ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Μελέτης Πλοίου και θαλασσίων Μεταφορών

Εξέταση Δεικτών Ενεργειακής Αποδοτικότητας Κατά Τη Σχεδίαση Του Πλοίου

Διαμάντης Χριστόφορος

Επιβλέπων Καθηγητής: Νικόλαος Θεμελής

Αθήνα, Μάιος 2022

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποσκοπεί στην εξέταση δεικτών ενεργειακής αποδοτικότητας κατά τη σχεδίαση του πλοίου, μεταβάλλοντας κάθε φορά μία ή περισσότερες από τις παραμέτρους του. Ο κύριος στόχος της εργασίας είναι να διερευνηθεί το πως επηρεάζει κάθε παράμετρος την τιμή του δείκτη ενεργειακής αποδοτικότητας EEDI και να υπολογιστούν τροποποιημένοι δείκτες EEDI οι οποίοι να ανταποκρίνονται περισσότερο στις καταστάσεις που θα αντιμετωπίσει ένα πλοίο κατά τη λειτουργία του σε όλο το κύκλο ζωής του και να αναδεικνύουν μια πιο ρεαλιστική οπτική πάνω στο ζήτημα της ενεργειακής αποδοτικότητας.

Στο Κεφάλαιο 1 γίνεται μια περίληψη πάνω στους μελλοντικούς στόχους του IMO για μείωση των αέριων ρύπων από τη ναυτιλία και εισάγεται η έννοια του δείκτη EEDI, οι παράμετροι που τον καθορίζουν, καθώς και ο τρόπος υπολογισμού του. Επιπλέον, τονίζεται η ανάγκη ύπαρξης τροποποιημένων δεικτών EEDI.

Στο Κεφάλαιο 2 υπολογίζεται ο δείκτης EEDI του πλοίου που θα χρησιμοποιηθεί για τους υπολογισμούς και περιγράφεται το πρόγραμμα PROPULSION.

Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται ο υπολογισμός της ελάχιστης ισχύος του πλοίου. Η ολοένα και αυξανόμενη ανάγκη μείωσης των ρύπων και συμμόρφωσης στον δείκτη EEDI οδηγούν αρκετούς σχεδιαστές στην μείωση της ισχύος της κύριας μηχανής. Παρόλα αυτά, πρέπει να υπάρχει ένα κάτω όριο ταχύτητας και ισχύος ώστε τα πλοία σε δυσμενείς συνθήκες υπό την επίδραση ανέμων και κυματισμών, να μπορούν να διατηρήσουν την ελεγξιμότητά τους. Σημαντικό ρόλο έχει η πρόσθετη αντίσταση σε κυματισμούς όπου και αναλύεται ο ρόλος της.

Στο Κεφάλαιο 4 υπολογίζονται τροποποιημένοι δείκτες EEDI ώστε να ληφθούν υπόψη ορισμένα πρακτικά ζητήματα τα οποία δεν λαμβάνονται υπόψη μέσω του κλασσικού EEDI. Οι παράμετροι που εξετάστηκαν είναι τα διαφορετικά σημεία λειτουργίας της μηχανής, τα διαφορετικά βυθίσματα λόγω καταστάσεων φόρτωσης καθώς και η αύξηση της αντίστασης λόγω ανέμων, κυματισμών, τραχύτητα γάστρας και διαφόρων άλλων αιτιών. Ακόμα, προτείνεται η αλλαγή βήματος έλικας και αύξηση του περιθωρίου στροφών LRM για την βελτιστοποίηση του EEDI.

Τέλος, τα συμπεράσματα και οι προτάσεις για περαιτέρω έρευνα αυτής της εργασίας βρίσκονται στο Κεφάλαιο 5 ενώ μερικές επιπρόσθετες πληροφορίες μπορούν να βρεθούν στο Παράρτημα.

ABSTRACT

The current diploma thesis aims at examining energy efficiency indexes during the ships design stage, modifying one or more parameters each time. The main goal of this study is to investigate how every parameter affects the value of the EEDI index and to calculate amended EEDI indexes which will respond better to the conditions that a ship will face during its life circle. This will point out a more realistic perspective over the energy efficiency issue.

In chapter 1, a summary of the future goals for IMO in order to reduce GHG from shipping is being made. Also, the meaning of the EEDI index, its parameters and how it is calculated is being introduced. Moreover, the need of amended indexes is being noted.

Chapter 2 provides all the necessary information to calculate the EEDI index of our work ship and also describes the PROPULSION program.

In Chapter 3, minimum propulsion power is being calculated. The rising need for reducing the GHGs and complying with the EEDI, are leading many designers to reduce the power of the main engine. Despite that, there has to be a minimum speed and power in order to maintain the maneuverability of ships in adverse conditions. The added wave resistance is of paramount importance and it is analyzed in this chapter.

In Chapter 4, amended EEDI indexes are being calculated in order to take into consideration some practical issues that are not noted via classic EEDI. Those parameters are the different operational points of the main engine, the various draughts due to loading conditions and the increase of the resistance because of wind, waves, hull roughness and other causes. Furthermore, the change of the PoD and the rise of the LRM for the optimization of the EEDI is being suggested.

Finally, the conclusions and suggestions for further research of this thesis can be found in Chapter 5, while some extra information can be found in the Annex.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η διπλωματική αυτή αποτελεί το τελευταίο μέρος του κύκλου σπουδών μου στην Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου της Αθήνας και πραγματοποιείται υπό την εποπτεία του τομέα Μελέτης Πλοίου και Θαλασσίων Μεταφορών.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υπεύθυνο Καθηγητή της διπλωματικής κ. Νικόλαο Θεμελή για την στήριξη και την καθοδήγηση που μου έδωσε κατά τη διάρκεια αυτού του εγχειρήματος, καθώς και για τις γνώσεις και τις πληροφορίες που μου μεταβίβασε. Η ενασχόληση με την παρούσα εργασία μου έδωσε το έναυσμα να μελετήσω περαιτέρω ζητήματα που συσχετίζουν τη ναυτιλία με το περιβάλλον και να αντιληφθώ την σημασία τους και πόσο έντονα θα μας απασχολήσουν στο εγγύς μέλλον.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές της Σχολής Ναυπηγών που μου έδωσαν τις γνώσεις ώστε να μπορώ να ανταποκριθώ στις απαιτήσεις του θέματος και να αποκτήσω σφαιρικές γνώσεις πάνω στη ναυπηγική.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια, τους φίλους και όλους όσους ήταν κοντά μου καθ’ όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Αθήνα 2022,

Διαμάντης Χριστόφορος.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ 2
ABSTRACT 3
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ 4
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ 10
1.1 Πλαίσιο του IMO για την ενεργειακή αποδοτικότητα των πλοίων 10
1.2 EEDI 11
1.3 Υπολογισμός EEDI 13
1.3.1 Απαιτούμενος (Required) EEDI 14
1.3.2 Επιτευχθείς (attained) EEDI 18
1.4 Ανάγκη Ύπαρξης Τροποποιημένων Δεικτών EEDI 25
2.Υπολογισμός EEDI του πλοίου εργασίας 27
3. Οδηγία για την ελάχιστη ισχύ του πλοίου και εφαρμογή για το υπό σχεδίαση πλοίο 35
3.1 Επίπεδο 1: Έλεγχος με χρήση ελάχιστων τιμών ισχύος 36
3.2 Επίπεδο 2: Απλοποιημένη Υπολογιστική Διαδικασία 37
3.2.1 ΒΗΜΑ 1: Εύρεση απαιτούμενης ταχύτητας Vs υπό την επίδραση πρωραίων κυματισμών και ανέμου 38
3.2.2 ΒΗΜΑ 2: Έλεγχος για την εγκατεστημένη ισχύ 40
4. Τροποποιημένοι Δείκτες EEDI 56
4.1 Διαφορετικά σημεία λειτουργίας της μηχανής του πλοίου 57
4.2 Αυξημένη αντίσταση (χ≠0) και Vref=14 knots 62
4.3 Αυξημένη αντίσταση (χ≠0) και P_{ME}=75% MCR 64
4.4 Υπολογισμός $EEDI_{weather}$ για διάφορες καταστάσεις θάλασσας 66
4.4.1 1η μέθοδος υπολογισμού 67
4.4.2 2η μέθοδος υπολογισμού 72
4.4.3 3η μέθοδος υπολογισμού 73
4.4.4 Σύγκριση μεθόδων 75
4.5 Υπολογισμός EEDI για διαφορετικά DWT 75
4.6 Επίδραση Τραχύτητας 81
4.7 Υπολογισμός EEDI για ταυτόχρονη επίδραση καιρού και ρύπανσης 85
4.8 EEDI Overall 87
EEDI Capacity Effect 88
EEDI Slow Steaming Effect 88

EEDI Operational Effect 89
Αλλαγή Βήματος Έλικας και αύξηση του περιθωρίου στροφών LRM 89
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 91
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 93
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 95
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Αποτελέσματα τους προγράμματος Propulsion για κάθε τροποποιημένο δείκτη 95
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Διαδικασία υπολογισμού fw για κάθε sea state 100
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Υπολογισμός της αντίστασης σε ήρεμο νερό 103
B.S.R.A. 104
LAP-KELLER 106
FORMDATA 109
ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ-ΙΣΧΥΟΣ ΠΡΟΩΣΗΣ 111
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ: Υπολογισμοί για τα υπόλοιπα sea states για τον υπολογισμό του EEDIweather 113

Πίνακας 1:Συντελεστής μείωσης της τιμής αναφοράς X [3] 15
Πίνακας 2: Απαιτούμενος Δείκτης EEDI-Μείωση της τιμής αναφοράς ανάλογα με τη χρονική φάση [4] 16
Πίνακας 3: Συντελεστές a, b, c υπολογισμού γραμμής αναφοράς [3] 18
Πίνακας 4: Συντελεστής άνθρακα για διάφορα καύσιμα [6] 23
Πίνακας 5: Βασικά χαρακτηριστικά του υπό σχεδίαση πλοίου [14] 28
Πίνακας 6: Ειδική κατανάλωση καυσίμου (GTD) [15] 30
Πίνακας 7: Υπολογισμός EEDI του υπό σχεδίαση πλοίου 34
Πίνακας 8: Υπολογισμός γραμμής αναφοράς και απαιτούμενων EEDI 35
Πίνακας 9: Καθορισμός των δυσμενών συνθηκών [8] 36
Πίνακας 10: Παράμετροι για την ελάχιστη γραμμή αναφοράς [8] 37
Πίνακας 11: Υπολογισμοί 1ου επιπέδου ελέγχου 37
Πίνακας 12: Εκλογή ταχύτητας Vs 39
Πίνακας 13: Υπολογισμός αντίστασης σε ήρεμο νερό 41
Πίνακας 14: Υπολογισμός αντίστασης ανέμου 41
Πίνακας 15: Υπολογισμός αντίστασης σε κυματισμούς 43
Πίνακας 16: Έλεγχος εγκυρότητας STAWAVE-1 43
Πίνακας 17: Διαδικασία υπολογισμού Rwave 46
Πίνακας 18: Υπολογισμός t,w [13] 50
Πίνακας 19: Ζεύγη τιμών J, Kt στην κατάσταση λειτουργίας 51
Πίνακας 20: Ζεύγη τιμών J-Kt ελεύθερης ροής 52
Πίνακας 21:Έλεγχος ικανοποίησης 2ου επιπέδου ελέγχου 55

Πίνακας 22: EEDI για 25-50-75-100 % MCR 58
Πίνακας 23: EEDI για 65-70-80-85 % MCR 60
Πίνακας 24: EEDI για αυξημένη αντίσταση κατά χ και Vref=14 knots 63
Πίνακας 25: EEDI για αυξημένη αντίσταση κατά χ και PME=75% MCR 65
Πίνακας 26: Πιθανότητα εμφάνισης κάθε sea state (North Atlantic) [20] 66
Πίνακας 27: Δημιουργία sea state και mean Hs, Tp 67
Πίνακας 28: Πιθανότητα εμφάνισης κάθε sea state 67
Πίνακας 29: Αντίσταση σε ήρεμο νερό για τις διάφορες ταχύτητες 67
Πίνακας 30: Vw για κάθε mean Hs 68
Πίνακας 31: Υπολογισμός επιμέρους αντιστάσεων για τα sea states 1A,1B,1C 69
Πίνακας 32: Υπολογισμός EEDI North Atlantic 71
Πίνακας 33: Παράμετροι a, b για υπολογισμό standard fw [7] 72
Πίνακας 34: EEDI καιρού- Μέθοδος 2 73
Πίνακας 35: Υπολογισμός BHP για κάθε sea state 74
Πίνακας 36: Διαδικασία υπολογισμού EEDI καιρού- Μέθοδος 3 75
Πίνακας 37: Σύγκριση αποτελεσμάτων των 3 μεθόδων 75
Πίνακας 38: Υπολογισμός βυθίσματος για κάθε DWT 76
Πίνακας 39: Απόσπασμα Υδροστατικού Διαγράμματος [22] 76
Πίνακας 40: Υπολογισμός w,t,nR για κάθε κατάσταση φόρτωσης 77
Πίνακας 41: Υπολογισμός αντίστασης για τις 2 καταστάσεις φόρτωσης 78
Πίνακας 42: Υπολογισμός των EEDI για τις καταστάσεις φόρτωσης 80
Πίνακας 43: Υπολογισμός ολικής αντίστασης για τις 2 περιπτώσεις τραχύτητας 83
Πίνακας 44: Υπολογισμός των EEDI τραχύτητας 84
Πίνακας 45: Υπολογισμός EEDI για επίδραση καιρού και για διάφορες τιμές τραχύτητας γάστρας 86
Πίνακας 46: Υπολογισμός EEDI Capacity 88
Πίνακας 47:Υπολογισμός EEDI Slow Steaming 88
Πίνακας 48:Υπολογισμός EEDI Operational 89
Πίνακας 49:Επίδραση του LRM σε λειτουργίες του πλοίου [24] 91
Πίνακας 50: Υπολογισμός Ολικής αντίστασης και ισχύος BHP για το sea state 1B . 100
Πίνακας 51: Υπολογισμός Ολικής αντίστασης και ισχύος BHP για το sea state 1C . 101
Πίνακας 52: Υπολογισμός Ολικής αντίστασης και ισχύος BHP για το sea state 2A . 101
Πίνακας 53: Υπολογισμός Ολικής αντίστασης και ισχύος BHP για το sea state 2C . 102
Πίνακας 54: Χαρακτηριστικά υπό σχεδίαση πλοίου "MOZAMBICAN" [14] 103
Πίνακας 55:Αποτελέσματα B.S.R.A. 105
Πίνακας 56: Αποτελέσματα LAP-KELLER 108
Πίνακας 57: Στοιχεία FORMDATA 109
Πίνακας 58: Αποτελέσματα FORMDATA 110
Πίνακας 59: Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα των 3 μεθόδων 111
Πίνακας 60: Μέσος όρος αντίστασης και ισχύος από τις 3 μεθόδους 112
Πίνακας 61: Υπολογισμός επιμέρους αντιστάσεων για τα sea states 2A,2B,2C,3A,3B,3C 113

Εικόνα 1: Εκπομπές αερίων ρύπων από τα πλοία [2] 10
Εικόνα 2: Διάγραμμα Παραμέτρων EEDI και δημιουργίας τροποποιημένων δεικτών 26
Εικόνα 3: Πατρικό πλοίο MOZAMBICAN (Aveva Lines) 27
Εικόνα 4: Layout Diagram της επιλεγμένης μηχανής [14] 29
Εικόνα 5: Αρχική σελίδα Propulsion [27] 31
Εικόνα 6: Δεδομένα εισόδου εφαρμογής SHIPRES [27] 31
Εικόνα 7: Είσοδος της εφαρμογής PROPPERF [27] 32
Εικόνα 8: Συμπλήρωση δεδομένων της εφαρμογής [27] 33
Εικόνα 9: Αποτελέσματα Propulsion [27] 34
Εικόνα 10: Τραχύτητά επιφάνειας [12] 82
Εικόνα 11:Ποσοστά μείωσης του C02 από κάθε μέτρο [28] 92
Εικόνα 12: Αποτελέσματα Propulsion για Pme=25/50/100% MCR [27] 95
Εικόνα 13: Αποτελέσματα Propulsion για Pme=65/70/80/85% MCR [27] 96
Εικόνα 14: Αποτελέσματα Propulsion για ks=5.000/10.000 μm [27] 96
Εικόνα 15: Αποτελέσματα Propulsion για Vref=14 knots και χ=0,1/0,2/0,3/0,5 [27] 97
Εικόνα 16: Αποτελέσματα Propulsion για Pme=75% MCR και χ=0,1/0,2/0,3/0,5 [27] 98
Εικόνα 17: Αποτελέσματα Propulsion για DWT=75/50% [27] 98
Εικόνα 18: Αποτελέσματα Propulsion για κάθε sea state [27] 99

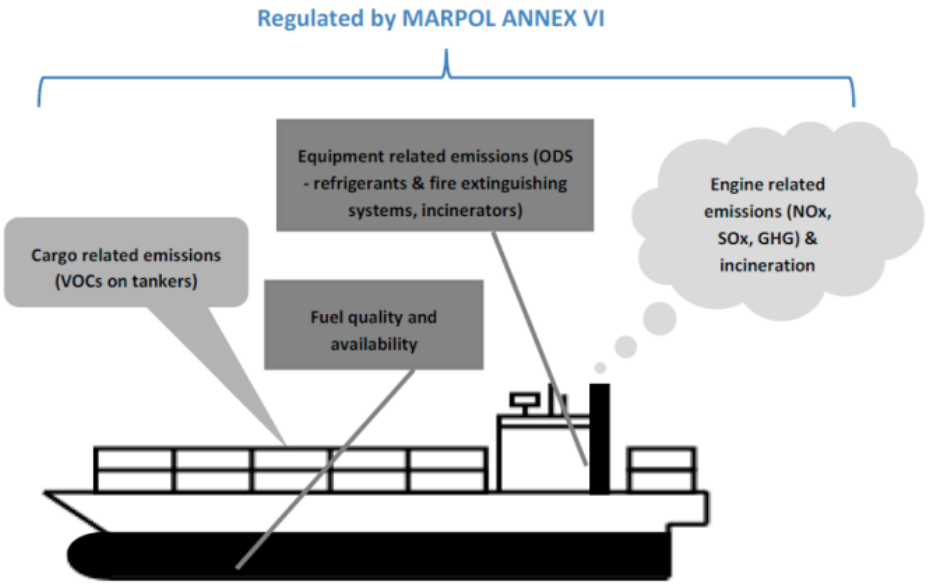
Σχήμα 1: Παράδειγμα συμμόρφωσης και μη συμμόρφωσης με τον απαιτούμενο EEDI [1] 14
Σχήμα 2:Διάγραμμα μείωσης της τιμής αναφοράς για κάθε χρονική φάση [2] 16
Σχήμα 3: Διαγράμματα γραμμής αναφοράς από ανάλυση πλοίων (HIS Fairplay)[5] 17
Σχήμα 4: Διαδικασία υπολογισμού Vref [2] 20
Σχήμα 5: Διαδικασία υπολογισμού fw [7] 21
Σχήμα 6 : Υπολογισμός fw για bulk carrier από καμπύλες ανάλυσης δεδομένων [7] 22
Σχήμα 7: Διάγραμμα ελεύθερης ροής έλικας WAGENIGEN B4-60 [17] 32
Σχήμα 8: Διάγραμμα ελάχιστης γραμμής αναφοράς [2] 37
Σχήμα 9: Επεξήγηση Lbwl [9] 42
Σχήμα 10: Επεξήγηση του LE [10] 44
Σχήμα 11: Διάγραμμα αδιαστατοποιημένης Rwave 46
Σχήμα 12: Διάγραμμα των φασμάτων JOHNSWAP για διάφορα sea states. 48
Σχήμα 13: Διάγραμμα της αδιάστατης Raw συναρτήσει της περιόδου κορυφής Tp 48
Σχήμα 14: Σύγκριση των 2 μεθόδων 49
Σχήμα 15: Kt-J λειτουργίας 52

Σχήμα 16: Kt-J έλικας σε ελεύθερη ροή 53
Σχήμα 17: Εύρεση σημείου λειτουργίας προπέλας για τους 4 κόμβους 53
Σχήμα 18: Εύρεση Kq..... 54
Σχήμα 19: Σημείο λειτουργίας Pmin,power στο Loading Diagram..... 56
Σχήμα 20: Σημεία λειτουργίας 25-50-75-100 % MCR στο Loading Diagram 59
Σχήμα 21: Σημεία λειτουργίας 65-70-80-85 % MCR στο Loading Diagram 61
Σχήμα 22: Ειδική κατανάλωση καυσίμου 61
Σχήμα 23: Σημεία λειτουργίας χ=0,1 χ=0,2 χ=0,3 και χ=0,5 (Vref=14 knots) στο Loading Diagram 64
Σχήμα 24: Σημεία λειτουργίας χ=0,1 χ=0,2 χ=0,3 και χ=0,5 (PME=75% MCR) στο Loading Diagram 65
Σχήμα 25 : Διαγράμματα των επιμέρους αντιστάσεων για τα sea states 1A,1B,1C .. 70
Σχήμα 26: Σημεία λειτουργίας των 5 sea states στο Loading Diagram 72
Σχήμα 27: BHP-Vs (Sea State 1A) 74
Σχήμα 28: Διάγραμμα αντίστασης-ταχύτητας για τις 2 καταστάσεις φόρτωσης 79
Σχήμα 29: Σημεία λειτουργίας των καταστάσεων φόρτωσης στο Loading Diagram . 81
Σχήμα 30: Σύγκριση Ρολ,clean-Ρολ,ks=5000-Ρολ,ks==10000 83
Σχήμα 31: Σημεία λειτουργίας των περιπτώσεων τραχύτητας στο Loading Diagram 85
Σχήμα 32: Σημεία λειτουργίας των παραπάνω περιπτώσεων στο Loading Diagram 87
Σχήμα 33: Επεξήγηση του LRM [24]..... 90
Σχήμα 34: Διάγραμμα BHP-Vs για το sea state 1B 100
Σχήμα 35: Διάγραμμα BHP-Vs για το sea state 1C 101
Σχήμα 36: Διάγραμμα BHP-Vs για το sea state 2A 102
Σχήμα 37: Διάγραμμα BHP-Vs για το sea state 2C 103
Σχήμα 38: Ολική Αντίσταση κατά B.S.R.A. 106
Σχήμα 39: Ισχύς Ρυμούλκησης κατά B.S.R.A. 106
Σχήμα 40: Ολική Αντίσταση κατά LAP-KELLER 108
Σχήμα 41: Ισχύς Ρυμούλκησης κατά LAP-KELLER 109
Σχήμα 42: Ολική Αντίσταση κατά FORMDATA 110
Σχήμα 43: Ισχύς Ρυμούλκησης κατά FORMDATA..... 111
Σχήμα 44: Διάγραμμα Αντίστασης (3 μέθοδοι και μέσος όρος) 112
Σχήμα 45: Διάγραμμα Ισχύος Ρυμούλκησης (3 μέθοδοι και μέσος όρος) 112
Σχήμα 46: Διαγράμματα των επιμέρους αντιστάσεων για τα sea states2,2B,2C,3A,3B,3C 115

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Πλαίσιο του IMO για την ενεργειακή αποδοτικότητα των πλοίων

Ο IMO έχει αναπτύξει ένα κανονιστικό πλαίσιο για τον έλεγχο της ενεργειακής αποδοτικότητας των πλοίων με στόχο τον αποτελεσματικότερο έλεγχο των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου. Αυτό το κανονιστικό πλαίσιο για τους αέριους ρύπους έχει υιοθετηθεί κατά βάση μέσω της Διεθνούς Σύμβασης για την Προστασία του Περιβάλλοντος (MARPOL), στο Annex VI. [1]



Εικόνα 1: Εκπομπές αερίων ρύπων από τα πλοία [2]

Το πλαίσιο περιλαμβάνει, ανάλογα με την φάση εξέτασης και το αν καθίσταται υποχρεωτικό ή όχι, τα παρακάτω:

- EEDI: Energy Efficiency Design Index (σχεδίαση, υποχρεωτικό)
- SEEMP: Ship Energy Efficiency Management Plan (υποχρεωτικό)
- EEOI: Energy Efficiency Operational Indicator (λειτουργία, εθελοντικό)
- IMO DCS: Data collection system (λειτουργία, υποχρεωτικό)

Στόχος του IMO είναι μέσω αυτών των μέτρων να μειωθούν οι ετήσιες εκπομπές ρύπων τουλάχιστον κατά 50% μέχρι το 2050, συγκριτικά με τους ρύπους του 2008.

Η στρατηγική για να επιτύχει αυτούς τους στόχους περιλαμβάνει βραχυπρόθεσμα μέτρα που θα προσδιοριστούν και θα εφαρμοστούν έως το 2023, με μέτρα που θα συμφωνηθούν στην περίοδο 2023-2030 και με μακροπρόθεσμα μέτρα που θα οριστικοποιηθούν και θα τεθούν σε ισχύ μετά το 2030. [1]

Στην 3η μελέτη του IMO για το αέρια του θερμοκηπίου, εξετάστηκαν όλα τα σενάρια για τις εκπομπές ρύπων από τα πλοία μέχρι το 2050. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι στην πιο αισιόδοξη περίπτωση, οι εκπομπές το 2050 θα βρίσκονται στα ίδια επίπεδο με τα τωρινά και στο χειρότερο σενάριο θα είναι 3,5 φορές περισσότερα. Αυτά τα σενάρια έρχονται σε αντίθεση με τις ανάγκες που επικρατούν ώστε να μετριαστεί η κλιματική αλλαγή. Για να επιτευχθεί ο στόχος, οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από την ναυτιλία πρέπει να μειωθούν κατά 75-85% μέχρι και το 2050. Αυτό μεταφράζεται σε μετάβαση από τα 20 γραμμάρια ανά τόνο ανά μίλι στο επίπεδο των 4 γραμμαρίων ανά τόνο ανά μίλι.

Ο IMO εξέτασε τον επιτευχθεί δείκτη EEDI για πλοία που παραδόθηκαν από το 2013 και έπειτα και διαπίστωσε ότι αυτά τα πλοία εκπέμπουν κατά μέσο όρο 20% λιγότερο διοξείδιο του άνθρακα CO2 από τα πλοία που είχαν χτιστεί την προηγούμενη περίοδο αναφοράς (1998-2008). Για αυτό και στην 73η MEPC τον Οκτώβρη του 2018 συμφωνήθηκε ότι τα όρια εκπομπών που έχουν θεσπιστεί για την 3η φάση του EEDI (30% μείωση από το 2025) είναι εφικτά. [19]

Η παρούσα εργασία θα επικεντρωθεί στον δείκτη EEDI, στην αδιαμφισβήτητη σημασία του ως ένα πρωταρχικό μέσο ανάδειξης της ενεργειακής αποδοτικότητας κάθε πλοίου και στην ανάγκη δημιουργίας τροποποιημένων δεικτών του ώστε να υπάρχει μια πιο ρεαλιστική εικόνας της ενεργειακής κατάστασης.

1.2 EEDI

Η ανάγκη δημιουργίας νέων μέτρων ώστε να μειωθούν οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από τα πλοία, οδήγησε τον IMO στην υιοθέτηση ενός σχεδιαστικού δείκτη που θα είχε εφαρμογή στα νεότευκτα πλοία και θα υπολογίζει πόσο CO_2 εκπέμπει το συγκεκριμένο πλοίο ανά μονάδα μεταφορικού έργου (τόνο-μίλι). Η σκέψη πίσω από αυτό ήταν να εκφραστεί η αναλογία μεταξύ του κόστους για την κοινωνία, δηλ. **εκπομπή CO_2** και του οφέλους ως προς την κοινωνία, δηλ. **μεταφορικό έργο**. Οι εκπομπές CO_2 θεωρείται ότι προέρχονται από τις κύριες μηχανές και από τις βοηθητικές μηχανές (δευτερεύουσες), μετά την αφαίρεση των εκπομπών που αναλογούν στην ισχύ που προσφέρεται από τη χρήση αντίστοιχων καινοτόμων τεχνολογιών. Το κέρδος που παράγεται θεωρείται ότι αποτελείται από το μεταφερόμενο φορτίο επί την ταχύτητα του πλοίου, το οποίο εκφράζεται ως ικανότητα μεταφοράς αγαθών, από τη λειτουργία του πλοίου.

$$EEDI = \frac{CO2\ emmited\ (in\ grams)}{Deadweight\ (in\ tons) * Distance\ travelled\ (in\ nautical\ miles)}$$

Εξίσωση 1: Απλοποιημένος τύπος EEDI

Ο δείκτης αυτός, ο οποίος είναι γνωστός με το αγγλικό ακρωνύμιο EEDI (Energy Efficiency Design Index) αποτελεί το πιο σημαντικό τεχνικό μέτρο που έχει ληφθεί έως τώρα για τη μείωση των εκπομπών και στοχεύει στη χρήση πιο ενεργειακά αποδοτικού εξοπλισμού και μηχανών, που θα είναι και λιγότερο ρυπογόνα για το περιβάλλον. Στόχος του δείκτη αποτελεί η επίτευξη πιο ενεργειακά αποδοτικών προσαρμογών για τα νέα πλοία, τεχνικά εφικτών και φιλικών προς το περιβάλλον και η παρακίνηση όσων σχετίζονται με τον κλάδο στην μελέτη του συγκεκριμένου τομέα.

Ο EEDI σκοπεύει ειδικότερα στις παρακάτω ενέργειες:

- Να απαιτήσει ένα ελάχιστο επίπεδο ενεργειακής αποδοτικότητας από τα πλοία, ανάλογα τον τύπο και το μέγεθος αυτών.
- Να αυξήσει την ενεργειακή αποδοτικότητα των πλοίων σταδιακά τις επόμενες δεκαετίες.
- Να παρακινήσει για συνεχόμενη τεχνολογική ανάπτυξη σε όλους τους παράγοντες, που επηρεάζουν την αποδοτικότητα ενός πλοίου.
- Να διαχωρίσει τα τεχνικά και τα σχεδιαστικά μέτρα από τα επιχειρησιακά και εμπορικά μέτρα.
- Να κάνει δυνατή μια σύγκριση της ενεργειακής αποδοτικότητας μεταξύ μεμονωμένων πλοίων του ιδίου μεγέθους, τα οποία μπορούν να μεταφέρουν το ίδιο φορτίο.

Σύμφωνα με την MEPC.203(62) [3] ,ο Επιτευχθείς EEDI θα υπολογίζεται για:

- κάθε νέο σκάφος
- κάθε νέο σκάφος, το υπέστη σημαντική μετατροπή
- κάθε νέο ή υφιστάμενο πλοίο, το οποίο υπέστη σημαντική μετατροπή, η οποία είναι τόσο εκτεταμένη, ώστε το πλοίο να θεωρείται από την αρχή ως νεοκατασκευαζόμενο πλοίο.

«Σημαντική μετατροπή» ενός πλοίου σημαίνει καθένα από τα παρακάτω ή και συνδυασμό:

- μεταβάλλει ουσιωδώς τις διαστάσεις, τη μεταφορική ικανότητα ,την ισχύ των μηχανών του πλοίου.
- αλλάζει τον τύπο του πλοίου.
- σκοπεύει ουσιαστικά να παρατείνει τη διάρκεια ζωής του πλοίου.

- αλλάζει το πλοίο έτσι ώστε, αν ήταν ένα νέο πλοίο, θα υπόκειται στις σχετικές διατάξεις της παρούσας απαίτησης, οι οποίες δεν εφαρμόζονται σε αυτό, ως υπάρχον πλοίο.
- αλλοιώνει σημαντικά την ενεργειακή απόδοση του πλοίου και περιλαμβάνει τις τυχόν τροποποιήσεις, που θα μπορούσαν να προκαλέσουν το πλοίο να υπερβεί τον αντίστοιχο απαιτούμενο EEDI.

Ο ανωτέρω υπολογισμός αφορά τις παρακάτω κατηγορίες πλοίων (Κανονισμός 20 της MARPOL Annex VI με 400 GT και πάνω) [1]:

- Bulk Carriers (Φορτίου Χύδην)
- Tankers (Δεξαμενόπλοια)
- Gas Carriers (Δεξαμενόπλοια Αερίου)
- LNG Carriers (Πλοία μεταφοράς LNG)
- Container Ships (Εμπορευματοκιβωτίων)
- General Cargo Ships (Γενικού Φορτίου)
- Refrigerated Cargo Ships (Μεταφοράς Κατεψυγμένου Φορτίου)
- Combination Carriers (Συνδυασμένων Μεταφορών)
- Ro-Ro Cargo Ships (μεταφοράς οχημάτων)
- Ro-Ro Cargo
- Ro-Ro Passenger Ships (Επιβατηγά πλοία)
- Cruise Passenger Ships (Κρουαζιερόπλοια)

Ο EEDI δεν θα πρέπει να εφαρμόζεται σε όλα τα πλοία. Πράγματι, δεν μπορεί να είναι κατάλληλο για όλους τους τύπους πλοίων (κυρίως εκείνων που δεν έχουν σχεδιαστεί για τη μεταφορά φορτίων) ή για όλους τους τύπους των συστημάτων πρόωσης (π.χ. για τα πλοία με ντίζελ-ηλεκτρικές, τουρμπίνα ή υβριδικά συστήματα πρόωσης) και θα απαιτούνται επιπλέον συντελεστές διόρθωσης.

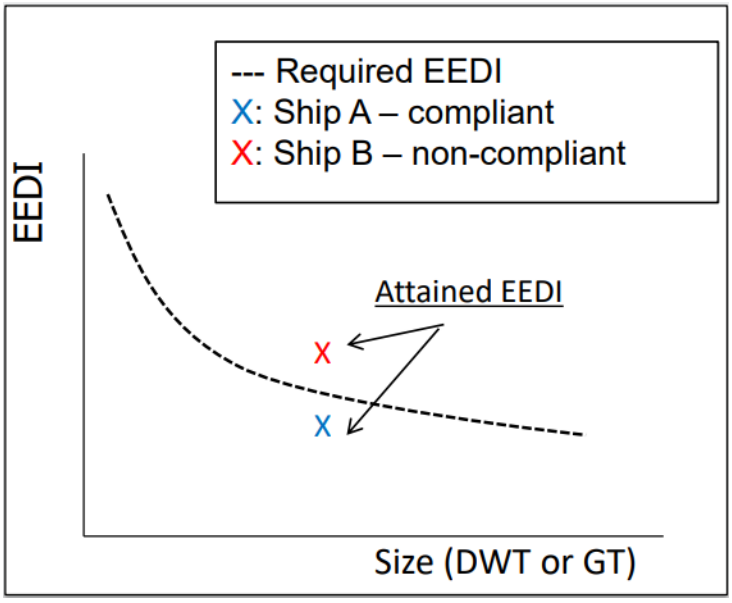
1.3 Υπολογισμός EEDI

Ο **απαιτούμενος EEDI** αποτελεί το άνω όριο στη τιμή του EEDI που δεν πρέπει να ξεπεραστεί και εξαρτάται από τον τύπο του πλοίου, την χωρητικότητα του και την χρονική φάση της μελέτης.

Ο **επιτευχθείς EEDI** αναλύεται στη συνέχεια και η τιμή του δεν θα πρέπει να ξεπερνάει αυτή του απαιτούμενου EEDI.

Δηλαδή πρέπει: **Επιτευχθείς (attained) EEDI≤ Απαιτούμενος (required) EEDI**

Όπως είναι φανερό και από το παράδειγμα στο Σχήμα 1, το πλοίο Α έχει τιμή του επιτευχθεί δείκτη κάτω από την καμπύλη τιμής του απαιτούμενου EEDI και είναι συμβατό με τους κανονισμούς. Αντίθετα το πλοίο Β, δεν ικανοποιεί τον κανονισμό και θα πρέπει να προβεί σε αλλαγές που στοχεύουν στην ενεργειακή απόδοση του πλοίου, ώστε να μειωθεί ο επιτευχθείς δείκτης μέχρι την απαιτούμενη τιμή.



Σχήμα 1: Παράδειγμα συμμόρφωσης και μη συμμόρφωσης με τον απαιτούμενο EEDI [1]

1.3.1 Απαιτούμενος (Required) EEDI

$$Απαιτούμενος\ EEDI = \frac{1 - X}{100} * Τιμή\ EEDI\ Αναφοράς$$

Εξίσωση 2: Απαιτούμενος EEDI

Όπου X είναι ένας συντελεστής μείωσης της τιμής αναφοράς και προκύπτει από τον τύπο πλοίου και τη χρονική φάση σύμφωνα με τον Πίνακα 1:

Πίνακας 1:Συντελεστής μείωσης της τιμής αναφοράς X [3]

Ship Type	Size	Phase 0 1 Jan 2013 – 31 Dec 2014	Phase 1 1 Jan 2015 – 31 Dec 2019	Phase 2 1 Jan 2020 – 31 Dec 2024	Phase 3 1 Jan 2025 and onwards
Bulk carrier	20,000 DWT and above	0	10	20	30
	10,000 – 20,000 DWT	n/a	0-10*	0-20*	0-30*
Gas carrier	10,000 DWT and above	0	10	20	30
	2,000 – 10,000 DWT	n/a	0-10*	0-20*	0-30*
Tanker	20,000 DWT and above	0	10	20	30
	4,000 – 20,000 DWT	n/a	0-10*	0-20*	0-30*
Container ship	15,000 DWT and above	0	10	20	30
	10,000 – 15,000 DWT	n/a	0-10*	0-20*	0-30*
General Cargo ships	15,000 DWT and above	0	10	15	30
	3,000 – 15,000 DWT	n/a	0-10*	0-15*	0-30*
Refrigerated cargo carrier	5,000 DWT and above	0	10	15	30
	3,000 – 5,000 DWT	n/a	0-10*	0-15*	0-30*
Combination carrier	20,000 DWT and above	0	10	20	30
	4,000 – 20,000 DWT	n/a	0-10*	0-20*	0-30*
LNG carrier***	10,000 DWT and above	n/a	10**	20	30
Ro-ro cargo ship (vehicle carrier)***	10,000 DWT and above	n/a	5**	15	30
Ro-ro cargo ship***	2,000 DWT and above	n/a	5**	20	30
	1,000 – 2,000 DWT	n/a	0-5*,**	0-20*	0-30*
Ro-ro passenger ship***	1000 DWT and above	n/a	5**	20	30
	250 – 1,000 DWT	n/a	0-5*,**	0-20*	0-30*
Cruise passenger ship*** having non-conventional propulsion	85,000 GT and above	n/a	5**	20	30
	25,000 – 85,000 GT	n/a	0-5*,**	0-20*	0-30*

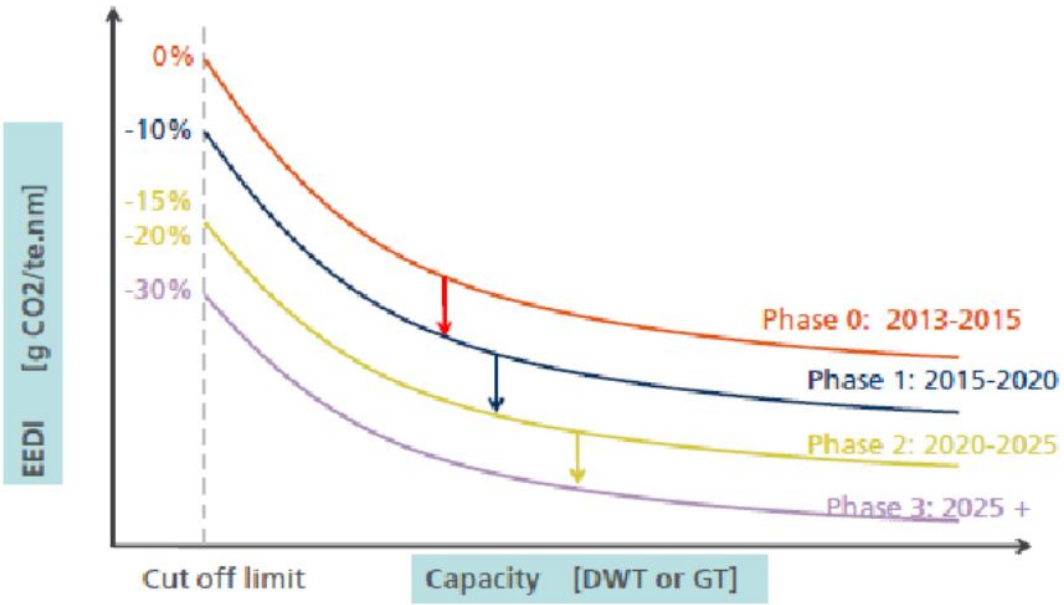
Ο κανονισμός για τον EEDI εφαρμόστηκε για πρώτη φορά στα πλοία που παραγγέλθηκαν την 1η Ιανουαρίου 2013 και έπειτα και αφορά πλοία με μέγεθος 400 GT και άνω [3].

Η πρώτη περίοδος των δύο ετών μετά από αυτή την ημερομηνία ορίζεται ως φάση μηδέν και τα πλοία που έχουν ναυπηγηθεί το διάστημα 1/1/2013-31/12/2014 θα πρέπει να επιτύχουν EEDI χαμηλότερο ή ίσο με την τιμή γραμμής αναφοράς που αντιστοιχεί στον τύπο του πλοίου και έχει οριστεί και υπολογιστεί σύμφωνα με τις οδηγίες του IMO όπως προβλέπεται στο σχετικό κανονισμό (Resolution MEPC.203(62)).

Η επόμενη φάση που ξεκινά από την 1/1/2015 και μέχρι 31/12/2019 θέτει νέο στόχο μείωσης 10% για τα επίπεδα CO_2 σε σχέση με την προηγούμενη τιμή αναφοράς και αντίστοιχα ακολουθούν ποσοστά μείωσης 20% για την επόμενη πενταετία έως το 2025 και μείωση 30% από το 2025 και μετά συγκριτικά με την αρχική γραμμή αναφοράς (Πίνακας 2, Σχήμα 2).

