



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών  
Τομέας Μελέτης Πλοίου και Θαλασσίων Μεταφορών

# ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

---

*ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΤΗΣ ΓΑΣΤΡΑΣ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ  
ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ*

ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΤΖΑΤΖΙΜΑΚΗΣ

*ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΘΕΜΕΛΗΣ*

*ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2023*

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Για την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέποντα καθηγητή μου Νικόλαο Θεμελή για την ανάθεση της εργασίας καθώς και για την αμέριστη βοήθεια και κατανόησή του, σε όλο το διάστημα της προετοιμασίας αυτής.

Επιπλέον, είμαι ευγνώμων για τη ψυχολογική στήριξη και την ενθάρρυνση που μου παρείχε τόσο η οικογένειά μου, όσο και οι φίλοι μου και συμφοιτητές μου, αλλά κυρίως οι συνάδελφοί μου και η υπεύθυνη μου Μαρία Βιτωράτου από τον οργανισμό Lloyd's Register. Η καθοδήγησή τους υπήρξε καθοριστική στην πορεία της διπλωματικής μου εργασίας.

Ολοκληρώνοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την εταιρεία TECHNOMAR SHIPPING INC., για τη διάθεση των πρωτογενών δεδομένων για τα τέσσερα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στο υπολογιστικό μέρος της μελέτης.

## ABSTRACT

The current thesis' objective is to examine whether raw operational data, obtained from the onboard Noon Reports of four sister container vessels, could prove which vessel(s) has/have been retrofitted with a more efficient antifouling hull coating, while also illustrating any difference in the vessels' performance due to the higher extent of hull fouling.

The subject thesis consists of a theoretical segment, where a summary of the biofouling of ships is presented and how this could affect the vessels' energy efficiency, from an operational and environmental scope, and from a computational segment, where the ISO 19030 (Ships and marine technology - Measurement of changes in hull and propeller performance) methodology and the ITTC Recommendations' method for calculating the vessel's wind and wave resistance, have been applied in the sorted Noon Reports' data, in order to evaluate the impact of the hull coating, if any.

Additionally, a KPI for the propeller performance has been calculated for the four vessels under study, in order to verify and confirm, whether the conclusions of the above investigation are in line with the KPI's values and how this is depicted in terms of vessel's speed reduction and required power increase.

## ΣΥΝΟΨΗ

Ο στόχος της παρούσης εργασίας έγκειται στο να μελετήσει εάν πρωτογενή δεδομένα, προερχόμενα από καθημερινές καταγραφές εν πλω (Noon Reports) τεσσάρων αδερφών πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, δύνανται να αποδείξουν ποιο (ή ποια) πλοία έχουν επιστρωθεί με ενισχυμένη αντιρρυπαντική επίστρωση. Ταυτόχρονα, η εργασία επιδιώκει να υποδείξει όποια διαφορά διαπιστώνεται στην απόδοση των πλοίων εξαιτίας του μεγάλου εύρους της ρύπανσης της γάστρας.

Η εργασία αποτελείται από το θεωρητικό μέρος, όπου παρουσιάζεται συνοπτικά η έννοια της ρύπανσης της γάστρας των πλοίων και πώς αυτή επηρεάζει την ενεργειακή αποδοτικότητα τους, από λειτουργικής και περιβαλλοντικής πλευράς, καθώς και από το υπολογιστικό μέρος, όπου εφαρμόζονται το πρότυπο ISO 19030 και η μέθοδος της ITTC για τον προσδιορισμό της αντίστασης του ανέμου και των κυμάτων ώστε να διορθωθούν κατάλληλα τα πρωτογενή δεδομένα, βάσει ορισμένων καταστάσεων αναφοράς, και να διαπιστωθεί ο θετικός αντίκτυπος της αντιρρυπαντικής επίστρωσης, αν είναι εφικτό.

Επιπρόσθετα, υπολογίζεται, και για τα τέσσερα υπό μελέτη πλοία, ένας KPI για την απόδοση της έλικας, στοχεύοντας στην επιβεβαίωση, εάν τα συμπεράσματα της παραπάνω διαδικασίας συνάδουν με τις τιμές του KPI καθώς και πώς αυτό απεικονίζεται, από άποψη αύξησης της απαιτούμενης ισχύος και περιορισμού της ταχύτητας των πλοίων εν λειτουργία.

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

<b>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....</b>	<b>2</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>3</b>
<b>ΣΥΝΟΨΗ.....</b>	<b>4</b>
<b>ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ.....</b>	<b>5</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>10</b>
1.1 Ερευνητικό Υπόβαθρο .....	10
1.2 Στόχος Εργασίας .....	12
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....</b>	<b>15</b>
2.1 Βασικές Έννοιες και Ορισμοί.....	15
2.2 Ρύπανση Γάστρας και Ενεργειακή Αποδοτικότητα .....	17
2.3 Αντιρρυπαντικά Συστήματα Γάστρας .....	18
2.4 Συλλογή Δεδομένων για τη Ρύπανση Γάστρας .....	20
2.5 Μελέτη και Ανάλυση Δεδομένων για τη Ρύπανση της Γάστρας .....	22
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΠΡΟΤΥΠΑ.....</b>	<b>24</b>
3.1 Παρουσίαση ISO 19030 .....	24
3.2 Βασικές Αρχές.....	25
3.3 Διαδικασία συλλογής δεδομένων .....	31
3.4 Παρουσίαση ITTC.....	32
3.5 Πρόσθετη Αντίσταση Ανέμου .....	33
3.5.1 Διόρθωση για την αντίσταση ανέμου και πρόσθετη ισχύς .....	33
3.5.2 Υπολογισμός Μεταβλητών Μεθόδου Fujiwara .....	37
3.6 Πρόσθετη Αντίσταση Κυματισμού.....	40
3.6.1 STAWAVE-1 .....	40
3.6.2 STAWAVE – 2.....	42
3.6.3 Υπολογισμός πρόσθετης ισχύος κυματισμού και τελικώς διορθωμένης αποδιδόμενης ισχύς ...	46
3.7 Δείκτες αποδοτικότητας.....	46

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΣΥΛΛΟΓΗ ΚΑΙ ΑΡΧΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....</b>	<b>48</b>
4.1 Μεθοδολογία.....	48
4.2 Συλλογή και Φιλτράρισμα Δεδομένων.....	50
4.3 Επεξεργασία Δεδομένων.....	52
4.4 Στατιστική ανάλυση δεδομένων.....	52
4.5 Μελέτη βυθισμάτων πλοίων.....	57
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΕΙΚΤΩΝ ΑΠΟΔΟΣΗΣ.....</b>	<b>60</b>
5.1 Διόρθωση ισχύος.....	60
5.1.1 Διόρθωση για την αντίσταση ανέμου.....	60
5.1.2 Διόρθωση για την αντίσταση κυματισμού.....	63
5.2 Αναμενόμενες Τιμές Ταχύτητας / Ισχύος $V_e/ P_e$ .....	67
5.3 Δείκτες Αποδοτικότητας.....	74
5.3.1 Δείκτης απώλειας ταχύτητας.....	75
5.3.2 Δείκτης απόκλισης ισχύος.....	80
5.3.2 Δείκτης απόδοσης φορτίου έλικας (KPI).....	85
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ, ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ.....</b>	<b>90</b>
Συμπεράσματα.....	90
Προτάσεις.....	92
Περιορισμοί Έρευνας.....	93
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>94</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : ΚΩΔΙΚΕΣ ΜΑΤΛΑΒ.....</b>	<b>96</b>
Συντελεστές Αντίστασης Ανέμου (Fujiwara).....	96
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β : ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ STAWAVE-1.....</b>	<b>99</b>
Παρουσίαση Αποτελεσμάτων.....	99
Κώδικας υπολογισμού STAWAVE-1 (MATLAB).....	100
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΔΙΟΡΘΩΜΕΝΗ ΙΣΧΥ ΜΟΝΟ ΛΟΓΩ</b>	
<b>ΑΝΕΜΟΥ.....</b>	<b>101</b>

## ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ ΚΑΙ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Εικόνα 1 - Παράδειγμα ρυπασμένης γάστρας (IMO, 2022b) .....	16
Σχήμα 1 - Δείκτης απόκλισης ισχύος (Themelis, 2020) .....	30
Σχήμα 2 - Δείκτης απώλειας ταχύτητας (Themelis, 2020) .....	30
Σχήμα 3 - Σύμβαση της κατεύθυνσης του πλοίου (ISO, 2016) .....	34
Σχήμα 4 - Σύμβαση των κατευθύνσεων του ανέμου(ISO, 2016) .....	35
Σχήμα 5 - Σύστημα συντεταγμένων και παράμετροι εισόδου της μεθόδου Fujiwara (ITTC, 2021).....	40
Σχήμα 6 - Μήκος $L_{BWL}$ (ITTC, 2021) .....	41
Σχήμα 7 - Γραφική απεικόνιση πρόσθετης αντίστασης κυματισμού STAWAVE-2 (ITTC, 2021) .....	42
Σχήμα 8 - Διάγραμμα ροής υπολογιστικού μέρους .....	50
Σχήμα 9 - Μέση Ταχύτητα - ΠΛΟΙΟ Α.....	53
Σχήμα 10 - Μέση Ταχύτητα - ΠΛΟΙΟ Β.....	53
Σχήμα 11 - Μέση Ταχύτητα - ΠΛΟΙΟ Γ .....	54
Σχήμα 12 - Μέση Ταχύτητα - ΠΛΟΙΟ Δ.....	54
Σχήμα 13 - Ιστόγραμμα κατανομής συχνότητας δεδομένων ισχύος ανέμου.....	55
Σχήμα 14 - Ιστόγραμμα κατανομής συχνότητας δεδομένων σημαντικού ύψους κύματος .....	55
Σχήμα 15 - Ιστόγραμμα κατανομής συχνότητας δεδομένων μετρούμενης ισχύος πλοίου.....	56
Σχήμα 16 - Ιστόγραμμα κατανομής συχνότητας δεδομένων μέσου βυθίσματος .....	58
Σχήμα 17 - Συντελεστές διόρθωσης ανέμου ( $C_{da}$ ) συναρτήσει της γωνίας ανέμου.....	63
Σχήμα 18- Αδιαστατοποιημένη συνάρτηση μεταφοράς συναρτήσει του αδιαστατοποιημένου μήκους κύματος.....	64
Σχήμα 19 - Δεδομένα Ταχύτητας - Ισχύος (Βύθισμα Ερματισμού) - ΠΛΟΙΟ Α .....	70
Σχήμα 20 - Δεδομένα Ταχύτητας - Ισχύος (Βύθισμα Σχεδίασης) - ΠΛΟΙΟ Α .....	70
Σχήμα 21 - Δεδομένα Ταχύτητας - Ισχύος (Βύθισμα Ερματισμού) - ΠΛΟΙΟ Β.....	71
Σχήμα 22 - Δεδομένα Ταχύτητας - Ισχύος (Βύθισμα Σχεδίασης) - ΠΛΟΙΟ Β.....	71
Σχήμα 23 - Δεδομένα Ταχύτητας - Ισχύος (Βύθισμα Ερματισμού) - ΠΛΟΙΟ Γ .....	72
Σχήμα 24 - Δεδομένα Ταχύτητας - Ισχύος (Βύθισμα Σχεδίασης) - ΠΛΟΙΟ Γ .....	72

Σχήμα 25 - Δεδομένα Ταχύτητας - Ισχύος (Βύθισμα Ερματισμού) - ΠΛΟΙΟ Δ.....	73
Σχήμα 26 - Δεδομένα Ταχύτητας - Ισχύος (Βύθισμα Σχεδίασης) - ΠΛΟΙΟ Δ .....	73
Σχήμα 27 - Δείκτης απώλειας ταχύτητας - ΠΛΟΙΟ Α .....	76
Σχήμα 28 - Δείκτης απώλειας ταχύτητας - ΠΛΟΙΟ Β .....	77
Σχήμα 29 - Δείκτης απώλειας ταχύτητας - ΠΛΟΙΟ Γ.....	78
Σχήμα 30 - Δείκτης απώλειας ταχύτητας - ΠΛΟΙΟ Δ .....	79
Σχήμα 31 - Δείκτης απόκλισης ισχύος - ΠΛΟΙΟ Α.....	81
Σχήμα 32 - Δείκτης απόκλισης ισχύος - ΠΛΟΙΟ Β.....	82
Σχήμα 33 - Δείκτης απόκλισης ισχύος - ΠΛΟΙΟ Γ .....	83
Σχήμα 34 - Δείκτης απόκλισης ισχύος - ΠΛΟΙΟ Δ.....	84
Σχήμα 35 - Δείκτης απόδοσης φορτίου έλικας (ΚΡΙ) - ΠΛΟΙΟ Α .....	86
Σχήμα 36 - Δείκτης απόδοσης φορτίου έλικας (ΚΡΙ) - ΠΛΟΙΟ Β .....	87
Σχήμα 37 - Δείκτης απόδοσης φορτίου έλικας (ΚΡΙ) - ΠΛΟΙΟ Γ.....	88
Σχήμα 38 - Δείκτης απόδοσης φορτίου έλικας (ΚΡΙ) - ΠΛΟΙΟ Δ .....	89

## ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1 - Συσκευές μέτρησης δεδομένων σύμφωνα με το ISO 19030.....	28
Πίνακας 2 - Αδιάστατοι συντελεστές μεθόδου Fujiwara .....	39
Πίνακας 3 - Δείκτες Αποδοτικότητας κατά ISO 19030.....	47
Πίνακας 4 - Βασικά χαρακτηριστικά υπό μελέτη πλοίων.....	51
Πίνακας 5 - Μέση τιμή και τυπική απόκλιση δεδομένων .....	56
Πίνακας 6 - Παράμετροι εισόδου για την εφαρμογή της μεθόδου Fujiwara.....	62
Πίνακας 7 - Καταστάσεις αναφοράς .....	67
Πίνακας 8 - Ημερομηνίες Δραστηριοτήτων Συντήρησης για κάθε Πλοίο .....	74
Πίνακας 9 – Συνολικά στατιστικά δεδομένα δείκτη απόδοσης απώλειας ταχύτητας .....	75
Πίνακας 10 - Στατιστικά δεδομένα δείκτη απόδοσης απώλειας ταχύτητας ΠΛΟΙΟ Α.....	76
Πίνακας 11 - Στατιστικά δεδομένα δείκτη απόδοσης απώλειας ταχύτητας ΠΛΟΙΟ Β .....	77
Πίνακας 12 - Στατιστικά δεδομένα δείκτη απόδοσης απώλειας ταχύτητας ΠΛΟΙΟ Γ.....	78
Πίνακας 13 - Στατιστικά δεδομένα δείκτη απόδοσης απώλειας ταχύτητας ΠΛΟΙΟ Δ .....	79
Πίνακας 14 - Συνολικά στατιστικά δεδομένα δείκτη απόδοσης απόκλισης ισχύος.....	80
Πίνακας 15 - Στατιστικά δεδομένα δείκτη απόδοσης απόκλισης ισχύος ΠΛΟΙΟ Α.....	81



Πίνακας 16 - Στατιστικά δεδομένα δείκτη απόδοσης απόκλισης ισχύος ΠΛΟΙΟ Β.....	82
Πίνακας 17 - Στατιστικά δεδομένα δείκτη απόδοσης απόκλισης ισχύος ΠΛΟΙΟ Γ .....	83
Πίνακας 18 - Στατιστικά δεδομένα δείκτη απόδοσης απόκλισης ισχύος ΠΛΟΙΟ Δ.....	84
Πίνακας 19 - Συνολικά στατιστικά δεδομένα δείκτη απόδοσης φορτίου έλικας.....	85
Πίνακας 20 - Στατιστικά δεδομένα δείκτη απόδοσης φορτίου έλικας ΠΛΟΙΟ Α.....	86
Πίνακας 21 - Στατιστικά δεδομένα δείκτη απόδοσης φορτίου έλικας ΠΛΟΙΟ Β.....	87
Πίνακας 22 - Στατιστικά δεδομένα δείκτη απόδοσης φορτίου έλικας ΠΛΟΙΟ Γ .....	88
Πίνακας 23 - Στατιστικά δεδομένα δείκτη απόδοσης φορτίου έλικας ΠΛΟΙΟ Δ.....	89

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Ερευνητικό Υπόβαθρο

Η διεθνής ναυτιλιακή βιομηχανία είναι μία από τις σημαντικότερες κινητήριες δυνάμεις της παγκόσμιας οικονομίας. Παρά το μέγεθος της, το μερίδιο του περιβαλλοντικού της αποτυπώματος είναι σχετικά μικρό, αν αναλογιστούμε ότι σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Ναυτιλίας (International Maritime organization – IMO), η ναυτιλία ευθύνεται για το σχεδόν 3% των παγκόσμιων εκπομπών αερίων θερμοκηπίου (Greenhouse Gas – GHG) (IMO, 2020). Το γεγονός αυτό καθιστά τα εμπορικά πλοία ως το πιο «πράσινο» μεταφορικό μέσο αλλά ταυτόχρονα αφήνει πολλά περιθώρια για βελτίωση και μείωση των εκπομπών από τις θαλάσσιες δραστηριότητες. Στο πλαίσιο αυτό, τα τελευταία χρόνια ο IMO έχει υιοθετήσει διάφορες πρακτικές με στόχο την στρατηγική μείωση των εκπομπών GHG από τα πλοία με κύριο σκοπό τη μείωση των συνολικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τις διεθνείς θαλάσσιες μεταφορές κατά 50 τοις εκατό έως το 2050 σε σύγκριση με τα επίπεδα του 2008 (IMO, 2018).

Πέρα από το κανονιστικό πλαίσιο που κατευθύνει την ναυτιλία σε πιο βιώσιμες λύσεις, παρατηρείται γενικότερο ενδιαφέρον από τους διάφορους εμπλεκόμενους (πλοιοκτήτες, ναυλωτές, χρηματοπιστωτικά ιδρύματα) για την βελτιστοποίηση της απόδοσης των πλοίων, την μείωση κατανάλωσης καυσίμου και τελικά την μείωση των εκπομπών. Οι προσπάθειες αυτές, ανεξάρτητα από την μείωση των εκπομπών, γίνονται και λόγω των αυξήσεων στις τιμές των καυσίμων που αντιπροσωπεύουν το 50-60% του συνολικού κόστους της λειτουργίας των πλοίων. Η μείωση του κόστους αυτού κατά μόλις 1% μπορεί να σημαίνει εκατοντάδες χιλιάδες δολάρια στη λειτουργία μεγάλων πλοίων (Barreiro et al, 2022). Λόγω του σκληρού ανταγωνισμού στη ναυτιλία, η συλλογή λειτουργικών δεδομένων έχει σημαντικό αντίκτυπο στο εμπορικό προφίλ του πλοίου. Η βελτίωση της αποδοτικότητας, μέσω της βελτιστοποίησης παραγόντων όπως ο περιορισμός ισχύος, η αύξηση ταχύτητας, και η μείωση κατανάλωσης για ένα πλοίο έχει επακόλουθη συνέπεια το να γίνει περισσότερο ανταγωνιστικό σε σύγκριση με άλλα - παρόμοιας σχεδίασης και ηλικίας - πλοία.

Ήδη από τον σχεδιασμό και την φάση κατασκευής ενός πλοίου, πραγματοποιούνται εκτενείς μελέτες, στοχεύοντας στο να ελεγχθεί και να βελτιστοποιηθεί, τόσο η υδροδυναμική συμπεριφορά όσο και η απόδοση της μηχανολογικής εγκατάστασής του (λ.χ. να προσδιοριστεί η σχέση ταχύτητας-ισχύος κατά τις δοκιμές θαλάσσης, σε διάφορα βυθίσματα, ή η ειδική κατανάλωση καυσίμου σε συγκεκριμένα φορτία της κύριας μηχανής, διορθωμένες σε ISO συνθήκες). Παρ' όλα αυτά παρατηρούνται διαφορές ανάμεσα στην προβλεπόμενη συμπεριφορά του πλοίου και την πραγματική. Αυτό καθιστά αναγκαία την συνεχή παρακολούθηση της ενεργειακής αποδοτικότητας του πλοίου (Aldous et al, 2015).

Για τον λόγο αυτό, έχει θεσπιστεί πλέον στον κλάδο η προσπάθεια για συνεχή παρακολούθηση της ενεργειακής απόδοσης των πλοίων (energy performance monitoring). Αυτή η πρακτική αξιολογείται μέσω των Δεικτών Αξιολόγησης Απόδοσης (Key Performance Indicators - KPIs) που αντανακλούν το επίπεδο απόδοσης σε αριθμούς. Σύμφωνα με αυτή την τάση, οι πλοιοκτήτες έχουν εφαρμόσει πρακτικές για την καταγραφή πρωτογενών δεδομένων, κατά τη διάρκεια της λειτουργίας των πλοίων, με σκοπό την αξιολόγηση της απόδοσης των πλοίων τους και την εφαρμογή αντίστοιχων μέτρων. Τα δεδομένα που μπορούν να βοηθήσουν στην αξιολόγηση της ενεργειακής αποδοτικότητας ενός πλοίου συμπεριλαμβάνουν δεδομένα πορείας, ταχύτητας, ισχύος, κατευθύνσεις ανέμου και κυματισμών, βυθίσματος κατά την υπηρεσιακή λειτουργία των πλοίων. Η παρακολούθηση τους συχνά υποδεικνύει σαφείς διαφορές μεταξύ αναμενόμενης και πραγματικής απόδοσης, σε όλη τη διάρκεια λειτουργίας του σκάφους. Η συλλογή και η αξιολόγηση αυτών των δεδομένων δύναται να υποδείξει συγκεκριμένες τάσεις στην συμπεριφορά του πλοίου, κυρίως όσον αφορά την απαιτούμενη ισχύ για πρόωση, τη δυνατότητα επίτευξης συγκεκριμένων ταχυτήτων αλλά και την απαιτούμενη κατανάλωση καυσίμου. Αυτοί είναι παράγοντες οι οποίοι είναι άμεσα συνδεδεμένοι με το περιβαλλοντικό αντίκτυπο των πλοίων και τις εκπομπές GHG (Barreiro et al, 2022).

Δύο θεωρούνται οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν την ενεργειακή αποδοτικότητα και την απόδοση ενός πλοίου: η κατάσταση της γάστρας και η κατάσταση της έλικας, οι οποίοι, ωστόσο, αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους. Μια καθαρή γάστρα έχει ως αποτέλεσμα λιγότερη αντίσταση κατά την πρόωση του πλοίου και ως εκ τούτου, απαιτεί χαμηλότερη

ισχύ για μια συγκεκριμένη ταχύτητα, ενώ μια καλοσχεδιασμένη και καθαρή έλικα λειτουργεί στο βέλτιστο της απόδοσής της, αποδίδοντας περισσότερη ισχύ για πρόωση από ό,τι μια κακοσχεδιασμένη και ρυπασμένη έλικα. Η παρακολούθηση της κατάστασης και συμπεριφοράς της γάστρας και της έλικας με την πάροδο του χρόνου καθιστούν δυνατή την ένδειξη των επιπτώσεων των δραστηριοτήτων συντήρησης, επισκευής και μετασκευής αυτών στη συνολική ενεργειακή απόδοση του εν λόγω πλοίου. Ταυτόχρονα, οι προσπάθειες για βελτιστοποίηση της γάστρας και της έλικας μπορεί να βελτιώσει το εμπορικό προφίλ του πλοίου κάνοντας το πιο ανταγωνιστικό και κερδοφόρο για τον πλοιοκτήτη (Aldous et al, 2015).

## 1.2 Στόχος Εργασίας

Λαμβάνοντας υπόψιν το παραπάνω ερευνητικό υπόβαθρο, η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε με στόχο τη μελέτη της επίδρασης της ρύπανσης της γάστρας και της έλικας στην ενεργειακή αποδοτικότητα των πλοίων. Για την έρευνα χρησιμοποιήθηκαν πραγματικά δεδομένα για τέσσερα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (containerships) και έγινε ανάλυση με βάση τα ακόλουθα πρότυπα:

- Το διεθνές πρότυπο ISO 19030 - Ships and marine technology - Measurement of changes in hull and propeller performance
- ITTC 2021 (Quality System Manual, Recommended Procedures and Guidelines: Preparation, Conduct and Analysis of Speed/Power Trials)

Η μελέτη βασίστηκε στον υπολογισμό μέσων ποσοστών αύξησης της απαιτούμενης ισχύος και απώλειας της ταχύτητας, σε συνδυασμό με τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή ενός KPI για την απόδοση της έλικας.

Τα ερευνητικά ερωτήματα τα οποία κατευθύναν την έρευνα είναι τα εξής:

1. Ποια από τα τέσσερα υπό μελέτη πλοία έχουν επιστρωθεί με συμβατικά αντιρρυπαντικά χρώματα και ποια με χρώματα που έχουν βάση την σιλικόνη,
2. Πως εξηγείται η βελτιωμένη συμπεριφορά που παρατηρείται μεταξύ των πλοίων με διαφορετικές αντιρρυπαντικές επιστρώσεις,
3. Την αποτελεσματικότητα των εφαρμοζόμενων προτύπων και μεθοδολογιών για την αξιολόγηση της απόδοσης καθώς και την εγκυρότητα του αποτελέσματος

Το Κεφάλαιο 1 αποτελεί την εισαγωγή της παρούσας εργασίας. Παρατίθεται το βασικό υπόβαθρο της μελέτης καθώς επίσης και ο στόχος και τα ερευνητικά ερωτήματα τα οποία την διέπουν.

Στο Κεφάλαιο 2, γίνεται παρουσίαση του θεωρητικού υπόβαθρου όσον αφορά την ενεργειακή αποδοτικότητα των πλοίων και την επίδραση σε αυτή από την ρύπανση της γάστρας. Μέσα από βιβλιογραφική ανασκόπηση παρουσιάζονται οι βασικές έννοιες γύρω από την ρύπανση της γάστρας και τα συστήματα αντιρρύπανσης που εφαρμόζονται στα πλοία. Επιπλέον βιβλιογραφική αναφορά γίνεται και για την συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων ενεργειακής αποδοτικότητας των πλοίων που σχετίζονται με την ρύπανση της γάστρας.

Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται εκτενής αναφορά στο πρότυπο ISO 19030 το οποίο χρησιμοποιήθηκε στο πειραματικό μέρος της παρούσας εργασίας για την επεξεργασία των δεδομένων. Ακόμη γίνεται αναφορά και στη μέθοδο της ITTC σχετικά με τις συνιστάμενες διαδικασίες για την προετοιμασία, την διεξαγωγή και ανάλυση των δοκιμών ταχύτητας -ισχύος (ITTC, 2021) που χρησιμοποιείται κατά την διάρκεια των θαλάσσιων δοκιμών.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται η μεθοδολογία συλλογής δεδομένων και η αρχική τους επεξεργασία. Στο πρώτο στάδιο της μελέτης έγινε φιλτράρισμα και κανονικοποίηση των έγκυρων δεδομένων. Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθεται η στατιστική ανάλυση των

δεδομένων με σκοπό την εύρεση των έγκυρων δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για το εμπειρικό κομμάτι της μελέτης.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται αναλυτικά η μεθοδολογία και η διαδικασία εφαρμογής του ISO 19030 και της ITTC 2021. Σε αυτό το κεφάλαιο παρατίθενται αναλυτικά διαγράμματα και αντιπαραβολή της πραγματικής απόδοσης της γάστρας των υπό μελέτη πλοίων με την υποθετική απόδοση τους που προκύπτει από τις δοκιμές μοντέλων. Συγκεκριμένα γίνεται αναφορά στην διόρθωση ισχύος για την αντίσταση ανέμου και κυματισμού καθώς και στις αναμενόμενες τιμές ταχύτητας ισχύος. Επίσης σε αυτό το κεφάλαιο υπολογίζονται και παρουσιάζονται οι τρεις δείκτες αποδοτικότητας: ο δείκτης απώλειας ταχύτητας, ο δείκτης απόκλισης ισχύος και ο δείκτης απόδοσης φορτίου έλικας.

Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν έπειτα από την επεξεργασία των δεδομένων. Σε αυτό το κεφάλαιο βλέπουμε πως τα επιχειρησιακά δεδομένα μπορούν μέσα από επεξεργασία να μεταφραστούν σε πολύτιμες πληροφορίες για την επίδραση της ρύπανσης στη γάστρα στην ενεργειακή αποδοτικότητα των πλοίων. Ακόμη παρατίθεται περεταίρω συζήτηση σχετικά με τους περιορισμούς της έρευνας καθώς και προτάσεις αναφορικά με μελλοντική έρευνα σχετική με το θέμα της εργασίας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

### 2.1 Βασικές Έννοιες και Ορισμοί

Η ρύπανση (fouling) της γάστρας είναι ένα κοινό φαινόμενο στη ναυτιλιακή βιομηχανία που εμπίπτει και αυτό στο γενικότερο πρόβλημα της ενεργειακής αποδοτικότητας του παγκόσμιου στόλου. Το συγκεκριμένο πρόβλημα που απασχολεί την ναυτιλιακή βιομηχανία είναι η βιορύπανση της γάστρας (biofouling) που ορίζεται ως η συσσώρευση μικροοργανισμών, όπως φύκια και θαλάσσιοι μικροοργανισμοί στη γάστρα του πλοίου, η οποία μπορεί να αυξήσει την αντίσταση τριβής του πλοίου. Αυτό μπορεί τελικά να οδηγήσει σε μείωση της ταχύτητας, της αποδοτικότητας καυσίμου και της αύξησης των εκπομπών, οι οποίες έχουν αρνητικό αντίκτυπο στο περιβάλλον. Είναι σημαντικό επίσης να επισημάνουμε ότι το πρόβλημα της ρύπανσης της γάστρας παρατηρείται σε όλα τα πλοία, ανεξάρτητα από το είδος τους (Callow & Callow, 2002).

Υπάρχουν δύο τύποι βιορύπανσης του κύτους με βάση το μέγεθος των οργανισμών: macrofouling και microfouling. Ο πρώτος τύπος περιλαμβάνει τη συσσώρευση φυτών, οστρακοειδών και άλλων μεγάλων θαλάσσιων οργανισμών στη γάστρα. Ο δεύτερος τύπος, περιλαμβάνει την ανάπτυξη μικρότερων οργανισμών όπως φύκια και βακτήρια, τα οποία μπορούν να σχηματίσουν βιοφίλμ (γλίτσα) στη γάστρα. Επίσης διαχωρισμός μπορεί να γίνει και ανάλογα με την σκληρότητα του στρώματος της ρύπανσης που δημιουργείται. Η σκληρή ρύπανση (hard fouling), αναφέρεται στην προσκόλληση μακροσκοπικών οργανισμών που δημιουργούν ένα τραχύ, σκληρό στρώμα στην επιφάνεια της γάστρας. Η σκληρή ρύπανση είναι πιο δύσκολο να αφαιρεθεί και μπορεί να προκαλέσει σημαντική αντίσταση και κατανάλωση καυσίμου. Η μαλακή ρύπανση (soft fouling), όπως τα φύκια και άλλοι φυτικοί οργανισμοί, μπορεί επίσης να μειώσει την ταχύτητα του πλοίου και να αυξήσουν την κατανάλωση καυσίμου, αλλά είναι γενικά ευκολότερο να αφαιρεθεί από την γάστρα (Callow & Callow, 2002).

Ο κύριος τρόπος αντιμετώπισης της ρύπανσης στη γάστρα είναι η εφαρμογή αντιρρυπαντικών συστημάτων (Anti-Fouling Systems - AFS). Ως αντιρρυπαντικά

συστήματα για τα πλοία μπορούν να οριστούν οι τεχνολογίες ή μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την πρόληψη ή τη μείωση της ανάπτυξης θαλάσσιων οργανισμών στην επιφάνεια της γάστρας. Τα αντιρρυπαντικά αυτά συστήματα συνήθως περιλαμβάνουν τη χρήση επικαλύψεων (coatings) ή επεξεργασιών που καθιστούν την επιφάνεια του κύτους λιγότερο ελκυστική για τους θαλάσσιους οργανισμούς ή που απελευθερώνουν βιοκτόνους παράγοντες για να τους σκοτώσουν ή να τους αποτρέψουν. Η αποτελεσματικότητα των αντιρρυπαντικών συστημάτων εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως ο τύπος και η ποιότητα της επικάλυψης ή της επεξεργασίας, οι περιβαλλοντικές συνθήκες και οι συγκεκριμένοι θαλάσσιοι οργανισμοί που υπάρχουν στην περιοχή (Yebera et al, 2004).



Εικόνα 1 - Παράδειγμα ρυπασμένης γάστρας (IMO, 2022b)

Ωστόσο, η ρύπανση της γάστρας δεν είναι μόνο ένα πρόβλημα που αφορά μόνο την αποδοτικότητα των πλοίων αλλά και ένα γενικευμένο περιβαλλοντικό πρόβλημα για τους ωκεανούς. Το περιβαλλοντικό πρόβλημα που προκύπτει οφείλεται στην εξάπλωση χωροκατακτητικών ειδών (invasive species) και στην απελευθέρωση ρύπων στο θαλάσσιο οικοσύστημα που θέτουν σε κίνδυνο την διατήρηση της βιοποικιλότητας. Το πρόβλημα έχει ενταθεί τις τελευταίες δεκαετίες λόγω του διευρυμένου όγκου εμπορίου και των πολλαπλασιασμό των θαλάσσιων γραμμών. Οι επιπτώσεις σε πολλές περιοχές του κόσμου ήταν καταστροφικές. Τα ποσοτικά στοιχεία δείχνουν ότι ο ρυθμός των βιο-εισβολών συνεχίζει να αυξάνεται με ανησυχητικό ρυθμό και νέες περιοχές εισβάλλουν συνεχώς. Για



την αντιμετώπιση του περιβαλλοντικού αυτού ζητήματος, ο IMO έχει εφαρμόσει διάφορα ρυθμιστικά μέτρα, όπως η Διεθνής Σύμβαση για τον έλεγχο των επιβλαβών προστατευτικών συστημάτων αντιρρύπανσης στα πλοία (International Convention on the Control of Harmful Anti-Fouling Systems on Ships, 2001 - AFS Convention), η οποία στοχεύει στη μείωση της χρήσης επιβλαβών χημικών ουσιών στις υφαλοχρωματικές επικαλύψεις, και θέτει κατευθυντήριες γραμμές για τον έλεγχο και τη διαχείριση των υφαλοχρωμάτων στα πλοία (IMO, 2022a).

## 2.2 Ρύπανση Γάστρας και Ενεργειακή Αποδοτικότητα

Η παρακολούθηση λοιπόν της ρύπανσης της γάστρας και των επιπτώσεων της είναι σημαντική λόγω του αντίκτυπου που έχει στην ενεργειακή απόδοση των πλοίων. Μελέτη που διεξήχθη από τον Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό (IMO) διαπίστωσε ότι η ρύπανση μπορεί να αυξήσει την κατανάλωση καυσίμου ενός πλοίου έως και 40%. Αυτή η αυξημένη κατανάλωση καυσίμου οδηγεί σε αυξημένες εκπομπές, συμβάλλοντας στην κλιματική αλλαγή και την ατμοσφαιρική ρύπανση. Επιπλέον, η ρύπανση μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένο κόστος συντήρησης και μειωμένη διάρκεια ζωής των εξαρτημάτων του πλοίου, όπως όπως η έλικα και τα κύρια μηχανήματα, κάτι που επιβαρύνει οικονομικά τους πλοιοκτήτες και τους ναυλωτές (Barreiro et al, 2022).

