονοδιάγραμμα του δείκτη KPI 2



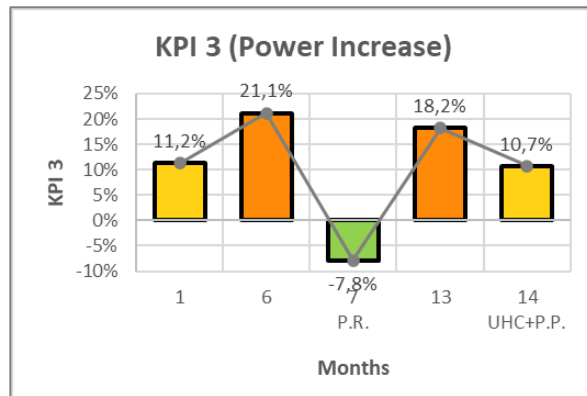
Εικόνα 54: Διάγραμμα με μηνιαίες μέσες τιμές του δείκτη KPI 2



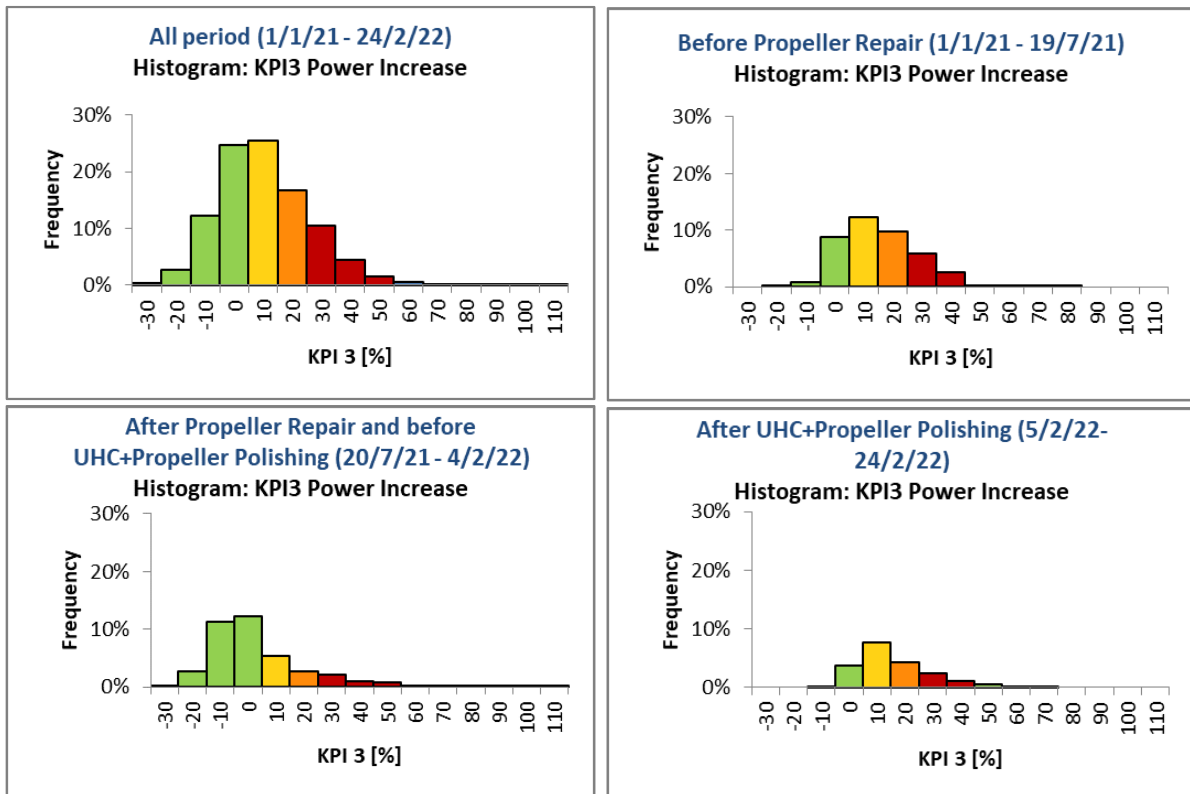
Εικόνα 55 Ιστογράμματα του δείκτη KPI 2 σε διαφορετικές χρονικές περιόδους