Πίνακας 2: Απαιτούμενος Δείκτης EEDI-Μείωση της τιμής αναφοράς ανάλογα με τη χρονική φάση [4]

Φάση	Περίοδος	Συντελεστής Μείωσης
Φάση 0	2013-2015	0%
Φάση 1	2015-2020	10%
Φάση 2	2020-2025	20%
Φάση 3	2025 και έπειτα	30%



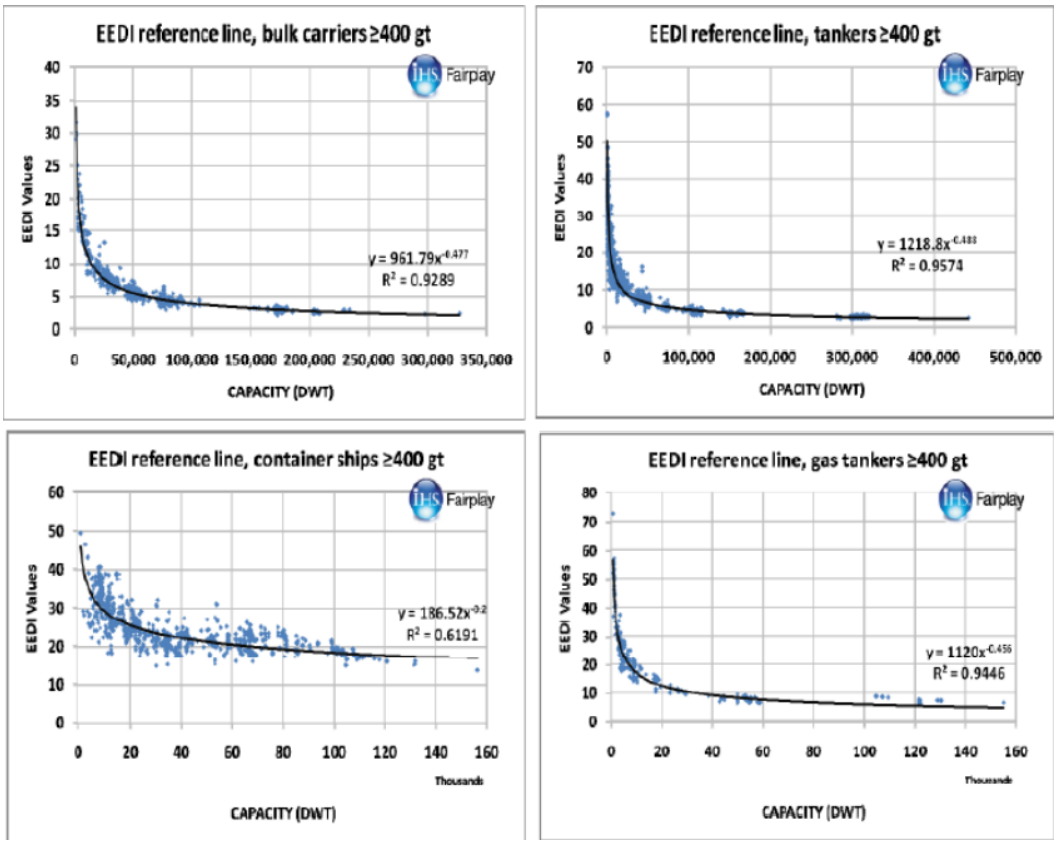
Σχήμα 2:Διάγραμμα μείωσης της τιμής αναφοράς για κάθε χρονική φάση [2]

Τα πλοία με χωρητικότητα μικρότερη των παρακάτω ορίων δεν είναι για την ώρα υποχρεωμένα να υπακούσουν στους κανονισμούς αναφορικά με τον EEDI.

<u>Όρια Χωρητικότητας(Cut off limit)</u>

- Bulk Carriers: 10.000 DWT
- Gas Carriers: 2.000 DWT
- Tankers: 4.000 DWT
- Containerships: 10.000 DWT
- General Cargo: 3.000 DWT

Η Τιμή αναφοράς προκύπτει χρησιμοποιώντας τη γραμμή αναφοράς που αντιστοιχεί στον τύπο του πλοίου και την χωρητικότητά του και προκύπτει από τα παρακάτω διαγράμματα από την ανάλυση πλοίων και την βάση δεδομένων του HIS Fairplay (Σχήμα 3).



Σχήμα 3: Διαγράμματα γραμμής αναφοράς από ανάλυση πλοίων (HIS Fairplay)[5]

Υπολογιστικά ,ισοδύναμα, με τη βοήθεια του Πίνακα 3 μπορεί να υπολογιστεί η γραμμή αναφοράς ως εξής:

Γραμμή αναφοράς= a*b^{-c} ,όπου οι τιμές για τα a,b,c προκύπτουν σύμφωνα με τα ακόλουθα:

Πίνακας 3: Συντελεστές a, b, c υπολογισμού γραμμής αναφοράς [3]

Ship type defined in regulation 2		a	b	c
2.25	Bulk carrier	961.79	DWT of the ship	0.477
2.26	Gas carrier	1120.00	DWT of the ship	0.456
2.27	Tanker	1218.80	DWT of the ship	0.488
2.28	Container ship	174.22	DWT of the ship	0.201
2.29	General cargo ship	107.48	DWT of the ship	0.216
2.30	Refrigerated cargo carrier	227.01	DWT of the ship	0.244
2.31	Combination carrier	1219.00	DWT of the ship	0.488
2.33	Ro-ro cargo ship (vehicle carrier)	$(DWT/GT)^{-0.7} \cdot 780.36$ where DWT/GT<0.3	DWT of the ship	0.471
		1812.63 where DWT/GT≥0.3		
2.34	Ro-ro cargo ship	1405.15	DWT of the ship	0.498
2.35	Ro-ro passenger ship	752.16	DWT of the ship	0.381
2.38	LNG carrier	2253.7	DWT of the ship	0.474
2.39	Cruise passenger ship having non-conventional propulsion	170.84	GT of the ship	0.214

Με βάση τα όσα αναφέρθηκαν , υπολογίζεται ο απαιτούμενος EEDI. Ο επιτευχθείς EEDI πρέπει να είναι μικρότερος από τη τιμή αυτή ώστε το πλοίο να συμμορφώνεται στους κανονισμούς εκπομπής αέριων ρύπων.

1.3.2 Επιτευχθείς (attained) EEDI

Ο αναλυτικός τελικός τύπος για τον υπολογισμό του επιτευχθεί σχεδιαστικού δείκτη ενεργειακής αποδοτικότητας δίνεται από την Εξίσωση 3 (Τα Boilers εξαιρούνται από τον υπολογισμό του EEDI):

Main Engine(s) | Aux Engine(s) | Innovative Energy Eff. Power Gen. Technologies | Innovative Energy Eff. Propulsion

$$\text{EEDI} = \frac{\left(\prod_{j=1}^{M} f_j\right)\left(\sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)}\right) + \left(P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE}^{*}\right) + \left(\left(\prod_{j=1}^{M} f_j \cdot \sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{AEeff(i)}\right) C_{FAE} \cdot SFC_{AE}\right) - \left(\sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{eff(i)} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME}\right)}{f_c \cdot f_i \cdot Capacity \cdot V_{ref} \cdot f_w}$$

[gCO2/(tonne.nm)]

Εξίσωση 3: Αναλυτικός τύπος υπολογισμού EEDI [6]

Πιο αναλυτικά, στον παρονομαστή υπάρχουν τα εξής μεγέθη:

- **Vref** : είναι η ταχύτητα του πλοίου, μετρούμενη σε ναυτικά μίλια ανά ώρα (knot), η οποία επιτυγχάνεται στην ισχύ πρόωσης P_{ME} , σε συνθήκες ήρεμης θάλασσας (χωρίς κύμα και αέρα) σε βαθύ νερό για το βύθισμα θέρους.

<u>Διαδικασία υπολογισμού Vref</u>

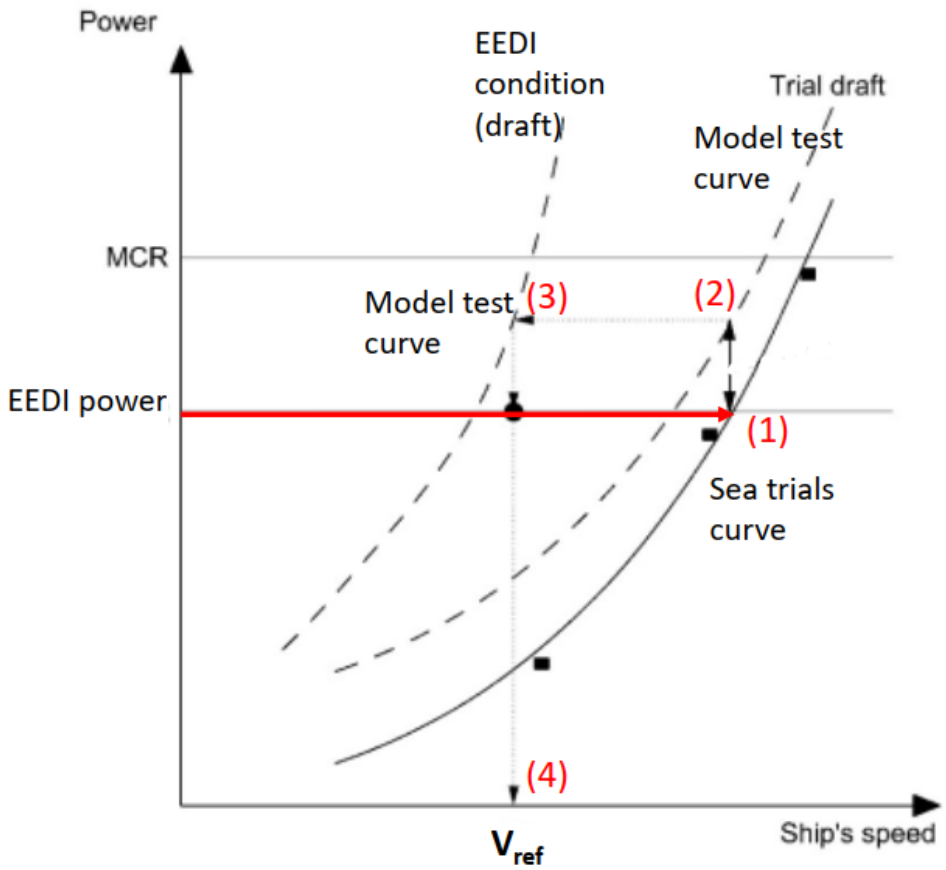
Η μέτρηση της Vref γίνεται κατά την διάρκεια δοκιμών παραλαβής (sea trials) σε συνθήκες που αντιστοιχούν σε βαθύ νερό, ήρεμη θάλασσα χωρίς άνεμο και κύματα και κατάσταση φόρτωσης που αντιστοιχεί στη χωρητικότητα DWT. Συνήθως όμως οι δοκιμές παραλαβής δεν πραγματοποιούνται στο βύθισμα που αντιστοιχεί στην κατάσταση φόρτωσης EEDI, αλλά σε μια άλλη κατάσταση φόρτωσης, κυρίως στην κατάσταση ερματισμού (trial condition).

Για αυτόν τον λόγο χρειάζεται μετατροπή λαμβάνοντας υπόψη επιπλέον τις καμπύλες ισχύος-ταχύτητας σε δοκιμές υπό κλίμακα στη δεξαμενή (tank test). Οι δοκιμές στη δεξαμενή θα πρέπει να γίνουν και για τα 2 βυθίσματα (trial condition και EEDI condition)

Έτσι η καμπύλη ισχύος-ταχύτητας στο βύθισμα στην κατάσταση EEDI, θα προκύψει με χρήση των προηγούμενων αποτελεσμάτων.

Η παραπάνω διαδικασία περιγράφεται στο Σχήμα 4 στο οποίο έχουν χαραχθεί και οι απαιτούμενες καμπύλες από το sea trial και τα πειράματα επί προτύπου.

1. Για την ισχύ στο 75% MCR που αναφέρεται ο EEDI (EEDI power), αντιστοιχεί μία ταχύτητα για την καμπύλη των sea trials.
2. Σε αυτή την ταχύτητα, αντιστοιχεί μία νέα ισχύς για την καμπύλη model trial.
3. Για την νέα αυτή ισχύ, βρίσκουμε την ταχύτητα που αντιστοιχεί στην καμπύλη model EEDI condition. Αυτή είναι η ταχύτητα Vref.



Σχήμα 4: Διαδικασία υπολογισμού Vref [2]

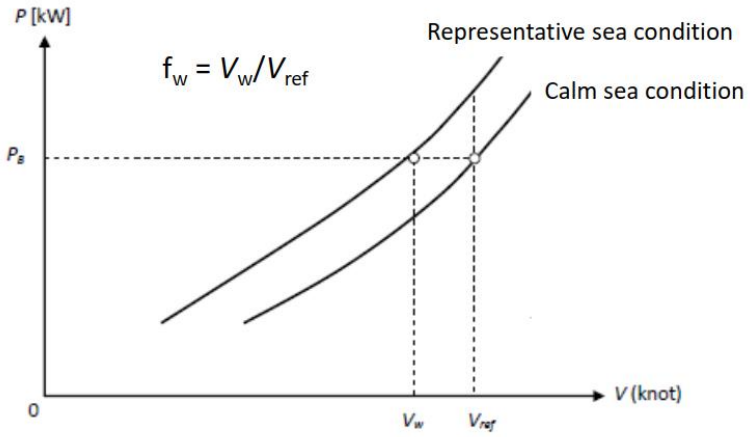
- **Capacity** (χωρητικότητα), η οποία ορίζεται ως ακολούθως:

1. Για bulk carriers, tankers, gas carriers, LNG carriers, Ro-Ro cargo ships (Οχηματαγωγά), Ro-Ro cargo ships, Ro-Ro passenger ships, general cargo ships, Refrigerated cargo carriers, το προσθετό βάρος (DWT) χρησιμοποιείται ως Capacity.
2. Για επιβατηγά πλοία και κρουαζιερόπλοια, η ολική χωρητικότητα (gross tonnage) χρησιμοποιείται ως Capacity, σύμφωνα με την Διεθνή Συνθήκη Μέτρησης Ολικής Χωρητικότητας Πλοίων του 1969, Παράρτημα Ι, κανονισμός 3.
3. Για τα containership (πλοία μεταφοράς τυποποιημένων εμπορευματοκιβώτιων) η παράμετρος Capacity θα λαμβάνεται ως το 70% του πρόσθετου βάρους (DWT).

- **fw** : Διορθωτικός αδιάστατος συντελεστής για τη μείωση της ταχύτητας του πλοίου υπό την επίδραση αντιπροσωπευτικών καταστάσεων θάλασσας. Για τον υπολογισμό του κλασικού δείκτη EEDI, fw = 1.0.
  Μπορεί να υπολογιστεί ο δείκτης $EEDI_{weather}$, ο οποίος αντιστοιχεί σε κατάσταση θάλασσας που περιγράφεται από το σημαντικό ύψος κύματος, τη μέση περίοδο και διεύθυνση κύματος, μέση ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου και τότε fw<1. Σε αυτήν την περίπτωση ο συντελεστής fw

υπολογίζεται με βάση τη διαδικασία που περιγράφεται στο MEPC.1/Circ.796 και στο Σχήμα 5.

<u>Διαδικασία υπολογισμού fw</u>



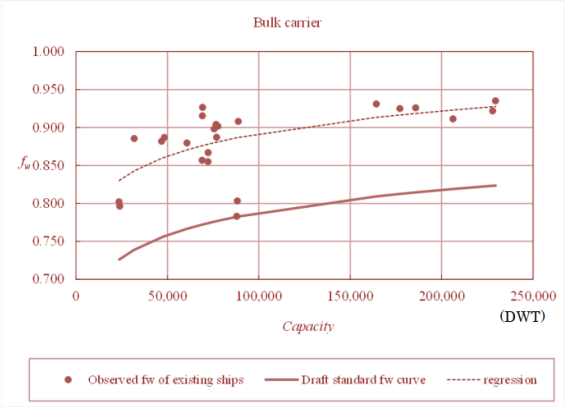
Σχήμα 5: Διαδικασία υπολογισμού fw [7]

Υπολογίζεται η συνολική αντίσταση πρόωσης (R_{Tw}),η οποία αποτελείται από την πρόσθετη αντίσταση σε κυματισμούς (Δ_{Rwave}) και άνεμο (Δ_{Rwind}), και από την συνολική αντίσταση (R_T) σε ήρεμο νερό. Στην συνέχεια, υπολογίζεται η νέα καμπύλη ισχύος-ταχύτητας για την αντιπροσωπευτική κατάσταση θάλασσας και ανέμου. Τέλος, υπολογίζεται η ταχύτητα Vw που επιτυγχάνεται όταν η ισχύς ισούται με P_B (75%MCR). Με αυτόν τον τρόπο υπολογίζεται ο συντελεστής fw σύμφωνα με τον τύπο του σχήματος 5.

Εναλλακτικά, υπάρχουν δεδομένα από καμπύλες ανάλυσης δεδομένων από υπαρκτά πλοία για τη μείωση της ταχύτητάς σε αντίστοιχες καιρικές συνθήκες (Σχήμα 6). Οι συντελεστές των καμπυλών έχουν προκύψει από την ανάλυση παλινδρόμησης και έχουν την εξής μορφή:

Standard fw = a*ln(capacity) + b

Εξίσωση 4: συντελεστής καιρού από καμπύλες ανάλυσης δεδομένων [7]



$f_w = 0.0429\ln(Capacity)+0.294$

Σχήμα 6 : Υπολογισμός fw για bulk carrier από καμπύλες ανάλυσης δεδομένων [7]

- **fi** : Διορθωτικός συντελεστής για τη χωρητικότητα για τα πλοία με τεχνικά/ κανονιστικά χαρακτηριστικά τα οποία επηρεάζουν τη χωρητικότητα. Πλοία με κλάση “ice-class” θα έχουν μικρότερη χωρητικότητα από πλοία ίδιου μεγέθους και τύπου χωρίς “ice-class” κλάση και θα πρέπει να διορθωθούν με τον συντελεστή fi. Επίσης τα bulk-carriers και τα oil-tankers που κατασκευάζονται σύμφωνα με τους Κοινούς Κατασκευαστικούς Κανονισμούς (Common Structural Rules) [26] ή πλοία που εθελοντικά σχεδιάζονται με ενισχυμένη αντοχή θα πρέπει να διαφοροποιηθούν.

- **fc** : Διορθωτικός συντελεστής για τη χωρητικότητα των πλοίων για τύπους φορτίου που επηρεάζουν τη σχέση deadweight-χωρητικότητα (π.χ. LNG, Chemical Tankers, Ro-Ro).

Και στον αριθμητή:

- **CF_{AE}**: Συντελεστής άνθρακα για καύσιμο στις βοηθητικές μηχανές [gCO_2/gfuel]
- **CF_{ME}**: Συντελεστής άνθρακα για καύσιμο στις κύριες μηχανές [gCO_2/gfuel]

Η ποσότητα του CO_2 που παράγεται από την καύση μοναδιαίας ποσότητας καυσίμου προσδιορίζεται μέσω αυτού του συντελεστή και οι αριθμητικές τιμές του λαμβάνονται μέσω του Πίνακα 4.

Πίνακας 4: Συντελεστής άνθρακα για διάφορα καύσιμα [6]

Type of fuel	Reference	Carbon content	C_F (t-CO_2/t-Fuel)
1 Diesel/Gas Oil	ISO 8217 Grades DMX through DMB	0.8744	3.206
2 Light Fuel Oil (LFO)	ISO 8217 Grades RMA through RMD	0.8594	3.151
3 Heavy Fuel Oil (HFO)	ISO 8217 Grades RME through RMK	0.8493	3.114
4 Liquefied Petroleum Gas (LPG)	Propane	0.8182	3.000
	Butane	0.8264	3.030
5 Liquefied Natural Gas (LNG)		0.7500	2.750
6 Methanol		0.3750	1.375
7 Ethanol		0.5217	1.913

- **SFC_{AE}**: Ειδική κατανάλωση καυσίμου για τις βοηθητικές μηχανές [g/kWh]
- **SFC_{ME}**: Ειδική κατανάλωση καυσίμου για τις κύριες μηχανές [g/kWh]

Τα SFC αντιπροσωπεύουν την αποδοτικότητα του καυσίμου (fuel efficiency) των μηχανών, υπολογίζονται από τις δοκιμές της μηχανής (shop tests) και αναφέρονται στο πιστοποιητικό NOx της κάθε μηχανής.

Για την κύρια μηχανή υπολογίζεται στο 75% του φορτίου, ενώ για τις βοηθητικές στο 50% του φορτίου. Χρησιμοποιείται ο ίδιος τύπος καυσίμου που έχει ληφθεί υπόψη στο πιστοποιητικό NOx, δηλαδή θα πρέπει να υπάρχει συμβατότητα μεταξύ SFC και CF.

Για τις μηχανές που δεν αναφέρουν συγκεκριμένες τιμές της ειδικής κατανάλωσης στο πιστοποιητικό NOx, η τιμή μπορεί να ληφθεί προσεγγιστικά ως εξής:
SFC_{ME} = 190 [g/kWh], για τις κύριες μηχανές
SFC_{AE} = 215 [g/kWh], για τις βοηθητικές μηχανές

- **P_{ME}**: Ισχύς πρόωσης στο 75% του MCR, λαμβάνοντας υπόψη την ύπαρξη shaft motor ή γεννήτρια άξονα [kW]

- **P_{AE}**: Απαιτήσεις σε βοηθητική ισχύ σε κανονικές συνθήκες πλεύσης[kW]

1. Για πλοία με ισχύ πρόωσης μεγαλύτερη των 10.000 kW:

$$P_{AE}\ (\Sigma MCR_{ME(i)} \geq 10.000\ kW) = \left(0{,}025 * \left(\sum_{i=1}^{nME} MCRme(i) + \frac{\sum_{i=1}^{nPTi} Ppti(i)}{0{,}75}\right)\right) + 250$$

Εξίσωση 5: P_{AE} για ΣMCR>10.000 kW[6]

2. Για πλοία με ισχύ πρόωσης μικρότερη των 10.000 kW:

$$P_{AE}\ (\Sigma MCR_{ME(i)} < 10.000\ kW) = \left(0{,}05 * \left(\sum_{i=1}^{nME} MCRme(i) + \frac{\sum_{i=1}^{nPTi} Ppti(i)}{0{,}75}\right)\right)$$

Εξίσωση 6: P_{AE} για ΣMCR<10.000 kW[6]

- **f_{eff}**: Διορθωτικός συντελεστής για τη διαθεσιμότητα καινοτόμων τεχνολογιών.

1. Για συστήματα ανάκτηση θερμότητας ο συντελεστής λαμβάνεται ίσος με 1.

2. Έχουν αναπτυχθεί οδηγίες για τον υπολογισμό του σε περίπτωση χρήσης ενέργειας από τον άνεμο, ηλιακής ενέργειας κτλ.

- **fj**: Διορθωτικός συντελεστής για ειδικές σχεδιάσεις πλοίων (π.χ. Ice-class) και σχετίζεται με την επίδραση στην ισχύ πρόωσης λόγω σχεδιαστικών ιδιαιτεροτήτων ή απαιτήσεων (αύξηση της ισχύς λόγω πλεύσης σε πάγο).
  Ο συντελεστής fj εφαρμόζεται για τις παρακάτω κατηγορίες:
    1. Ice-classed
    2. Shuttle tankers with propulsion redundancy (80.000-160.000 DWT)
    3. Ro-Ro
    4. Γενικού φορτίου

  Στις υπόλοιπες περιπτώσεις λαμβάνεται ίσος με 1.

- **n_{eff}**: Αριθμός καινοτόμων τεχνολογιών

- **n_{ME}**: Αριθμός κύριων μηχανών

- **n_{PTI}**: Αριθμός συστημάτων πρόσθεσης ισχύος (π.χ. shaft motors)

- **$P_{AE,eff}$**: Μείωση της βοηθητικής ισχύος εξαιτίας της παραγωγής και χρήσης ηλεκτρικής ισχύος από καινοτόμες τεχνολογίες [kW]

- **P_{eff}**: 75% της εγκατεστημένης ισχύος για την κάθε καινοτόμα τεχνολογία που συνεισφέρει στην πρόωση του πλοίου [kW]

- **P_{PTI}**: 75% της εγκατεστημένης ισχύος για το κάθε power take in σύστημα (π.χ. propulsion shaft motors) [kW]

1.4 Ανάγκη Ύπαρξης Τροποποιημένων Δεικτών EEDI

Ο EEDI υπολογίζεται για μια κατάσταση λειτουργίας του πλοίου, η οποία αναφέρεται ως Κατάσταση EEDI και ορίζεται σε σχέση με τις παρακάτω παραμέτρους ως εξής [2]:

• **Βύθισμα**: Βύθισμα θέρους στη γραμμή φόρτωσης.

• **Χωρητικότητα**: DWT (ή Gross Tonnage για τα επιβατηγά) που αντιστοιχεί στο παραπάνω βύθισμα, ενώ για containerships είναι το 70% της τιμής του DWT.

• **Καιρικές συνθήκες**: ήρεμος καιρός χωρίς άνεμο και χωρίς κύματα.

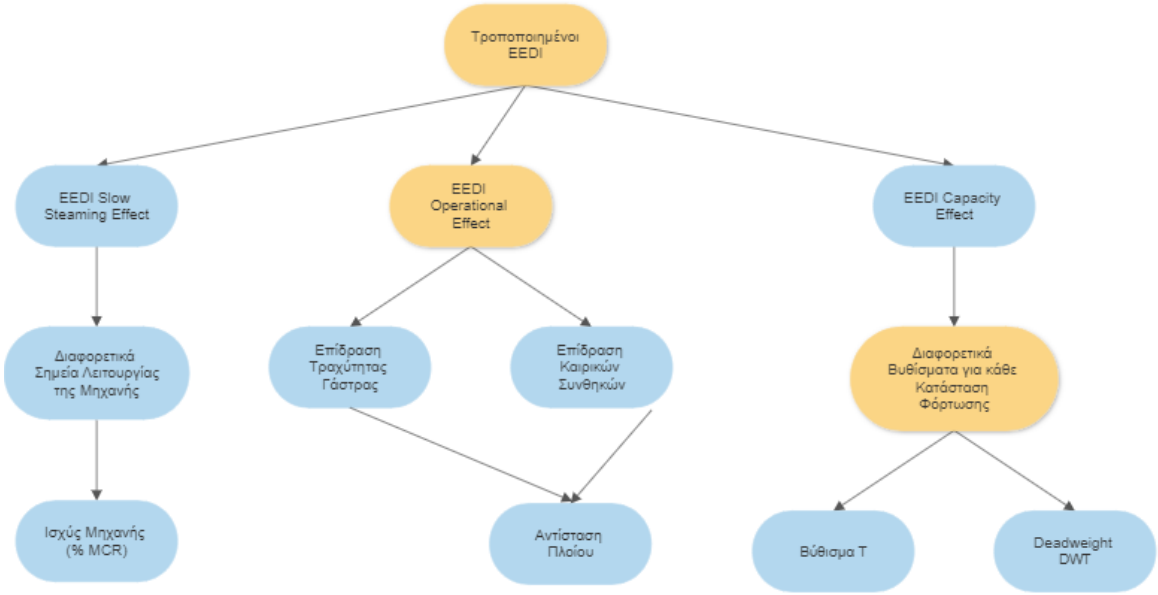
• **Ισχύς πρόωσης**: 75% MCR της κύριας μηχανής, ενώ υπάρχουν διορθώσεις εφόσον υπάρχει γεννήτρια ισχύος ή κινητήρας ισχύος άξονα.

• **Ταχύτητα αναφοράς (Vref)**: η ταχύτητα που επιτυγχάνει το πλοίο στις παραπάνω συνθήκες.

Έτσι, παρόλο που ο EEDI είναι ένας πολύ χρήσιμος σχεδιαστικός δείκτης, που καθοδηγεί τον ναυπηγό αναφορικά με την ενεργειακή αποδοτικότητα του πλοίου και πού μπορεί να επέμβει ώστε να επιφέρει βελτίωση στον συγκεκριμένο τομέα, υπάρχουν ορισμένα πρακτικά ζητήματα τα οποία δεν λαμβάνονται υπόψη. Πιο συγκεκριμένα:

- Κατά μέσο όρο ένα πλοίο δεξαμενίζεται κάθε 2,5 χρόνια. Αυτό σημαίνει ότι κατά τη διάρκεια αυτών των 2,5 χρόνων η γάστρα υπόκειται σε ρύπανση μέσω των οργανισμών που προσκολλώνται, αρά στην αύξηση της τραχύτητας της γάστρας και έτσι το πλοίο απαιτεί μεγαλύτερη ισχύ πρόωσης για την ιδιά ταχύτητα. [18]
- Ο EEDI αναφέρεται σε ήρεμη θάλασσα που είναι η εξαίρεση και έτσι ανταμείβονται οι γεμάτες γάστρες που λειτουργούν καλά σε ήρεμο νερό και όχι αυτές που σχεδιάζονται ώστε να λειτουργούν σε ρεαλιστικές καταστάσεις. Το πλοίο κατά τη διάρκεια ενός μεγάλου κυκλικού ταξιδιού μπορεί να έρθει αντιμέτωπο με πολλές καταστάσεις θάλασσας και διάφορες ταχύτητες και διευθύνσεις ανέμου.
- Το πλοίο αναλόγως με τη κατάσταση φόρτωσης του, χαρακτηρίζεται από διαφορετικό βύθισμα.
- Το πλοίο δύναται να λειτουργήσει σε διάφορες τιμές ισχύος μέσα στα όρια του loading diagram.
- Σε ένα κυκλικό ταξίδι, το πλοίο μπορεί να επιστρέφει άδειο και συνεπώς παράγει ρύπους χωρίς να συνεισφέρει στη κοινωνία μέσω της μεταφοράς φορτίου.

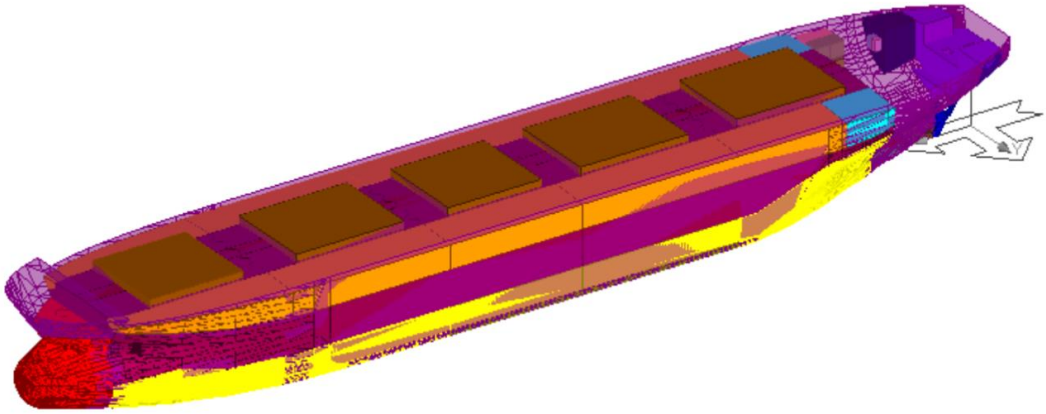
Τα παραπάνω ζητήματα δημιουργούν την ανάγκη ανάδειξης τροποποιημένων δεικτών EEDI οι οποίοι να ανταποκρίνονται περισσότερο στις καταστάσεις που θα αντιμετωπίσει ένα πλοίο κατά τη λειτουργία του σε όλο το κύκλο ζωής του και να αναδεικνύουν μια πιο ρεαλιστική οπτική πάνω στο ζήτημα της ενεργειακής αποδοτικότητας. Οι παράμετροι που θα εξεταστούν και ο τρόπος που θα συνδυαστούν για να προκύψουν τροποποιημένοι δείκτες ενεργειακής αποδοτικότητας παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.



Εικόνα 2: Διάγραμμα Παραμέτρων EEDI και δημιουργίας τροποποιημένων δεικτών

2.Υπολογισμός EEDI του πλοίου εργασίας

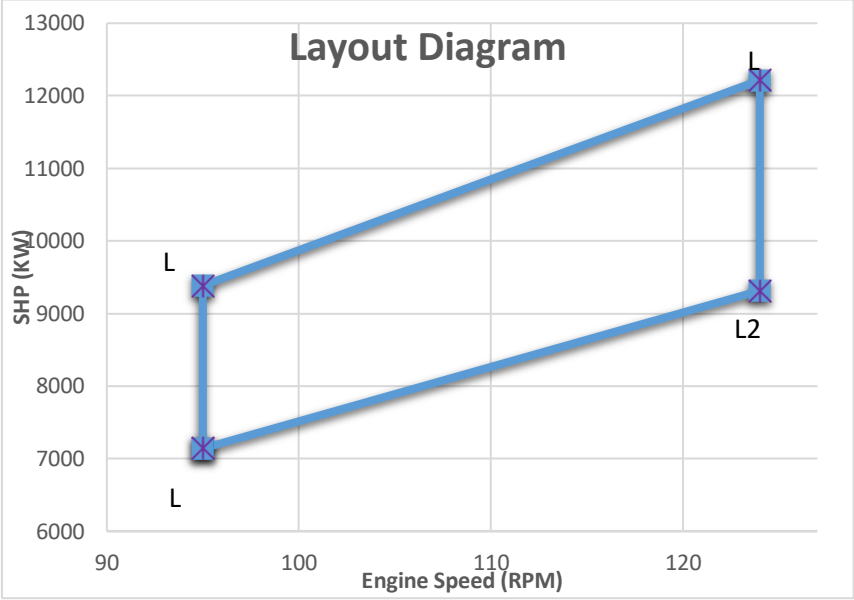
Το υπό σχεδίαση πλοίο 'MOZAMBICAN' είναι τύπου bulk carrier. Από τα αποτελέσματα των ερωτημάτων 1-5 του Θ.Μ.Σ.Π, έχει καθοριστεί ότι το DWT του ισούται με 43035 t. Με την ολοκλήρωση του ερωτήματος 9 επιλέχθηκε η μηχανή **7RT flex50-D** της εταιρίας WARTSILA με MCR=12215 kW η οποία λειτουργεί με HFO και συνεπώς C_F=3,114 σύμφωνα με τον Πίνακα 4. Παρακάτω παρουσιάζονται το Layout Diagram της μηχανής (Εικόνα 4) καθώς και ο Πίνακας 5 με τα κύρια χαρακτηριστικά του πλοίου.[14]



Εικόνα 3: Πατρικό πλοίο MOZAMBICAN (Aveva Lines)

Πίνακας 5: Βασικά χαρακτηριστικά του υπό σχεδίαση πλοίου [14]

Ship Name		MOZAMBICAN	
Ship Type		Bulk Carrier	
	Μέγεθος	**Τύπος**	**Τιμή**
Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά	Ολικό Μήκος	L_{OA} (m)	178.410
	Μήκος Μεταξύ καθέτων	L_{BP} (m)	170
	Πλάτος	B (m)	30
	Κοίλο	D (m)	16.15
	Βύθισμα	T (m)	11.4
	Ύψος προστέγου	h_{BACK} (m)	2.5
Κύρια Μηχανή & Ηλ/τριες	Ταχύτητα υπηρεσίας	V_S (kn)	14.0
	Κύρια Μηχανή	1 x WinGD 7RT-flex50-D	
	Ισχύς κινητήρα	P (kW)	10325
	Ηλεκτρογεννήτριες	3 x MAN 5L23/30DF	
	Ισχύς ηλεκτρογεννητριών	P_e (kW)	590
Συντελεστές	Γάστρας	C_B	0.830
	Ισάλου επιφάνειας	C_{WL}	0.904
	Μορφής	C_M	0.997
	Πρισματικός	C_P	0.833
Lightship	Μεταλλικής Κατασκευής	W_{ST} (t)	4861.38
	Ενδιαίτησης και Εξοπλισμού	W_{OT} (t)	867.78
	Μηχανολογικής Εγκατάστασης	W_M (t)	796.25
	Βάρος κενού σκάφους	LS (t)	6525.4
Ανάλυση Deadweight	Ωφέλιμο Φορτίο	$W_{PAYLOAD}$ (t)	40788.305
	Βάρος Καυσίμων και Λιπαντικών	W_{FUEL} (t)	1806.2
	Βάρος εφοδίων	W_{PR} (t)	291.8
	Βάρος πληρώματος	W_{CRP} (t)	3.0
	Βάρος υγρού έρματος	B (t)	0
	Βάρος Stores	W_{STORES} (t)	27.9
	Υπόλοιπο Σταθερό Βάρος (Cool. Water, System Oil, Grab Buckets, Spare, Oil and Water in E/R)	$W_{REST_CONSTANT}$ (t)	118
	Μεταφορική Ικανότητα	DWT (t)	43035
Συνολικό Βάρος	Εκτόπισμα	Δ (t)	49560.4
Πυκνότητα	Πυκνότητα νερού	cγ (t/m^3)	1.027
Ύφαλα	Summer Freeboard	FB_{SUMMER} (m)	4.724
Κέντρο Βάρους	Διάμηκες από Α.Ρ.	LCG (m)	89.794
	Κατακόρυφο από B.L	KG (m)	9.212
Βρεχόμενη Επιφάνεια	@ T=11.4 m	S_A (m^2)	8120.46



Εικόνα 4: Layout Diagram της επιλεγμένης μηχανής [14]

Σαν βοηθητική μηχανή, έχει επιλεχθεί η **MAN 5L23/30DF** η οποία λειτουργεί με HFO και συνεπώς C_F=3,114 σύμφωνα με τον πίνακα 4, με ισχύ: P_{AE}=(0,025*MCR_{ME})+250=555,375 kW.

Το πλοίο θα κατασκευαστεί σύμφωνα με τους κοινούς κατασκευαστικούς κανόνες (Common Structural Rules) οπότε $f_{i,csr}$=1+(0,08*LWT_{CSR}/DWT_{CSR}) σύμφωνα με το MEPC.308(73) [6].

Οι υπόλοιποι διορθωτικοί συντελεστές λαμβάνονται ίσοι με 1.

Τέλος, το πλοίο δεν διαθέτει καινοτόμες τεχνολογίες και συστήματα πρόσθεσης ισχύος. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, υπολογίζονται τα ακόλουθα μεγέθη:

- P_{ME}=0,75*MCR_{ME}→**P_{ME}=9161,25 kW**
- P_{AE}=(0,025*MCR_{ME})+250→**P_{AE}=555,375 kW**
- **f_w=1**
- **f_c=1**
- **f_j=1**
- $f_{i,csr}$=1+(0,08*LWT_{CSR}/DWT_{CSR})=1+(0,08*6524,4/43035)→**$f_{i,csr}$=1,012**
- **f_{eff}=1**
- **$C_{f,ME}$=$C_{f,AE}$=3,114**
- **n_{PTI}=0**
- **n_{ME}=1**
- **n_{eff}=0**
- **$P_{AE,eff}$=0**
- **P_{eff}=0**

- **P_{PTI}=0**
- **Capacity=DWT=43035 t**

Για να υπολογιστεί ο EEDI χρειάζεται ακόμα να υπολογισθούν οι ειδικές καταναλώσεις καυσίμου και η ταχύτητα αναφοράς του πλοίου στην κατάσταση EEDI. Για την ειδική κατανάλωση καυσίμου της κύριας μηχανής, από το πρόγραμμα GTD (Πίνακας 6) [15] , για το 75% του φορτίου ισχύει ότι:

SFCME=166,9 g/kWh

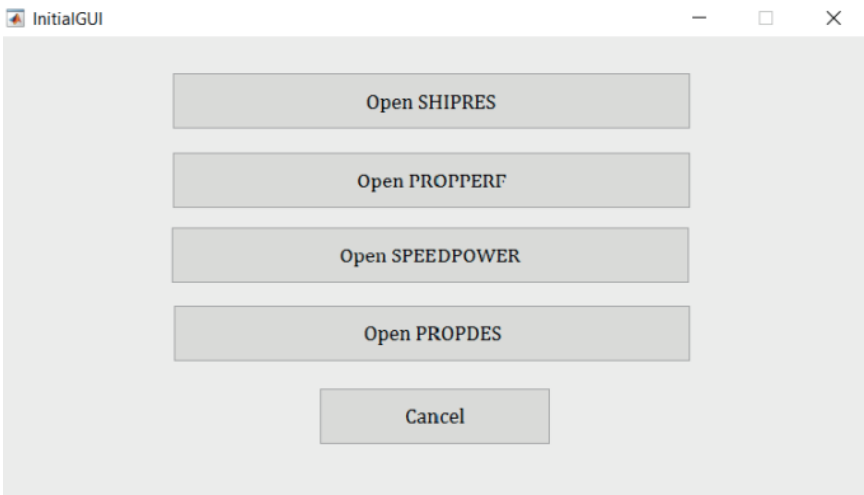
Πίνακας 6: Ειδική κατανάλωση καυσίμου (GTD) [15]

Engine Performance

	Performance			ISO			Design		
Power	Power	Speed	BMEP	BSFC	BSEF	tEaT	BSFC	BSEF	tEaT
%	kW	rpm	bar	g/kWh	kg/kWh	°C	g/kWh	kg/kWh	°C
110.0	13437	128.0	22.35	170.0	7.25	266	173.0	6.81	303
100.0	12215	124.0	20.98	169.0	7.60	250	172.0	7.11	288
95.0	11604	121.9	20.27	167.6	7.73	242	170.6	7.22	280
90.0	10994	119.7	19.55	166.3	7.84	234	169.3	7.30	273
85.0	10383	117.5	18.82	165.4	8.00	228	168.4	7.43	267
80.0	9772	115.1	18.08	164.4	8.25	225	167.4	7.65	265
75.0	9161	112.7	17.32	163.9	8.49	224	166.9	7.86	265
70.0	8551	110.1	16.54	163.7	8.64	222	166.7	7.97	263
60.0	7329	104.6	14.92	163.7	8.83	222	166.7	8.10	265
50.0	6108	98.4	13.21	165.2	8.92	231	168.2	8.13	277
40.0	4886	91.4	11.39	167.6	8.85	253	170.6	8.00	303
30.0	3665	83.0	9.40	168.7	9.43	250	171.7	8.64	291
25.0	3054	78.1	8.32	169.8	9.42	263	172.8	8.70	301

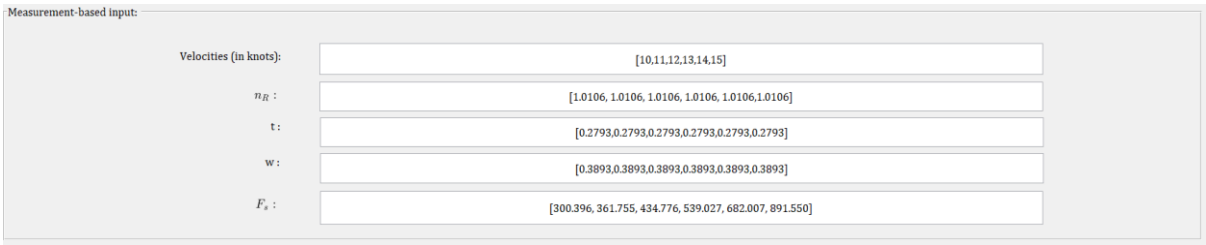
Ακόμα, σύμφωνα με το πιστοποιητικό NOx→**SFC_{AE}=184 g/kWh**

Για την ταχύτητα αναφοράς **Vref** χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Propulsion του Θ. Λουκάκη[16]. Με την εκτέλεση του προγράμματος εμφανίζεται ο κατάλογος με τις εφαρμογές, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.