Δεδομένου ότι η αντίσταση τριβής αποτελεί περίπου το 70- 85% της συνολικής αντίστασης της γάστρας για πλοία με γεμάτες γραμμές που κινούνται σε χαμηλές-μεσαίες ταχύτητες , η διατήρηση της τραχύτητας της γάστρας του πλοίου όσο το δυνατόν χαμηλότερα είναι ίσως ο πιο αποτελεσματικός τρόπος για τη μείωση της ισχύος και των περιττών αυξήσεων στην κατανάλωση καυσίμου και τις εκπομπές CO<sub>2</sub>. Ενώ έχει γίνει αρκετή έρευνα σχετικά με τη σημασία της της γάστρας και τον αντίκτυπό της στην απόδοση κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής ενός σκάφους, υπάρχουν πολλά περιθώρια βελτίωσης ακόμα. Ο καθαρισμός της γάστρας γίνεται κυρίως κατά την διάρκεια του δεξαμενισμού (dry-dock) των πλοίων, συνήθως κάθε πέντε χρόνια κατά τη διάρκεια των special surveys και κάθε 2,5 χρόνια στις ενδιάμεσες επιθεωρήσεις, και είναι ένα έξοδο λειτουργίας του πλοίου (Operation Expense – OPEX), το κόστος το επωμίζεται ο πλοιοκτήτης και όχι από τους υπεύθυνους διαχείρισης

του πλοίου. Οι πλοιοκτήτες λόγω του περιορισμένου χρόνου και προϋπολογισμού, δεν θα δώσει την απαραίτητη προσοχή στη γάστρα και συνήθως γίνεται καθαρισμός και επίστρωση της γάστρας μόνο σε σημεία και όχι συνολικά. Η πρακτική αυτή όμως της αντιμετώπισης του προβλήματος τοπικά και όχι συνολικά, σε σύντομο χρονικό διάστημα αποτελεί πρόβλημα καθώς, η πρόσθετη αντίσταση αυξάνεται σταθερά επηρεάζοντας την ταχύτητα του πλοίου και την αυξημένη κατανάλωση καυσίμου. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η ποιότητα της επιλεγμένης επίστρωσης παίζει επίσης σημαντικό ρόλο στην απόδοση. Επιπλέον, τέτοιες καταστάσεις καθιστούν αναγκαία τον έγκαιρο ή πρόωρο δεξαμενισμό του σκάφους πριν από την ολοκλήρωση του κανονικού κύκλου ζωής πέντε ετών μεταξύ των drydocks. Οι προκλήσεις για την αντιμετώπιση τέτοιων ζητημάτων εξακολουθούν να παραμένουν, καθώς η ευθύνη του ενός ενδιαφερόμενου μέρους δεν ευθυγραμμίζεται με τον άλλο ενδιαφερόμενο· ως εκ τούτου, στερείται συνοχής και συνεργία (Armstrong, & Banks, 2015).

Ακόμη, αν και η βιορύπανση εξελίσσεται με προβλέψιμο ρυθμό, δεν είναι μια ομοιόμορφη διαδικασία και αυτό αποτελεί μία ακόμη πρόκληση για την αντιμετώπιση της ρύπανσης της γάστρας. Για παράδειγμα, η βιολογική ρύπανση δεν κατανέμεται ομοιόμορφα στα ύφαλα των πλοίων, επειδή η γάστρα δεν είναι μία ομαλή και ομοιόμορφη επιφάνεια. Ορισμένα μοτίβα ταξιδιού και περιβαλλοντικοί παράγοντες έχουν παρατηρηθεί ότι επηρεάζουν την ποικιλομορφία (ποικιλία ειδών) και την ποσότητα των βιολογικών εναποθέσεων που παρατηρούνται στις γάστρες των εμπορικών πλοίων. Οι παράγοντες που ενδέχεται να επηρεάσουν το ρυθμό βιορύπανσης περιλαμβάνουν: περιόδους αγκυροβολίου, ταχύτητα και διάρκεια ταξιδιού, και περιβαλλοντικοί παράγοντες (λ.χ. αλατότητα ή θερμοκρασία νερού) (Koboενίς, Bebić, & Kurtela, 2018).

### 2.3 Αντιρρυπαντικά Συστήματα Γάστρας

Ένας πλέον σύνηθες τρόπος για την πρόληψή και την απομάκρυνση της ρύπανσης της γάστρας είναι η εφαρμογή αντιρρυπαντικών επικαλύψεων στη γάστρα. Αυτές οι επικαλύψεις περιέχουν βιοκτόνα που σκοτώνουν ή απωθούν τους θαλάσσιους οργανισμούς.

Υπάρχουν δύο τύποι αντιρρυπαντικών επικαλύψεων, αυτές που έχουν σχεδιαστεί για να απελευθερώνουν βιοκτόνα με την πάροδο του χρόνου, και αυτές που περιέχουν βιοκτόνα ενσωματωμένα στο χρώμα. Μια άλλη αντιρρυπαντική μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι υπερήχων υφαλοχρώματα, όπου τα υπερηχητικά κύματα χρησιμοποιούνται για να διαταράξουν την προσκόλληση των θαλάσσιων οργανισμών στο κύτος (Yebrá et al, 2004).

Παραδοσιακά από την αρχή της εμφάνισης αυτών των συστημάτων είχαν ενσωματωμένες τοξικές ουσίες, συμπεριλαμβανομένου του χαλκού και του τριβουτυλικού κασσιτέρου (TBT). Η ευρεία χρήση τοξικών ουσιών σε τέτοια χρώματα είχε ως αποτέλεσμα υψηλά επίπεδα μόλυνσης του περιβάλλοντος και αρνητικές επιπτώσεις τους στο θαλάσσιο οικοσύστημα. Ο IMO απαγόρευσε την εφαρμογή χρωμάτων TBT από 2008 (AFS Convention and EC regulation No. 782/2003) και έτσι αναπτύχθηκαν νέες επικαλύψεις, μη τοξικές. Αυτά δεν εμποδίζουν την συσσώρευση βιορρύπανσης, αλλά μειώνουν την αντοχή προσάρτησης έτσι ώστε όταν το σκάφος βρίσκεται σε κίνηση τυχόν συσσωρευμένα βιολογικά κατάλοιπα απομακρύνονται καθώς αυξάνεται η αντίσταση τριβής. Ωστόσο, οι επικαλύψεις αυτές έχουν περιορισμένη εφαρμογή καθώς είναι αποτελεσματικές μόνο σε ταχύπλοα σκάφη ή πλοία με μεγάλες ταχύτητες (IMO, 2022).

Γενικά υπάρχουν επικαλύψεις με βάση το χαλκό που απελευθερώνουν ιόντα χαλκού στο νερό, τα οποία αναστέλλουν την ανάπτυξη θαλάσσιων οργανισμών. Οι επικαλύψεις με βάση το χαλκό είναι αποτελεσματικές σε ένα ευρύ φάσμα θαλάσσιων περιβαλλόντων και είναι σχετικά φθηνές. Πλέον είναι διαθέσιμες και πολλές επιστρώσεις με βάση τη σιλικόνη οι οποίες είναι συνήθως πιο ακριβές από τις επικαλύψεις με βάση το χαλκό, αλλά είναι πιο αποτελεσματικές στην πρόληψη της ρύπανσης του ωκεανού. Οι επικαλύψεις με βάση τη σιλικόνη είναι επίσης λιγότερο πιθανό να φθαρούν με την πάροδο του χρόνου (Yebrá et al, 2004; Dafforn et al, 2011).

Ακόμη στην αγορά είναι διαθέσιμες και υβριδικές επικαλύψεις που συνδυάζουν χαλκό και σιλικόνη για να παρέχουν μια πιο αποτελεσματική και μακράς διάρκειας αντιρρυπαντική λύση. Οι υβριδικές επικαλύψεις είναι συνήθως ακριβότερες από τις επικαλύψεις με βάση τον χαλκό, αλλά είναι λιγότερο πιθανό να απαιτούν συχνή εκ νέου εφαρμογή. Τέλος

υπάρχουν και μη τοξικές επικαλύψεις που χρησιμοποιούν μη τοξικά υλικά, όπως φυσικά πολυμερή, για την πρόληψη της ρύπανσης. Οι μη τοξικές επικαλύψεις είναι φιλικές προς το περιβάλλον, αλλά μπορεί να μην είναι τόσο αποτελεσματικές όσο άλλοι τύποι επικαλύψεων (Dafforn et al, 2011).

Υπάρχουν διάφοροι παράγοντες για την επιλογή των συστημάτων antifouling στα πλοία. Σύμφωνα με τον IMO, μερικοί παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την επιλογή ενός προστατευτικού συστήματος υφαλοχρωματισμού περιλαμβάνουν (IMO ,2011):

1. Τις προγραμματισμένες περιόδους μεταξύ των dry dock,
2. Την ταχύτητα του πλοίου – διαφορετικά προστατευτικά συστήματα υφαλοχρωματισμού έχουν σχεδιαστεί για τη βελτιστοποίηση της αντιρρυπαντικής απόδοσης για συγκεκριμένες ταχύτητες πλοίου,
3. Το προφίλ εμπορικής λειτουργίας του πλοίου – πρότυπα χρήσης, εμπορικές θαλάσσιες πλόες και επίπεδα δραστηριότητας, συμπεριλαμβανομένων των περιόδων αδράνειας, επηρεάζουν τον ρυθμό συσσώρευσης βιορρύπανσης
4. Τον τύπο πλοίου και την κατασκευή του,
5. Τυχόν νομικές απαιτήσεις για την πώληση και τη χρήση των προστατευτικών συστημάτων υφαλοχρωματισμού.

#### 2.4 Συλλογή Δεδομένων για τη Ρύπανση Γάστρας

Στα πλαίσια της πρακτικής που ακολουθείται για την γενική παρακολούθηση της απόδοσης των πλοίων, γίνονται και στοχευμένες προσπάθειες για την συλλογή δεδομένων σχετικά με την ρύπανση της γάστρας. Από τις πρώτες μέρες των ατμόπλοιων υπήρξε η ανάγκη να γνωρίζουμε τη σχέση ταχύτητας και ισχύος των πλοίων καθώς εκτελούν σε υπηρεσία. Αυτό ιστορικά γίνονταν με την ανάλυση της συνολικής κατανάλωσης καυσίμου από τα δεδομένα ανεφοδιασμού και από τα διάφορα ημερολόγια που κρατούνται πάνω στο πλοίο (logbooks). Πλέον υπάρχουν τρεις βασικές πηγές δεδομένων για την ενεργειακή αποδοτικότητα των πλοίων και αυτές είναι η απλή συλλογή

δεδομένων με χρήση αρχείων καταγραφής επιχειρησιακών δεδομένων (engine log book, noon reports, κ.α.), τα αυτόματα ηλεκτρονικά συστήματα καταγραφής και πιο πολύπλοκα σύγχρονα συστήματα συλλογής καταγραφής και ανάλυσης επιχειρησιακών δεδομένων.

Στα εμπορικά πλοία, κρατείται ένα ημερήσιο σύστημα ημερολογίου παρακολούθησης της απόδοσης της μηχανής, της πλοήγησης και των διαδικασιών φόρτωσης. Τα αρχεία καταγραφής των μηχανών παρέχουν τεχνικά δεδομένα για την αξιολόγηση της κατάστασης του κινητήρα και των μηχανημάτων. Τα ημερολόγια καταστρώματος ή πλοήγησης χρησιμοποιούνται για τον προγραμματισμό του ταξιδιού, την ασφάλεια και την ανάλυση της απόδοσης του πλοίου, ενώ τα ημερολόγια φόρτωσης χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της ευστάθειας, τον προγραμματισμό φορτίου κ.λπ. Επειδή τα ημερολόγια χρησιμοποιούνται σε όλα τα πλοία, χρησιμοποιούνται συχνά για την παρακολούθηση της απόδοσης. Ωστόσο, η παρακολούθηση της απόδοσης των πλοίων απαιτεί υψηλότερο επίπεδο ακρίβειας από αυτό που μπορούν να παρέχουν τα αφηρημένα ημερολόγια πλοίου.

Με την εισαγωγή ηλεκτρονικών ημερολογίων πλοίων και ασύρματης μετάδοσης δεδομένων από πλοία, είναι πλέον δυνατή η ηλεκτρονική συλλογή πολλών παραμέτρων απόδοσης πλοίων. Ένα κεντρικό σύστημα απόκτησης δεδομένων διασυνδεδεμένο με όλα τα απαραίτητα όργανα μπορεί να παρακολουθεί και να αποθηκεύει δεδομένα είτε για στιγμιαία είτε για εκτός σύνδεσης ανάλυση. Η αυτοματοποίηση της συλλογής δεδομένων συμβάλλει σημαντικά στη βελτίωση της ποιότητας των δεδομένων. Η συνεχής παρακολούθηση επιτρέπει την επικύρωση σημάτων, το φιλτράρισμα και την εξαγωγή στατιστικών στοιχείων για αυξημένη ακρίβεια και αξιοπιστία. Η αυτόματη συλλογή δεδομένων επιτρέπει την ανάλυση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για παρακολούθηση και για τον συναγερμό σε ακραίες συνθήκες λειτουργίας μέσω του Alarm Monitoring System (AMS) ή ανατροφοδότηση σε πραγματικό χρόνο σχετικά με τη λειτουργία του σκάφους. Παραδείγματα συστημάτων αυτόματης καταγραφής δεδομένων είναι οι καταγραφείς δεδομένων ταξιδιού (VDR) και τα συστήματα παρακολούθησης της κατάστασης των κινητήρων (Aldous et al, 2015).

Τα τελευταία έχουν σημειωθεί πολλές πρόοδοι στα εμπορικά συστήματα παρακολούθησης της απόδοσης και συμπεριφοράς των πλοίων σχετικά με τη συλλογή δεδομένων. Ορισμένες λύσεις χρησιμοποιούν ήδη συστήματα αυτόματης απόκτησης δεδομένων για ανάλυση επί του πλοίου. Ωστόσο, τα περισσότερα συστήματα χρησιμοποιούν δεδομένα που εισάγονται με μη αυτόματο τρόπο για παρακολούθηση της απόδοσης. Δεδομένου ότι τα περισσότερα τέτοια εμπορικά συστήματα είναι μαύρα κουτιά, όπου ακόμη και ο πλοιοκτήτης δεν μπορεί να αποκτήσει πλήρη εικόνα για τον τρόπο συλλογής, προετοιμασίας ή ανάλυσης των δεδομένων, είναι δύσκολο να σχολιάσουμε τα χαρακτηριστικά των αλγορίθμων προετοιμασίας και ανάλυσης δεδομένων και την αξιοπιστία των KPI. Ως αποτέλεσμα, πολλές ναυτιλιακές εταιρείες εξακολουθούν να χρησιμοποιούν τις δικές τους μεθοδολογίες για τη συλλογή δεδομένων και την παρακολούθηση της απόδοσης (Aldous et al, 2015).

## 2.5 Μελέτη και Ανάλυση Δεδομένων για τη Ρύπανση της Γάστρας

Στην βιβλιογραφία υπάρχουν κυρίως τρεις τρόποι για την ανάλυση των δεδομένων απόδοσης του πλοίου στη θάλασσα (Shaw, & Lin, 2021):

1. Μέθοδοι που βασίζονται σε δεδομένα: Αυτές οι μέθοδοι χρησιμοποιούν συνήθως τεχνητά νευρωνικά δίκτυα και αλγόριθμους τεχνητής νοημοσύνης και δεν απαιτούν συγκεκριμένες γνώσεις. Όλη η διαχείριση των δεδομένων και η στατιστική ανάλυση πραγματοποιούνται εξ ολοκλήρου από υπολογιστές που χρησιμοποιούν αλγόριθμους. Παρέχεται μεγάλος αριθμός δειγμάτων για την κατασκευή των μοντέλων αυτών και τον περιορισμό των εφαρμογών.
2. Ντετερμινιστικές μέθοδοι: Αυτές οι μέθοδοι εξετάζουν την ταχύτητα των πλοίων χρησιμοποιώντας χαρακτηριστικά αντίστασης και πρόωσης, την εφαρμογή υπολογιστικών μοντέλων ρευστοδυναμικής (CFD), δοκιμές μοντέλων, δοκιμές, δοκιμές στη θάλασσα και ανάλυση των μακροπρόθεσμων δεδομένων των πλοίων για την απόδοσης.

3. Υβριδικές μέθοδοι: Αυτές οι μέθοδοι χρησιμοποιούν γενικές φυσικές παραμέτρους για την αξιολόγηση της απόδοσης των πλοίων. Χρησιμοποιούνται γενικές προσεγγίσεις για τον προσδιορισμό της αντίστασης του πλοίου με βάση την ταχύτητα, την αντίσταση και ορισμένα χαρακτηριστικά των πλοίων. Επίσης βελτιστοποίηση αυτών των μεθόδων γίνεται και με συνδυασμό πραγματικών μετρήσεων επί του σκάφους και καταγραφή ποσοτικών χαρακτηριστικών (π.χ. κατανάλωση καυσίμου, ταχύτητα, ισχύς, βύθισμα, κατεύθυνση ανέμου) από τις δοκιμές του μοντέλου. Έτσι, η απόδοση προβλέπεται και επικυρώνεται μέσω σύγκρισης με δεδομένα που παρακολουθούνται επί του σκάφους.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΠΡΟΤΥΠΑ

### 3.1 Παρουσίαση ISO 19030

Το ISO 19030 είναι ένα πρότυπο που αναπτύχθηκε από τον Διεθνή Οργανισμό Τυποποίησης (ISO) και παρέχει κατευθυντήριες γραμμές και διαδικασίες για τη μέτρηση της απόδοσης των πλοίων και την αξιολόγηση της απόδοσης καυσίμου τους. Το πρότυπο, το οποίο δημοσιεύθηκε το 2016, στοχεύει στην παροχή ενός ενιαίου και διαφανούς τρόπου μέτρησης της ενεργειακής απόδοσης των πλοίων, ο οποίος με τη σειρά του μπορεί να συμβάλει στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και στη βελτίωση της βιωσιμότητας της ναυτιλιακής βιομηχανίας.

Το πρότυπο ISO 19030 αποτελείται από τέσσερα μέρη, καθένα από τα οποία αντιμετωπίζει μια διαφορετική πτυχή της απόδοσης του πλοίου. Το πρώτο μέρος παρέχει γενικές κατευθυντήριες γραμμές για τη μέτρηση της ενεργειακής απόδοσης των πλοίων, συμπεριλαμβανομένων ορισμών βασικών όρων, συστάσεων για τη μέτρηση και την αναφορά της κατανάλωσης καυσίμου και άλλων σχετικών δεδομένων και κατευθυντήριων γραμμών για την επαλήθευση της ακρίβειας των μεθόδων μέτρησης. Το δεύτερο μέρος προβλέπει διαδικασίες για τον προσδιορισμό των συνθηκών αναφοράς και των επιδόσεων ταχύτητας/ισχύος ενός πλοίου. Οι συνθήκες αναφοράς χρησιμοποιούνται ως βάση για τη σύγκριση των επιδόσεων του πλοίου με την πάροδο του χρόνου, ενώ η απόδοση ταχύτητας/ισχύος χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της ενεργειακής απόδοσης και της κατανάλωσης καυσίμου του πλοίου. Το τρίτο μέρος, παρέχει οδηγίες για τη συλλογή, ανάλυση και αναφορά δεδομένων σχετικά με την απόδοση ενός πλοίου. Περιλαμβάνει συστάσεις για την επιλογή κατάλληλων πηγών δεδομένων και μεθόδων μέτρησης, καθώς και οδηγίες για την ανάλυση και την αναφορά των δεδομένων σε τυποποιημένη μορφή. Το τελευταίο μέρος παρέχει κατευθυντήριες γραμμές για τη μέτρηση των αλλαγών στην απόδοση της γάστρας και της έλικας ενός πλοίου. Αυτές οι αλλαγές μπορούν να έχουν σημαντικό αντίκτυπο στην ενεργειακή απόδοση και την κατανάλωση καυσίμου ενός πλοίου και οι κατευθυντήριες γραμμές σε αυτό το μέρος του προτύπου έχουν σχεδιαστεί για να βοηθήσουν στον εντοπισμό και την ποσοτικοποίηση αυτών των αλλαγών.



Υπάρχουν διάφορες υπολογιστικές μέθοδοι κατά το ISO 19030 που βασίζονται είτε στην ισχύ στον άξονα, είτε την παραγόμενη ισχύ της κύριας μηχανής, είτε σε εξωτερικά δεδομένα όπως η ταχύτητα και η ισχύς. Παρακάτω θα εστιάσουμε κυρίως στην μεθοδολογία που αφορά την χρήση εξωτερικών δεδομένων καθώς αυτή χρησιμοποιήθηκε για το υπολογιστικό μέρος αυτής της εργασίας.

### 3.2 Βασικές Αρχές

Η αποδοτικότητα της γάστρας και της έλικας εκφράζει πόσο αποδοτικά είναι τα βυθισμένα μέρη τους σε σχέση με την ισχύ που χρειάζεται για να κινηθεί το πλοίο με μια συγκεκριμένη ταχύτητα στο νερό. Η αποδοτικότητα αυτή λοιπόν σχετίζεται στενά με την αποτελεσματικότητα της πρόωσης του πλοίου και την αντίσταση που αντιμετωπίζει κατά την πλεύση του και δεν είναι άμεσα μετρήσιμη. Έτσι, ο υπολογισμός της βασίζεται στη σχέση μεταξύ της παρεχόμενης ισχύος και της συνολικής αντίστασης.

Η παρεχόμενη ισχύς ( $P_D$ ) μπορεί να εκφραστεί ως:

$$P_D = \frac{R_T \times V}{\eta_Q} \quad (3.1)$$

Όπου:

- $R_T$  η συνολική αντίσταση, (N)
- $V$  η ταχύτητα πλεύσης του πλοίου στο νερό, (m/s)
- $\eta_Q$  ο συντελεστής απόδοση πρόωσης, (-)

Η συνολική αντίσταση υπολογίζεται από το άθροισμα των συνιστωσών αντιστάσεων:

$$R_T = R_{SW} + R_{AA} + R_{AW} + R_{AH} \quad (3.2)$$

Όπου:

- $R_{SW}$  η αντίσταση σε ήρεμο νερό, (N)
- $R_{AA}$  η αντίσταση λόγω ανέμου, (N)
- $R_{AW}$  η αντίσταση λόγω κυματισμού, (N)
- $R_{AH}$  η πρόσθετη αντίσταση λόγω μεταβολών στην κατάσταση της γάστρας, (N)

Όμοια η ο συντελεστής απόδοση πρόωσης υπολογίζεται ως εξής:

$$\eta_Q = \eta_0 \eta_H \eta_R \quad (3.3)$$

Όπου:

- $\eta_0$  ο συντελεστής απόδοσης της έλικας σε ανοιχτό νερό
- $\eta_H$  ο συντελεστής απόδοσης της γάστρας
- $\eta_R$  ο συντελεστής σχετικής περιστροφικής απόδοσης της έλικας

Η πρόσθετη αντίσταση λόγω αλλαγών στην κατάσταση της γάστρας μπορεί να εκφραστεί:

$$R_{AH} = \frac{P_D \times \eta_Q}{V} - (R_{SW} + R_{AA} + R_{AW}) \quad (3.4)$$

Όπου η ταχύτητα ( $V$ ) μπορεί να υπολογιστεί άμεσα και η αποδιδόμενη ισχύς  $P_D$  μπορεί να προσδιοριστεί είτε από μετρήσεις στον άξονα, είτε μέσω μετρήσεων της κατανάλωσης καυσίμου.

Οι διακυμάνσεις της ισχύος που απαιτούνται για τη μετακίνηση ενός πλοίου στο νερό οφείλονται σε αλλαγές στην αντίσταση της γάστρας ή/και στην απόδοση της έλικας. Για τη μέτρηση των αλλαγών στη σχέση ταχύτητας-ισχύος ενός πλοίου, απαιτείται μία περίοδος αναφοράς και μία περίοδος αξιολόγησης με συγκρίσιμες συνθήκες. Επειδή οι δραστηριότητες συντήρησης, επισκευής και μετασκευής στη γάστρα και την έλικα επηρεάζουν την ενεργειακή αποδοτικότητα του πλοίου πρέπει να εφαρμόζονται διαδικασίες για το φιλτράρισμα και την κανονικοποίηση των δεδομένων ώστε να μελετηθεί η αποδοτικότητα ανάμεσα σε αυτές τις δύο περιόδους.

Προκειμένου να εφαρμοστούν οι διαδικασίες φιλτραρίσματος και κανονικοποίησης που είναι αναγκαίες για να καταστούν επαρκώς συγκρίσιμες η περίοδος αναφοράς και η περίοδος αξιολόγησης, απαιτούνται μετρήσεις τόσο των περιβαλλοντικών συνθηκών όσο και του επιχειρησιακού προφίλ του πλοίου.

Σχετικοί περιβαλλοντικοί παράγοντες είναι:

- Ταχύτητα και κατεύθυνση ανέμου
- Ύψος, ταχύτητα και προφίλ κυμάτων
- Βάθος νερού
- Θερμοκρασία και πυκνότητα νερού

Σχετικοί επιχειρησιακοί παράμετροι είναι:

- Ταχύτητα
- Συνθήκες φόρτωσης
- Δυναμικές συνθήκες πλεύσης
- Γωνία πηδαλίου

Για να απομονώσουμε τις συγκρίσιμες συνθήκες αναφοράς και στα πλαίσια της προετοιμασίας των δεδομένων (φιλτράρισμα, κανονικοποίηση), πρέπει να καταγράφονται τόσο οι περιβαλλοντικοί παράγοντες όσο και το επιχειρησιακό προφίλ του πλοίου. Για τον λόγο αυτό το ISO 19030 έχει εισάγει τις ελάχιστες απαιτήσεις αισθητήρων για τις δευτερεύουσες παραμέτρους μέτρησης όπως φαίνονται στον **Πίνακας 1**.

Εάν δεν υπάρχουν αξιόπιστα σήματα αισθητήρων για όλες τις παραμέτρους, είτε τα σήματα από εναλλακτικούς αισθητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προσέγγιση ή/και για πρακτικούς σκοπούς, πρέπει να υποθέσουμε ότι τα αποτελέσματά τους "εξέρχονται κατά μέσο όρο με την πάροδο του χρόνου". Η χρήση εναλλακτικών αισθητήρων ή η εξάρτηση από την υπόθεση της ίσης κατανομής εισάγει πρόσθετη αβεβαιότητα.

Παράμετρος	Αποδεκτή συσκευή μέτρησης/πηγή	Μονάδα Μέτρησης
Σχετική ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου μετρούμενη στο ύψος του ανεμομέτρου	Ανεμόμετρο πλοίου - ελάχιστη ακρίβεια αισθητήρα $\pm 1\text{m/s}$ , $\pm 5^\circ$	[m/s], [°]
Ταχύτητα εδάφους	(D) GPS	[knots]
Κατεύθυνση πλοίου	Γυροσκοπική πυξίδα ή πυξίδα - DGPS	[°]
Στροφές άξονα	Οπτικός αισθητήρας, στροφόμετρο πλοίου με ελάχιστη ακρίβεια αισθητήρα $\pm 0,5\%$	[rev/min]
Στατικό βύθισμα εμπρός και πίσω	Πληροφορίες από υπολογιστή μέτρησης κατάστασης φόρτωσης ή ευστάθειας ή ισοδύναμες πηγές στατικού βυθίσματος.	[m]
Βάθος νερού	Βυθόμετρο πλοίου με ελάχιστη ακρίβεια αισθητήρα:  1. - +/- 0,5 m στην κλίμακα εμβέλειας 20m, αντίστοιχα 2. +/- 5m στην κλίμακα εμβέλειας 200m, ή 3. - +/-2,5% του υποδεικνυόμενου βάθους, όποιο είναι μεγαλύτερο.	[m]
Γωνία στροφής πηδαλίου	Ένδειξη γωνίας πηδαλίου  - ελάχιστη ακρίβεια αισθητήρα $\pm 1^\circ$	[°]
Θερμοκρασία νερού	Θερμόμετρο	[°C]
Θερμοκρασία αέρα περιβάλλοντος	Θερμόμετρο	[°C]
Πίεση αέρα	Βαρόμετρο	[Pa]

Πίνακας 1 - Συσκευές μέτρησης δεδομένων σύμφωνα με το ISO 19030

Αφού υπολογιστεί η τελική διορθωμένη ισχύς ( $P_{D,corr}$ ) μπορεί πλέον να εφαρμοστεί η βασική αρχή της μεθοδολογίας του ISO 19030, ο υπολογισμός δεικτών απόδοσης. Στην συγκεκριμένη περίπτωση για την παρούσα μελέτη οι δείκτες αυτοί είναι ο δείκτης απώλειας ταχύτητας και ο δείκτης απόκλισης της ισχύος. Οι δείκτες προκύπτουν από την ποσοστιαία διαφορά της μετρούμενης ποσότητας (m) από την αναμενόμενη τιμή (e) που θα είχε το πλοίο από τις καμπύλες αναφοράς του (P – V). Οι καμπύλες αναφοράς που

μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό των αναμενόμενων τιμών προέρχονται από θαλάσσιες δοκιμές, δοκιμές μοντέλων, καμπύλες υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD) ή καμπύλες που προέρχονται από τα πραγματικά λειτουργικά δεδομένα του πλοίου. Στην παρούσα μελέτη, ως καμπύλες αναφοράς έχουν χρησιμοποιηθεί αυτές των δοκιμών μοντέλου οι οποίες είναι κοινές καθώς τα τέσσερα υπό μελέτη πλοία είναι αδελφά.

Οι δείκτες αυτοί, δεδομένων όλων των παραμέτρων που εισέρχονται στον υπολογισμό τους, είναι ενδεικτικοί για την απόδοση του πλοίου τη συγκεκριμένη στιγμή της καταγραφής, ούτως ώστε σε βάθος χρόνου η πληθώρα των δεδομένων να καταστήσει εφικτή την εξαγωγή ενός συμπεράσματος για την ενεργειακή αποδοτικότητα του πλοίου, αλλά και την επίδραση όποιας συντήρησης πραγματοποιήθηκε σε αυτό, όπως θα διαπιστωθεί σε παρακάτω κεφάλαιο.

Οι δύο τιμές απόδοσης υπολογίζονται σύμφωνα με τους παρακάτω τύπους:

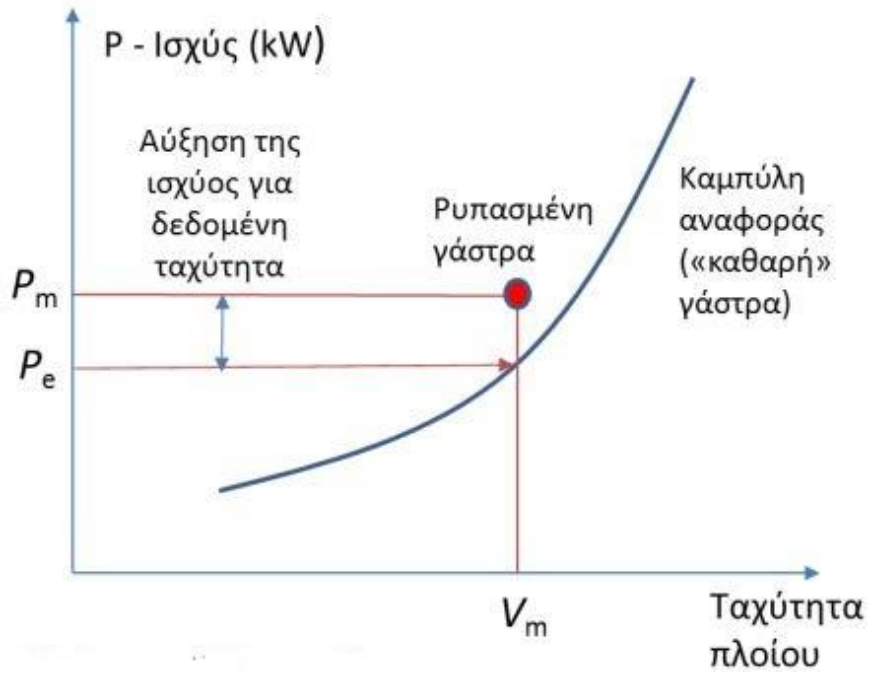
$$[\% \text{ P. D.}] = 100 \frac{(P_{D,corr} - P_e)}{P_e} \quad (3.5)$$

$$[\% \text{ S. L.}] = 100 \frac{(V_m - V_e)}{V_e} \quad (3.6)$$

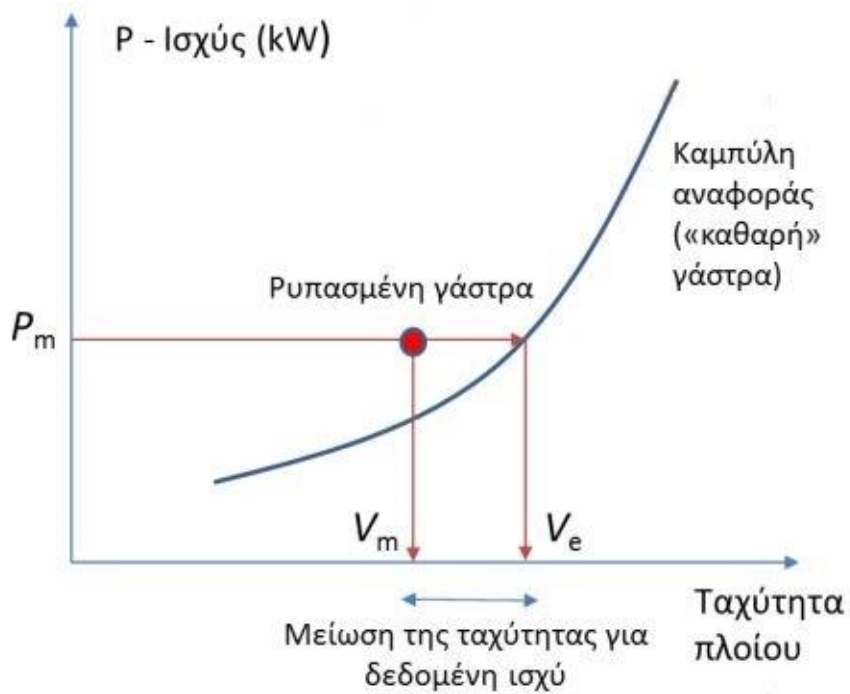
Όπου :

- P.D. Power Deviation – Απόκλιση Ισχύος
- S.L. Speed Loss – Απώλεια Ταχύτητας
- $V_m$  η μετρούμενη ταχύτητα του πλοίου
- $V_e$  η αναμενόμενη ταχύτητα του πλοίου
- $P_{D,corr}$  η μετρούμενη διορθωμένη ισχύς του πλοίου,
- $P_e$  η αναμενόμενη ισχύς του πλοίου,

Παρακάτω (**Σχήμα 1** και **Σχήμα 2**) φαίνεται η γραφική απεικόνιση των δύο υπολογιζόμενων δεικτών.