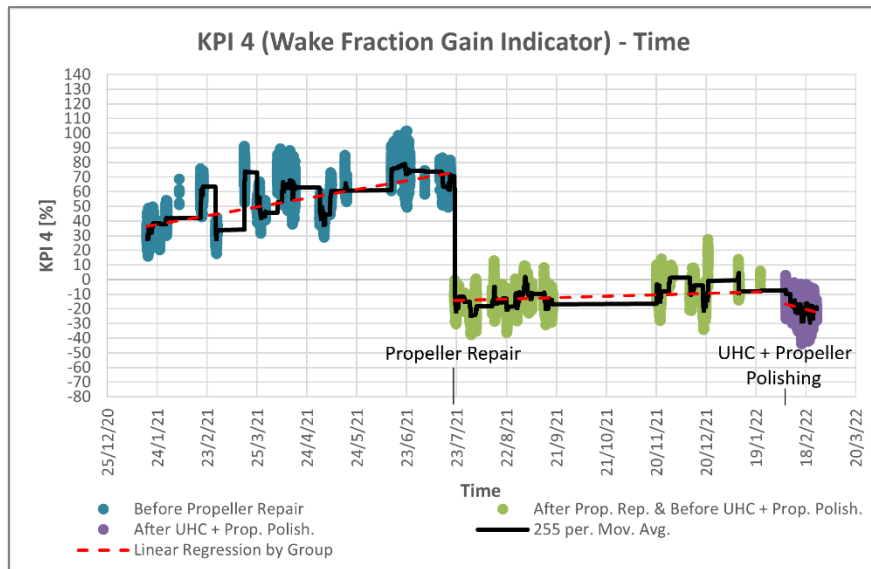
Εικόνα 56: Χρονοδιάγραμμα του δείκτη KPI 3



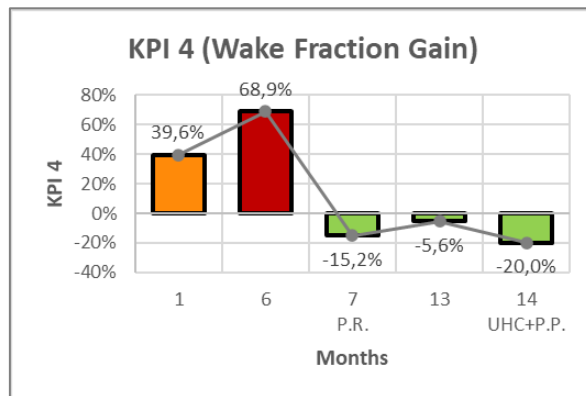
Εικόνα 57 Διάγραμμα με μηνιαίες μέσες τιμές του δείκτη KPI 3



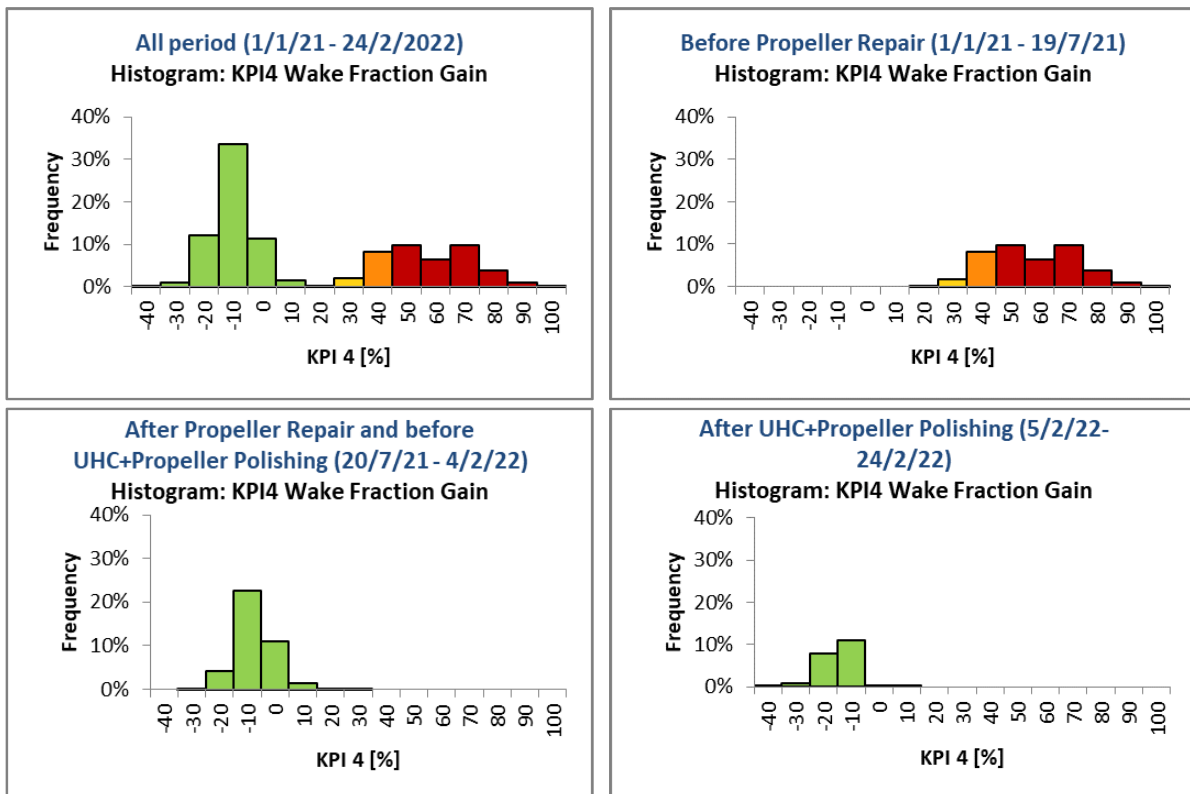
Εικόνα 58 Ιστογράμματα του δείκτη KPI 3 σε διαφορετικές χρονικές περιόδους