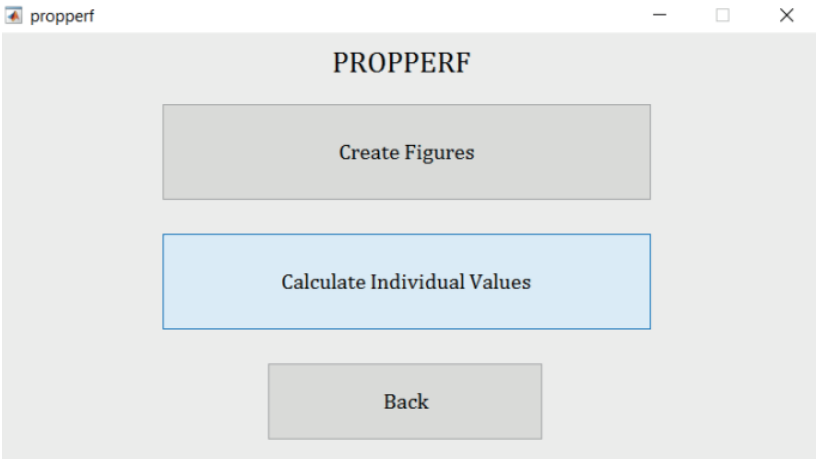
Εικόνα 5: Αρχική σελίδα Propulsion [27]

Αρχικά, θα δοθούν δεδομένα εισόδου στην εφαρμογή SHIPRES. Με βάση τα πειράματα επί προτύπου (ή άλλες μεθοδολογίες) προβλέπεται η συνολική αντίσταση του πλοίου (γάστρα, έξαλα, υπερκατασκευές) στις ιδανικές συνθήκες (όχι άνεμος, όχι κύματα, καθαρή γάστρα). Τα αποτελέσματα λαμβάνονται από το ερώτημα 9Α του Θ.Μ.Σ.Π στο οποίο χρησιμοποιήθηκαν οι συστηματικές σειρές LAP-KELLER, FORMDATA, B.S.R.A ώστε να υπολογιστεί η αντίσταση σε ήρεμο νερό. Ο συντελεστής μείωσης ώσης t, ο συντελεστής ομόρου w και ο βαθμός σχετικής περιστροφής n_R υπολογίστηκαν επίσης στο ερώτημα 9Α μέσω εμπειρικών τύπων. [14].Στην Εικόνα 6 παρουσιάζονται τα δεδομένα που αναφέρθηκαν και αποτελούν την είσοδο για το SHIPRES. Τονίζεται ότι οι υπόλοιπες εφαρμογές του προγράμματος δεν μπορούν να τρέξουν εφόσον δεν έχουν συμπληρωθεί τα δεδομένα της εφαρμογής SHIPRES.



Εικόνα 6: Δεδομένα εισόδου εφαρμογής SHIPRES [27]

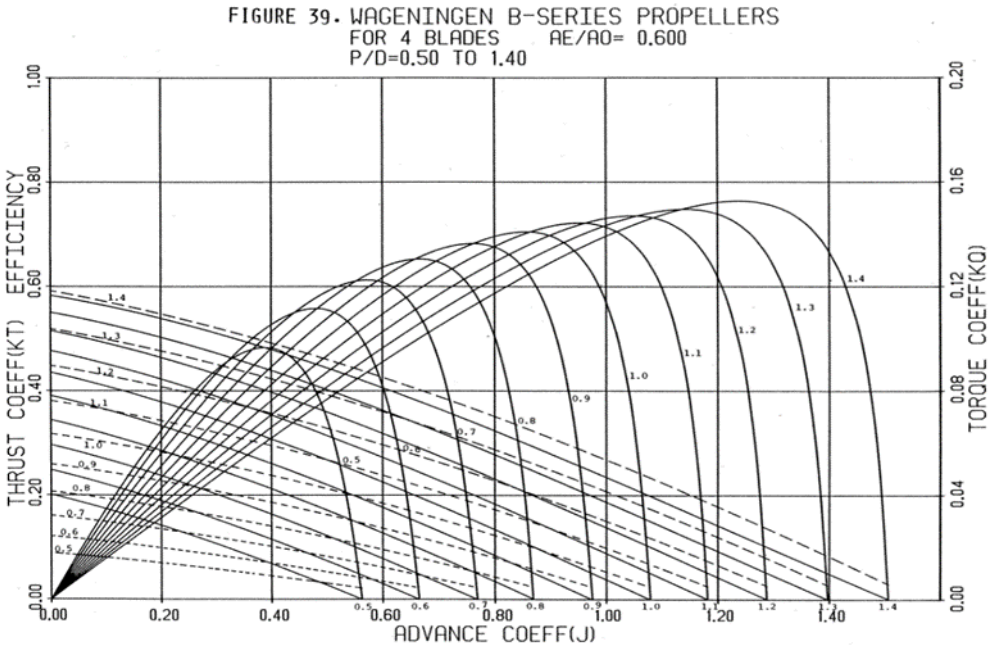
Στην συνέχεια από την εφαρμογή PROPPEREF θα επιλυθεί κάθε πρόβλημα πρόωσης πλοίου για δεδομένη έλικα με δεδομένη διάμετρο και βήμα. Η εκλογή της έλικας έγινε στο ερώτημα 9Β και επιλέχθηκε η έλικα **WAGENINGEN B4-60** με **P/D=0,78 και D=6 m**.



Εικόνα 7: Είσοδος της εφαρμογής PROPPERF [27]

Στο PROPPERF-CALCULATE INDIVIDUAL VALUES εμφανίζονται 3 πλαίσια.

Στο πρώτο πλαίσιο (Kt, Kq fits), εισάγονται τουλάχιστον 7 τιμές για τα J,Kt,Kq της επιλεγμένης έλικας. Οι τιμές αυτές λαμβάνονται με τη βοήθεια του διαγράμματος ελεύθερης ροής της έλικας B4-60 (Σχήμα 7).



Σχήμα 7: Διάγραμμα ελεύθερης ροής έλικας WAGENIGEN B4-60 [17]

Στο δεύτερο πλαίσιο εισάγονται ορισμένα στοιχεία για την επιλεγμένη έλικα. Τα στοιχεία αυτά περιλαμβάνουν:

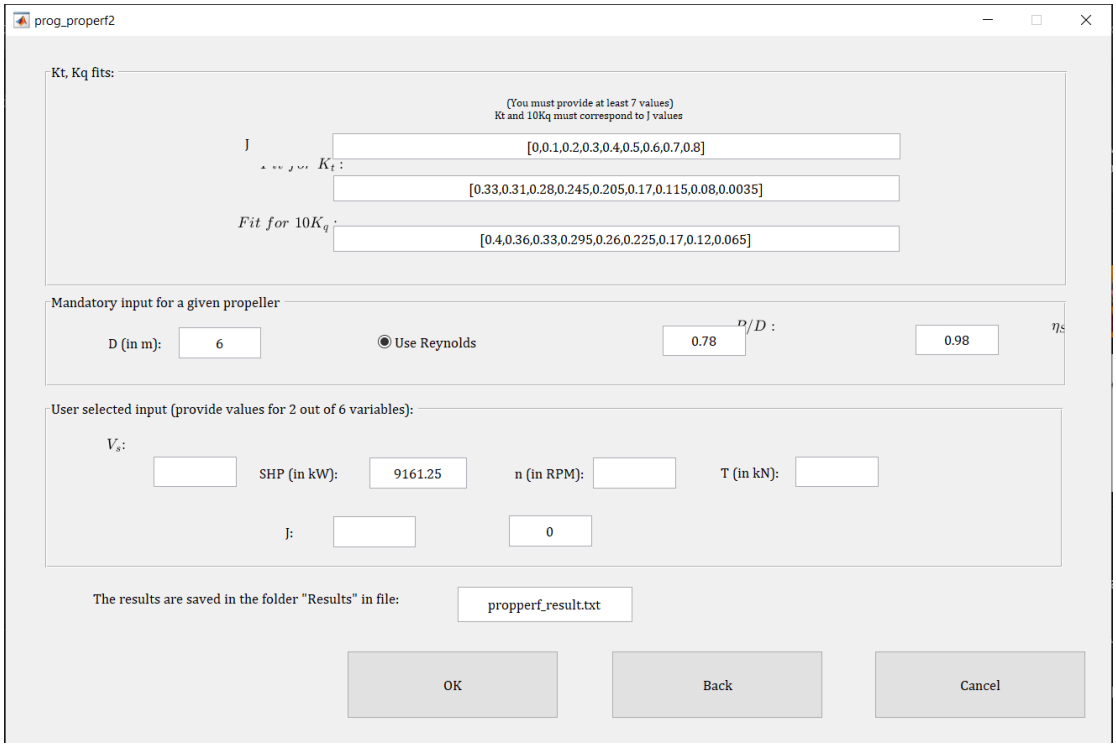
- Τη διάμετρο D σε μέτρα
- Τον λόγο βήματος προς διάμετρο PoD (αδιάστατο μέγεθος)$[0{,}6 \leq PoD \leq 2]$
- Τον συντελεστή απόδοσης άξονα η_s. Ο συντελεστής αυτός λαμβάνει συνήθως την τιμή 0,98 ή 0,99.

Συμπεριλαμβάνοντας την επιλογή «Include Reynolds», στους υπολογισμούς θα συμπεριληφθεί ο πραγματικός αριθμός Reynolds, αλλιώς θα χρησιμοποιηθεί η τιμή Re=2x10^6 . Η προεπιλογή είναι να συμπεριλαμβάνεται ο αριθμός Reynolds και θα επιλεχθεί και στη συγκεκριμένη μελέτη.

Στο τρίτο πλαίσιο [User-selected input (provide values for 2 out of 6 variables)], εισάγονται οι τιμές για τις δυο από τις έξι διαθέσιμες μεταβλητές (Vs,SHP,n,T,J,χ). Ανάλογα με τις μεταβλητές που δίνονται ως είσοδος, το πρόγραμμα αυτόματα επιλύει το σύστημα και επιστρέφει τις τιμές για τις όλες τις μεταβλητές.

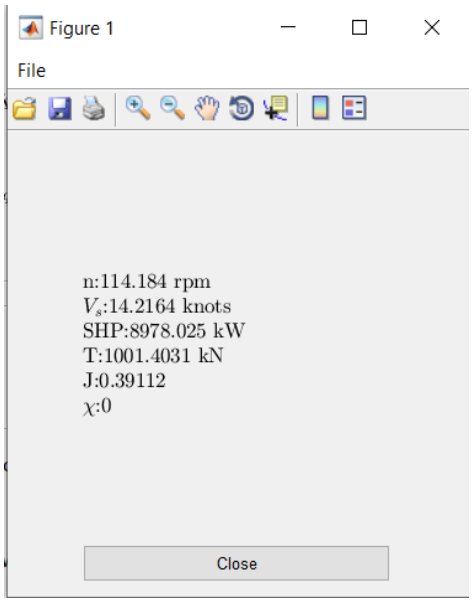
Από τη στιγμή που ζητείται η ταχύτητα στην κατάσταση EEDI, δίνεται ως είσοδος χ=0 (ήρεμη θάλασσα) και SHP=9165 kW(75% MCR).

Τα δεδομένα συμπληρώθηκαν όπως στην Εικόνα 8:



Εικόνα 8: Συμπλήρωση δεδομένων της εφαρμογής [27]

Η έξοδος του προγράμματος εμφανίζεται στην Εικόνα 9, από όπου υπολογίζεται ότι **Vref=14,2164 knots**



Εικόνα 9: Αποτελέσματα Propulsion [27]

Πλέον με όλα τα δεδομένα διαθέσιμα, υπολογίζεται ο δείκτης EEDI του υπό σχεδίαση πλοίου όπως φαίνεται στον Πίνακα 7.

Πίνακας 7: Υπολογισμός EEDI του υπό σχεδίαση πλοίου

Capacity DWT	43035
Type of Ship	Bulk Carrier
Vref(knots)	14,2164
MCRme(kW)	12215
Pme(kW)	9161,25
Type of Fuel	HFO
Cfme	3,114
SFCme(g/kWh)	166,9
Pae(kW)	555,375
Type of Fuel	HFO
Cfae	3,114
SFCae(g/kWh)	184
fw	1
fj	1
fi	1,012
fc	1
EEDI [gC02/t.nm]	**8,204**

Η γραμμή αναφοράς υπολογίζεται από τον τύπο **a*b**$^{-c}$,όπου τα a,b,c λαμβάνονται από τον Πίνακα 3 για τύπο πλοίου bulk carrier και σύμφωνα με αυτές τις τιμές προκύπτουν οι EEDI για κάθε χρονική περίοδο:

Πίνακας 8: Υπολογισμός γραμμής αναφοράς και απαιτούμενων EEDI

a	961,79			
b	43035			
c	0,477			
γραμμή αναφοράς	5,926			
	φαση0	φαση 1	φαση 2	φαση 3
απαιτούμενος EEDI [gC02/ t.nm]	5,926	5,333	4,741	4,148

Από τον Πίνακα 8 προκύπτουν έτσι οι 4 απαιτούμενοι EEDI ανάλογα με τη χρονική φάση.

Ο δείκτης EEDI που υπολογίσθηκε δεν ικανοποιεί τις απαιτήσεις για καμία από τις 4 φάσεις.

3. Οδηγία για την ελάχιστη ισχύ του πλοίου και εφαρμογή για το υπό σχεδίαση πλοίο

Ο έλεγχος αυτός πραγματοποιείται για bulk-carriers και tankers. Στόχος είναι να διασφαλιστεί ότι αυτά τα πλοία θα διαθέτουν επαρκή ισχύ έτσι ώστε σε δυσμενείς συνθήκες υπό την επίδραση ανέμων και κυματισμών, να μπορούν να διατηρήσουν την ελεγξιμότητά τους (maneuverability).

Η ολοένα και αυξανόμενη ανάγκη μείωσης των ρύπων και συμμόρφωσης στον δείκτη EEDI οδηγούν αρκετούς σχεδιαστές στην μείωση της ισχύος της κύριας μηχανής. Παρόλα αυτά, πρέπει να υπάρχει ένα κάτω όριο ταχύτητας (άρα και ισχύος) που θα υπολογισθεί μέσω της παρακάτω διαδικασίας, ώστε το πλοίο να μη βρεθεί αντιμέτωπο με τα προαναφερθέντα προβλήματα. Ο καθορισμός των δυσμενών συνθηκών που θα πραγματοποιηθούν οι υπολογισμοί καθορίζεται με βάση το μήκος του πλοίου σύμφωνα με τον Πίνακα 9: [MEPC 232(65)]

Πίνακας 9: Καθορισμός των δυσμενών συνθηκών [8]

Ship length, m	Significant wave height h_s, m	Peak wave period T_P, s	Mean wind speed V_w, m/s
Less than 200	4.0	7.0 to 15.0	15.7
$200 \leq L_{pp} \leq 250$	Parameters linearly interpolated depending on ship's length		
More than L_{pp} = 250	Refer to paragraph 1.1		

↓

Significant wave height h_s, m	Peak wave period T_P, s	Mean wind speed V_w, m/s
5.5	7.0 to 15.0	19.0

Εφόσον L_{PP}=170 m τότε:

- Hs=4 m
- Tp=7-15 sec
- Vw=15,7 m/s

Ο έλεγχος πραγματοποιείται σε δύο επίπεδα και αν τουλάχιστον ένα από τα δύο ικανοποιούνται, τότε η ισχύς του πλοίου θεωρείται επαρκής για την διατήρηση της ελεγξιμότητα σε δυσμενείς συνθήκες. Η διαδικασία περιγράφεται στο MEPC 232(65). [8]

3.1 Επίπεδο 1: Έλεγχος με χρήση ελάχιστων τιμών ισχύος

Ελέγχεται εάν η εγκατεστημένη ισχύς είναι μεγαλύτερη από την τιμή **a*(DWT)+b**

Δηλαδή πρέπει να ισχύει ότι:

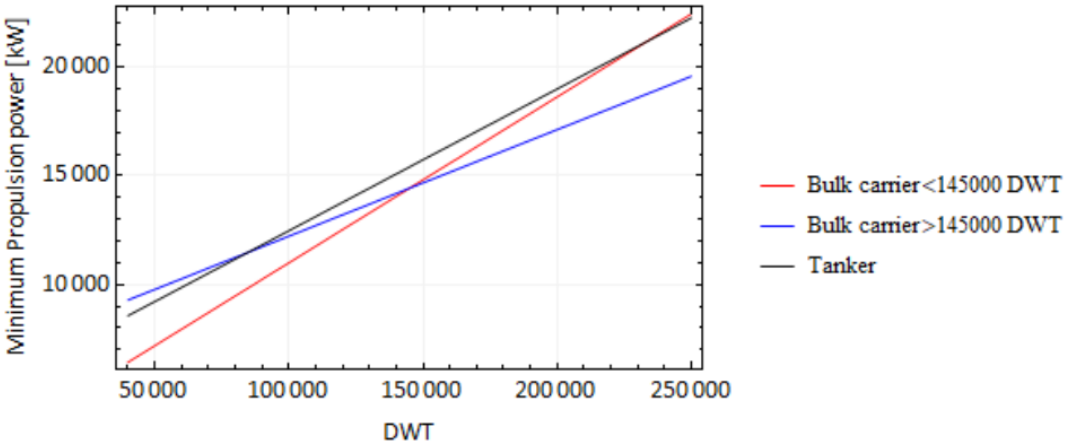
Minimum Power Line Value= a*(DWT) + b ≤ MCR_{ME}

Τα a και b δίνονται από τον Πίνακα 10:

Πίνακας 10: Παράμετροι για την ελάχιστη γραμμή αναφοράς [8]

Ship type	a	b
Bulk carrier which DWT is less than 145,000	0.0763	3374.3
Bulk carrier which DWT is 145,000 and over	0.0490	7329.0
Tanker	0.0652	5960.2
Combination Carrier	see tanker above	

Ισοδύναμα, οι παραπάνω υπολογισμοί μπορούν να πραγματοποιηθούν και μέσω του Σχήματος 8:



Σχήμα 8: Διάγραμμα ελάχιστης γραμμής αναφοράς [2]

Σύμφωνα με τους υπολογισμούς του Πίνακα 11, ικανοποιείται το 1° επίπεδο ελέγχου.

Πίνακας 11: Υπολογισμοί 1ου επιπέδου ελέγχου

1ο επίπεδο ελέγχου			Αρα ΙΚΑΝΟΠΟΙΕΙΤΑΙ
a	0,0763	MCR main engine kw	
b	3374,3		
ελάχιστη τιμή MCR (kW)	6657,871	12215	

3.2 Επίπεδο 2: Απλοποιημένη Υπολογιστική Διαδικασία

Στο 2° επίπεδο ελέγχου θα εξεταστεί εάν το πλοίο διαθέτει ισχύ ικανή για να το κινήσει με μια συγκεκριμένη πρόσω ταχύτητα κάτω από την επίδραση πρωραίων κυματισμών. Αν καταφέρει να επιτύχει αυτή την ταχύτητα για πρωραίους

κυματισμούς, τότε θα είναι ικανό και να διατηρήσει τη πορεία του υπό την επίδραση κυμάτων και ανέμου κάθε κατεύθυνσης. Η τιμή της ταχύτητας αυτής (και συνεπώς της ισχύος) εξαρτάται από τα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά του πλοίου και κυρίως από την επιφάνεια του πηδαλίου. Έτσι, πλοία με μεγαλύτερη επιφάνεια πηδαλίου θα μπορούν να διατηρήσουν τη πορεία τους με μικρότερη εγκατεστημένη ισχύ σε σχέση με πλοία με μικρότερη επιφάνεια.

3.2.1 ΒΗΜΑ 1: Εύρεση απαιτούμενης ταχύτητας Vs υπό την επίδραση πρωραίων κυματισμών και ανέμου

Η Vs, η οποία θα διασφαλίζει τη διατήρηση της πορείας σε όλες τις περιπτώσεις κατεύθυνσης των κυμάτων και του ανέμου, θα είναι η μεγαλύτερη από τις παρακάτω 2 ταχύτητες:

- Ελάχιστη τιμή της ταχύτητας πλεύσης (navigational), ***V*nav**,
- Ελάχιστη τιμή ταχύτητας για τη διατήρηση πορείας (course-keeping), ***V*ck**

Η ελάχιστη τιμή **Vnav**, αναφέρεται στην ανάπτυξη ταχύτητας για την αποφυγή έντονων καιρικών συνθηκών και η τιμή της ορίζεται στους 4 knots.

Η ελάχιστη τιμή της ταχύτητας για την διατήρηση της πορείας ***V*ck**, επιλέγεται έτσι ώστε να είναι εφικτή η διατήρηση της πορείας υπό την επίδραση κυματισμών και ανέμου από οποιαδήποτε κατεύθυνση.

Καθορίζεται μια ταχύτητα αναφοράς ***V*ck,ref** η οποία αντιστοιχεί σε πλοία τα οποία διαθέτουν πηδάλιο με επιφάνεια A_R ίση με 0,9% της πλευρικής βυθισμένης επιφάνειας $A_{LS,cor}$ λαμβάνοντας υπόψη διόρθωση για το πλάτος. Η ταχύτητα αναφοράς *V*ck,ref για τα tankers και τα bulk carriers, εξαρτάται από τον λόγο της προβολής της μετωπικής επιφάνειας ανέμου A_{FW} προς την προβολή της πλευρικής επιφάνειας ανέμου A_{LW}.

Η ***V*ck,ref** λαμβάνεται ως εξής:

$$Vck,ref = \begin{cases} 4, & AFW/ALW \geq 0{,}4 \\ 9, & AFW/ALW \leq 0{,}1 \\ \textit{Γραμμική παρεμβολή μεταξύ } 0{,}1 \textit{ και } 0{,}4 \textit{ για τις ενδιάμεσες τιμές του λόγου } AFW/ALW \end{cases}$$

Εξίσωση 7: Vck,ref

Τα υπόλοιπα μεγέθη ορίζονται ακολούθως σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις:

$$Vck = Vck, ref - 10(AR\% - 0{,}9)$$

$$AR\% = \frac{AR}{ALS, cor} * 100$$

$$ALS, cor = LBP * Tm\left(1 + 25\left(\frac{Bwl}{LBP}\right)^2\right)$$

Εξίσωση 8Α,Β,Γ: Vck, AR%, ALS,cor

Οι τιμές για τα A_R,A_{FW},A_{LW} λήφθηκαν από το GA του πλοίου.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, επιλέγεται τιμή για την Vs (Πίνακας 12):

Πίνακας 12: Εκλογή ταχύτητας Vs

2ο επίπεδο ελέγχου			
ΒΗΜΑ 1			
Ορισμός Απαιτούμενης Ταχύτητας			
Vnav (kn)	4		
A FW (m^2)	417,45		
A LW (m^2)	1100		
Afw/Alw	0,3795		
Vck,ref	4,342		
	Vck,ref	AF/AL	
	4	0,4	
	9	0,1	1
Bwl (m)	28,24		
ALS,corr	3274,981		
A R (m^2)	40		
A R %	1,221		
Vck (kn)	1,128		
Vs (kn)	4		

Τελικά Vs=Max[Vck, Vnav]=[1.27,4]→Vs=4 knots

Οπότε η απαιτούμενη ταχύτητα του πλοίου Vs ορίζεται για τους υπολογισμούς στους 4 κόμβους.

Vs=4 knots

3.2.2 ΒΗΜΑ 2: Έλεγχος για την εγκατεστημένη ισχύ

Ο έλεγχος γίνεται για την ταχύτητα Vs που υπολογίστηκε στο βήμα 1 και για το μέγιστο βύθισμα σχεδίασης. (T=11,4 m)

Η βασική αρχή ελέγχου είναι ότι η απαιτούμενη ώση της προπέλας T πρέπει να μπορεί να καλυφθεί από το σύστημα πρόωσης του πλοίου, λαμβάνοντας υπόψη τον συντελεστή μείωσης ώσης t. Η Εξίσωση 9 συνδέει την ώση T με τις επιμέρους αντιστάσεις που συναντά το πλοίο και τον συντελεστή μείωσης ώσης.

$$T = \frac{Rcw + Rair + Raw + Rapp}{1 - t}$$

Εξίσωση 9: Απαιτούμενη ώση T [8]

3.2.2.1 Υπολογισμός Rcw (Αντίσταση σε Ήρεμο Νερό)

Η αντίσταση σε ήρεμο νερό υπολογίζεται από την εξίσωση 10

$$Rcw = \frac{1}{2}(1 + k) * CF * \rho * S * Vs^2$$

Εξίσωση 10: Αντίσταση σε ήρεμο νερό

Όπου

- k = −0,095 + 25,6*[C_B/(L_{BP}/B_{wl})^2 *(B_{wl}/T_m)^{0,5}] = 0,277537228 ο συντελεστής μορφής που υπολογίζεται εμπειρικά, απουσία των model tests
- Re = $Vs \cdot L_{BP}/v$=350453037,7 ο αριθμός Reynolds
- C_F = 0,075/($log10Re$−2)^2 = 0,00175102 ο συντελεστής αντίστασης τριβής.
- ρ = 1025 kg/m^3 , πυκνότητα νερού.
- S = 8210,41 m^2 , η βρεχόμενη επιφάνεια

Τελικά, Rcw =0,5*(1 + k)*C_F*ρ*S*Vs^2=39421,519 N σύμφωνα με τους υπολογισμούς του Πίνακα 13.

Πίνακας 13: Υπολογισμός αντίστασης σε ήρεμο νερό

Cb	0,83
k	0,277537228
v(m^2/s)	9,982E-07
ρ(kg/m^3)	1025
Re	350453037,7
Cf	0,00175102
S(m^2)	8120,41
Rcw (N)	39421,519

Η αντίσταση λόγω δημιουργίας κυματισμών δεν λαμβάνεται υπόψη, διότι λαμβάνει πολύ μικρότερες τιμές από την αντίσταση τριβής.

3.2.2.2 Υπολογισμός Rair (Πρόσθετη Αντίσταση Λόγω Ανέμου)

Η πρόσθετη αντίσταση λόγω ανέμου υπολογίζεται από την εξίσωση 11

$$Rair = \frac{1}{2} * Cair * \rho\alpha * AFW * Vw,rel^2$$

Εξίσωση 11: Πρόσθετη αντίσταση λόγω ανέμου

Όπου

- C_{air} = 1 , αεροδυναμικός συντελεστής αντίστασης [λαμβάνεται 1, απουσία εμπειρικών δεδομένων και model tests]
- ρ_α = 1.2 kg/m^3 , πυκνότητα αέρα
- Vw,rel (m/s) , σχετική ταχύτητα ανέμου με Vw,rel = Vw + Vs=17,76 m/s

Τελικά, $Rair$ = 0,5*C_{air}*ρ_α*A_{FW}*$V_{w,\text{rel}}^2$ = 78982,877 N σύμφωνα με τους υπολογισμούς του Πίνακα 14.

Πίνακας 14: Υπολογισμός αντίστασης ανέμου

ρα	1,2
Cair	1
Vw(m/s)	15,7
Vw,rel (m/s)	17,76
Rair(N)	78982,877

3.2.2.3 Υπολογισμός Raw (Πρόσθετη Αντίσταση Λόγω Κυματισμών)

STAWAVE-1

Για τον υπολογισμό της ελάχιστης ισχύος του πλοίου θα χρησιμοποιηθεί σε πρώτη φάση η ημι-εμπειρική απλουστευμένη μέθοδος **STAWAVE-1** η οποία βασίζεται στις εξής παραδοχές [9]:

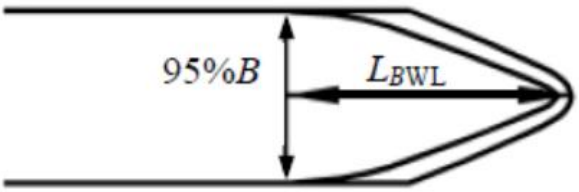
1. Κίνηση heave και pitch μικρού πλάτους
2. Επίδραση μετωπικών κυματισμών με μέγιστη απόκλιση 45 μοίρες από την πλώρη
3. Πρόσθετη αντίσταση κυματισμών μόνο εξαιτίας της ανάκλασης

Η μέθοδος αυτή υπολογίζεται με βάση την εξίσωση 12 όπου:

- h_S το σημαντικό ύψος κύματος
- L_{BWL} είναι το μήκος του πρωραίου τμήματος στην ίσαλο πλεύσης το οποίο αντιστοιχεί στο 95% του πλάτους
- ρ η πυκνότητα του νερού
- g η επιτάχυνση της βαρύτητας
- B το πλάτος του πλοίου

$$RAWL = \frac{1}{16} * \rho * g * hs^2 * B * \sqrt{\frac{B}{LBWL}}$$

Εξίσωση 12: STAWAVE-1 [9]



Σχήμα 9: Επεξήγηση Lbwl [9]

Πίνακας 15: Υπολογισμός αντίστασης σε κυματισμούς

STAWAVE 1	
ρ(kg/m^3)	1025
g(m/sec^2)	9,81
Hs (m)	4
B (m)	30
Lbwl (m)	26,63
Rawl (N)	320176,2927

Από τους υπολογισμούς προκύπτει ότι R_{AWL}=320176,2927 N

Όμως, η μέθοδος STAWAVE-1 για να είναι ακριβής προϋποθέτει να ισχύει η ανισότητα Hs≤2,25$\sqrt{Lpp/100}$.

Πίνακας 16: Έλεγχος εγκυρότητας STAWAVE-1

Hs	2,25*SQRT(Lpp/100)
4	2,934

Σύμφωνα με τον IMO και τον πίνακα 16, για την μελέτη της ελάχιστης ισχύος στο συγκεκριμένο πλοίο ισχύει ότι Hs=4 m και το αποτέλεσμα του δεξιού μέλους της ανισότητας είναι ίσο με 2,934. Συνεπώς **δεν ικανοποιείται αυτή η συνθήκη**. Η STAWAVE-1 προσφέρει μια προκαταρκτική αλλά αβέβαιη εκτίμηση για τον υπολογισμό της αντίστασης κυματισμών και για αυτό τον λόγο θεωρείται αναγκαία μία δεύτερη μέθοδος ώστε να επιβεβαιώσει την εγκυρότητα των υπολογισμών.

LIU&PAPANIKOLAOU

Σύμφωνα με τις οδηγίες (IMO MEPC.1/CIRC.796) [7] , η πρόσθετη αντίσταση των πλοίων σε κυματισμό πρέπει να καθορίζεται μέσω tank test ή μέσω μιας ισοδύναμης με τα test σε ακρίβεια φόρμουλας. Μια τέτοια φόρμουλα κατασκευάστηκε από τους Liu&Papanikolaou [10] λόγω της άμεσης ανάγκης να προβλέπεται γρήγορα η πρόσθετη αντίσταση κυματισμών στα αρχικά στάδια σχεδίασης των πλοίων. Η μέθοδος χρησιμοποιεί σαν δεδομένα τα κύρια γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πλοίου και του κύματος και η εφαρμογή της γίνεται για μεγάλο εύρος ταχυτήτων.

Σύμφωνα λοιπόν με τους Liu&Papanikolaou, η πρόσθετη αντίσταση σε μετωπικούς κυματισμούς, για κάθε μήκος κύματος λ, μπορεί να υπολογισθεί μέσω της παρακάτω εξίσωσης:

$$\boldsymbol{R_{WAVE} = R_{AWR} + R_{AWM}}$$

Εξίσωση 13: Rwave [10]

Σύμφωνα με την ITTC (ITTC, 2014) [9], η αντίσταση σε regular waves, R_{WAVE}, υπολογίζεται από το άθροισμα της συνιστώσας R_{AWM}, που κυρίως οφείλεται στη κίνηση του πλοίου, και της συνιστώσας που οφείλεται κυρίως στην ανάκλαση των κυμάτων, R_{AWR}, και πρέπει να υπολογίζεται με ακρίβεια γιατί, για μικρά λ (short waves), είναι η κυρίαρχη.

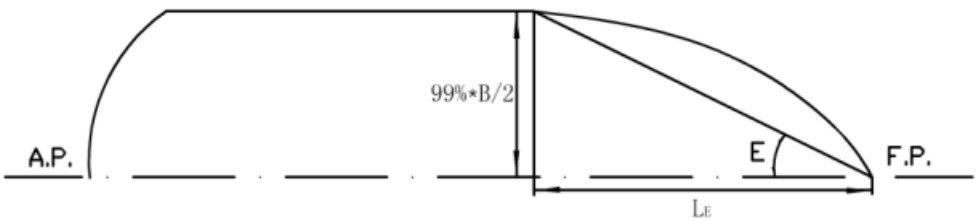
Wave Reflection Added Resistance, R_{AWR}

Για τον υπολογισμό της **R_{AWR}** (πρόσθετη αντίσταση λόγω ανάκλασης) , οποία είναι κυρίαρχη για short waves, χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω εξίσωση:

$$\boldsymbol{R_{AWR} = \frac{2.25}{2}\rho g B \zeta_a^2 sin^2 E \left(1 + 5\sqrt{\frac{L_{PP}}{\lambda}} Fn\right)\left(\frac{0.87}{C_B}\right)^{1+4\sqrt{Fn}}}$$

Εξίσωση 14: Rawr [10]

Όπου E=atan(B/L_E) και L_E= η απόσταση από το πρωραίο άκρο ως το σημείο κατά το διάμηκες όπου B=99%Bmax. Στο πλοίο της εργασίας μετρήθηκε στο σχέδιο του GA ότι L_E=38 m.



Σχήμα 10: Επεξήγηση του LE [10]

Ship Motion Added Resistance, R_{AWM}

Για τον υπολογισμό του **R_{AWM}** (πρόσθετη αντίσταση λόγω κίνησης πλοίου) , η οποία είναι κυρίαρχη για μεγάλα λ (long waves), χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω εξίσωση:

$$R_{AWM} = \frac{4\rho g \zeta_a^2 B^2}{L_{PP}} \bar{\omega}^{b_1} exp\left[\frac{b_1}{d_1}(1 - \bar{\omega}^{b_1})\right] \alpha_1 \alpha_2$$

Εξίσωση 15: Rawm [10]

Όπου:

- Για C_B>0,75 → $\begin{cases} b1 = \begin{cases} 11, \bar{\omega} < 1 \\ -8{,}5, \alpha\lambda\lambda o\acute{\upsilon} \end{cases} \\ d1 = \begin{cases} 566 * \left(\frac{Lpp}{B}\right)^{-2{,}66}, \bar{\omega} < 1 \\ -566 * \left(\frac{Lpp}{B}\right)^{-2{,}66} * 6, \alpha\lambda\lambda o\acute{\upsilon} \end{cases} \end{cases}$

Εξίσωση 16: b1,d1 για CB>0,75 [11]

- Για C_B<0,75 → $\begin{cases} b1 = \begin{cases} 11, \bar{\omega} < 1 \\ -8{,}5, \alpha\lambda\lambda o\acute{\upsilon} \end{cases} \\ d1 = \begin{cases} 14, \bar{\omega} < 1 \\ -566 * \left(\frac{Lpp}{B}\right)^{-2{,}66} * 6, \alpha\lambda\lambda o\acute{\upsilon} \end{cases} \end{cases}$

Εξίσωση 17:b1,d1 για CB<0.75 [11]

- $\alpha 1 = 60{,}3 * Cb^{1{,}34} * \left(\frac{0{,}87}{Cb}\right)^{1+Fr}$

Εξίσωση 18: α1 [11]

- $\alpha 2 = \begin{cases} 0{,}072 + 0{,}1676 * Fr, Fr < 0{,}12 \\ Fr^{1{,}5} e^{-3{,}5*Fr}, Fr \geq 0{,}12 \end{cases}$

Εξίσωση 19: α2 [11]

- $$\overline{\omega} = \begin{cases} \dfrac{\sqrt{\dfrac{Lpp}{g}}^3 \sqrt{\dfrac{Kyy}{Lpp}} 0{,}05^{0{,}143}}{1{,}17} \omega \ , Fr < 0{,}05 \\ \dfrac{\sqrt{\dfrac{Lpp}{g}}^3 \sqrt{\dfrac{Kyy}{Lpp}} Fr^{0{,}143}}{1{,}17} \omega, Fr \geq 0{,}05 \end{cases}$$

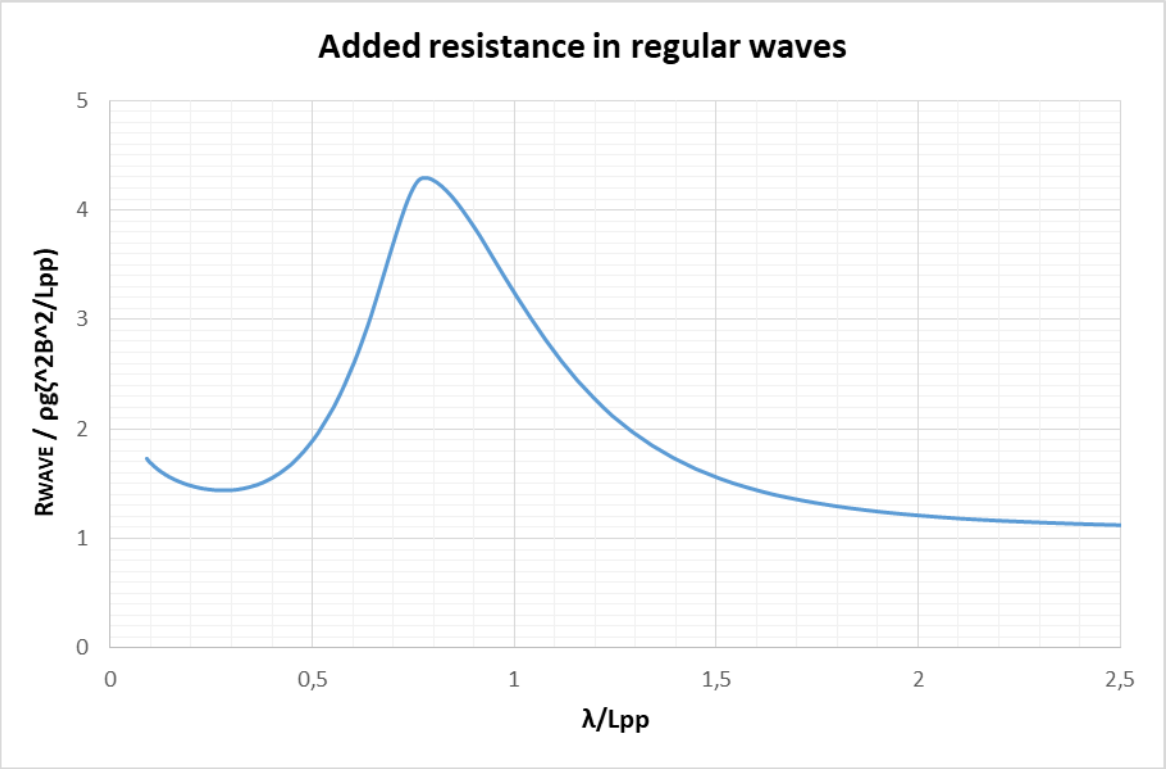
Εξίσωση 20: $\overline{\omega}$ [11]

Με βάση αυτά, υπολογίζεται η R_{WAVE} .Στην παρακάτω εικόνα, παρουσιάζεται ένα μέρος από τους υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν στο excel και η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την κατασκευή του διαγράμματος της R_{wave}.

Πίνακας 17: Διαδικασία υπολογισμού Rwave

ω (r/s)	k	λ (m)	λ/Lpp	Rawr (N)	ω (r/s)	b1	d1	Rawm (N)	RWAVE (N)	RWAVE / ρgζ^2B^2/Lpp)
0,05	0,000254842	24655,21915	145,031	**204286,702**	0,073100685	11	5,61002553	**1,48844E-06**	**204286,702**	**0,959**
0,06	0,000366972	17121,67996	100,716	**205123,9496**	0,087720822	11	5,61002553	**1,10592E-05**	**205123,95**	**0,963**
0,07	0,00049949	12579,19344	73,995	**205961,1971**	0,10234096	11	5,61002553	**6,02749E-05**	**205961,197**	**0,967**
0,08	0,000652396	9630,944979	56,653	**206798,4446**	0,116961097	11	5,61002553	**0,000261846**	**206798,445**	**0,971**
0,09	0,000825688	7609,635539	44,763	**207635,6922**	0,131581234	11	5,61002553	**0,000956573**	**207635,693**	**0,975**
0,1	0,001019368	6163,804786	36,258	**208472,9397**	0,146201371	11	5,61002553	**0,003048196**	**208472,943**	**0,979**

Στο Σχήμα 11 παρουσιάζεται η αδιαστατοποιημένη Rwave, όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα των υπολογισμών στο excel.