Σχήμα 1 - Δείκτης απόκλισης ισχύος (Themelis, 2020)



Σχήμα 2 - Δείκτης απώλειας ταχύτητας (Themelis, 2020)

Ακόμη για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας και για την εκτενέστερη μελέτη της απόδοσης της προπέλας, υπολογίστηκε ένας ακόμη δείκτης. Ο δείκτης αυτός αφορά την απόδοση της φόρτισης της προπέλας και ορίζεται ως εξής:

$$KPI_{\text{propeller}} = \frac{P_{D,\text{corr}}}{n^3} \quad (3.7)$$

Όπου  $P_{D,\text{corr}}$  η μετρούμενη διορθωμένη ισχύς και  $n$  οι στροφές της προπέλας αντίστοιχα.

Ο δείκτης αυτός αντιστοιχεί στον συντελεστή καμπύλης έλικας ή αλλιώς στον λόγο ισχύος και έχει χρησιμοποιηθεί σε διάφορες μελέτες (Themelis et al., 2019) για την αξιολόγηση της ενεργειακής απόδοσης της έλικας.

### 3.3 Διαδικασία συλλογής δεδομένων

Σύμφωνα με το ISO 19030, τρία είναι τα βασικά βήματα στη διαδικασία για την μέτρηση της αποδοτικότητας της γάστρα και της έλικας του πλοίου; Η συλλογή δεδομένων, η αποθήκευση των δεδομένων και η προετοιμασία των δεδομένων.

1. Η απόκτηση δεδομένων περιλαμβάνει την καταγραφή σημάτων/δεδομένων από σχετικούς αισθητήρες, εξοπλισμό εγκατεστημένο στο σκάφος και εξωτερικούς παρόχους πληροφοριών, είτε χειροκίνητα είτε αυτόματα.
2. Η αποθήκευση δεδομένων περιλαμβάνει την αποθήκευση και διατήρηση των συλλεγόμενων δεδομένων σε κατάλληλη μορφή για εύκολη ανάκτηση όταν απαιτείται.
3. Η προετοιμασία δεδομένων περιλαμβάνει την εξαγωγή, τη συλλογή, τη διαλογή και την επικύρωση των δεδομένων για να τους δώσει μια δομή, μορφή και ποιότητα κατάλληλη για περαιτέρω επεξεργασία. Διαφορετικά υποσύνολα τιμών απόδοσης χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό διαφόρων δεικτών απόδοσης.

Η ποιότητα μιας μέτρησης καθορίζεται από την ορθότητα και την ακρίβεια της, με την ορθότητα να αναφέρεται στην εγγύτητα του μέσου όρου των αποτελεσμάτων μέτρησης

με την πραγματική τιμή και την ακρίβεια να αναφέρεται στην εγγύτητα της συμφωνίας εντός των επιμέρους αποτελεσμάτων.

Σχετικά με την συλλογή δεδομένων, γίνεται αναφορά από το ISO 19030 στις βάσεις δεδομένων που εκφράζουν την απαιτούμενη ισχύ ως συνάρτηση της ταχύτητας, του βυθίσματος και της διαγωγής. Αυτές μπορούν να βασίζονται σε δοκιμές μοντέλων, δοκιμές στη θάλασσα ή CFD (υπολογιστική ρευστοδυναμική).

Σε κάθε περίπτωση, αυτές οι βάσεις δεδομένων πρέπει:

- να τεκμηριώνονται,
- να ακολουθούν γενικά αποδεκτές διαδικασίες, π.χ. εκείνες που προτείνονται από την ITTC 2021 ή το ISO 15016
- να θεωρούν ότι το πλοίο βρίσκεται σε κατάσταση πρόωσης,
- να καλύπτουν το πλήρες σχετικό εύρος παραμέτρων εισόδου (ταχύτητα, βύθισμα, διαγωγή) με επαρκή συχνότητα ώστε να διατηρούνται τα σφάλματα παρεμβολής για την ισχύ κάτω από το 2%. Αυτό επαληθεύεται παραλείποντας τα σημεία δεδομένων στην παρεμβολή και συγκρίνοντας τις παρεμβολές και τις πραγματικές τιμές για τα εν λόγω σημεία δεδομένων,
- να γίνεται βαθμονόμηση των αποτελεσμάτων έναντι δοκιμών στη θάλασσα.

### 3.4 Παρουσίαση ITTC

Στο πλαίσιο της εμπειρικής μελέτης της εργασίας χρησιμοποιήθηκαν και κάποιες προτεινόμενες μέθοδοι διόρθωσης της ITTC (International Towing Tank Conference). Πιο συγκεκριμένα, η Αντίσταση Ανέμου υπολογίζεται μέσω του αναδρομικού τύπου του Fujiwara et al ενώ η Πρόσθετη Αντίσταση Κυματισμού υπολογίζεται μέσω της εμπειρικής μεθόδου STA 1 και STA 2.

Ακόμη και εντός των δοκιμαστικών ορίων για το ύψος κύματος, η προστιθέμενη αντίσταση λόγω κυμάτων μπορεί να αποτελέσει σημαντικό μέρος της απαιτούμενης ισχύος άξονα. Η



προστιθέμενη αντίσταση στα κύματα αυξάνεται τετραγωνικά με το ύψος του κύματος και, επομένως, ακόμη και σε ήρεμη θάλασσα, η μέθοδος διόρθωσης κυμάτων θα πρέπει να παρέχει ακριβή πρόβλεψη της πρόσθετης αντίστασης για το πλοίο και των πραγματικών συνθηκών που συναντώνται στη θάλασσα από τον άνεμο.

Αντίστοιχα η αντίσταση του ανέμου στα πλοία αυξάνεται τετραγωνικά με τη σχετική ταχύτητα του ανέμου και επομένως η πραγματική ταχύτητα και διεύθυνση του ανέμου θα πρέπει να μετράται όσο το δυνατόν ακριβέστερα. Ειδικά για τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, είναι ζωτικής σημασίας να γίνεται διάκριση της αντίστασης του ανέμου σε κατάσταση έρματος χωρίς εμπορευματοκιβώτια στο κατάστρωμα, αλλά λαμβάνοντας υπόψη τις γέφυρες πρόσδεσης (οι οποίες εκτίθενται στον άνεμο κατά τη διάρκεια των δοκιμών) και στο βύθισμα σχεδιασμού όπου το πλοίο φορτώνεται με εμπορευματοκιβώτια. Είναι αξιοσημείωτο ότι ο συντελεστής αντίστασης στον άνεμο του φορτωμένου πλοίου είναι συνήθως μικρότερος, καθώς τα εμπορευματοκιβώτια παρέχουν καλύτερη ροή από η γέφυρα του πλοίου μόνη της.

### 3.5 Πρόσθετη Αντίσταση Ανέμου

#### 3.5.1 Διόρθωση για την αντίσταση ανέμου και πρόσθετη ισχύς

Την παραπάνω διαδικασία συλλογής δεδομένων της παραγράφου 3.3 ακολουθεί η υπολογιστική μέθοδος όπως παρουσιάζεται στο δεύτερο μέρος του ISO 19030 (Annex E) και είναι η διόρθωση της μετρούμενης ισχύος των δεδομένων λόγω της πρόσθετης ισχύος που οφείλεται στον άνεμο.

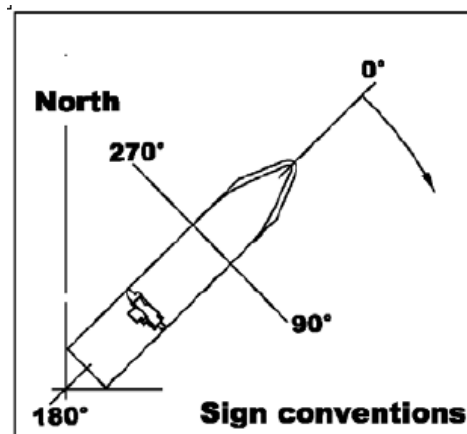
Η πραγματική ταχύτητα ανέμου,  $v_{wt}$  [m/s] και η πραγματική κατεύθυνση του ανέμου,  $\psi_{wt}$  [radians], στο ύψος του ανεμόμετρου υπολογίζεται από τη σχετική ταχύτητα ανέμου,  $v_{wr}$  [m/s], την ταχύτητα του σκάφους πάνω από το έδαφος,  $v_g$  [m/s], τη διεύθυνση του σχετικού ανέμου ( $\psi_{wr}$  [radians]) και την κατεύθυνση του σκάφους,  $\psi_0$  [radians], σύμφωνα με τους παρακάτω τύπους:

$$v_{wt} = \sqrt{v_{wr}^2 + v_g^2 - 2v_{wr}v_g \cos \psi_{wr}} \quad (3.8)$$

$$\psi_{wt} = \tan^{-1} \left\{ \frac{v_{wr} \sin(\psi_{wr} + \psi_0) - v_g \sin(\psi_0)}{v_{wr} \cos(\psi_{wr} + \psi_0) - v_g \cos(\psi_0)} \right\} \text{ για } v_{wr} \cos(\psi_{wr} + \psi_0) - v_g \cos(\psi_0) \geq 0 \quad (3.9)$$

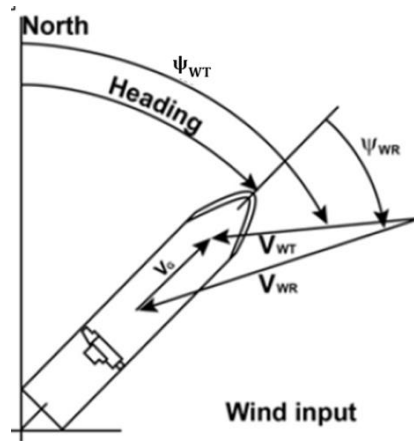
$$\psi_{wt} = \tan^{-1} \left\{ \frac{v_{wr} \sin(\psi_{wr} + \psi_0) - v_g \sin(\psi_0)}{v_{wr} \cos(\psi_{wr} + \psi_0) - v_g \cos(\psi_0)} \right\} + 180 \text{ για } v_{wr} \cos(\psi_{wr} + \psi_0) - v_g \cos(\psi_0) < 0 \quad (3.10)$$

Στο **Σχήμα 3** απεικονίζεται η σύμβαση σήμανσης για κατευθύνσεις σχετικές με την κατεύθυνση του πλοίου.



Σχήμα 3 - Σύμβαση της κατεύθυνσης του πλοίου (ISO, 2016)

Στο **Σχήμα 4** απεικονίζονται η πραγματική και σχετική ταχύτητα του ανέμου, η ταχύτητα του πλοίου ως προς το έδαφος, η σχετική και πραγματική διεύθυνση του ανέμου και η κατεύθυνση του πλοίου.



Σχήμα 4 - Σύμβαση των κατευθύνσεων του ανέμου(ISO, 2016)

Για τον υπολογισμό της αντίστασης του ανέμου χρησιμοποιούνται η ταχύτητα του ανέμου και η διεύθυνση της στο ύψος αναφοράς όπου βασίζονται οι συντελεστές αντίστασης του ανέμου. Επομένως, η ταχύτητα του ανέμου και η διεύθυνση στο ύψος του ανεμομέτρου διορθώνονται με βάση το ύψος αναφοράς.

Εάν δεν υπάρχει ύψος αναφοράς, επιλέγεται ύψος αναφοράς 10 μέτρων. Η διαφορά μεταξύ του ύψους του ανεμομέτρου και του ύψους αναφοράς για την αντίσταση του ανέμου πρέπει να διορθώνεται μέσω της καμπύλης ταχύτητας ανέμου που δίνεται από τον τύπο:

$$v_{wt,ref} = v_{wt} \left( \frac{Z_{ref}}{Z_a} \right)^{\frac{1}{7}} \quad (3.11)$$

Όπου:

$v_{wt,ref}$  η πραγματική ταχύτητα στο ύψος αναφοράς [m/s]

$v_{wt}$  η πραγματική ταχύτητα ανέμου το ύψος του ανεμομέτρου [m/s]

$Z_{ref}$  το ύψος αναφοράς πάνω από την επιφάνεια ισάλου [m]

$Z_a$  το ύψος του ανεμομέτρου πάνω από την επιφάνεια ισάλου [m]

Η σχετική ταχύτητα ανέμου στο ύψος αναφοράς πάνω από την επιφάνεια ισάλου υπολογίζεται από τον τύπο:

$$v_{wr,ref} = \sqrt{v_{wt,ref}^2 + v_g^2 - 2v_{wt,ref}v_g \cos(\psi_{wt} + \psi_0)} \quad (3.12)$$

Η σχετική διεύθυνση του ανέμου στο ύψος αναφοράς πάνω από την επιφάνεια ισάλου, σε μοίρες, υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\psi_{wr,ref} = \tan^{-1} \left\{ \frac{v_{wt,ref} \sin(\psi_{wt} - \psi_0)}{v_g + v_{wt,ref} \cos(\psi_{wt} - \psi_0)} \right\} \text{ για } v_g + v_{wt,ref} \cos(\psi_{wt} - \psi_0) \geq 0 \quad (3.13)$$

$$\psi_{wr,ref} = \tan^{-1} \left\{ \frac{v_{wt,ref} \sin(\psi_{wt} - \psi_0)}{v_g + v_{wt,ref} \cos(\psi_{wt} - \psi_0)} \right\} + 180 \text{ για } v_g + v_{wt,ref} \cos(\psi_{wt} - \psi_0) < 0 \quad (3.14)$$

Τα ύψη άνω της ισάλου εξαρτώνται από τις τρέχουσες συνθήκες φόρτωσης, ιδίως από το βύθισμα του πλοίου. Οι συντελεστές αντίστασης στον άνεμο δίνονται γενικά για μία συνθήκη αναφοράς, συνήθως την κατάσταση φόρτωσης σχεδιασμού (design).

Τα ύψη διορθώνονται για το βύθισμα, υποθέτοντας αμελητέα επίδραση της διαγωγής:

$$\Delta T = T_{des} - T \quad (3.15)$$

$$A = A_{des} + \Delta T \cdot B \quad (3.16)$$

$$Z_\alpha = Z_{\alpha,des} + \Delta T \quad (3.17)$$

$$Z_{ref} = \frac{A_{des} \cdot (Z_{ref,des} + \Delta T) + \frac{1}{2} B \cdot \Delta T^2}{A} \quad (3.18)$$

Όπου:

- $\Delta T$  η διαφορά του πραγματικού βυθίσματος από το βύθισμα σχεδίασης [m]
- $T_{des}$  το βύθισμα σχεδίασης του πλοίου [m]
- $T$  το πραγματικό βύθισμα του πλοίου [m]
- $A_{des}$  η προβλεβλήμενη εγκάρσια επιφάνεια στην υπό μελέτη κατάσταση φόρτωσης [m]
- $B$  το πλάτος του πλοίου [m]
- $Z_{\alpha,des}$  το ύψος του ανεμόμετρου άνω της επιφάνειας ισάλου για το βύθισμα σχεδίασης [m]

$Z_{ref,des}$  το ύψος αναφοράς άνω της επιφάνειας ισάλου για το βύθισμα σχεδίασης [m]

Οι τιμές της αποδιδόμενης ισχύος ( $P_D$ ) πρέπει να διορθωθούν για την αντίσταση του ανέμου αφαιρώντας τη διόρθωση αντίστασης ανέμου σύμφωνα με τον τύπο:

$$P_{D,wind\ corr} = P_D - \Delta P_w \quad (3.19)$$

Οπού  $P_{D,wind\ corr}$  είναι οι διορθωμένες τιμές της αποδιδόμενης ισχύος.

Η διόρθωση της ισχύος υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο:

$$\Delta P_{Wind} = \frac{(R_{rw} - R_{ow}) \cdot v_g}{\eta_{D0}} + P_D \left(1 - \frac{\eta_{DM}}{\eta_{D0}}\right) \quad (3.20)$$

Όπου:

$$R_{rw} = \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot v_{wr}^2 \cdot A \cdot C_{DA}(\psi_{wr,ref}) \quad (3.21)$$

και

$$R_{ow} = \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot v_g^2 \cdot A \cdot C_{ow}(0) \quad (3.22)$$

Όπου:

$\Delta P_w$  η διόρθωση λόγω ανέμου [W]

$R_{rw}$  η αντίσταση λόγω της σχετικής ταχύτητας του ανέμου [N]

$R_{ow}$  η αντίσταση του αέρα σε συνθήκη χωρίς αέρα [N]

$v_g$  η ταχύτητα του πλοίου προς το έδαφος [m/s]

$v_{wr}$  η σχετική ταχύτητα του ανέμου στο ύψος αναφοράς [m/s]

$C_{DA}$  ο συντελεστής αντίστασης του ανέμου (Fujiwara) εξαρτώμενος από την σχετική διεύθυνση του ανέμου  $\psi_{wr,ref}$  [-]

$C_{ow}$  ο συντελεστής αντίστασης του ανέμου (Fujiwara) σε μετωπικό άνεμο ( $0^\circ$  διεύθυνση ανέμου)

$\rho_a$  η πυκνότητα του αέρα [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$A$  εγκάρσια προβαλλόμενη περιοχή σε κατάσταση τρέχουσας φόρτισης [ $\text{m}^2$ ]

$\eta_{D0}$  συντελεστής απόδοσης πρόωσης σε ήρεμη κατάσταση

$\eta_{DM}$  συντελεστής απόδοσης πρόωσης σε πραγματικές συνθήκες πλεύσης

### 3.5.2 Υπολογισμός Μεταβλητών Μεθόδου Fujiwara

Σε περίπτωση που ο συντελεστής αντίστασης ανέμου δεν είναι γνωστός πειραματικά, μπορεί να προσδιοριστεί μέσω μεθόδων που προέρχονται από ανάλυση παλινδρόμησης δια διάφορους τύπους πλοίων. Μία κατάλληλη μέθοδος είναι η Fujiwara όπως παρουσιάζεται από την ITTC 2021 και πρόκειται για μια διαδικασία υπολογισμών που προήλθε από πειράματα αεροσήραγγας σε διάφορα πλοία.

Ο συντελεστής λοιπόν προσδιορίζεται από την σχέση:

$$C_{DA} = C_{LF} \cdot c + c_{XLI} \cdot \left( \sin(\Psi_{wr}) - \frac{1}{2} \cdot \sin(\Psi_{wr}) \cdot \cos(\Psi_{wr})^2 \right) \cdot \sin(\Psi_{wr}) \cdot \cos(\Psi_{wr}) + C_{ALF} \cdot \sin(\Psi_{wr}) \cdot \cos(\Psi_{wr})^3 \quad (3.23)$$

Όπου για  $0 \leq \Psi_{wr} < 90^\circ$  ισχύει:

$$C_{LF} = \beta_{10} + \beta_{11} \cdot \frac{A_{YV}}{L_{OA} \cdot B} + \beta_{12} \cdot \frac{C_{MC}}{L_{OA}} \quad (3.24)$$

$$C_{XLI} = \delta_{10} + \delta_{11} \cdot \frac{A_{YV}}{L_{OA} \cdot h_{BR}} + \delta_{12} \cdot \frac{A_{YV}}{B \cdot h_{BR}} \quad (3.25)$$

$$C_{ALF} = \varepsilon_{10} + \varepsilon_{11} \cdot \frac{A_{OD}}{A_{YV}} + \varepsilon_{12} \cdot \frac{B}{L_{OA}} \quad (3.26)$$

Ενώ για  $90^\circ \leq \Psi_{wr} < 180^\circ$  ισχύει:

$$C_{LF} = \beta_{20} + \beta_{21} \cdot \frac{B}{L_{OA}} + \beta_{22} \cdot \frac{h_c}{L_{OA}} + \beta_{23} \cdot \frac{A_{OD}}{L_{OA}^2} + \beta_{24} \cdot \frac{A_{XV}}{B^2} \quad (3.27)$$

$$C_{XLI} = \delta_{20} + \delta_{21} \cdot \frac{A_{YV}}{L_{OA} \cdot h_{BR}} + \delta_{22} \cdot \frac{A_{XV}}{A_{YV}} + \delta_{23} \cdot \frac{B}{L_{OA}} + \delta_{24} \cdot \frac{A_{XV}}{B \cdot h_{BR}} \quad (3.28)$$

$$C_{ALF} = \varepsilon_{20} + \varepsilon_{21} \cdot \frac{A_{OD}}{A_{YV}} \quad (3.29)$$

Και για  $\Psi_{wr} = 90^\circ$

$$C_{DA\Psi_{wr}=90} = \frac{1}{2} \cdot \left( C_{DA\Psi_{wr}=90-\mu} + C_{DA\Psi_{wr}=90+\mu} \right) \quad (3.30)$$

Όπου:

$A_{OD}$  Η πλευρική προβεβλημένη επιφάνεια των υπερκατασκευών [m<sup>2</sup>]

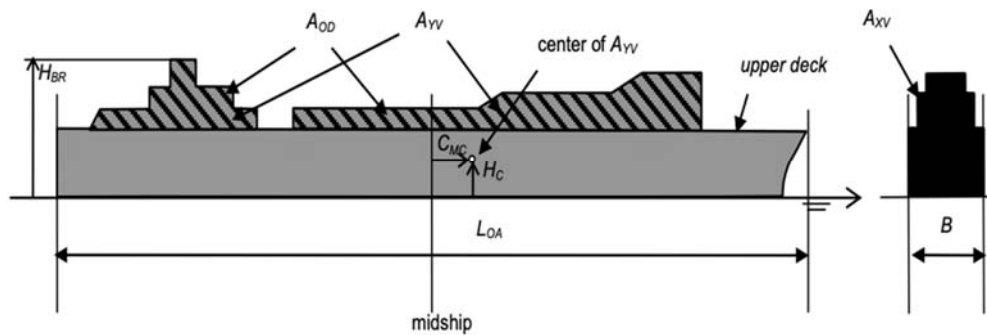
- $A_{XV}$  Η επιφάνεια της μέγιστης εγκάρσιας τομής που εκτίθεται στον άνεμο [ $m^2$ ]
- $A_{YV}$  Η πλευρική προβεβλημένη επιφάνεια πάνω από την ίσαλο πλεύσης [ $m^2$ ]
- $B$  Το πλάτος του πλοίου [m]
- $C_{DA}$  Συντελεστής αντίστασης ανέμου
- $C_{MC}$  Η οριζόντια απόσταση από την μέση τομή μέχρι το κέντρο της επιφάνειας  $A_w$  [m]
- $h_{BR}$  Η κατακόρυφη απόσταση από την κορυφή των υπερκατασκευών μέχρι την ίσαλο πλεύσης [m]
- $H_C$  Η κατακόρυφη απόσταση από την ίσαλο πλεύσης μέχρι το κέντρο της επιφάνειας  $A_{wv}$ , [m]
- $L_{OA}$  Το ολικό μήκος του πλοίου [m]
- $M$  εύρος εξομάλυνσης
- $\Psi_{wr}$  Η σχετική κατεύθυνση του ανέμου, όπου οι  $0^\circ$  σημαίνει μετωπικός άνεμος.

Για τους αδιάστατους συντελεστές  $\beta_{ij}$ ,  $\delta_{ij}$ ,  $\epsilon_{ij}$  δίνεται ο **Πίνακας 2**:

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

Πίνακας 2 - Αδιάστατοι συντελεστές μεθόδου Fujiwara

Στο **Σχήμα 5** παρουσιάζονται το σύστημα συντεταγμένων, ο συμβολισμός και η εξήγηση των παραμέτρων εισόδου για την μέθοδο Fujiwara.



Σχήμα 5 - Σύστημα συντεταγμένων και παράμετροι εισόδου της μεθόδου Fujiwara (ITTC, 2021)

### 3.6 Πρόσθετη Αντίσταση Κυματισμού

Η πρόσθετη αντίσταση κυματισμού μπορεί να υπολογιστεί με τη διενέργεια δοκιμών με μοντέλα, με υπολογιστικές μεθόδους CFD ή με χρήση εμπειρικών μεθόδων. Στην παρούσα εργασία υπολογίστηκε με την εμπειρική μέθοδο STAWAVE-1 και STAWAVE-2 οι οποίες προτείνονται στην ITTC 2021 και παρουσιάζονται παρακάτω.

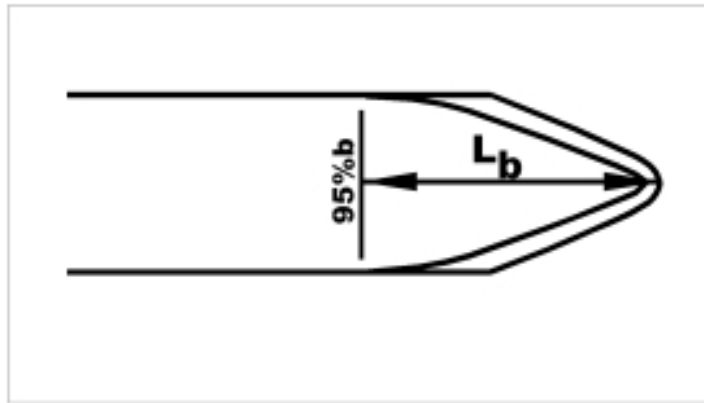
#### 3.6.1 STAWAVE-1

Συγκεκριμένα για συνθήκες δοκιμών ανοιχτής θάλασσας για τα σύγχρονα πλοία έχει αναπτυχθεί μία συγκεκριμένη και πρακτική μέθοδος από το Sea Trial Analysis – Joint Industry Project (STA-JIP) της MARIN, για την εκτίμηση της πρόσθετης αντίστασης κυματισμού με περιορισμένα δεδομένα.

Γενικά, οι δοκιμές θαλάσσης διεξάγονται σε ήρεμα νερά με περιορισμένο ύψος κύματος. Σε χαμηλούς πρωραίους κυματισμούς η συχνότητα συνάντησης των κυμάτων είναι υψηλή. Σε αυτές τις συνθήκες, η επίδραση των κινήσεων που προκαλούνται από τα κύματα μπορεί να παραμεληθεί και η πρόσθετη αντίσταση του σκάφους προκύπτει κυρίως από την ανάκλαση του κύματος στη γάστρα στην ίσαλο γραμμή. Η γεωμετρία της



ισάλο προσεγγίζεται με βάση τη δοκό του πλοίου και το μήκος του πρωραίου τμήματος στην ίσαλο όπως φαίνεται στην **Σχήμα 6**.



Σχήμα 6 - Μήκος  $L_{BWL}$  (ITTC, 2021)

Η παρακάτω σχέση υπολογίζει την αύξηση της αντίστασης στα πρωραία κύματα, υπό την προϋπόθεση ότι οι κινήσεις κατακόρυφης ταλάντωσης (heave) και προνευτασμού (pitch) είναι μικρές. Η εφαρμογή περιορίζεται εκ νέου σε κύματα στο κομμάτι της πλώρης, εντός +/- 45 μοιρών από την πλώρη. Για κατευθύνσεις κυμάτων έξω από αυτό το κομμάτι δεν εφαρμόζεται διόρθωση κύματος.

$$R_{AWL} = \frac{1}{16} \rho_s g H_{1/3W}^2 B \sqrt{\frac{B}{L_{BWL}}} \quad (3.31)$$

Όπου:

$\rho_s$  η πυκνότητα νερού σε πραγματική θερμοκρασία και περιεκτικότητα σε αλάτι [ $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ]

$g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας [ $\text{m/s}^2$ ]

$H_{w1/3}$  το σημαντικό ύψος κύματος λόγω ανέμου [m]

$B$  το πλάτος του πλοίου [m]

$L_{BWL}$  το μήκος από την πλώρη έως το σημείο που αντιστοιχεί στο 95% του μέγιστου πλάτους στην ίσαλο πλεύσης του πλοίου [m]

Η μέθοδος STAWAVE-1 έχει αξιολογηθεί εκτενώς για τις ακόλουθες συνθήκες:

1. Για μικρές κινήσεις heave και pitch (πρωραία κατακόρυφη επιτάχυνση <0,05 g)

2. Για πρωραίου κυματισμούς. Για κύματα με διεύθυνση κύματος εντός 0 έως  $\pm 45$  μοιρών από την πλήρη διορθώνονται ως πρωραίοι κυματισμοί.

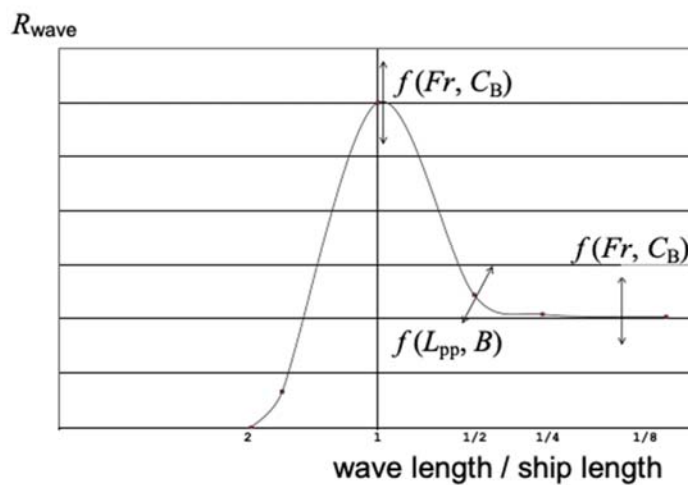
Ωστόσο, στο πλαίσιο της παρούσης μελέτης, δεδομένου ότι δε λαμβάνει υπόψιν το τυχαίο φάσμα των κυματισμών, το οποίο το πλοίο μπορεί να συναντήσει καθ' όλη τη διάρκεια της πλεύσης του, αξιολογήθηκε ως μη ακριβής και δε χρησιμοποιήθηκε, κατά την επεξεργασία των δεδομένων.

Για λόγους πληρότητας, η μεταβολή της τιμής της συναρτήσεως του αδιαστατοποιημένου μήκους κύματος, καθώς και η ποιοτική σύγκριση με τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας STAWAVE-2 που ακολουθεί, παρουσιάζονται στο παράρτημα Β της εργασίας.

### 3.6.2 STAWAVE – 2

Η εμπειρική μέθοδος STAWAVE-2 έχει αναπτυχθεί και αυτή από το STA-JIP της MARIN, για την προσέγγιση της συνάρτησης μεταφοράς της πρόσθετης αντίστασης κυματισμού χρησιμοποιώντας κύριες παραμέτρους όπως οι διαστάσεις και η ταχύτητα του πλοίου

**Σχήμα 7.** Για το σκοπό αυτό, μια εκτεταμένη βάση δεδομένων αποτελεσμάτων δοκιμών μοντέλων για μεγάλο πλήθος πλοίων έχει χρησιμοποιηθεί για την εξαγωγή παραμετρικών λειτουργιών μετασχηματισμού.



Σχήμα 7 - Γραφική απεικόνιση πρόσθετης αντίστασης κυματισμού STAWAVE-2 (ITTC, 2021)

Η εμπειρική αυτή μέθοδος καλύπτει τόσο την πρόσθετη αντίσταση λόγω ανάκλασης (Resistance Increase due to Wave Reflection)  $R_{AWR}$ , όσο και την πρόσθετη αντίσταση λόγω κινήσεων του πλοίου (Motion Induced Added Wave Resistance)  $R_{AWM}$ .

$$R_{wave}(\omega, \alpha; V_s) = R_{AWM} + R_{AWR} \quad (3.32)$$

Η πρόσθετη αντίσταση λόγω κινήσεων  $R_{AWM}$  δίνεται από τη σχέση:

$$R_{AWML} = 4\rho_s g \zeta_A^2 B^2 / L_{pp} \bar{\Gamma}_{aw}(\omega) \quad (3.33)$$

Όπου

$$\bar{\Gamma}_{aw}(\omega) = \bar{\omega}^{b_1} \exp\left\{\frac{b_1}{d_1}(1 - \bar{\omega}^{d_1})\right\} a_1 Fr^{1.50} \exp(-3.50Fr) \quad (3.34)$$

$$\bar{\omega} = \frac{\sqrt{\frac{L_{pp}}{g}} \sqrt[3]{k_{yy}}}{1.17Fr^{-0.143}} \omega \quad (3.35)$$

$$\alpha_1 = 60.3C_B^{1.34} \quad (3.36)$$

$$b_1 = \begin{cases} 11.0 & , \text{για } \bar{\omega} < 1 \\ -8.50 & , \text{για } \bar{\omega} \geq 1 \end{cases} \quad (3.37)$$

$$d_1 = \begin{cases} 14.0 & , \text{για } \bar{\omega} < 1 \\ -566 \left(\frac{L_{pp}}{B}\right)^{-2.66} & , \text{για } \bar{\omega} \geq 1 \end{cases} \quad (3.38)$$

$$R_{AWRL} = \frac{1}{2} \rho_s g \zeta_A^2 B a_1(\omega) \quad (3.39)$$

$$\alpha_1(\omega) = \frac{\pi^2 I_1^2(1.5kT_M)}{\pi^2 I_1^2(1.5kT_M) + K_1^2(1.5kT_M)} f_1 \quad (3.40)$$

$$f_1 = 0.692 \left(\frac{V_s}{\sqrt{T_M g}}\right)^{0.769} + 1.81C_B^{6.95} \quad (3.41)$$

Όπου:

$C_B$	ο συντελεστής εκτοπίσματος του πλοίου [-]
$V_S$	η ταχύτητα του πλοίου [m/s]
$K_{\gamma\gamma}$	ο αδιάστατος συντελεστής της ακτίνας περιστροφής στην εγκάρσια κατεύθυνση[-]
$L_{pp}$	το μήκος μεταξύ καθέτων του πλοίου [m]
$T_M$	το βύθισμα στο μέσο του πλοίου [m]
$I_1$	τροποποιημένη συνάρτηση Bessel πρώτης τάξης με όρισμα το 1
$K_1$	τροποποιημένη συνάρτηση Bessel δεύτερης τάξης με όρισμα το 1

Η μέθοδος αυτή έχει τους παρακάτω περιορισμούς:

1.  $50\text{m} < L_{pp} < 400\text{m}$ ,
2.  $4.0 < \frac{L_{pp}}{B} < 9.0$ ,
3.  $2.2 < \frac{B}{T_M} < 9.0$ ,
4.  $0.10 < Fr < 0.30$ ,
5.  $0.39 < C_B < 0.90$ ,
6. Κατεύθυνση κυματισμών μεταξύ 0 και  $\pm 45$  μοίρες από την πλήρη

Για τον υπολογισμό της πρόσθετης αντίστασης σε μη αρμονικούς κυματισμούς, η μέθοδος εφαρμόζεται ως εξής:

$$R_{AWL} = 2 \int_0^{\infty} \frac{R_{wave}(\omega; V_S)}{\zeta_{\alpha}^2} S_{\eta}(\omega) d\omega \quad (3.42)$$

- Για το κυματικό φάσμα  $S_{\eta}(\omega)$  χρησιμοποιήθηκε το φάσμα JONSWAP, (Hasselmann et al) το οποίο έχει βασιστεί στα δεδομένα από το Joint North Sea Wave Program (JONSWAP) του 1969 στα δυτικά των ακτών της Δανίας. Το φάσμα αυτό χρησιμοποιήθηκε καθώς είναι το πιο ευρέως διαδεδομένο και χρησιμοποιούμενο φάσμα για μελέτες σε βαθιά νερά και για δυσχερείς καιρικές συνθήκες :

$$S(H_s, T_p, \gamma) = \frac{\alpha^* H_s^2 \omega^{-5}}{\omega_p^{-4}} \exp \left[ -\frac{5}{4} \left( \frac{\omega}{\omega_p} \right)^{-4} \right] \gamma \exp \left[ \frac{-(\omega - \omega_p)^2}{2\sigma^2 \omega_p^2} \right] \quad (3.43)$$

Όπου:

- $\omega_p$  η συχνότητα του κύματος σε rad/s που αντιστοιχεί στην περίοδο κορυφής μέσω της παρακάτω σχέσης :

$$\omega_p = \frac{2\pi}{T_p} \quad (3.44)$$

- $\alpha^* = 0.064/[0.23 + 0.0336\gamma - 0.185/(1.9 + \gamma)]$
- $\sigma = \begin{cases} 0.07, & \omega \leq \omega_p \\ 0.09, & \omega > \omega_p \end{cases}$
- $\gamma = 3.3$
- $H_s$  το σημαντικό ύψος κύματος σε [m], όπως αυτό υπολογίζεται από τα διαθέσιμα δεδομένα των καθημερινών καταγραφών των πλοίων για καταστάσεις κυματισμών swell, επονομαζόμενο ως Swell Height –  $H_{s1/3}$ , και από τα δεδομένα για τον επαγόμενο κυματισμό λόγω του ανέμου (Wind Waves –  $H_{w1/3}$ ).