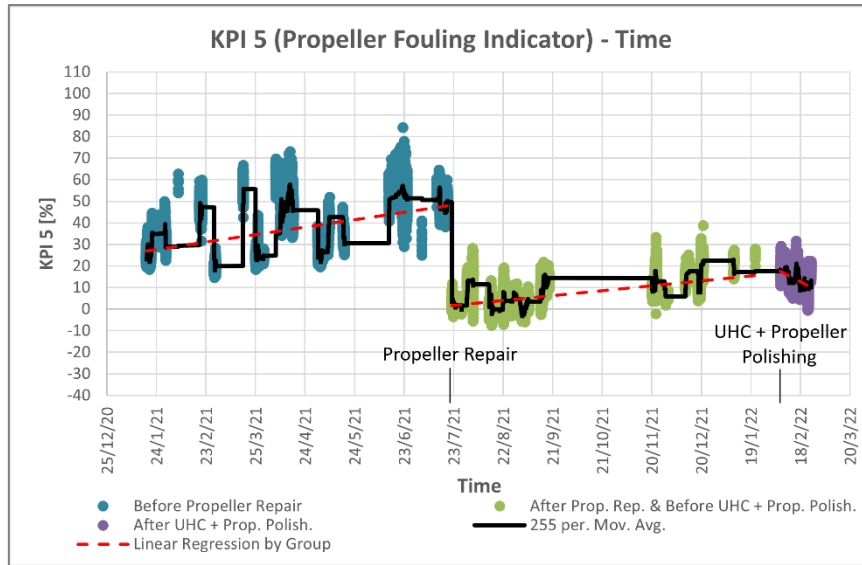
Εικόνα 59: Χρονοδιάγραμμα του δείκτη KPI 4



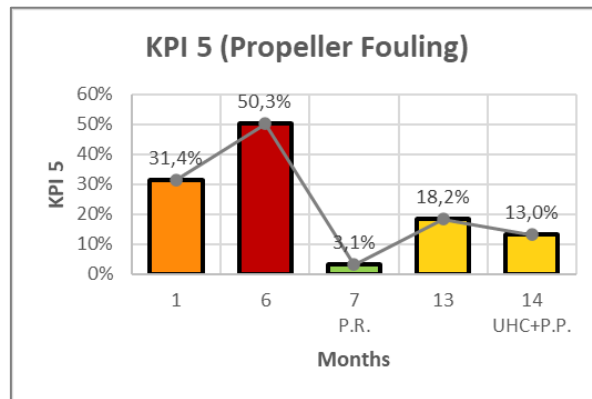
Εικόνα 60: Διάγραμμα με μηνιαίες μέσες τιμές του δείκτη KPI 4