Σχήμα 11: Διάγραμμα αδιαστατοποιημένης Rwave

Για τον υπολογισμό της R_{AW} , που υπολογίζει την πρόσθετη αντίσταση σε μη κανονικούς κυματισμούς, θα χρειαστεί να εφαρμόσουμε κάποια φασματική συνάρτηση στην συνάρτηση μεταφοράς $R_{WAVE}/\zeta_{\alpha}^2$. Θα χρησιμοποιηθεί το φάσμα JOHNSWAP:

$$S(Hs, Tp, \gamma) = \frac{\alpha * Hs^2 \omega^{-5}}{\omega p^{-4}} \exp\left[\frac{-5}{4}\left(\frac{\omega}{\omega p}\right)^{-4}\right] \gamma^{\exp[\frac{-(\omega-\omega p)^2}{2\sigma^2 \omega p^2}]}$$

Εξίσωση 21: Φάσμα JOHNSWAP [12]

Όπου:

- $\sigma = \begin{cases} 0{,}07, \omega < \omega p \\ 0{,}09, \omega > \omega p \end{cases}$

Εξίσωση 22: Υπολογισμός σ

- γ = 3,3

Εξίσωση 23: Υπολογισμός γ

- $\alpha * = \frac{0{,}0624}{0{,}23 + 0{,}0336\gamma - 0{,}185 / 1{,}9+\gamma}$

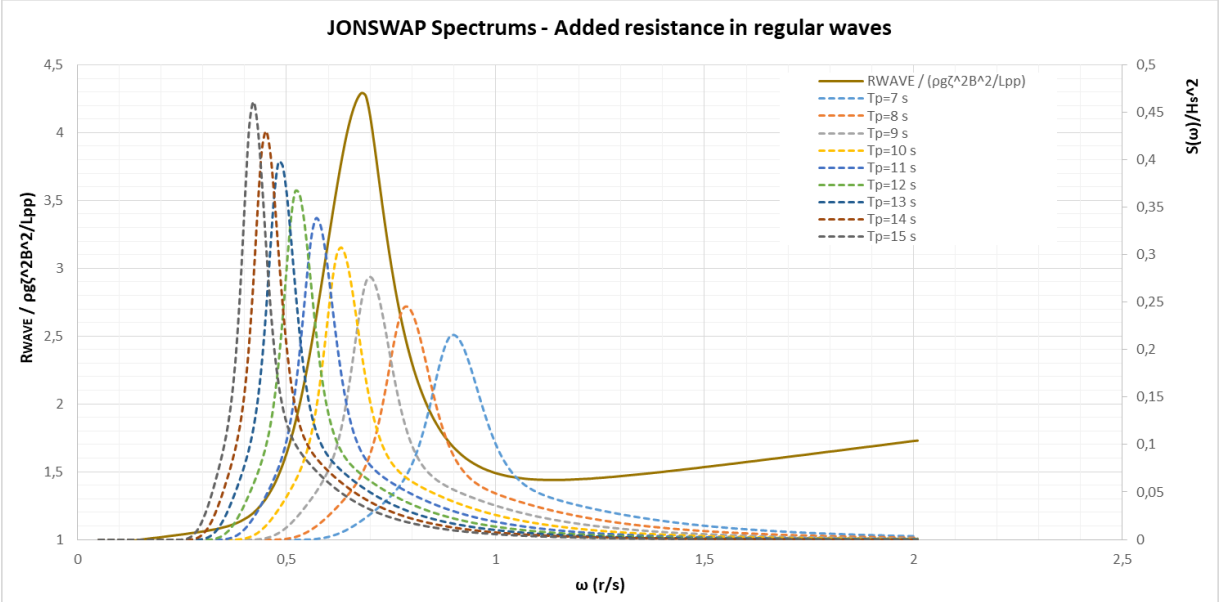
Εξίσωση 24: Υπολογισμός α*

Τελικά, η R_{AW} υπολογίζεται ως εξής:

$$R_{AW} = 2 \int_0^{\infty} S(\omega) \frac{Raw(\omega)}{\zeta\alpha^2} d\omega$$

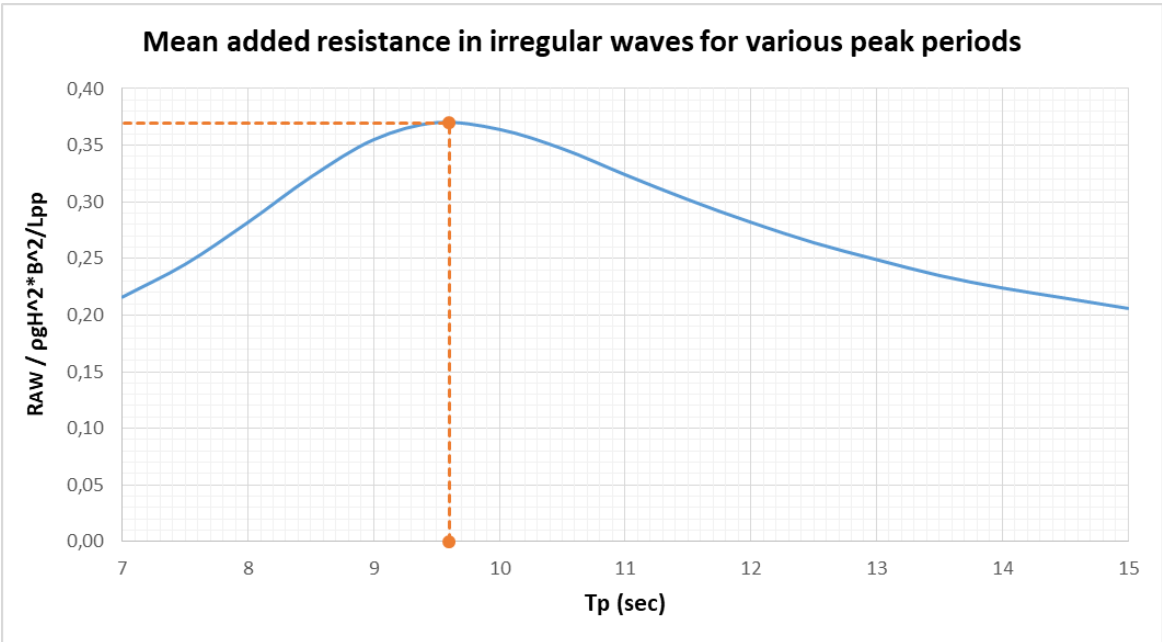
Εξίσωση 25: Raw [10]

Για να είναι έγκυρα τα αποτελέσματα, εξετάζεται κάθε πιθανό φάσμα με περίοδο κορυφής από 7-15 sec. Η Rwave και τα φάσματα για τα διάφορα sea states που προαναφέρθηκαν και λαμβάνονται υπόψη, παρουσιάζονται στο Σχήμα 12:



Σχήμα 12: Διάγραμμα της Rwave και των φασμάτων JOHNSWAP για διάφορα sea states.

Για να υπολογιστεί η μέγιστη Raw (μη κανονικοί κυματισμοί) για το πλοίο μελέτης, η σχέση $R_{AW}=2\int_0^{\infty} S(\omega)\frac{Raw(\omega)}{\zeta\alpha^2}d\omega$ πρέπει να εφαρμοστεί για όλα τα sea states. Στο Σχήμα 13 παρουσιάζεται η αδιάστατη Raw συναρτήσει της περιόδου κορυφής Tp:

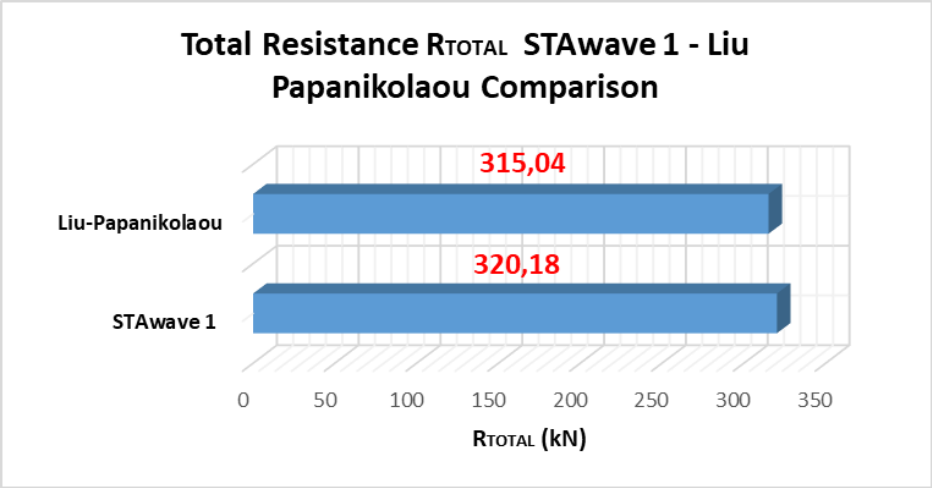


Σχήμα 13: Διάγραμμα της αδιάστατης Raw συναρτήσει της περιόδου κορυφής Tp

Σύμφωνα με το Σχήμα 13, η μέγιστη Raw για το φάσμα JOHNSWAP και για περιόδους κορυφής 7-15 sec ισούται με 315,04 kN όταν Tp=9,6 sec.

Σύγκριση Αποτελεσμάτων STAWAVE-1/LIU-PAPANIKOLAOU

Η πρόσθετη αντίσταση σε κυματισμούς παίρνει 2 διαφορετικές τιμές, ανάλογα με τη μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε (STAWAVE-1, Liu-Papanikolaou ημι-εμπειρική σχέση). Οι τιμές παρουσιάζονται στο παρακάτω Σχήμα:



Σχήμα 14: Σύγκριση των 2 μεθόδων

Παρατηρείται ότι οι 2 τιμές έχουν μικρή απόκλιση μεταξύ τους. Για να υπάρξει μια πιο συντηρητική εκτίμηση των αποτελεσμάτων αναφορικά με την ελάχιστη ισχύ πρόωσης του πλοίου, θα χρησιμοποιηθεί η STAWAVE-1 που έδωσε μεγαλύτερη τιμή αντίστασης.

3.2.2.4 Υπολογισμός Rapp (Αντίσταση Παρελκόμενων)

Θεωρήθηκε ότι η αντίσταση των παρελκομένων Rapp είναι ίση με το 4% της αντίστασης σε ήρεμο νερό. Συνεπώς, **Rapp = 0.04*Rcw =1576,86 N**

3.2.2.5 Υπολογισμός απαιτούμενης ώσης προπέλας

Αρχικά, βρέθηκε ο συντελεστής ομόρου (w) και ο συντελεστής μείωσης ώσης (t) μέσω εμπειρικών σχέσεων. Χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω εμπειρικές σχέσεις [13]:

- Kruger: $w=0,75C_B-0,24$
- Hecksher: $w=0,7C_P-0,18$
- Troost: $w=0,25+2,5(C_B-0,6)^2$

Εξίσωση 26: Συντελεστής ομόρου

- S.S.P.A: $t=1,57-(C_B*(2,3-1,5C_{WL})/C_{WL})*w$
- Hecksher: $t=0,5C_P-0,12$
- Danckwardt: $t= 0,5C_B-0,15$

Εξίσωση 27: Συντελεστής μείωσης ώσης

Τα αποτελέσματα λήφθηκαν από τον μέσο όρο των εξισώσεων 26 για τον συντελεστή ομόρου και από τον μέσο όρο των εξισώσεων 27 για τον συντελεστή μείωσης ώσης όπως φαίνεται και στον Πίνακα 18.

Πίνακας 18: Υπολογισμός t,w [13]

Συντελεστής ομόρρου	
Kruger	0,3825
Hecksher	0,4031
Troost	0,3823
w =	0,38928333
Συντελεστής μείωσης ώσης	
S.S.P.A.	0,2763
Hecksher	0,2965
Danckwardt	0,2650
t =	0,27925390

Επομένως, η απαιτούμενη ώση της προπέλας θα είναι:

$$\mathbf{T = \frac{Rcw + Rair + Raw + Rapp}{1 - t} = 610697,07\ N}$$

Αφού υπολογίστηκε η απαιτούμενη ώση , θα υπολογιστεί το πηλίκο

$$\frac{Kt}{J^2} = \frac{T}{\rho * Va^2 * Dp^2}$$

Εξίσωση 28:Kt/J^2

Όπου:

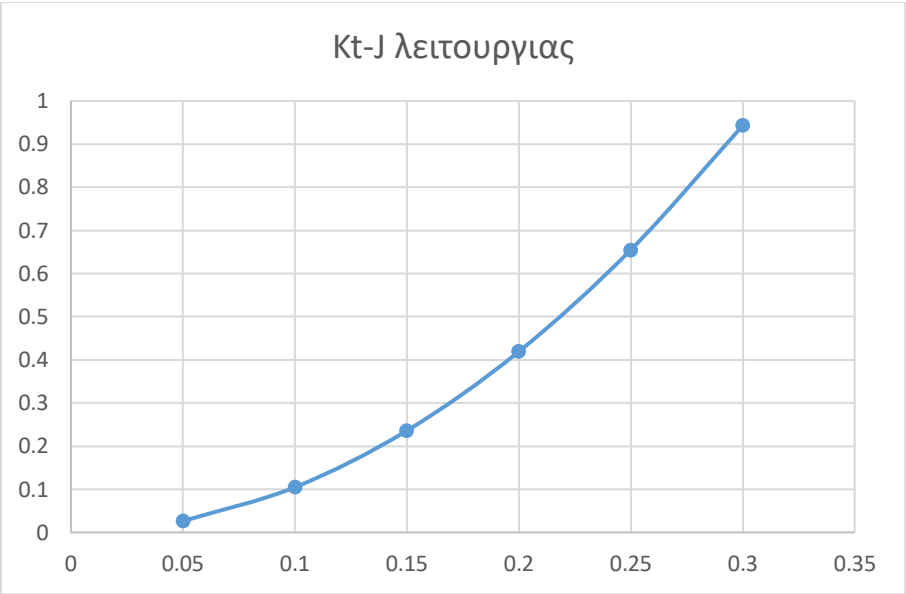
- Va = Vs(1-w) = 1,257 m/s
- D_P = 6 m , η διάμετρος της προπέλας

Άρα **K_T/J^2= 10,479**

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε η γραφική παράσταση $\boldsymbol{K_T(J)}$ **λειτουργίας** (Σχήμα 15) για τιμές του J από $0{,}05 - 0{,}3$ με βάση την παραπάνω σχέση.

Πίνακας 19: Ζεύγη τιμών J, Kt στην κατάσταση λειτουργίας

J	Kt
0,05	0,026198
0,1	0,104791
0,15	0,235779
0,2	0,419163
0,25	0,654942
0,3	0,943117

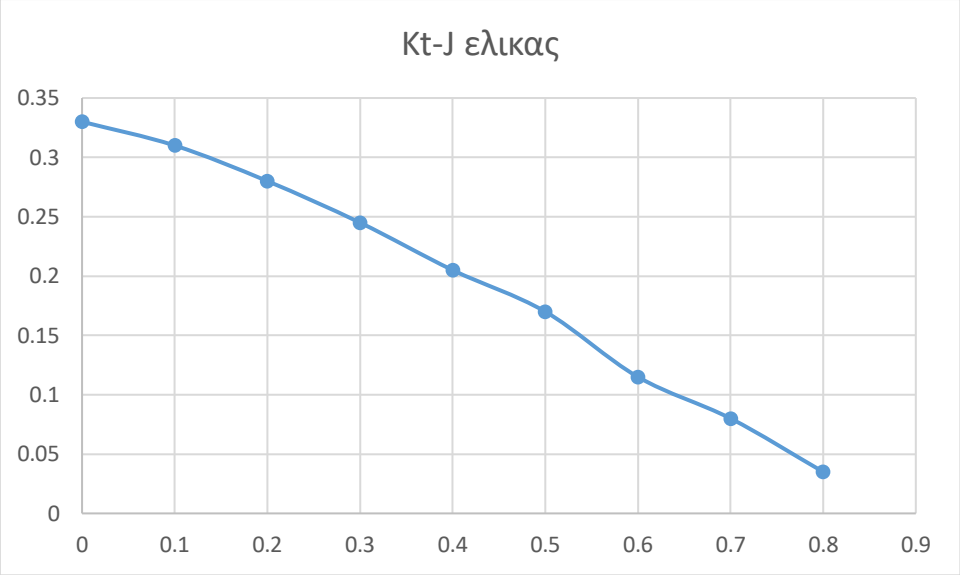


Σχήμα 15: Kt-J λειτουργίας

Έπειτα πραγματοποιήθηκε η γραφική παράσταση **Kt-(J) ελεύθερης ροής** για τιμές του J από $0{,}05 - 0{,}3$ της έλικας του πλοίου σε ελεύθερη ροή (Σχήμα 16). Οι τιμές θα υπολογιστούν από το διάγραμμα ελεύθερης ροής της έλικας WAGENINGEN B4-60 (Σχήμα 7-Πίνακας 20).

Πίνακας 20: Ζεύγη τιμών J-Kt ελεύθερης ροής

J	Kt
0	0,33
0,1	0,31
0,2	0,28
0,3	0,245
0,4	0,205
0,5	0,17
0,6	0,115
0,7	0,08
0,8	0,035

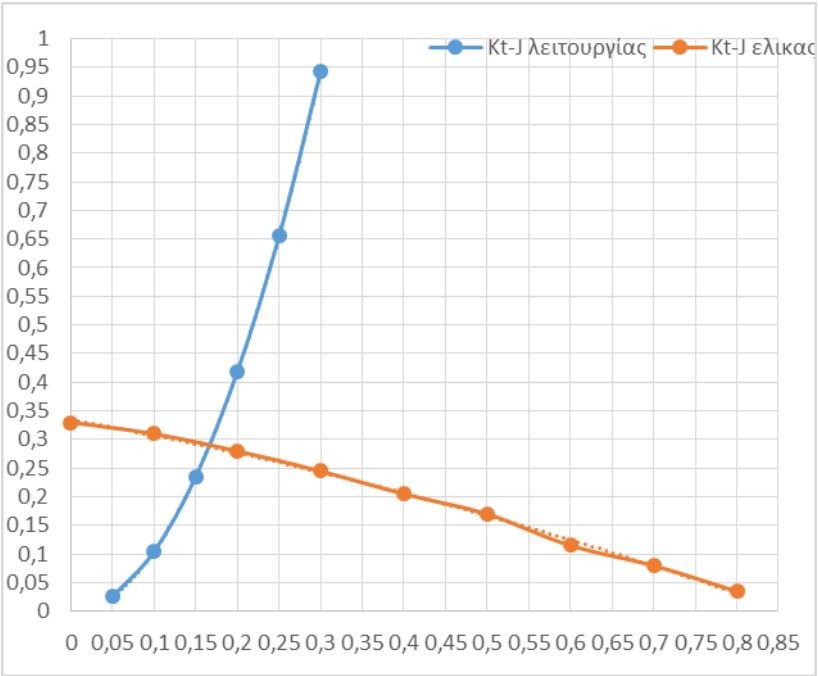


Σχήμα 16: Kt-J έλικας σε ελεύθερη ροή

Το σημείο τομής των 2 καμπυλών θα αποτελεί το σημείο λειτουργίας της προπέλας στην κατάσταση της κίνησης του πλοίου με τη ταχύτητα των 4 κόμβων. Έτσι, από το Σχήμα 17 προκύπτει ότι:

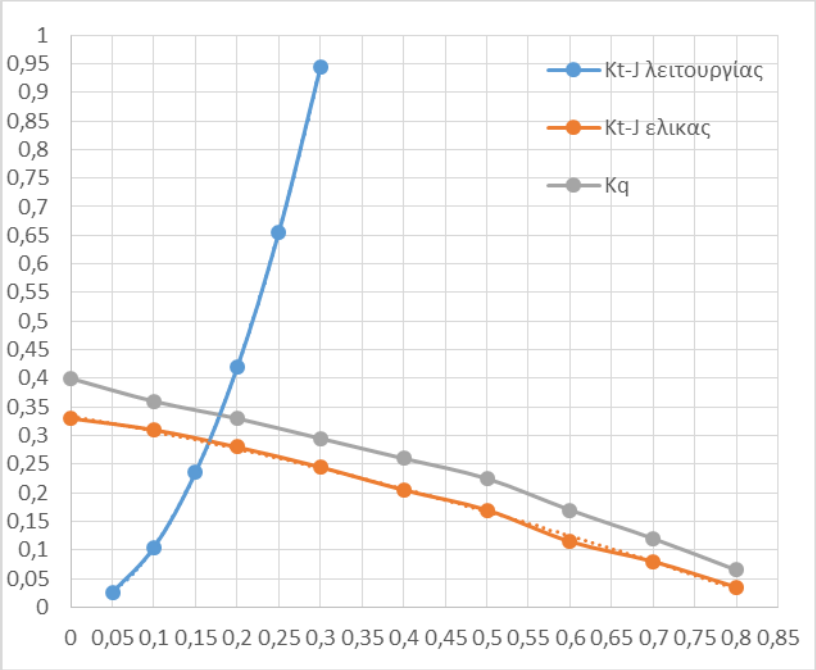
$$\boldsymbol{J = 0,16}$$

$$\boldsymbol{K_T = 0,2682}$$



Σχήμα 17: Εύρεση σημείου λειτουργίας προπέλας για τους 4 κόμβους

Σχεδιάζεται και η γραφική Kq-J (Σχήμα 18) και προκύπτει με παρόμοιο τρόπο ότι **Kq=0,034**



Σχήμα 18: Εύρεση Kq

Έπειτα , με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης, υπολογίστηκαν οι απαιτούμενες στροφές της έλικας από τη σχέση:

$$n = \frac{Va}{J*Dp}$$

Εξίσωση 29: Απαιτούμενες στροφές έλικας

Όπου προκύπτει ότι n= 1,309 RPS

Τέλος, η αποδιδόμενη ισχύς στην προπέλα με στροφές n υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$P_D = \frac{2\pi*\rho*n^3 Dp^5*Kq}{nR}$$

Εξίσωση 30: Αποδιδόμενη ισχύς στην προπέλα

Όπου προκύπτει ότι P_D=3819,79 kW με n_R=1 οπότε και

$$\boldsymbol{Pmin,power = \frac{PD}{nt} = 3897,75\ kW}$$

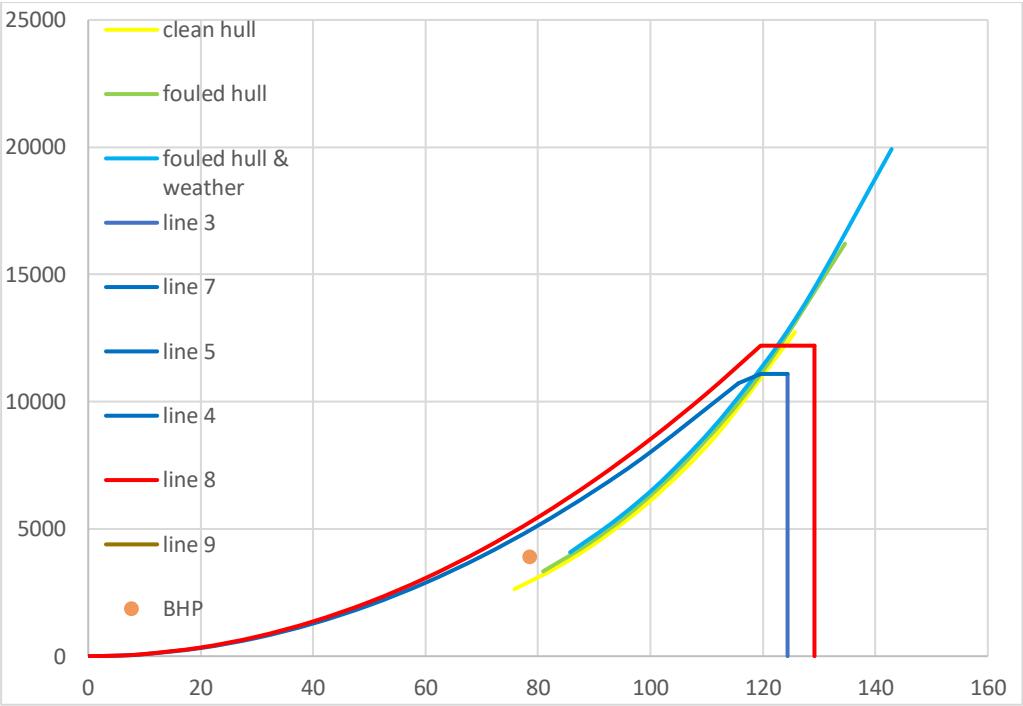
Εξίσωση 31:BHP

Παρατηρείται ότι $Pmin, power \leq P(MCR)$, άρα ικανοποιείται και το 2ο Επίπεδο Ελέγχου.

Πίνακας 21:Έλεγχος ικανοποίησης 2ου επιπέδου ελέγχου

wake fraction (w)	0,389
συντελεστής μείωσης ώσης (t)	0,279
T (N)	610697,094
Va(m/s)	1,257
Dp (m)	6,000
Kt(J)/J^2	10,479
J	0,160
n(rps)	1,309
10Kq	0,340
kq	0,034
Pd(kW)	3819,794
Pmin,power (kW)	3897,749
Qp	464400,898

Τέλος, σχεδιάζεται το loading diagram μαζί με το σημείο λειτουργίας υπό αυτές τις συνθήκες ώστε να ελεγχθεί αν η συγκεκριμένη κατάσταση μπορεί να επιτευχθεί.



Σχήμα 19: Σημείο λειτουργίας Pmin,power στο Loading Diagram

Το σημείο λειτουργίας βρίσκεται εντός ορίων του loading diagram, συνεπώς η μηχανή μπορεί να λειτουργήσει ικανοποιητικά υπό αυτές τις συνθήκες.

4. Τροποποιημένοι Δείκτες EEDI

Με βάση τη μεθοδολογία που έχει προαναφερθεί, ακολουθεί η εξέταση των διαφόρων παραμέτρων και πώς αυτοί μπορούν να επηρεάσουν τον EEDI και να δημιουργήσουν τροποποιημένους δείκτες. Η παράγραφος 4.1 απευθύνεται στην παράμετρο της ισχύος της μηχανής, που δεν λειτουργεί πάντα στο 75% MCR , οι παράγραφοι 4.2-4.4 και 4.6 στην αύξηση της αντίστασης του πλοίου και η παράγραφος 4.5 στις διάφορες καταστάσεις φόρτωσης με επακόλουθο την διαφοροποίηση του βυθίσματος. Στην παράγραφο 4.7 εξετάζεται η ταυτόχρονη επίδραση τραχύτητας και καιρού και τέλος στην παράγραφο 4.8 υπολογίζονται οι τροποποιημένοι δείκτες.

4.1 Διαφορετικά σημεία λειτουργίας της μηχανής του πλοίου

Θα εξεταστεί η συμπεριφορά του δείκτη για τις περιπτώσεις που το πλοίο κινείται με ισχύ 25%, 50%, 75% και 100% του MCR αντίστοιχα. Ο δείκτης για 75% MCR υπολογίστηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο καθότι αντιστοιχεί στον κλασσικό δείκτη EEDI. Για τα υπόλοιπα σημεία λειτουργίας, πρέπει να βρεθεί η ειδική κατανάλωση καυσίμου για κάθε περίπτωση. Αυτό συμβαίνει διότι η απόδοση της μηχανής δεν είναι ίδια για κάθε ζήτηση ισχύος και έτσι για διαφορετικές τιμές της ισχύς, η ειδική κατανάλωση μεταβάλλεται. Από το πρόγραμμα GTD της εταιρίας WINGD υπολογίζονται οι ειδικές καταναλώσεις καυσίμου για κάθε ισχύ (Πίνακας 6).

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του προγράμματος :

- SFOC=172,8 g/kWh για P_{ME}=25%MCR=3053,75 kW
- SFOC=168,2 g/kWh για P_{ME}=50%MCR=6107,5 kW
- SFOC=172 g/kWh για P_{ME}=100%MCR=12215 kW

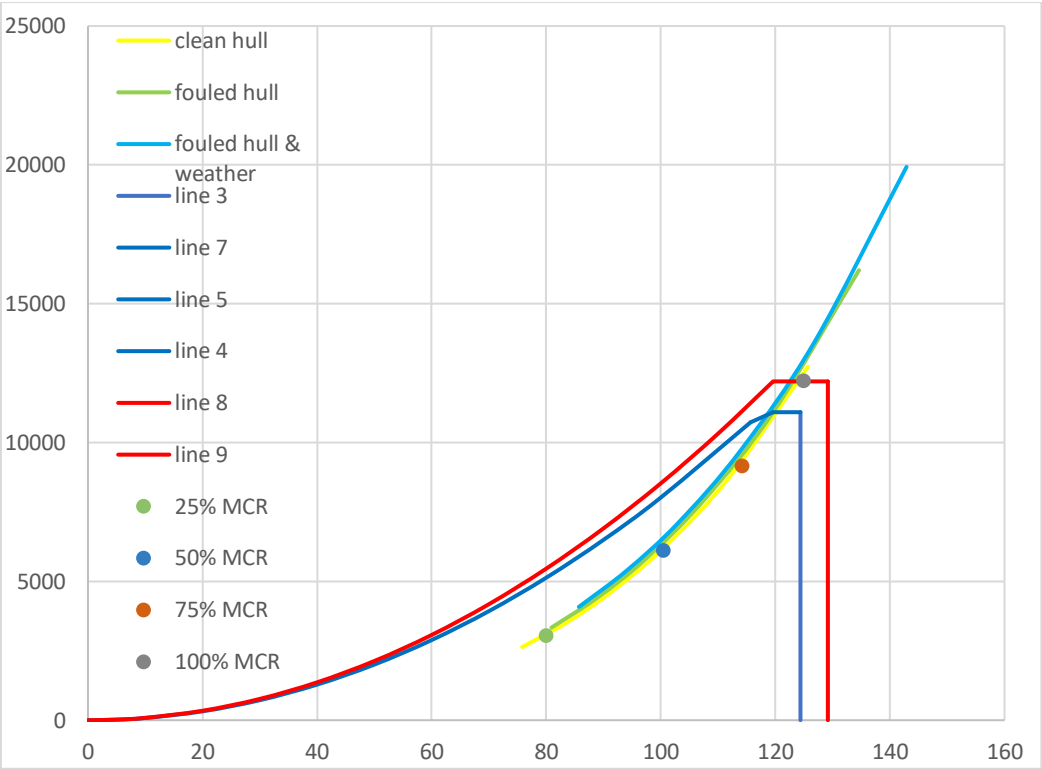
Από το πρόγραμμα PROPULSION [26] λαμβάνονται τα αποτελέσματα για τα Vref, T, n, J για τις συγκεκριμένες περιπτώσεις (δόθηκαν τιμές στα SHP και χ)[ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α]

Έχοντας πλέον δεδομένη την ταχύτητα αναφοράς και την ειδική κατανάλωση καυσίμου, και τα υπόλοιπα μεγέθη ίδια με τη περίπτωση του κλασσικού δείκτη, μπορούν να υπολογιστούν οι τροποποιημένοι δείκτες (Πίνακας 22).

Πίνακας 22: EEDI για 25-50-75-100 % MCR

CASE 1: Διαφορετικό σημείο λειτουργίας ME				
	25% MCR	50% MCR	75% MCR	100% MCR
Capacity DWT	43035	43035	43035	43035
Type of Ship	Bulk Carrier	Bulk Carrier	Bulk Carrier	Bulk Carrier
Vref(knots)	10,65	13,035	14,22	14,98
MCRme(kW)	12215	12215	12215	12215
Pme(kW)	3053,75	6107,5	9161,25	12215
Type of Fuel	HFO	HFO	HFO	HFO
Cfme	3,114	3,114	3,114	3,114
SFCme(g/kWh)	172,8	168,2	166,9	172
Pae(kW)	555,375	555,375	555,375	555,375
Type of Fuel	HFO	HFO	HFO	HFO
Cfae	3,114	3,114	3,114	3,114
SFCae(g/kWh)	184	184	184	184
fw	1	1	1	1
fj	1	1	1	1
fi	1,012	1,012	1,012	1,012
fc	1	1	1	1
EEDI att [gC02/ t.nm]	4,229	6,196	8,202	10,516
n[RPM]	80,05	100,43	114,2	124,92

Τοποθετώντας τα 4 σημεία στο Loading Diagram γίνεται αντιληπτό ότι δεν είναι δυνατόν το πλοίο να κινείται χρησιμοποιώντας το 100% του MCR αδιάκοπτα, καθότι υπάρχει υπέρβαση του ορίου συνεχούς λειτουργίας του κινητήρα. Επίσης είναι φανερό ότι η λειτουργία στο 25% και στο 50% του MCR δεν είναι αποδοτική.



Σχήμα 20: Σημεία λειτουργίας 25-50-75-100 % MCR στο Loading Diagram

Για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω, θα ακολουθηθεί η ίδια διαδικασία για να υπολογιστούν οι τροποποιημένοι δείκτες για ποσοστά ισχύος στην περιοχή κοντά στο 75% MCR (65-85%)

Χρησιμοποιείται το πρόγραμμα GTD της εταιρίας WINGD για να υπολογιστούν οι ειδικές καταναλώσεις καυσίμου για κάθε ισχύ (Πίνακας 6).

- SFOC=166,7 g/kWh για Pme=65%MCR=7939,75 kW
- SFOC=166,7 g/kWh για Pme=70%MCR=8550,5 kW
- SFOC=167,4 g/kWh για Pme=80%MCR=9772 kW
- SFOC=168, 4 g/kWh για Pme=85%MCR=10382,75 kW

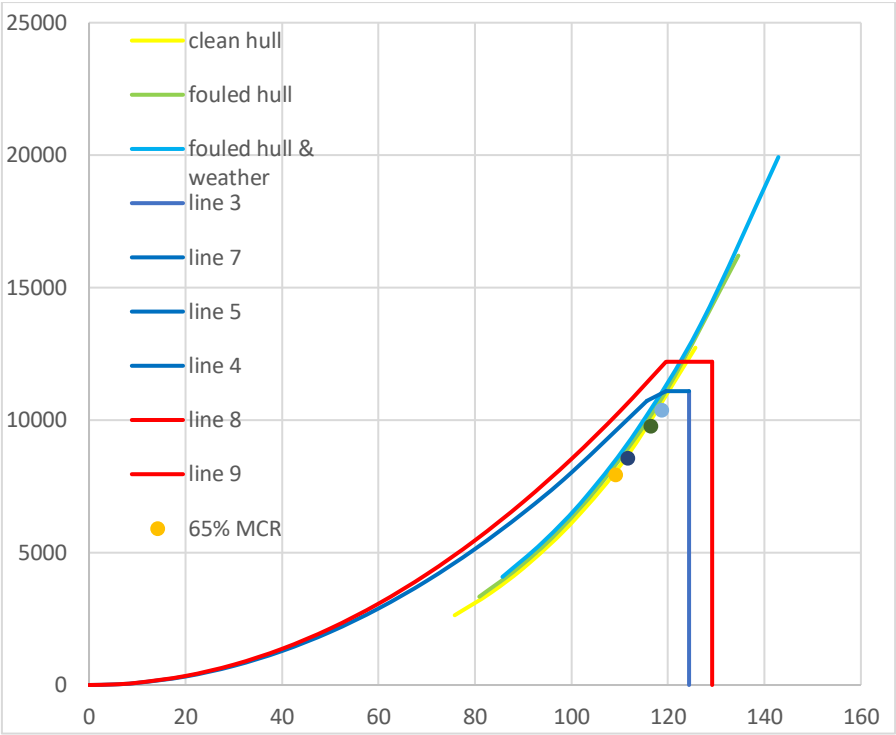
Από το πρόγραμμα PROPULSION [26] λαμβάνονται τα αποτελέσματα για τα Vref, T, n, J για τις συγκεκριμένες περιπτώσεις (δόθηκαν τιμές στα SHP και χ)[ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α]:

Έχοντας πλέον δεδομένη την ταχύτητα αναφοράς και την ειδική κατανάλωση καυσίμου, και τα υπόλοιπα μεγέθη ίδια με τη περίπτωση του κλασσικού δείκτη, μπορούν να υπολογιστούν οι τροποποιημένοι δείκτες.

Πίνακας 23: EEDI για 65-70-80-85 % MCR

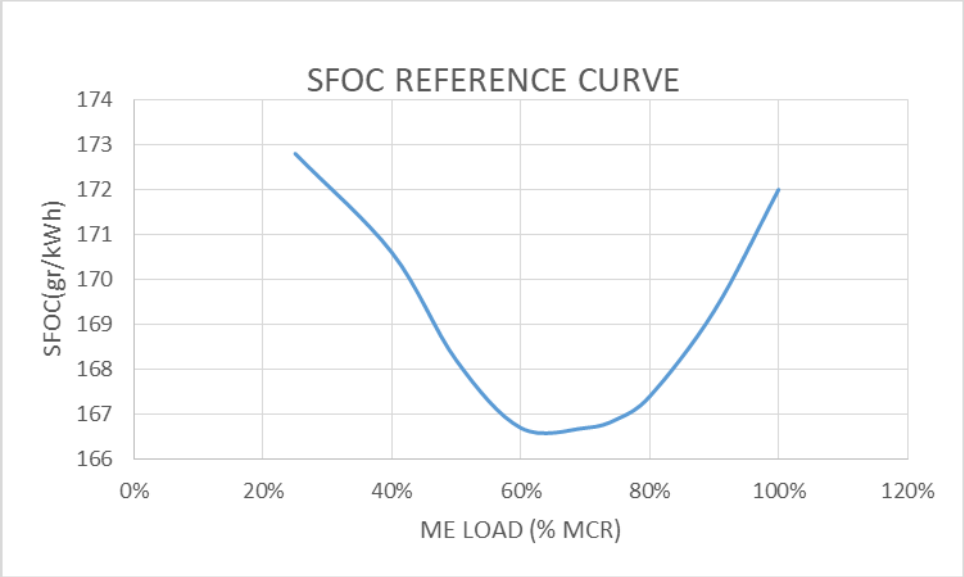
CASE 1':Περιοχή γύρω από το 75% MCR					Κλασσικός EEDI
	65% MCR	70% MCR	80% MCR	85% MCR	75% MCR
Capacity DWT	43035	43035	43035	43035	43035
Type of Ship	Bulk Carrier	Bulk Carrier	Bulk Carrier	Bulk Carrier	Bulk Carrier
Vref(knots)	13,82	14,03	14,39	14,55	14,22
MCRme(kW)	12215	12215	12215	12215	12215
Pme(kW)	7939,75	8550,5	9772	10382,75	9161,25
Type of Fuel	HFO	HFO	HFO	HFO	HFO
Cfme	3,114	3,114	3,114	3,114	3,114
SFCme(g/kWh)	166,7	166,7	167,4	168,4	166,9
Pae(kW)	555,375	555,375	555,375	555,375	555,375
Type of Fuel	HFO	HFO	HFO	HFO	HFO
Cfae	3,114	3,114	3,114	3,114	3,114
SFCae(g/kWh)	184	184	184	184	184
fw	1	1	1	1	1
fj	1	1	1	1	1
fi	1,012	1,012	1,012	1,012	1,012
fc	1	1	1	1	1
EEDI att [gC02/ t.nm]	7,376	7,785	8,636	9,094	8,202
n[RPM]	109,2	111,7	116,5	118,7	114,2

Αποδεικνύεται λοιπόν ότι η περιοχή γύρω από το 75% του MCR είναι η ενδεδειγμένη καθώς τα σημεία στη περιοχή αυτή βρίσκονται μέσα στα όρια κανονικής λειτουργίας (Σχήμα 21) και επιτρέπουν στο πλοίο να ταξιδεύει με αυτή την ισχύ χωρίς να δημιουργείται πρόβλημα και κρατώντας παράλληλα την ειδική κατανάλωση καυσίμου σε χαμηλότερα επίπεδα σε σχέση με τη λειτουργία σε πιο απομακρυσμένα σημεία από το 75%.



Σχήμα 21: Σημεία λειτουργίας 65-70-80-85 % MCR στο Loading Diagram

Πράγματι, σχεδιάζοντας το διάγραμμα της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου συναρτήσει του ποσοστού της ισχύος επί τις εκατό του MCR (Σχήμα 22), επαληθεύονται τα προηγούμενα συμπεράσματα.



Σχήμα 22: Ειδική κατανάλωση καυσίμου

4.2 Αυξημένη αντίσταση (χ≠0) και Vref=14 knots

Το πλοίο κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του και μέχρι τον επόμενο δεξαμενισμό, αντιμετωπίζει αυξημένη αντίσταση λόγω ρύπανσης της γάστρας, της έλικας και των παρελκόμενων. Παράλληλα, μπορεί να βρεθεί αντιμέτωπο με διάφορες καταστάσεις θάλασσας, ανέμου και ακραίων μετεωρολογικών συνθηκών. Για αυτό τον λόγο υπάρχει η ανάγκη να υπολογιστεί ένας τροποποιημένος δείκτης EEDI που να λαμβάνει υπόψη αυτή την αύξηση της αντίστασης. Για την αύξηση της αντίστασης σε αυτή την περίπτωση θα θεωρηθεί ότι το πλοίο κινείται με την ίδια Vref των 14 κόμβων, με επακόλουθο την αύξηση στην ζήτηση ισχύος.

Η συγκεκριμένη περίπτωση αποτελεί γενίκευση των παραγράφων 4.4 και 4.6 όπου η αύξηση της αντίστασης θα υπολογιστεί για διάφορες καταστάσεις θάλασσας και για τραχύτητα γάστρας και τα αποτελέσματα των οποίων θα χρησιμοποιηθούν στον υπολογισμό των τροποποιημένων EEDI όσο αναφορά την κατάσταση λειτουργίας.

Από το πρόγραμμα PROPULSION [27] λαμβάνονται τα αποτελέσματα για τα SHP, T, n, J για τις περιπτώσεις αύξησης της αντίστασης κατά 10/20/30 και 50% (χ=0,1/0,2/0,3/0,5) και Vref=14 knots (δόθηκαν τιμές στα Vref και χ) [ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α].

Με δεδομένη πλέον την ισχύ που απαιτείται, χρησιμοποιείται το πρόγραμμα GTD της εταιρίας WINGD για να υπολογιστούν οι ειδικές καταναλώσεις καυσίμου για κάθε ισχύ (Πίνακας 6).