Σημειώνεται πως, σύμφωνα με τον ορισμό του συγκεκριμένου φάσματος, ως δεδομένα εισόδου θεωρούνται : το σημαντικό ύψος κύματος  $H_s$ , ο συντελεστής  $\gamma$  και η περίοδος κορυφής  $T_p$ . Ενώ τα δύο ορίζονται σαφώς από τις διαθέσιμες καταγραφές και τους κανονισμούς της MEPC.1/Circ.850/Rev.3 για δυσχερείς καιρικές συνθήκες,, η περίοδος κορυφής δεν είναι εξ' αρχής γνωστή για κάθε σετ δεδομένων.

Ως εκ τούτου, όπως αναφέρεται και στους παραπάνω κανονισμούς, για κάθε σετ δεδομένων και για κάθε συνιστώσα αντίστασης υπολογίστηκε το φάσμα για εύρος περιόδων κορυφής 7-15 sec.

Η ολική τιμή της πρόσθετης αντίστασης κυματισμού  $R_{AWL}$  υπολογίζεται, εφαρμόζοντας το φάσμα JONSWAP στην συνάρτηση μεταφοράς :

$$\frac{R_{wave(\omega;V_s)}}{\zeta_\alpha^2}$$

όπως ορίστηκε παραπάνω, με το  $\zeta_\alpha$  να ισούται με  $H_s/2$ .

### 3.6.3 Υπολογισμός πρόσθετης ισχύος κυματισμού και τελικώς διορθωμένης αποδιδόμενης ισχύος

Η τελική τιμή της πρόσθετης ισχύος λόγω κυματισμού υπολογίζεται με τον παρακάτω τύπο :

$$\Delta P_{Wave} = \frac{(R_{AWL}) \cdot v_g}{\eta_{D0}} \quad (3.45)$$

, με τα μεγέθη όπως ορίστηκαν προηγουμένως.

Έχοντας, πλέον, ολοκληρώσει τις διορθώσεις ανέμου και κυματισμού, οι αρχικές τιμές της μετρούμενης ισχύος διορθώνονται ως εξής :

$$P_{D,corr} = P_D - \Delta P_{wind} - \Delta P_{Wave} \quad (3.46)$$

### 3.7 Δείκτες αποδοτικότητας

Όπως έχει προαναφερθεί, έχουν θεσπιστεί πλέον στη ναυτιλία η αξιολόγηση της αποδοτικότητας με την χρήση μέσω των Δεικτών Αξιολόγησης Αποδοτικότητας (Key Performance Indicators - KPIs) που αντανακλούν το επίπεδο απόδοσης σε αριθμούς. Έτσι και στο ISO 19030 υπάρχουν 4 τέτοιοι δείκτες όπως φαίνονται στον **Πίνακας 3**.

Δείκτες Αξιολόγησης Απόδοσης	Ορισμός
<b>Dry-docking performance/Απόδοση Δεξαμενισμού:</b> Προσδιορισμός της αποτελεσματικότητας του δεξαμενισμού (δραστηριότητες επισκευής και/ή μετασκευής)	Μεταβολή των επιδόσεων της γάστρας και της έλικας μετά τον δεξαμενισμό (περίοδος αξιολόγησης) σε σύγκριση με τον μέσο όρο των προηγούμενων αποδόσεων πριν τον δεξαμενισμό (περίοδοι αναφοράς).
<b>In-service performance/Εν-Λειτουργία Απόδοση:</b> Προσδιορισμός της αποτελεσματικότητας της γάστρας και της έλικας (συμπεριλαμβανομένων τυχόν δραστηριοτήτων συντήρησης που έχουν πραγματοποιηθεί κατά τη διάρκεια του πλήρους διαστήματος δεξαμενισμού)	Η μέση μεταβολή των επιδόσεων της γάστρας και της έλικας από μια περίοδο μετά την έξοδο από δεξαμενισμό (περίοδος αναφοράς) έως το τέλος του διαστήματος δεξαμενισμού (περίοδος αξιολόγησης).

<p><b>Maintenance trigger/ Έναυσμα για Συντήρηση:</b> Έναυσμα για της συντήρησης της γάστρας και της έλικας, συμπεριλαμβανομένης της επιθεώρησης έλικα ή/και γάστρας</p>	<p>Μεταβολή της απόδοσης της γάστρας και της έλικας από την έναρξη του διαστήματος δεξαμενισμού (περίοδος αναφοράς) σε κινητό μέσο όρο σε οποιαδήποτε επιλεγμένη χρονική στιγμή (περίοδος αξιολόγησης).</p>
<p><b>Maintenance effect/ Επίδραση της Συντήρησης:</b> Προσδιορισμός της επίδρασης συγκεκριμένης δραστηριότητας συντήρησης συμπεριλαμβανομένου οποιουδήποτε καθαρισμού έλικας και/ή γάστρας</p>	<p>Μεταβολή των επιδόσεων της γάστρας και της έλικας που μετράται πριν (περίοδος αναφοράς) και μετά (περίοδος αξιολόγησης) από μία δραστηριότητα συντήρησης.</p>

Πίνακας 3 - Δείκτες Αποδοτικότητας κατά ISO 19030

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΣΥΛΛΟΓΗ ΚΑΙ ΑΡΧΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

### 4.1 Μεθοδολογία

Το ερευνητικό μέρος της εργασίας αποτελείται από ποσοτική έρευνα για την οποία χρησιμοποιήθηκαν πραγματικά δεδομένα. Πιο συγκεκριμένα με την χρήση δεδομένων για τέσσερα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων γίνεται εφαρμογή της μεθόδου του ISO 19030 για την αξιολόγηση της ενεργειακής τους αποδοτικότητας με σκοπό να απαντηθούν τα τρία ερευνητικά ερωτήματα της παρούσας εργασίας.

Για την εφαρμογή της μεθοδολογίας του ISO 19030 ακολουθήθηκαν τα εξής βήματα:

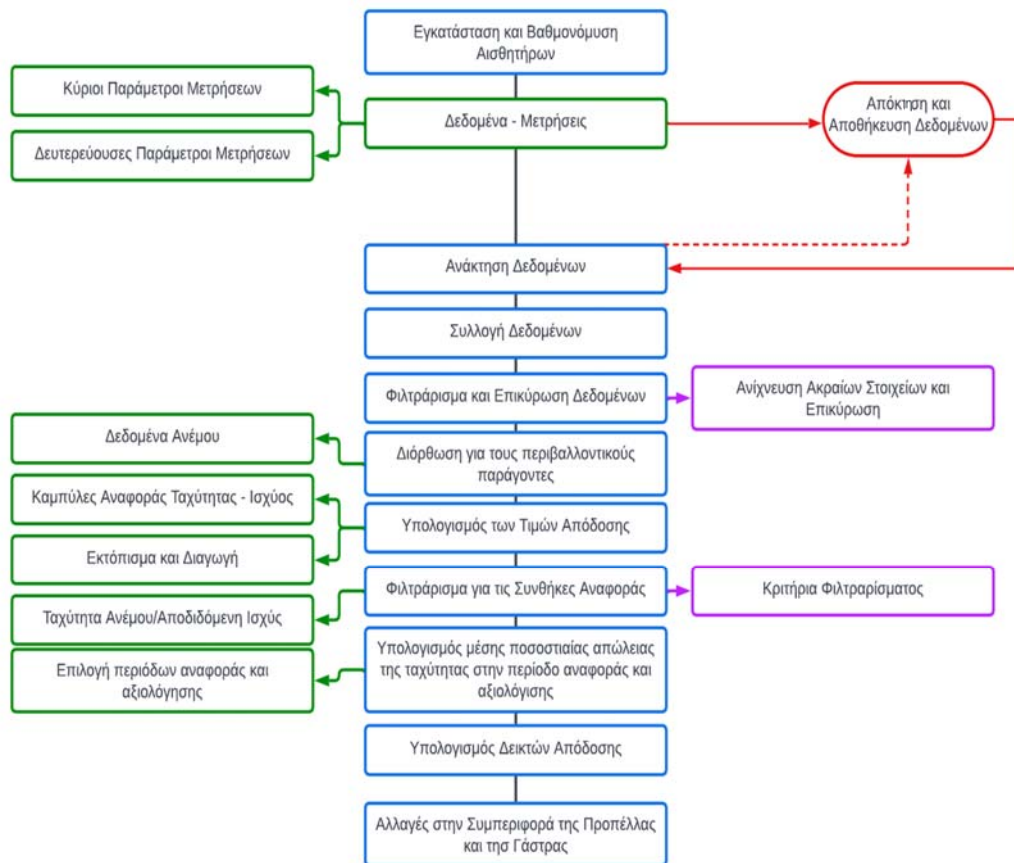
1. Φιλτράρισμα και κανονικοποίηση δεδομένων
2. Εισαγωγή ταχύτητας και κατεύθυνσης του ανέμου και του πλοίου
3. Υπολογισμός πραγματικής ταχύτητας και κατεύθυνσης του ανέμου
4. Εισαγωγή του βυθίσματος, επιφάνειας, πλάτους και υψών ανεμόμετρου και αναφοράς πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας
5. Υπολογισμός του ύψους αναφοράς από το επίπεδο της θάλασσας και στην συνέχεια της πραγματικής ταχύτητας του ανέμου στο ύψος αυτό
6. Υπολογισμός σχετικής ταχύτητας και κατεύθυνσης του ανέμου σε αυτό το ύψος
7. Υπολογισμός συντελεστών αντίστασης ανέμου εφαρμόζοντας την μέθοδο Fujiwara
8. Υπολογισμός πρόσθετης αντίστασης λόγω του σχετικού ανέμου
9. Υπολογισμός αντίστασης του αέρα σε κατάσταση άπνοιας
10. Εισαγωγή μετρούμενης ισχύος και των συντελεστών απόδοσης πρόωσης
11. Υπολογισμός τελικής τιμής της ισχύος

Μία δεύτερη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε είναι αυτή της ITTC σύμφωνα με τα παρακάτω βήματα. Σημειώνεται πως η διαδικασία υπολογισμού της πρόσθετης αντίστασης λόγω ανέμου είναι η ίδια με αυτή του ISO 19030 και τα βήματα αυτά παραλείπονται. Όλα τα παρακάτω βήματα έγιναν με τη χρήση κώδικα προγραμματισμού στο MATLAB.



1. Εισαγωγή πραγματικής ταχύτητας του ανέμου και επιτάχυνσης της βαρύτητας.
2. Υπολογισμός σημαντικού ύψους κύματος και το πλάτος αυτού
3. Εισαγωγή πυκνότητας του νερού, του πλάτους του πλοίου και του μήκους  $L_{BWL}$ .
4. Υπολογισμός πρόσθετης αντίστασης λόγω κυματισμού σύμφωνα με την μέθοδο STAWAVE – 1
5. Εισαγωγή γεωμετρικών χαρακτηριστικών πλοίων
6. Υπολογισμός συντελεστή Froude και  $\alpha_1$ .
7. Εισαγωγή  $\kappa_{\gamma\gamma}$  και υπολογισμός  $\bar{\omega}$ .
8. Υπολογισμός  $b_1$ ,  $d_1$ .
9. Υπολογισμός  $\bar{\tau}\omega$ .
10. Υπολογισμός πρόσθετης αντίστασης κυματισμού εξαιτίας κίνησης του κύματος.
11. Υπολογισμός συντελεστή  $f_1$ .
12. Εισαγωγή συναρτήσεων Bessel  $K_1, I_1$  και κυματαριθμού  $\kappa$
13. Υπολογισμός συντελεστή  $\alpha_{1(\omega)}$
14. Υπολογισμός πρόσθετης αντίστασης κυματισμού λόγω ανάκλασης
15. Υπολογισμός αντίστασης κυματισμού  $R_{WAVE}$
16. Εισαγωγή  $\omega_m$
17. Υπολογισμός φάσματος
18. Υπολογισμός πρόσθετης αντίστασης κυματισμού
19. Υπολογισμός συνολικής πρόσθετης αντίστασης
20. Εισαγωγή μετρούμενης ισχύος και συντελεστών απόδοσης πρόωσης
21. Υπολογισμός τελικής τιμής της ισχύος

Όλα τα παραπάνω βήματα απεικονίζονται στο γενικευμένο διάγραμμα ροής του υπολογιστικού μέρους της εργασίας όπως αυτό φαίνεται στο **Σχήμα 8**.



Σχήμα 8 - Διάγραμμα ροής υπολογιστικού μέρους

Οι υπολογισμοί έγιναν αξιολογώντας, αρχικά, τρεις καταστάσεις φόρτωσης σε τρία διαφορετικά βύθισματα: μέγιστο βύθισμα αντοχής (scantling draught), βύθισμα σχεδίασης (design draught), βύθισμα σε κατάσταση ερματισμού (ballast draught). Με την εφαρμογή του ISO 19030 σε συνδυασμό με την ITTC 2021, υπολογίστηκαν τελικά τα ποσοστά αύξησης ισχύος και μείωσης ταχύτητας καθώς και ο συντελεστής φόρτισης της έλικας για κάθε σετ δεδομένων.

#### 4.2 Συλλογή και Φιλτράρισμα Δεδομένων

Πολύ σημαντικό κομμάτι της έρευνας αποτελεί η συλλογή των δεδομένων καθώς και το φιλτράρισμα και η προετοιμασία αυτών. Συγκεκριμένα, για την παρούσα έρευνα, χρησιμοποιήθηκαν πραγματικά δεδομένα για τέσσερα πλοία μεταφοράς

εμπορευματοκιβωτίων (Container Vessels). Τα βασικά χαρακτηριστικά των πλοίων φαίνονται στον Πίνακα 4 τα οποία είναι όμοια μεταξύ τους καθώς πρόκειται για τέσσερα όμοια αδελφά πλοία.

TEU	<b>6,927</b>
Lpp (m)	258
Πλάτος (moulded) (m)	42.8
Κοίλο (moulded) (m)	24.8
Βύθισμα Σχεδίασης (m) (moulded)	13
Βύθισμα Αντοχής (m) (moulded)	14.5
DWT (t)	abt.80,000
MCR (kW)	33,670

Πίνακας 4 - Βασικά χαρακτηριστικά υπό μελέτη πλοίων

Έπειτα από συνεννόηση με την εταιρεία, συλλέξαμε τα παρακάτω δεδομένα για κάθε πλοίο:

1. Τα σχέδια της γενικής διάταξης των πλοίων (General Arrangement)
2. Βιβλίο Διαγωγής και Ευστάθειας (Trim & Stability Booklet) για τα τέσσερα πλοία
3. Δοκιμές Θαλάσσης (Sea Trials) για δύο από τα τέσσερα πλοία
4. Καμπύλες ταχύτητας – ισχύος από δοκιμές μοντέλων για τα τέσσερα πλοία
5. Αναφορές Συντήρησης (Maintenance Reports) για όλα τα πλοία
6. Καθημερινές Καταγραφές Εν Πλω (Noon Reports) για κάθε πλοίο

Η πηγή των δεδομένων ήταν τα noon reports των πλοίων. Συλλέχθηκαν καθημερινές καταγραφές για χρονικό διάστημα 3,5 ετών με περισσότερες από 1,500 μετρήσεις για κάθε πλοίο.

### 4.3 Επεξεργασία Δεδομένων

Το σύνολο των διαθέσιμων δεδομένων από τα noon reports συλλέχθηκε σε υπολογιστικά φύλλα Excel τα οποία περιείχαν για κάθε καταγραφή:

- Τύπος (Noon, Arrival, Departure)
- Ημερομηνία
- Κατεύθυνση Ανέμου
- Ισχύς Ανέμου [Beaufort]
- Μέση ταχύτητα ως προς το έδαφος [knots]
- Κατεύθυνση πορείας
- Μέση πραγματική ταχύτητα [knots]
- Ποσοστό ισχύος κύριας μηχανής [%MCR]
- Πρωραίο βύθισμα [m]
- Πρυμναίο Βύθισμα [m]
- Διαγωγή [m]
- Ύψος κύματος (swell height) [m]
- Κατεύθυνση κύματος (swell direction)

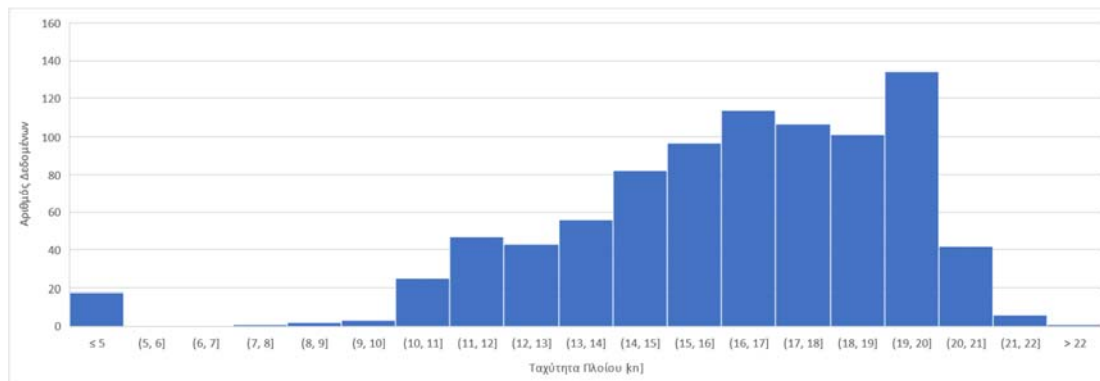
Σε αυτά τα δεδομένα έγιναν αρχικές διορθώσεις όπως η μετατροπή της ταχύτητας ανέμου σε μονάδες m/s, ο υπολογισμός μέσου βυθίσματος, και η μετατροπή της κατεύθυνσης ανέμου από σημεία του ορίζοντα σε μοίρες.

### 4.4 Στατιστική ανάλυση δεδομένων

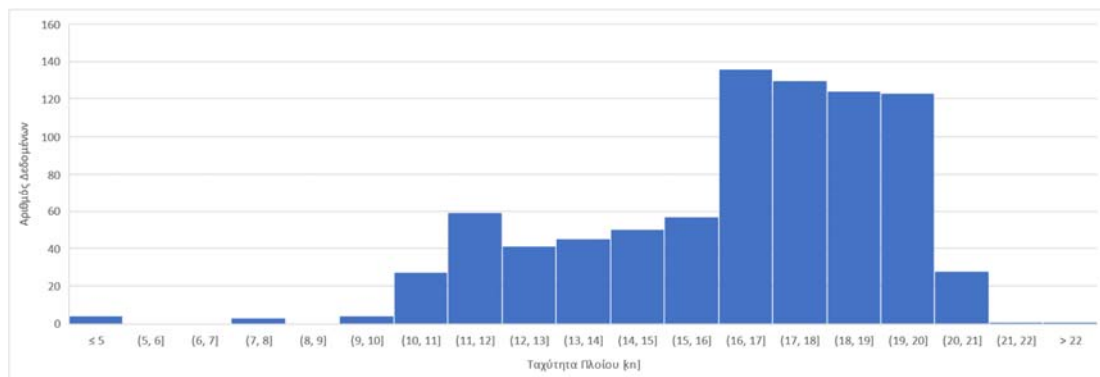
Από την επεξεργασία των δεδομένων προκύπτουν ως έγκυρα τα αποτελέσματα των απογευματινών καταγραφών (noon). Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται στατιστική ανάλυση αυτών των διαθέσιμων έγκυρων δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη. Πιο συγκεκριμένα παρακάτω φαίνονται τα ιστογράμματα συχνότητας μιας σειράς βασικών παραμέτρων των τεσσάρων πλοίων. Η διαδικασία αυτή αποτελεί ένα από τα σημαντικά στάδια για να προσδιοριστούν τόσο οι οι μέσες τιμές των παραμέτρων,

επομένως και οι καταστάσεις που επικράτησαν στο χρονικό διάστημα της μελέτης, όσο και για την εύρεση των ακραίων τιμών του δείγματος.

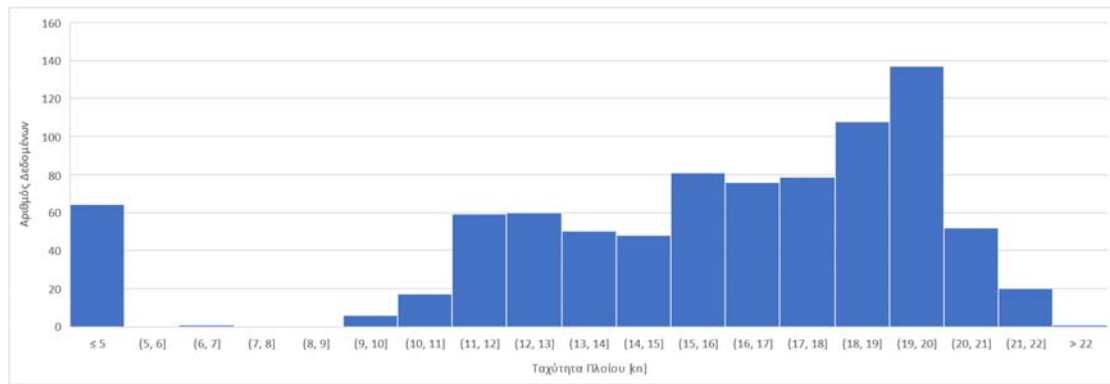
Όσον αφορά τα δεδομένα για την ταχύτητα στο νερό τα διαθέσιμα δεδομένα ανέρχονται συνολικά περίπου στις 900 τιμές για τα τέσσερα πλοία, εκ των οποίων η πλειοψηφία κυμαίνεται μεταξύ 12 και 20 κόμβων. Η κατανομή των δεδομένων παρουσιάζεται στα παρακάτω σχήματα.



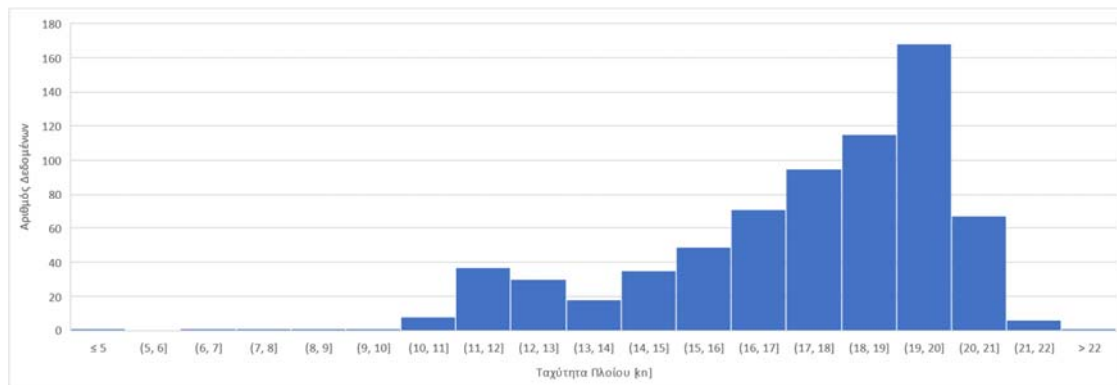
Σχήμα 9 - Μέση Ταχύτητα - ΠΛΟΙΟ Α



Σχήμα 10 - Μέση Ταχύτητα - ΠΛΟΙΟ Β



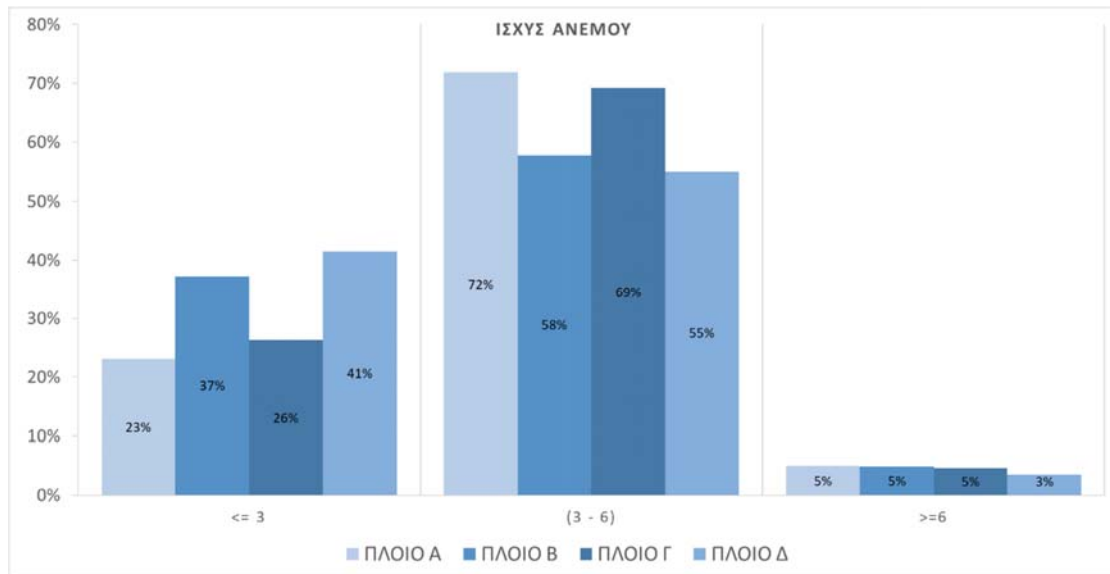
Σχήμα 11 - Μέση Ταχύτητα - ΠΛΟΙΟ Γ



Σχήμα 12 - Μέση Ταχύτητα - ΠΛΟΙΟ Δ

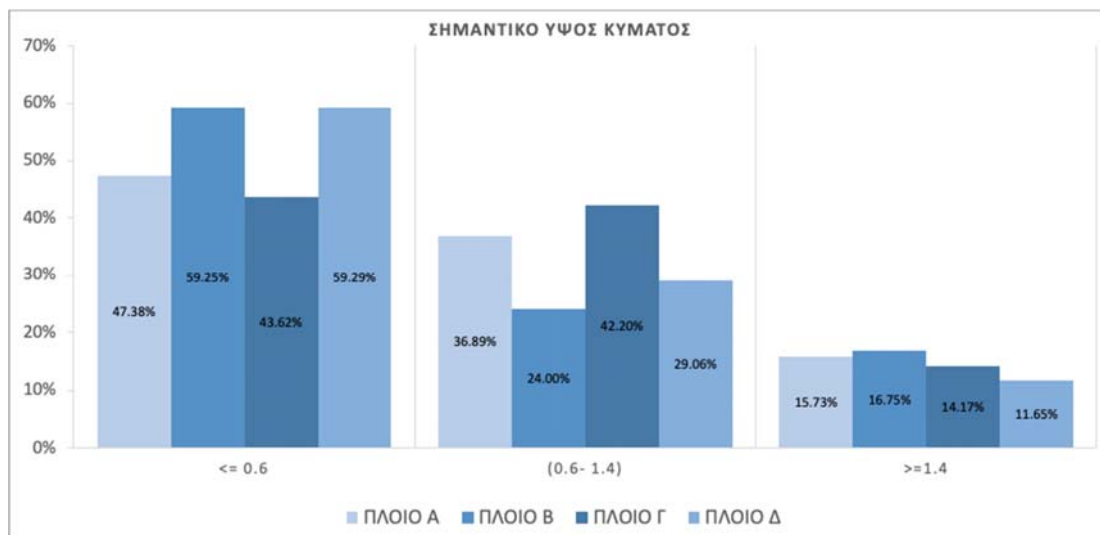
Παρατηρείται μια σχετικά ομαλή κατανομή των ταχυτήτων των πλοίων Α και Γ (με πολλές ταχύτητες του Γ να είναι αρκετά μικρές), ενώ οι ταχύτητες των πλοίων Β και Δ συγκεντρώνονται σαφώς στο εύρος 16 με 20 κόμβους. Ειδικά, στο πλοίο Δ διαπιστώνεται μεγάλη διαφορά στον αριθμό δεδομένων εύρους 19 με 20 κόμβους, συγκριτικά με τα υπόλοιπα.

Στο ιστόγραμμα του σχήματος **Σχήμα 13** παρουσιάζεται η συχνότητα των δεδομένων για την ισχύ του ανέμου, αντιμέτωπο με την οποία βρέθηκε το εκάστοτε πλοίο στο χρονικό διάστημα των δεδομένων (ισχύς ανέμου σε κλίμακα BF).



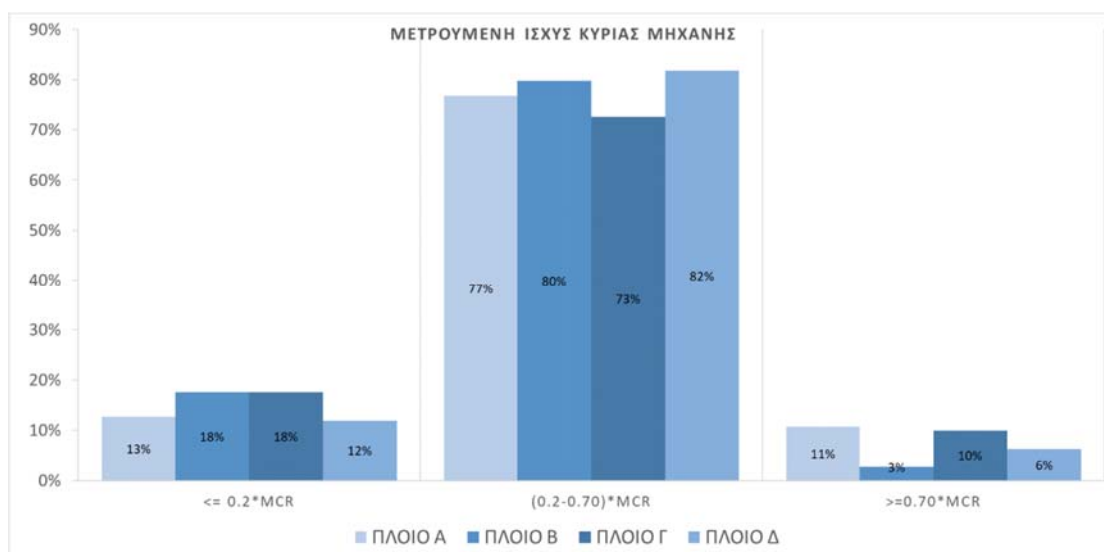
Σχήμα 13 - Ιστογράμμα κατανομής συχνότητας δεδομένων ισχύος ανέμου

Σχετικά με το σημαντικό ύψος κύματος, συγκεντρώθηκαν περίπου 900 δεδομένα ανά πλοίο και η κατανομή της συχνότητάς τους ανά πλοίο φαίνεται στο **Σχήμα 14**.



Σχήμα 14 - Ιστογράμμα κατανομής συχνότητας δεδομένων σημαντικού ύψους κύματος

Τέλος, στο ιστογράμμα του σχήματος **Σχήμα 15** παρουσιάζεται η συχνότητα των δεδομένων για τη μετρούμενη ισχύ των πλοίων, όπως αυτή καταγράφεται από τους μετρητές του μηχανοστασίου.



Σχήμα 15 - Ιστογράμμα κατανομής συχνότητας δεδομένων μετρούμενης ισχύος πλοίου

		ΠΛΟΙΟ Α	ΠΛΟΙΟ Β	ΠΛΟΙΟ Γ	ΠΛΟΙΟ Δ
<b>Ταχύτητα στο νερό [kn]</b>	Μέση τιμή	16.08	16.37	15.31	17.40
	Τυπική Απόκλιση	3.58	2.90	5.21	3.02
<b>Σημαντικό ύψος κύματος [m]</b>	Μέση τιμή	0.88	0.86	0.92	0.79
	Τυπική Απόκλιση	0.599	0.585	0.267	0.541
<b>Ισχύς ανέμου [BF]</b>	Μέση τιμή	4.36	4.08	4.26	3.81
	Τυπική Απόκλιση	1.237	1.406	1.401	1.467
<b>Απαίτηση ισχύος [kW]</b>	Μέση τιμή	14,321	13,098	13,821	15,217
	Τυπική Απόκλιση	6,462.8	5,637.1	6,394.6	6,139.1

Πίνακας 5 - Μέση τιμή και τυπική απόκλιση δεδομένων

Σύμφωνα με τα στατιστικά, οι καιρικές συνθήκες τις οποίες αντιμετώπιζε το πλοίο Δ κατά την καταγραφή των δεδομένων, στο διάστημα 3.5 ετών, κρίνονται σαφέστατα καλύτερες από των υπολοίπων τριών. Συγκεκριμένα, ενώ έχει τη μεγαλύτερη απαίτηση ισχύος, η ισχύς ανέμου και το σημαντικό ύψος κύματος υπολογίζονται αρκετά χαμηλά, συγκριτικά με τα υπόλοιπα πλοία, καθώς και η ταχύτητα του στο νερό μεγαλύτερη κατά ένα κόμβο από το δεύτερο πλοίο (πλοίο Β). Αξιοσημείωτη είναι, επίσης, η πολύ μικρή απαιτούμενη ισχύς του πλοίου Β, αναλογικά με τη μέση ταχύτητά του (16.37 kn), διότι, παρόλο που οι



ενδείξεις των καιρικών συνθηκών (άνεμος και ύψος κύματος) για τα πλοία Β και Γ είναι αρκετά παρόμοιες και, επομένως, ασφαλώς συγκρίσιμες, η μέση ταχύτητα του πλοίου Γ είναι κατά ένα κόμβο μικρότερη του Β ενώ η απαιτούμενη ισχύς κατά 800 kW μεγαλύτερη.