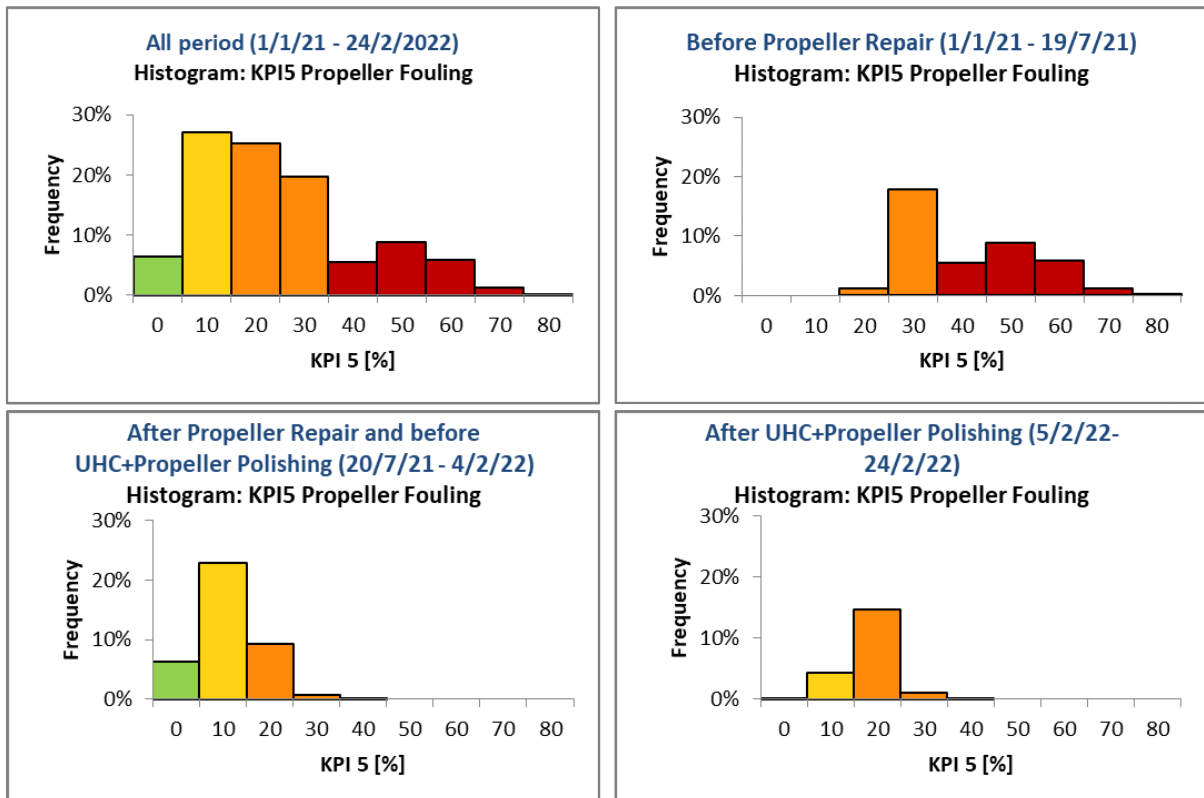
Εικόνα 61: Ιστογράμματα του δείκτη KPI 4 σε διαφορετικές χρονικές περιόδους



Εικόνα 62: Χρονοδιάγραμμα του δείκτη KPI 5



Εικόνα 63: Διάγραμμα με μηνιαίες μέσες τιμές του δείκτη KPI 5



Εικόνα 64: Ιστογράμματα του δείκτη KPI 5 σε διαφορετικές χρονικές περιόδους

Πίνακας 35: Αποτελέσματα δεικτών KPI

Performance change between maintenance events - Effects of maintenance events				
KPIs	Start – Propeller Repair [6 months]	Effect of Propeller Repair	Prop. Repair-UHC+Prop. Polish. [6 months]	Effect of UHC + Propeller Polishing
KPI1 (Propeller Loading Coef.)	12,5%	-31,4%	3,8%	2,6%
KPI2 (Speed Loss)	-1,1%	7,1%	-9,8%	5,2%
KPI3 (Power Increase)	9,9%	-29,0%	26,1%	-7,5%
KPI4 (Wake Fraction Gain)	29%	-84,1%	9,6%	-14,5%
KPI5 (Propeller Fouling)	18,8%	-47,2%	15,1%	-5,2%

6.2 Σύγκριση των συμβατικών KPIs Speed Loss και Power Increase με τους πιο στοχευμένους στη ρύπανση KPIs

Ο σκοπός αυτής της υπο-ενότητας είναι η σύγκριση των συμβατικών δεικτών KPI 2 (Speed Loss Indicator) και KPI 3 (Power Increase Indicator) που χρησιμοποιούνται στα πιο ανεπτυγμένα Ship Performance Monitoring Systems (SPMS) για την παρακολούθηση της επίδρασης της ρύπανσης της γάστρας και της έλικας στην απόδοση του πλοίου, με τους πιο στοχευμένους στη ρύπανση δείκτες KPI 4 (Wake Fraction Gain Indicator) και KPI 5 (Propeller Fouling Indicator) που προτείνονται στη μελέτη των Alessandro Carchen, Mehmet Atlar (2020) για τον καλύτερη εκτίμηση της επίδρασης της ρύπανσης γάστρας και έλικας. Για τον σκοπό αυτόν, υπολογίστηκε ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης Pearson (Pearson Correlation Coefficient) κατά τον οποίον υπολογίζεται η γραμμική συσχέτιση μεταξύ των μετρούμενων παραμέτρων. Επιπρόσθετα, δημιουργήθηκαν τα διαγράμματα με τους συνδυασμούς των δεικτών (KPI 2 - KPI 4, KPI 2 - KPI 5, KPI 3 - KPI 4 και KPI 3 - KPI 5) για την οπτικοποίηση της συσχέτισής τους.