Η ισχύς για χ=0,1 αποτελεί το 78,4% του MCR και με γραμμική παρεμβολή μεταξύ του 75% design και 80% design, υπολογίζεται ότι **SFOC=167,24 g/kWh**

Η ισχύς για χ=0,2 αποτελεί το 87,7% του MCR και με γραμμική παρεμβολή μεταξύ του 85% design και 90% design, υπολογίζεται ότι **SFOC=169 g/kWh**

Η ισχύς για χ=0,3 αποτελεί το 97,3% του MCR και με γραμμική παρεμβολή μεταξύ του 95% design και 100% design, υπολογίζεται ότι **SFOC=171,2 g/kWh**

Η ισχύς για χ=0,5 υπερβαίνει το 110% του MCR και η μηχανή δεν δύναται να επιτύχει τη ταχύτητα των 14 κόμβων για χ=0,5

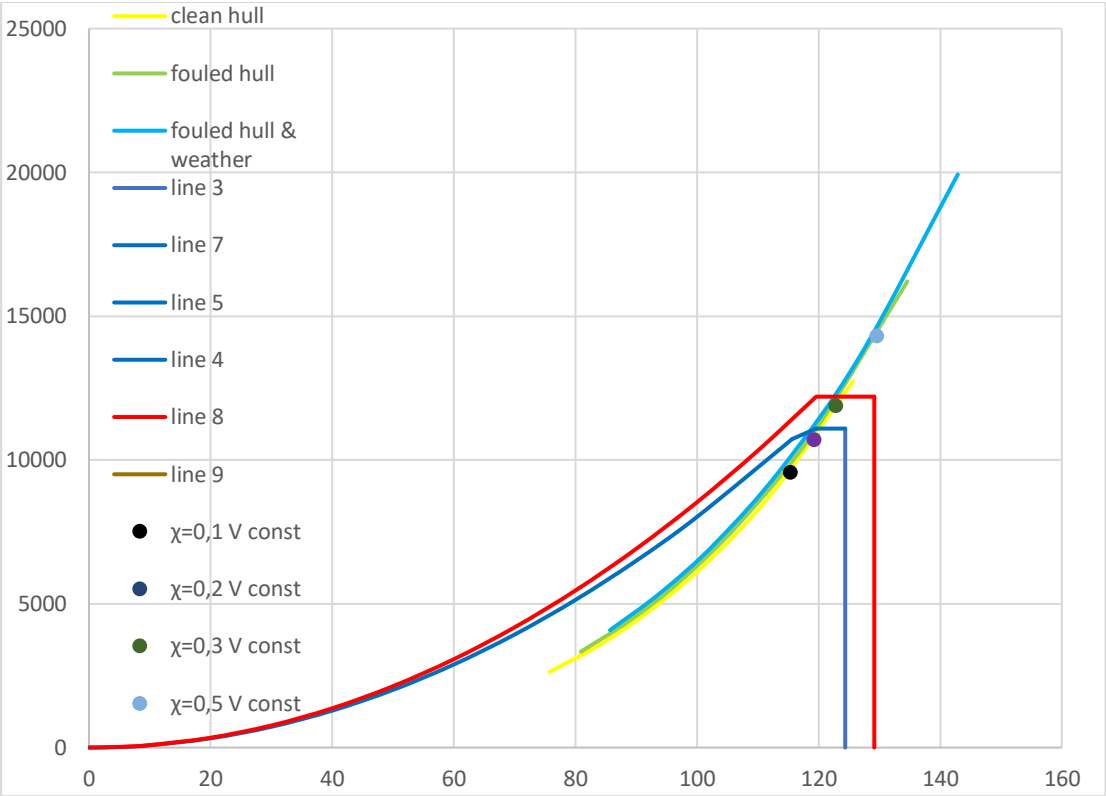
Η ισχύς των βοηθητικών μηχανών, θεωρείται ίδια με αυτή του αρχικού δείκτη, το ίδιο και οι καταναλώσεις τους.

Πλέον όλα τα δεδομένα είναι διαθέσιμα για τον υπολογισμό των τροποποιημένων EEDI (Πίνακας 24).

Πίνακας 24: EEDI για αυξημένη αντίσταση κατά χ και Vref=14 knots

CASE 2					Κλασσικός EEDI
2.1: Ισχύς για δεδομένα V και χ					
	χ=0,1 Vref=14 kn	χ=0,2 Vref=14 kn	χ=0,3 Vref=14 kn	χ=0,5 Vref=14 kn	χ=0 Vref=14 kn
Capacity DWT	43035	43035	43035	43035	43035
Type of Ship	Bulk Carrier	Bulk Carrier	Bulk Carrier	Bulk Carrier	Bulk Carrier
Vref(knots)	14	14	14	14	14,22
MCRme(kW)	12215	12215	12215	12215	12215
Pme(kW)	9573,163	10714,286	11885,510	14322,449	9161,250
Type of Fuel	HFO	HFO	HFO	HFO	HFO
Cfme	3,114	3,114	3,114	3,114	3,114
SFCme(g/kWh)	167,24	169	171,2	Υπερβαση	166,9
Pae(kW)	555,375	555,375	555,375	555,375	555,375
Type of Fuel	HFO	HFO	HFO	HFO	HFO
Cfae	3,114	3,114	3,114	3,114	3,114
SFCae(g/kWh)	184	184	184	184	184
fw	1	1	1	1	1
fj	1	1	1	1	1
fi	1,012	1,012	1,012	1,012	1,012
fc	1	1	1	1	1
EEDI att [gCO2/ t.nm]	8,699	9,770	10,914	-	8,202
n[RPM]	115,4	119,2	122,8	129,6	114,2

Όπου $Pme = \frac{SHP}{ns} = \frac{SHP}{0,98}$



Σχήμα 23: Σημεία λειτουργίας χ=0,1 χ=0,2 χ=0,3 και χ=0,5 (Vref=14 knots) στο Loading Diagram

Τα σημεία λειτουργίας για τις 2 πρώτες περιπτώσεις βρίσκονται εντός των ορίων κανονικής λειτουργίας του διαγράμματος φόρτισης της μηχανής του πλοίου. Για χ=0,3 δεν είναι δυνατόν η μηχανή να λειτουργήσει σε αυτό το σημείο σε μόνιμη κατάσταση και για χ=0,5 έχουν ξεπεραστεί και τα όρια υπερφόρτωσης του κινητήρα (Σχήμα 23).

4.3 Αυξημένη αντίσταση (χ≠0) και P_{ME}=75% MCR

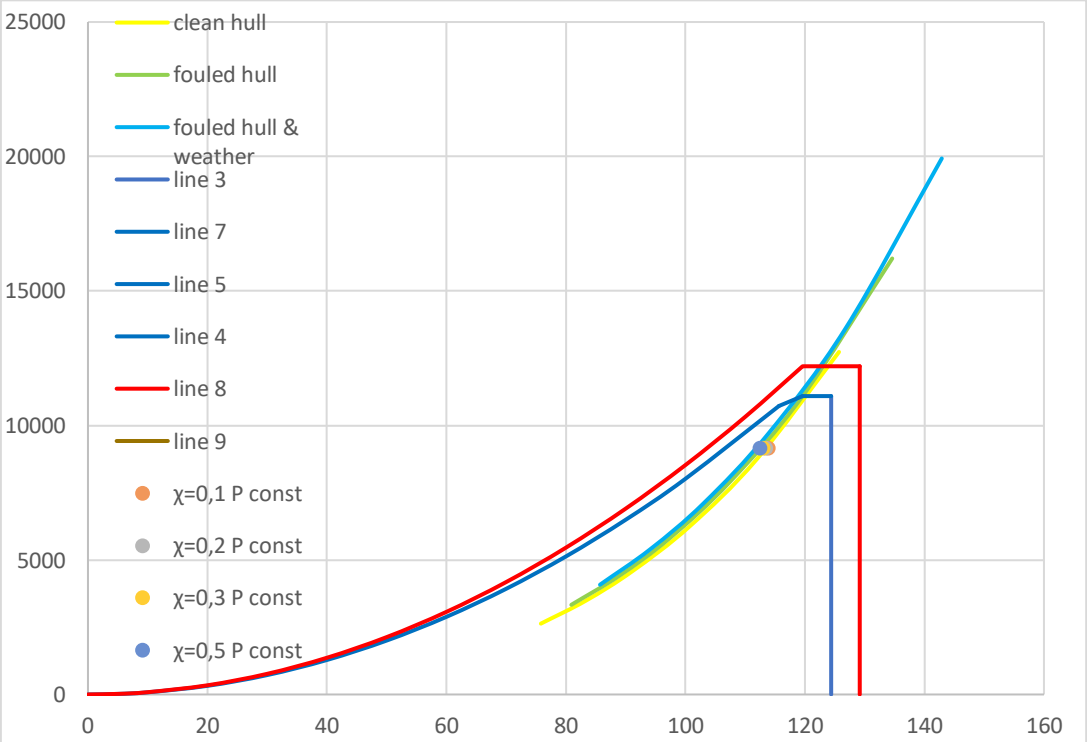
Με εντελώς ανάλογο τρόπο, αλλά με την υπόθεση ότι διατηρείται σταθερή η ισχύς της μηχανής (άρα και οι καταναλώσεις καυσίμου μένουν ίδιες με τον κλασικό δείκτη) και όχι η ταχύτητα αναφοράς όπως προηγουμένως, υπολογίζεται η ταχύτητα που θα επιτύχει το πλοίο για την δεδομένη ισχύ (75% MCR) και την αύξηση της αντίστασης κατά χ όπως προηγουμένως.

Από το πρόγραμμα PROPULSION [27] λαμβάνονται τα αποτελέσματα για τα Vref, T, n, J για τις συγκεκριμένες περιπτώσεις αυξημένης αντίστασης (για χ=0,1 χ=0,2 χ=0,3 και χ=0,5 και P_{ME}=9161,25 kW (δόθηκαν τιμές στα SHP και χ) [ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α].

Πλέον όλα τα δεδομένα είναι διαθέσιμα για τον υπολογισμό των τροποποιημένων EEDI (Πίνακας 25).

Πίνακας 25: EEDI για αυξημένη αντίσταση κατά χ και PME=75% MCR

CASE 2'					Κλασσικός EEDI
2.2: Ταχύτητα για δεδομένα P και χ					
	χ=0,1 Pme=9161,25 kW	χ=0,2 Pme=9161,25 kW	χ=0,3 Pme=9161,25 kW	χ=0,5 Pme=9161,25 kW	χ=0 Pme=9161,25 kW
Capacity DWT	43035	43035	43035	43035	43035
Type of Ship	Bulk Carrier	Bulk Carrier	Bulk Carrier	Bulk Carrier	Bulk Carrier
Vref(knots)	13,88	13,56	13,24	12,66	14,22
MCRme(kW)	12215	12215	12215	12215	12215
Pme(kW)	9161,25	9161,25	9161,25	9161,25	9161,25
Type of Fuel	HFO	HFO	HFO	HFO	HFO
Cfme	3,114	3,114	3,114	3,114	3,114
SFCme(g/kWh)	166,9	166,9	166,9	166,9	166,9
Pae(kW)	555,375	555,375	555,375	555,375	555,375
Type of Fuel	HFO	HFO	HFO	HFO	HFO
Cfae	3,114	3,114	3,114	3,114	3,114
SFCae(g/kWh)	184	184	184	184	184
fw	1	1	1	1	1
fj	1	1	1	1	1
fi	1,012	1,012	1,012	1,012	1,012
fc	1	1	1	1	1
EEDI att [gCO2/ t.nm]	8,403	8,601	8,809	9,213	8,202
n[RPM]	113,8	113,4	113	112,4	114,2



Σχήμα 24: Σημεία λειτουργίας χ=0,1 χ=0,2 χ=0,3 και χ=0,5 (PME=75% MCR) στο Loading Diagram

Τα συγκεκριμένα σημεία λειτουργίας βρίσκονται όλα εντός ορίων κανονικής λειτουργίας της μηχανής του πλοίου από τη στιγμή που διατηρήθηκε σταθερή η

ισχύς της μηχανής, παρόλα αυτά δεν είναι δυνατή η επίτευξη της ταχύτητας αναφοράς των 14 κόμβων από τη στιγμή που για αυξημένη αντίσταση το πλοίο κινείται με την ίδια ισχύ (Σχήμα 24).

4.4 Υπολογισμός $EEDI_{weather}$ για διάφορες καταστάσεις θάλασσας

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, ο EEDI αναφέρεται σε ήρεμη θάλασσα που είναι η εξαίρεση καθώς το πλοίο κατά τη διάρκεια ενός μεγάλου κυκλικού ταξιδιού μπορεί να έρθει αντιμέτωπο με πολλές καταστάσεις θάλασσας και διάφορες ταχύτητες και διευθύνσεις ανέμου. Οπότε για να υπάρχει μια πιο αντικειμενική θεώρηση του δείκτη και της ακρίβειας του, θα υπολογιστεί ο δείκτης $EEDI_{weather}$ σε μια συγκεκριμένη περιοχή, για ορισμένες καταστάσεις θάλασσας, ταχύτητες και διευθύνσεις ανέμου. Αυτό που ουσιαστικά αλλάζει σε σχέση με τον EEDI είναι η αύξηση της αντίστασης λόγω ανέμου και κυματισμών. Η αύξηση της αντίστασης λόγω κυματισμών θα υπολογισθεί μέσω 3 μεθόδων υπολογισμού και της εκτέλεσης τους στο excel. Η μελέτη περίπτωσης που θα εξεταστεί αφορά την λειτουργία του πλοίου στον Βόρειο Ατλαντικό και τις διάφορες καταστάσεις θάλασσας που θα αντιμετωπίσει το πλοίο στη συγκεκριμένη περιοχή. Συνεπώς, προκύπτει ένας $EEDI_{weather}$ που θα υποδεικνύει την ενεργειακή αποδοτικότητα του πλοίου κάτω από αυτές τις συνθήκες.

Πίνακας 26: Πιθανότητα εμφάνισης κάθε sea state (North Atlantic) [19]

Number of occurrences: 100 000 / T_z (s) = average zero-crossing wave period / H_s (m) = significant wave height																
Tz (s) ► / Hs (m) ▼	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5	16.5	17.5	18.5
0.5	1.3	133.7	865.6	1186.0	634.2	186.3	36.9	5.6	0.7	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1.5	0.0	29.3	986.0	4976.0	7738.0	5569.7	2375.7	703.5	160.7	30.5	5.1	0.8	0.1	0.0	0.0	0.0
2.5	0.0	2.2	197.5	2158.8	6230.0	7449.5	4860.4	2066.0	644.5	160.2	33.7	6.3	1.1	0.2	0.0	0.0
3.5	0.0	0.2	34.9	695.5	3226.5	5675.0	5099.1	2838.0	1114.1	337.7	84.3	18.2	3.5	0.6	0.1	0.0
4.5	0.0	0.0	6.0	196.1	1354.3	3288.5	3857.5	2685.5	1275.2	455.1	130.9	31.9	6.9	1.3	0.2	0.0
5.5	0.0	0.0	1.0	51.0	498.4	1602.9	2372.7	2008.3	1126.0	463.6	150.9	41.0	9.7	2.1	0.4	0.1
6.5	0.0	0.0	0.2	12.6	167.0	690.3	1257.9	1268.6	825.9	386.8	140.8	42.2	10.9	2.5	0.5	0.1
7.5	0.0	0.0	0.0	3.0	52.1	270.1	594.4	703.2	524.9	276.7	111.7	36.7	10.2	2.5	0.6	0.1
8.5	0.0	0.0	0.0	0.7	15.4	97.9	255.9	350.6	296.9	174.6	77.6	27.7	8.4	2.2	0.5	0.1
9.5	0.0	0.0	0.0	0.2	4.3	33.2	101.9	159.9	152.2	99.2	48.3	18.7	6.1	1.7	0.4	0.1
10.5	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	10.7	37.9	67.5	71.7	51.5	27.3	11.4	4.0	1.2	0.3	0.1
11.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	3.3	13.3	26.6	31.4	24.7	14.2	6.4	2.4	0.7	0.2	0.1
12.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	1.0	4.4	9.9	12.8	11.0	6.8	3.3	1.3	0.4	0.1	0.0
13.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	1.4	3.5	5.0	4.6	3.1	1.6	0.7	0.2	0.1	0.0
14.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.4	1.2	1.8	1.8	1.3	0.7	0.3	0.1	0.0	0.0
15.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.4	0.6	0.7	0.5	0.3	0.1	0.1	0.0	0.0
16.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0

4.4.1 1η μέθοδος υπολογισμού

Η κάθε κατάσταση θάλασσας (sea state) ορίζεται από ένα σημαντικό ύψος κύματος και από μία περίοδο κορυφής. Στον Πίνακα 26 φαίνονται τα διάφορα ύψη κύματος, οι περίοδοι κορυφής (sea states) που εμφανίζονται στον Βόρειο Ατλαντικό και ο αριθμός εμφανίσεως του κάθε sea state ανά 100.000 κύματα.

Για τις ανάγκες της μελέτης λόγω μεγάλου αριθμού sea states, ο πίνακας θα χωριστεί σε 9 υποπίνακες, όπου για τον καθένα θα λαμβάνεται ένα μέσο Hs και ένα μέσο Tp και θα υπολογίζεται ο EEDI για την κάθε υποπερίπτωση. Στην συνέχεια, θα υπολογιστεί ο σταθμισμένος EEDI λαμβάνοντας υπόψη την πιθανότητα εμφάνισης κάθε sea state. Στους Πίνακες 27 και 28 παρουσιάζεται η κατηγοριοποίηση των sea states καθώς και η πιθανότητα εμφάνισης τους ώστε να υπολογιστεί ο σταθμισμένος μέσος όρος ($EEDI_{N.A}$).

Πίνακας 27: Δημιουργία sea state και mean Hs, Tp

Hs	Mean Hs		Ts	Mean Ts	
0.5-5.5	3.5	1	3.5-7.5	5.5	A
6.5-10.5	8	2	8.5-12.5	10.5	B
11.5-16.5	13	3	13.5-18.5	16	C

Πίνακας 28: Πιθανότητα εμφάνισης κάθε sea state

MEAN SEA STATES	εμφάνιση ανα 100.000	%	
(1A)	31202,5	0,312025	31,2025
(1B)	58449,5	0,584495	58,4495
(1C)	529,4	0,005294	0,5294
(2A)	256,7	0,002567	0,2567
(2B)	8760,4	0,087604	8,7604
(2C)	594,9	0,005949	0,5949
(3A)	0,4	0,000004	0,0004
(3B)	160,8	0,001608	0,1608
(3C)	45,4	0,000454	0,0454
SUM	100000	1	100

Αρχικά, η αντίσταση στο βύθισμα σχεδίασης (T=11,4 m) και σε ήρεμο νερό έχει υπολογιστεί σε προηγούμενο στάδιο και τα αποτελέσματα παρατίθενται στον Πίνακα 29.

Πίνακας 29: Αντίσταση σε ήρεμο νερό για τις διάφορες ταχύτητες

	Vs [knots]								
	4	6	8	10	11	12	13	14	15
Rcw [kN]	40,35	86,03	147,35	300,39	361,76	434,78	539,03	682,01	891,55

Στην συνέχεια, θα υπολογιστεί η αεροδυναμική αντίσταση σύμφωνα με τον τύπο $Rair$ = 0,5*C_{air}*ρ_{α}*A_{FW}*$V_{w,\mathrm{rel}}^2$

Όπου

- C_{air} = 1 , αεροδυναμικός συντελεστής αντίστασης
- ρ_{α} = 1.2 kg/m^3 , πυκνότητα αέρα
- A_{FW}= 417,45 m^2, η
- Vw,rel (m/s) , σχετική ταχύτητα ανέμου με Vw,rel = Vw + Vs

Η ταχύτητα του ανέμου συνδέεται με το Hs με την εξής σχέση:

$$H = \begin{cases} 1{,}614 * 10^{-2} Vw^2, 0 \leq \ Vw \leq 7{,}5\ m/s \\ 10^{-2} Vw^2 + 8{,}134 * 10^{-4} Vw^3, 7{,}5 \leq Vw \leq 50\ m/s \end{cases}$$

Εξίσωση 32: Ταχύτητα ανέμου Vw συναρτήσει του ύψους κύματος Hs [20]

Παρουσιάζεται η ταχύτητα ανέμου για κάθε μέσο σημαντικό ύψος κύματος που θα μελετηθεί:

Πίνακας 30: Vw για κάθε mean Hs

Hs [m]	**Vw [m/s]**
3,5	13,03
8	18,01
13	21,69

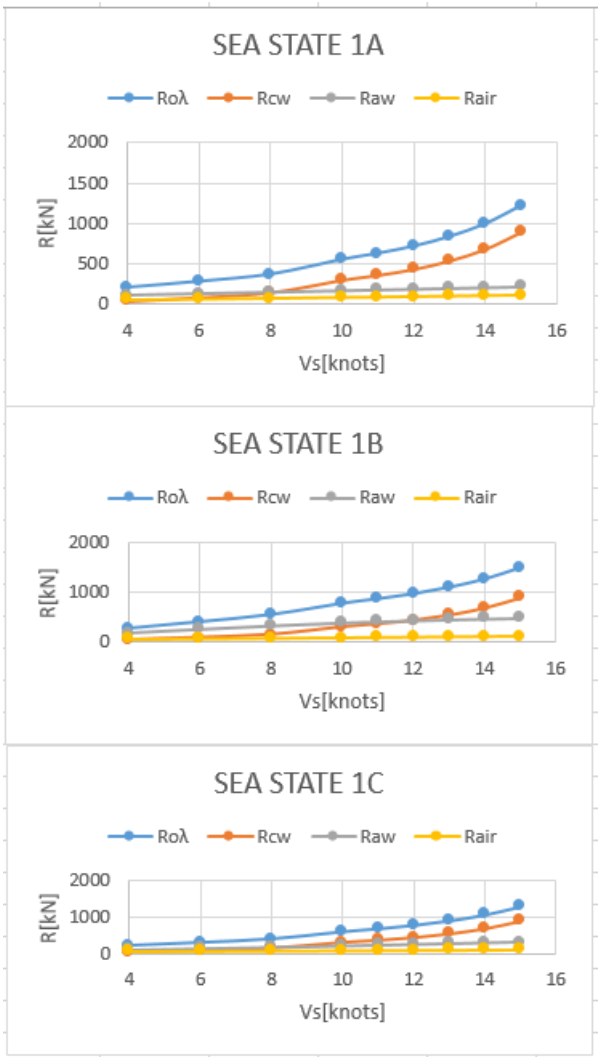
Τέλος υπολογίζεται η πρόσθετη αντίσταση σε κυματισμούς μέσω της μεθόδου Liu-Papanikolaou ακολουθώντας την διαδικασία που έχει προαναφερθεί και στην περίπτωση της ελάχιστης ισχύος πρόωσης. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για τα 9 sea states που δημιουργήθηκαν και για ταχύτητες από 4-15 knots. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών για τα πρώτα 3 sea states παρουσιάζονται στους πίνακες που ακολουθούν. Οι υπολογισμοί για τις υπόλοιπες καταστάσεις βρίσκονται στο Παράρτημα Δ.

Πίνακας 31: Υπολογισμός επιμέρους αντιστάσεων για τα sea states 1A,1B,1C

1A	Vs [knots]								
	4	6	8	10	11	12	13	14	15
Raw [kN]	110,32	130,04	149,78	169,62	179,58	189,57	199,59	209,64	219,73
Rcw	40,35	86,03	147,35	300,39	361,76	434,78	539,03	682,01	891,55
Rair	57,049	65,094	73,66	82,765	87,521	92,401	97,412	102,566	107,843
Roλ	207,719	281,164	370,79	552,775	628,861	716,751	836,032	994,216	1219,123

1B	Vs								
	4	6	8	10	11	12	13	14	15
Raw	175,32	252,9	325,75	387,19	412,98	435,56	455,29	472,19	486,67
Rcw	40,35	86,03	147,35	300,39	361,76	434,78	539,03	682,01	891,55
Rair	57,049	65,094	73,66	82,765	87,521	92,401	97,412	102,566	107,843
Roλ	272,719	404,024	546,76	770,345	862,261	962,741	1091,732	1256,766	1486,063

1C	Vs								
	4	6	8	10	11	12	13	14	15
Raw	111,97	141,9	176,29	213,51	232,77	252,27	271,92	291,56	311,12
Rcw	40,35	86,03	147,35	300,39	361,76	434,78	539,03	682,01	891,55
Rair	57,049	65,094	73,66	82,765	87,521	92,401	97,412	102,566	107,843
Roλ	209,369	293,024	397,3	596,665	682,051	779,451	908,362	1076,136	1310,513



Σχήμα 25 : Διαγράμματα των επιμέρους αντιστάσεων για τα sea states 1A,1B,1C

Εισάγοντας στο πρόγραμμα PROPULSION [27] τις τιμές της ολικής αντίστασης για τις 9 ταχύτητες που μελετήθηκαν και κρατώντας ίδια όλα τα υπόλοιπα inputs όπως και στον κλασσικό δείκτη EEDI υπολογίζεται η ταχύτητα αναφοράς για κάθε sea state. Λαμβάνοντας 9 τροποποιημένους EEDI (έναν για κάθε sea state) υπολογίζεται ο EEDI North Atlantic με βάση τον παρακάτω τύπο:

$$EEDI\ N.A = \frac{\begin{array}{c} P(1A) * EEDI(1A) + P(2A) * EEDI(2A) + P(3A) * EEDI(3A) + \\ P(1B) * EEDI(1B) \\ +P(2B) * EEDI(2B) + P(3B) * EEDI(3B) + \\ P(1C) * EEDI(1C) + P(2C) * EEDI(2C) + P(3C) * EEDI(3C) \end{array}}{Pol}$$

Εξίσωση 33: Σταθμισμένος EEDI καιρού (North Atlantic)

Όπου Ρολ, η συνολική συχνότητα εμφάνισης των sea states.

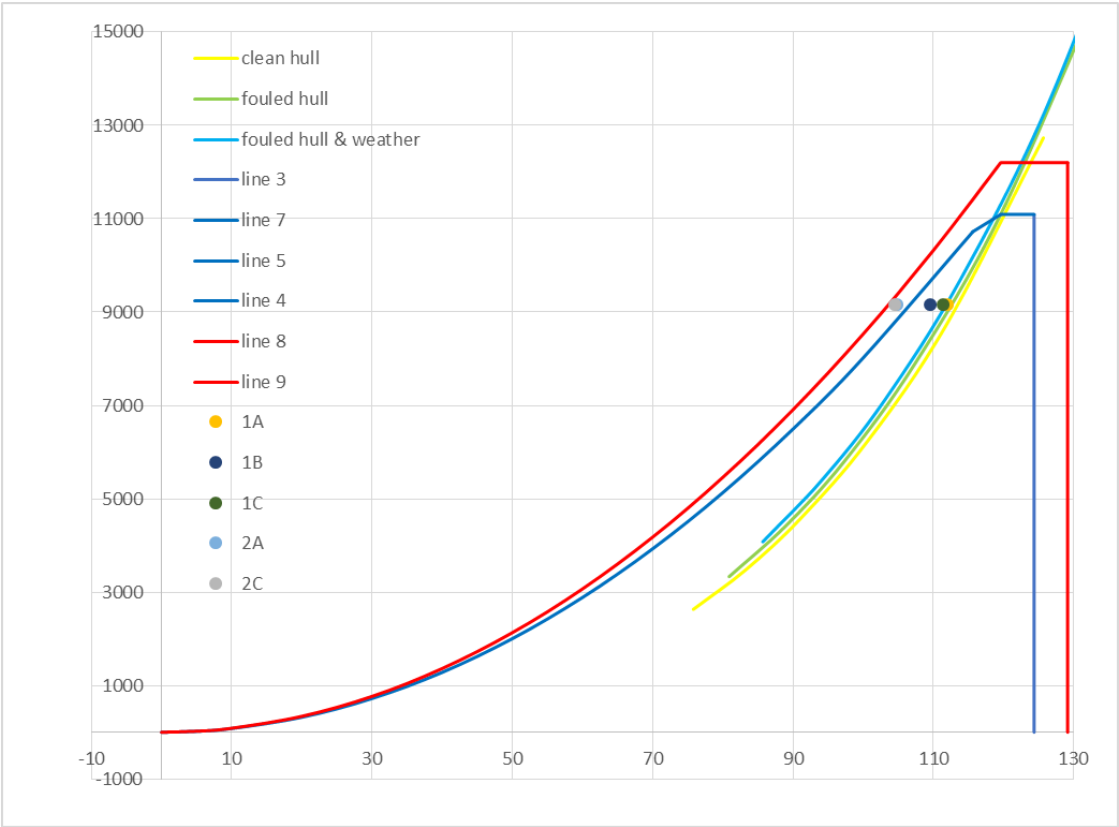
Τα sea states 2B, 3A, 3B, 3C απορρίπτονται, καθώς δεν ικανοποιούν την απαίτηση της ελάχιστης ταχύτητας των 4 κόμβων που υπολογίστηκε παραπάνω. Έτσι, τα αποτελέσματα θα προκύψουν από τον σταθμισμένο μέσο όρο των υπόλοιπων 5 sea states (1A, 1B, 1C, 2A, 2C).

Πίνακας 32: Υπολογισμός EEDI North Atlantic

EEDI North Atlantic										Κλασσικός EEDI
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	Calm Water
Capacity DWT	43035	43035	43035	43035	43035	43035	43035	43035	43035	43035
Type of Ship	Bulk Carrier	Bulk Carrier	Bulk Carrier	Bulk Carrier	Bulk Carrier	Bulk Carrier	Bulk Carrier	Bulk Carrier	Bulk Carrier	Bulk Carrier
Vref(knots)	12,35	10,23	11,86	5,66	ΥΠΕΡΒΑΣΗ	5,24	ΥΠΕΡΒΑΣΗ	ΥΠΕΡΒΑΣΗ	ΥΠΕΡΒΑΣΗ	14,22
MCRme(kW)	12215	12215	12215	12215	12215	12215	12215	12215	12215	12215
Pme(kW)	9161,25	9161,25	9161,25	9161,25	9161,25	9161,25	9161,25	9161,25	9161,25	9161,25
Type of Fuel	HFO	HFO	HFO	HFO	HFO	HFO	HFO	HFO	HFO	HFO
Cfme	3,114	3,114	3,114	3,114	3,114	3,114	3,114	3,114	3,114	3,114
SFCme(g/kWh)	166,9	166,9	166,9	166,9	166,9	166,9	166,9	166,9	166,9	166,9
Pae(kW)	555,375	555,375	555,375	555,375	555,375	555,375	555,375	555,375	555,375	555,375
Type of Fuel	HFO	HFO	HFO	HFO	HFO	HFO	HFO	HFO	HFO	HFO
Cfae	3,114	3,114	3,114	3,114	3,114	3,114	3,114	3,114	3,114	3,114
SFCae(g/kWh)	184	184	184	184	184	184	184	184	184	184
fw	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
fj	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
fi	1,012	1,012	1,012	1,012	1,012	1,012	1,012	1,012	1,012	1,012
fc	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
EEDI att [gCO2/ t.nm]	9,444	11,401	9,834	20,607	#ΤΙΜΗ!	22,258	#ΤΙΜΗ!	#ΤΙΜΗ!	#ΤΙΜΗ!	**8,202**
n[RPM]	112,04	109,57	111,46	104,87		104,51				114,2
Πιθανότητα Εμφάνισης	31,20%	58,45%	0,53%	0,26%	8,76%	0,59%	0,00%	0,16%	0,05%	
	31,2025	58,4495	0,5294	0,2567	8,7604	0,5949	0,0004	0,1608	0,0454	
EEDIatt*P	294,67709	666,39097	5,20622798	5,289728369	#ΤΙΜΗ!	13,2414826	#ΤΙΜΗ!	#ΤΙΜΗ!	#ΤΙΜΗ!	
EEDI N.A [gCO2/ t.nm]	**10,818**									

Παρατηρείται ότι ο EEDI North Atlantic είναι μεγαλύτερος από τον κλασικό δείκτη. Αυτό οφείλεται αποκλειστικά στην πρόσθετη αντίσταση (άνεμος και κύμα) που δημιουργούν τα διάφορα sea states και συμβάλουν στην μείωση της ταχύτητας του πλοίου, όταν εκείνο λειτουργεί με την ίδια ισχύ πρόωσης σε κάθε κατάσταση. Η μείωση της Vref έχει σαν επακόλουθο την αύξηση του δείκτη ενεργειακής αποδοτικότητας.

Τα σημεία λειτουργίας των 5 sea states βρίσκονται εντός του διαγράμματος λειτουργίας (Σχήμα 26).



Σχήμα 26: Σημεία λειτουργίας των 5 sea states στο Loading Diagram

4.4.2 2η μέθοδος υπολογισμού

Στην συνέχεια, θα υπολογιστεί εκ νέου ο EEDIweather με την μέθοδο των standard fw curves σύμφωνα με την MEPC.1/Circ.796. [7]

Η Εξίσωση 34 δείχνει τον τρόπο υπολογισμού του δείκτη καιρού στη προκειμένη περίπτωση

$$standard\ fw = a * \ln(capacity) + b$$

Εξίσωση 34: standard fw

Πίνακας 33: Παράμετροι a, b για υπολογισμό standard fw [7]

Ship type	***a***	***b***
Bulk carrier	0.0429	0.294
Tanker	0.0238	0.526
Containership	0.0208	0.633

Σύμφωνα με τον Πίνακα 33 και την Εξίσωση 34, για bulk carrier ισχύει:

fw= 0.0429ln (Capacity) +0.294

Για DWT=43035 t→ **fw=0,7517**

Ακολουθεί ο υπολογισμός του EEDIweather, σύμφωνα με τη μέθοδο 2.

Πίνακας 34: EEDI καιρού- Μέθοδος 2

Capacity DWT	43035
Type of Ship	Bulk Carrier
Vref(knots)	14,22
MCRme(kW)	12215
Pme(kW)	9161,25
Type of Fuel	HFO
Cfme	3,114
SFCme(g/kWh)	166,9
Pae(kW)	555,375
Type of Fuel	HFO
Cfae	3,114
SFCae(g/kWh)	184
fw	0,752
fj	1
fi	1,012
fc	1
EEDI att [gCO2/ t.nm]	**10,911**

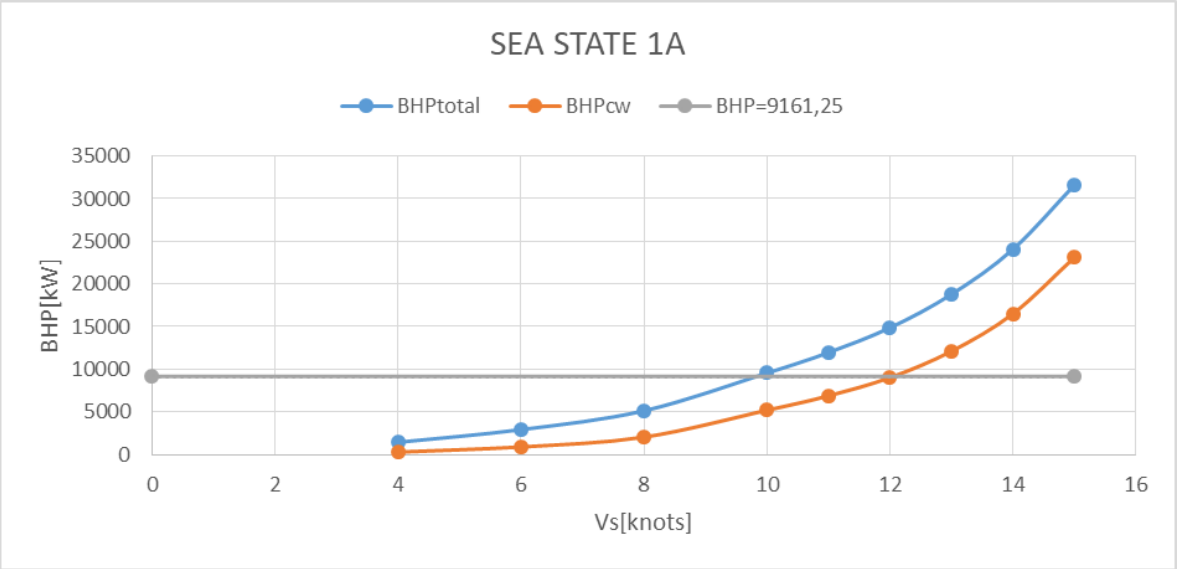
4.4.3 3η μέθοδος υπολογισμού

Τέλος, θα χρησιμοποιηθεί μια 3η μέθοδος υπολογισμού του EEDIweather, όπως αυτή περιγράφηκε στο Σχήμα 5. Για κάθε ένα από τα πέντε έγκυρα sea states, θα σχεδιαστεί το διάγραμμα BHP[kW]-Vs[knots] για την ολική αντίσταση (ήρεμο νερό+ άνεμος+ κύμα) και για την αντίσταση σε ήρεμο νερό.

Η ευθεία για BHP=75%MCR τέμνει την κάθε καμπύλη σε ένα σημείο το οποίο αντιστοιχεί στην ταχύτητα αναφοράς κάθε κατάστασης. Διαιρώντας τις δύο ταχύτητες, λαμβάνεται ο συντελεστής καιρού κάθε sea state.

Πίνακας 35: Υπολογισμός BHP για κάθε sea state

1A	Vs [knots]								
	4	6	8	10	11	12	13	14	15
Raw	110,320	130,040	149,780	169,620	179,580	189,570	199,590	209,640	219,730
Rcw	40,350	86,030	147,350	300,390	361,760	434,780	539,030	682,010	891,550
Rair	57,049	65,094	73,660	82,765	87,521	92,401	97,412	102,566	107,843
Roλ	207,719	281,164	370,790	552,775	628,861	716,751	836,032	994,216	1219,123
BHP[Kw]	1436,360	2916,339	5127,966	9555,986	11958,438	14868,825	18788,554	24062,231	31613,013
BHPcw[kW]	279,017	892,336	2037,827	5192,931	6879,238	9019,406	12113,884	16506,154	23118,735



Σχήμα 27: BHP-Vs (Sea State 1A)

Στον Πίνακα 35 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών για το sea state 1A.

Από το Σχήμα 27 προκύπτει ότι $fw(1A) = \frac{Vw}{Vref} = \frac{10,094}{12,098} = 0,8399$

Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται και για τα υπόλοιπα sea states (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β)

Στον Πίνακα 36 παρουσιάζεται ο υπολογισμός των επιμέρους EEDI για κάθε sea state και η εύρεση του EEDIweather, λαμβάνοντας υπόψη τις καταστάσεις θάλασσας και την πιθανότητα εμφάνισης κάθε μίας.

Πίνακας 36: Διαδικασία υπολογισμού EEDI καιρού- Μέθοδος 3

	1A	1B	1C	2A	2C
Capacity DWT	43035	43035	43035	43035	43035
Type of Ship	Bulk Carrier	Bulk Carrier	Bulk Carrier	Bulk Carrier	Bulk Carrier
Vref(knots)	14,22	14,22	14,22	14,22	14,22
MCRme(kW)	12215	12215	12215	12215	12215
Pme(kW)	9161,25	9161,25	9161,25	9161,25	9161,25
Type of Fuel	HFO	HFO	HFO	HFO	HFO
Cfme	3,114	3,114	3,114	3,114	3,114
SFCme(g/kWh)	166,9	166,9	166,9	166,9	166,9
Pae(kW)	555,375	555,375	555,375	555,375	555,375
Type of Fuel	HFO	HFO	HFO	HFO	HFO
Cfae	3,114	3,114	3,114	3,114	3,114
SFCae(g/kWh)	184	184	184	184	184
fw	**0,840**	**0,718**	**0,814**	**0,491**	**0,475**
fj	1	1	1	1	1
fi	1,012	1,012	1,012	1,012	1,012
fc	1	1	1	1	1
EEDI att [gC02/ t.nm]	**9,765**	**11,422**	**10,082**	**16,707**	**17,278**
Πιθανότητα Εμφάνισης	0,312025	0,584495	0,005294	0,002567	0,005949
	31,2025	58,4495	0,5294	0,2567	0,5949
EEDIatt*P	304,707	667,616	5,337	4,289	10,279
EEDI N.A [gC02/ t.nm]	**10,900**				

4.4.4 Σύγκριση μεθόδων

Πίνακας 37: Σύγκριση αποτελεσμάτων των 3 μεθόδων

Method 1	**10,818**
Method 2	**10,911**
Method 3	**10,900**

Παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα των 3 μεθόδων συγκλίνουν και παρέχουν αξιόπιστα αποτελέσματα αναφορικά με τον υπολογισμό του EEDIweather.

4.5 Υπολογισμός EEDI για διαφορετικά DWT

Θα εξεταστεί η επίδραση των διαφορετικών DWT στη τιμή του δείκτη ενεργειακής αποδοτικότητας. Συγκεκριμένα θα μελετηθούν τα βυθίσματα που αντιστοιχούν στο 50% και στο 75% του DWT σχεδίασης. Με βάση το DWT υπολογίζεται το εκτόπισμα και μέσω του υδροστατικού διαγράμματος υπολογίζεται το βύθισμα στις 2 καταστάσεις. Από το βύθισμα θα προκύψει η αντίσταση γυμνής γάστρας για αυτές

τις καταστάσεις φόρτωσης, δίνοντας την δυνατότητα να υπολογιστεί η Vref υπό αυτές τις συνθήκες. Η διαδικασία υπολογισμού του βυθίσματος σε κάθε κατάσταση παρουσιάζεται στον Πίνακα 38, μαζί με το αντίστοιχο απόσπασμα του Υδροστατικού Διαγράμματος (Πίνακας 39).