#### 4.5 Μελέτη βυθισμάτων πλοίων

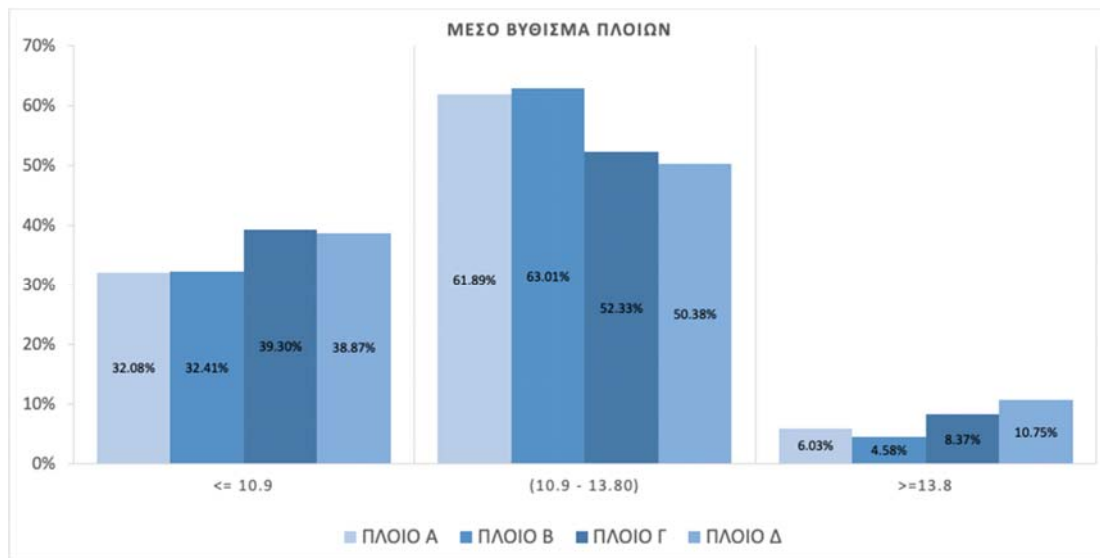
Κατά την σχεδίαση των πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, το βέλτιστο βύθισμα λειτουργίας του καθορίζεται με βάση παράγοντες όπως το μέγεθος του πλοίου, το εκτόπισμα, η μορφή της γάστρας, το σύστημα πρόωσης και η χωρητικότητα του. Το βύθισμα σχεδίασης (design draught) είναι το βύθισμα στο οποίο το πλοίο μπορεί να επιτύχει την καλύτερη απόδοση και αποτελεσματικότητά του, διατηρώντας παράλληλα την ασφάλεια και την ευστάθεια του. Το βύθισμα αυτό είναι συνήθως χαμηλότερο από το μέγιστο επιτρεπόμενο βύθισμα του πλοίου (scantling draught), το οποίο αντιπροσωπεύει το μέγιστο βύθισμα στο οποίο το πλοίο μπορεί να λειτουργήσει με ασφάλεια χωρίς να υπερβεί τα όρια αντοχής και ευστάθειας (Kristensen, 2013).

Η λειτουργία των πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων στο βύθισμα σχεδίασης επιτρέπει στα πλοία να επιτύχουν την καλύτερη απόδοσή τους όσον αφορά την ταχύτητα, την απόδοση καυσίμου και τη χωρητικότητα φορτίου. Εάν ένα πλοίο λειτουργεί σε διαφορετικά βυθίσματα και αναλόγως μπορεί να παρουσιάσει μειωμένη απόδοση, υψηλότερη κατανάλωση καυσίμου ή μειωμένη χωρητικότητα φορτίου. Για παράδειγμα, εάν ένα πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων λειτουργεί πολύ ρηχά, η προπέλα του μπορεί να μην είναι πλήρως βυθισμένη, μειώνοντας την ταχύτητα του πλοίου και αυξάνοντας την κατανάλωση καυσίμου. Αντίθετα, εάν ένα πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων λειτουργεί πολύ βαθιά, μπορεί να αντιμετωπίσει αυξημένη αντίσταση, μειώνοντας την ταχύτητά του και αυξάνοντας την κατανάλωση καυσίμου.

Τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων συνήθως φορτώνονται και εκφορτώνονται για να διατηρηθεί ένα βέλτιστο βύθισμα λειτουργίας, το οποίο είναι συνήθως περίπου το 80-90% του μέγιστου επιτρεπόμενου βυθίσματος του πλοίου. Αυτό επιτρέπει στο πλοίο να μεταφέρει όσο το δυνατόν περισσότερο φορτίο, διατηρώντας παράλληλα τη βέλτιστη

απόδοση και ευστάθεια. Έτσι, τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων σχεδιάζονται για να λειτουργούν στο ή κοντά στο βύθισμα σχεδίασης τους, το οποίο είναι το βέλτιστο βάθος για το πλοίο να επιτύχει την καλύτερη απόδοση και αποτελεσματικότητά του. Η διατήρηση του βέλτιστου βυθίσματος λειτουργίας είναι σημαντική για τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων για τη γρήγορη και οικονομικά αποδοτική μεταφορά εμπορευμάτων, μεγιστοποιώντας παράλληλα τη χωρητικότητα φορτίου και ελαχιστοποιώντας την κατανάλωση καυσίμου (Kristensen, 2013).

Όσον αφορά τα πραγματικά δεδομένα βυθίσματος, για τα τέσσερα υπό μελέτη πλοία, όπως αναφέρονται στις καθημερινές καταγραφές των πλοίων, παρατίθενται παρακάτω, χωρισμένα στις τρεις θεωρούμενες καταστάσεις αναφοράς με τη μορφή ιστογραμμάτων και ποσοστιαία, ως προς το συνολικό διαθέσιμο αριθμό (Σχήμα 16).



Σχήμα 16 - Ιστόγραμμα κατανομής συχνότητας δεδομένων μέσου βυθίσματος

Παρατηρείται πως το ποσοστό των βυθισμάτων κοντά στο μέγιστο βύθισμα αντοχής δεν ξεπερνάει το 10.75% και, δεδομένου ότι σύμφωνα με την παρούσα μελέτη, πρέπει να ικανοποιούνται και τα κριτήρια της παραγράφου 5.1.2. που ακολουθεί, ο αριθμός των τελικώς έγκυρων δεδομένων ήταν ακόμη χαμηλότερος.

Με γνώμονα όλα τα παραπάνω, κατά τη διαδικασία υπολογισμού των ποσοστών αύξησης ισχύος και απώλειας ταχύτητας και για τα τέσσερα υπό μελέτη πλοία, εξήχθη το συμπέρασμα πως τα τελικά έγκυρα δεδομένα βυθίσματος στο επιλεχθέν εύρος βυθισμάτων κοντά στο μέγιστο βύθισμα αντοχής ( $\geq 13.8$  m) είναι ανεπαρκή, καθώς και το ότι τα αποτελέσματα ισχύος-ταχύτητας με βάση την αντίστοιχη κατάσταση αναφοράς, συγκριτικά με τις δύο άλλες καταστάσεις, απέκλιναν.

Ως εκ τούτου, η παρούσα μελέτη και η εξαγωγή των συμπερασμάτων για την ενεργειακή αποδοτικότητα των πλοίων βασίστηκε μόνο στις παρακάτω δύο καταστάσεις αναφοράς :

1. Ερματισμού ( $\leq 10.9$  m)
2. Φόρτωσης του πλοίου, στο εύρος του βυθίσματος αναφοράς (10.9 – 13.8 m) , με τα αντίστοιχα υδροστατικά στοιχεία όπως ορίστηκαν παραπάνω

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΕΙΚΤΩΝ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

### 5.1 Διόρθωση ισχύος

#### 5.1.1 Διόρθωση για την αντίσταση ανέμου

Ως βάση για τη διόρθωση ανέμου, χρησιμοποιήθηκαν οι συντελεστές αντίστασης του ανέμου της μεθόδου Fujiwara όπως αυτοί υπολογίστηκαν για κάθε σετ δεδομένων από κώδικα προγραμματισμού στο MATLAB. Ο σχετικός κώδικας παρατίθεται στο παράρτημα Α, στο τέλος της παρούσης εργασίας.

Για την παρούσα μελέτη οι παράμετροι εισόδου αφορούν δύο βύθισματα και φαίνονται αναλυτικά στον Πίνακα 6. Ελλείψει υπολογισμένων τιμών των τριών επιφανειών  $A_{OD}$ ,  $A_{XV}$ ,  $A_{YV}$ , από τα δεδομένα για το κάθε βύθισμα αναφοράς, οι ακόλουθες προσεγγίσεις εφαρμόστηκαν για την εύρεση τους :

$A_{YV}$  : Η πλευρική προβεβλημένη επιφάνεια στον άνεμο σε κάθε βύθισμα, όπως ορίζεται σχηματικά παραπάνω, ελήφθη ως ο μέσος όρος των αναφερόμενων τιμών στις αντίστοιχες καταστάσεις φόρτωσης από το Βιβλίο Διαγωγής και Ευστάθειας των πλοίων. Για παράδειγμα, για το βύθισμα σχεδίασης, η τελική τιμή της επιφάνειας βασίστηκε σε πέντε καταστάσεις φόρτωσης των πλοίων στο βύθισμα αυτό, ούτως ώστε να ληφθούν υπόψιν όλες οι ομογενείς φορτώσεις, με παραμέτρους τον αριθμό των TEU και την στοίβαξη των εμπορευματοκιβωτίων στο κατάστρωμα και τα αμπάρια, για βύθισμα ίσο με 13 μέτρα.

$A_{OD}$  : Για τον υπολογισμό της πλευρικής προβεβλημένης επιφάνειας των υπερκατασκευών, στο εκάστοτε βύθισμα, εφαρμόστηκε ο παρακάτω προσεγγιστικός τύπος :

$$A_{OD} = A_{YV} - L_{WL} \times (D - T) \quad (5.1)$$

Όπου :  $D$  το κοίλο,  $L_{WL}$  το μήκος της ισάλου γραμμής, που μεταβάλλεται ανάλογα με την προβεβλημένη επιφάνεια ανέμου και, κατά συνέπεια, το βύθισμα του πλοίου και  $A_{YV}$ , όπως περιγράφηκε παραπάνω

$A_{xv}$  : η εγκάρσια προβεβλημένη επιφάνεια ανέμου, όπως μετρήθηκε από το σχέδιο Γενικής Διάταξης του πλοίου

Επιπλέον, οι αποστάσεις όπως αποτυπώνονται στην Σχήμα 5 υπολογίζονται ως εξής:

$C_{MC}$  : Η οριζόντια απόσταση του κέντρου της επιφάνειας  $A_{YV}$  από τη μέση τομή (συμβατικά, από το σημείο  $L_{BP}/2$ ) βρίσκεται από το θεώρημα των ροπών, δεδομένου ότι έχουμε ήδη διαθέσιμη την τιμή  $A_{YV}$  καθώς και το πόσα και με ποια διάταξη τα εμπορευματοκιβώτια είναι τοποθετημένα στο κατάστρωμα σε κάθε κατάσταση φόρτωσης (θεωρώντας τα κέντρα των επιφανειών τους, επίσης συμβατικά, στη μέση τους)

$h_{MC}$  : Η κατακόρυφη απόσταση του κέντρου της επιφάνειας  $A_{YV}$  από την ίσαλο πλεύσης, υπολογίζεται όμοια με την οριζόντια, από το θεώρημα των ροπών για κάθε βύθισμα αναφοράς

$h_{BR}$  : Η κατακόρυφη απόσταση του ανώτατου μέρους των υπερκατασκευών από την ίσαλο, θεωρείται η απόσταση από το ανώτατο μέρος του Wheelhouse Top έως την εκάστοτε ίσαλο για τα τρία βυθίσματα αναφοράς , όπως υπολογίζεται από το Σχέδιο Γενικής Διάταξης των πλοίων

Ακολουθως, όλα τα παραπάνω δεδομένα εισήχθησαν στο υπολογιστικό πρόγραμμα MATLAB, καθώς και όλα τα σετ δεδομένων από τις διαθέσιμες καθημερινές καταγραφές των τεσσάρων πλοίων με τις αντίστοιχες εξισώσεις υπολογισμού, ώστε να βρεθεί για κάθε καταγραφή ο αντίστοιχος συντελεστής διόρθωσης.

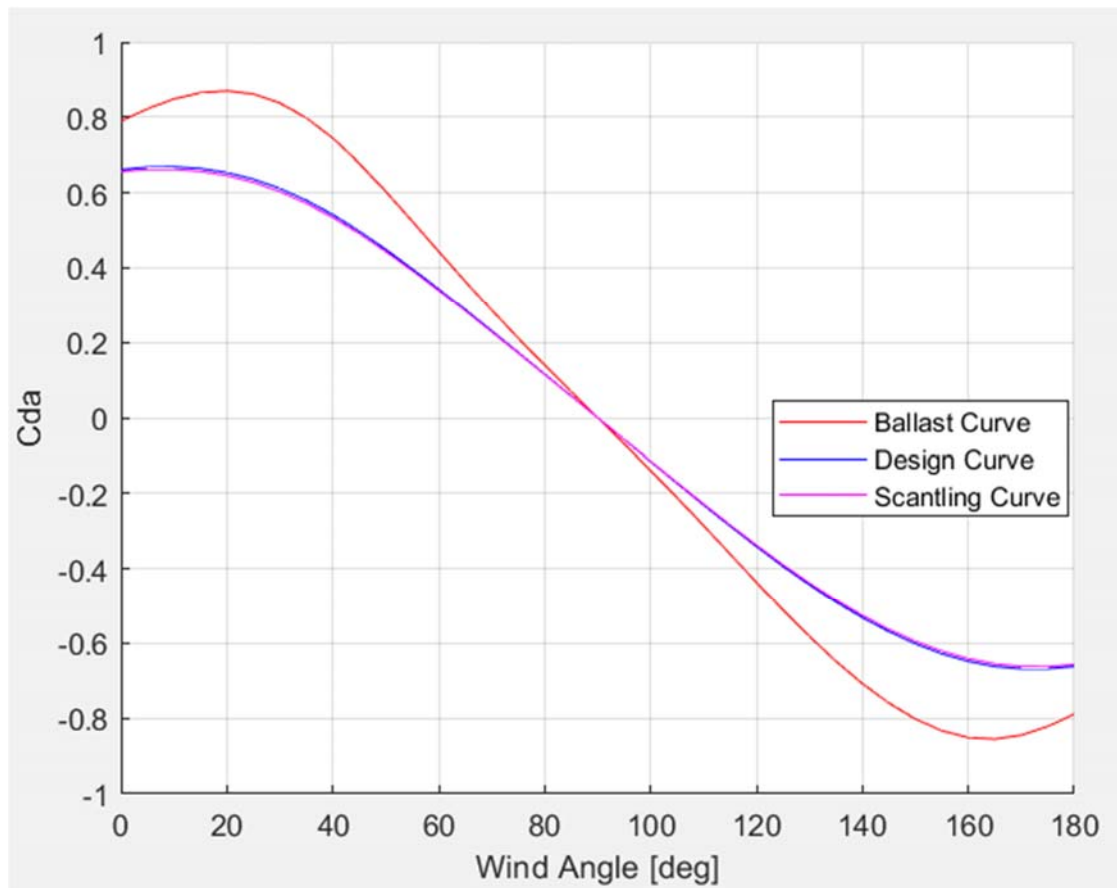
Στη συνέχεια, για τον υπολογισμό του ύψους του ανεμόμετρου άνωθεν της επιφάνειας ισάλου [Za,ref] έγιναν μετρήσεις από το σχέδιο Γενικής Διάταξης των πλοίων για το εκάστοτε βύθισμα και προέκυψαν τα παρακάτω τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του Za.

Όλα τα παραπάνω μεγέθη συνοψίζονται στον **Πίνακα 6**.

	Βύθισμα Ερματισμού	Βύθισμα Σχεδίασης
T [m]	8.1	13
A <sub>OD</sub> [m <sup>2</sup> ]	944.1	3126.8
A <sub>XV</sub> [m <sup>2</sup> ]	1837.6	1902.7
A <sub>VV</sub> [m <sup>2</sup> ]	5138.6	6152.1
B [m]	42.8	42.8
L <sub>WL</sub> [m]	250.9	257.3
C <sub>MC</sub> [m]	-21.4	-2.3
h <sub>BR</sub> [m]	49.5	44.5
h <sub>C</sub> [m]	9.3	12
L <sub>OA</sub> [m]	270	270
μ [-]	10	10
Z <sub>a,ref</sub>	49.5	44.5

Πίνακας 6 - Παράμετροι εισόδου για την εφαρμογή της μεθόδου Fujiwara

Στο παρακάτω διάγραμμα, απεικονίζονται οι τελικοί συντελεστές διόρθωσης ανέμου  $C_{DA}$ , συναρτήσει της γωνίας ανέμου σε μοίρες (για λόγους πληρότητας, παρατίθεται και η αντίστοιχη καμπύλη του βυθίσματος αντοχής).



Σχήμα 17 - Συντελεστές διόρθωσης ανέμου ( $C_{da}$ ) συναρτήσει της γωνίας ανέμου

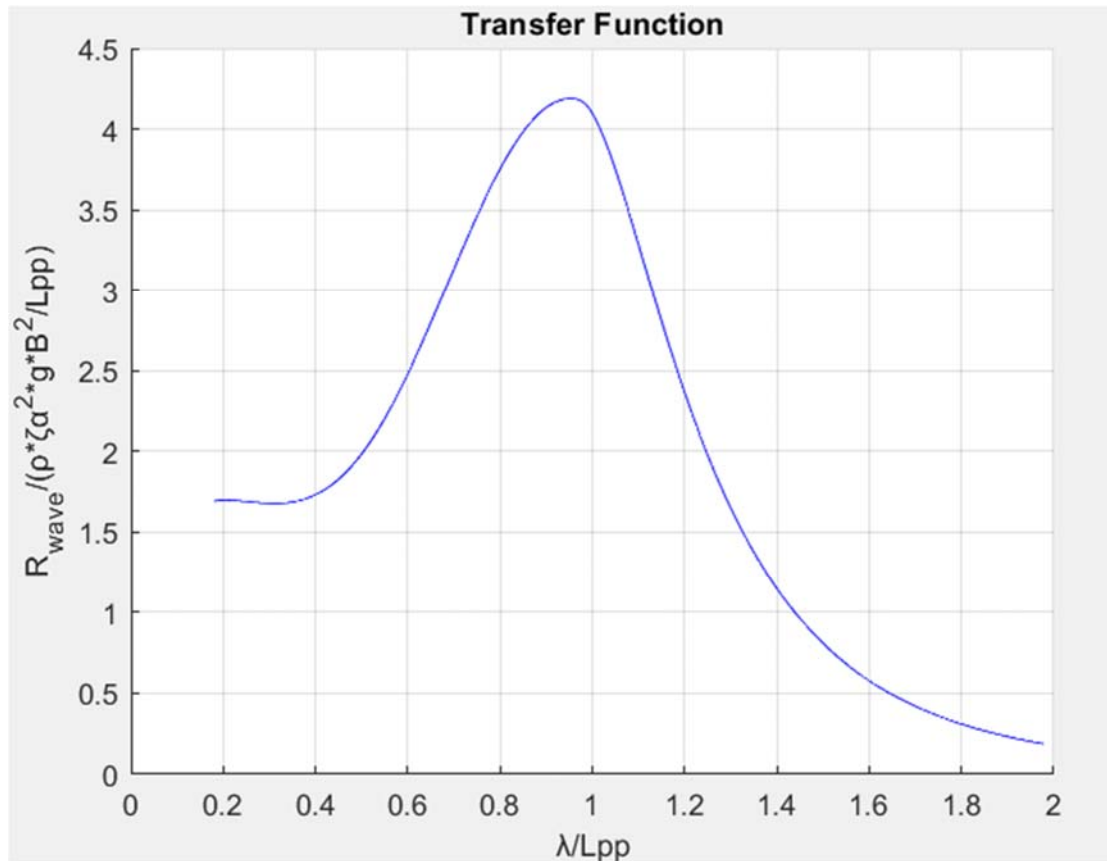
Έχοντας ολοκληρώσει τους παραπάνω υπολογισμούς, τα δεδομένα είναι έτοιμα για την εφαρμογή της διόρθωσης αντίστασης ανέμου σε κάθε έγκυρο σετ δεδομένων των πλοίων, όπως αυτή περιγράφεται στην παράγραφο 3.3.1.

#### 5.1.2 Διόρθωση για την αντίσταση κυματισμού

Η μέθοδος υπολογισμού της πρόσθετης αντίστασης κυματισμού, όπως ακριβώς περιγράφηκε στην παράγραφο 3.6, εφαρμόστηκε στα δεδομένα των καθημερινών

καταγραφών με την εισαγωγή τους στο προγραμματιστικό περιβάλλον του MATLAB, κατά αντιστοιχία με την μέθοδο διόρθωσης αντίστασης ανέμου.

Η αδιαστατοποιημένη μορφή της συνάρτησης μεταφοράς, συναρτήσει της αδιάστατης τιμής του μήκους κύματος  $\lambda$  ως προς το ολικό μήκος του πλοίου  $L_{pp}$ , για ένα τυχαίο σετ πραγματικών δεδομένων, αποτυπώνεται στο παρακάτω διάγραμμα του MATLAB :



Σχήμα 18 - Αδιαστατοποιημένη συνάρτηση μεταφοράς συναρτήσει του αδιαστατοποιημένου μήκους κύματος

Για τον αναλυτικό υπολογισμό του σημαντικού ύψους κύματος για τα δεδομένα των πλοίων, το οποία εισήχθησαν στο MATLAB, και για την τελική επιλογή της τιμής της πρόσθετης αντίστασης κυματισμού, ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία :

Από τα πρωτογενή διαθέσιμα δεδομένα, αντλήθηκαν τα παρακάτω στοιχεία για κάθε καθημερινή καταγραφή των πλοίων :



- Ισχύς Ανέμου (Wind Force) , σε μονάδες Beaufort
- Κατάσταση Θάλασσας (Sea Condition)
- Swell Height, σε m
- Swell Direction, σε m
- Σχετική Κατεύθυνση Ανέμου (Relative Wind Direction) , καταγεγραμμένη σε σημεία του ορίζοντα

Με βάση την μεθοδολογία που περιγράφεται στην παράγραφο 6.4 της ITTC 2021, ορίστηκαν οι παρακάτω συνιστώσες :

3. **Wind Waves Height –  $H_{w1/3}$**  : Με δεδομένα εισόδου την ισχύ του ανέμου, με βάση το Appendix B της ITTC 2021, υπολογίστηκε για κάθε σετ δεδομένων το πιθανό αντίστοιχο ύψος κύματος (σε μέτρα).
4. **Swells –  $H_{s1/3}$**  : Το ύψος κύματος όπως ελήφθη από τα δεδομένα, ίσο με το Swell Height (σε μέτρα)

Ωστόσο, στις καθημερινές καταγραφές των πλοίων δεν ορίζεται η διαδικασία μέτρησης του swell, με αποτέλεσμα να είναι αρκετά επισφαλές να θεωρηθεί ότι δεν εμπεριέχεται καθόλου το επαγόμενο ύψος κύματος λόγω ανέμου. Ως εκ τούτου, η μέθοδος υπολογισμού ενός ολικού σημαντικού ύψους κύματος ως η τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων των δύο παραπάνω συνιστωσών, αντικαθίσταται από τη θεώρηση των δύο σημαντικών υψών ξεχωριστά.

Τη θεώρηση αυτή ακολουθεί, στη συνέχεια, ο υπολογισμός της STAWAVE-2 μέσω MATLAB για κάθε καθημερινή καταγραφή, με αποτέλεσμα δύο τιμές για την αντίσταση κυματισμού :

A) Η αντίσταση που οφείλεται στα swells  $R_{wave,swells}$

B) Η αντίσταση που οφείλεται στους ανεμογενείς κυματισμούς  $R_{wind wave}$

Πρακτικά, όπως επισημαίνεται και σε προηγούμενη παράγραφο, για κάθε καθημερινή καταγραφή υπολογίζονται οι τιμές των παραπάνω αντιστάσεων για εύρος περιόδων κορυφής από 7 έως 15 sec.

- Σημειώνεται πως, για να αποφευχθεί υπερβολική διόρθωση λόγω αντίστασης κυματισμού, η τελική  $R_{AWL}$  υπολογίστηκε θεωρώντας ως περίοδο κορυφής για το φάσμα την τιμή εκείνη που αποδίδει την μέση τιμή της αντίστασης κυματισμού από το σύνολο των υπολογισμένων τιμών, για κάθε σετ δεδομένων.

Στη συνέχεια, ελήφθησαν υπόψιν τα κριτήρια που ακολουθούν, ώστε να καθοριστεί η εγκυρότητα της διόρθωσης κυματισμού και να απομακρυνθούν τα σημεία, τα οποία απέκλιναν αρκετά από την αναμενόμενη συμπεριφορά :

1. Swell Direction:  $\pm 45^\circ$  (διόρθωση μόνο για πρωραίους κυματισμούς)
2. Για να ληφθεί υπόψιν η διόρθωση κυματισμού, οφειλόμενη μόνο σε swell height, ελέγχθηκε το παρακάτω κριτήριο :

$$\text{abs}(\text{Swell Direction} - \text{Wind Direction}) \leq 60 \text{ degrees}$$

, ώστε, στο πλαίσιο της τελικής διόρθωσης της αποδιδόμενης ισχύος, να είναι λογική η αλγεβρική πρόσθεση των αντιστάσεων ανέμου και κυματισμού

3. Για τις καταγραφές για τις οποίες ισχύει :

$$H \geq 1.5 \times \sqrt{\frac{L_{pp}}{100}} = 2.41 \text{ m}$$

, για όποια τιμή ύψους κύματος (είτε swell είτε wind waves), δεν γίνεται διόρθωση κυματισμού, σύμφωνα με την ITTC 2017.

4. Επιλέχθηκε, για δύο έγκυρες τιμές ανά καταγραφή, να κρατηθεί, τελικά, η μικρότερη τιμή, ώστε να μην πραγματοποιείται υπερβολική διόρθωση λόγω κυματισμού στα πρωτογενή δεδομένα

5.2 Αναμενόμενες Τιμές Ταχύτητας / Ισχύος  $V_e / P_e$ 

Προκειμένου να μπορέσει να διαπιστωθεί η διαφορά σε κάθε σετ δεδομένων της μετρούμενης ταχύτητας και της διορθωμένης αποδιδόμενης ισχύος ( $V_m$  και  $P_{D,corr}$  αντίστοιχα), σε σύγκριση με τις αντίστοιχες αναμενόμενες τιμές ταχύτητας και ισχύος ( $V_e$  και  $P_e$ ), οι ακόλουθες διορθώσεις εφαρμόστηκαν :

- Το κριτήριο της επιτρεπτής διαφοράς ανάμεσα στο εκτόπισμα της καμπύλης αναφοράς ( $\Delta_{ref}$ ) και το εκτόπισμα στο εκάστοτε μετρούμενο βύθισμα ( $\Delta_{act}$ ) είναι:

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

, όπου  $\Delta_{ref}$  ορίζεται το εκτόπισμα σε τόννους στις δύο καταστάσεις αναφοράς, όπως φαίνεται στον **Πίνακας 7**.

Καταστάσεις αναφοράς	T (m)	$\Delta_{ref}$ [tonnes]
Βύθισμα Σχεδίασης (Design)	13	89766
Βύθισμα Ερματισμού (Ballast)	7.22	43261

Πίνακας 7 - Καταστάσεις αναφοράς

Για το βύθισμα σχεδίασης, τα δεδομένα για το εκτόπισμα ελήφθησαν από το Βιβλίο Διαγωγής και Ευστάθειας των τεσσάρων πλοίων, ενώ για την κατάσταση ερματισμού από το αρχείο των Δοκιμών Θαλάσσης (Sea Trial Report) από το οποίο έχουμε στοιχεία για την καμπύλη αναφοράς του μοντέλου πλοίου στο παραπάνω βύθισμα.

- Αντίστοιχα, ελέγχθηκε η επιτρεπτή διαφορά ανάμεσα στη διαγωγή της καμπύλης αναφοράς ( $trim_{ref}$ ) και τη διαγωγή στο μετρούμενο βύθισμα ( $trim_{act}$ ) ώστε να ικανοποιείται η παρακάτω συνθήκη:

$$|trim_{ref} - trim_{act}| < 0.2 \frac{L_{PP}}{100}$$

Εφόσον τα παραπάνω κριτήρια γίνονται αποδεκτά για ένα σετ δεδομένων, προχωράμε στην αναγωγή των μετρούμενων τιμών ταχύτητας/ισχύος με βάση τα δεδομένα της καμπύλης αναφοράς στην οποία αντιστοιχούν.

Η αναγωγή αυτή καθίσταται αναγκαία, βάσει του προτύπου ISO, καθώς οι καμπύλες αναφοράς αφορούν μόνο τρία συγκεκριμένα βυθίσματα, όπως επισημαίνεται παραπάνω, Κατά αυτόν τον τρόπο, δεδομένου ότι τα εκάστοτε μετρούμενα βυθίσματα διαφέρουν, προφανώς, από αυτά των καμπυλών αναφοράς, με την διόρθωση που επισημαίνεται παρακάτω καθίσταται εφικτή η σύγκριση της ταχύτητας/ισχύος των καθημερινών καταγραφών με αυτή των δεδομένων αναφοράς.

Ο τύπος που χρησιμοποιείται για τη διόρθωση της ταχύτητας και της ισχύος βασίζεται στο συντελεστή ναυαρχείου και είναι ίσος με :

$$V_e = V_{e(\text{ref})} \left( \frac{\Delta_d^{2/3}(\text{ref})}{\Delta_{\text{act}}^{2/3}} \right)^{1/3} \quad (5.2)$$

, για την αναγωγή και της ταχύτητας και

$$P_e = P_{e(\text{ref})} \left( \frac{\Delta_{\text{act}}}{\Delta_d(\text{ref})} \right)^{2/3} \quad (5.3)$$

για την αναγωγή της ισχύος.

Όπου :

$V_e, V_{e(\text{ref})}$  : ταχύτητα στο μετρούμενο εκτόπισμα και στο εκτόπισμα αναφοράς αντίστοιχα

$\Delta_{\text{act}}$  : εκτόπισμα στο μετρούμενο βύθισμα

$\Delta_d(\text{ref})$  : εκτόπισμα στο βύθισμα αναφοράς

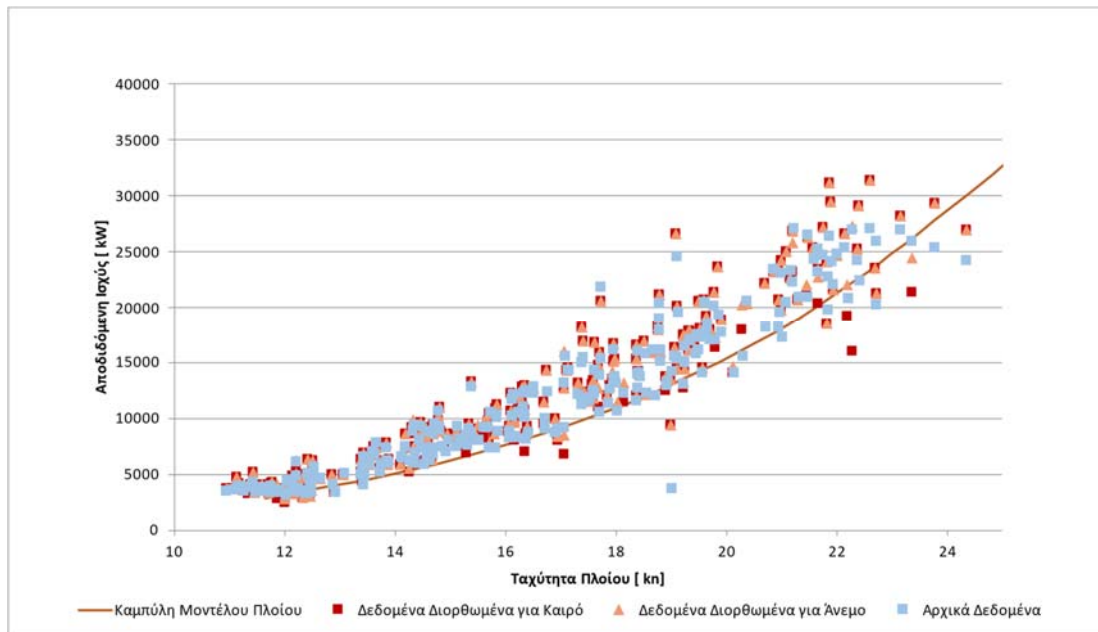
$P_e, P_{e(\text{ref})}$  : ισχύς στο μετρούμενο εκτόπισμα και στο εκτόπισμα αναφοράς αντίστοιχα

Ενδεικτικά, στα διαγράμματα που ακολουθούν, απεικονίζονται τα σημεία ταχύτητας-ισχύος για τα τέσσερα πλοία για τα δύο βύθισμα αναφοράς, για τέσσερις περιπτώσεις:

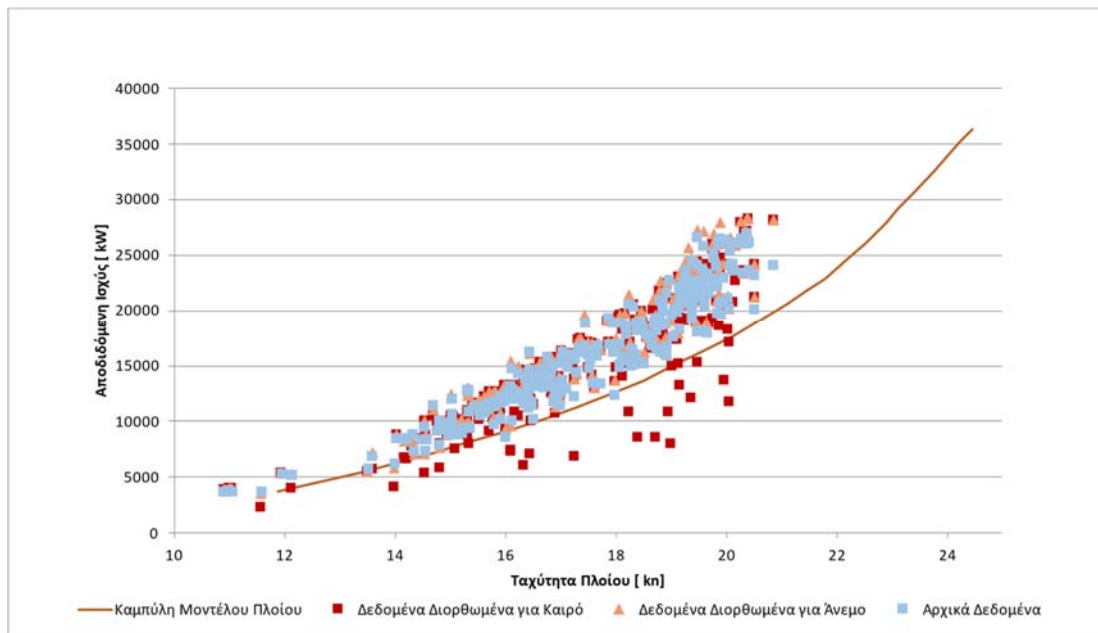
- Καμπύλες ταχύτητας-ισχύος, όπως προέκυψαν από τις δοκιμές μοντέλων πλοίων
- Για μετρούμενες ταχύτητες, διορθωμένες για το βύθισμα αναφοράς και μετρούμενη ισχύ βάσει των δεδομένων μας
- Για μετρούμενες ταχύτητες, διορθωμένες για το βύθισμα αναφοράς και για διορθωμένη ισχύ για άνεμο
- Για μετρούμενες ταχύτητες, διορθωμένες για το βύθισμα αναφοράς και για διορθωμένη ισχύ για καιρό (άνεμο + κυματισμό)

Να σημειωθεί πως τα σημεία «outliers» (συμβατικά, τα σημεία με τελική διορθωμένη ισχύ που απείχε περισσότερο από 50% από την αντίστοιχη της καμπύλης αναφοράς) έχουν απομακρυνθεί από τα διαγράμματα και τους υπολογισμούς των δεικτών, στη συνέχεια.