Για τον υπολογισμό του συντελεστή Pearson (PCC) για κάθε ζεύγος KPI χρησιμοποιήθηκε η λειτουργία του excel = $Pearson(array1;array2)$ η οποία χρησιμοποιεί την εξής μαθηματική σχέση:

$$PCC = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (6.2.1)$$

Όπου:

- x_i : Οι τιμές της παραμέτρου x
- \bar{x} : Η μέση τιμή όλων των τιμών της παραμέτρου x
- y_i : Οι τιμές της παραμέτρου y
- \bar{y} : Η μέση τιμή όλων των τιμών της παραμέτρου y

n: Ο αριθμός των δεδομένων

Στον Πίνακα 36 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών γραμμικής συσχέτισης κατά Pearson και στον Πίνακα 37 οι κατηγορίες βαθμού συσχέτισης. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι οι δείκτες KPI 4 (Wake Fraction Gain Indicator) και KPI 5 (Propeller Fouling Indicator) έχουν ισχυρή γραμμική συσχέτιση με τον δείκτη KPI 1 (Propeller Loading Coefficient), εφόσον εξαρτώνται από την απόδοση της έλικας. Οι δείκτες KPI 2 (Speed Loss Indicator) και KPI 3 (Power Increase Indicator) έχουν επίσης ισχυρή γραμμική συσχέτιση εφόσον και οι δύο εξαρτώνται από την σχέση ισχύος – ταχύτητας και από την απόκλισή τους από τις τιμές αναφοράς των Sea Trials. Ισχυρή συσχέτιση επίσης παρουσιάζουν οι δείκτες KPI 4 (Wake Fraction Gain Indicator) και KPI 5 (Propeller Fouling Indicator) μεταξύ τους ως ταυτόχρονης επίδρασης της ρύπανσης στην γάστρα και στην έλικα. Οι δείκτες KPI 2 (Speed Loss Indicator) και KPI 3 (Power Increase Indicator) παρουσιάζουν αδύναμη γραμμική συσχέτιση με τον δείκτη KPI 4 (Wake Fraction Gain) όπου σημαίνει ότι η ρύπανση της γάστρας και της έλικας επηρεάζουν διαφορετικά τους δείκτες αυτούς. Τέλος, ο δείκτης KPI 2 (Speed Loss Indicator) έχει μέτρια συσχέτιση με τον δείκτη KPI 5 (Propeller Fouling Indicator) ενώ ο KPI 3 (Power Increase Indicator) παρουσιάζει οριακά ισχυρή συσχέτιση με τον δείκτη KPI 5.

Πίνακας 36: Γραμμική συσχέτιση κατά Pearson

Pearson Correlation					
	KPI 1 Propeller Loading Coef.	KPI 2 Speed Loss	KPI 3 Power Increase	KPI 4 Wake Fraction Gain	KPI 5 Propeller Fouling
KPI 1 Propeller Loading Coef.	1	-0,354	0,400	0,956	0,966
KPI 2 Speed Loss		1	-0,884	-0,193	-0,453
KPI 3 Power Increase			1	0,221	0,525
KPI 4 Wake Fraction Gain				1	0,878
KPI 5 Propeller Fouling					1