Πίνακας 38: Υπολογισμός βυθίσματος για κάθε DWT

	50% DWT	75% DWT
LS	6525,4	6525,4
DWT	21517,5	32276,25
Displ	27358,93	37855,27
T	6,5	9

Πίνακας 39: Απόσπασμα Υδροστατικού Διαγράμματος [22]

Draft	Displt	LCB	VCB	WPA	LCF	KML	KMT	WSA	TPC	MTC	CB	CM	CP	CW
(m)	(t)	(m)	(m)	(m^2)	(m)	(m)	(m)	(m^2)	(t/cm)	(t-m/cm)				
6.30	26431.03	92.614	3.221	4249.85	92.464	294.688	14.102	6020.54	43.65	453.16	0.801	0.994	0.806	0.833
6.40	26867.66	92.611	3.272	4253.18	92.386	290.634	13.987	6057.29	43.68	454.16	0.802	0.994	0.806	0.834
6.50	27304.64	92.607	3.323	4256.71	92.303	286.746	13.877	6094.19	43.72	455.22	0.802	0.994	0.807	0.835
6.60	27741.99	92.602	3.374	4260.42	92.215	283.016	13.772	6131.23	43.75	456.34	0.803	0.994	0.807	0.835
6.70	28179.74	92.595	3.425	4264.32	92.122	279.437	13.673	6168.41	43.79	457.53	0.803	0.995	0.807	0.836
6.80	28617.89	92.587	3.475	4268.40	92.024	276.003	13.578	6205.74	43.84	458.77	0.804	0.995	0.808	0.837
6.90	29056.47	92.578	3.526	4272.62	91.915	272.696	13.489	6243.32	43.88	460.07	0.804	0.995	0.808	0.838
7.00	29495.49	92.567	3.577	4277.01	91.798	269.514	13.403	6281.19	43.92	461.41	0.804	0.995	0.809	0.839
7.10	29934.98	92.555	3.628	4281.59	91.674	266.452	13.323	6319.29	43.97	462.80	0.805	0.995	0.809	0.840
7.20	30374.94	92.541	3.679	4286.35	91.544	263.508	13.246	6357.62	44.02	464.25	0.805	0.995	0.810	0.840
7.30	30815.40	92.526	3.730	4291.37	91.408	260.693	13.174	6396.21	44.07	465.79	0.806	0.995	0.810	0.841
7.40	31256.39	92.509	3.781	4296.62	91.265	257.998	13.105	6435.06	44.13	467.40	0.806	0.995	0.810	0.842
7.50	31697.94	92.491	3.833	4302.11	91.110	255.411	13.040	6474.30	44.18	469.09	0.807	0.995	0.811	0.844
7.60	32140.06	92.470	3.884	4308.04	90.943	252.976	12.979	6514.04	44.24	470.93	0.807	0.995	0.811	0.845
7.70	32582.81	92.448	3.935	4314.20	90.768	250.652	12.922	6554.09	44.31	472.87	0.808	0.995	0.812	0.846
7.80	33026.21	92.425	3.986	4320.55	90.586	248.421	12.867	6594.44	44.37	474.87	0.808	0.995	0.812	0.847
7.90	33470.26	92.399	4.037	4327.03	90.397	246.269	12.815	6635.10	44.44	476.92	0.809	0.995	0.813	0.848
8.00	33914.99	92.372	4.089	4333.90	90.198	244.237	12.767	6676.22	44.51	479.10	0.809	0.995	0.813	0.850

Draft (m)	Displt (t)	LCB (m)	VCB (m)	WPA (m^2)	LCF (m)	KML (m)	KMT (m)	WSA (m^2)	TPC (t/cm)	MTC (t-m/cm)	CB	CM	CP	CW
9.00	38407.36	91.980	4.605	4416.67	87.708	228.547	12.432	7112.02	45.36	505.94	0.815	0.996	0.818	0.866
9.10	38861.41	91.928	4.657	4425.52	87.414	227.261	12.410	7157.79	45.45	508.86	0.815	0.996	0.819	0.868
9.20	39316.37	91.874	4.709	4434.53	87.124	226.003	12.392	7203.56	45.54	511.79	0.816	0.996	0.819	0.870
9.30	39772.27	91.818	4.761	4443.87	86.848	224.840	12.374	7248.79	45.64	514.88	0.817	0.996	0.820	0.871
9.40	40229.14	91.760	4.813	4453.27	86.582	223.724	12.358	7293.57	45.74	518.04	0.817	0.996	0.820	0.873
9.50	40686.96	91.701	4.865	4462.43	86.323	222.601	12.343	7338.09	45.83	521.12	0.818	0.996	0.821	0.875
9.60	41145.72	91.639	4.917	4471.44	86.071	221.489	12.329	7382.30	45.92	524.18	0.818	0.996	0.821	0.877
9.70	41605.37	91.577	4.970	4479.97	85.839	220.318	12.316	7425.64	46.01	527.04	0.819	0.996	0.822	0.878
9.80	42065.93	91.512	5.022	4489.22	85.613	219.249	12.307	7468.76	46.10	530.10	0.820	0.996	0.823	0.880
9.90	42527.45	91.447	5.074	4498.33	85.396	218.196	12.299	7511.59	46.20	533.15	0.820	0.996	0.823	0.882
10.00	42989.88	91.381	5.127	4507.16	85.187	217.137	12.291	7554.10	46.29	536.13	0.821	0.996	0.824	0.884
10.10	43453.21	91.314	5.179	4515.77	84.985	216.081	12.283	7596.40	46.38	539.08	0.821	0.996	0.824	0.885
10.20	43917.41	91.246	5.232	4524.17	84.790	215.028	12.276	7638.47	46.46	541.98	0.822	0.996	0.825	0.887
10.30	44382.47	91.177	5.284	4532.49	84.608	213.968	12.270	7680.14	46.55	544.82	0.823	0.996	0.826	0.889
10.40	44848.39	91.108	5.337	4540.82	84.439	212.903	12.268	7721.39	46.63	547.59	0.823	0.996	0.826	0.890
10.50	45315.14	91.039	5.390	4548.81	84.278	211.817	12.265	7762.37	46.72	550.25	0.824	0.996	0.827	0.892

Για την εύρεση της αντίστασης στα 2 αυτά βυθίσματα, θα εφαρμοστούν 3 μέθοδοι αντίστασης (BSRA, FORMDATA, LAP-KELLER). Τα αποτελέσματα των μεθόδων θα χρησιμοποιηθούν ως inputs στο πρόγραμμα PROPULSION. Παράλληλα θα βρεθούν νέες τιμές για τα w,t,n_R, καθώς εξαρτώνται από τους συντελεστές μορφής οι οποίοι παίρνουν διαφορετικές τιμές ανάλογα με το βύθισμα του πλοίου. Με τα νέα αυτά δεδομένα, θα προκύψει η ταχύτητα αναφοράς του πλοίου και επακόλουθα ο τροποποιημένος EEDI για αυτά τα βυθίσματα. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής των μεθόδων παρουσιάζονται παρακάτω. Η διαδικασία υπολογισμού των αντιστάσεων παρατίθεται στο Παράρτημα Γ.

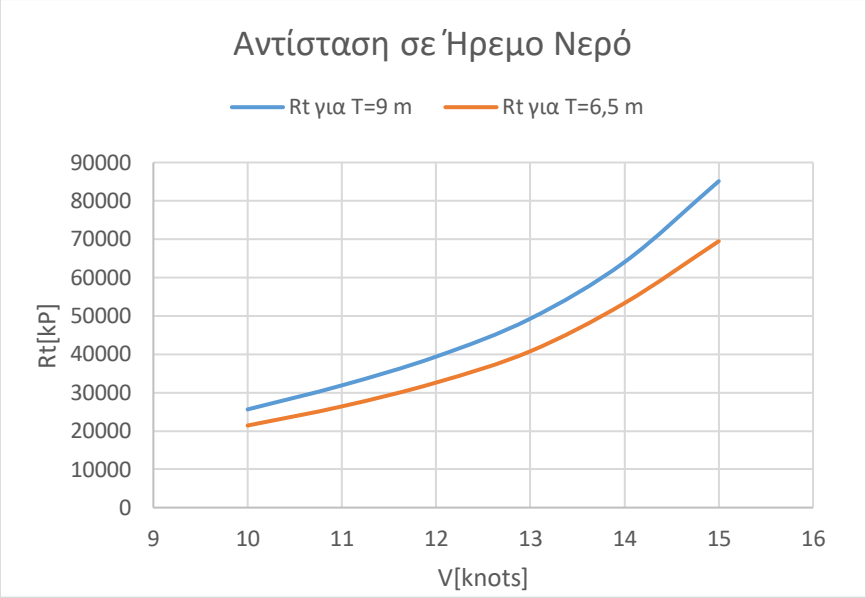
Πίνακας 40: Υπολογισμός w,t,nR για κάθε κατάσταση φόρτωσης

	50% DWT	75% DWT	100% DWT
DWT [tonnes]	21517,50	32276,25	43035,00
T [m]	6,5	9,0	11,4
w	0,366	0,376	0,389
t	0,247	0,261	0,279
Cb	0,802	0,815	0,830
Cp	0,807	0,818	0,833
Cwl	0,835	0,866	0,904
nr	1,00867	1,00949	1,01060

Πίνακας 41: Υπολογισμός αντίστασης για τις 2 καταστάσεις φόρτωσης

	3 Methods			
	V [kn]	RT [kP]	EHP [PS]	EHP [kW]
		FORMDATA|LAP-KELLER|B.S.R.A.		
T=9 m	10	25611,666	1756,755	1292,076
	11	31877,485	2405,195	1768,997
	12	39374,051	3240,894	2383,645
	13	49274,367	4393,776	3231,578
	14	64032,433	6148,958	4522,497
	15	85130,986	8758,957	6442,125

	3 Methods			
	V [kn]	RT [kP]	EHP [PS]	EHP [kW]
		FORMDATA|LAP-KELLER|B.S.R.A.		
T=6,5 m	10	21407,394	1468,376	1079,976
	11	26393,006	1991,384	1464,643
	12	32607,091	2683,903	1973,984
	13	40772,949	3635,708	2674,027
	14	53329,066	5121,126	3766,537
	15	69479,218	7148,578	5257,707



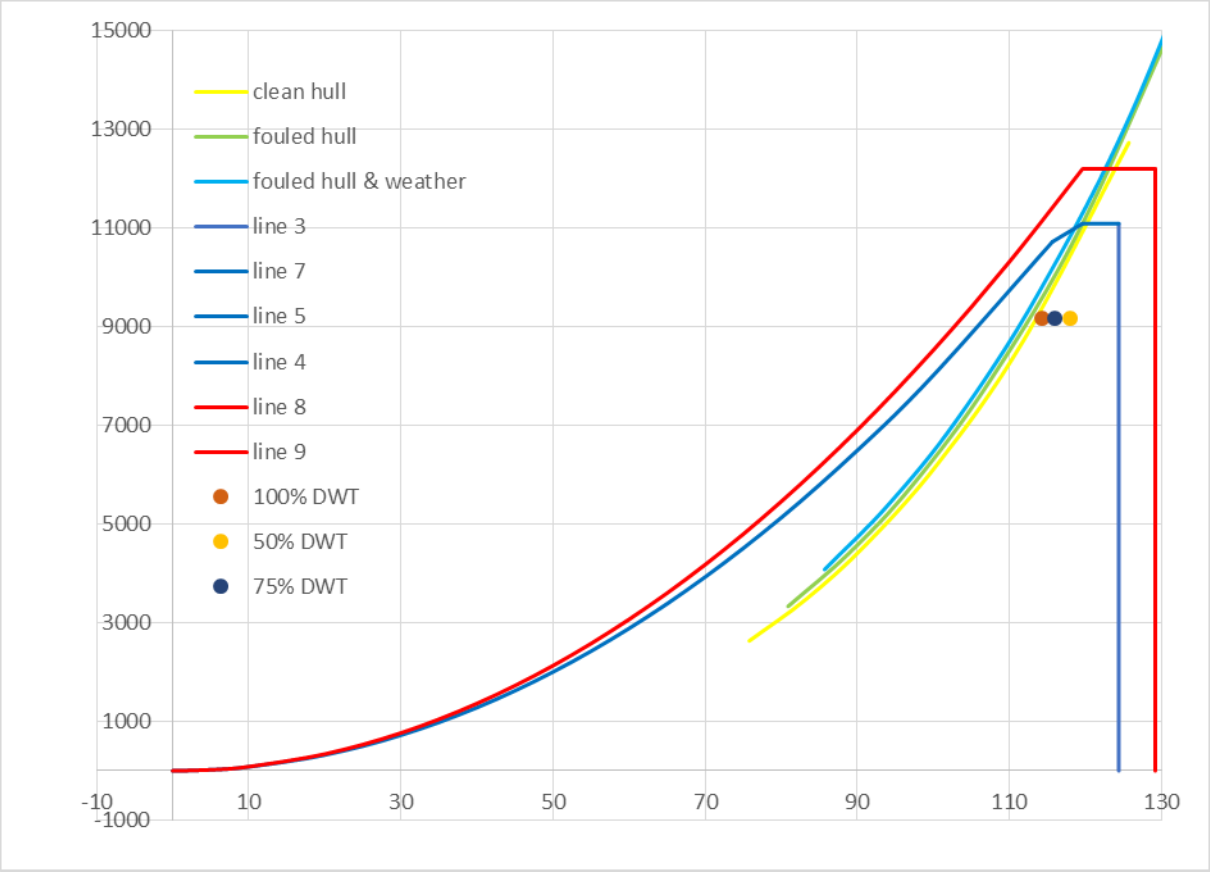
Σχήμα 28: Διάγραμμα αντίστασης-ταχύτητας για τις 2 καταστάσεις φόρτωσης

Πίνακας 42: Υπολογισμός των EEDI για τις καταστάσεις φόρτωσης

CASE 4: Διαφορετικά DWT			Κλασσικός EEDI
	75% DWT	50% DWT	100% DWT
Capacity DWT	32276,25	21517,5	43035
Type of Ship	Bulk Carrier	Bulk Carrier	Bulk Carrier
Vref(knots)	15,58	16,74	14,22
DWT*Vref	502863,98	360202,95	611957,7
MCRme(kW)	12215	12215	12215
Pme(kW)	9161,25	9161,25	9161,25
Type of Fuel	HFO	HFO	HFO
Cfme	3,114	3,114	3,114
SFCme(g/kWh)	166,9	166,9	166,9
Pae(kW)	555,375	555,375	555,375
Type of Fuel	HFO	HFO	HFO
Cfae	3,114	3,114	3,114
SFCae(g/kWh)	184	184	184
fw	1	1	1
fj	1	1	1
fi	1,012	1,012	1,012
fc	1	1	1
EEDI att [gCO2/ t.nm]	9,981	13,935	8,202
n[RPM]	116	118	114,2

Με τον αριθμητή του κλάσματος του EEDI να παραμένει σταθερός, η μείωση του παρονομαστή (DWT*Vref→όφελος προς τη κοινωνία→ μεταφορική ικανότητα επί ταχύτητα), επιφέρει μια αναμενόμενη αύξηση στη τιμή του δείκτη, συγκριτικά με τον κλασικό EEDI.

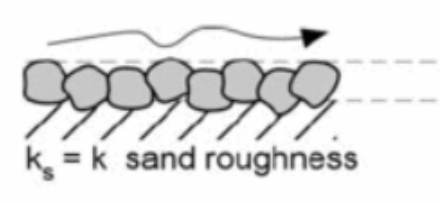
Τα σημεία λειτουργίας για 50% και 75% DWT βρίσκονται εντός των ορίων λειτουργίας της μηχανής όπως φαίνεται στο Loading diagram του Σχήματος 29.



Σχήμα 29: Σημεία λειτουργίας των καταστάσεων φόρτωσης στο Loading Diagram

4.6 Επίδραση Τραχύτητας

Κατά μέσο όρο ένα πλοίο δεξαμενίζεται κάθε 2,5 χρόνια. Αυτό σημαίνει ότι κατά τη διάρκεια αυτών των 2,5 χρόνων η γάστρα υπόκειται σε ρύπανση μέσω των οργανισμών που προσκολλώνται, αρά στην αύξηση της τραχύτητας της γάστρας και έτσι το πλοίο απαιτεί μεγαλύτερη ισχύ πρόωσης για την ιδιά ταχύτητα. Επίσης, κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του πλοίου, η τραχύτητα της γάστρας και της προπέλας αυξάνονται, λόγω διάβρωσης και υλικών ζημιών. Αυτό μπορεί να εκφραστεί μέσω του ks (equivalent sand roughness height [μm]).Για ένα πλοίο που βρίσκεται διαρκώς σε λειτουργία, η ρύπανση της προπέλας είναι σημαντικά μικρότερη της ρύπανσης της γάστρας κυρίως για δύο λόγους. Η ταχύτητα της προπέλας είναι μεγαλύτερη από εκείνη του πλοίου και η συντήρηση της προπέλας είναι πιο εύκολη αποτελεσματική και ασφαλή διαδικασία και μπορεί να πραγματοποιείται ανά συντομότερα χρονικά διαστήματα (ο καθαρισμός της γάστρας είναι χρονοβόρος, ακριβός και επιβλαβής για το περιβάλλον). Με βάση τα παραπάνω, στη παρούσα ανάλυση θα θεωρηθεί ότι δεν υπάρχει τραχύτητα προπέλας (καθαρισμός ανά σύντομα τακτά διαστήματα που καθιστά την αύξηση της αντίστασης λόγω ρύπανσης προπέλας αμελητέα) και θα ληφθούν υπόψη 2 σενάρια για τη τραχύτητα της γάστρας (ks=5000 μm και ks=10000 μm). [12]



Εικόνα 10: Τραχύτητά επιφάνειας [12]

Για να υπολογιστεί η αντίσταση του πλοίου σε ήρεμο νερό με τραχύτητα γάστρας, είναι απαραίτητος ο υπολογισμός της πρόσθετης αντίστασης λόγω τραχύτητας. Αρχικά, υπολογίζεται το ΔC_F συναρτήσει του ks και του Lwl ως εξής [22]:

$$\Delta C_F = 0.044 \left[\left(\frac{k_S}{L_{WL}} \right)^{\frac{1}{3}} - 10 \cdot \mathrm{Re}^{-\frac{1}{3}} \right] + 0.000125$$

Εξίσωση 35: Πρόσθετη αντίσταση λόγω τραχύτητας (ITTC)[22]

Στην συνέχεια υπολογίζεται η αντίσταση τραχύτητας σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$\mathrm{Rfl} = 0{,}5 * \rho * \mathrm{S} * \mathrm{Vs}^2 * \Delta\mathrm{Cf}$$

Εξίσωση 36:Αντίσταση τραχύτητας [22]

Τέλος, η ολική αντίσταση του πλοίου σε ήρεμο νερό με τραχύτητα γάστρας ορίζεται ως το άθροισμα των 2 επιμέρους συνιστωσών:

$$Ro\lambda = Rt + Rfl$$

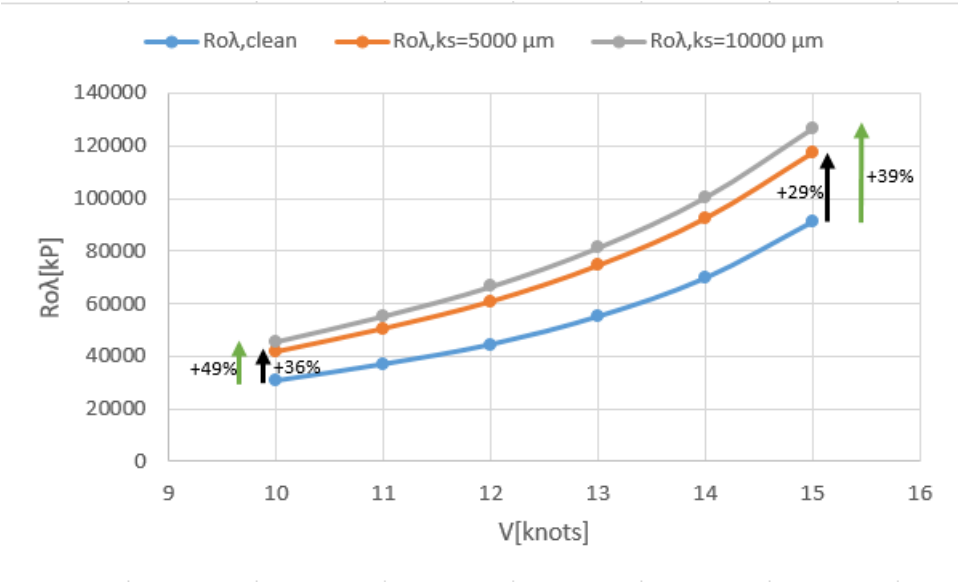
Εξίσωση 37: Rολ για τραχύτητα και ήρεμο νερό

Όπου Rt η αντίσταση σε ήρεμο νερό και μηδενική τραχύτητα που έχει υπολογισθεί μέσω των συστηματικών σειρών B.S.R.A, LAP-KELLER και FORMDATA.

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών παρουσιάζονται στον Πίνακα 43:

Πίνακας 43: Υπολογισμός ολικής αντίστασης για τις 2 περιπτώσεις τραχύτητας

	V=10 knots		V=11 knots		V=12 knots		V=13 knots		V=14 knots		V=15 knots	
ITTC Method	ks[μm]											
	5000	10000	5000	10000	5000	10000	5000	10000	5000	10000	5000	10000
	δCf											
	0,000991	0,001342	0,001006	0,001357	0,001019	0,00137	0,001031	0,001382	0,001042	0,001393	0,001052	0,001403
	Rfl[kN]											
	109,1374	147,7983	134,0757	180,8554	161,6895	217,3612	191,9953	257,3323	225,0078	300,7832	260,7403	347,7273
	Rfl[kp]											
	11128,74	15071	13671,7	18441,83	16487,48	22164,33	19577,76	26240,17	22944,05	30670,86	26587,68	35457,76
	Rt[kP]											
	30632	30632	36889	36889	44335	44335	54966	54966	69545	69545	90913	90913
	Roλ[kP]											
	41760,74	45703	50560,7	55330,83	60822,48	66499,33	74543,76	81206,17	92489,05	100215,9	117500,7	126370,8
	Roλ[kN]											
	409,5395	448,2004	495,839	542,6187	596,4743	652,146	731,0362	796,3732	907,0221	982,7975	1152,306	1239,293



Σχήμα 30: Σύγκριση Roλ,clean-Roλ,ks=5000-Roλ,ks==10000

Ανάλογα με το μέγεθος της ρύπανσης και την ταχύτητα με την οποία κινείται το πλοίο, στο Σχήμα 30 παρατηρείται μία αύξηση της αντίστασης σε ήρεμο νερό της τάξης του 30-50%.

Για τον υπολογισμό του τροποποιημένου EEDI που θα λαμβάνει υπόψη τη τραχύτητα της γάστρας αυτό που αλλάζει σε σχέση με τον κλασικό δείκτη, είναι η αυξημένη αντίσταση, η οποία θα έχει ως αποτέλεσμα την μείωσης της Vref, αφού χρησιμοποιείται η ίδια ισχύς (75% MCR). Εισάγοντας τα νέα δεδομένα στο πρόγραμμα PROPULSION [26] , υπολογίζεται η νέα Vref για τα 2 σενάρια και

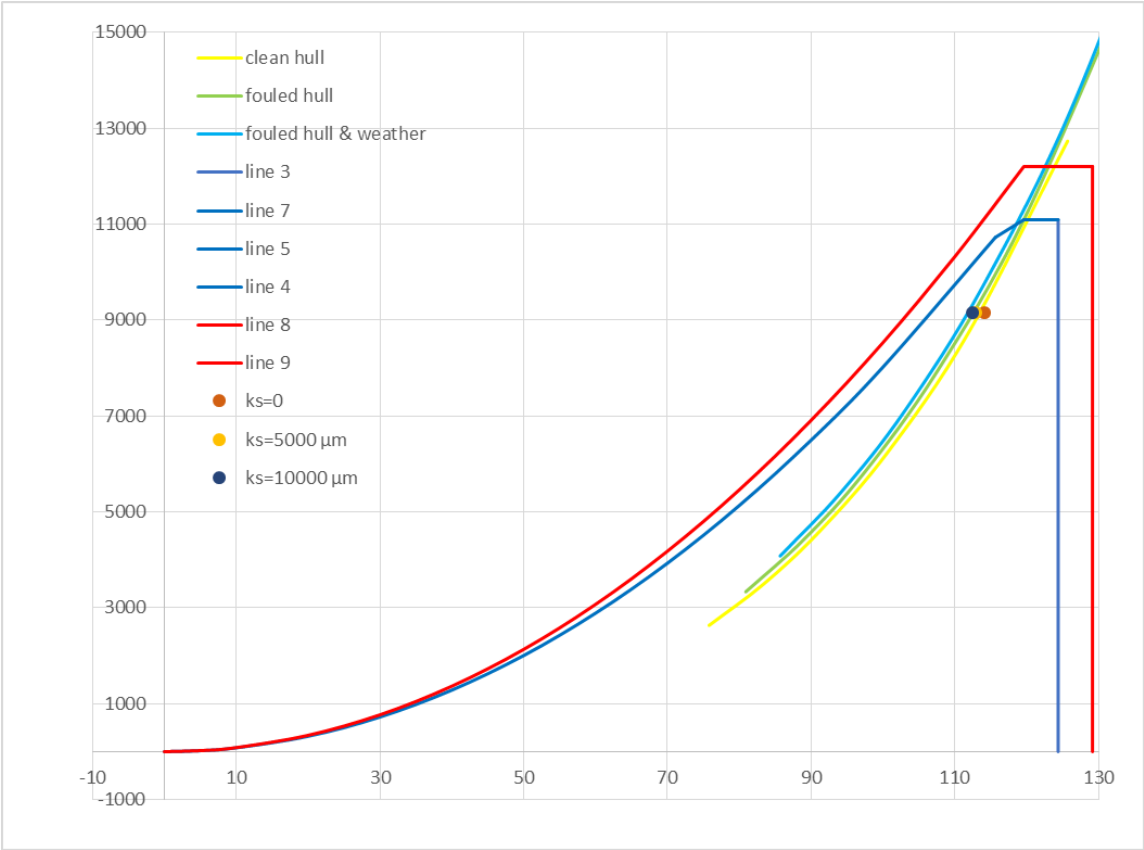
προκύπτουν οι αντίστοιχοι EEDI's . Όπως αναμενόταν, η αύξηση της αντίστασης έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της Vref και συνεπακόλουθα την αύξηση του EEDI.

Πίνακας 44: Υπολογισμός των EEDI ταχύτητας

Hull Roughness			Κλασσικός EEDI
	ks=5000 μm	ks=10000 μm	ks=0 μm
Capacity DWT	43035	43035	43035
Type of Ship	Bulk Carrier	Bulk Carrier	Bulk Carrier
Vref(knots)	13,07	12,69	14,22
MCRme(kW)	12215	12215	12215
Pme(kW)	9161,25	9161,25	9161,25
Type of Fuel	HFO	HFO	HFO
Cfme	3,114	3,114	3,114
SFCme(g/kWh)	166,9	166,9	166,9
Pae(kW)	555,375	555,375	555,375
Type of Fuel	HFO	HFO	HFO
Cfae	3,114	3,114	3,114
SFCae(g/kWh)	184	184	184
fw	1	1	1
fj	1	1	1
fi	1,012	1,012	1,012
fc	1	1	1
EEDI att [gCO2/ t.nm]	8,924	9,191	8,202
n[RPM]	112,88	112,44	114,2

Ο κλασικός δείκτης EEDI παρουσιάζει μικρότερη τιμή και άρα μικρότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα, όμως δεν λαμβάνει υπόψιν του το σημαντικό φαινόμενο της ρύπανσης της γάστρας το οποίο συναντάται σε όλα τα πλοία καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους.

Τέλος, στο loading diagram, τοποθετούνται τα 3 σημεία λειτουργίας της μηχανής για τις 3 προαναφερθείσες καταστάσεις. Και οι 2 νέες καταστάσεις κρίνονται εφικτές, από πλευράς ικανοποίησης τους από την συνεργασία μηχανής-έλικας.



Σχήμα 31: Σημεία λειτουργίας των περιπτώσεων τραχύτητας στο Loading Diagram

4.7 Υπολογισμός EEDI για ταυτόχρονη επίδραση καιρού και ρύπανσης

Η τραχύτητα της γάστρας και οι ανεμογενείς κυματισμοί αποτελούν δύο φαινόμενα τα οποία είναι σχεδόν αδύνατο να μην συναντήσει ένα πλοίο κατά τη λειτουργία του. Για αυτό το λόγο κρίνεται απαραίτητο να εξεταστεί η ταυτόχρονη επίδραση των δύο αυτών φαινομένων στον δείκτη EEDI. Για την ανάγκη της μελέτης θα θεωρηθούν 2 σενάρια, για ks=5000 μm και για ks=10000 μm. Για την επίδραση του καιρού θα ληφθεί υπόψη ότι fw= 0,7517 όπως υπολογίστηκε στον EEDIweather μέσω της 2^{ης} μεθόδου υπολογισμού.

Σύμφωνα λοιπόν με τα παραπάνω:

- Ks=5000 μm και fw=0,7517
- Ks=10000 μm και fw=0,7517

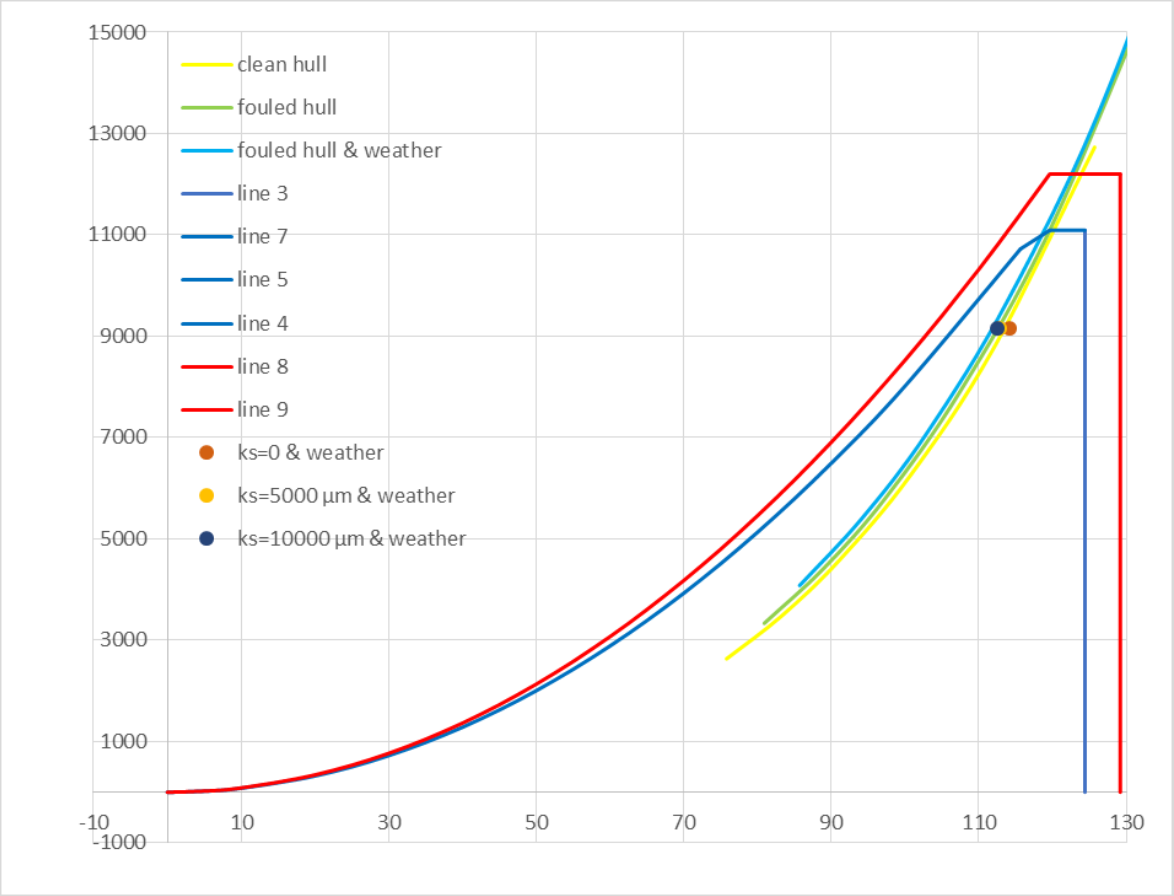
Με βάση όσα αναφέρθηκαν, η διαδικασία που θα ακολουθηθεί ουσιαστικά είναι αυτή που ακολουθήθηκε για την επίδραση της τραχύτητας, αλλάζοντας στους υπολογισμούς μας τον δείκτη καιρού fw. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών παρατίθενται στον Πίνακα 46. Για σύγκριση των αποτελεσμάτων, τοποθετείται και μία 3η στήλη, που λαμβάνει υπόψη μόνο τον καιρό όπως υπολογίστηκε σε προηγούμενο εδάφιο, και αμελεί την ρύπανση της γάστρας.

Πίνακας 45 Υπολογισμός EEDI για επίδραση καιρού και για διάφορες τιμές τραχύτητας γάστρας

Ks 5000 + weather		Ks 10000 + weather		Ks 0 + weather	
Capacity DWT	43035	Capacity DWT	43035	Capacity DWT	43035
Type of Ship	Bulk Carrier	Type of Ship	Bulk Carrier	Type of Ship	Bulk Carrier
Vref(knots)	13,07	Vref(knots)	12,7	Vref(knots)	14,22
MCRme(kW)	12215	MCRme(kW)	12215	MCRme(kW)	12215
Pme(kW)	9161,25	Pme(kW)	9161,25	Pme(kW)	9161,25
Type of Fuel	HFO	Type of Fuel	HFO	Type of Fuel	HFO
Cfme	3,114	Cfme	3,114	Cfme	3,114
SFCme(g/kWh)	166,9	SFCme(g/kWh)	166,9	SFCme(g/kWh)	166,9
Pae(kW)	555,375	Pae(kW)	555,375	Pae(kW)	555,375
Type of Fuel	HFO	Type of Fuel	HFO	Type of Fuel	HFO
Cfae	3,114	Cfae	3,114	Cfae	3,114
SFCae(g/kWh)	184	SFCae(g/kWh)	184	SFCae(g/kWh)	184
fw	0,7517	fw	0,7517	fw	0,7517
fj	1	fj	1	fj	1
fi	1,012	fi	1,012	fi	1,012
fc	1	fc	1	fc	1
EEDI att [gCO2/ t.nm]	**11,871**	**EEDI att [gCO2/ t.nm]**	**12,217**	**EEDI att [gCO2/ t.nm]**	**10,911**

Τα αποτελέσματα έρχονται σε συμφωνία με αυτό που αναμενόταν, καθώς για διάφορες τιμές τραχύτητας και ίδια επίδραση του καιρού σε κάθε περίπτωση, όσο μεγαλύτερη η τραχύτητα στην επιφάνεια της γάστρας, τόσο μεγαλύτερη αντίσταση συναντάει το πλοίο, με επακόλουθο την μείωση της ταχύτητας για ίδια ισχύ, άρα και την αύξηση του δείκτη EEDI.

Τέλος, στο loading diagram, τοποθετούνται τα 3 σημεία λειτουργίας της μηχανής για τις 3 προαναφερθείσες καταστάσεις. Και οι 2 νέες καταστάσεις κρίνονται εφικτές.



Σχήμα 32: Σημεία λειτουργίας των παραπάνω περιπτώσεων στο Loading Diagram

4.8 EEDI Overall

Αφού μελετήθηκαν οι σημαντικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν τον δείκτη EEDI, είναι πλέον εφικτό να υπολογιστούν τροποποιημένοι δείκτες ανά κατηγορία διαφοροποίησης. Για παράδειγμα, ένα πλοίο δεν κινείται μόνιμα με την ίδια ταχύτητα (slow steaming, ανάγκη για μεγαλύτερη ισχύ σε κακό καιρό κλπ.). Ένας αντιπροσωπευτικός δείκτης θα μπορούσε να προκύψει από τον σταθμισμένο μέσο όρο του EEDI για κάθε ποσοστό του MCR επί την πιθανότητα να χρησιμοποιηθεί κάθε ένα από αυτά τα MCR. Με τον ίδιο τρόπο μπορεί να μελετηθεί η επίδραση του DWT (Capacity effect) και η επίδραση λόγω λειτουργίας του πλοίου σε ρεαλιστικές συνθήκες (Operational effect→ fouling & weather). Τα σενάρια που θα θεωρηθούν παρακάτω μπορούν να τροποποιηθούν αλλάζοντας τον συντελεστή βάρους κάθε κατάστασης και να προκύψει ο επιθυμητός τροποποιημένος EEDI.

EEDI Capacity Effect

Θεωρώντας ότι το πλοίο βρίσκεται πλήρως φορτωμένο στο 50% της διάρκειας των ταξιδιών, με τη μισή χωρητικότητα στο 40% και φορτωμένο κατά 75% στο υπόλοιπο 10%, προκύπτει ο ακόλουθος δείκτης, με την διαδικασία που προκύπτει από τον Πίνακα 46. Η αυξημένη τιμή σε σχέση με τον κλασικό δείκτη οφείλεται στο γεγονός ότι χρησιμοποιείται η τιμή 100% DWT σε όλες τις περιπτώσεις, μειώνοντας με αυτό τον τρόπο τη μεταφορική ικανότητα και την προσφορά στην κοινωνία.

Πίνακας 46: Υπολογισμός EEDI Capacity

	50% DWT	75% DWT	100% DWT
EEDI [gCO2/ t.nm]	9,9815	13,9347	8,2042
Συντελεστής βάρους	40	10	50
EEDI* Συντελεστής βάρους	399,26	139,347	410,21
EEDI Capacity Effect [CO2/ t.nm]	**9,488**		

EEDI Slow Steaming Effect

Στο σενάριο αυτό θεωρείται ότι το πλοίο στο 20% της διάρκειας του ταξιδιού λόγω slow steaming χρησιμοποιεί το 25% του MCR της μηχανής, στο 35% χρησιμοποιεί το 50% του MCR, στο 40% βρίσκεται στο Pme=75%MCR και τέλος για το 5% του ταξιδιού λόγω αντίξοων συνθηκών χρησιμοποιεί το 100% του MCR.

Πίνακας 47:Υπολογισμός EEDI Slow Steaming

	25% MCR	50% MCR	75% MCR	100% MCR
EEDI [gCO2/ t.nm]	4,2288	6,1955	8,2042	10,516
Συντελεστής βάρους	20	35	40	5
EEDI* Συντελεστής βάρους	84,576	216,8425	328,168	52,58
EEDI slow steaming effect [CO2/ t.nm]	**6,822**			

EEDI Operational Effect

Στο σενάριο αυτό θεωρείται ότι στο 30% της λειτουργίας του η γάστρα δεν έχει υποστεί ακόμα ρύπανση, για το 50% υπάρχει τραχύτητα 5.000 μm και για το 20% της λειτουργίας μέχρι τον επόμενο δεξαμενισμό η τραχύτητα έχει φτάσει τα 10.000 μm. Παράλληλα, λόγω της λειτουργίας του δέχεται και την επίδραση του καιρού.

Πίνακας 48:Υπολογισμός EEDI Operational

	Ks 0 + weather	Ks 5000 + weather	Ks 10000 + weather
EEDI [gCO2/ t.nm]	10,91138267	11,87145077	12,21731194
Συντελεστής βάρους	30	50	20
EEDI* Συντελεστής βάρους	327,3414802	593,5725387	244,3462388
EEDI Operational Effect [CO2/ t.nm]	**11,653**		

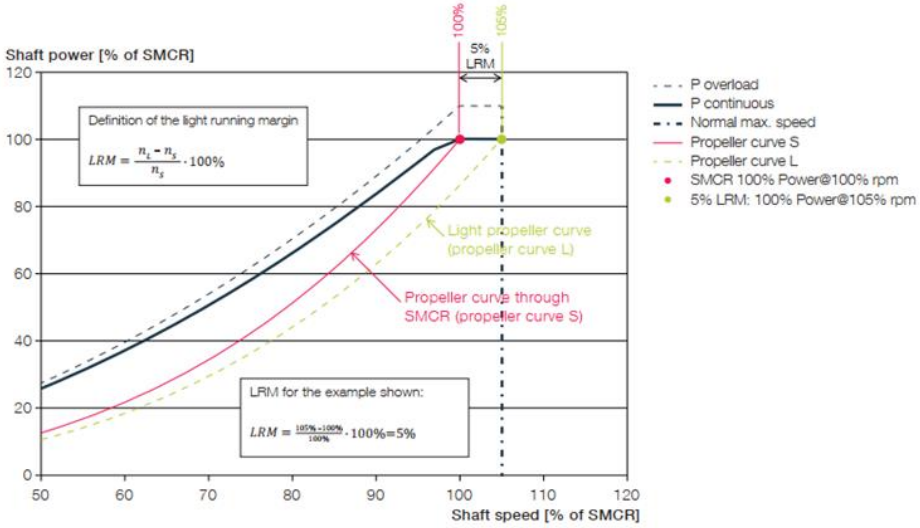
Αλλαγή Βήματος Έλικας και αύξηση του περιθωρίου στροφών LRM

Ο σχεδιαστικός δείκτης EEDI αναπτύχθηκε από τον IMO ώστε η ναυτιλία να συμμορφωθεί με τις παγκόσμιες απαιτήσεις μείωσης των εκπομπών αέριων ρύπων που συμβάλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Η μείωση του σημείου SMCR της εγκατεστημένης μηχανής αποτελεί παράμετρο-κλειδί στον δρόμο προς την επίτευξη ενός πιο «οικολογικού» πλοίου το οποίο θα αποτυπωθεί μέσω του EEDI.Λόγω των απαιτήσεων για ικανοποίηση του EEDI, όταν πλέον τοποθετείται μικρότερη από το παρελθόν μηχανή, δεν θα μειωθεί μόνο η ταχύτητα του πλοίου αλλά και η ικανότητα του να λειτουργεί σε αντίξοες καιρικές συνθήκες και να επιταχύνει, όταν οι συνθήκες το απαιτούν. Το αποτελεσματικότερο μέσο για την αποφυγή αυτών των προβλημάτων είναι η **μείωση του λόγου P/D**, άρα η **αύξηση του περιθωρίου στροφών.**

Για ένα πλοίο, μικρότερο βήμα της έλικας συνδυάζεται με μικρότερη κατανάλωση καυσίμου σε αντίξοες καιρικές συνθήκες λόγω λειτουργίας σε καλύτερη απόδοση. Σε ήρεμο νερό, είναι δυνατόν το μικρότερο βήμα να οδηγήσει σε αύξηση της κατανάλωσης καυσίμου, πράγμα που εξισορροπείται με την καλύτερη λειτουργία σε κακό καιρό. Επιπλέον, το μικρότερο βήμα οδηγεί σε υψηλότερη διατηρούμενη ταχύτητα σε κακό καιρό και βελτιωμένες ελικτικές ικανότητες. Έτσι, αν η έλικα είχε σχεδιαστεί εξαρχής με μεγαλύτερο περιθώριο ελαφριάς λειτουργίας, δηλαδή για υψηλότερες στροφές και μικρότερο βήμα, τότε παρά τον μικρότερο βαθμό απόδοσης θα είχε καλύτερη λειτουργία όταν γίνει «βαριά» λόγω ρύπανσης ή/και καιρού.