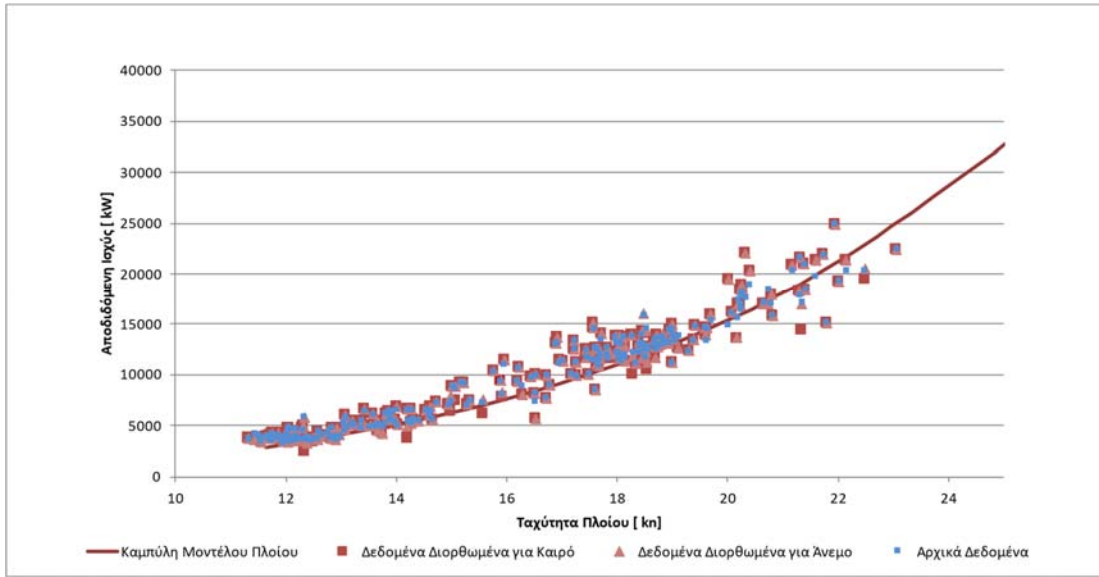
Κατά γενική ομολογία, παρατηρείται πως τα δεδομένα ταχύτητας – ισχύος για το βύθισμα σχεδίασης, και για τα τέσσερα πλοία, συγκεντρώνονται σε ένα μικρότερο εύρος κοντά στις καμπύλες αναφοράς, συγκριτικά με του ερματισμού. Ειδικότερα, διαπιστώνεται πως στο πλοίο Β, τα σημεία διορθωμένα για καιρό και στις 2 καταστάσεις φόρτωσης (ειδικότερα στην κατάσταση ερματισμού) καταναμένονται ομοιόμορφα γύρω από τις καμπύλες αναφοράς και βρίσκονται «δεξιότερα» σε σύγκριση με των υπολοίπων πλοίων. Εφόσον δεν πραγματοποιείται υπερβολική διόρθωση ισχύος για κυματισμό (π.χ. λόγω υψηλότερης καταγραφής ύψους κύματος σε σχέση με την πραγματική), το γεγονός αυτό υποδεικνύει πως για ίδια τιμή ισχύος, το πλοίο Β αναπτύσσει μεγαλύτερη ταχύτητα από τα υπόλοιπα. Επιπλέον, για τα δεδομένα του πλοίου Δ, παρά το γεγονός ότι στην κατάσταση ερματισμού είναι ελάχιστα, παρατηρείται πως στην κατάσταση βυθίσματος σχεδίασης, όχι μόνο είναι αρκετά περισσότερα σε αριθμό, αλλά βρίσκονται και πολύ κοντά ή και «δεξιότερα» της καμπύλης αναφοράς, πράγμα που υποδεικνύει μια πιθανώς πιο αποδοτική συμπεριφορά του πλοίου στο αντίστοιχο βύθισμα, συγκριτικά με τα πλοία Α και Γ.



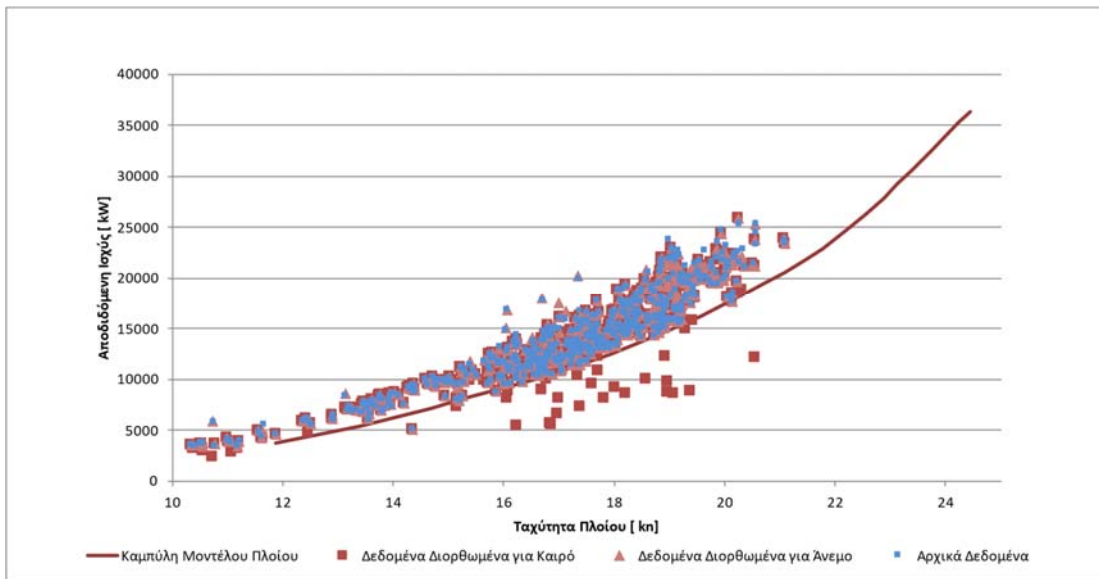
Σχήμα 19 - Δεδομένα Ταχύτητας - Ισχύος (Βύθισμα Ερματισμού) - ΠΛΟΙΟ Α



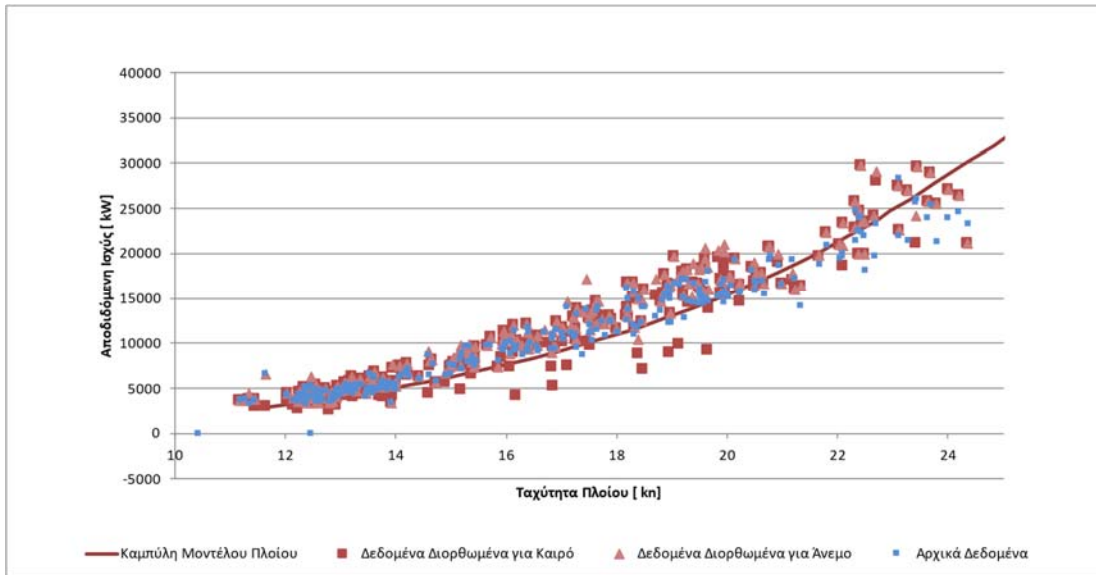
Σχήμα 20 - Δεδομένα Ταχύτητας - Ισχύος (Βύθισμα Σχεδίασης) - ΠΛΟΙΟ Α



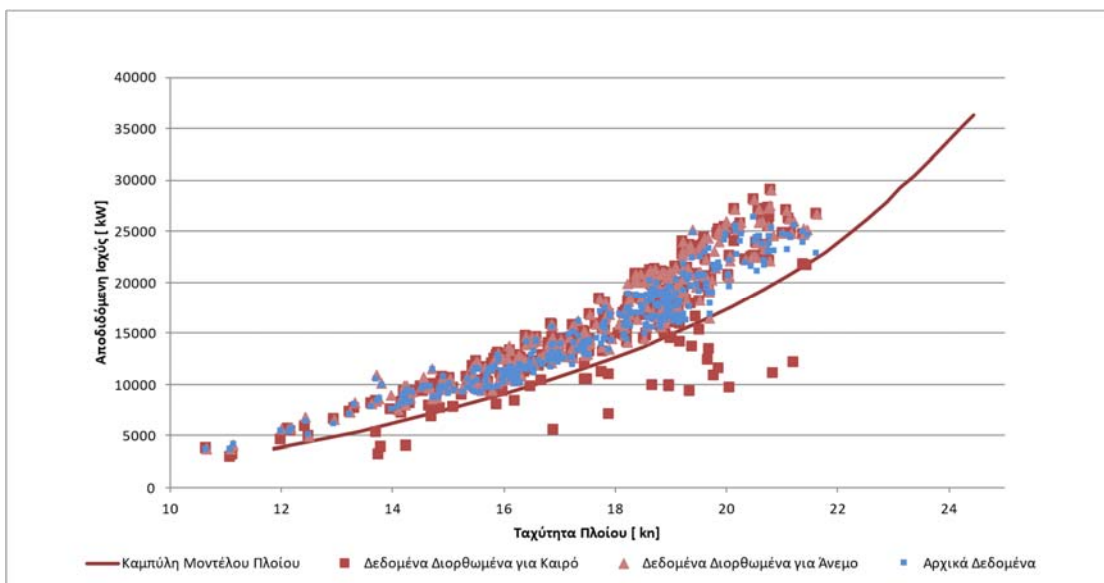
Σχήμα 21 - Δεδομένα Ταχύτητας - Ισχύος (Βύθισμα Ερματισμού) - ΠΛΟΙΟ Β



Σχήμα 22 - Δεδομένα Ταχύτητας - Ισχύος (Βύθισμα Σχεδίασης) - ΠΛΟΙΟ Β

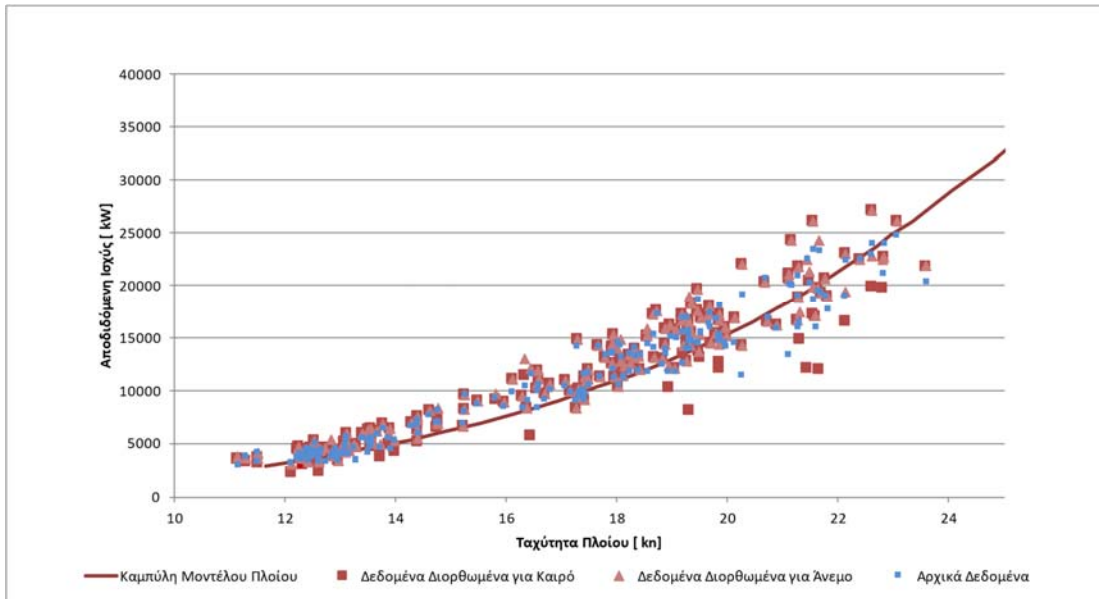


Σχήμα 23 - Δεδομένα Ταχύτητας - Ισχύος (Βύθισμα Ερματισμού) - ΠΛΟΙΟ Γ

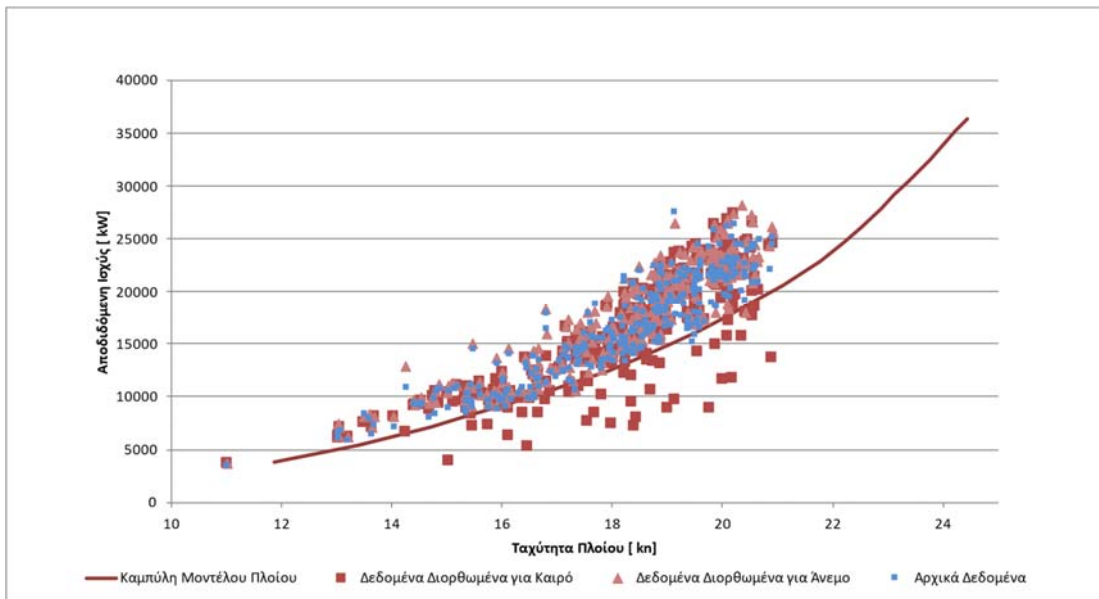


Σχήμα 24 - Δεδομένα Ταχύτητας - Ισχύος (Βύθισμα Σχεδίασης) - ΠΛΟΙΟ Γ





Σχήμα 25 - Δεδομένα Ταχύτητας - Ισχύος (Βύθισμα Ερματισμού) - ΠΛΟΙΟ Δ



Σχήμα 26 - Δεδομένα Ταχύτητας - Ισχύος (Βύθισμα Σχεδίασης) - ΠΛΟΙΟ Δ

### 5.3 Δείκτες Αποδοτικότητας

Έχοντας ολοκληρώσει, πλέον τη μεθοδολογία για τον υπολογισμό των δεικτών απόδοσης και τη σύγκριση αναμενόμενων – μετρούμενων τιμών, στις παρακάτω παραγράφους επισημαίνονται διαγραμματικά τα αποτελέσματα (σε ποσοστό %) για τους δείκτες αποδοτικότητας όπως ορίστηκαν παραπάνω.

Για κάθε πλοίο έχουν χρησιμοποιηθεί διαφορετικές περιόδους αναφοράς όπως αυτές ορίζονται από τα διαστήματα μεταξύ των δραστηριοτήτων συντήρησής τους. Οι σχετικές ημερομηνίες φαίνονται στον Πίνακα 8 ενώ στα διαγράμματα φαίνονται ως οριζόντιες γραμμές.

<b>ΠΛΟΙΟ</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>Γ</b>	<b>Δ</b>
<b>DRYDOCK</b>	02/05/2018	14/02/2018	24/08/2019	14/06/2019
<b>UNDERWATER INSPECTION &amp; PROPELLER POLISHING</b>	29/09/2020		22/06/2021	
<b>PROPELLER POLISHING</b>		02/11/2021		25/08/2020
<b>UNDERWATER INSPECTION</b>	13/02/2021	01/12/2020		19/05/2021
<b>UNDERWATER CLEANING</b>	15/09/2021			

Πίνακας 8 - Ημερομηνίες Δραστηριοτήτων Συντήρησης για κάθε Πλοίο

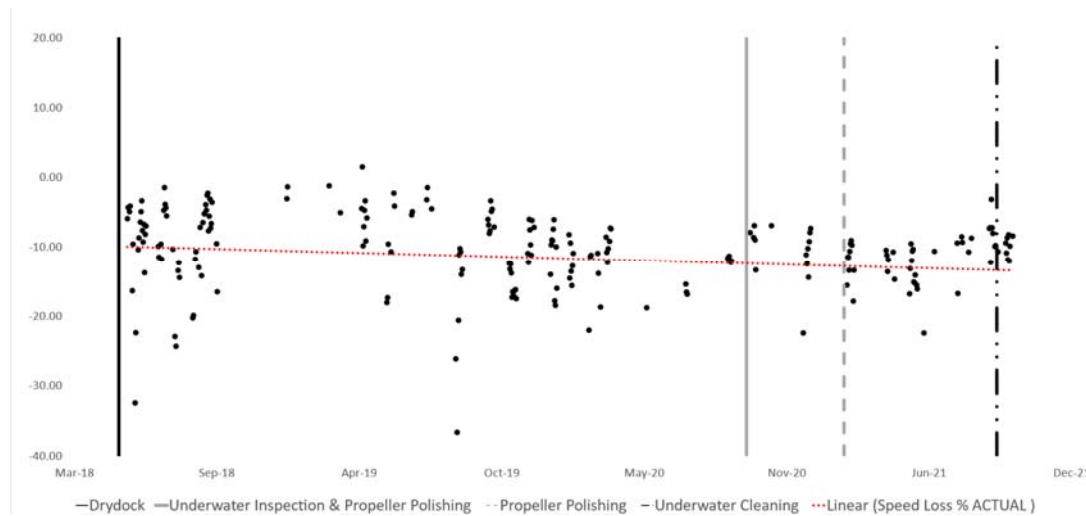
## 5.3.1 Δείκτης απώλειας ταχύτητας

Για τον δείκτη απώλειας ταχύτητας που παρουσιάζεται στα παρακάτω διαγράμματα, σε συνδυασμό με τις ημερομηνίες και τις εργασίες συντήρησης που είναι διαθέσιμες από την εταιρεία, παρατηρείται πως το πλοίο Β όχι μόνο έχει περισσότερα έγκυρα δεδομένα συγκριτικά με τα υπόλοιπα, αλλά επίσης το ποσοστό απώλειας ταχύτητάς του (-8.7%) είναι αρκετά χαμηλότερο (περίπου 3%) από το αντίστοιχο του πλοίου Α. Η συγκεκριμένη αντιπαραβολή θεωρείται περισσότερο λογική, από ό,τι να συγκριθεί το ίδιο ποσοστό με αυτά των πλοίων Γ η Δ, καθώς, όπως φαίνεται παραπάνω, τα πλοία αυτά είχαν υποβληθεί σε διεργασίες δεξαμενισμού το καλοκαίρι του 2019, εν αντιθέσει με τα δύο πρώτα, των οποίων ο δεξαμενισμός τους ήταν το πρώτο εξάμηνο του 2018. Ωστόσο, μεταξύ των δύο τελευταίων, παρόλο που το πλοίο Δ έχει ελάχιστα καλύτερο ποσοστό από το Γ, δεν μπορεί να εξαχθεί κάποιο ασφαλές συμπέρασμα διότι αφενός η μορφή της γραμμής τάσης του Γ είναι σχετικά οριζόντια, ενώ του Δ αύξουσα, αφετέρου τα έγκυρα δεδομένα του Δ κρίνονται ανεπαρκή.

Στον **Πίνακα 9** φαίνονται συνολικά τα στατιστικά δεδομένα για τον δείκτη απώλειας ταχύτητας ενώ παρακάτω στα σχήματα και τους αντίστοιχους πίνακες φαίνονται τα δεδομένα για κάθε ένα από τα πλοία.

ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ	ΠΛΟΙΟ Α	ΠΛΟΙΟ Β	ΠΛΟΙΟ Γ	ΠΛΟΙΟ Δ
Μέση Τιμή	-11.65	-8.69	-7.08	-6.60
Διάμεσος	-10.40	-8.18	-6.17	-5.94
Τυπική Απόκλιση	9.03	7.58	5.21	4.44
Σύνολο Δεδομένων	226	449	300	92

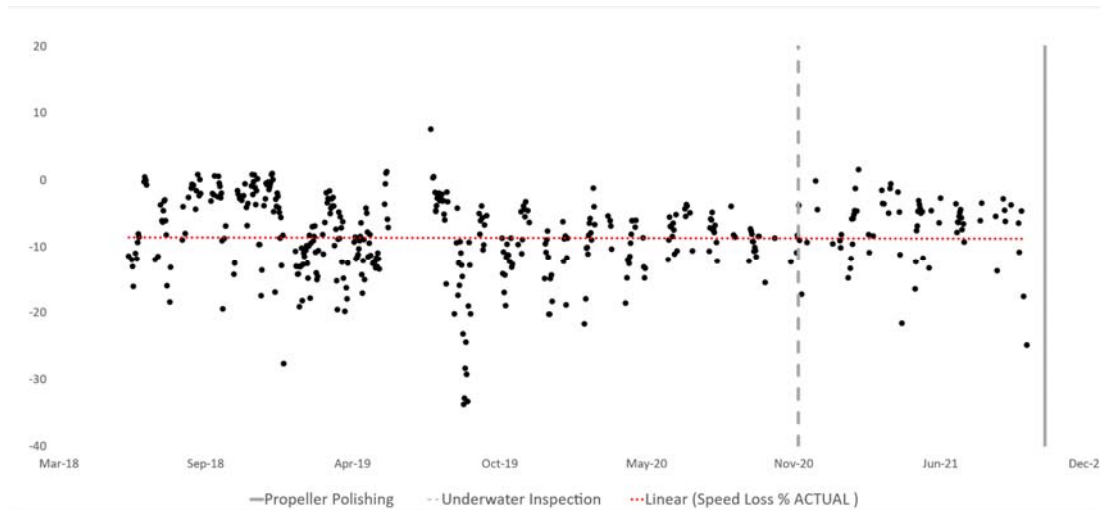
Πίνακας 9 – Συνολικά στατιστικά δεδομένα δείκτη απόδοσης απώλειας ταχύτητας [%]



Σχήμα 27 - Δείκτης απώλειας ταχύτητας [%] - ΠΛΟΙΟ Α

ΠΕΡΙΟΔΟΙ ΑΝΑΦΟΡΑΣ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΕΣ	ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ : ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ
ΠΕΡΙΟΔΟΣ Α	14/05/2018 – 08/09/2020	UNDERWATER INSPECTION & PROPELLER POLISHING : 29/09/2020	-11.31	9.29
ΠΕΡΙΟΔΟΣ Β	04/10/2020 – 28/12/2020	UNDERWATER INSPECTION : 13/02/2021	-10.62	4.18
ΠΕΡΙΟΔΟΣ Γ	17/02/2021 – 14/09/2021	UNDERWATER CLEANING : 15/09/2021	-13.75	9.98
ΠΕΡΙΟΔΟΣ Δ	17/09/2021 – 08/10/2021		-9.80	1.48

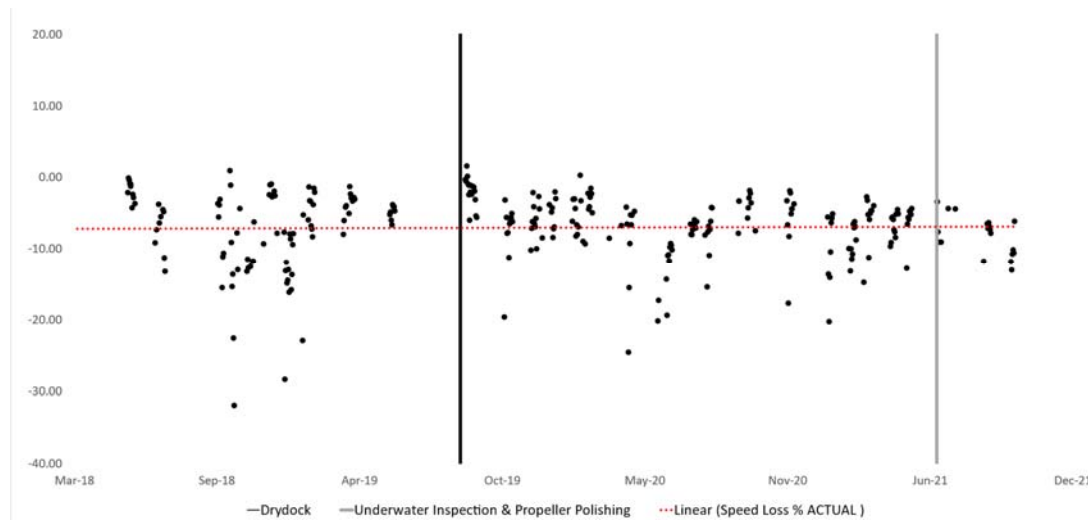
Πίνακας 10 - Στατιστικά δεδομένα δείκτη απόδοσης απώλειας ταχύτητας [%] ΠΛΟΙΟ Α



Σχήμα 28 - Δείκτης απώλειας ταχύτητας [%]- ΠΛΟΙΟ Β

ΠΕΡΙΟΔΟΙ ΑΝΑΦΟΡΑΣ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΕΣ	ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ : ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ
UNDERWATER INSPECTION & PROPELLER				
ΠΕΡΙΟΔΟΣ Α	03/06/2018 – 30/11/2020	POLISHING : 01/12/2020	-8.98	7.98
ΠΕΡΙΟΔΟΣ Β	02/12/2020 – 08/10/2021	PROPELLER POLISHING : 02/11/2021	-7.27	4.82

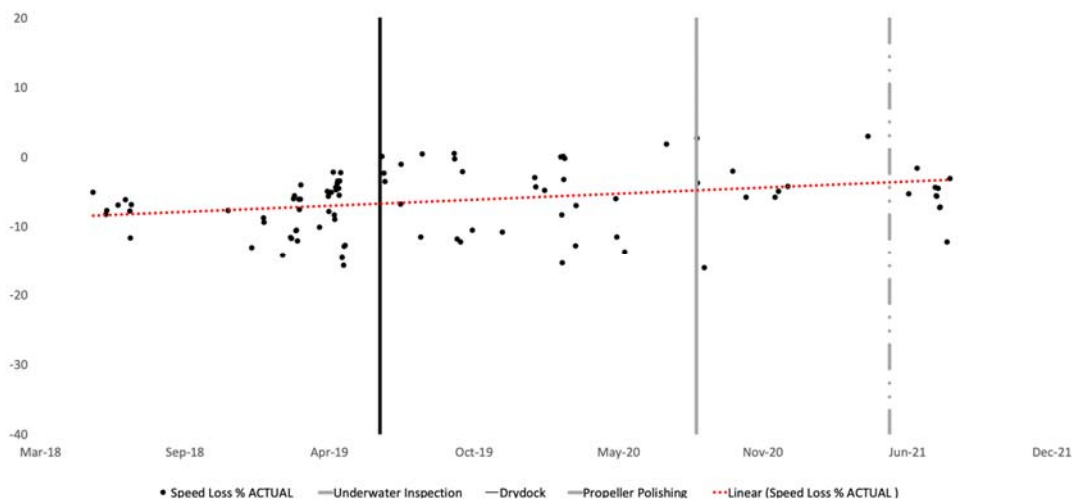
Πίνακας 11 - Στατιστικά δεδομένα δείκτη απόδοσης απώλειας ταχύτητας [%] ΠΛΟΙΟ Β



Σχήμα 29 - Δείκτης απώλειας ταχύτητας [%] - ΠΛΟΙΟ Γ

ΠΕΡΙΟΔΟΙ ΑΝΑΦΟΡΑΣ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΕΣ	ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ : ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ
ΠΕΡΙΟΔΟΣ Α	14/05/2018 – 30/06/2019	<b>DRYDOCK :</b> 24/08/2019	-7.43	6.96
ΠΕΡΙΟΔΟΣ Β	31/08/2019 – 21/06/2021	<b>UNDERWATER INSPECTION &amp; PROPELLER POLISHING:</b> 22/06/2021	-6.79	4.28
ΠΕΡΙΟΔΟΣ Γ	23/06/2021 – 09/10/2021		-8.17	7.44

Πίνακας 12 - Στατιστικά δεδομένα δείκτη απόδοσης απώλειας ταχύτητας [%] ΠΛΟΙΟ Γ



Σχήμα 30 - Δείκτης απώλειας ταχύτητας [%] - ΠΛΟΙΟ Δ

ΠΕΡΙΟΔΟΙ ΑΝΑΦΟΡΑΣ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΕΣ	ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ : ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ
ΠΕΡΙΟΔΟΣ Α	13/05/2018 – 27/04/2019	<b>DRYDOCK :</b> 14/06/2019	-7.95	3.51
ΠΕΡΙΟΔΟΣ Β	17/06/2019 – 15/07/2020	PROPELLER POLISHING: 25/08/2020	-5.60	5.25
ΠΕΡΙΟΔΟΣ Γ	26/08/2020 – 20/04/2021	UNDERWATER INSPECTION : 19/05/2021	-4.17	5.58
ΠΕΡΙΟΔΟΣ Δ	15/06/2021 – 11/08/2021		-5.76	2.87

Πίνακας 13 - Στατιστικά δεδομένα δείκτη απόδοσης απώλειας ταχύτητας [%] ΠΛΟΙΟ Δ

## 5.3.2 Δείκτης απόκλισης ισχύος

Οι μέσες τιμές των ποσοστών απόκλισης ισχύος συγκλίνουν στα ίδια συμπεράσματα με τις μέσες τιμές των ποσοστών απώλειας ταχύτητας, όπως σχολιάστηκαν προηγουμένως. Αξιοσημείωτη ,εδώ ,είναι και πάλι η βελτιωμένη συμπεριφορά του πλοίου Β, για το οποίο:

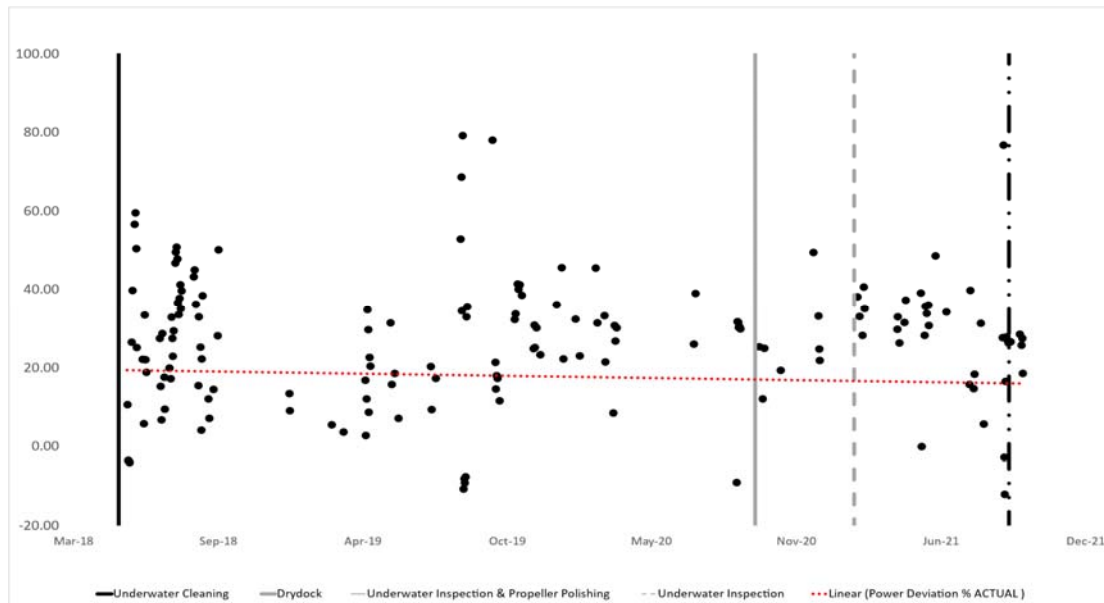
1. Τα έγκυρα σημεία είναι σαφώς περισσότερα από των υπολοίπων πλοίων
2. Η τυπική απόκλιση των δεδομένων είναι σημαντικά μικρότερη από αυτή των υπολοίπων (18.31 συγκριτικά με 22.73-25.59), υποδεικνύοντας την ομαλή κατανομή των σημείων γύρω από τη μέση τιμή. Το γεγονός αυτό συνάδει και με την απεικόνιση των σημείων ταχύτητας - ισχύος στα αντίστοιχα διαγράμματα.
3. Τα ποσοστά απόκλισης ισχύος, στην περίοδο που ακολουθεί τον καθαρισμό της έλικας το Νοέμβριο του 2020, φαίνονται να τοποθετούνται σε μεγάλο βαθμό κάτω από την αντίστοιχη γραμμή τάσης

Επιπλέον, ο αριθμός των έγκυρων δεδομένων του πλοίου Δ δεν επιτρέπει την ασφαλή εξαγωγή συμπεράσματος για τη βελτιωμένη συμπεριφορά που παρουσιάζει, ενώ, τέλος, παρά τις πολλαπλές εργασίες συντήρησης του πλοίου Α, η αποδοτικότητά του κρίνεται ως η χειρότερη εκ των τεσσάρων πλοίων, βάσει της μέσης τιμής και της διασποράς των ποσοστών αύξησης της ισχύος του.

ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ	ΠΛΟΙΟ Α	ΠΛΟΙΟ Β	ΠΛΟΙΟ Γ	ΠΛΟΙΟ Δ
Μέση Τιμή	22.00	17.32	15.56	12.24
Διάμεσος	26.90	18.14	18.37	17.70
Τυπική Απόκλιση	23.42	18.31	22.73	25.59
Σύνολο Δεδομένων	237	499	312	101

Πίνακας 14 - Συνολικά στατιστικά δεδομένα δείκτη απόδοσης απόκλισης ισχύος [%]

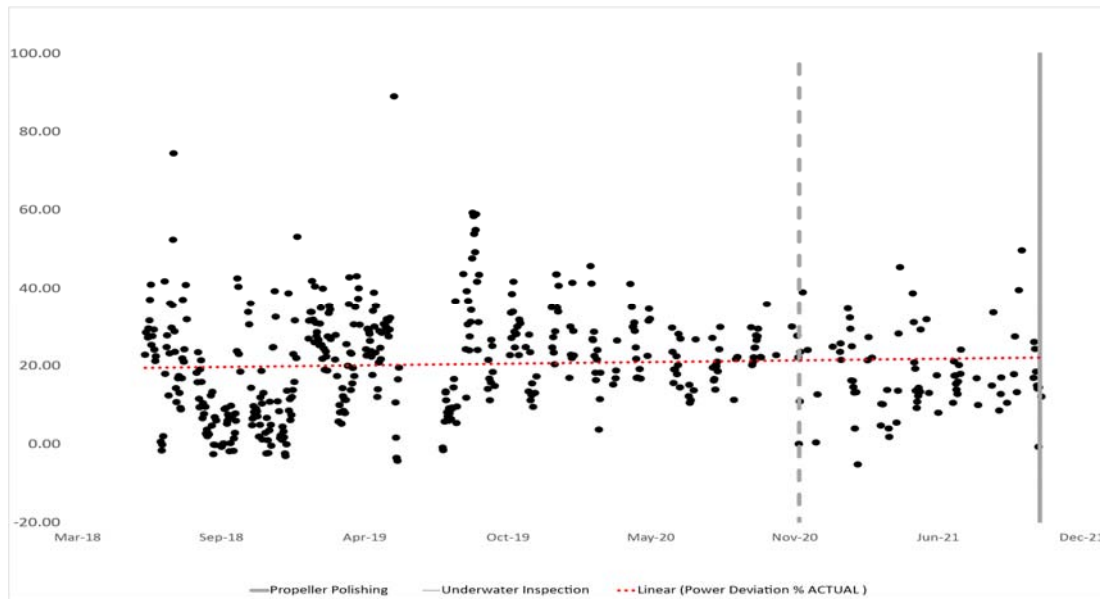




Σχήμα 31 - Δείκτης απόκλισης ισχύος [%] - ΠΛΟΙΟ Α

ΠΕΡΙΟΔΟΙ ΑΝΑΦΟΡΑΣ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΕΣ	ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ : ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ
ΠΕΡΙΟΔΟΣ Α	14/05/2018 – 08/09/2020	UNDERWATER INSPECTION & PROPELLER POLISHING : 29/09/2020	21.08	23.28
ΠΕΡΙΟΔΟΣ Β	04/10/2020 – 28/12/2020	UNDERWATER INSPECTION : 13/02/2021	15.89	25.90
ΠΕΡΙΟΔΟΣ Γ	17/02/2021 – 14/09/2021	UNDERWATER CLEANING : 15/09/2021	28.40	20.44
ΠΕΡΙΟΔΟΣ Δ	17/09/2021 – 10/11/2021		28.01	4.53

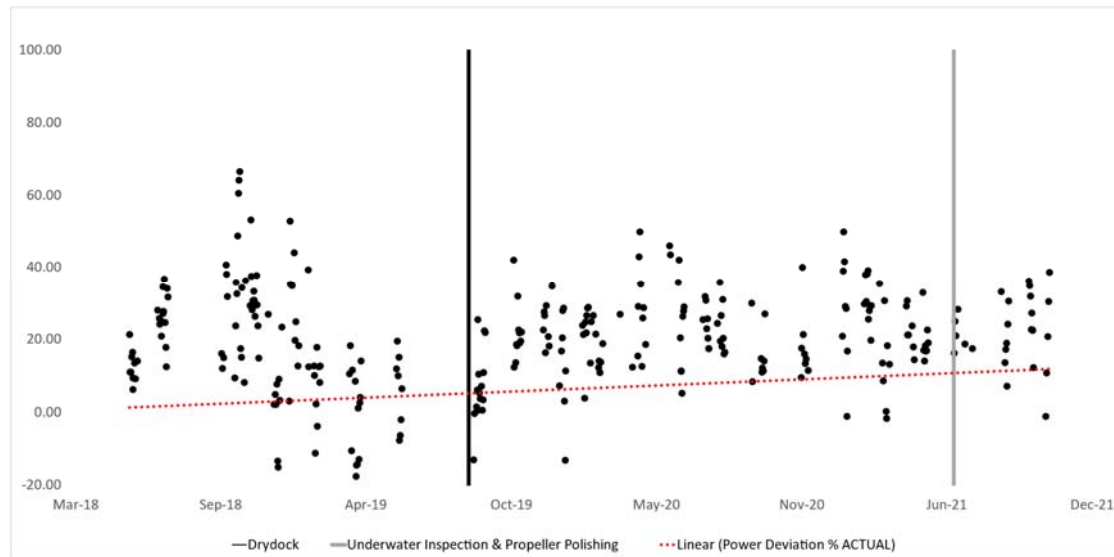
Πίνακας 15 - Στατιστικά δεδομένα δείκτη απόδοσης απόκλισης ισχύος [%] ΠΛΟΙΟ Α



Σχήμα 32 - Δείκτης απόκλισης ισχύος [%] - ΠΛΟΙΟ Β

ΠΕΡΙΟΔΟΙ ΑΝΑΦΟΡΑΣ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΕΣ	ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ : ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ
ΠΕΡΙΟΔΟΣ Α	03/06/2018 – 30/11/2020	UNDERWATER INSPECTION & PROPELLER POLISHING : 01/12/2020	17.00	19.12
ΠΕΡΙΟΔΟΣ Β	02/12/2020 – 04/11/2021	PROPELLER POLISHING : 02/11/2021	18.86	13.63

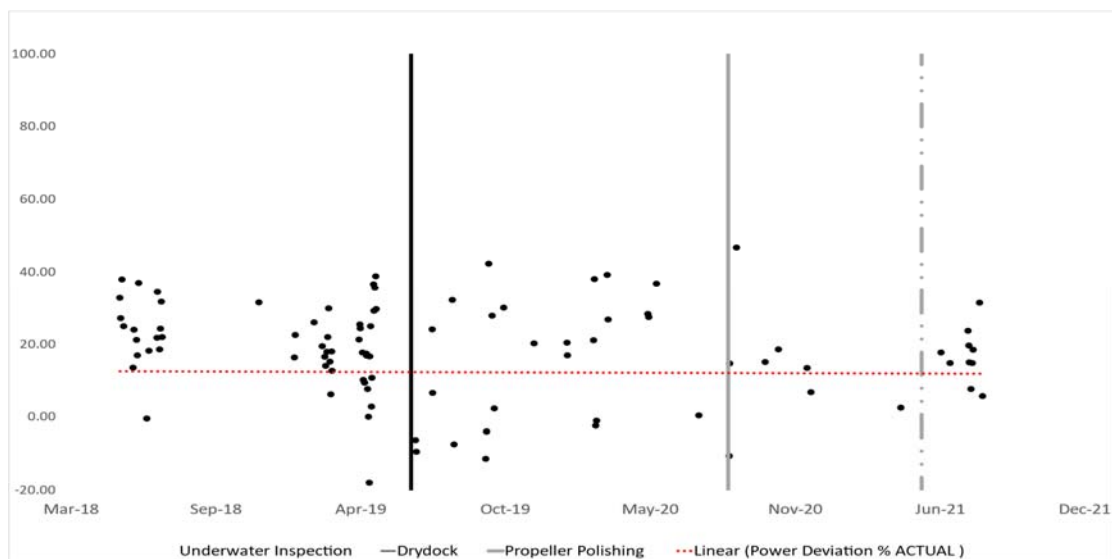
Πίνακας 16 - Στατιστικά δεδομένα δείκτη απόδοσης απόκλισης ισχύος [%] ΠΛΟΙΟ Β



Σχήμα 33 - Δείκτης απόκλισης ισχύος [%] - ΠΛΟΙΟ Γ

ΠΕΡΙΟΔΟΙ ΑΝΑΦΟΡΑΣ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΕΣ	ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ :	ΜΕΣΗ	ΤΥΠΙΚΗ
		ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΤΙΜΗ	ΑΠΟΚΛΙΣΗ
ΠΕΡΙΟΔΟΣ Α	14/05/2018 –	DRYDOCK :	16.28	21.50
	30/06/2019			
ΠΕΡΙΟΔΟΣ Β	31/08/2019 –	UNDERWATER INSPECTION & PROPELLER POLISHING:	14.65	23.70
	21/06/2021			
ΠΕΡΙΟΔΟΣ Β	23/06/2021 – 09/10/2021		18.30	21.18

Πίνακας 17 - Στατιστικά δεδομένα δείκτη απόδοσης απόκλισης ισχύος [%] ΠΛΟΙΟ Γ



Σχήμα 34 - Δείκτης απόκλισης ισχύος [%] - ΠΛΟΙΟ Δ

ΠΕΡΙΟΔΟΙ ΑΝΑΦΟΡΑΣ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΕΣ	ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ : ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ
ΠΕΡΙΟΔΟΣ Α	08/05/2018 – 27/04/2019	<b>DRYDOCK :</b> 14/06/2019	12.77	26.84
ΠΕΡΙΟΔΟΣ Β	20/06/2019 – 15/07/2020	PROPELLER POLISHING: 25/08/2020	9.18	29.75
ΠΕΡΙΟΔΟΣ Γ	26/08/2020 – 20/04/2021	UNDERWATER INSPECTION : 19/05/2021	13.27	16.41
ΠΕΡΙΟΔΟΣ Δ	15/06/2021 – 11/08/2021		16.73	7.38

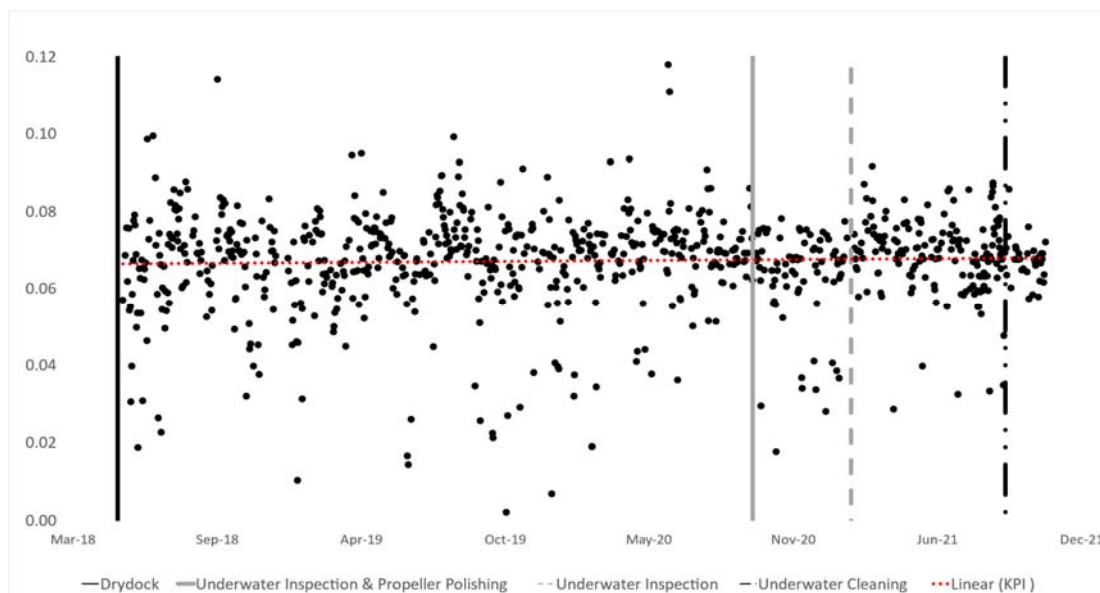
Πίνακας 18 - Στατιστικά δεδομένα δείκτη απόδοσης απόκλισης ισχύος [%] ΠΛΟΙΟ Δ

## 5.3.2 Δείκτης απόδοσης φορτίου έλικας (KPI)

Τα αποτελέσματα και η συμπεριφορά των τεσσάρων πλοίων, σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα των στατιστικών τιμών για τον KPI που μελετάται, αλλά και τη μορφή των διαγραμμάτων, διαπιστώνονται πως ακολουθούν την ίδια τάση με αυτή του δείκτη απόκλισης ισχύος (αναμενόμενο, καθώς υπεισέρχεται και στους δύο υπολογισμούς η διορθωμένη αποδιδόμενη ισχύς  $P_{D,corr}$ ).

ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ	ΠΛΟΙΟ Α	ΠΛΟΙΟ Β	ΠΛΟΙΟ Γ	ΠΛΟΙΟ Δ
Μέση Τιμή	0.067	0.062	0.067	0.063
Διάμεσος	0.068	0.063	0.067	0.065
Τυπική Απόκλιση	0.012	0.010	0.012	0.013
Σύνολο Δεδομένων	237	499	312	101

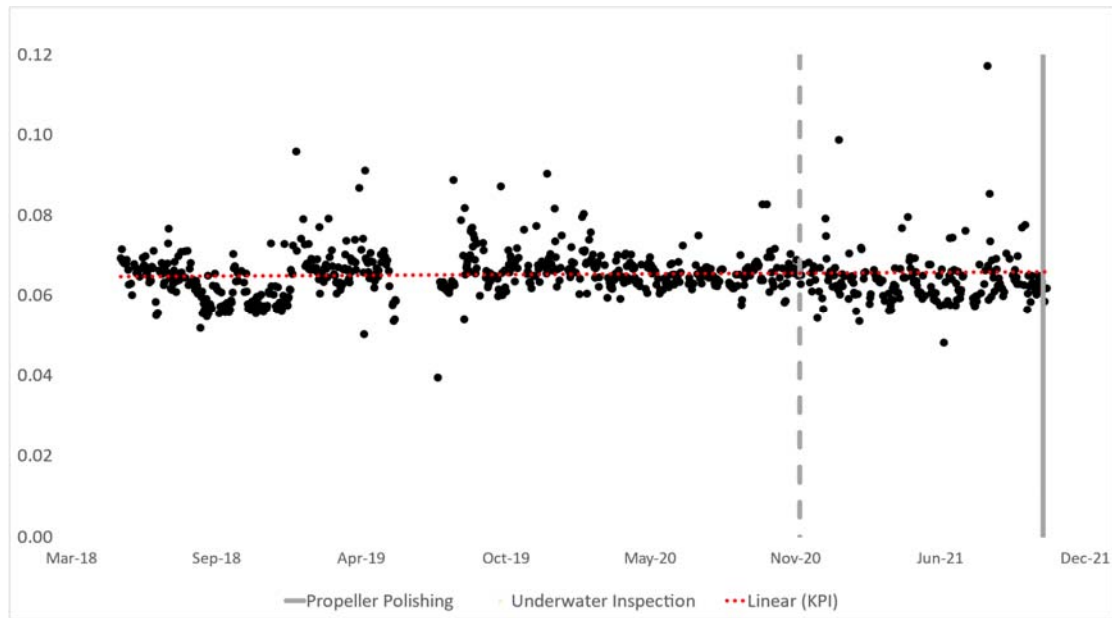
Πίνακας 19 - Συνολικά στατιστικά δεδομένα δείκτη απόδοσης φορτίου έλικας



Σχήμα 35 - Δείκτης απόδοσης φορτίου έλικας (ΚΡΙ) - ΠΛΟΙΟ Α

ΠΕΡΙΟΔΟΙ ΑΝΑΦΟΡΑΣ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΕΣ	ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ : ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ
ΠΕΡΙΟΔΟΣ Α	14/05/2018 – 08/09/2020	UNDERWATER INSPECTION & PROPELLER POLISHING : 29/09/2020	0.066	0.012
ΠΕΡΙΟΔΟΣ Β	04/10/2020 – 28/12/2020	UNDERWATER INSPECTION : 13/02/2021	0.062	0.011
ΠΕΡΙΟΔΟΣ Γ	17/02/2021 – 14/09/2021	UNDERWATER CLEANING : 15/09/2021	0.068	0.010
ΠΕΡΙΟΔΟΣ Δ	17/09/2021 – 10/11/2021		0.068	0.003

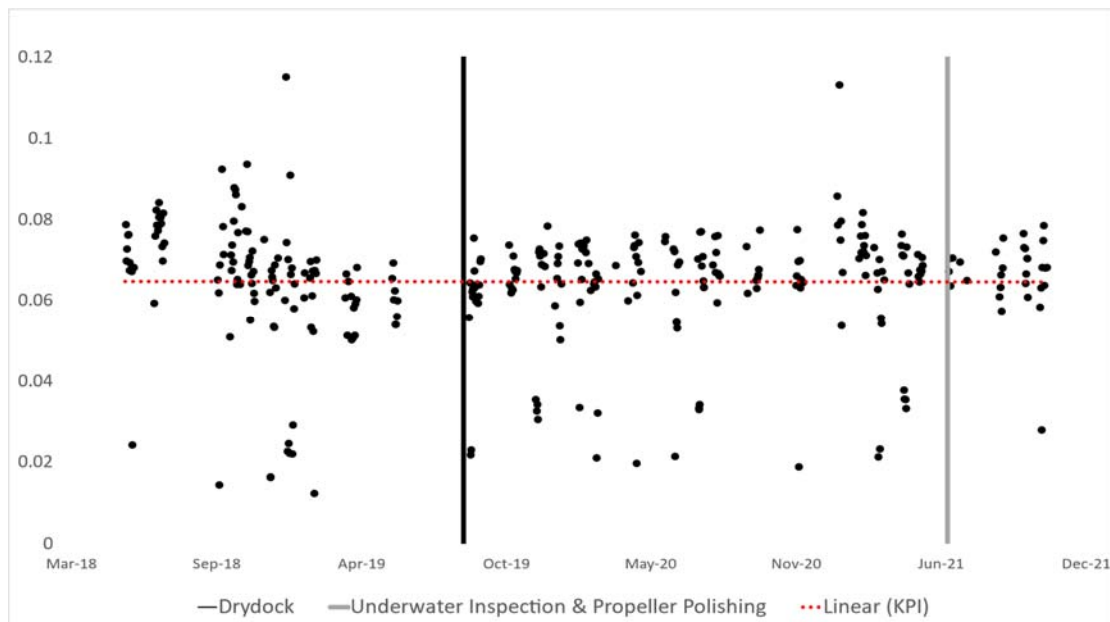
Πίνακας 20 - Στατιστικά δεδομένα δείκτη απόδοσης φορτίου έλικας ΠΛΟΙΟ Α



Σχήμα 36 - Δείκτης απόδοσης φορτίου έλικας (ΚΡΙ) - ΠΛΟΙΟ Β

ΠΕΡΙΟΔΟΙ ΑΝΑΦΟΡΑΣ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΕΣ	ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ : ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ
ΠΕΡΙΟΔΟΣ Α	03/06/2018 – 30/11/2020	UNDERWATER INSPECTION & PROPELLER POLISHING : 01/12/2020	0.062	0.010
ΠΕΡΙΟΔΟΣ Β	02/12/2020 – 04/11/2021	PROPELLER POLISHING : 02/11/2021	0.061	0.011

Πίνακας 21 - Στατιστικά δεδομένα δείκτη απόδοσης φορτίου έλικας ΠΛΟΙΟ Β

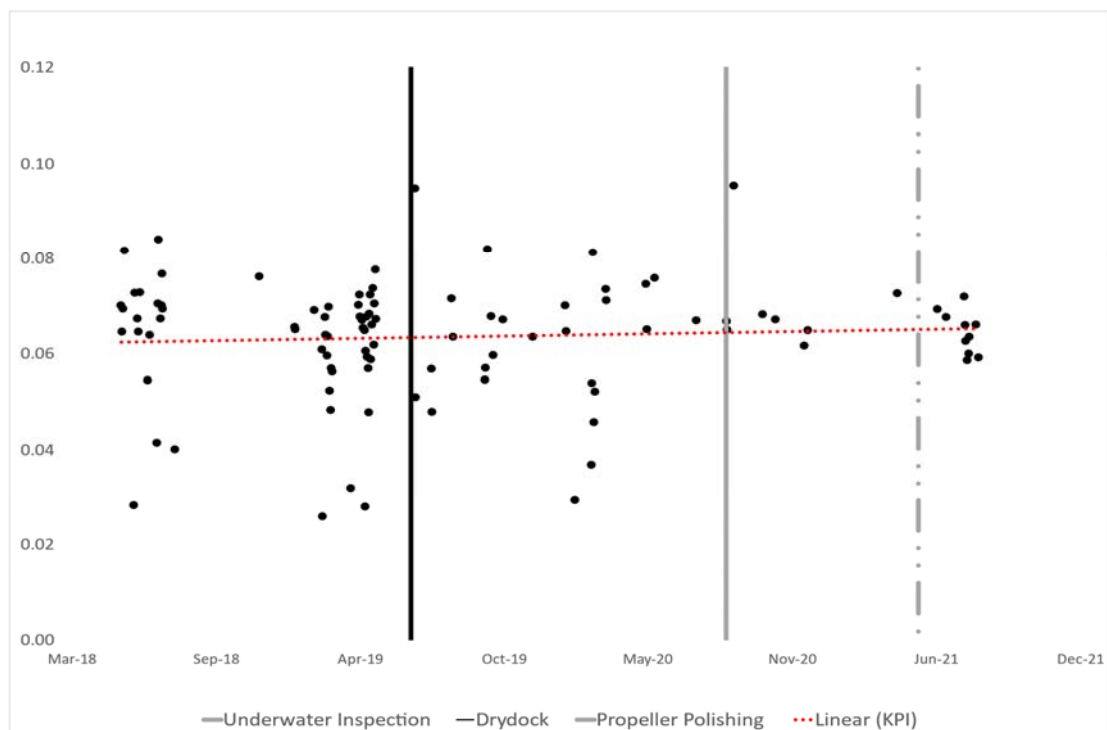


Σχήμα 37 - Δείκτης απόδοσης φορτίου έλικας (ΚΡΙ) - ΠΛΟΙΟ Γ

ΠΕΡΙΟΔΟΙ ΑΝΑΦΟΡΑΣ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΕΣ	ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ : ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ
ΠΕΡΙΟΔΟΣ Α	14/05/2018 – 30/06/2019	<b>DRYDOCK :</b> 24/08/2019	0.068	0.012
ΠΕΡΙΟΔΟΣ Β	31/08/2019 – 21/06/2021	UNDERWATER INSPECTION & PROPELLER POLISHING: 22/06/2021	0.066	0.013
ΠΕΡΙΟΔΟΣ Γ	23/06/2021 – 09/10/2021		0.066	0.009

Πίνακας 22 - Στατιστικά δεδομένα δείκτη απόδοσης φορτίου έλικας ΠΛΟΙΟ Γ





Σχήμα 38 - Δείκτης απόδοσης φορτίου έλικας (ΚΡΙ) - ΠΛΟΙΟ Δ

ΠΕΡΙΟΔΟΙ ΑΝΑΦΟΡΑΣ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΕΣ	ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ : ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ
ΠΕΡΙΟΔΟΣ Α	08/05/2018 – 27/04/2019	DRYDOCK : 14/06/2019	0.063	0.013
ΠΕΡΙΟΔΟΣ Β	20/06/2019 – 15/07/2020	PROPELLER POLISHING: 25/08/2020	0.063	0.014
ΠΕΡΙΟΔΟΣ Γ	26/08/2020 – 20/04/2021	UNDERWATER INSPECTION : 19/05/2021	0.070	0.010
ΠΕΡΙΟΔΟΣ Δ	15/06/2021 – 11/08/2021		0.064	0.004

Πίνακας 23 - Στατιστικά δεδομένα δείκτη απόδοσης φορτίου έλικας ΠΛΟΙΟ Δ

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ, ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

### Συμπεράσματα

Καθώς η ναυτιλιακή βιομηχανία και οι δραστηριότητες που σχετίζονται με το θαλάσσιο εμπόριο έχουν σημαντικό αντίκτυπο στο περιβάλλον, η ανάγκη για βιώσιμες τεχνολογίες που αυξάνουν την αποδοτικότητα των πλοίων αυξάνεται. Το ενδιαφέρον έχει στραφεί προς βιώσιμες ενέργειες που μειώνουν την κατανάλωση καυσίμου, την απώλεια της ταχύτητας και τις βλαβερές εκπομπές. Για παράδειγμα, για την πρόληψη ή τη μείωση του φαινομένου της θαλάσσιας ρύπανσης που επηρεάζει την αποδοτικότητα ενός πλοίου, απαιτούνται δαπανηροί δεξαμενισμοί για τον καθαρισμό της και της έλικας, οι οποίες πρέπει να προγραμματίζονται βάσει της εκτίμησης απώλειας ταχύτητας του πλοίου.

Μέσα από την παρούσα μελέτη, έγινε εφαρμογή του διεθνούς προτύπου ISO 19030, το οποίο θεωρείται το πιο διαδεδομένο πρότυπο σχετικά με την αξιολόγηση της αποδοτικότητας των πλοίων, με σκοπό την μελέτη τεσσάρων πλοίων. Πιο συγκεκριμένα, με την εφαρμογή του προτύπου διερευνήθηκε η απόκλιση της ισχύος, η απώλεια της ταχύτητας και η απόδοση της έλικας στην πάροδο του χρόνου.

Παρόλα τα παραπάνω, τα στατιστικά δεδομένα που υπολογίστηκαν, συνδυαστικά με τα διαγράμματα ταχύτητας – ισχύος, οδηγούν στην εξαγωγή των παρακάτω συμπερασμάτων.

α) Η ενεργειακή αποδοτικότητα του πλοίου Β στο χρόνο παρατηρείται να ξεχωρίζει και να ακολουθεί ομαλή συμπεριφορά, σε όλο το χρονικό διάστημα της μελέτης. Με γνώμονα τις ελάχιστες εργασίες συντήρησης στις οποίες υποβλήθηκε, με κυριότερη την ημερομηνία δεξαμενισμού του λίγους μήνες πριν αρχίσει η καταγραφή των διαθέσιμων δεδομένων, είναι περισσότερο πιθανό να έχει επιστρωθεί με ενισχυμένο αντιρρυπαντικό χρώμα (silicon-based) απ ό,τι τα υπόλοιπα τρία πλοία.

β) Παρά το γεγονός ότι το πλοίο Δ έχει, ποσοτικά, αρκετά πιο βελτιωμένη συμπεριφορά, βάσει των δεικτών ενεργειακής αποδοτικότητάς του, η ανεπάρκεια των τελικών έγκυρων δεδομένων δε δύναται να μας οδηγήσει σε ένα ασφαλές και έγκυρο συμπέρασμα για το εάν αποτυπώνεται η επίδραση μιας ενισχυμένης επίστρωσης ή όχι. Ωστόσο, από τα πρωτογενή δεδομένα διαπιστώνεται, σε γενικές γραμμές, ότι η πλεύση του σε υψηλότερες ταχύτητες οφείλεται, κυρίως, στις βελτιωμένες καιρικές συνθήκες που αντιμετώπιζε στην περίοδο των 3.5 ετών που μελετήθηκε. Αξιοσημείωτο είναι, όμως, το γεγονός ότι υποβλήθηκε σε λιγότερες εργασίες συντήρησης σε σχέση με το πλοίο Γ, από το οποίο εμφανίζει καλύτερη συμπεριφορά. Τα δύο αυτά πλοία υποβλήθηκαν σε δεξαμενισμό σε πολύ κοντινά χρονικά διαστήματα (μόλις δύο μήνες διαφορά), οπότε η άμεση σύγκριση της αποδοτικότητάς τους καθίσταται εφικτή.

γ) Η συμπεριφορά του πλοίου Α, παρά τις πολλαπλές εργασίες συντήρησης στις οποίες υποβλήθηκε συνολικά καθ' όλη την περίοδο μελέτης, κρίνεται η χειρότερη εκ των τεσσάρων. Σημειώνεται, όμως, ότι είχε ημερομηνία δεξαμενισμού την άνοιξη του 2018, πριν αρχίσει, δηλαδή, η καταγραφή των δεδομένων.

Με βάση τα παραπάνω, μπορούμε να απαντήσουμε στα τρία ερευνητικά ερωτήματα της παρούσας μελέτης ακολούθως:

1. Χωρίς να μπορούμε να εξάγουμε ασφαλή συμπεράσματα, φαίνεται ότι η ενεργειακή αποδοτικότητα των πλοίων Β και Δ σε σχέση με αυτή των Α και Γ αντίστοιχα, εμφανίζεται βελτιωμένη. Άρα θεωρούμε ότι τα πλοία Β και Δ έχουν ενισχυμένη αντιρρυπαντική επίστρωση.
2. Η διαφορά στην αποδοτικότητα που υποδεικνύει η απάντηση του πρώτου ερευνητικού ερωτήματος εντοπίζεται κυρίως στο είδος και στη συχνότητα των εργασιών συντήρησης που υποβλήθηκαν τα πλοία κατά τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος της μελέτης.
3. Τα αποτελέσματα δείχνουν σαφώς ότι η μελέτη της απόδοσης της γάστρας και της έλικας χρησιμοποιώντας το ISO 19030 δεν ακολουθεί γραμμική τάση στο χρόνο και δεν αλλάζει αμέσως μόλις πραγματοποιηθεί ένας σημαντικός καθαρισμός ή συντήρηση της γάστρας και της έλικας. Έτσι, με την εκτίμηση

αυτή δε δίνεται η ακριβής εικόνα της κατάστασης της ρύπανσης στη γάστρα του πλοίου σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή, λόγω της μικρής αποτελεσματικότητας, ακρίβειας και αξιοπιστίας του ISO 19030. Αυτό αποδεικνύεται τόσο από την ανακριβή πρόβλεψη της απώλειας απόδοσης με την πάροδο του χρόνου, μεταξύ των διαστημάτων καθαρισμού, όσο και από την ανεπαρκή ικανότητα αυτόματης ανίχνευσης δραστηριοτήτων συντήρησης.

### Προτάσεις

Δεδομένων των παραπάνω αποτελεσμάτων προτείνεται περαιτέρω ανάπτυξη του προτύπου ISO 19030 που σχετίζεται με την εκτίμηση της θαλάσσιας ρύπανσης με σκοπό την ενσωμάτωση ακριβέστερης μεθοδολογίας. Η ανάγκη για μια αποτελεσματική μέθοδο υπολογισμού της επίδρασης της ρύπανσης στις επιδόσεις των πλοίων, είναι αναγκαία τόσο για οικονομικούς όσο και για περιβαλλοντικούς λόγους. Μια πιθανή αλλαγή θα μπορούσε να είναι η τροποποίηση της μεθοδολογίας, ώστε να λαμβάνονται υπόψιν ξεχωριστά τα είδη και οι μορφές των αντιρρυπαντικών χρωμάτων στους υπολογισμούς.

Σημειώνεται, επίσης, ότι στην παρούσα μελέτη δεν ελήφθησαν υπόψιν οι πραγματικές πορείες των πλοίων σε όλη την διαθέσιμη χρονική περίοδο. Είναι προφανές πως η πλεύση δύο αδελφών πλοίων, με την ίδια μορφή και σύσταση αντιρρυπαντικού χρώματος, σε διαφορετικές θάλασσες (με διαφορετική σύσταση υδάτων π.χ. αλατότητα κλπ) θα οδηγήσει σε διαφορετικό ποσοστό ρύπανσης μεταξύ των δύο, οπότε μια περαιτέρω μελέτη για να ληφθεί υπόψιν η διαφοροποίηση των ταξιδιών πλοίων με όμοια αντιρρυπαντική επίστρωση θα οδηγούσε σε ενδιαφέροντα αποτελέσματα, βάσει των καθημερινών καταγραφών των πλοίων (δεδομένου ότι ήταν γνωστό εκ των προτέρων, ποια πλοία διαθέτουν όμοια αντιρρυπαντικά χρώματα).

Ολοκληρώνοντας, λαμβάνοντας υπόψιν ότι οι διαθέσιμες καθημερινές καταγραφές, παρά το γεγονός ότι όλες ακολουθούσαν ένα συγκεκριμένο πρότυπο και εμφάνιζαν όμοια μορφή, πολλά δεδομένα σε αυτές δεν καταγράφονταν σωστά ή παρέμεναν κενά, οπότε δεν χρησιμοποιούνταν οι αντίστοιχες καθημερινές καταγραφές στους υπολογισμούς. Υπό

αυτό το πρίσμα, σκεπτόμενοι ότι στην παρούσα εργασία, το γεγονός αυτό αποτέλεσε τροχοπέδη σε πολλά σετ δεδομένων (ειδικά για το πλοίο Δ) , είναι αναγκαία η καθιέρωση προτύπων καταγραφής πρωτογενών δεδομένων από τα πληρώματα των εταιριών που επιθυμούν την παρακολούθηση της αποδοτικότητας των πλοίων τους.

### Περιορισμοί Έρευνας

Καθώς η παρούσα μελέτη βασίστηκε στην επεξεργασία πρωτογενών ποσοτικών δεδομένων, τα αποτελέσματα ενδέχεται να περιέχουν έναν βαθμό σφάλματος και τα συμπεράσματα της θα πρέπει να ερμηνεύονται λαμβάνοντας υπόψιν τους διάφορους περιορισμούς της έρευνας. Καθώς δεν υπήρχε μία ενιαία μεθοδολογία χρησιμοποιήθηκαν διάφορα πρότυπα (ISO, ITTC) και εργαλεία (Excel, MATLAB) για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων με αποτέλεσμα την πιθανή αλλοίωση της ακρίβειας τους. Να σημειωθεί, επίσης, ότι πολλά από τα διαθέσιμα δεδομένα δεν είχαν καταγραφεί με το σωστό τρόπο, ούτως ώστε κατά την ταξινόμησή τους, να θεωρούνταν άκυρα, για την εκτέλεση των αναγκαίων υπολογισμών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα ήταν η καταγραφή της κατεύθυνσης του ανέμου και του swell , καθώς σε πολλά σετ δεδομένων υπήρχαν κενά ή η μορφή καταγραφής τους δεν ακολουθούσε την τυπική μορφή (π.χ. VAR στις κατευθύνσεις ανέμου).

Επιπλέον, η μέτρηση των πρωτογενών δεδομένων βασίζεται και σε παρατηρήσεις με ανθρώπινο μάτι (π.χ. μέτρηση του swell) που εμπεριέχει ένα αρκετά μεγάλο ποσοστό σφάλματος.

Ολοκληρώνοντας, οι προσεγγιστικές μετρήσεις των επιφανειών από τα διαθέσιμα σχέδια των πλοίων (Γενικής Διάταξης και Βιβλίο Ευστάθειας) αλλά και οι διάφορες συμβάσεις που ακολουθήθηκαν, με βασικές την απομάκρυνση ορισμένων σημείων ταχύτητας – ισχύος από τα αντίστοιχα διαγράμματα και τα εύρη των βυθισμάτων αναφοράς, συντελούν σε μικρές αποκλίσεις των πραγματικών τιμών των αποτελεσμάτων.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Aldous, L., Smith, T., Bucknall, R., & Thompson, P. (2015). Uncertainty analysis in ship performance monitoring. *Ocean Engineering*, 110, 29–38. doi:10.1016/j.oceaneng.2015.05.043
- Armstrong, V. N., & Banks, C. (2015). Integrated approach to vessel energy efficiency. *Ocean Engineering*, 110, 39–48. doi:10.1016/j.oceaneng.2015.10.024
- Barreiro, J., Zaragoza, S., & Diaz-Casas, V. (2022). Review of ship energy efficiency. *Ocean Engineering*, 257, 111594.
- Callow, M. E., & Callow, J. A. (2002). Marine biofouling: a sticky problem. *Biologist*, 49(1), 1-5.
- Dafforn, K. A., Lewis, J. A., & Johnston, E. L. (2011). Antifouling strategies: History and regulation, ecological impacts and mitigation. *Marine Pollution Bulletin*, 62(3), 453–465. doi:10.1016/j.marpolbul.2011.01.012
- Erol, E., Cansoy, C. E., & Aybar, O. Ö. (2020). Assessment of the impact of fouling on vessel energy efficiency by analyzing ship automation data. *Applied Ocean Research*, 105, 102418. doi:10.1016/j.apor.2020.102418
- IMO, (2011). Resolution MEPC. 207 (62). Guidelines for the control and management of ships' biofouling to minimize the transfer of Invasive aquatic species. MEPC 62/24/Add. 1, Annex 26. *London: International Maritime Organization*, 25.
- IMO, (2017). Resolution MEPC.1/Circ.850/Rev.2). Guidelines for determining minimum propulsion power to maintain manoeuvrability in adverse conditions.
- IMO, (2018). Resolution MEPC. 304 (72). *Initial IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships*.
- IMO, (2022a). Anti-fouling systems. Retrieved April 1, 2023, from <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Anti-fouling.aspx>
- IMO, (2022b). Biofouling. Retrieved April 1, 2023, from <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Biofouling.aspx>
- IMO, (2020). Fourth greenhouse gas study 2020. <https://www.imo.org/en/OurWork/En>
- ISO, 2016. ISO 19030-2: Ships and Marine Technology Measurement of Changes in Hull and Propeller Performance, Geneva.