Πίνακας 37: Κατηγοριοποίηση ισχύος γραμμικής συσχέτισης κατά Pearson

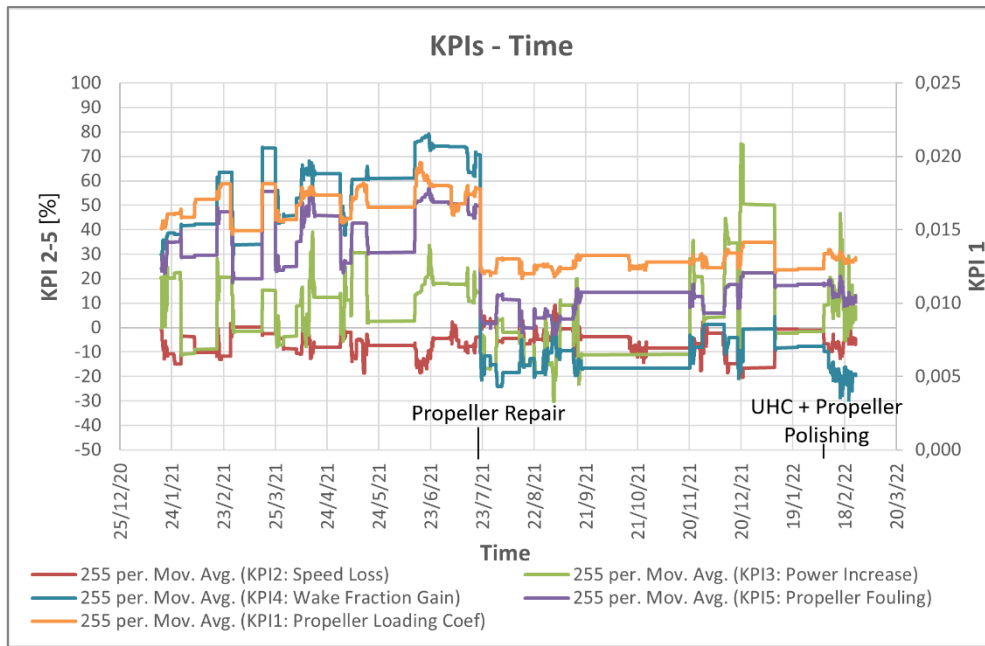
Correlation Strength	
(PCC) value	Strength
$ PCC = 1$	Perfect Correlation
$0,5 < PCC < 1$	Strong
$0,3 < PCC < 0,5$	Moderate
$0 < PCC < 0,3$	Weak

Στην *Εικόνα 65* παρουσιάζονται τα διαγράμματα των συνδυασμών των KPIs τα οποία έχουν χωριστεί σε τρεις περιοχές (κόκκινο χρώμα το εξάμηνο πριν την επισκευή της έλικας, πράσινο χρώμα το εξάμηνο μετά την επισκευή της έλικας και μωβ χρώμα ο ένας μήνας μετά τον καθαρισμό της γάστρας και της έλικας). Μπορεί να παρατηρηθεί η μεγαλύτερη ευαισθησία των δεικτών KPI 4 (Wake Fraction Gain Indicator) και KPI 5 (Propeller Fouling) συγκριτικά με τους συμβατικούς δείκτες KPI 2 (Speed Loss Indicator) και KPI 3 (Power Increase Indicator) στα γεγονότα επισκευής και συντήρησης αλλά και στη ρύπανση μεταξύ αυτών των γεγονότων.



Εικόνα 65: Διαγράμματα συνδυασμών δεικτών KPI

Στην *Εικόνα 66* παρουσιάζεται το κοινό χρονοδιάγραμμα των Δεικτών Αξιολόγησης της Απόδοσης KPIs όπου μπορεί να εξεταστεί η συμπεριφορά του κάθε δείκτη ως προς το χρόνο.



Εικόνα 66: Κοινό χρονοδιάγραμμα δεικτών KPI

7. Συμπεράσματα και περαιτέρω μελέτη

7.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία γίνεται μελέτη εφαρμογής Δεικτών Αξιολόγησης της Απόδοσης KPIs για την εκτίμηση της επίδρασης της ανάπτυξης βιο-ρύπανσης στη βρεχόμενη επιφάνεια της γάστρας και στην έλικα, στην απόδοση του πλοίου.

Για να είναι εφικτός και αξιόπιστος ο υπολογισμός των δεικτών KPI είναι μεγάλης σημασίας η σωστή προετοιμασία και επεξεργασία των επιχειρησιακών δεδομένων η οποία αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 3. Αρχικά, πρέπει να ελέγχεται εάν είναι διαθέσιμα όλα τα επιχειρησιακά δεδομένα που είναι απαραίτητα για τον υπολογισμό των δεικτών KPI τα οποία αντλούνται από τους αντίστοιχους εγκατεστημένους αισθητήρες καθώς και τα δεδομένα αναφοράς τα οποία λαμβάνονται από τις δοκιμές θαλάσσης (Sea Trials) και τα πειράματα δεξαμενής (Towing Tank Model Test). Στην περίπτωση της συγκεκριμένης εργασίας τα δεδομένα υψηλής συχνότητας δειγματοληψίας συμπληρώθηκαν από τις ημερήσιες αναφορές (noon reports) για την επίτευξη ενός ολοκληρωμένου αρχείου δεδομένων. Στη συνέχεια, πρέπει να αφαιρούνται τα κενά τα οποία μπορεί να οφείλονται σε στιγμιαία δυσλειτουργία των αισθητήρων. 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) και των πειραμάτων δεξαμενής (Towing Tank Model Test) το οποίο επιτυγχάνεται με τη διαδικασία φιλτραρίσματος (filtering) και κανονικοποίησης-διόρθωσης (normalization). 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 και η θερμοκρασία θάλασσας αποκλίνει συνήθως από την θερμοκρασία θάλασσας αναφοράς των 15 °C. Έτσι, οφείλεται να διορθωθεί η αποδιδόμενη ισχύς για τις πρόσθετες αντιστάσεις που επιφέρουν αυτές οι συνθήκες (Κεφάλαιο 4). Στη συγκεκριμένη εργασία μεγαλύτερη συνεισφορά πρόσθετης αντίστασης είχε ο άνεμος με 58% επί της συνολικής αντίστασης, δεύτερη οι θαλάσσιοι ανεμογενείς κυματισμοί με 47% και η μικρότερη επιρροή οφείλεται στην απόκλιση της θερμοκρασίας θάλασσας από τη θερμοκρασία θάλασσας αναφοράς με -5%. Όμως, αξίζει να σημειωθεί ότι το ποσοστό επί της συνολικής συνεισφοράς αντίστασης της θερμοκρασίας θάλασσας ήταν 17% για θερμοκρασία θάλασσας 2 °C και -24% για θερμοκρασία θάλασσας 30 °C τα οποία αποτελούν σημαντικά ποσοστά και επομένως για πλοία που ταξιδεύουν σε πολύ κρύες ή πολύ ζεστές θάλασσες οφείλεται να γίνεται η διόρθωση αυτή.