Η επιλογή στροφών κοντά στις βέλτιστες για σταθερή ταχύτητα και δεδομένη διάμετρο ελάχιστα επηρεάζει την απαιτούμενη ιπποδύναμη. Αυτό είναι σημαντικό αν θέλουμε να μετακινήσουμε την καμπύλη της έλικας προς τα δεξιά, προς μικρότερο δηλαδή βήμα, κίνηση που μας προσφέρει μεγαλύτερο περιθώριο στροφών. Για παρεκκλίσεις προς μικρότερο από το βέλτιστο βήμα, δηλ. αύξηση των στροφών με δεδομένη διάμετρο, πολύ λίγο επηρεάζεται η απόδοση. [24]

Ο λόγος ανάμεσα στις στροφές της light propeller curve (καθαρή γάστρα-προπέλα, ήρεμος καιρός, βαθύ νερό, χωρίς επιταχύνσεις) και στις στροφές της engine layout curve (περνάει από το SMCR) ονομάζεται light running margin (LRM), όπως φαίνεται στην εικόνα. Για σταθερή ισχύ SMCR, το LRM θα αυξηθεί μειώνοντας το βήμα. Υψηλότερο LRM επιτρέπει μεγαλύτερη ισχύ σε κακό καιρό και κατά τη διάρκεια επιταχύνσεων.



Σχήμα 33: Επεξήγηση του LRM [24]

Από το 1999, η MAN πρότεινε ένα LRM της τάξης του 3-7%. Οι νέες απαιτήσεις και η ανατροφοδότηση από τα νεότευκτα πλοία με μικρότερη εγκατεστημένη μηχανή που παρουσίαζαν αδυναμία στην επιτάχυνση και χαμηλή ταχύτητα σε κακό καιρό, έφεραν στο προσκήνιο την συζήτηση για αλλαγή του περιθωρίου LRM, σε συνδυασμό με τις ολοένα και αυξανόμενες ανάγκες για μείωση του EEDI.

Για αυτούς τους λόγους από την 1η Μαΐου του 2015, η MAN άλλαξε το σύσταση της για περιθώριού του LRM από 3-7% σε 4-10%. Κάθε πλοίο πρέπει να έχει επαρκή LRM έτσι ώστε[23]:

- Να διατηρείται ασφαλές σε κακό καιρό και/ή με ρυπασμένη γάστρα, προπέλα και παρελκόμενα.
- Να ξεπερνάει με ευκολία ένα κάτω όριο ταχύτητας.
- Να μπορεί να επιτύχει ελιγμούς και επιταχύνσεις όταν οι συνθήκες το απαιτούν

Τα αποτελέσματα αλλαγής του LRM σε ορισμένες παραμέτρους παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 49:Επίδραση του LRM σε λειτουργίες του πλοίου [23]

	Larger LRM	Smaller LRM
Ship gearing	Lower	Higher
Engine acceleration	Faster	Slower
Ship acceleration	Faster	Slower
Heavy weather ship speed	Higher	Lower
Propeller speed	Higher	Lower

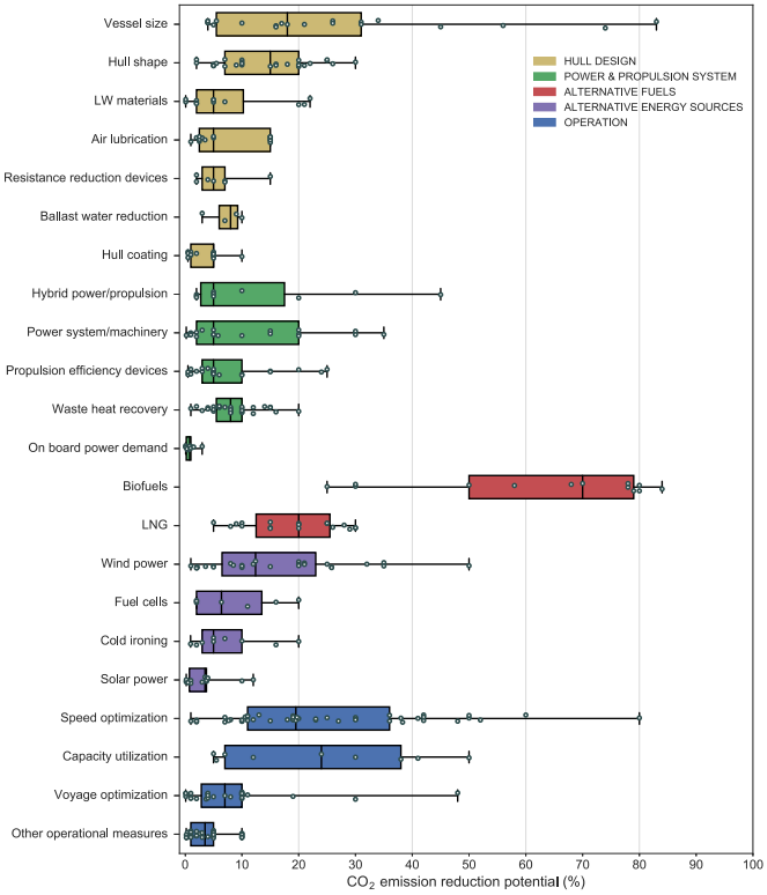
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το πλοίο μελέτης της παρούσας εργασίας δεν ικανοποιεί τον δείκτη EEDI σε καμία φάση. Οι δύο κυριότεροι λόγοι που συμβαίνει αυτό είναι οι εξής:

- το πλοίο σχεδιάζεται με βάση το πατρικό πλοίο ''SPRING HAWK'' το οποίο κατασκευάστηκε το 1998 όπου δεν υπήρχαν τέτοιου είδους ενεργειακοί περιορισμοί.
- το πλοίο βρίσκεται στην 1η φάση προμελέτης του και το ζήτημα θα μπορούσε να διορθωθεί σε επόμενα στάδια ώστε το πλοίο να λάβει το απαραίτητο πιστοποιητικό. Τα μέτρα που θα μπορούσαν να ληφθούν και αποτελούν προτάσεις για περαιτέρω έρευνα χωρίζονται στις εξής κύριες κατηγορίες:

    1. Σχεδίαση γάστρας
    2. Σύστημα πρόωσης
    3. Εναλλακτικά καύσιμα
    4. Εναλλακτικές πηγές ενέργειας
    5. Λειτουργία Πλοίου

Τονίζεται ότι κάθε μέτρο μεμονωμένα δεν είναι ικανό να επιφέρει την επιθυμητή μείωση των ρύπων, αλλά με κατάλληλο συνδυασμό μέτρων, οι στόχοι μπορούν να επιτευχθούν. Η κατηγοριοποίηση των μέτρων και το εύρος στο ποσοστό μείωσης του CO2 που μπορεί να επιφέρει το καθένα χωριστά παρουσιάζονται στην Εικόνα 11.



Εικόνα 11:Ποσοστά μείωσης του C02 από κάθε μέτρο [27]

Συμπερασματικά, ο EEDI στην παρούσα του μορφή αδυνατεί από μόνος του να επιτύχει τους κλιματικούς στόχους για το 2050. Ο κανονισμός του EEDI αφορά μόνο τα νεότευκτα πλοία με συνέπεια ένας σημαντικός αριθμός πλοίων το 2040 να έχουν κατασκευαστεί πριν την εφαρμογή του κανονισμού ή κατά την 1η φάση του, όταν και δεν υπήρχε μεγάλη απαίτηση στην βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης.

Λόγω του ότι ο δείκτης είναι σχεδιαστικός, δεν ανταποκρίνεται πλήρως στις καταστάσεις στις οποίες θα λειτουργεί το πλοίο κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του και με αυτό τον τρόπο αναδεικνύεται η ανάγκη δημιουργίας των τροποποιημένων δεικτών που δημιουργούνε μια πιο ρεαλιστική εικόνα της πραγματικότητας. Παρόλου που σε ένα μεγάλο βαθμό λαμβάνουν μεγαλύτερες τιμές από τον κλασικό δείκτη, είναι απαραίτητοι ώστε οι στόχοι για το 2050 να επιτευχθούν και να μην αποτύχει το εγχείρημα της μείωσης των ρύπων.

Οι τεχνολογίες που θα εφαρμόζονται στα πλοία για να τα βοηθούν να ικανοποιεί τον EEDI πρόκειται να αυξήσουν το αρχικό κόστος των πλοίων. Η εύρεση των κατάλληλων σχεδιαστικών επιλογών που θα ανταποκρίνονται στις ανάγκες την αγοράς ώστε να υπάρχει σύντομη απόδοση επένδυσης είναι θέμα μείζονος σημασίας πλέον για τους πλοιοκτήτες.

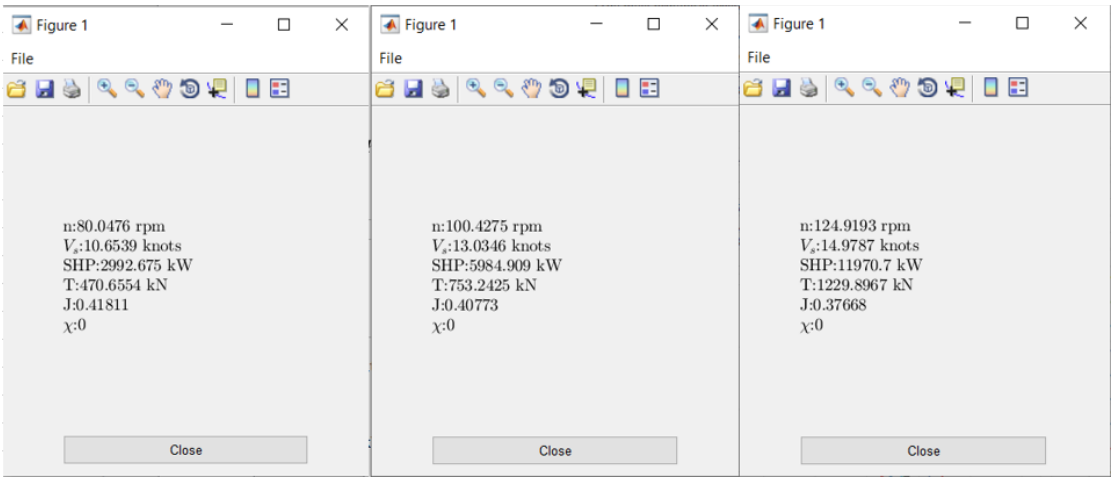
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. ‘’MARPOL ANNEX VI Prevention of air pollution from ships’’, Νοέμβριος 2020.
2. Θεμελής Ν., ‘’ΣΝΜΜ-ΕΜΠ-Αξιολόγηση της Συμπεριφοράς και Απόδοσης πλοίων-Πλαίσιο του IMO για την ενεργειακή αποδοτικότητα των πλοίων’’, 2020. Retrieved from https://mycourses.ntua.gr/
3. ‘’IMO, MEPC.203(62):ANNEX 19’’,Ιούλιος 2011.
4. https://www.myseatime.com/blog/detail/ship-energy-efficiency
5. https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Air%20pollution/M2%20Energy%20Efficiency%20Regulations%20-%20IMO%20TTT%20course%20presentation%20final1.pdf
6. ‘’ANNEX 5 RESOLUTION MEPC 308(73)’’, Οκτώβριος 2018.
7. ‘’ANNEX 6 MEPC.1/Circ.796’’, Οκτώβριος 2012.
8. ‘’IMO, 2013, MEPC. 232(65): 2013 Interim Guidelines for determining minimum propulsion power to maintain the maneuverability of ships in adverse conditions, International Maritime Organization, London”
9. ‘’ITTC Recommended Procedures and Guidelines, Analysis of Speed/Power Trial Data’’, 2014.
10. Liu, S, Papanikolaou, A., Bolbot, V., 2016, ‘’An improved formula for estimating the added resistance of ships in engineering applications’’, J. Marine Sci. Appl. (2016) 15: 442-451.
11. Liu, S., Papanikolaou, A., 2019, ‘’Approximation of the added resistance of ships with small draft or in ballast condition by empirical formula’’, Journal of Engineering for the Maritime Environment, 223(1), 27-40.
12. Liu, S., Papanikolaou, A., 2021, ‘’On the effect of biofouling on the minimum propulsion power of ships for safe navigation in realistic conditions, Biofouling.
13. Παπανικολάου Α.(2009). ‘’Μελέτη Πλοίου – Μεθοδολογίες Προμελέτης (Τεύχος 1). Αθήνα: Εκδόσεις Συμεών’’.
14. Αραβανής, Διαμάντης ‘’ΘΕΜΑ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΠΛΟΙΟΥ ΕΡΩΤΗΜΑ 9^{A}, Υπολογισμός Αντίστασης σε ήρεμο νερό’’, 2022
15. https://www.wingd.com/en/engines/general-technical-data-(gtd)/
16. Λουκάκης, Θ., & Μαλιάτσος, Κ. (2016). Πρόωση Πλοίου. Προγράμματα Η/Υ και οι εφαρμογές τους (Τόμος Γ.). Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Retrieved from https://repository.kallipos.gr/handle/11419/462
17. M.M. Bernitsas, D. Ray, P.Kinley, ‘’Kt, Kq and efficiency curves for the WAGENIGEN B-SERIES propellers’’, Μάιος 1981.
18. Lindstad E., Borgen H., Eskeland S., Paalson C., Psaraftis H and Turan O. ‘’The Need to Amend IMO’s EEDI to Include a Threshold for Performance in Waves (Realistic Sea Conditions) to Achieve the Desired GHG Reduction’’, Ιούλιος 2019.
19. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2092678216302138

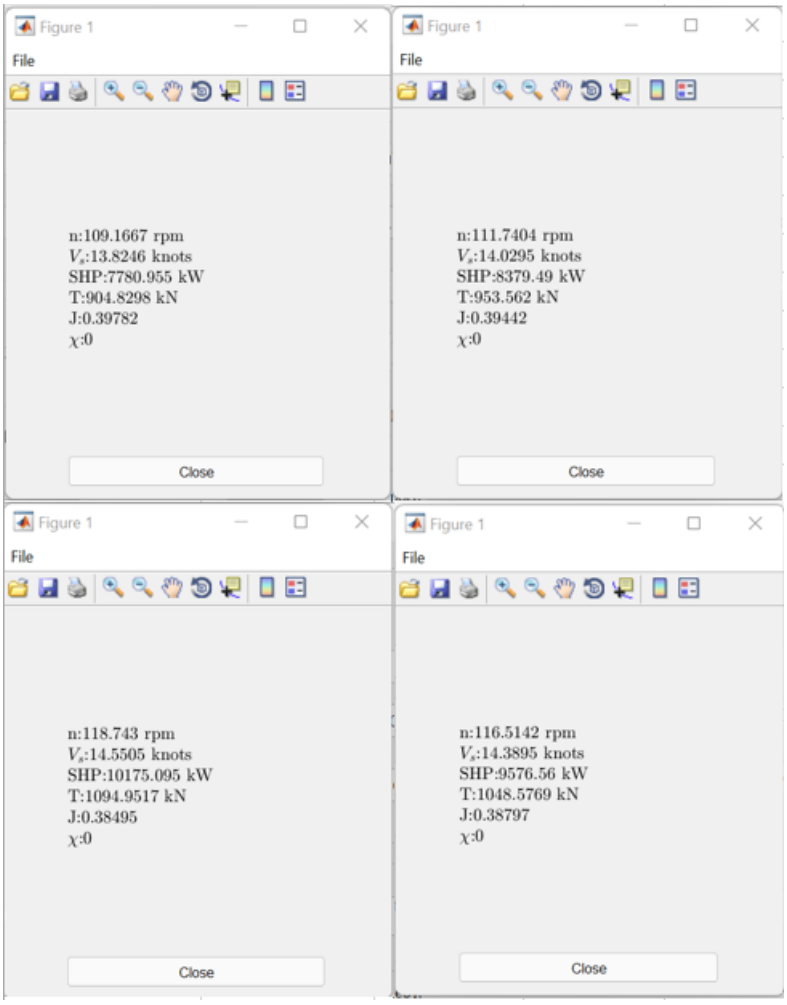
20. Chen, Chapron, Ezraty, Vandemark, ''A Global View of Swell and Wind Sea Climate in the Ocean by Satellite Altimeter and Scatterometer'', Φεβρουάριος 2002.
21. Αραβανής, Διαμάντης ''ΘΕΜΑ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΠΛΟΙΟΥ ΕΡΩΤΗΜΑ 7'', 2022.
22. Resistance and Propulsion committee of the 29th ITTC,''ITTC Performance prediction method, Ιούνιος 2021.
23. MAN, ''MUN 2015-3 Market Update Note, Light Running Margin'', Απρίλιος 2015.
24. Λουκάκης, Θ., Δόδουλας, Α., Κουρεμένος, Δ. (2016). Πρόωση Πλοίου. Επιλογή Κύριας Μηχανής (Τόμος Α.). Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Retrieved from https://repository.kallipos.gr/handle/11419/462.
25. ''IACS CSR for bulk carriers and oil tankers'', Δεκέμβριος 2013.
26. Λουκάκης, Πρόγραμμα PROPULSION. https://repository.kallipos.gr/handle/11419/462
27. E. A. Bouman, E. Lindstad et al, "State-of-the-art technologies, measures, and potential for reducing GHG emissions from shipping – A review, Transportation Research Part D 52 (2017) 408–421.
28. «Οδηγίες χρήσεως μεθοδικών σειρών B.S.R.A για τον υπολογισμό της αντίστασης προώσεως» (Φυλλάδιο No. 4).
29. Φυλλάδιο No. 9 «Υπολογισμός Αντιστάσεως με τη μέθοδο Lap/Keller».
30. Πολίτης, ''ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΩΣΗ ΠΛΟΙΟΥ'', Μάϊος 2018.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

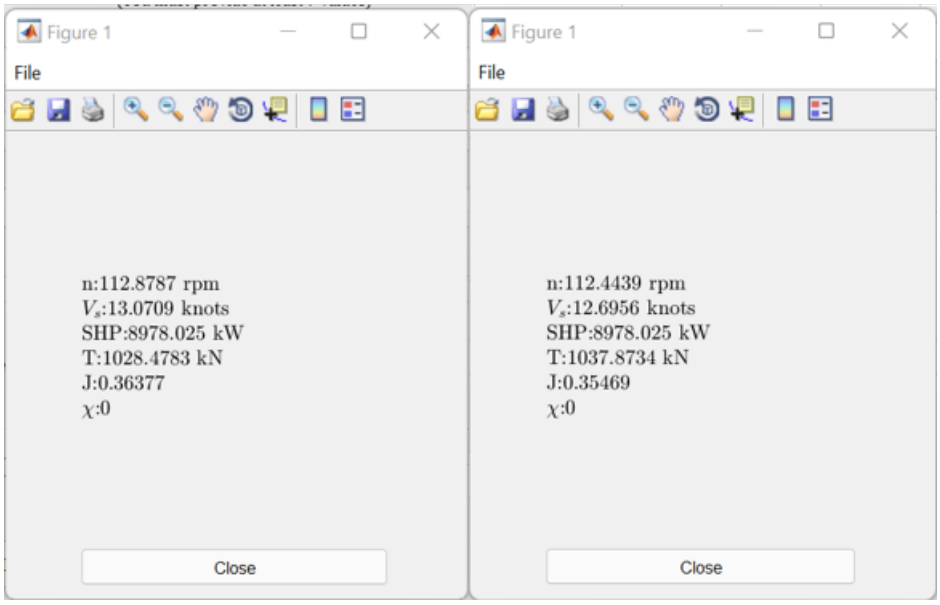
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Αποτελέσματα τους προγράμματος Propulsion για κάθε τροποποιημένο δείκτη



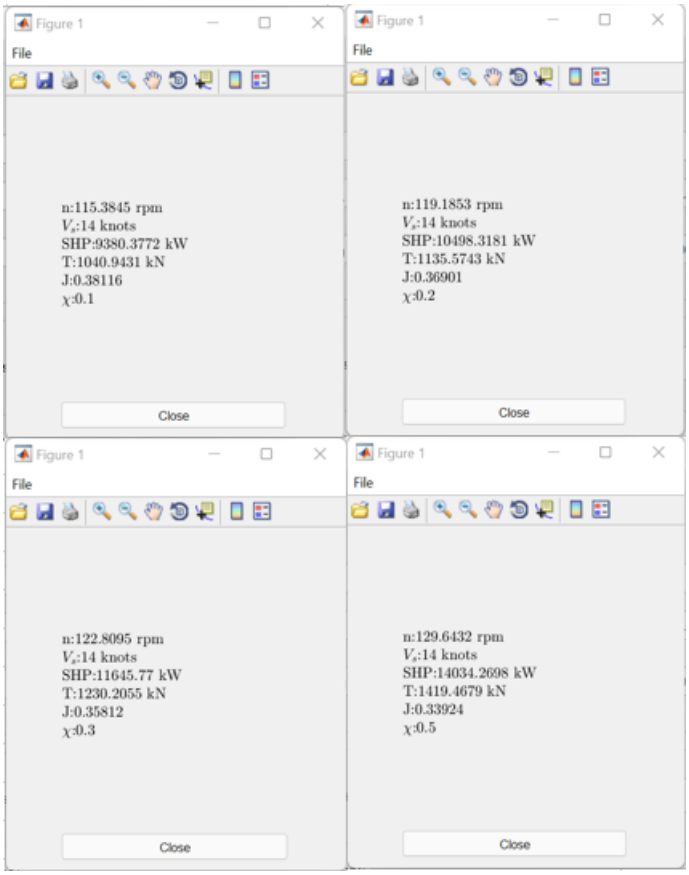
Εικόνα 12: Αποτελέσματα Propulsion για Pme=25/50/100% MCR [26]



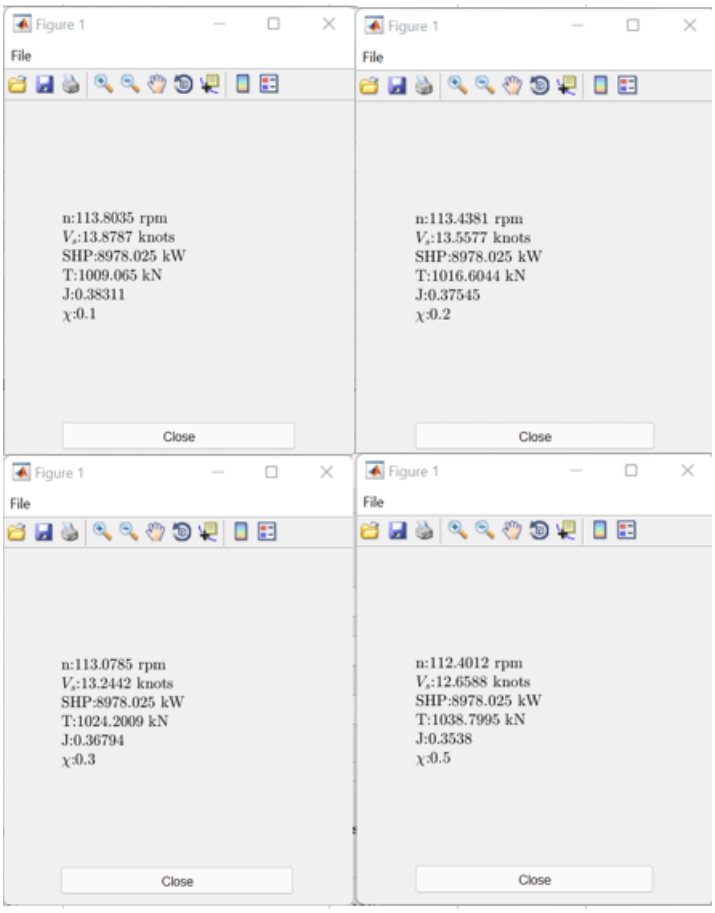
Εικόνα 13: Αποτελέσματα Propulsion για Pme=65/70/80/85% MCR [26]



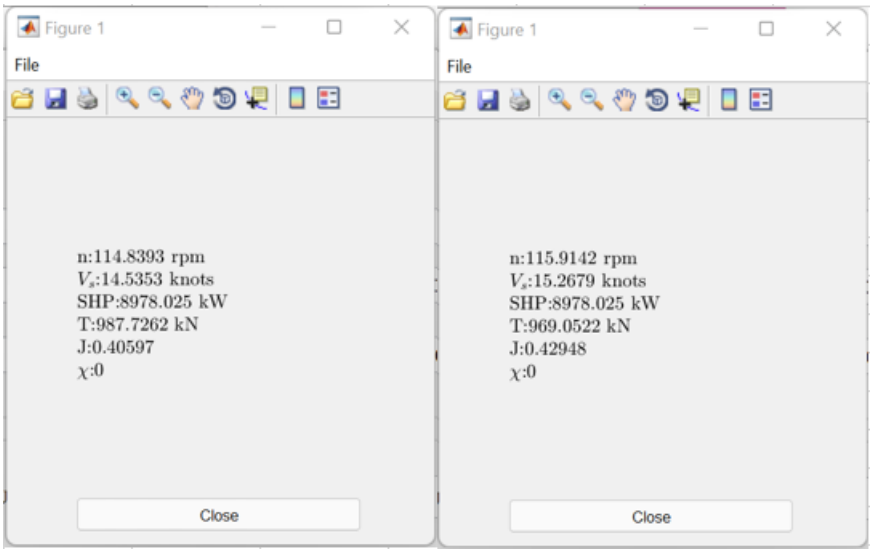
Εικόνα 14: Αποτελέσματα Propulsion για ks=5.000/10.000 μm [26]



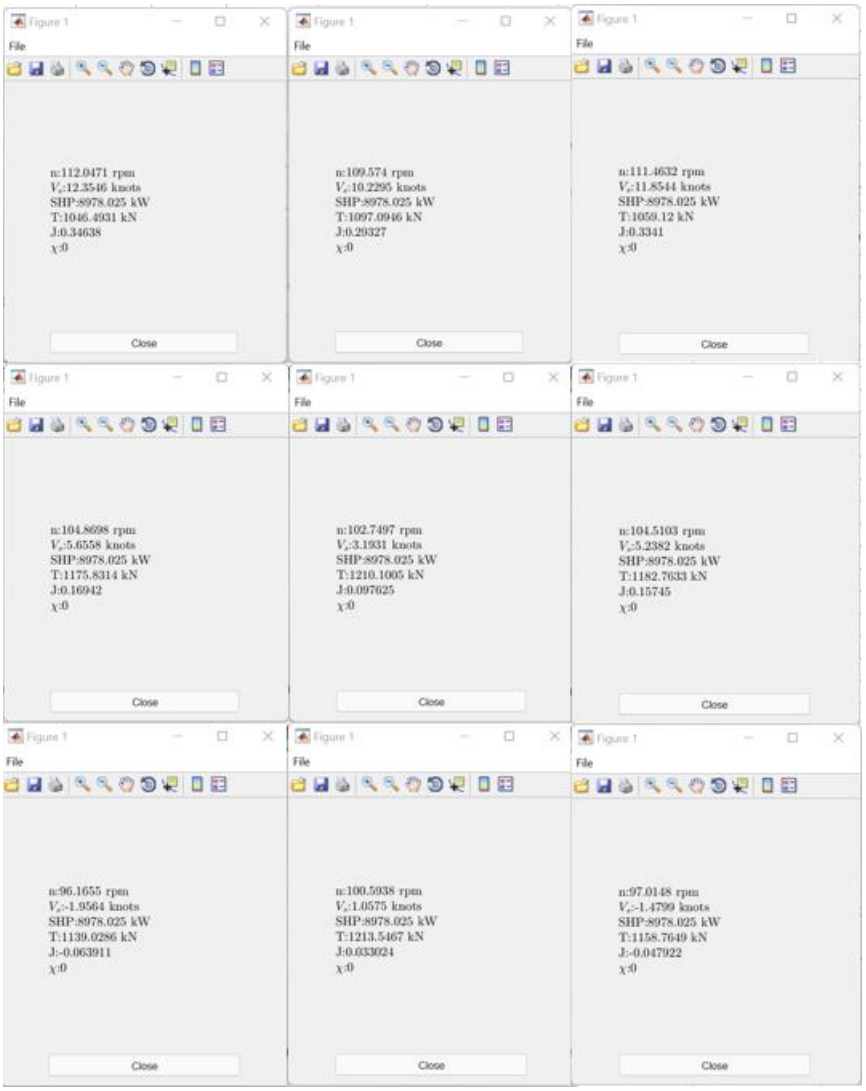
Εικόνα 15: Αποτελέσματα Propulsion για Vref=14 knots και χ=0,1/0,2/0,3/0,5 [26]



Εικόνα 16: Αποτελέσματα Propulsion για Pme=75% MCR και χ=0,1/0,2/0,3/0,5 [26]



Εικόνα 17: Αποτελέσματα Propulsion για DWT=75/50% [26]

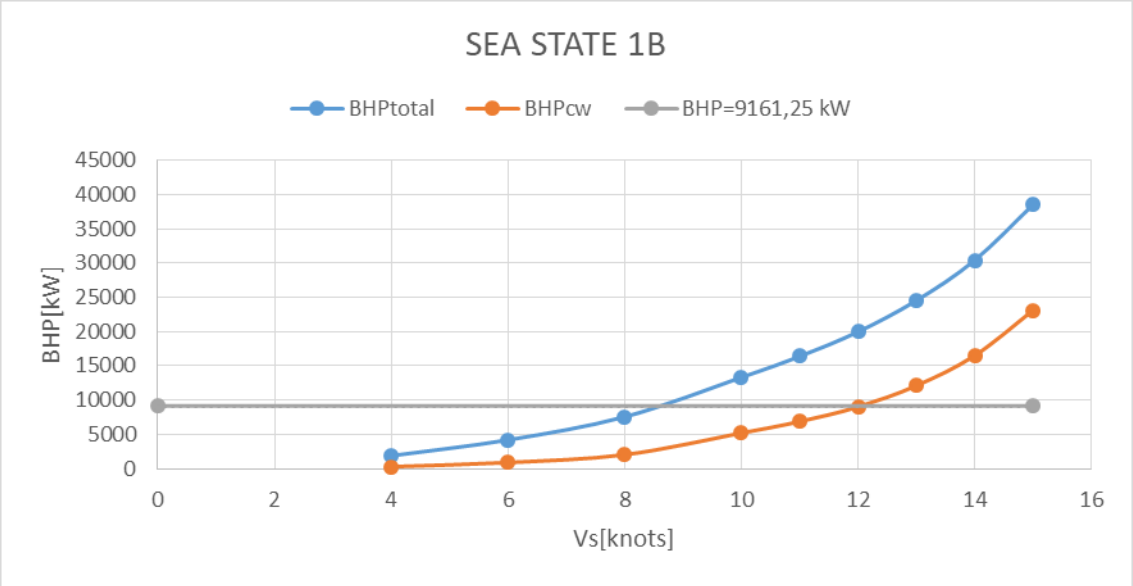


Εικόνα 18: Αποτελέσματα Propulsion για κάθε sea state [26]

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Διαδικασία υπολογισμού fw για κάθε sea state

Πίνακας 50: Υπολογισμός Ολικής αντίστασης και ισχύος BHP για το sea state 1B

1B	Vs [knots]								
	4	6	8	10	11	12	13	14	15
Raw	175,32	252,9	325,75	387,19	412,98	435,56	455,29	472,19	486,67
Rcw	40,35	86,03	147,35	300,39	361,76	434,78	539,03	682,01	891,55
Rair	57,049	65,094	73,66	82,765	87,521	92,401	97,412	102,566	107,843
Roλ	272,719	404,024	546,76	770,345	862,261	962,741	1091,732	1256,766	1486,063
BHP[Kw]	1885,830	4190,690	7561,602	13317,183	16396,779	19971,828	24535,025	30416,523	38535,020
BHPcw[kW]	279,017	892,336	2037,827	5192,931	6879,238	9019,406	12113,884	16506,154	23118,735

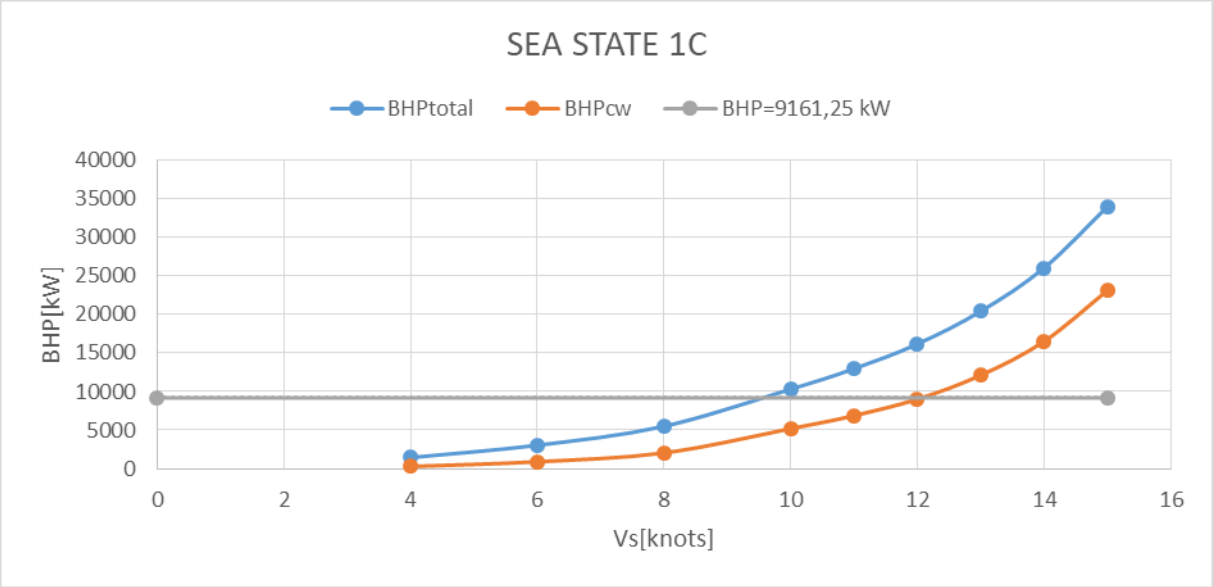


Σχήμα 34: Διάγραμμα BHP-Vs για το sea state 1B

Από το σχήμα προκύπτει ότι $fw(1B) = \frac{Vw}{Vref} = \frac{8,63}{12,098} = 0,71809$

Πίνακας 51: Υπολογισμός Ολικής αντίστασης και ισχύος BHP για το sea state 1C

1C	Vs [knots]								
	4	6	8	10	11	12	13	14	15
Raw	111,97	141,9	176,29	213,51	232,77	252,27	271,92	291,56	311,12
Rcw	40,35	86,03	147,35	300,39	361,76	434,78	539,03	682,01	891,55
Rair	57,049	65,094	73,66	82,765	87,521	92,401	97,412	102,566	107,843
Roλ	209,369	293,024	397,3	596,665	682,051	779,451	908,362	1076,136	1310,513
BHP[Kw]	1447,770	3039,356	5494,595	10314,725	12969,901	16169,522	20414,062	26044,877	33982,842
BHPcw[kW]	279,017	892,336	2037,827	5192,931	6879,238	9019,406	12113,884	16506,154	23118,735

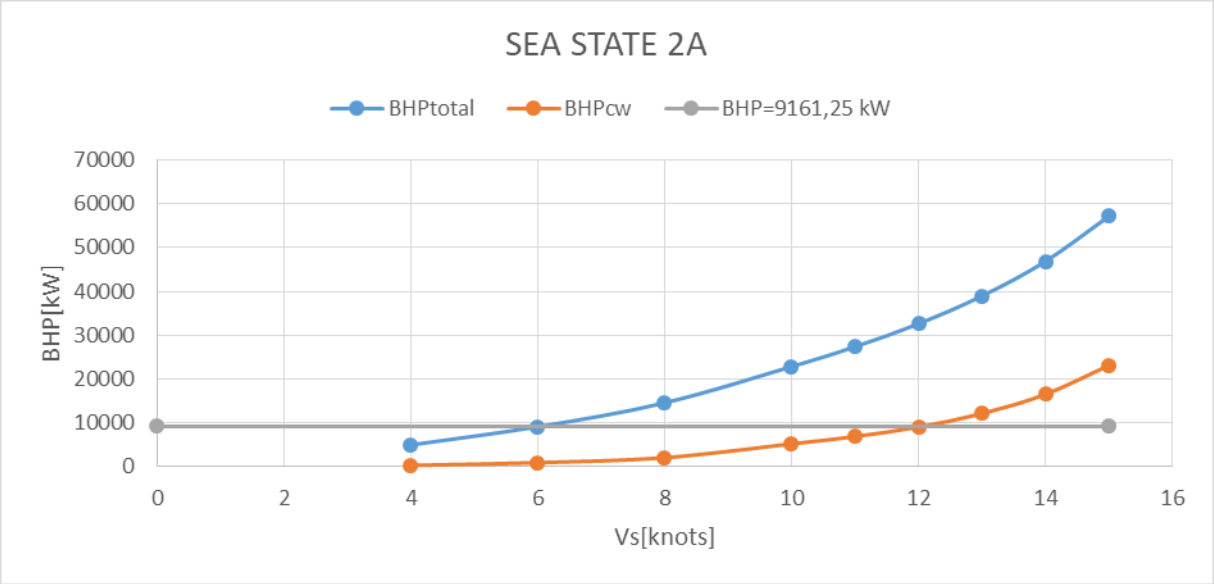


Σχήμα 35: Διάγραμμα BHP-Vs για το sea state 1C

Από το σχήμα προκύπτει ότι $fw(1C) = \frac{Vw}{Vref} = \frac{9,777}{12,098} = 0,81353$

Πίνακας 52: Υπολογισμός Ολικής αντίστασης και ισχύος BHP για το sea state 2A

2A	Vs								
	4	6	8	10	11	12	13	14	15
Raw	576,37	679,37	782,53	886,17	938,21	990,4	1042,76	1095,28	1147,97
Rcw	40,35	86,03	147,35	300,39	361,76	434,78	539,03	682,01	891,55
Rair	100,911	111,522	122,653	134,325	140,366	146,528	152,822	159,261	165,819
Roλ	717,631	876,922	1052,533	1320,885	1440,336	1571,708	1734,612	1936,551	2205,339
BHP[Kw]	4962,360	9095,767	14556,361	22834,532	27389,469	32604,701	38982,780	46868,827	57186,528
BHPcw[kW]	279,017	892,336	2037,827	5192,931	6879,238	9019,406	12113,884	16506,154	23118,735

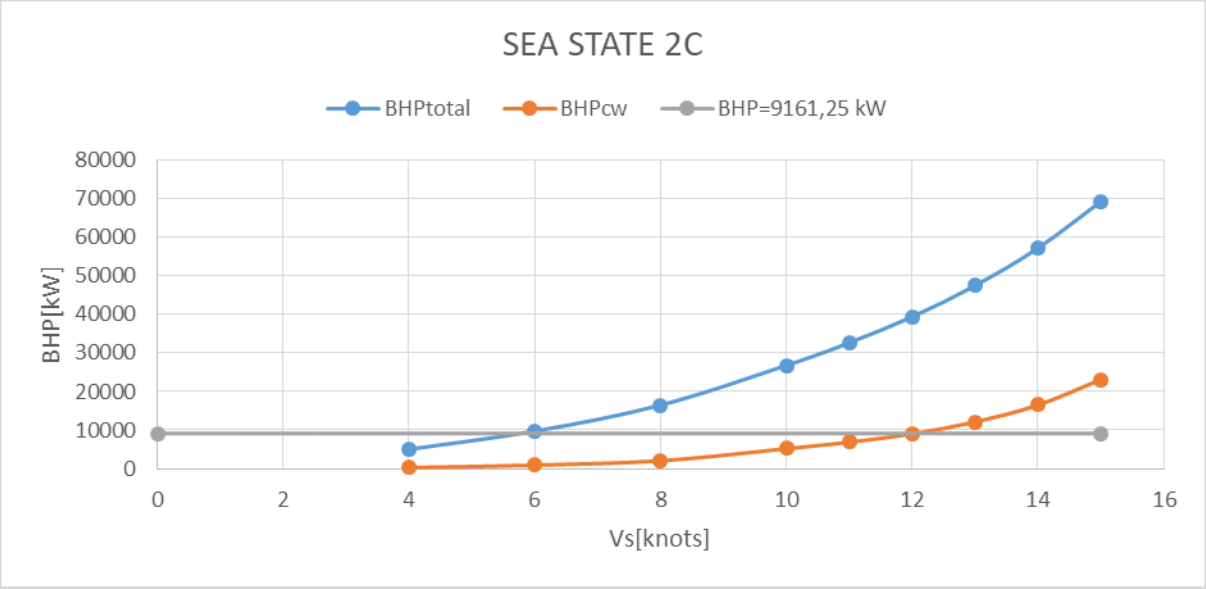


Σχήμα 36: Διάγραμμα BHP-Vs για το sea state 2A

Από το σχήμα προκύπτει ότι $fw(2A) = \frac{Vw}{Vref} = \frac{5,9}{12,098} = 0,49093$

Πίνακας 53: Υπολογισμός Ολικής αντίστασης και ισχύος BHP για το sea state 2C

2C	Vs								
	4	6	8	10	11	12	13	14	15
Raw	584,97	741,38	921,03	1115,5	1216,12	1318	1420,66	1523,26	1615,46
Rcw	40,35	86,03	147,35	300,39	361,76	434,78	539,03	682,01	891,55
Rair	100,911	111,522	122,653	134,325	140,366	146,528	152,822	159,261	165,819
Roλ	726,231	938,932	1191,033	1550,215	1718,246	1899,308	2112,512	2364,531	2672,829
BHP[Kw]	5021,829	9738,958	16471,794	26799,028	32674,213	39400,683	47475,511	57226,892	69308,986
BHPcw[kW]	279,017	892,336	2037,827	5192,931	6879,238	9019,406	12113,884	16506,154	23118,735



Σχήμα 37: Διάγραμμα BHP-Vs για το sea state 2C

Από το σχήμα προκύπτει ότι $fw(2C) = \frac{Vw}{Vref} = \frac{5,705}{12,098} = 0,474705$

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Υπολογισμός της αντίστασης σε ήρεμο νερό

Πίνακας 54: Χαρακτηριστικά υπό σχεδίαση πλοίου "MOZAMBICAN" [14]

Ship Name		**MOZAMBICAN**				
Ship Type		**Bulk Carrier**				
	Μέγεθος	**Τύπος**			**Τιμή**	
Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά	Ολικό Μήκος	L_{OA} (m)			178.410	
	Μήκος Μεταξύ καθέτων	L_{BP} (m)			170	
	Μήκος ισάλου	L_{WL} (m)			172.929	
	Πλάτος	B (m)			30	
	Κοίλο	D (m)			16.15	
	Βύθισμα	T (m)			11.4	
	Frame Spacing	F.S (m)	Fr.(-4) – Fr.10	14 Frames	0.78	Μήκος : 10.73
			Fr.10 – Fr.29	19 Frames	0.85	Μήκος : 16.15
			Fr.29 – Fr.197	168 Frames	0.90	Μήκος : 151.53
			Σύνολο :	201 Frames	-	Μήκος : 178.410
	Ύψος προστέγου	h_{DB} (m)	Fr.10 – Fr. 14		Γραμμική Μείωση από 2.135m έως 1.82 m	
			Fr.14 – Fr.15		1.82	
			Fr.15 – Fr.197		1.605	
Συντελεστές	Γάστρας	C_B			0.830	
	Ισάλου επιφάνειας	C_{WL}			0.904	

	Μορφής	C_M	0.997
	Πρισματικός	C_P	0.833
Συνολικό Βάρος	Εκτόπισμα	Δ (t)	49560.4
Πυκνότητα	Πυκνότητα νερού	cγ (t/m^3)	1.027
Ύψος Εξάλων	Summer Freeboard	FB_{SUMMER} (m)	4.724
Κέντρο Βάρους	Διάμηκες από Α.Ρ.	LCG (m)	89.794
	Κατακόρυφο από B.L	KG (m)	9.212
Κέντρο άντωσης	Διάμηκες από Α.Ρ.	LCB_{AP}(m)	89.783
	Διάμηκες από Midship	LCB_{MS} (m)	4.783
Μέση τομή		A_M (m^2)	340.974
Επιφάνεια Βολβού	Cross Area Param.	$A_{BLB,t}$ (m^2)	78.36
	Length Area Param.	$A_{BLB,l}$ (m^2)	36.9931
Απόσταση άξονα από τρόπιδα		h =	3.27
Βρεχόμενη Επιφάνεια	@ T=11.4 m	S_A (m^2)	8120.46

Εφαρμόστηκαν τρείς μέθοδοι υπολογισμού αντίστασης για το υπό σχεδίαση πλοίο.