- ITTC 2021-Recommended Procedures and Guidelines 7.5-04-01-01.2. Speed and Power Trials, Part 2 Analysis of Speed/Power Trial Data.
- Koboević, Ž., Bebić, D., & Kurtela, Ž. (2018). *New approach to monitoring hull condition of ships as objective for selecting optimal docking period. Ships and Offshore Structures, 1–9*. doi:10.1080/17445302.2018.1481
- Kristensen, H. O. (2013). Statistical analysis and determination of regression formulas for main dimensions of container ships based on IHS Fairplay data. *University of Southern Denmark: Odense, Denmark*.
- Rikka, S., & Kiil, S. (2015). Antifouling coatings: recent developments in control strategies and toxicity, with emphasis on marine paints. *Journal of Coatings Technology and Research, 12(2)*, 197-208.
- Shaw, H.-J., & Lin, C.-K. (2021). *Marine big data analysis of ships for the energy efficiency changes of the hull and maintenance evaluation based on the ISO 19030 standard. Ocean Engineering, 232, 108953*. doi:10.1016/j.oceaneng.2021.1
- Themelis, N. (2020). Lecture notes on “Measurement of changes in hull and propeller performance”. School Of Naval Architecture and Marine Engineering. National Technical University of Athens.
- Themelis, N., Spandonidis, C. C., & Giordamlis, C. (2019). Data acquisition and processing techniques for a novel performance monitoring system based on KPIs. In *Sustainable Development and Innovations in Marine Technologies* (pp. 306-315). CRC Press.
- Voulvoulis, N., & Arpon, K. D. (2011). Antifouling paint biocides in the aquatic environment: a review. *Environmental international, 37(2)*, 554-569.
- Yebra, D. M., Kiil, S., & Dam-Johansen, K. (2004). Antifouling technology—past, present and future steps towards efficient and environmentally friendly antifouling coatings. *Progress in Organic Coatings, 50(2)*, 75–104. doi:10.1016/j.porgcoat.2003.06

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : ΚΩΔΙΚΕΣ MATLAB

## Συντελεστές Αντίστασης Ανέμου (Fujiwara)

%Κώδικας για τον υπολογισμό συντελεστών αντίστασης ανέμου με τη μέθοδο Fujiwara

```

%Διαστάσεις Πλοίων
D=24.8;
B=42.8;
Loa=270.2;
%Συντελεστές για πράξεις στην μέθοδο Fujiwara
b10=0.922; b11=-0.507; b12=-1.162; b20=-0.018; b21=5.091; b22=-10.367; b23=3.011; b24=0.341;
d10=-0.458; d11=-3.245; d12=2.313; d20=1.901; d21=-12.727; d22=-24.407; d23=40.310; d24=5.481;
e10=0.585; e11=0.906; e12=-3.239; e20=0.314; e21=1.117;
%Περίπτωση Α : Βύθισμα Αντοχής
Aods=3341.14;
Axvs=1837.60336;
Hbrs=43;
Cmcs=0.009061337;
Hcs=12.29628613;
Ayvs=6048;
%Υπολογισμός επιμέρους συντελεστών, όπως παρουσιάζονται στην ITTC
Clf1s=b10+b11*Ayvs/(Loa*B)+b12*Cmcs/Loa;
Cx11s=d10+d11*Ayvs/(Loa*Hbrs)+ d12*Axvs/(B*Hbrs);
Calf1s=e10+e11*Aods/Ayvs+e12*B/Loa;
Clf2s=b20+b21*B/Loa+b22*Hcs/Loa+b23*Aods/(Loa^2)+ b24*Axvs/(B^2);
Cx12s=d20+d21*Ayvs/(Loa*Hbrs)+ d22*Axvs/Ayvs+d23*B/Loa+d24*Axvs/(B*Hbrs);
Calf2s=e20+e21*Aods/Ayvs;
mm=1;
%Δυνατές τιμές γωνίας ανέμου
Ta =[0:5:180];
T1 = Ta';
for yy = 1:1:size(T1)
    if yy>0 && yy<90

Cdas(mm)=Clf1s*cosd(T1(yy))+Cx11s*(sind(T1(yy))*0.5*sind(T1(yy))*(cosd(T1(yy))^2)*sind(T1(yy))*cosd(
(T1(yy))+Calf1s*sind(T1(yy))*(cosd(T1(yy))^3);
        else if yy > 90
            Cdas
(mm)=Clf2s*cosd(T1(yy))+Cx12s*(sind(T1(yy))*0.5*sind(T1(yy))*(cosd(T1(yy)))^2)*sind(T1(yy))*cosd(T
1(yy))+Calf2s*sind(T1(yy))*(cosd(T1(yy))^3);
            else if yy == 90
                Clf90as=b10+b11*Ayvs/(Loa*B)+b12*Cmcs/Loa;
                Cx1190as=d10+d11*Ayvs/(Loa*Hbrs)+ d12*Axvs/(B*Hbrs);
                Calf90as=e10+e11*Aods/Ayvs+e12*B/Loa;

Cda90as=Clf90a*cosd(80)+Cx1190a*(sind(80))*0.5*sind(80)*(cosd(80))^2)*sind(80)*cosd(80)+Calf90a*sind
(80)*(cosd(80)^3);
                Clf90bs=b20+b21*B/Loa+b22*Hcs/Loa+b23*Aods/(Loa^2)+ b24*Axvs/(B^2);
                Calf90bs=e20+e21*Aods/Ayvs;

Cda90bs=Clf90b*cosd(100)+Cx12s*(sind(100))*0.5*sind(100)*(cosd(100))^2)*sind(100)*cosd(100)+Calf90b
*sind(100)*(cosd(100)^3);
                Cdas (mm)= 0.5*(Cda90a+Cda90b);

            end
        end
    end
    mm = mm + 1 ;
end
%Περίπτωση Β : Βύθισμα Σχεδίασης
Aodd=3126.824679;
Axvd=1902.659359;
Hbrd=44.5;
Cmcd=-2.272040194;
Hcd=12.0052447;
Ayvd=6152.1;
%Υπολογισμός επιμέρους συντελεστών, όπως παρουσιάζονται στην ITTC
Clf1d=b10+b11*Ayvd/(Loa*B)+b12*Cmcd/Loa;
Cx11d=d10+d11*Ayvd/(Loa*Hbrd)+ d12*Axvd/(B*Hbrd);
Calf1d=e10+e11*Aodd/Ayvd+e12*B/Loa;
Clf2d=b20+b21*B/Loa+b22*Hcd/Loa+b23*Aodd/(Loa^2)+ b24*Axvd/(B^2);
Cx12d=d20+d21*Ayvd/(Loa*Hbrd)+ d22*Axvd/Ayvd+d23*B/Loa+d24*Axvd/(B*Hbrd);

```



```

Calf2d=e20+e21*Aodd/Ayvd;
mm=1;
%Δυνατές τιμές γωνίας ανέμου
Ta =[0:5:180];
T1 = Ta';
for yy = 1:size(T1)
    if yy>=0 && yy<90

Cdad(mm)=Clf1d*cosd(T1(yy))+Cx11d*(sind(T1(yy))*0.5*sind(T1(yy))*(cosd(T1(yy))^2)*sind(T1(yy))*cosd
(T1(yy))+Calf1d*sind(T1(yy)))*(cosd(T1(yy))^3);
    else if yy > 90
        Cdad
    (mm)=Clf2d*cosd(T1(yy))+Cx112d*(sind(T1(yy))*0.5*sind(T1(yy))*(cosd(T1(yy)))^2)*sind(T1(yy))*cosd(T
1(yy))+Calf2d*sind(T1(yy))*(cosd(T1(yy))^3);
    else if yy == 90
        Clf90ad=b10+b11*Ayvd/(Loa*B)+b12*Cmcd/Loa;
        Cx1190ad=d10+d11*Ayvd/(Loa*Hbrd)+ d12*Axvd/(B*Hbrd);
        Calf90ad=e10+e11*Aodd/Ayvd+e12*B/Loa;

Cda90ad=Clf90ad*cosd(80)+Cx1190ad*(sind(80)*0.5*sind(80)*(cosd(80))^2)*sind(80)*cosd(80)+Calf90ad*s
ind(80)*(cosd(80)^3);
        Clf90bd=b20+b21*B/Loa+b22*Hcd/Loa+b23*Aodd/(Loa^2)+ b24*Axvd/(B^2);
        Calf90bd=e20+e21*Aodd/Ayvd;

Cda90bd=Clf90bd*cosd(100)+Cx112d*(sind(100)*0.5*sind(100)*(cosd(100))^2)*sind(100)*cosd(100)+Calf90
bd*sind(100)*(cosd(100)^3);
        Cdad(mm)= 0.5*(Cda90ad+Cda90bd);
    end
end
end
mm = mm + 1 ;
end
%Περίπτωση Γ : Βύθισμα Ερματισμού
Aodb=944.1024224;
Axvb=2179.147359;
Hbrb=49.46;
Cmcb=-21.44286414;
Hcb=9.347286753;
Ayvb=5138.6;
%Υπολογισμός επιμέρους συντελεστών, όπως παρουσιάζονται στην ITTC
Clf1b=b10+b11*Ayvb/(Loa*B)+b12*Cmcb/Loa;
Cx11b=d10+d11*Ayvb/(Loa*Hbrb)+ d12*Axvb/(B*Hbrb);
Calf1b=e10+e11*Aodd/Ayvb+e12*B/Loa;
Clf2b=b20+b21*B/Loa+b22*Hcb/Loa+b23*Aodb/(Loa^2)+ b24*Axvb/(B^2);
Cx112b=d20+d21*Ayvb/(Loa*Hbrb)+ d22*Axvb/Ayvb+d23*B/Loa+d24*Axvb/(B*Hbrb);
Calf2b=e20+e21*Aodb/Ayvb;
mm=1;
%Δυνατές τιμές γωνίας ανέμου
Ta =[0:5:180];
T1 = Ta';
for yy = 1:size(T1)
    if yy>=0 && yy<90

Cdab(mm)=Clf1b*cosd(T1(yy))+Cx11b*(sind(T1(yy))*0.5*sind(T1(yy))*(cosd(T1(yy))^2)*sind(T1(yy))*cosd
(T1(yy))+Calf1b*sind(T1(yy)))*(cosd(T1(yy))^3);
    else if yy > 90
        Cdab
    (mm)=Clf2b*cosd(T1(yy))+Cx112b*(sind(T1(yy))*0.5*sind(T1(yy))*(cosd(T1(yy)))^2)*sind(T1(yy))*cosd(T
1(yy))+Calf2b*sind(T1(yy))*(cosd(T1(yy))^3);
    else if yy == 90
        Clf90ab=b10+b11*Ayvb/(Loa*B)+b12*Cmcb/Loa;
        Cx1190ab=d10+d11*Ayvb/(Loa*Hbrb)+ d12*Axvb/(B*Hbrb);
        Calf90ab=e10+e11*Aodb/Ayvb+e12*B/Loa;

Cda90ab=Clf90ab*cosd(80)+Cx1190ab*(sind(80)*0.5*sind(80)*(cosd(80))^2)*sind(80)*cosd(80)+Calf90ab*s
ind(80)*(cosd(80)^3);
        Clf90bb=b20+b21*B/Loa+b22*Hcb/Loa+b23*Aodb/(Loa^2)+ b24*Axvb/(B^2);
        Calf90bb=e20+e21*Aodb/Ayvb;

Cda90bb=Clf90bb*cosd(100)+Cx112b*(sind(100)*0.5*sind(100)*(cosd(100))^2)*sind(100)*cosd(100)+Calf90
bb*sind(100)*(cosd(100)^3);
        Cdab(mm)= 0.5*(Cda90ab+Cda90bb);
    end
end
end

```

```

    end
    mm = mm + 1 ;
end

%Εισαγωγή δεδομένων από τις καθημερινές καταγραφές του πλοίου A (όμοια και για τα άλλα τρία) και
%παρεμβολή από τις υπολογισμένες τιμές, για κάθε σετ δεδομένων
Ywind = xlsread ("SL-PD A.xlsx", "SL PD" , "Q5:Q1670") ;
T      = xlsread ("SL-PD A.xlsx", "SL PD" , "m5:m1670") ;
mn = 1 ;
for mn =1:1:size(Ywind)
    if T(mn) > 13.8
        Cda (mn) = interp1 (T1,Cdas,Ywind(mn));
    else if T(mn) <=13.8 && T(mn) > 10.9
        Cda (mn) = interp1 (T1,Cdad,Ywind(mn));
    else if T(mn) <= 10.9
        Cda (mn) = interp1 (T1,Cdab,Ywind(mn));
    else
        Cda (mn) = 0;
    end
    mn = mn +1 ;
end
end
end

%Αναστροφή πίνακα αποτελεσμάτων , για επικόλληση στα φύλλα εργασίας Excel
Cdasreal = Cda';

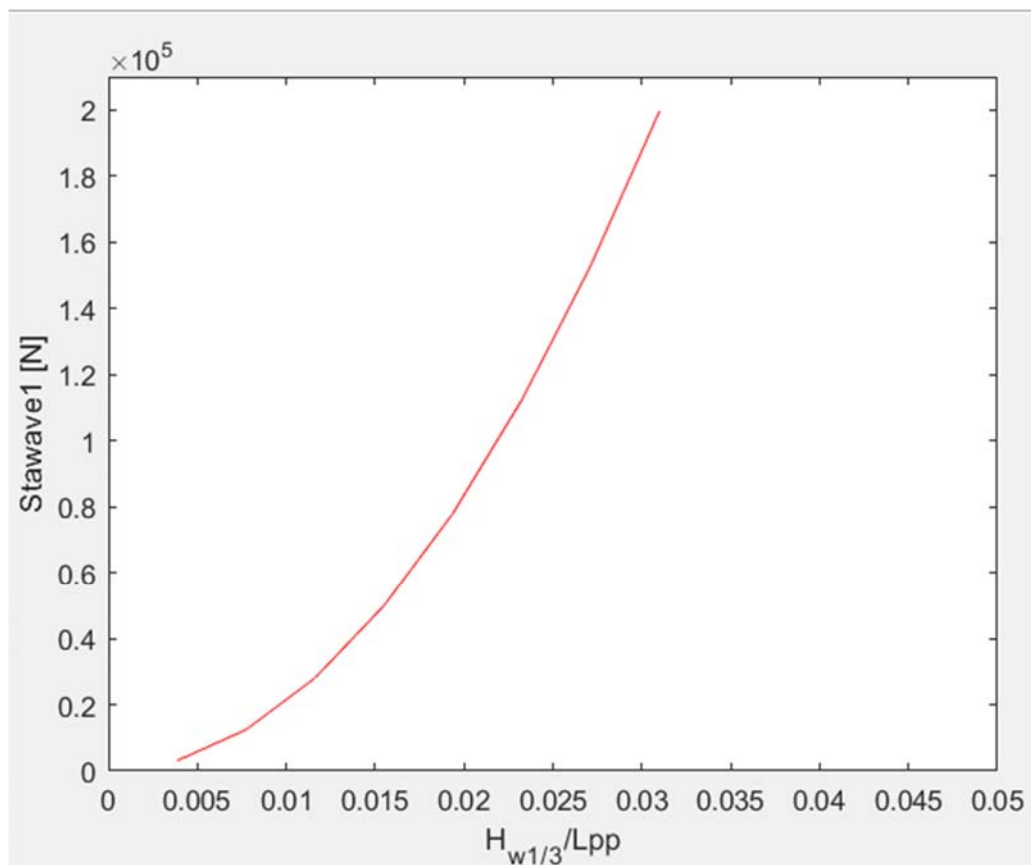
%Απεικόνιση των τελικών συντελεστών αντίστασης CDA
figure
hold on
plot (Ta,Cdab,'r')
plot (Ta,Cdad,'b')
plot (Ta,Cdas,'m')
xlabel ('Wind Angle [deg]')
ylabel ('C_D_A')
legend ('Ballast Curve', 'Design Curve', 'Scantling Curve', 'location', 'southeast')

```

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β : ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ STAWAVE-1

### Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

Στο σχήμα που ακολουθεί, παρατίθεται η μορφή της συνάρτησης STAWAVE-1, όπως αυτή αναλύθηκε στην παράγραφο 3.6.2 της εργασίας :



Σχήμα Π.1 : Αντίσταση κυματισμού STAWAVE-1 συναρτήσει του αδιάστατου μήκους κύματος

Παρατηρούμε ότι ακολουθείται μια εκθετική αύξηση της αντίστασης, συναρτήσει των αδιάστατων σημαντικών υψών ανεμογενών κυματισμών (με βάση το μήκος μεταξύ καθέτων του πλοίου). Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε και στην αντίστοιχη παράγραφο, η μεθοδολογία αυτή για τον υπολογισμό της αντίστασης κυματισμού, απορρίφθηκε για τους εξής λόγους :

- Δε λαμβάνονται υπόψιν τα Swell Heights των δεδομένων, παρά μόνο οι επαγόμενοι κυματισμοί λόγω ανέμου
- Σύμφωνα με την ITTC, η STAWAVE-1 λειτουργεί για διορθώσεις αντίστασης κυματισμού υπό την προϋπόθεση ότι οι κινήσεις κατακόρυφης ταλάντωσης (heave) και προνεαυτασμού (pitch) είναι μικρές. Από τα δεδομένα για τα τέσσερα πλοία, ωστόσο, μας δίνονται οι επιδράσεις των καιρικών συνθήκων, για κάθε καθημερινή καταγραφή, όπου αναγράφεται σε πολλά σημεία ότι το εκάστοτε πλοίο βρίσκεται σε κατάσταση “pitching”. Ως εκ τούτου, η STAWAVE-1 δεν μπορεί να εφαρμοστεί.
- Η μέθοδος υπολογισμού της δε λαμβάνει υπόψιν το κυματικό φάσμα, το οποίο ολοκληρώνεται σαν συνάρτηση των συχνοτήτων συνάντησης. Επιπλέον, δεν υπολογίζει ξεχωριστά τις συνιστώσες αντίστασης επαγόμενης κίνησης και αντίστασης ανακλώμενου κυματισμού, όπως η STAWAVE-2, οπότε κρίνεται, στο σύνολό της, ανακριβής για όλες τις περιπτώσεις πραγματικών λειτουργικών δεδομένων των πλοίων.

#### Κώδικας υπολογισμού STAWAVE-1 (MATLAB)

```
%Υπολογισμός Αντίστασης Κυματισμού STAWAVE-1
clear all
close all

%Διαμήκης Απόσταση από το μήκος ισάλου(262.8 m) έως το σημείο που αντιστοιχεί στο
95%
%του μέγιστου πλάτους
Lbw1=33.03732719;
B=42.8;
%Πυκνότητα νερού
dg=1025;
%Σημαντικά Ύψη επαγόμενου κύματος από άνεμο, βάσει δεδομένων του Πλοίου Γ
Hsw= [0.1; 0.2; 0.6 ;1; 2; 3;4; 5.5];
deiktis = 1;
ii = 1;

%Επαναληπτικός Βρόχος για όλα τα παραπάνω ύψη
for ii =1:1:size(Hsw)
Hsw(deiktis)=ii;
stawave1(deiktis)= (1/16)*dg*B*sqrt(B/Lbw1)*(ii^2);
deiktis=deiktis+1;
```

```
end
```

```
%Διάγραμμα αντίστασης για αδιαστατοποιημένα μήκη με βάση το μήκος μεταξύ
%καθέτων του πλοίου Lpp = 258 m
figure
plot (Hsw/258,stawave, 'r');
xlim ([0 0.05])
ylim ([0 2.1*10^5])
xlabel ('H_w_1_/_3/Lpp')
ylabel('Stawave1 [N]')
```

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΔΙΟΡΘΩΜΕΝΗ ΙΣΧΥ ΜΟΝΟ ΛΟΓΩ ΑΝΕΜΟΥ

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, τα τελικώς διορθωμένα για καιρό σημεία ταχύτητας – ισχύος για τα τέσσερα πλοία ήταν, σε ορισμένες περιπτώσεις, δεξιότερα των αντίστοιχων καμπυλών αναφοράς. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι στα πρωτογενή δεδομένα διαδραμάτιζε σημαντικό ρόλο η επίδραση του κυματισμού, οπότε τα πλοία είχαν μεγαλύτερες απαιτήσεις ισχύος λόγω των κυμάτων. Ωστόσο, σε πολλές περιπτώσεις είναι δυνατόν να έχει γίνει υπερβολική διόρθωση ισχύος λόγω κυματισμού, καθώς η παρατήρηση και καταγραφή του swell ίσως βασιζόταν, αποκλειστικά, στο ανθρώπινο μάτι, με τις αντίστοιχες υπο- και υπερεκτιμήσεις που αυτό επιφέρει στα αποτελέσματα.

Για λόγους σύγκρισης των αποτελεσμάτων μεταξύ των πλοίων, παρατίθενται, ενδεικτικά, οι πίνακες με τα συνολικά στατιστικά για τους δείκτες απώλειας ταχύτητας (Speed Loss), όπου για τον υπολογισμό του πρώτου (συγκεκριμένα, για την εύρεση της αναμενόμενης ταχύτητας στο νερό  $V_e$ ) χρησιμοποιήθηκε μόνο η διορθωμένη ισχύς για άνεμο και όχι για κυματισμό, ενώ ο δεύτερος ταυτίζεται με τον πίνακα της παραγράφου 5.3.1. :

ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ	ΠΛΟΙΟ Α	ΠΛΟΙΟ Β	ΠΛΟΙΟ Γ	ΠΛΟΙΟ Δ
Μέση Τιμή	-13.45	-8.47	-8.80	-8.39
Διάμεσος	-12.37	-7.97	-8.11	-8.19
Τυπική Απόκλιση	9.08	6.19	7.02	6.05
Σύνολο Δεδομένων	232	448	329	104

Πίνακας Π.1 – Συνολικά στατιστικά δεδομένα δείκτη απόδοσης απώλειας ταχύτητας [%]

(για διορθωμένη ισχύ μόνο λόγω ανέμου)

ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ	ΠΛΟΙΟ Α	ΠΛΟΙΟ Β	ΠΛΟΙΟ Γ	ΠΛΟΙΟ Δ
Μέση Τιμή	-11.65	-8.69	-7.08	-6.60
Διάμεσος	-10.40	-8.18	-6.17	-5.94
Τυπική Απόκλιση	9.03	7.58	5.21	4.44
Σύνολο Δεδομένων	226	449	300	92

Πίνακας Π.2 – Συνολικά στατιστικά δεδομένα δείκτη απόδοσης απώλειας ταχύτητας [%]

(για διορθωμένη ισχύ λόγω καιρού)

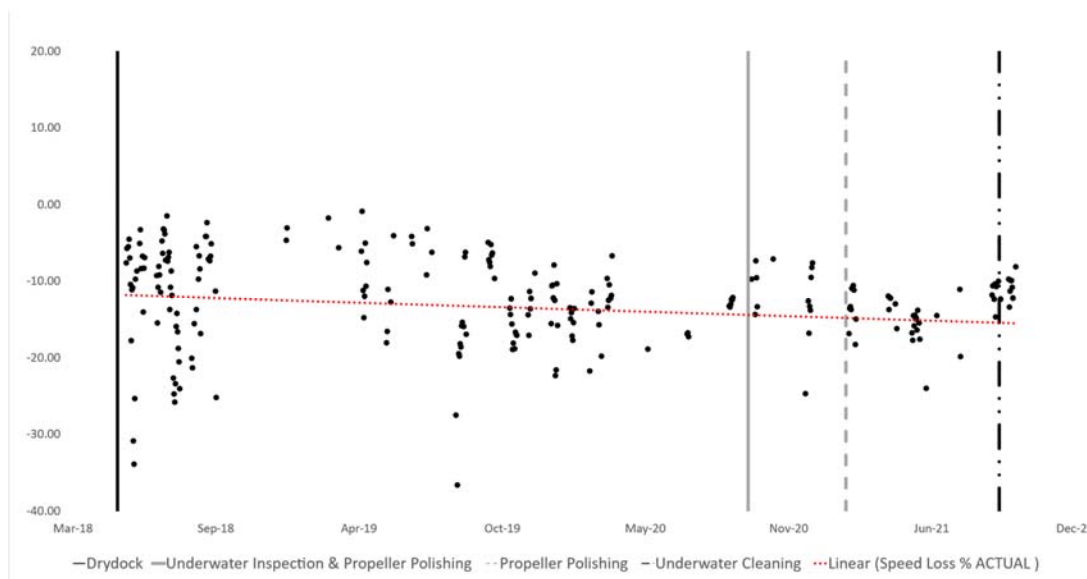
Παρατηρείται ότι :

- Για τα πλοία Α και Γ, τα διορθωμένα δεδομένα μόνο για άνεμο αποδίδουν αρκετά χειρότερους δείκτες απώλειας ταχύτητας, σε σχέση με τα διορθωμένα δεδομένα για καιρό, συνολικά. Το γεγονός αυτό εντοπίζεται και στα διαγράμματα ταχύτητας – ισχύος, όπου και τα δύο αυτά πλοία είχαν αρκετά διορθωμένα σημεία δεξιότερα των καμπυλών αναφοράς. Ωστόσο, τα αποτελέσματα είναι σχετικά αναμενόμενα διότι οι μέσες καιρικές συνθήκες που αντιμετώπισαν καθ'όλη τη χρονική διάρκεια των 3.5 ετών (σ.σ. σημαντικό ύψος κύματος) κρίθηκαν χειρότερες από τις αντίστοιχες των Β και Δ, οπότε αναμένεται μεγαλύτερη διόρθωση λόγω κυματισμού στα τελικά δεδομένα.
- Ενδιαφέρον παρουσιάζει η σύγκριση των δεικτών του πλοίου Β. Τα τελικώς διορθωμένα σημεία αποδίδουν (ελάχιστα) χειρότερα ποσοστά απώλειας ταχύτητας, ωστόσο δεν αναμενόταν μεγάλη απόκλιση στα συγκριτικά αυτά αποτελέσματα, διότι το μέσο σημαντικό ύψος κύματος, όπως αποτυπώνεται στο κεφάλαιο 4, παραμένει σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Γενικά, ο αριθμός των έγκυρων δεδομένων και η ομαλή κατανομή των δεδομένων, όπως φαίνεται και στα

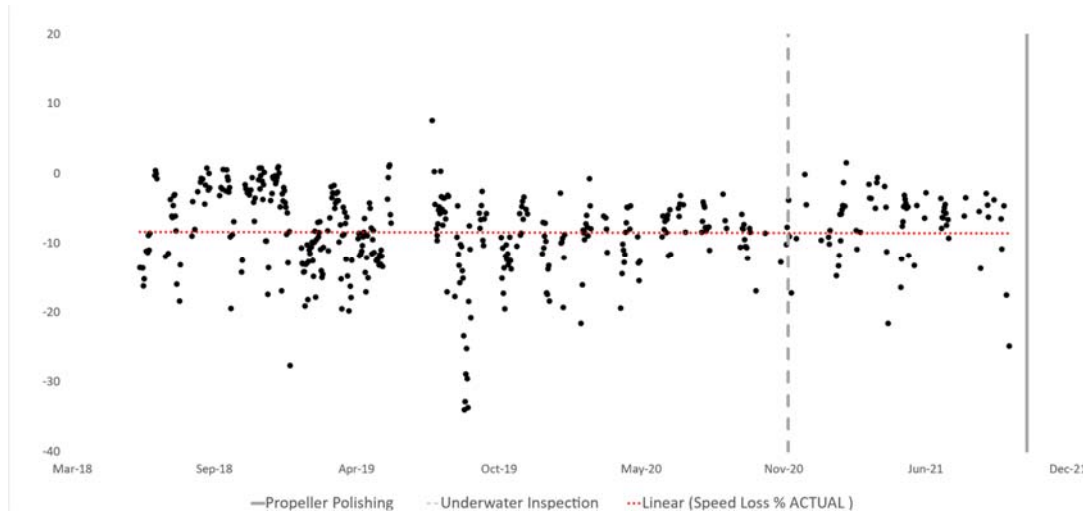
διαγράμματα ταχύτητας – ισχύος, επιβεβαιώνουν τη βελτιωμένη συμπεριφορά του πλοίου.

- Για το πλοίο Δ, ενώ αναμενόταν παρόμοια συμπεριφορά με το πλοίο Β, διαπιστώνεται πως για τα τελικώς διορθωμένα σημεία, η διόρθωση κυματισμού υπερεκτιμάται. Τα ποσοστά απώλειας ταχύτητας για διορθωμένη ισχύ μόνο λόγω ανέμου έχουν αρκετά μεγάλη απόκλιση από αυτά για διορθωμένη ισχύ λόγω καιρού, ενώ το μέσο σημαντικό ύψος κύματος κυμαινόταν σε χαμηλά επίπεδα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί και η πληθώρα των σημείων ταχύτητας – ισχύος που βρίσκονται δεξιότερα των καμπυλών αναφοράς. Ωστόσο, όπως επισημάνθηκε και προηγουμένως, τα έγκυρα δεδομένα για το πλοίο Δ είναι αρκετά ανεπαρκή ώστε να οδηγήσουν σε κάποιο σαφές και ασφαλές συμπέρασμα για την ενεργειακή αποδοτικότητά του.

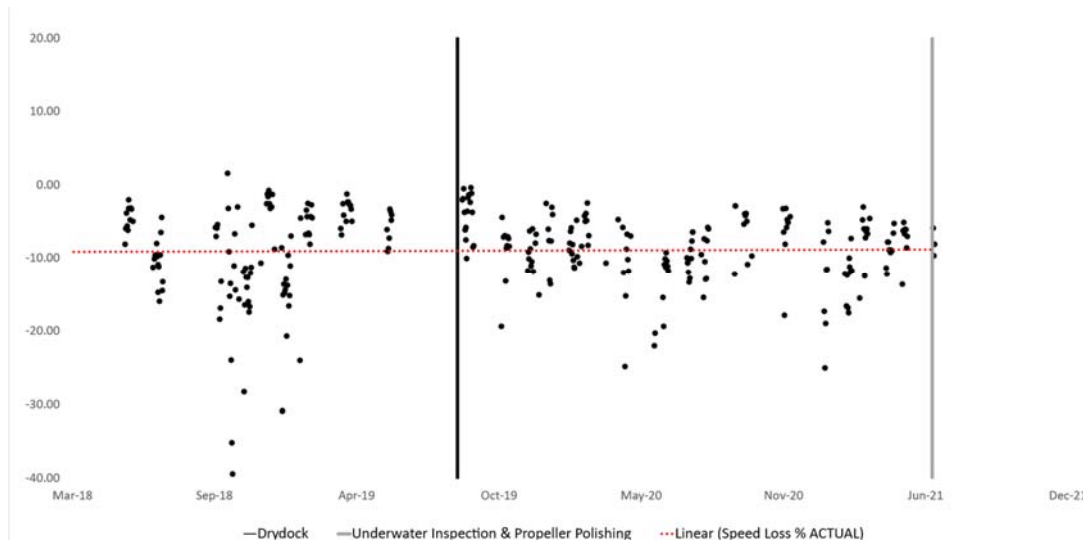
Τέλος, παρατίθενται τα αντίστοιχα διαγράμματα για το δείκτη απώλειας ταχύτητας βάσει μόνο της διόρθωσης ανέμου, όπου διαπιστώνονται οι σχετικά ομαλές συμπεριφορές των πλοίων Β και Γ στο χρόνο, καθώς και τα ποσοστά απώλειας ταχύτητας για το πλοίο Α να μεγαλώνουν με το πέρασμα του χρόνου, ενώ για το πλοίο Δ, η αύξουσα τάση των ελάχιστων ποσοστών απώλειας ταχύτητας δεν αποδεικνύει, ουσιαστικά, μια σαφή βελτιωμένη συμπεριφορά, λόγω των ελάχιστων δεδομένων.



Σχήμα Π.2 : Δείκτης απώλειας ταχύτητας  
(για διορθωμένη ισχύ μόνο λόγω ανέμου) [%] – ΠΛΟΙΟ Α

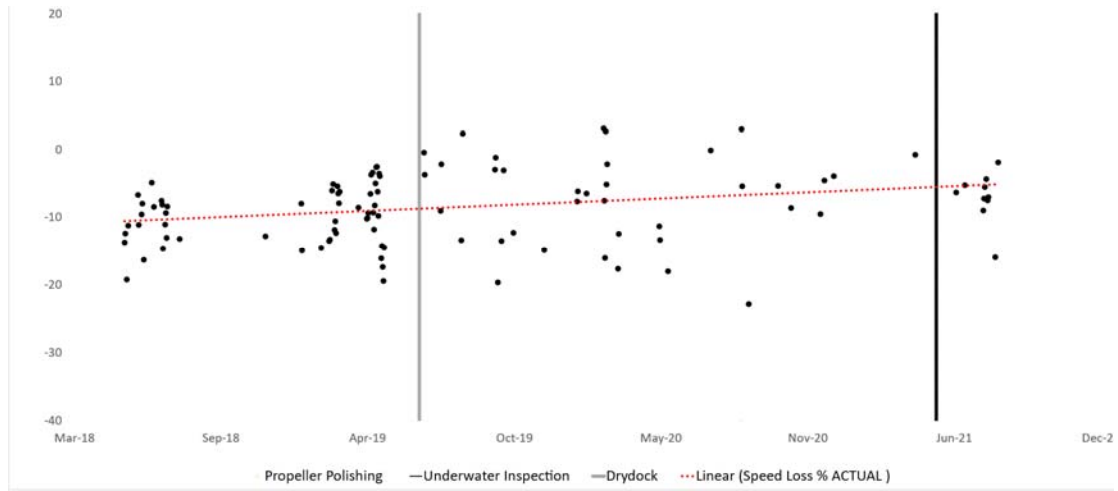


Σχήμα Π.3 : Δείκτης απώλειας ταχύτητας  
(για διορθωμένη ισχύ μόνο λόγω ανέμου) [%] – ΠΛΟΙΟ Β



Σχήμα Π.4 : Δείκτης απώλειας ταχύτητας  
(για διορθωμένη ισχύ μόνο λόγω ανέμου) [%] – ΠΛΟΙΟ Γ





Σχήμα Π.5 : Δείκτης απώλειας ταχύτητας  
(για διορθωμένη ισχύ μόνο λόγω ανέμου) [%] – ΠΛΟΙΟ Δ