Η επιλογή των δεικτών KPI για την παρακολούθηση της απόδοσης θεωρείται κρίσιμη για τη σωστή παρακολούθηση κάποιου φαινομένου. Στην περίπτωση της παρακολούθησης της επίδρασης της ανάπτυξης βιο-ρύπανσης στην γάστρα και στην έλικα στην απόδοση του πλοίου επιλέχθηκαν πέντε δείκτες KPI εκ των οποίων οι δύο θεωρούνται νέας προσέγγισης και πιο στοχευμένοι στο συγκεκριμένο πρόβλημα. Ο δείκτης KPI 1 (Propeller Loading Coefficient) αναπτύχθηκε για την επαλήθευση του εντοπισμού απότομης μεταβολής στην απόδοση αποδιδόμενης ισχύος – ταχύτητας περιστροφής έλικας κατά την επεξεργασία των

δεδομένων η οποία αποδίδεται στην επισκευή της έλικας. Ο δείκτης KPI 1 κατά την ανάλυση των αποτελεσμάτων στο *Κεφάλαιο 6* φαίνεται να επηρεάζεται από την ανάπτυξη βιο-ρύπανσης στη γάστρα και στην έλικα. Οι δύο δείκτες που χρησιμοποιούνται εκτενώς για την παρακολούθηση της μεταβολής της απόδοσης εξαιτίας της βιο-ρύπανσης γάστρας και έλικας είναι οι δείκτες KPI 2 (Speed Loss) και KPI 3 (Power Increase), δύο αξιόλογοι δείκτες οι οποίοι όμως δεν είναι ικανοί να παρακολουθούν αποκλειστικά την επίδραση της ρύπανσης στην απόδοση μη συνυπολογίζοντας και άλλες πηγές μεταβολής της απόδοσης (π.χ. απόδοση μηχανημάτων και συστημάτων του μηχανοστασίου). Για τον λόγο αυτό, υπολογίστηκαν επιπρόσθετα οι δείκτες KPI 4 (Wake Fraction Gain) και KPI 5 (Propeller Fouling) οι οποίοι υπολογίζουν την αύξηση του ποσοστού ομόρου που προκαλείται από την πάχυνση του οριακού στρώματος λόγω αύξησης της τραχύτητας της γάστρας που προκαλεί η ανάπτυξη της ρύπανσης. Ο δείκτης KPI 4 (Wake Fraction Gain) εκτιμά την επίδραση της ρύπανσης της γάστρας και της έλικας ενώ ο δείκτης KPI 5 (Propeller Fouling) τη ρύπανση της έλικας.

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων των δεικτών KPI συμπεραίνεται ότι και οι πέντε δείκτες είναι ικανοί να εντοπίζουν την μείωση της απόδοσης εξαιτίας της ρύπανσης καθώς και της αύξησης της απόδοσης κατά τα γεγονότα καθαρισμών και επισκευής, πέραν του KPI 1 (Propeller Loading Coefficient) ο οποίος δεν εντόπισε τον καθαρισμό γάστρας και έλικας. Έτσι, για την καλύτερη εκτίμηση της επίδρασης της βιο-ρύπανσης στην απόδοση της γάστρας και της έλικας προτείνεται η παρακολούθηση ενός συνόλου δεικτών KPI ώστε να μπορεί να γίνεται σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων και να λαμβάνονται πιο σωστές αποφάσεις.