Ο υπολογισμός της αντίστασης για το υπό σχεδίαση πλοίο θα πραγματοποιηθεί με τη βοήθεια τριών συστηματικών σειρών υπολογισμού αντίστασης:

- B.S.R.A.
- Lap-Keller
- Formdata

Ο υπολογισμός της αντίστασης έγινε σε ένα εύρος (-4,+1) κόμβων σε σχέση με την ταχύτητα υπηρεσίας (14.0 knots). Ακόμη τα στοιχεία του πίνακα που αφορούν το πλοίο εξάχθηκαν από το πρόγραμμα AVEVA που χρησιμοποιήθηκε κατά το Θ.Μ.Σ.Π. και προέκυψαν κατά τη διαδικασία της προμελέτης της σχεδίασης του πλοίου.

B.S.R.A

Για τον υπολογισμό της αντίστασης με βάση τη μέθοδο B.S.R.A. αντλήθηκαν δεδομένα από το βοηθητικό φυλλάδιο «Οδηγίες χρήσεως μεθοδικών σειρών B.S.R.A για τον υπολογισμό της αντίστασης προώσεως» (Φυλλάδιο No.4)[28]. Αρχικά χρειάστηκε να βρεθούν τα χαρακτηριστικά του πλοίου στα οποία αναφέρονται τα αποτελέσματα της μεθόδου. Ο διαχωρισμός γίνεται με βάσει το συντελεστή γάστρας C_B. Το υπό σχεδίαση πλοίο έχει C_B=0.83 > 0.725 που είναι το

όριο διαφοροποίησης της B.S.R.A. Συνεπώς σύμφωνα με το φυλλάδιο τα χαρακτηριστικά του πλοίου που αναφέρεται η μέθοδος είναι (πλοίο αναφοράς):

- L_{BP} = 121.92 m
- B = 16.76 m
- T = 6.71 m
- LCB = +2% LBP πλώρα από τη μέση τομή
- Βολβοειδής πλώρη

Η κατά B.S.R.A., εκτίμηση της αντίστασης του υπό μελέτη σκάφους περιλαμβάνει τον υπολογισμό του συντελεστή αντίστασης © ενός πλοίου αναφοράς με συγκεκριμένη μορφή και την διόρθωση των αποτελεσμάτων για μια σειρά αποκλίσεων που αυτή η μορφή παρουσιάζει σε σχέση με το υπό μελέτη πλοίο. Οι διορθώσεις αυτές είναι πέντε στον αριθμό (δ1 έως δ5). Οι πρώτοι τρεις (δ1 έως δ3) αποτελούν συντελεστές με τους οποίους πρέπει να πολλαπλασιάσουμε την αρχική μας εκτίμηση για τον συντελεστή ©, ενώ οι ακόλουθοι δύο προστίθενται στο παραπάνω γινόμενο.

Στη συνέχεια υπολογίζεται ο συντελεστής © για το πλοίο μας με γραμμική παρεμβολή στα σχήμα 7β του φυλλαδίου στο εύρος των ταχυτήτων που αναφέρθηκε παραπάνω με βήμα 1 knot (10.0 -15.0 knots).

Ακόμη υπολογίζεται η ταχύτητα αναφοράς του πλοίου με βάση τον τύπο:

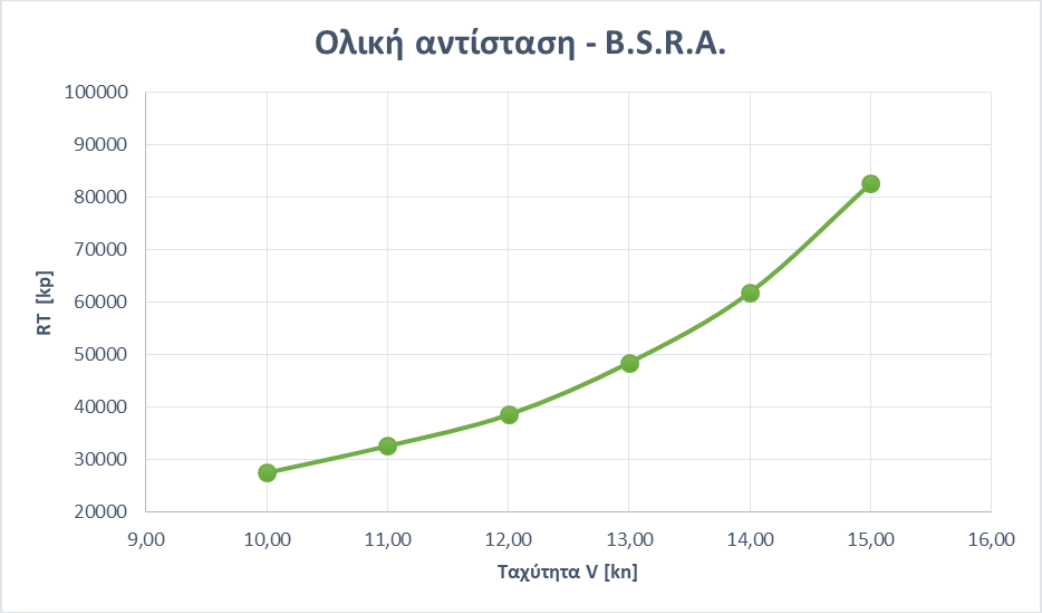
$$V_{reference\ ship} = V_{ship} \cdot \sqrt{\frac{121.92}{L_{BP}}}$$

Εξίσωση 38: Vref κατά BSRA

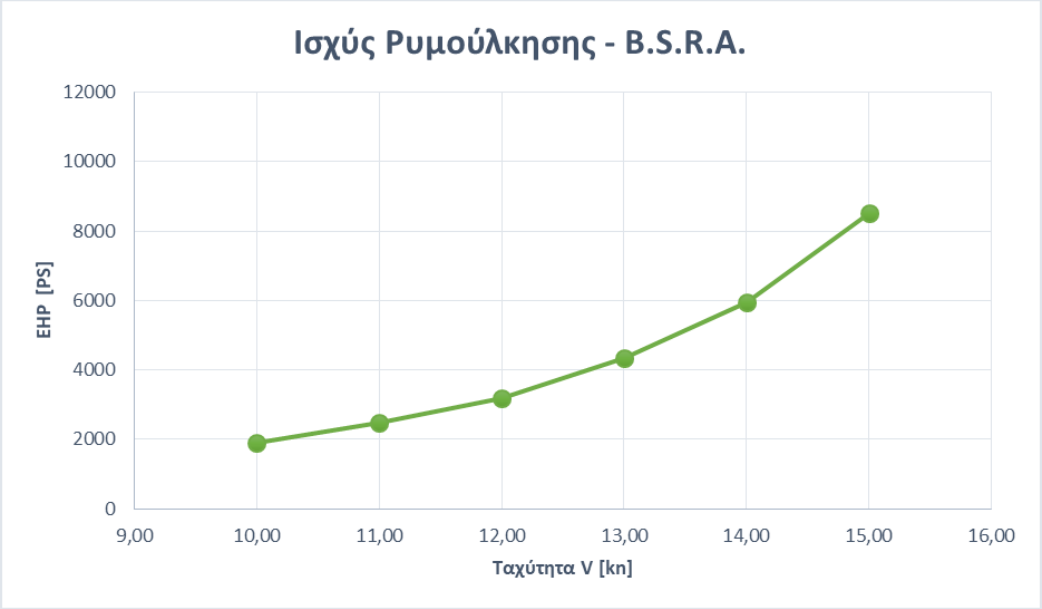
Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για το εύρος των ταχυτήτων που εξετάζεται στην παρούσα έκθεση παρουσιάζονται στον πίνακα 55 καθώς και στα σχήματα 38 και 39.

Πίνακας 55:Αποτελέσματα B.S.R.A.

Μέθοδος B.S.R.A.						
$V_{M/T}$ [kn]	10,00	11,00	12,00	13,00	14,00	15,00
$V_{M/T}$ [m/s]	5,14	5,66	6,17	6,69	7,20	7,72
$©_{M/T}$	0,60	0,58	0,58	0,62	0,68	0,80
R_T [kp]=	27513	32618	38585	48507	61889	82677
$10^3 \cdot C_T$ =	2,45	2,40	2,38	2,55	2,81	3,27
EHP [PS]=	1887	2461	3176	4325	5943	8507
EHP [kW]=	1388	1810	2336	3181	4371	6257



Σχήμα 38: Ολική Αντίσταση κατά B.S.R.A.



Σχήμα 39: Ισχύς Ρυμούλκησης κατά B.S.R.A.

LAP-KELLER

Η μέθοδος περιγράφεται στο Φυλλάδιο No. 9 «Υπολογισμός Αντιστάσεως με τη μέθοδο Lap/Keller».[30]

Σύμφωνα με τη μέθοδο LAP-KELLER, η συνολική αντίσταση του πλοίου αποτελείται από τη αντίσταση τριβής R_F, και τις υπόλοιπες αντιστάσεις R_R. Οι δύο παραπάνω συνιστώσες της αντίστασης λαμβάνονται για το υπό μελέτη πλοίο αφού πρώτα

διορθωθούν με βάση κάποιους συντελεστές, η χρήση των οποίων γίνεται για την διόρθωση τις επίδρασης κάποιων γεωμετρικών λόγων του σκάφους. Η ολική αντίσταση δίνεται από τις σχέσεις:

$$R_T = (R_F + R_R \cdot k_1) \cdot k_2$$

$$R_F = (C_F + C_A) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S$$

$$R_R = \zeta_r \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A_M$$

Εξίσωση 39: Ολική και Επιμέρους Αντιστάσεις κατά LAP-KELLER

Όπου, k_1: συντελεστής διόρθωσης από το σχήμα 7 του φυλλαδίου, για L/B≠6.5

k_2: συντελεστής διόρθωσης για B/T≠2,4 και υπολογίζεται από τις σχέσεις:

$$k_2 = \begin{cases} 1 + 0.05 \cdot \left(\frac{B}{T} - 2.4\right), for \frac{B}{T} \geq 2.4 \\ 1, \quad for \frac{B}{T} < 2.4 \end{cases}$$

Εξίσωση 40 :Συντελεστής διόρθωσης κ2 για B/T≠2,4

C_F: συντελεστής τριβής που λαμβάνεται από το σχήμα 8 του φυλλαδίου σαν συνάρτηση του γινομένου $V \cdot L_d$ (V σε κόμβους, L_d σε μέτρα), όπου $L_d = 1.01 \cdot L_{BP}$, εκτός και αν $L_{WL} < 1.01 \cdot L_{BP}$ οπότε $L_{WL} = L_d$. Στη συγκεκριμένη περίπτωση **L_d = 171.7 m.**

C_A: συντελεστής συσχέτισης από τον πίνακα 1

ρ: πυκνότητα θαλασσινού νερού στους 15°C

S: βρεχόμενη επιφάνεια (m^2), και σύμφωνα με τον Lap δίνεται από τη σχέση:

$$S = \left(3.4 \cdot \nabla^{\frac{1}{3}} + 0.5 \cdot L_d\right) \cdot \nabla^{\frac{1}{3}} = 7632.123\, m^2$$

A_M: επιφάνεια μέσης τομής (m^2)

ζ_r: συντελεστής υπολοίπων αντιστάσεων

C_{Pd}: πρισματικός συντελεστής βασισμένος στο μήκος L_d και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$C_{Pd} = \frac{\nabla}{\mathrm{C_M \cdot B \cdot T \cdot L_d}} = 0.824$$

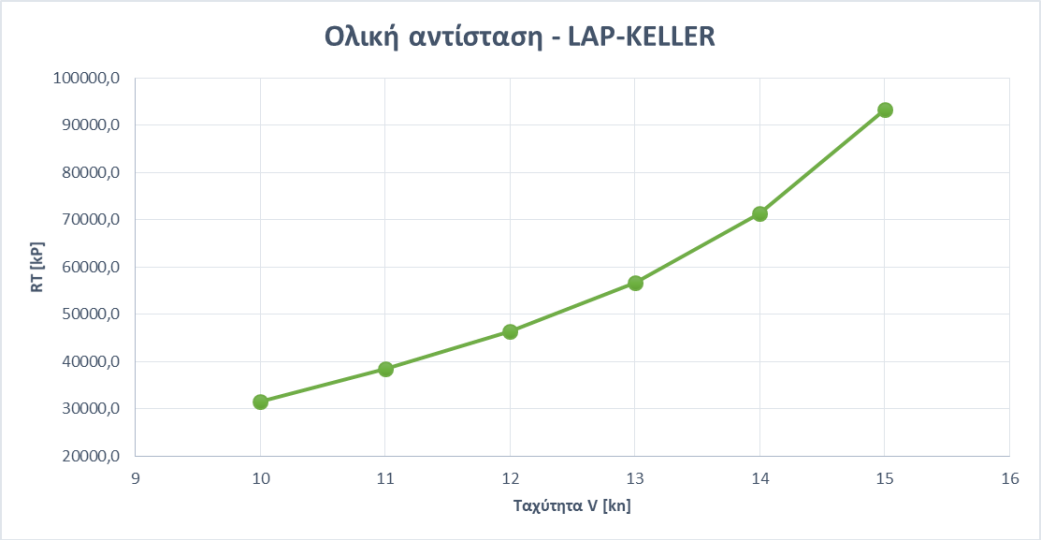
Ανάλογα με τη διαμήκη θέση του κέντρου άντωσης LCB και τον πρισματικό συντελεστή C_P ο Lap διακρίνει πέντε κατηγορίες πλοίων από A έως E των οποίων οι περιοχές φαίνονται στο σχήμα 1 του φυλλαδίου. Για κάθε κατηγορία δίνεται ένα διάγραμμα της μεταβολής ενός είδους συντελεστή υπολοίπων αντιστάσεων ζ_r ως συνάρτηση του C_P και του αριθμού $\frac{V}{\sqrt{C_{Pd} \cdot L_d}}$.

Σύμφωνα με το σχήμα 1 το υπό μελέτη πλοίο ανήκει στην κατηγορία A.

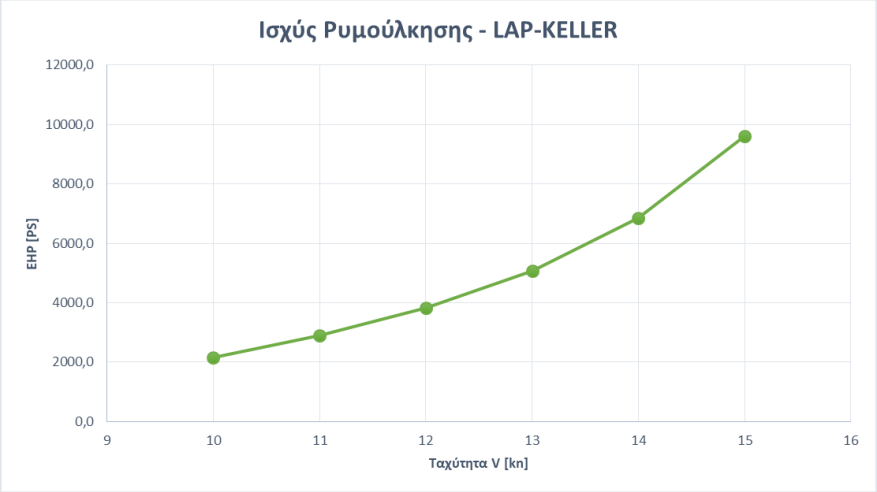
Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για το εύρος των ταχυτήτων που εξετάζεται στην παρούσα έκθεση παρουσιάζονται στον πίνακα 56 καθώς και στα σχήματα 40 και 41.

Πίνακας 56: Αποτελέσματα LAP-KELLER

$V_{M/T}$ [kn]	10	11	12	13	14	15
$V_{M/T}$ [m/s]	5,144	5,659	6,173	6,688	7,202	7,717
Υπολογισμός συντελεστή αντίστασης τριβής C_F						
$V\,[kn]\cdot L_d\cdot 10^{-3}$	1,717	1,889	2,060	2,232	2,404	2,576
$10^3\cdot C_F$ =	1,583	1,5678	1,5526	1,5374	1,5222	1,507
Υπολογισμός συντελεστή συσχετίσεως C_A						
$10^3\cdot C_A$ =	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Υπολογισμός συντελεστή υπόλοιπης αντίστασης ζ_R						
$V/((C_{pd}\cdot L_d)^{1/2})$ =	0,432	0,476	0,519	0,562	0,605	0,649
ζ_R =	0,0225	0,023	0,0242	0,0269	0,0323	0,0416
Υπολογισμός αντίστασης τριβής R_F						
R_F =	18837,4	22598,9	26663,3	31021,0	35662,3	40577,5
Υπολογισμός υπόλοιπης αντίστασης R_R						
R_R =	10620,1	13135,9	16448,4	21457,7	29881,6	44179,5
Υπολογισμός ολικής αντίστασης τριβής R_T						
R_T [kP] =	31624,9	38407,5	46439,5	56776,4	71441,5	93335,9
Υπολογισμός ισχύος ρυμούλκησης EHP						
EHP [PS]=	2169,2	2897,9	3822,5	5062,7	6860,4	9603,1
EHP [kW]=	1595,5	2131,4	2811,4	3723,6	5045,8	7063,1



Σχήμα 40: Ολική Αντίσταση κατά LAP-KELLER



Σχήμα 41: Ισχύς Ρυμούλκησης κατά LAP-KELLER

FORMDATA

Η FORMDATA είναι μια μέθοδος υπολογισμού αντίστασης πλοίου ανεπτυγμένη στο Πολυτεχνείο της Δανίας. Αποτελεί συνδυασμό των αποτελεσμάτων των μεθοδικών σειρών Taylor, 60, S.S.P.A., N.P.L. όπως και των αποτελεσμάτων του Lap. Τα αποτελέσματα της μεθόδου έχουν ταξινομηθεί με βάση τον λόγο $L/\nabla^{1/3}$, τον πρισματικό συντελεστή C_p και τον λόγο $V/\sqrt{L}$ (ή εναλλακτικά του αριθμού Froude).

Ο τελικός υπολογισμός της αντίστασης συνίσταται από τον υπολογισμό του συντελεστή υπόλοιπης αντίστασης C_R και του συντελεστή τριβής C_F.

Συντελεστής υπόλοιπης αντίστασης C_R

Οι τιμές του συντελεστή C_R δίνονται από τα αντίστοιχα διαγράμματα της μεθόδου [30]. Η μέθοδος FORMDATA υπολογίζει το C_R για πλοία με πρότυπη μορφή, δηλαδή με πρότυπες τιμές του λόγου B/T, θέση του LCB, κανονικά σχήματα εγκάρσιων τομών, πρύμνη τύπου καταδρομικού και πλώρη με κλίση χωρίς βολβό. Για παρεκκλίσεις από την πρότυπη μορφή, γίνονται οι ανάλογες διορθώσεις στον συντελεστή.

Τα απαραίτητα στοιχεία του υπό μελέτη πλοίου συγκεντρώνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 57: Στοιχεία FORMDATA

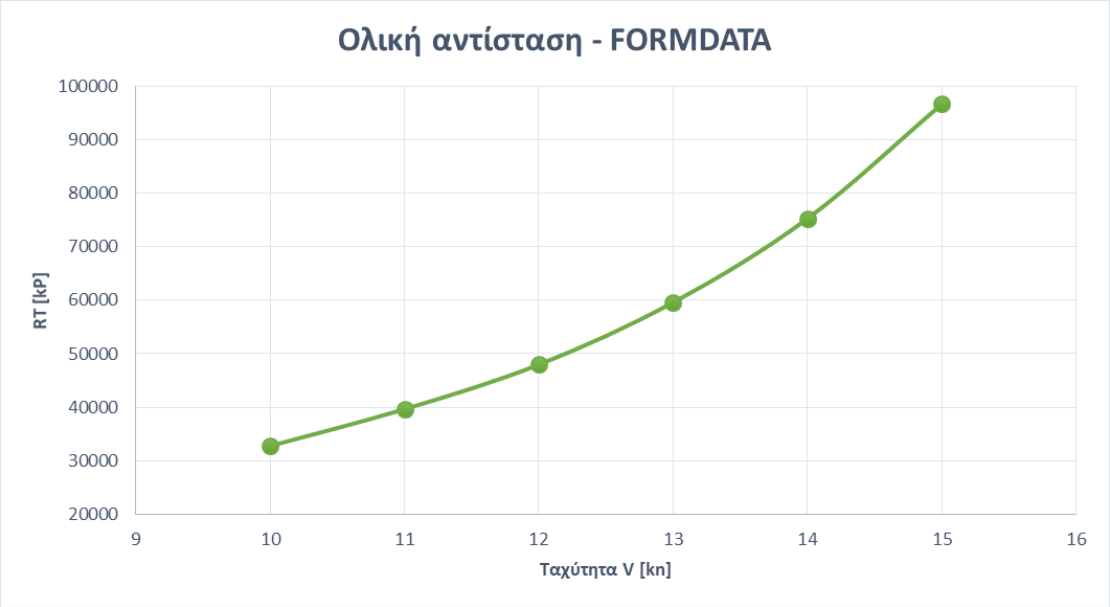
$L/\nabla^{1/3}$	4.750
C_p	0.818
B/T	2.632
LCB ($\%L_{WL}$)	2.766
A_{BT}/A_X	0.223

Ο υπολογισμός του αρχικού C_R γίνεται για ένα εύρος τιμών ταχυτήτων του πλοίου και μέσω γραμμικής παρεμβολής μεταξύ των διαγραμμάτων που ακολουθούν και αντιστοιχούν σε τιμές $L/\nabla^{1/3}$ 4.5 και 5. Σημειώνεται, ότι η καμπύλη του πρισματικού συντελεστή του υπό σχεδίαση πλοίου δεν απεικονίζεται πλήρως στο διάγραμμα. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιήθηκε μια νέα ευθεία C_P, όμοιας γεωμετρίας και σε απόσταση από τις υπόλοιπες τέτοια ώστε να αντιστοιχεί περίπου στην επιθυμητή τιμή. Ο αρχικός υπολογισμός του συντελεστή θα συμβολίζεται με C_{R1}. Τα αποτελέσματα συγκεντρώνονται στη συνέχεια.

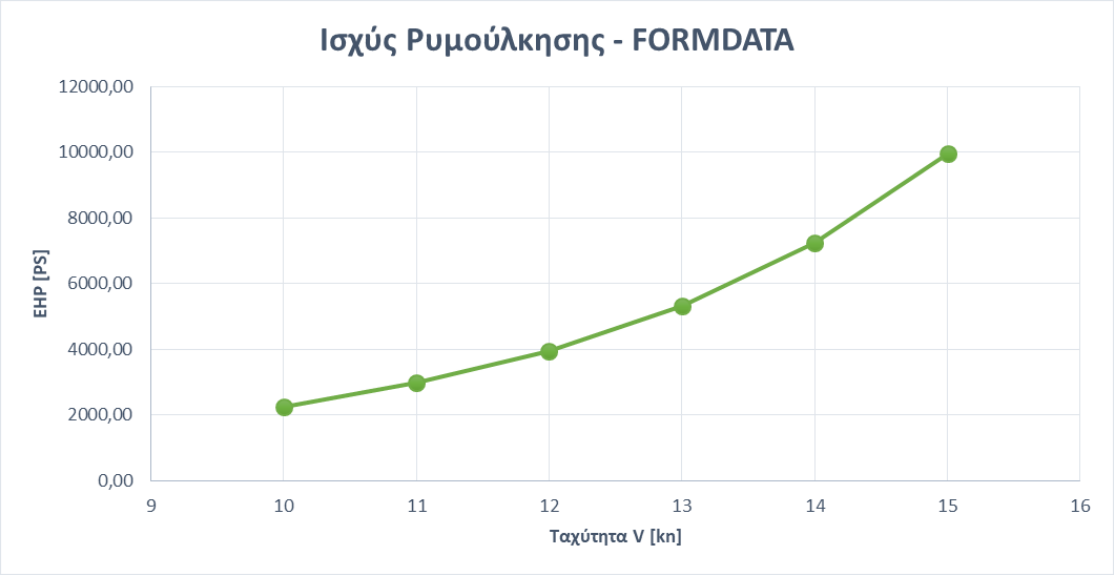
Τα αποτελέσματα της μεθόδου FORMDATA συγκεντρώνονται σε μορφή πίνακα και γραφικά παρακάτω:

Πίνακας 58: Αποτελέσματα FORMDATA

Vs (kn)	10	11	12	13	14	15
10^3 CT	2,9141753	2,914427	2,964108037	3,137975	3,41794	3,824292
RT (kp)	32758,211	39640,85	47980,08656	59612,97	75305,2	96724,84
EHP (PS)	2246,9512	2990,95	3949,260117	5315,665	7231,468	9951,826
EHP (kW)	1652,6304	2199,841	2904,676866	3909,666	5318,738	7319,558



Σχήμα 42: Ολική Αντίσταση κατά FORMDATA



Σχήμα 43: Ισχύς Ρυμούλκησης κατά FORMDATA

ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ-ΙΣΧΥΟΣ ΠΡΟΩΣΗΣ

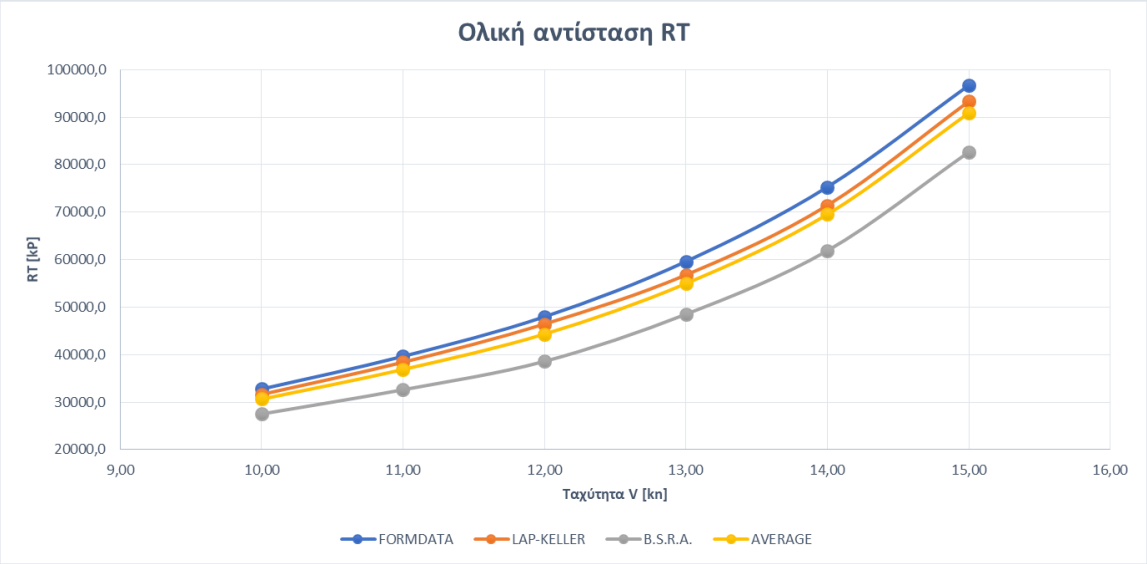
Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα των τριών μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν (BSRA, Lap Keller, Formdata) για το εύρος ταχυτήτων που εξετάστηκαν (10.0-15.0) προκειμένου να αποκτηθεί μια συνολική αίσθηση.

Πίνακας 59: Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα των 3 μεθόδων

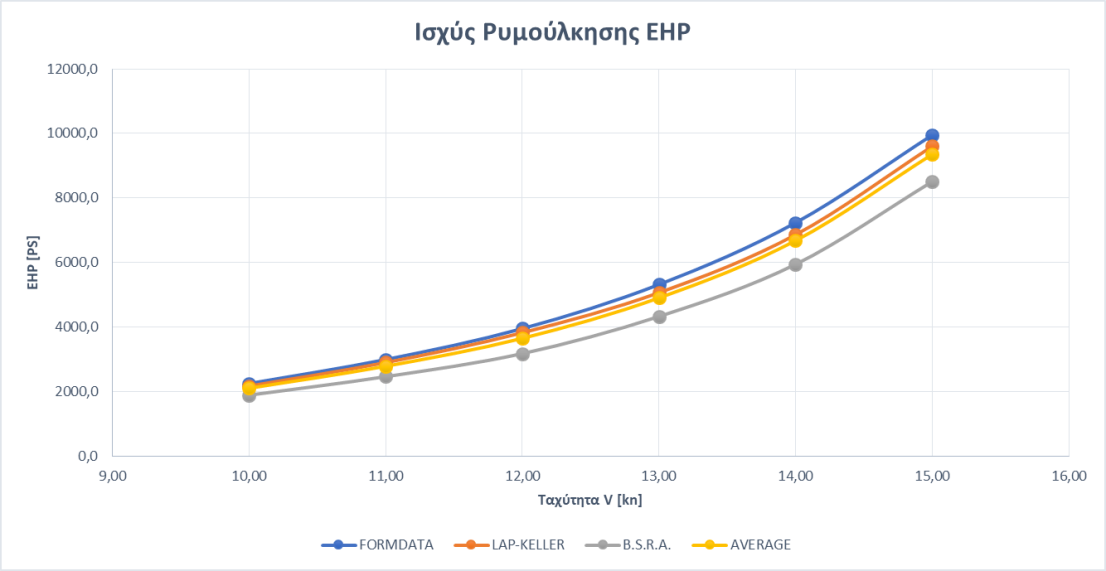
V [kn]	R_T [kP]			EHP [PS]		
	FORMDATA	LAP-KELLER	B.S.R.A.	FORMDATA	LAP-KELLER	B.S.R.A.
10,00	32758,2	31624,9	27512,5	2247,0	2169,2	1887,1
11,00	39640,9	38407,5	32617,8	2990,9	2897,9	2461,1
12,00	47980,1	46439,5	38585,0	3949,3	3822,5	3175,9
13,00	59613,0	56776,4	48507,1	5315,7	5062,7	4325,4
14,00	75305,2	71441,5	61889,5	7231,5	6860,4	5943,2
15,00	96724,8	93335,9	82677,5	9951,8	9603,1	8506,5

Πίνακας 60: Μέσος όρος αντίστασης και ισχύος από τις 3 μεθόδους

3 Methods			
V [kn]	R_T [kP]	EHP [PS]	EHP [kW]
	FORMDATA | LAP-KELLER | B.S.R.A.		
10	30631,87	2101,10	1545,34
11	36888,73	2783,30	2047,09
12	44334,85	3649,22	2683,96
13	54965,51	4901,25	3604,82
14	69545,39	6678,36	4911,87
15	90912,75	9353,83	6879,65



Σχήμα 44: Διάγραμμα Αντίστασης (3 μέθοδοι και μέσος όρος)



Σχήμα 45: Διάγραμμα Ισχύος Ρυμούλκησης (3 μέθοδοι και μέσος όρος)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ: Υπολογισμοί για τα υπόλοιπα sea states για τον υπολογισμό του EEDIweather

Πίνακας 61: Υπολογισμός επιμέρους αντιστάσεων για τα sea states 2A,2B,2C,3A,3B,3C

2A	Vs								
	4	6	8	10	11	12	13	14	15
Raw	576,37	679,37	782,53	886,17	938,21	990,4	1042,76	1095,28	1147,97
Rcw	40,35	86,03	147,35	300,39	361,76	434,78	539,03	682,01	891,55
Rair	100,911	111,522	122,653	134,325	140,366	146,528	152,822	159,261	165,819
Roλ	717,631	876,922	1052,533	1320,885	1440,336	1571,708	1734,612	1936,551	2205,339

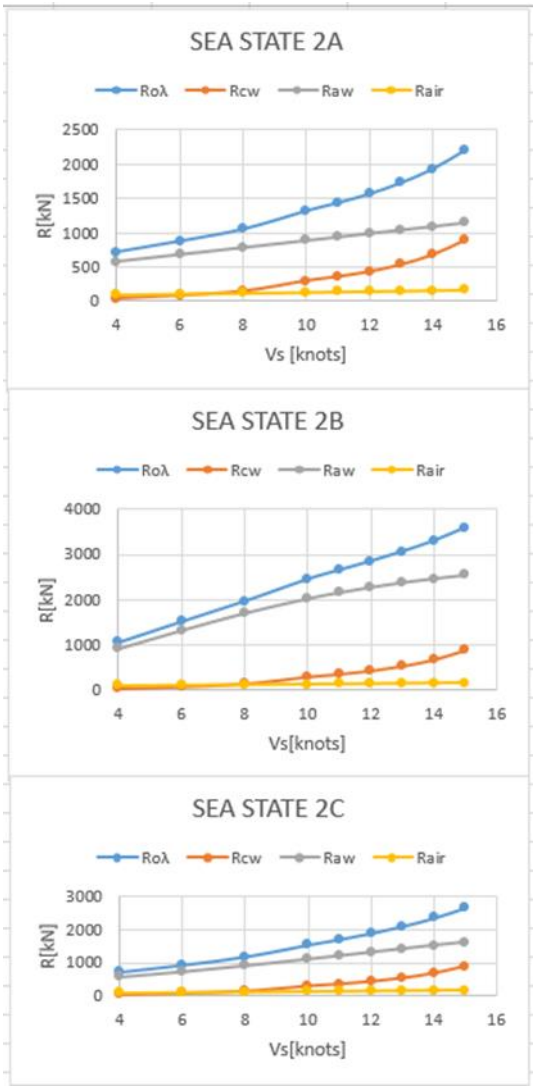
2B	Vs								
	4	6	8	10	11	12	13	14	15
Raw	918,04	1321,28	1701,88	2022,85	2157,62	2275,56	2378,65	2466,93	2542,61
Rcw	40,35	86,03	147,35	300,39	361,76	434,78	539,03	682,01	891,55
Rair	100,911	111,522	122,653	134,325	140,366	146,528	152,822	159,261	165,819
Roλ	1059,301	1518,832	1971,883	2457,565	2659,746	2856,868	3070,502	3308,201	3599,979

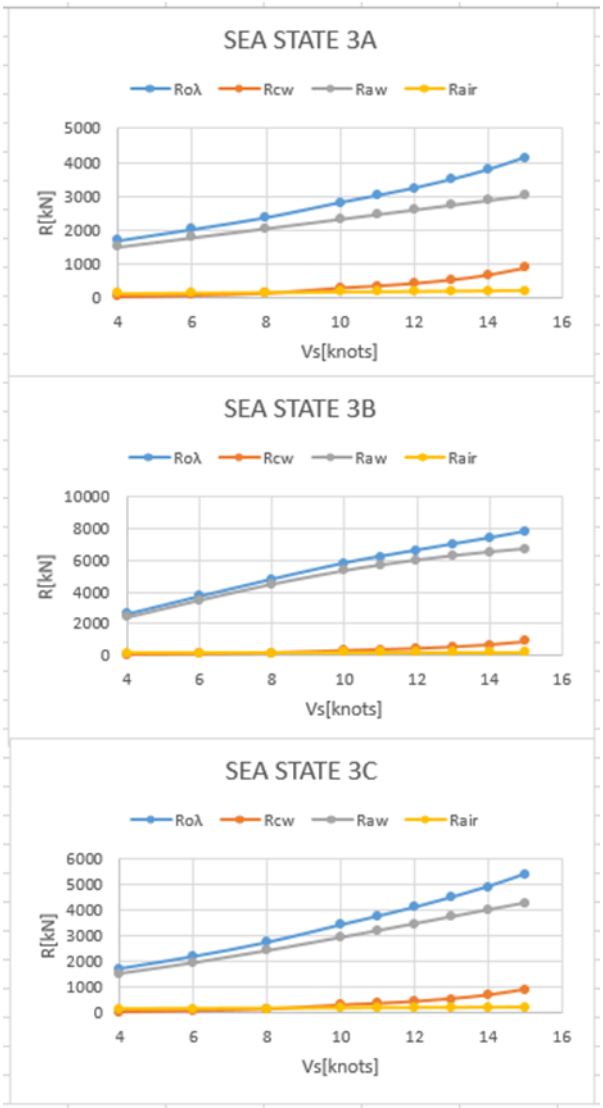
2C	Vs								
	4	6	8	10	11	12	13	14	15
Raw	584,97	741,38	921,03	1115,5	1216,12	1318	1420,66	1523,26	1615,46
Rcw	40,35	86,03	147,35	300,39	361,76	434,78	539,03	682,01	891,55
Rair	100,911	111,522	122,653	134,325	140,366	146,528	152,822	159,261	165,819
Roλ	726,231	938,932	1191,033	1550,215	1718,246	1899,308	2112,512	2364,531	2672,829

3A	Vs								
	4	6	8	10	11	12	13	14	15
Raw	1521,97	1793,96	2066,38	2340,04	2477,45	2615,28	2753,53	2892,22	3031,35
Rcw	40,35	86,03	147,35	300,39	361,76	434,78	539,03	682,01	891,55
Rair	141,221	153,726	166,749	180,314	187,302	194,41	201,649	209,036	216,54
Roλ	1703,541	2033,716	2380,479	2820,744	3026,512	3244,47	3494,209	3783,266	4139,44

3B	Vs								
	4	6	8	10	11	12	13	14	15
Raw	2424,21	3489	4494,04	5341,58	5697,47	6008,91	6281,11	6514,23	6714,08
Rcw	40,35	86,03	147,35	300,39	361,76	434,78	539,03	682,01	891,55
Rair	141,221	153,726	166,749	180,314	187,302	194,41	201,649	209,036	216,54
Roλ	2605,781	3728,756	4808,139	5822,284	6246,532	6638,1	7021,789	7405,276	7822,17

3C	Vs								
	4	6	8	10	11	12	13	14	15
Raw	1544,67	1957,7	2432,11	2945,61	3211,31	3480,35	3751,44	4022,37	4292,22
Rcw	40,35	86,03	147,35	300,39	361,76	434,78	539,03	682,01	891,55
Rair	141,221	153,726	166,749	180,314	187,302	194,41	201,649	209,036	216,54
Roλ	1726,241	2197,456	2746,209	3426,314	3760,372	4109,54	4492,119	4913,416	5400,31


SEA STATE 2A
Roλ
Rcw
Raw
Rair
R[kN]
2500
2000
1500
1000
500
0
4
6
8
10
12
14
16
Vs [knots]
SEA STATE 2B
Roλ
Rcw
Raw
Rair
R[kN]
4000
3000
2000
1000
0
4
6
8
10
12
14
16
Vs[knots]
SEA STATE 2C
Roλ
Rcw
Raw
Rair
R[kN]
3000
2000
1000
0
4
6
8
10
12
14
16
Vs[knots]



Σχήμα 46: Διαγράμματα των επιμέρους αντιστάσεων για τα sea states2,2B,2C,3A,3B,3C