7.2 Περαιτέρω μελέτη

Για τον υπολογισμό των Δεικτών Αξιολόγησης της Απόδοσης KPI 2 (Speed Loss Indicator) και KPI 3 (Power Increase Indicator) έγιναν οι απαραίτητες διορθώσεις της ισχύος για την επίδραση του καιρού (άνεμος, θαλάσσιοι ανεμογενείς κυματισμοί) και της θερμοκρασίας θάλασσας αλλά και οι διορθώσεις-κανονικοποιήσεις της ταχύτητας για τις αποκλίσεις των πραγματικών βυθισμάτων κάθε κατάστασης φόρτωσης από τα βυθίσματα των καταστάσεων φόρτωσης αναφοράς σύμφωνα με το πρότυπο ISO 19030 (2015) και με τις προτεινόμενες διαδικασίες της ITTC (2017). Για τον υπολογισμό των πιο στοχευμένων στη ρύπανση γάστρας και έλικας δεικτών KPI 4 (Wake Fraction Gain Indicator) και KPI 5 (Propeller Fouling Indicator) ενώ έγιναν οι διορθώσεις-κανονικοποιήσεις της ταχύτητας για τις αποκλίσεις των βυθισμάτων, δεν έγιναν διορθώσεις για την επίδραση του καιρού καθώς δεν υπάρχουν ακόμη οι αντίστοιχες διορθωτικές προτεινόμενες διαδικασίες για τις μετρήσεις της ώσης και της ροπής. Επομένως, για την βελτίωση του υπολογισμού των δεικτών KPI 4 και KPI 5 προτείνεται να βρεθεί διαδικασία διόρθωσης για την επίδραση του καιρού στις μετρήσεις ροπής και ώσης.

Κατά τη διαδικασία ανάλυσης των δεικτών KPI στο *Κεφάλαιο 6* παρατηρήθηκε υπερεκτίμηση των τιμών του δείκτη KPI 4 (Wake Fraction Gain Indicator) μετά την επισκευή της έλικας. Η υπερεκτίμηση των τιμών οφείλεται στην αλλαγή της συμπεριφοράς της έλικας ύστερα από την επισκευή της λόγω της μεταβολής των χαρακτηριστικών της και της συμπεριφοράς της σε ελεύθερη ροή. Η παρατήρηση αυτή αποδεικνύει την επιτυχία εντοπισμού αλλαγής της συμπεριφοράς της έλικας από τον δείκτη η οποία αποτελεί σημαντική πληροφορία κατά την παρακολούθηση της απόδοσης της γάστρας και της έλικας. Όμως, εφόσον εντοπιστεί μια τέτοια ανωμαλία στα αποτελέσματα οφείλεται να διορθώνεται και στη συγκεκριμένη

περίπτωση προτείνεται διόρθωση του διαγράμματος ελεύθερης ροής της έλικας και των χαρακτηριστικών της.

Βιβλιογραφία

Carchen A., Atlar M., (2020), Four KPIs for the assessment of biofouling effect on ship performance, University of Genoa, Strathclyde University

IMO, (2012), Resolution MEPC. 1/Circ.792, Guidance for Minimizing the Transfer of Invasive Aquatic Species as Biofouling (Hull Fouling) for Recreational Craft, International Maritime Organization

IMO, (2023), Resolution MEPC.377(80), 2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships, International Maritime Organization

ISO (2015), ISO 15016:2015-Ship and Marine Technology-Guidelines for the Assessment of Speed and Power Performance by Analysis of Speed Trial Data, International Organization for Standardization

ISO (2015), ISO 19030: Ships and marine technology - Measurement of changes in hull and propeller performance. Part 2: Default method, International Organization for Standardization

ITTC, (2011), Fresh Water and Seawater Properties, International Towing Tank Committee, 7.5-02-01-03

ITTC, (2011), Recommended Procedures and Guidelines: Resistance Test, International Towing Tank Committee, 7.5-02-02-01

ITTC, (2017), Quality System Manual, Recommended Procedures and Guidelines: 1978 ITTC Performance Prediction Method, International Towing Tank Committee, 7.5-0.2-0.3-01.4

ITTC, (2017), Quality System Manual, Recommended Procedures and Guidelines: Preparation, Conduct and Analysis of Speed/Power Trials, International Towing Tank Committee, 7.5-04-01-01.1

Πολίτης Γ., (2018), Αντίσταση και Πρόωση Πλοίου, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Κυρτάτος Ν., (2007), Βασικές Αρχές Πρόωσης Πλοίων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο