ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΝΑΥΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΑΙΤΗΣΕΩΝ ΙΣΧΥΟΣ ΕΝΟΣ BULK CARRIER ΣΕ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥΣ. Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΠΡΟΣΘΕΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ»

ΧΡΥΣΟΣΤΟΜΟΣ Λ. ΠΑΠΑΓΙΑΝΝΙΔΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΓΡΗΓΟΡΙΟΣ Ι. ΓΡΗΓΟΡΟΠΟΥΛΟΣ

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ 2022

ΣΥΝΟΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποσκοπεί στην εκτίμηση της απαιτούμενης ισχύος πρόωσης ενός bulk carrier προκειμένου να συγκριθεί με την αντίστοιχη μετρούμενη πραγματική και έτσι να αξιολογηθεί η κατάσταση του εν λόγω πλοίου κατά την περίοδο που αφορούν τα δοθέντα λειτουργικά δεδομένα από τη διαχειρίστρια εταιρεία. Με αυτόν τον τρόπο δύναται, εκτός της αξιολόγησης της κατάστασης της γάστρας και της έλικας (αν συνηγορούν και τα δεδομένα), να προσδιοριστούν οι αιτίες των όποιων αποκλίσεων, που έχουν αντίκτυπο στην κατανάλωση καυσίμου, στη διακύμανση της ταχύτητας άρα και στην απόδοση του πλοίου. Έτσι, καθίσταται δυνατή η πρόταση μέτρων, που μπορούν να περιληφθούν στο SEEMP (Ship Energy Efficiency Management Plan) του υπό ανάλυση πλοίου. Μέτρων που σχετίζονται όχι μόνο με τη λειτουργία του πλοίου, αλλά και με τη διαδικασία συλλογής δεδομένων (ειδικά του σημαντικού ύψους κύματος), ίσως και με αύξηση των μετρούμενων παραμέτρων (που δε λαμβάνονταν υπ' όψιν από την εταιρεία). Οποιαδήποτε βελτίωση του επιπέδου της αποδοτικότητας του πλοίου επιδρά στη μείωση του λειτουργικού κόστους, των καταναλώσεων, καθώς και στις εκπομπές του πλοίου.

Αρχικά, υπολογίζεται ο δείκτης EEXI (που αναλύεται στην έκθεση), ο οποίος θα είναι υποχρεωτικός για το εν λόγω bulk carrier από 1η Ιανουαρίου 2023. Καθ' αυτό τον τρόπο, εξετάζεται σε γενικό πλαίσιο (και όχι βάσει λειτουργικών δεδομένων, παρά περιγραφικά) το επίπεδο ενεργειακής αποδοτικότητας του υπό ανάλυση πλοίου, αλλά και προτείνονται μέτρα με τα οποία θα μειωθεί το επίπεδο εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, κατά τέτοιον τρόπο που να συμβαδίζει το πλοίο με τους νέους κανονισμούς. Μέτρα, όμως που μπορεί να σχετίζονται με εγκατάσταση καινοτόμων τεχνολογιών (πχ σύστημα ανάκτησης θερμότητας), σχεδιαστικά (πχ προσθήκη βολβού πηδαλίου), ίσως και εγκατάσταση απλών συσκευών περιορισμού ισχύος άξονα (πχ Engine Power Limitation).

Στη συνέχεια, πραγματοποιείται εκτίμηση της αντίστασης ρυμούλκησης για ήρεμο νερό, χωρίς άνεμο, (απουσία ρευμάτων) για το υπό ανάλυση bulk carrier. Πιο συγκεκριμένα, προσδιορίζεται η αντίσταση κυματισμού με χρήση του προγράμματος Swan 2 (σε full scale), αναγωγή της στη συνολική με χρήση της μεθόδου Hughes, αλλά και λαμβάνοντας υπ' όψιν την αντίσταση του αέρα και προσαύξηση λόγω παρελκομένων. Η χρήση του προγράμματος Swan 2 πραγματοποιείται ελλείψει model tests. Έτσι, κρίνεται αναγκαίος, για την εν λόγω κατάσταση (ήρεμο νερό, χωρίς άνεμο) προσδιορισμός της αντίστοιχης αντίστασης πρόωσης κυρίως για την ταχύτητα υπηρεσίας, άρα και ισχύος πρόωσης. Η εν λόγω υπολογισθείσα ισχύς συγκρίνεται με την αντίστοιχη που περιέχεται στο sea trials report, προκειμένου να διαπιστωθεί κατά πόσον η ακολουθούμενη διαδικασία είναι αξιόπιστη. Επιπλέον, πραγματοποιείται εκτίμηση της αντίστασης του ανέμου (ομοίως και για αντίσταση αέρα) με χρήση των συντελεστών από το report του Blendermann (1996), που προέκυψαν έπειτα από πραγματοποίηση πειραμάτων μοντέλων σε αεροδυναμική σήραγγα για διάφορες γεωμετρίες προβεβλημένων επιφανειών. Έπειτα, πραγματοποιείται εκτίμηση της πρόσθετης αντίστασης κυματισμού. Αυτή γίνεται με χρήση του προγράμματος FRANK. Ωστόσο, τα αποτελέσματα του εν λόγω προγράμματος συγκρίνονται με την εκτίμηση της εν λόγω συνιστώσας της αντίστασης με εμπειρικές, περιγραφικές μεθόδους. Αυτές είναι η μέθοδος Kreitner, η προτεινόμενη μέθοδος του προτύπου ISO15016 (Stawave 2), η μέθοδος των Liu- Papanikolaou, που βασίστηκε σε regression analysis.

Επισημαίνεται, ότι οι προαναφερθείσες εκτιμήσεις της αντίστασης πραγματοποιούνται για μια επιλεχθείσα έμφορτη κατάσταση και για μια ερματισμένη κατάσταση. Οι εν λόγω καταστάσεις φόρτωσης αντλούνται από το Loading Manual και είναι παραπλήσιων των καταστάσεων δοκιμών. Για κάθε κατάσταση φόρτωσης καθορίζεται, βάσει των δοθέντων σχεδίων, η γεωμετρία του πλοίου, που θα αποτελέσει και είσοδο για τα χρησιμοποιούμενα προγράμματα. Τονίζεται, ακόμη, ότι προκειμένου να πραγματοποιηθεί αναγωγή της αντίστασης ρυμούλκησης σε αντίσταση πρόωσης επιλέγεται έλικα σειράς

Wageningen-B, με παραπλήσια γεωμετρικά χαρακτηριστικά (ίδια διάμετρο, βήμα, λόγο εκτεταμένης επιφάνεια, αριθμό πτερυγίων) με την πραγματική, δεδομένου ότι δεν υπάρχουν διαθέσιμα αποτελέσματα από το πείραμα έλικας σε ελεύθερη ροή.

Τα λειτουργικά δεδομένα που χρησιμοποιούνται αποτελούν ως επί το πλείστον ενδείξεις μέτρησης οργάνων υψηλής συχνότητας, που είναι εγκατεστημένα στο πλοίο. Τα εν λόγω δεδομένα κοινοποιούνται απευθείας online στα κεντρικά γραφεία της διαχειρίστριας εταιρείας. Βάσει αυτών υπολογίζονται ορισμένοι KPIs, όποιοι είναι δυνατόν βάσει των μετρούμενων μεγεθών. Μάλιστα, παρατίθενται σε διαγραμματική μορφή, προκειμένου τα αποτελέσματα να είναι περισσότερο κατανοητά και να μπορούν ευκολότερα να αχθούν τα όποια συμπεράσματα. Τέλος, πραγματοποιείται σχολιασμός της ακρίβειας των χρησιμοποιούμενων μεθόδων, αλλά και επεξήγηση των όποιων αποκλίσεων.

ABSTRACT

This diploma thesis aims to estimate the required propulsion power of a bulk carrier in order to compare it with the corresponding measured actual power and thus to evaluate the condition of the ship during the period covered by the given operational data from the managing company. In this way, in addition to assessing the condition of the hull and the propeller (if the data is available), the causes of any deviations, (which have an impact on fuel consumption, speed variation and therefore on the performance of the ship), can be identified. This makes it possible to propose measures that can be included in the SEEMP (Ship Energy Efficiency Management Plan) of the ship which is under analysis. Measures related not only to the operation of the ship, but also to the data collection process (especially for the significant wave height), perhaps by increasing the measured parameters (which were not taken into account by the company). Any improvement in the level of efficiency of the ship has an impact on the reduction of operating costs, consumption, as well as on the ship's emissions.

Initially, the EEXI index (discussed in the report) is calculated, which will be mandatory for this bulk carrier from 1 January 2023. In this way, the level of energy efficiency of the under analysis ship is examined in a general context (rather than on the basis of operational data, rather than descriptive data) and measures are proposed to reduce the level of carbon dioxide emissions in such a way that the ship complies with the new regulations. Measures, however, may relate to the installation of innovative technologies (e.g. heat recovery system), design (e.g. addition of rudder bulbs), perhaps even the installation of simple power limitation devices (e.g. Engine Power Limitation).

Consequently, an estimation of the towing resistance for calm water, without wind, (in the absence of currents) is carried out for this bulk carrier. In particular, the wave resistance is determined using the Swan 2 program (full scale), reaching the total one using the Hughes method, but also taking into account the wind resistance and increase due to appendages. Swan 2 is used in the absence of model tests. It is therefore necessary, for the situation in question (calm water, no wind), to determine the corresponding propulsion resistance, in particular for the service speed and hence the propulsion power. This calculated power shall be compared with that contained in the sea trials report in order to establish whether the procedure followed is reliable. In addition, the wind resistance (and similarly for air resistance) is estimated by using the coefficients from the Blendermann (1996) report, obtained from model experiments in an aerodynamic tunnel for various projected surface geometries. Then, an estimation of the additional wave resistance is carried out. This is done by using the FRANK program. However, the results of this program are compared with the estimation of this drag component by empirical, descriptive methods. These are the Kreitner method, the recommended method of ISO15016 (Stawave 2), the Liu-Papanikolaou's method, which is based on regression analysis.

It should be noted that the aforementioned estimates of resistance are carried out for a selected loaded condition and for a loaded condition. These loading conditions are taken from the Loading Manual and are similar to the test conditions. For each loading condition the ship geometry is determined, based on the given drawings, which will be the input for the programs used. It is also emphasised that, in order to carry out the transformation of the towing resistance to the propulsion resistance, a Wageningen-B series' propeller with similar geometrical characteristics (same diameter, pitch, aspect ratio, number of blades) as the real one is selected, since no results are available from the free-flow propeller test.

The operational data used are mostly readings from high-frequency instruments installed on board. This data is communicated directly online to the headquarters of the management company. On the basis of this data, certain KPIs are calculated, which are possible on the basis of the measured values. They are

even presented in a graphical form in order to make the results more comprehensible and to come to a conclusion. Finally, the accuracy of the methods used is commented on and any discrepancies explained.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας Γρηγόριο Γρηγορόπουλο, Καθηγητή ΕΜΠ, για την ανάθεση του θέματος, αλλά και τη συνεργασία που υπήρχε. Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω το Δημοσθένη Τριπερίνα για τη βοήθεια που μου παρείχε, όποτε χρειάστηκε. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τη ναυτιλιακή εταιρεία MARAN DRY για τη διάθεση των στοιχείων και των δεδομένων ενός bulk carrier που ήταν απαραίτητα για την εκπόνηση της διπλωματικής.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΣΥΝΟΨΗ 2

ABSTRACT 4

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ 6

1 ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΠΛΟΙΟΥ 9

1.1 ΓΕΝΙΚΑ 9

1.2 EEDI 11

1.3 EEOI 13

1.4 EEXI 14

1.4.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΕΙΚΤΗ EEXI ΓΙΑ ΥΠΟ ΑΝΑΛΥΣΗ BULK CARRIER 15

1.5 CII 22

1.6 SEEMP 23

1.6.1 PART I OF SEEMP 24

1.6.2 PART II OF SEEMP 26

1.6.3 IMO DCS (DATA COLLECTION SYSTEM) 27

2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΠΛΟΙΟΥ 29

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ- ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΛΟΙΟΥ 29

2.2 ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΦΟΡΤΩΣΗΣ 30

2.3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ BODYPLAN 32

2.3.1 ΠΑΡΑΤΡΟΠΙΔΙΑ 38

2.4 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΓΙΑ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ 41

2.5 SHOP TESTS 43

2.6 ONLINE OPERATIONAL DATA 46

2.7 FRANK- ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ 46

2.8 SWAN 2- ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ 47

3 ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ 48

3.1 ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΡΥΜΟΥΛΚΗΣΗΣ ΣΕ ΗΡΕΜΟ ΝΕΡΟ ΧΩΡΙΣ ΑΝΕΜΟ 48

3.1.1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ 48

3.1.2 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ 54

3.1.3 ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΑΕΡΑ 58

3.1.4 ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΠΑΡΕΛΚΟΜΕΝΩΝ 58

3.1.5 ΛΟΙΠΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ 59

3.1.6 ΕΙΔΙΚΑ ΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥΣ 60

3.1.7 ΕΠΙΛΟΓΟΣ ... 63
3.2 ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΑΝΕΜΟΥ ... 63
3.3 ΕΠΙΠΡΟΣΘΕΤΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥ ... 70
3.4 ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΩΝ ... 95
3.5 ΕΠΙΛΟΓΟΣ ... 96
4 ΠΡΟΩΣΗ ... 97
4.1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ... 97
4.1.1 ΤΥΠΟΙ ΚΑΙ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΕΛΙΚΑΣ ... 97
4.1.2 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΡΟΗΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΕΛΙΚΑ ... 101
4.2 ΠΕΡΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ ... 110
4.2.1 «ΝΟΜΟΣ» ΤΗΣ ΕΛΙΚΑΣ ... 110
4.2.2 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΝΑΥΑΡΧΕΙΟΥ ... 111
4.2.3 ΕΙΔΙΚΑ ΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥΣ ... 111
4.3 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΞΗΣΗΣ ΒΑΘΜΟΥ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΠΡΟΩΣΤΗΤΡΙΑΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ... 118
5 OPERATIONAL DATA ... 124
5.1 ΑΚΟΛΟΥΘΟΥΜΕΝΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ... 124
5.1.1 ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΕΞΑΙΤΙΑΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΑΝΕΜΟΥ ... 127
5.1.2 ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΕΞΑΙΤΙΑΣ ΠΡΟΣΘΕΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥ ... 130
5.1.3 ΛΟΙΠΕΣ ΔΙΟΡΘΩΣΕΙΣ ... 130
5.1.4 ΣΥΝΟΨΗ ... 131
5.2 ΣΥΛΛΟΓΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ - ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ... 131
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ... 146
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ... 149

1 ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΠΛΟΙΟΥ

1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η έννοια της αποδοτικότητας του πλοίου είναι πολύ σημαντική για τη σύγχρονη ναυτιλία. Σχετίζεται με την κατανάλωση καυσίμου (γενικώς, όχι μόνο της κύριας μηχανής), καθώς αυτή καθορίζει κυρίως και το επίπεδο αποδοτικότητας του πλοίου. Παρόλα αυτά, δεν θα πρέπει να συνδέεται η εν λόγω έννοια αποκλειστικά με την ενεργειακή αποδοτικότητα του καυσίμου, αν και η μείωση του καυσίμου είναι εν τέλει ο σκοπός, αλλά και με άλλες παραμέτρους. Παραμέτρους, όπως την υδροδυναμική σχεδίαση της γάστρας, τη σχεδίαση της έλικας, την επιλογή της κύριας μηχανής πρόωσης, αλλά και της ζεύξης αυτών που εν τέλει καθορίζει και το σημείο λειτουργίας τους, προκειμένου να επιτευχθεί η ζητούμενη ταχύτητα. Γίνεται, λοιπόν σαφές, ότι η αποδοτικότητα του πλοίου εξαρτάται, εκτός των άλλων, από τη σχεδίαση της γάστρας και της προωστήριας εγκατάστασης. Παρόλα αυτά, όπως είναι λογικό σχετίζεται και με την αποδοτικότητα του ταξιδιού, μέσω βελτιστοποίησης ταξιδιού και λειτουργικών επιδόσεων (πχ πλεύση σε κατάλληλη διαγωγή), αλλά και με την αποδοτικότητα του στόλου, μέσω βελτίωσης επικοινωνίας και συνεργασίας μεταξύ πληρώματος και προσωπικού on shore, με σκοπό την καλύτερη επίγνωση της κατάστασης, προκειμένου να επιτυγχάνεται ορθή λήψη αποφάσεων ως προς το πλοίο και ως προς το περιβάλλον. Βάσει, λοιπόν, των προαναφερθέντων η βελτιστοποίηση σε όλους τους τομείς (τόσο της σχεδίασης, όσο και της λειτουργίας, αλλά και οργανογράμματος) είναι ζωτικής σημασίας για την αποδοτικότητα τόσο ενός πλοίου, όσο και ολόκληρου στόλου.

Ως γνωστόν, η αύξηση της αποδοτικότητας του πλοίου σχετίζεται με τη μείωση κατανάλωσης καυσίμου, προκειμένου αυτό να πλέει στην επιθυμητή ταχύτητα. Καθ' αυτό τον τρόπο μειώνονται οι εκπομπές των καυσαερίων, που αποτελεί πλέον σκοπό της διεθνούς κοινότητας, αλλά και απαίτηση των κανονισμών του IMO. Οι εκπομπές που συγκεντρώνουν το περισσότερο ενδιαφέρον είναι οι σχετικές με οξείδια θείου, αζώτου και το διοξείδιο του άνθρακα. Για αρκετό χρονικό διάστημα η ενασχόληση με την αποδοτικότητα του πλοίου ήταν προαιρετική. Αυτό είχε σαν συνέπεια, οι πλοιοκτήτες να καθορίζουν την πολιτική τους, αποκλειστικά βάσει του συμφέροντός τους, χωρίς ιδιαίτερους περιορισμούς, ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες. Καθώς οι συνθήκες της αγοράς μεταβάλλονταν, έγινε πιο έντονη η ανάγκη για κατασκευή και χρήση ακόμα μεγαλύτερων πλοίων, τα οποία, όμως, συνέφεραν οικονομικά όλο και λιγότερο, καθώς οι απαιτήσεις καυσίμου αυξάνονταν. Οι υψηλές τιμές καυσίμου κάνουν πιο ελκυστικά τα πλοία με μικρότερες ενεργειακές ανάγκες, διότι η αποδοτικότητά τους μειώνει το συνολικό κόστος απόκτησης[1]. Παράλληλα, το επίπεδο των ναύλων διαδραματίζει σημαντικό ρόλο. Πιο συγκεκριμένα, αύξηση των ναύλων συνεπάγεται αύξηση ζήτησης νέων πλοίων και ότι τα ναυπηγεία μπορούν να κατασκευάσουν τυποποιημένης σχεδίασης πλοία, με σχετικά χαμηλό ρίσκο και υψηλό περιθώριο κέρδους. Αντιθέτως, μείωση των ναύλων συνεπάγεται ότι τα ναυπηγεία ανταγωνίζονται για πελάτες (λόγω μειωμένης ζήτησης νέων πλοίων) και ενδέχεται να κατασκευάσουν πλοία πιο αποδοτικά (Faber & Maarten, 2015). Έπειτα, όταν οι ναύλοι είναι υψηλοί και οι τιμές καυσίμων χαμηλές, οι πλοιοκτήτες επιλέγουν μεγιστοποίηση χωρητικότητας φορτίου, αγνοώντας την αποδοτικότητα του πλοίου. Σήμερα, λόγω των καταστάσεων, οι τιμές του καυσίμου είναι πολύ υψηλές και η ανάγκη για ενεργειακή αποδοτικότητα ύψιστης σημασίας.

Ο IMO λαμβάνοντας υπ' όψιν την πρακτική των ναυτιλιακών εταιρειών, αποφάσισε μέσω της συγκρότησης της MEPC, να προτείνει οδηγίες για μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος. Ακόμη, από το 2011 επέβαλε την υποχρεωτικότητα ελέγχου της ενεργειακής αποδοτικότητας, με ισχύ από 1/1/2013. Μάλιστα, ανάλογα με τα συνολικά αποτελέσματα στην παγκόσμια ναυτιλία, δίνονται συνεχώς

[1] Γενικότερα, η κατασκευή πλοίων πιο αποδοτικών σε καύσιμο είναι ακριβότερη, ωστόσο η περίοδος αποπληρωμής μειώνεται σημαντικά, όταν οι τιμές του καυσίμου μειώνονται. Μάλιστα, δεν υπάρχει η ανάγκη να μειωθεί η ταχύτητα πλεύσης, προκειμένου να μειωθούν τα λειτουργικά έξοδα καυσίμων.

νέες οδηγίες, που καθορίζονται από τις αντίστοιχες MEPC, αλλά και αυστηροποιούνται οι κανονισμοί για τις εκπομπές, προκειμένου να επιτευχθούν οι στόχοι και οι επιθυμίες του IMO.

Ως γνωστόν, ένα ιδιαίτερα σημαντικό παγκόσμιο πρόβλημα είναι το φαινόμενο του θερμοκηπίου, που έχει ως επίπτωση την υπερθέρμανση του πλανήτη. Καθίσταται, λοιπόν, αναγκαία η μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, που «συντηρούν» δηλαδή το εν λόγω φαινόμενο. Τέτοια αέρια είναι το CO_2, μεθάνιο, N_2O (υποξείδιο αζώτου), υδρατμός, αλλά και άλλα σωματίδια.

Προς τούτο, η ναυτιλία αντιμετωπίζει όλο και περισσότερες πιέσεις για την απαλλαγή των λειτουργιών της από τις εκπομπές άνθρακα. Ήδη από τον Απρίλιο του 2018[2], ο IMO υιοθέτησε μια φιλόδοξη στρατηγική σχετικά με απαλλαγή της ναυτιλίας από τις εκπομπές άνθρακα εντός του 21^{ου} αιώνα. Θεωρώντας ως έτος αναφοράς το 2008, η στρατηγική αυτή στοχεύει στη μείωση κατά τουλάχιστον 50% των συνολικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τη ναυτιλία ως το 2050. Η επίτευξη αυτών των στόχων απαιτεί την εφαρμογή τεχνολογιών, που βρίσκονται σε ανάπτυξη, την αποδοχή χαμηλότερων ταχυτήτων πλεύσης, καθώς και την ανάπτυξη βιώσιμων καυσίμων με μηδενικό ή ουδέτερο ισοζύγιο άνθρακα. Ακόμη, απαιτεί τη συνεχή παρακολούθηση της ετήσιας εξέλιξης των εκπομπών, μέσω του IMO DCS, για το οποίο γίνεται αναφορά παρακάτω, στην παγκόσμια ναυτιλία και λήψη διορθωτικών αποφάσεων σε επίπεδο οδηγιών, αλλά και κανονισμών από τον IMO.

Εκτός από τα παράγωγα άνθρακα, οι ναυτικοί κινητήρες εκπέμπουν οξείδια του αζώτου NOx, κατά την καύση σε υψηλές θερμοκρασίες, και οξείδια του θείου SOx, λόγω κακής ποιότητας καυσίμου. Πρόκειται για ιδιαίτερα επικίνδυνες ουσίες για το περιβάλλον. Προκειμένου να επιλυθεί αυτό το πρόβλημα, ο IMO εισήγαγε ορισμένες περιοχές ελέγχου εκπομπής (ECA- emission control areas). Μάλιστα, με τον κανονισμό του IMO 2020, που τέθηκε σε ισχύ από 1/1/2020 υπάρχει η απαίτηση η περιεκτικότητα σε θείο να μην υπερβαίνει το 0.5% m/m[3] (από 3.5% που ήταν) εκτός περιοχών SECA[4] και 0.1%m/m (ισχύει από το 2015) στις SECA. Προκειμένου να συμμορφωθούν οι πλοιοκτήτες τοποθέτησαν scrubbers, για τον έλεγχο των αέριων εκπομπών SOx. Ταυτόχρονα το ενδιαφέρον επικεντρώθηκε στη χρήση και στη μελέτη εναλλακτικών καυσίμων (και της διαδικασίας καύσης τους), όπως LNG, LPG, αιθανόλης, βιοκαυσίμων, υδρογόνου, ακόμα και χρήση fuel cells, τα οποία θεωρούνται ως πολλά υποσχόμενες λύσεις για τη ναυτιλία.

Στην παρούσα εργασία, ενδιαφερόμεθα περισσότερο με τις εκπομπές του άνθρακα, μιας και τα NOx, SOx σχετίζονται περισσότερο με το καύσιμο, την διαδικασία καύσης και γενικότερα τον τομέα της Μηχανολογίας και των κινητήρων.

Η ενεργειακή αποδοτικότητα περιλαμβάνει ένα ευρύτερο πλάνο διαχείρισης, γνωστό ως SEEMP, καθώς και ορισμένους δείκτες, με ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Τέτοιοι είναι ο EEDI, ο EEOI, αλλά και οι EEXI, CII (με υποχρεωτική ισχύ από το 2023 για τους δυο τελευταίους). Στη συνέχεια πραγματοποιείται σύντομη περιγραφή των εν λόγω δεικτών, αλλά και υπολογισμός του EEXI.

[2] Βλ. RESOLUTION MEPC.304(72): INITIAL IMO STRATEGY ON REDUCTION OF GHG EMISSIONS FROM SHIPS, APRIL 2018.

[3] m/m=mass by mass.

[4] S= Sulphur

1.2 EEDI

Λαμβάνοντας υπ' όψιν τις αυξανόμενες ανησυχίες για τους ατμοσφαιρικούς ρύπους και την κατανάλωση ορυκτών καυσίμων, η MEPC προχώρησε στην εφαρμογή του δείκτη ενεργειακής αποδοτικότητας Energy Efficiency Design Index (EEDI), που υπολογίζεται κατά τη σχεδίαση των νέων πλοίων και ο οποίος είναι ενδεικτικός της εκλυόμενης ποσότητας CO_2 και άλλων επιβλαβών ενώσεων. Ο εν λόγω δείκτης αποσκοπεί στη βελτίωση του σχεδιασμού της γάστρας και των λειτουργιών του μηχανικού εξοπλισμού, ώστε να μειωθεί η κατανάλωση καυσίμου, άρα και οι εκπομπές CO_2 αυξάνοντας έτσι τη συνολική αποδοτικότητα του πλοίου. Οι τροποποιήσεις εγκρίθηκαν τον Ιούλιο του 2011 (MEPC 62) και τέθηκαν σε ισχύ την 1η Ιανουαρίου 2013. Η MEPC 62 καθιστά το δείκτη EEDI υποχρεωτικά για όλα τα νέα πλοία (ή καταλλήλως μετασκευασμένα), με στόχο την ευρύτερη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης της διεθνούς ναυτιλίας.

Ο δείκτης EEDI απαιτείται μόνο για τους ακόλουθους τύπους πλοίων άνω των 400GT: Bulk Carrier, Gas Carrier, Tanker, Containership, Refrigerated Cargo Ship, General Cargo Ship, Combination Carrier.

Κατά τη σχεδίαση και κατασκευή πλοίου χρειάζεται να υπολογισθεί ο δείκτης EEDI, με βάση τον οποίο ελέγχεται η σχεδιαστική ενεργειακή αποδοτικότητα του πλοίου και συγκρίνεται με τιμές αναφοράς ανάλογα με τον τύπο του πλοίου και τη χωρητικότητά του. Πιο συγκεκριμένα απαιτείται: επιτευχθείς (attained) EEDI≤ απαιτούμενος (required) EEDI.

Σε γενικό πλαίσιο ισχύει ότι: $\mathrm{EEDI} = \frac{\mathrm{FOC \cdot C}}{\mathrm{Capacity \cdot V_s}}$, όπου:

- EEDI μετριέται σε $\frac{gr}{ton-sea\ miles}$ και εκφράζει το λόγο της ποσότητας (μάζας) CO_2 που εκπέμπεται από το πλοίο προς μεταφορικό έργο.
- FOC: κατανάλωση καυσίμου
- C: συντελεστής για τους τόνους CO2 που παράγονται κατά την καύση 1 τόνου καυσίμου, ανάλογα προφανώς με τον τύπο του καυσίμου
- $\mathrm{Capacity}$: μεταφερόμενο φορτίο
- $\mathrm{V_s}$: ταχύτητα του πλοίου (ground speed)

Όπως προαναφέρθηκε, θα πρέπει να ισχύει:

Επιτευχθείς (attained) EEDI≤ Απαιτούμενος (required) EEDI= (1-X/100)·EEDIref

Όπου:

- X είναι ένας συντελεστής μείωσης της γραμμής αναφοράς, ανάλογα με τη χρονική φάση.
- EEDIref είναι τιμή αναφοράς και προκύπτει χρησιμοποιώντας τη γραμμή αναφοράς που αντιστοιχεί στον τύπο του πλοίου και τη χωρητικότητά του. Η γραμμή αναφοράς περιγράφεται από την εξίσωση: $\mathrm{a \cdot b^{-c}}$, με τις παραμέτρους $\mathrm{a, b, c}$ να εξαρτώνται από τον τύπο και τη χωρητικότητα του πλοίου. Για το υπό ανάλυση bulk- carrier ισχύει ότι[5]: $\mathrm{a} = 961.79, \mathrm{b} = \mathrm{DWT}, \mathrm{c} = 0.477$.

Βάσει του RESOLUTION MEPC.308(73): 2018 GUIDELINES ON THE METHOD OF CALCULATION OF THE ATTAINED ENERGY EFFICIENCY DESIGN INDEX (EEDI) FOR NEW SHIPS, OCTOBER 2018, ο επιτευχθείς EEDI προκύπτει ως κάτωθι αναγράφεται:

[5] Βάσει του RESOLUTION MEPC.203(62): AMENDMENTS TO MARPOL ANNEX VI (INCLUSION OF REGULATIONS ON ENERGY EFFICIENCY FOR SHIPS IN MARPOL ANNEX VI)/ REGULATION 21, 15 JULE 2011.

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

Όπου:

- Ο όρος $\left(\prod_{j=1}^{M} f_j\right)\left(\sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} C_{FME(i)} SFC_{ME(i)}\right)$ εκφράζει την ποσότητα CO_2 που εκπέμπεται και προέρχεται από την κύρια μηχανή πρόωσης.
- Ο όρος $\left(P_{AE} C_{FAE} SFC_{AE}\right)$ εκφράζει την ποσότητα CO_2 που εκπέμπεται και προέρχεται από τις βοηθητικές μηχανές, τις ηλεκτρομηχανές. Εξαιρούνται τα Boilers, καθώς δεν προσμετρώνται στον υπολογισμό του εν λόγω δείκτη.
- Ο όρος $\left(\prod_{j=1}^{M} f_j \sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} P_{AEeff(i)}\right) C_{FAE} SFC_{AE}$ εκφράζει την ποσότητα CO_2 που εκπέμπεται από τις shaft motors[6], συμπεριλαμβάνοντας τις μειώσεις των εν λόγω εκπομπών λόγω χρήσης καινοτόμων τεχνολογιών ανάκτησης θερμότητας σχετικών με τις ηλεκτρογεννήτριες ή άλλων energy saving equipment (βλ. παρακάτω).
- Ο όρος $\left(\sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} P_{eff(i)} C_{FME} SFC_{ME}\right)$ εκφράζει τη μείωση της ποσότητας CO_2 που εκπέμπεται λόγω της χρήσης καινοτόμων τεχνολογιών ανάκτησης θερμότητας σχετικών με την κύρια μηχανή πρόωσης ή energy saving equipment (πχ rudder bulb, rudder fins).

Στην εν λόγω σχέση περιλαμβάνονται και επιμέρους συντελεστές και παράμετροι, οι οποίοι εκφράζουν τα κάτωθι (βλ. παρακάτω πίνακα):

ΠΙΝΑΚΑΣ 1: ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΣΥΜΒΟΛΩΝ ΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΔΕΙΚΤΗ EEDI

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΜΟΝΑΔΕΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
Capacity	tn	Η χωρητικότητα σε DWT ή gross tonnage στο βύθισμα θέρους
C_{FAE}	gCO_2/gfuel	Συντελεστής άνθρακα για καύσιμο στις βοηθητικές μηχανές
C_{FME}	gCO_2/gfuel	Συντελεστής άνθρακα για καύσιμο στις κύριες μηχανές
f_{eff}	-	Διορθωτικός συντελεστής για τη διαθεσιμότητα καινοτόμων τεχνολογιών
f_i	-	Διορθωτικός συντελεστής για τη χωρητικότητα για τα πλοία με τεχνικά/ κανονιστικά χαρακτηριστικά τα οποία επηρεάζουν τη χωρητικότητα
f_c	-	Διορθωτικός συντελεστής για τη χωρητικότητα των πλοίων για τύπους φορτίου που επηρεάζουν τη σχέση DWT- χωρητικότητα (πχ πλοία LNG)
f_j	-	Διορθωτικός συντελεστής για ειδικές σχεδιάσεις πλοίων (πχ ice-class)
f_w	-	Διορθωτικός συντελεστής για τη μείωση της ταχύτητας πλοίου υπό την επίδραση αντιπροσωπευτικών καταστάσεων θάλασσας
f_l	-	Διορθωτικός συντελεστής για General Cargo Ships εφοδιασμένα με γερανούς.
f_m	-	Διορθωτικός συντελεστής για ice-classed πλοία κλάσης IA Super, IA[7].
n_{eff}	-	Αριθμός καινοτόμων τεχνολογιών
n_{ME}	-	Αριθμός κύριων μηχανών
n_{PTI}	-	Αριθμός συστημάτων πρόσθετης ισχύος (πχ shaft motors)
P_{ME}	kW	Ισχύς πρόωσης στο 75% MCR, λαμβάνοντας υπ' όψιν την ύπαρξη shaft motor ή γεννήτριας άξονα

[6] Αν διαθέτει το πλοίο.

[7] Σύμφωνα με το RESOLUTION MEPC.322(74): AMENDMENTS TO THE 2018 GUIDELINES ON THE METHOD OF CALCULATION OF THE ATTAINED ENERGY EFFICIENCY DESIGN INDEX (EEDI) FOR NEW SHIPS, MAY 2019.

P_{AE}	kW	Απαιτήσεις σε βοηθητική ισχύ σε κανονικές συνθήκες πλεύσης[8]
P_{AEeff}	kW	Μείωση της βοηθητικής ισχύος εξαιτίας της παραγωγής και χρήσης ηλεκτρικής ισχύος από καινοτόμες τεχνολογίες
P_{eff}	kW	75% της εγκατεστημένης ισχύος για την κάθε καινοτόμα τεχνολογία που συνεισφέρει στην πρόωση του πλοίου
P_{PTI}	kW	75% της εγκατεστημένης ισχύος για το κάθε power take in σύστημα (πχ propulsion shaft motors)
SFC_{AE}	g/kWh	Ειδική κατανάλωση καυσίμου για τις βοηθητικές μηχανές
SFC_{ME}	g/kWh	Ειδική κατανάλωση καυσίμου για τις κύριες μηχανές
V_{ref}	knots	Ταχύτητα αναφοράς, η οποία επιτυγχάνεται στην ισχύ πρόωσης P_{ME}, σε συνθήκες ήρεμης θάλασσας και σε βαθύ νερό για το βύθισμα θέρους.

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:

- Βύθισμα: Βύθισμα θέρους στη γραμμή φόρτωσης (μέγιστο βύθισμα θέρους όπως αναφέρεται στο εγχειρίδιο ευστάθειας)
- Χωρητικότητα: DWT (ή Gross Tonnage για τα επιβατηγά) που αντιστοιχεί στο παραπάνω βύθισμα
- 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: η ταχύτητα που επιτυγχάνει το πλοίο στις παραπάνω συνθήκες.

Από τα ανωτέρω γίνεται σαφές ότι ο δείκτης EEDI υπολογίζεται κατά το στάδιο σχεδίασης και δε σχετίζεται με τη λειτουργία του πλοίου, αλλά υπολογίζεται σε ένα σημείο λειτουργίας του πλοίου.

1.3 EEOI

Οι οδηγίες MEPC.1/Circ.684 Guidelines for Voluntary use of the Ship Energy Efficiency Indicator (EEOI) παραθέτουν το βασικό πλαίσιο για τον υπολογισμό της ενεργειακής αποδοτικότητας του πλοίου κατά τη λειτουργία του με αναφορά ανά ταξίδι ή ως προς δεδομένο χρονικό διάστημα. Αυτός μπορεί να επιτευχθεί μέσω του δείκτη EEOI (Energy Efficiency Operational Indicator). Όπως αναφέρεται και παραπάνω δεν είναι υποχρεωτικός ο υπολογισμός του από τους πλοιοκτήτες, αλλά προαιρετικός.

Ο EEOI, λοιπόν, στοχεύει στην αποτύπωση της πραγματικής κατανάλωσης καυσίμου από όλες τις πηγές κατανάλωσης (πχ κύρια μηχανή, ηλεκτρογεννήτριες, boiler, incinerator) λαμβάνοντας υπ' όψιν τον τύπο του καυσίμου που χρησιμοποιείται, καθώς και το μεταφερόμενο έργο που παράγεται. Το μεταφερόμενο έργο, μάλιστα, προσδιορίζεται από τη μάζα του φορτίου και την αντίστοιχη απόσταση που διανύεται σε ναυτικά μίλια. Συνεπώς, ο EEOI ισούται με το λόγο της μάζας του CO_2 προς το μεταφορικό έργο, δηλαδή:

$$\mathrm{EEOI} = \frac{M_{CO_2}}{\text{μεταφορικό έργο}}$$

Δεδομένου ότι η ποσότητα CO_2 που εκπέμπεται από ένα πλοίο σχετίζεται άμεσα με την κατανάλωση καυσίμων, ο δείκτης EEOI μπορεί να προσφέρει χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με τις επιδόσεις ενός πλοίου, όσον αφορά την αποδοτικότητα των καυσίμων. Πρόκειται επομένως για μια αντιπροσωπευτική

[8] Ισχύει ότι: $P_{AE} = \begin{cases} 0.025MCR_{ME} + 250, \text{για } P_{ME} \geq 10000kW \\ 0.05MCR_{ME}, \text{για } P_{ME} < 10000kW \end{cases}$.

τιμή της ενεργειακής απόδοσης της λειτουργίας του πλοίου, κατά τη διάρκεια μιας σταθερής περιόδου[9]. Επιπλέον, η χρήση του EEOI παρέχει προσέγγιση σχετικά με την αξιολόγηση της αποδοτικότητας ενός πλοίου ως προς τα αέρια θερμοκηπίου, σε σχέση με τις εκπομπές CO_2.

Από τα ανωτέρω, γίνεται σαφές ότι ο EEDI είναι το μέτρο της ενεργειακής αποδοτικότητας του πλοίου κατά το σχεδιασμό, ενώ ο EEOI είναι το μέτρο του πόσο αποτελεσματικά λειτουργεί. Ο EEDI αναφέρεται στο πόσο καλά (ενεργειακά αποδοτικά) είναι σχεδιασμένο ένα πλοίο, ενώ ο EEOI αποτελεί το μέτρο του κατά πόσο καλά (ενεργειακά αποδοτικά) λειτουργεί ένα πλοίο. Τέλος, ο EEDI χρησιμοποιεί το συνολικό DWT του πλοίου στον υπολογισμό, ενώ ο EEOI βασίζεται στο πραγματικό φορτίο που μεταφέρθηκε κατά τη διάρκεια της εξεταζόμενης περιόδου.

Τέλος, επισημαίνεται ότι η τιμή αναφοράς του EEOI βασίζεται στη διαδικασία που περιγράφεται στο Clean Ship Index, όπου λαμβάνεται υπ' όψιν ο EEDIref, το ωφέλιμο φορτίο και ο συντελεστής φόρτωσης:

$\mathrm{EEOI_{ref}} = \mathrm{EEDI_{ref}}/(\text{load factor} \cdot \text{payload ratio})$, όπου $\text{load factor}, \text{payload ratio}$ λαμβάνονται από πίνακες, ανάλογα με το είδος του πλοίου. Για παράδειγμα, το υπό ανάλυση πλοίο είναι bulk carrier με DWT>100000tn, οπότε: $\text{load factor} = 0.5$, $\text{payload ratio} = 0.9$.

1.4 EEXI

Ο δείκτης EEXI (Energy Efficiency Existing Ship Index) είναι δείκτης, όμοιος του EEDI phase 2 ή 3[10], μιας και υπολογίζεται για μια κατάσταση και όχι για το εκάστοτε data point (των operational data) και αφορά τον υπολογισμό της ενεργειακής αποδοτικότητας υπαρκτού πλοίου (και όχι κατά το στάδιο σχεδίασης). Από τη 1η Ιανουαρίου 2023 θα είναι υποχρεωμένα τα αντίστοιχα (βλ. κανονισμούς και για EEDI) πλοία να διαθέτουν το αντίστοιχο πιστοποιητικό, που να αποδεικνύει ότι επιτυγχάνεται το απαραίτητο EEXI. Γίνεται, λοιπόν, σαφές ότι θα πρέπει[11]:

Επιτευχθείς (attained) EEXI≤ Απαιτούμενος (required) EEXI= (1-Y/100)·EEDIref

Όπου:

- Y είναι ένας συντελεστής μείωσης της γραμμής αναφοράς, ανάλογα με τον τύπο και τη χωρητικότητα του πλοίου (DWT) και δίνεται από τον πίνακα 3/ RESOLUTION MEPC.328(76) : 2021 Revised MARPOL Annex VI/ Regulation 25.
- EEDIref είναι τιμή αναφοράς και προκύπτει χρησιμοποιώντας τη γραμμή αναφοράς που αντιστοιχεί στον τύπο του πλοίου και τη χωρητικότητά του. Σημειώνεται ότι και για τον απαιτούμενο EEXI χρησιμοποιείται η γραμμή αναφοράς του EEDI, με μόνη διαφορά το συντελεστή μείωσης Y. Για bulk carrier με 20000tn≤DWT≤200000tn, όπως το παρόν πλοίο, προκύπτει ότι: Y=20%.

Όσον αφορά τον attained EEXI αυτός υπολογίζεται, σύμφωνα με το RESOLUTION MEPC.333(76): 2021 GUIDELINES ON THE METHOD OF CALCULATION OF THE ATTAINED ENERGY EFFICIENCY EXISTING SHIP INDEX (EEXI), 17 June 2021, όπως ακριβώς και ο επιτευχθείς EEDI, που περιγράφεται και παραπάνω. Ιδιαίτερη προσοχή, βέβαια, πρέπει να δοθεί στην ταχύτητα αναφοράς (V_{ref}).

[9] Είτε μπορεί να αντιστοιχεί σε ένα ταξίδι, είτε σε χρονικό διάστημα αρκετών ταξιδιών (πχ 1 έτος), σαν μέσος όρος, αποτελούμενο τον κυλιόμενο μέσο όρο (Average EEOI).

[10] Φέρουν, μάλιστα, τις ίδιες μονάδες μέτρησης.

[11] Σύμφωνα με RESOLUTION MEPC.328(76) : AMENDMENTS TO THE ANNEX OF THE PROTOCOL OF 1997 TO AMEND THE INTERNATIONAL CONVENTION FOR THE PREVENTION OF POLLUTION FROM SHIPS, 1973, AS MODIFIED BY THE PROTOCOL OF 1978 RELATING THERETO /2021 REVISED MARPOL ANNEX VI/ REGULATION 25.

Στόχος του δείκτη EEXI είναι η βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας υπαρκτών πλοίων, αποτελώντας μέτρο αυτής.

1.4.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΕΙΚΤΗ EEXI ΓΙΑ ΥΠΟ ΑΝΑΛΥΣΗ BULK CARRIER

Παρακάτω, παρουσιάζεται η διαδικασία εκτίμησης του attained EEXI βάσει του δείγματος που παρατίθεται στο RESOLUTION MEPC.334(76): 2021 GUIDELINES ON SURVEY AND CERTIFICATION OF THE ATTAINED ENERGY EFFICIENCY EXISTING SHIP INDEX (EEXI), JUNE 2021. Επισημαίνεται, βέβαια, ότι πληροφορίες για κάποιο waste heat recovery system[12] ή κάποιον κόφτη (πχ στο governor) δεν δόθηκαν από τη ναυτιλιακή, ως εκ τούτου θεωρήθηκε κατ' αρχάς ότι δεν υπάρχει.

1 Data

1.1 General information

Shipowner	-
Shipbuilder	-
Hull no.	-
IMO no.	-
Ship type	Bulk carrier

1.2 Principal particulars

Length overall	249.884	m
Length between perpendiculars	240	m
Breadth, moulded	43	m
Depth, moulded	21.3	m
Summer load line draught, moulded	15	m
Deadweight at summer load line draught	114011.47	tn

1.3 Main engine

Manufacturer	HYUNDAI HEAVY INDUSTRIES	
Type	1 x MAN-B&W 7S60MC-C7	
Maximum continuous rating (MCR_{ME})	15820	kW
Limited maximum continuous rating with the Engine Power Limitation installed ($MCR_{ME,lim}$)	N/A	

[12] Ή γενικότερα καινοτόμα τεχνολογία (ακόμη και σχεδιαστική) που να οδηγεί σε αύξηση του β.α. προωστήριας εγκατάστασης, σε μείωση κατανάλωσης καυσίμου, άρα και των εκπομπών CO_2. Όπως αναφέρεται στην παρούσα έκθεση, το εν λόγω bulk- carrier διαθέτει Mewis Duct και PBCF (Propeller Boss Cap Fins), ωστόσο αυτό δεν φαίνεται πουθενά στα δοθέντα αρχεία από τη ναυτιλιακή, ούτε και υπάρχουν πληροφορίες (για γεωμετρία, από πειράματα σε μοντέλα κ.ο.κ.). Ως εκ τούτου, δεν δύναται να χρησιμοποιηθούν στην εκτίμηση του attained EEXI, στην παρούσα εργασία. Κάθε είδους εικασία θα αύξανε περεταίρω την αβεβαιότητα.

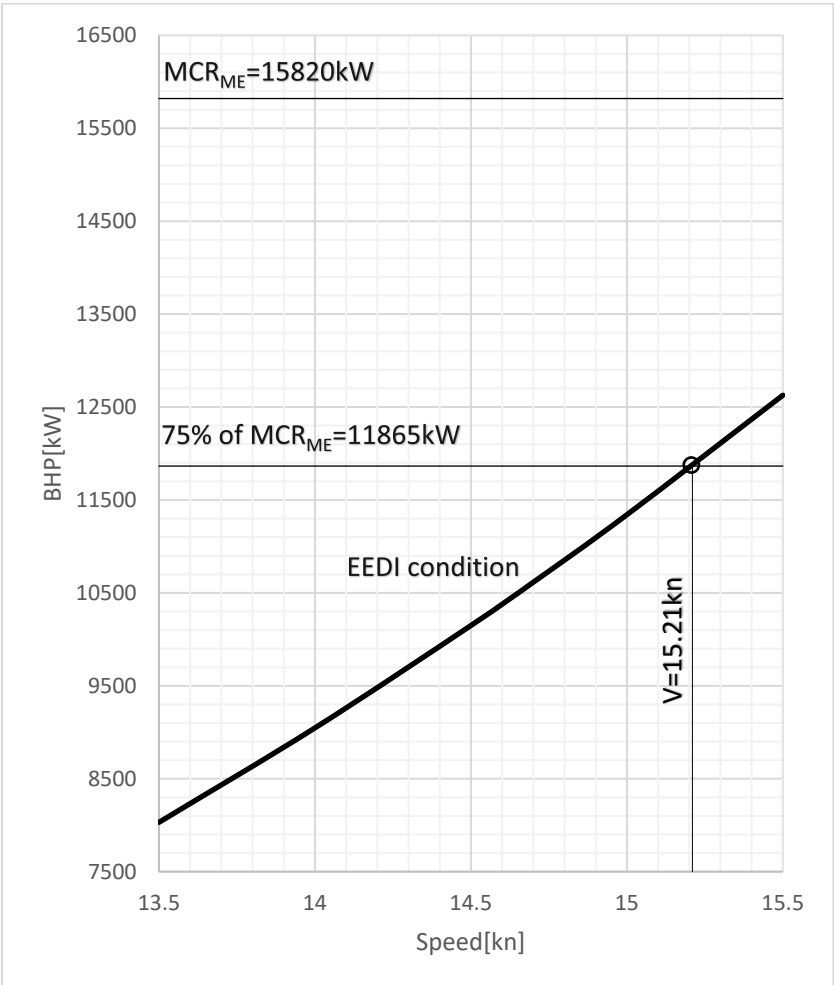
SFC at 75% of MCR_{ME} or 83% of $MCR_{ME,lim}$	190	g/kWh
Number of sets	1	
Fuel type	HFO	

1.4 Auxiliary engine

Manufacturer	N/A	
Type	N/A	
Maximum continuous rating (MCR_{AE})	820	kW
SFC at 50% MCR_{AE}	215	g/kWh
Number of sets	3	
Fuel type	HFO	
1.5 Ship speed		
Ship speed (Vref)	15.21	knots

2

Power curve



ΣΧΗΜΑ 1: POWER CURVE

3 Overview of propulsion system and electric power supply system

3.1 Propulsion system

3.1.1 Main engine

Refer to paragraph 1.3 of this sample.

3.1.2 Propeller

Type	FPP	
Diameter	7.48	m
Number of blades	4	
Number of sets	1	

3.2 Electric power supply system

3.2.1 Auxiliary engines

Refer to paragraph 1.4 of this sample.

3.2.2 Main generators

Manufacturer	N/A
Rated output	N/A
Voltage	N/A
Number of sets	3

6 Calculated value of attained EEXI

6.1 Basic data

Type of ship	Capacity DWT	Speed V_{ref} (knots)
Bulk carrier	114,011	15.21

6.2 Main engine

MCR_{ME} (kW)	$MCR_{ME,lim}$ (kW)	P_{ME} (kW)	Type of fuel	CF_{ME}	SFC_{ME} (g/kWh)
15,820	N/A	11,865	HFO	3.114	190

6.3 Auxiliary engines

P_{AE} (kW)	Type of fuel	CF_{AE}	SFC_{AE} (g/kWh)
646	HFO	3.114	215.00

6.4 Ice class

N/A

6.5 Innovative electrical energy-efficient technology

N/A

6.6 Innovative mechanical energy-efficient technology

N/A

6.7 Cubic capacity correction factor

N/A

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

$$= \frac{1\mathrm{x}(11865\mathrm{x}3.114\mathrm{x}190) + (646\mathrm{x}3.114\mathrm{x}215) + 0 - 0}{1\mathrm{x}1.0143^{13}\mathrm{x}114011.47\mathrm{x}15.21\mathrm{x}1} = 4.24\ \mathrm{g} - \mathrm{CO_2}/(\mathrm{tn} \cdot \mathrm{nm})$$

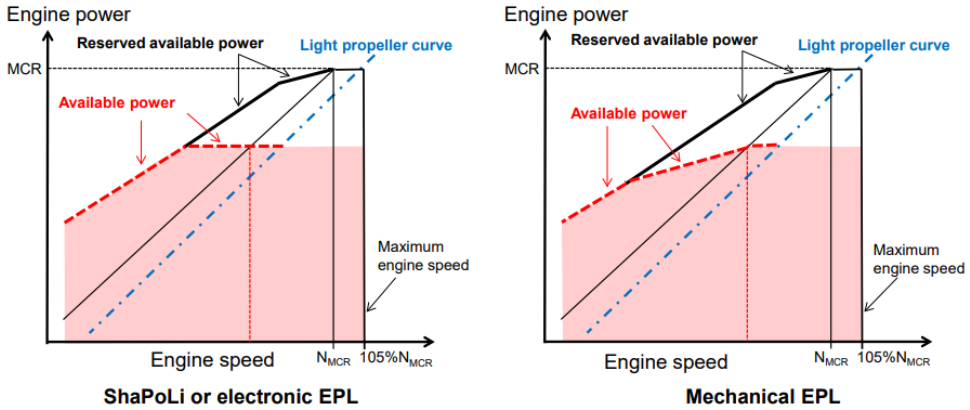
<u>attained EEXI=4.24 g-CO_2/(tn·nm)</u>

$$\text{Reference Line} = \mathrm{EEDI_{ref}} = a \cdot b^{-c} = 961.79\ \cdot \mathrm{DWT}^{-0.477} = 3.723\ \mathrm{g} - \mathrm{CO_2}/(\mathrm{tn} \cdot \mathrm{nm})$$

[13] Για Bulk- Carriers που υπόκεινται στους κανονισμούς του CSR και φέρουν το αντίστοιχο notation, όπως το παρόν πλοίο, θα πρέπει, σύμφωνα με το RESOLUTION MEPC.308(73): 2018 GUIDELINES ON THE METHOD OF CALCULATION OF THE ATTAINED ENERGY EFFICIENCY DESIGN INDEX (EEDI) FOR NEW SHIPS, OCTOBER 2018, να ισχύει: $f_i = f_{iCSR} = 1 + 0.08 \cdot \mathrm{LS/DWT}$, όπου LS=20363 tn για το παρόν bulk- carrier.

required EEXI= (1-Y/100)·EEDIref=(1-20/100)= **2.98 g-CO_2/(tn·nm)**

Από τους ανωτέρω υπολογισμούς γίνεται σαφές ότι δεν ισχύει: attained EEXI≤required EEXI, κάτι που σημαίνει ότι το υπό ανάλυση Bulk- Carrier έχει πρόβλημα ενεργειακής αποδοτικότητας και ικανοποίησης του απαιτούμενου EEXI. Βέβαια, δεν υπάρχουν στοιχεία για το αν το εν λόγω πλοίο φέρει συστήματα ανάκτησης θερμότητας, ή και καινοτόμες τεχνολογίες (πχ συστήματα αερολίπανσης). Θεωρώντας ότι δεν φέρει τέτοια συστήματα, κάτι που είναι πιο πιθανό. Βέβαια, βάσει της χρονικής περιόδου διεξαγωγής των δοκιμών κλίνης και των θαλασσίων δοκιμών παραλαβής γίνεται σαφές ότι αυτές προηγούνται χρονικά της MEPC 62 του Ιουλίου 2011, η οποία επέβαλε για πρώτη φορά τον υπολογισμό του EEDI. Κάτι τέτοιο σημαίνει ότι είναι πιθανό κατά τη σχεδίαση του εν λόγω πλοίου από το ναυπηγείο να μην ελήφθη υπ' όψιν (ή τουλάχιστον να μη ελήφθησαν μεγάλα περιθώρια) ο εν λόγω δείκτης[14]. Ακόμη, δεν υπάρχουν πληροφορίες το αν το εν λόγω πλοίο φέρει εγκεκριμένο EPL (Engine Power Limitation) ή SHaPoLi (Shaft Power Limitation). Το πρώτο σύστημα αποσκοπεί στον περιορισμό της ισχύος που παράγει ο κινητήρας (BHP), ενώ το δεύτερο στον περιορισμό της αποδιδόμενης στην έλικα ισχύος (DHP). Σε κάθε περίπτωση, όμως σε περίπτωση διακινδύνευσης της ασφάλειας του πλοίου (πχ θαλασσοταραχή) ή σε διάσωση δύναται το πλήρωμα να απορρυθμίσει, έπειτα από έγκριση του πλοιάρχου, τα εν λόγω συστήματα, υπερβαίνοντας τα όποια όρια ισχύος[15], κάτι το οποίο πρέπει να καταγραφεί στο OMM (Onboard Management Manual). Όλα αυτά και πολλά άλλα περιγράφονται αναλυτικά στο RESOLUTION MEPC.335(76): 2021 GUIDELINES ON THE SHAFT / ENGINE POWER LIMITATION SYSTEM TO COMPLY WITH THE EEXI REQUIREMENTS AND USE OF A POWER RESERVE, JUNE 2021. Γενικώς, περιορισμός στην ισχύ συνεπάγεται και περιορισμό στην ταχύτητα, κάτι που πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπ' όψιν κατά τη λήψη απόφασης για εγκατάσταση τέτοιου συστήματος για να ικανοποιείται το EEXI, ενδεχομένως και το CII. Παρακάτω, παρατίθεται σχήμα (από το RESOLUTION MEPC.335(76)) με τυπικό load diagram κινητήρα με Shaft/ Engine Power Limitation.



ΣΧΗΜΑ 2: ΤΥΠΙΚΟ LOAD DIADRAM ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΜΕ SHAFT/ POWER LIMITATION

Το EPL μπορεί να είναι μηχανικού τύπου ή ηλεκτρονικού[16], και για την εγκατάστασή του δε χρειάζεται να γίνει κάποιο retrofit, κάτι που την καθιστά απλή. Μάλιστα, η εγκατάστασή του μπορεί να γίνει πολύ

[14] Πιθανό το εν λόγω πλοίο να είναι pre-EEDI.

[15] Αυτός είναι και ο λόγος ότι το εν λόγω όριο ισχύος δε χρειάζεται να ικανοποιεί τις απαιτήσεις της ελάχιστης ισχύος, κατά MEPC.1/CIRC.850/REV.3: GUIDELINES FOR DETERMINING MINIMUM PROPULSION POWER TO MAINTAIN THE MANOEUVRABILITY OF SHIPS IN ADVERSE CONDITIONS.

[16] Αυτό εξαρτάται από το είδος του κινητήρα. Αν είναι παλαιού τύπου, με εκκεντροφόρο άξονα τότε το EPL θα είναι μηχανικού τύπου. Αν είναι ηλεκτρονική έγχυσης

σύντομα κατά την παραμονή του πλοίου στο λιμάνι, χωρίς να απαιτείται ανανέωση του EIAPP certificate[17] και του NOx technical file.

Επανερχόμενοι στην περίπτωση μας, προκειμένου το υπό ανάλυση bulk- carrier να ικανοποιεί την απαίτηση για το δείκτη EEXI είτε θα πρέπει να εγκατασταθεί κάποιο σύστημα ανάκτησης θερμότητας, ή κάποιο καινοτόμο σύστημα, όπως πχ αερολίπανσης, είτε θα πρέπει να εγκατασταθεί κάποιο σύστημα Engine/ Shaft Power Limitation. Μπορεί, βέβαια, να υπάρξουν και συνδυασμοί. Στο υπό ανάλυση bulk-carrier, όπως προαναφέρθηκε δε γνωρίζουμε αν υπάρχουν τέτοια συστήματα. Υποθέτουμε ότι δεν υπάρχουν. Παρακάτω, παρατίθενται πληροφορίες σχετικά με επαναληπτική διαδικασία υπολογισμών, που πραγματοποιήθηκαν προκειμένου ο attained EEXI να εξισώνεται, έστω και οριακά, με το required EEXI. Προκειμένου η απαίτηση για τον EEXI να ικανοποιηθεί έστω και οριακά μέχρι το τέλος του 2023, εξετάζουμε το σενάριο εγκατάστασης EPL (μεμονωμένα, χωρίς συνδυασμό με άλλο σύστημα που θα μειώσει τις εκπομπές CO_2) και υπολογίζουμε το αντίστοιχο όριο ισχύος, αλλά και την όποια απώλεια ταχύτητας μεταξύ των ταχυτήτων αναφοράς, για τις οποίες δηλαδή γίνονται οι όποιοι υπολογισμοί.

Παρακάτω παρατίθεται πίνακας με τους εν λόγω υπολογισμούς. Μάλιστα, παρουσιάζεται η περίπτωση χωρίς EPL (ίδια με παραπάνω) και η περίπτωση με EPL, αλλά μόνο με την τελευταία επανάληψη ($4^{η}$), καθώς τότε παρουσιάζεται σύγκλιση της μεθόδου και οριακή ικανοποίηση της απαίτησης για το δείκτη EEXI.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ATTAINED ΚΑΙ REQUIRED EEXI ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ EPL

Bulk carrier		Before EPL	After EPL
	Unit	**Vref available**	Iteration 4
Deadweight	DWT	114,011	114,011
Capacity	100%DWT	114,011	114,011
MCR_{ME}	kW	15,820	15,820
MCR_{lim} (P_{ME}/0.83)	kW	-	8,082
V_{ref}	knot	15.21	12.78
P_{ME}	kW	11,865	6,708
P_{AE}	kW	646	646
SFC_{ME}	g/kWh	190	190
SFC_{AE}	g/kWh	215	215
CF_{ME}	t-CO2/t-fuel	3.114	3.114
CF_{AE}	t-CO2/t-fuel	3.114	3.114
f_{iCSR}		1.0143	1.0143
f_c		1.0000	1.0000
Att.EEXI	**g-CO2/t-mile**	**4.24**	**2.98**
Reference line		3.723	3.723
Reduction rate (%)		20%	20%
Req.EEXI	**g-CO2/t-mile**	**2.98**	**2.98**
Att.EEXI / Req.EEXI		1.423	1.000
Judgement		**Not Comply**	**Comply**
MCR_{lim} (P_{ME}/0.83) / MCR_{ME}		-	51.1%
ΔV	knot	-	-2.43

[17] Σχετίζεται με το επίπεδο εκπομπών NOx του κινητήρα και πιστοποιεί ότι ικανοποιούνται οι αντίστοιχες απαιτήσεις του Annex VI της MARPOL 73/78.

Σύμφωνα με το RESOLUTION MEPC.333(76): 2021 GUIDELINES ON THE METHOD OF CALCULATION OF THE ATTAINED ENERGY EFFICIENCY EXISTING SHIP INDEX (EEXI), 17 June 2021, βάσει του οποίου πραγματοποιούνται οι υπολογισμοί του attained EEXI του παραπάνω πίνακα (με ή χωρίς EPL) η ισχύς πρόωσης P_{ME} λαμβάνεται ίση με το 75% του MCR_{ME} στην περίπτωση ύπαρξης EPL και με το min(0.75 MCR_{ME}, $0.83 \cdot MCR_{lim}$). Το MCR_{lim} είναι το όριο ισχύος που θέτει το EPL και το οποίο προκύπτει από τις επαναλήψεις, κατά τέτοιον τρόπο ώστε να επιτευχθεί οριακά η ισότητα: attained EEXI= required EEXI. Σημειώνεται ότι αν η V_{ref} της περίπτωσης με EPL διορθωθεί βάσει της προηγούμενης κάθε φορά επανάληψης με ισότητα των συντελεστών ναυαρχείου, δεδομένου του εκτοπίσματος (σταθερό), τότε η απώλεια ταχύτητας είναι μεγάλη και το όριο ισχύος μικρό. Η ισότητα των attained EEXI= required EEXI μπορεί να επιτευχθεί, αποφεύγοντας την αυστηρότητα της ισότητας συντελεστών ναυαρχείου, θεωρώντας ότι το ζεύγος (P_{ME},V_{ref}) που προκύπτει για κάθε επανάληψη ανήκει στην ίδια καμπύλη P-V με της προηγούμενης επανάληψης, άρα όλα ανήκουν στην ίδια καμπύλη με την αντίστοιχη της περίπτωσης χωρίς EPL. Η εν λόγω καμπύλη είναι αυτή που παρουσιάζεται με μορφή διαγράμματος παραπάνω (βλ. **ΣΧΗΜΑ 1: POWER CURVE**). Ακόμη, καθίσταται αναγκαία η αναφορά στο γεγονός ότι στο προαναφερθέν σενάριο, δεν ελήφθη υπ' όψιν τυχούσα εγκατάσταση waste heat recovery system ή καινοτόμου συστήματος (πχ αερολίπανσης ή γενικότερα βλ. MEPC.1/CIRC.896: 2021 GUIDANCE ON TREATMENT OF INNOVATIVE ENERGY EFFICIENCY TECHNOLOGIES FOR CALCULATION AND VERIFICATION OF THE ATTAINED EEDI AND EEXI, DECEMBER 2021) που να μειώνει περεταίρω τις εκπομπές CO_2, άρα και της τιμής του attained EEXI. Τέλος, κατά τον υπολογισμό του attained EEXI, για την ειδική κατανάλωση καυσίμου θεωρήθηκε ότι, βάσει του σχετικού με τον υπολογισμό του δείκτη guideline, ελλείψει στοιχείων για τις ηλεκτρομηχανές αυτή είναι 215gr/kWh (στο 50% για HFO). Από την άλλη, για την κύρια μηχανή υπήρχαν shop trials. Παρόλα αυτά λόγω του ότι ο EEXI είναι νέος δείκτης και δεν υπάρχουν πιο πρόσφατα στοιχεία για την επίδοση του κινητήρα (δεκαετίας), προκειμένου να αποφευχθεί τυχόν υποεκτίμηση του EEXI, που θα οδηγούσε σε εσφαλμένα συμπεράσματα, θεωρήθηκε, πάλι βάσει του ίδιου guideline, η ειδική κατανάλωση στο ενδιαφέρον σημείο 190gr/kWh, που για 2-X αργόστροφο ναυτικό κινητήρα DIESEL είναι μεγάλο (από shop trials στο 75%, για HFO, 176gr/kWh).

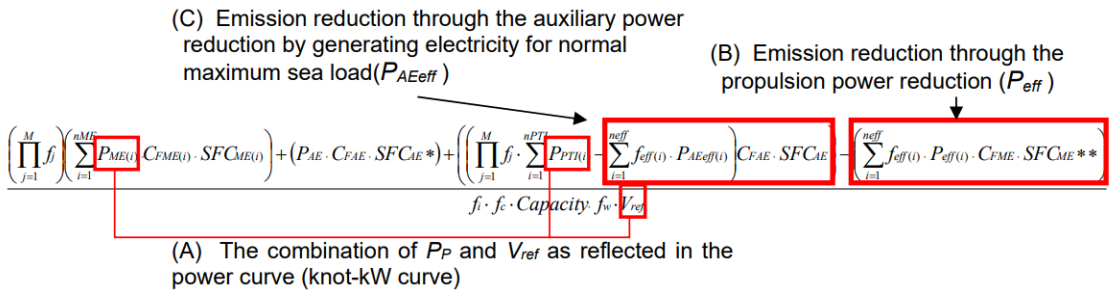
Σύμφωνα με την οδηγία για τη διαχείριση καινοτόμων τεχνολογιών για την ενεργειακή αποδοτικότητα στον υπολογισμό και επαλήθευση των επιτευχθέντων δεικτών EEDI, EEXI[18], οι εν λόγω τεχνολογίες κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες: A,B,C, με τις κατηγορίες B,C να κατατάσσονται με τη σειρά τους σε δυο υποκατηγορίες έκταση (B-1,B-2, C-1,C-2).

- **Κατηγορία A**: Τεχνολογίες που έχουν άμεση υδροδυναμική επίδραση και μεταβάλλουν τη συσχέτιση μεταξύ ισχύος πρόωσης (P_P) και ταχύτητας αναφοράς (V_{ref}) του πλοίου (πχ με σταθερή η ταχύτητα αναφοράς μειώνεται η ισχύος πρόωσης, και με σταθερή την ισχύ πρόωσης αυξάνεται η ταχύτητα αναφοράς του πλοίου).
- **Κατηγορία B**: Τεχνολογίες που με σταθερή η ταχύτητα αναφοράς μειώνουν την ισχύος πρόωσης, ωστόσο δε συμβάλλουν στην παραγωγή ηλεκτρισμού. Η ισχύς τους αναφέρεται ως P_{eff}.
    - **Κατηγορία B-1**: Τεχνολογίες διαθέσιμες κάθε χρονική στιγμή κατά τη λειτουργία (πχ συστήματα αερολίπανσης), οπότε και f_{eff}=1.
    - **Κατηγορία B-2**: Τεχνολογίες που η πλήρης χρήση τους (διαθεσιμότητα) πραγματοποιείται κάτω από συγκεκριμένες καταστάσεις και χρονικές περιόδους (πχ ισχύς από άνεμο), οπότε: f_{eff}<1.
- **Κατηγορία C**: Τεχνολογίες που συμβάλλουν στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία αναφέρεται ως P_{AEeff}.

[18] Βλ. MEPC.1/CIRC.896: 2021 GUIDANCE ON TREATMENT OF INNOVATIVE ENERGY EFFICIENCY TECHNOLOGIES FOR CALCULATION AND VERIFICATION OF THE ATTAINED EEDI AND EEXI, DECEMBER 2021.

- **Κατηγορία C-1**: Τεχνολογίες διαθέσιμες κάθε χρονική στιγμή κατά τη λειτουργία (πχ waste heat recovery systems), οπότε και f_{eff}=1.
- **Κατηγορία C-2**: Τεχνολογίες που η πλήρης χρήση τους (διαθεσιμότητα) πραγματοποιείται κάτω από συγκεκριμένες καταστάσεις και χρονικές περιόδους (πχ ηλιακή ενέργεια), οπότε: f_{eff}<1.

Παρακάτω παρατίθενται δυο εικόνες από την οδηγία (MEPC.1/CIRC.896) στις οποίες αποτυπώνεται η επίδραση των προαναφερθέντων κατηγοριών συστημάτων στους όρους που περιλαμβάνονται στη σχέση υπολογισμού των attained EEDI, EEXI. Ακόμη, παρουσιάζονται ενδεικτικά παραδείγματα συστημάτων ανά κατηγορία.



ΣΧΗΜΑ 3: ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΩΝ ATTAINED EEDI, EEXI ΑΠΟ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΚΑΤΗΓΟΡΙΩΝ

Innovative Energy Efficiency Technologies				
Reduction of Main Engine Power			Reduction of Auxiliary Power	
Category A	*Category B-1*	*Category B-2*	*Category C-1*	*Category C-2*
Cannot be separated from overall performance of the vessel	Can be treated separately from the overall performance of the vessel		Effective at all time	Depending on ambient environment
	$f_{eff}=1$	$f_{eff}<1$	$f_{eff}=1$	$f_{eff}<1$
– low friction coating – bare optimization – rudder resistance – propeller design	– hull air lubrication system (air cavity via air injection to reduce ship resistance) (can be switched off)	– wind assistance (sails, Flettner-Rotors, kites)	– waste heat recovery system (exhaust gas heat recovery and conversion to electric power)	– photovoltaic cells

ΣΧΗΜΑ 4: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΚΑΙΝΟΤΟΜΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΑΝΑ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ

Στην οδηγία (MEPC.1/CIRC.896) και συγκεκριμένα στα παραρτήματα 1,2 περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία υπολογισμού της ισχύος των εν λόγω τεχνολογιών, αλλά και της επαλήθευσής τους. Θα μπορούσαν είτε μεμονωμένα, είτε σε κατάλληλο συνδυασμό μεταξύ τους, είτε σε συνδυασμό με χρήση EPL να συμβάλλουν στην ζητούμενη οριακή ισότητα attained EEXI=required EEXI για το υπό ανάλυση bulk- carrier. Στην παρούσα εργασία δεν μελετήθηκαν σενάρια για εγκατάσταση τέτοιων συστημάτων,

καθώς είτε απαιτούνταν πραγματοποίηση πειραμάτων, είτε γενικότερα κάτι τέτοιο ξέφευγε από τους σκοπούς της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

1.5 CII

Η MEPC 76, του Ιουνίου 2021, υιοθέτησε έναν βραχυπρόθεσμο[19], ετήσιο δείκτη μέτρησης των εκπομπών CO_2, με απώτερο σκοπό τη μείωση του λόγου εκπομπών CO_2 προς το μεταφορικό έργο, σα μέσο όρο σε όλη τη διεθνή ναυτιλία, από τουλάχιστον 40% το 2030, μέχρι 70% το 2050, σε σύγκριση με το 2008[20]. Αυτός ο δείκτης είναι ο CII (Carbon Intensity Indicator) και παρουσιάζει πολλά κοινά στοιχεία με τον EEOI ως προς τον υπολογισμό του.

Ο attained (επιτευχθείς) CII[21] ισούται με: $\mathrm{CII} = \frac{\text{Annual } CO_2 \text{ emission}}{\text{AnnualDistanceTravelled} \cdot \text{Capacity}}$[22], όπου Capacity=DWT στο μέγιστο βύθισμα θέρους. Οπότε, μετριέται σε: [$grCO_2$/(tn· sea miles)].

Είναι, λοιπόν, ένας ετήσιος δείκτης της ενεργειακής αποδοτικότητας του πλοίου, σχετίζεται με τη λειτουργία του και υπολογίζεται βάσει των απεσταλμένων στις αρμόδιες αρχές IMO DCS data[23] (κάτι που δεν ισχύει με τον EEOI, για αυτό είναι και προαιρετικός). Σύμφωνα με τη MEPC76 από το τέλος του ημερολογιακού έτους 2023 θα είναι υποχρεωτικό να περιλαμβάνεται στο SEEMP κάθε πλοίου άνω των 5000GT (αγνοώντας τον τύπο της προωστήριας εγκατάστασης) ο υπολογισμός του (ετήσιου) δείκτη CII, καθώς και η κατάταξη σε διάφορες κατηγορίες του πλοίου, ανάλογα με το επίπεδο ενεργειακής αποδοτικότητας (A,B,C,D,E)[24]. Η εν λόγω κατάταξη πραγματοποιείται βάσει του δείκτη CII.

Σύμφωνα με το RESOLUTION MEPC.328(76) : 2021 Revised MARPOL Annex VI/ Regulation 28, ισχύει και σε αυτή την περίπτωση:

$\text{Required annual operational CII} = \left(\frac{100-Z}{100}\right) \mathrm{CII}_{\mathrm{ref}}$, όπου:

- Z είναι ο % ετήσιος συντελεστής μείωσης της καμπύλης αναφοράς του CII και καθορίζεται ανάλογα με το στόχο κάθε έτους σε σύγκριση με το 2019[25]. Για παράδειγμα[26], για το 2023, Z=5%. Ενώ, για το 2024, Z=7%, το 2025, Z=9%, το 2026, Z=11%. Για τα επόμενα έτη δεν έχει ακόμη καθοριστεί το Z. Γίνεται, λοιπόν, σαφές ότι κάθε χρόνο τα όρια θα αυστηροποιούνται και ο απαιτούμενος δείκτης CII θα είναι πιο μικρός.

[19] Κατά το RESOLUTION MEPC.304(72). Δηλαδή, θα καθιερωνόταν (όπως και έγινε) από την (εν λόγω) επιτροπή μεταξύ 2018 και 2023.

[20] Αυτοί οι στόχοι παρατίθενται αναλυτικά στο RESOLUTION MEPC.304(72): INITIAL IMO STRATEGY ON REDUCTION OF GHG EMISSIONS FROM SHIPS, APRIL 2018.

[21] Υπολογίζεται βάσει του RESOLUTION MEPC 336(76): 2021 GUIDELINES ON OPERATIONAL CARBON INTENSITY INDICATORS AND THE CALCULATION METHODS (CII GUIDELINES, G1), 17 JUNE 2021.

[22] Υπάρχει και διορθωτικός συντελεστής, που δεν έχει ακόμη καθοριστεί, κάτι που αναμένεται να γίνει στο άμεσο μέλλον.

[23] Κάτι που αποτελεί ετήσια υποχρέωση όλων των πλοίων άνω των 5000GT (βάσει του κανονισμού της MARPOL Annex VI, Reg. 22).

[24] Τα επίπεδα A,B,C,D,E εδώ παρατίθενται με φθίνουσα σειρά ενεργειακής αποδοτικότητας και αύξουσα σειρά της τιμής attained CII σε σχέση με τη required CII.

[25] Για το CIIref χρονιά αναφοράς είναι το 2019, καθώς αυτή ήταν η πρώτη χρονιά με εξακριβωμένα DCS data γνωστοποιημένα στον IMO.

[26] Βλ. RESOLUTION MEPC 338(76): 2021 GUIDELINES ON THE OPERATIONAL CARBON INTENSITY REDUCTION FACTORS RELATIVE TO REFERENCE LINES (CII REDUCTION FACTOR GUIDELINES, G3), 17 JUNE 2021.

- $\mathrm{CII_{ref}}$ είναι η καμπύλη αναφοράς, με: $\mathrm{CII_{ref}} = \alpha \mathrm{Capacity}^{-c}$[27], όπου α, c καθορίζονται βάσει του είδους και της χωρητικότητας του πλοίου. Πιο συγκεκριμένα, για το υπό ανάλυση πλοίο της παρούσας εργασίας, επειδή αποτελεί bulk- carrier με DWT ≤ 279000tn ισχύει: $\alpha = 4745, c = 0.622$.

Ανάλογα με το λόγο $\frac{\textbf{Attained annual operational CII}}{\textbf{Required annual operational CII}}$ και ανάλογα με το είδος του πλοίου καθορίζεται το επίπεδο ενεργειακής αποδοτικότητας αυτού (A,B,C,D,E)[28]. Για παράδειγμα, για το υπό ανάλυση bulk-carrier ισχύει ότι: Αν συμβολίσουμε τον εν λόγω λόγο με λ, χάριν απλότητας τότε:

- Αν λ>1.18, τότε το πλοίο ανήκει στην ενεργειακή κατηγορία E,
- Αν 1.18≥λ>1.06, τότε το πλοίο ανήκει στην ενεργειακή κατηγορία D,
- Αν 1.06≥λ>0.94, τότε το πλοίο ανήκει στην ενεργειακή κατηγορία C,
- Αν 0.94≥λ>0.86, τότε το πλοίο ανήκει στην ενεργειακή κατηγορία B,
- Αν 0.86≥λ, τότε το πλοίο ανήκει στην ενεργειακή κατηγορία A.

Για πλοίο που κατατάσσεται για τρία συνεχόμενα χρόνια στην κατηγορία D, ή για μια χρονιά στην κατηγορία E, θα πρέπει να γίνουν διορθωτικές ενέργειες, βάσει πλάνου που θα παρατίθεται στο SEEMP και θα λάβει την κατάλληλη έγκριση. Μερικές λύσεις μείωσης εκπομπών CO_2 είναι η μείωση της ταχύτητας, χρήση εναλλακτικού καυσίμου, εφαρμογή τεχνολογιών αύξησης ενεργειακής αποδοτικότητας, βελτιστοποίηση λειτουργικών παραμέτρων, κτλ.

1.6 SEEMP

Ένα πλάνο SEEMP (Ship Energy Efficiency Management Plan) παρέχει μια δομημένη προσέγγιση για την παρακολούθηση, βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του πλοίου και του στόλου, σε βάθος χρόνου. Επιπλέον, ενθαρρύνει τον πλοιοκτήτη να εξετάσει νέες τεχνολογίες και πρακτικές σε κάθε στάδιο (κύκλο) του πλάνου. Ο IMO, μέσω της MARPOL και άλλων κανονιστικών οργάνων προσπαθεί να ενισχύσει την ενεργειακή απόδοση και να μειώσει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου[29] από τη ναυτιλία. Η MEPC 62, που πραγματοποιήθηκε τον Ιούλιο του 2011 εκτός των άλλων καθιέρωσε την υποχρεωτικότητα του πλάνου SEEMP για νέα, αλλά και ήδη υπάρχοντα πλοία άνω των 400GT, από την 1η Ιανουαρίου 2013 και έπειτα. Η MEPC 76, του 2021 επέβαλε για όλα (σχεδόν[30]) τα εμπορικά πλοία, άνω των 5000GT, να περιλαμβάνεται στο SEEMP τους, από την 1η Ιανουαρίου 2023 εγκεκριμένο πλάνο επίτευξης του απαιτούμενου δείκτη CII. Ακόμη, για πλοίο που κατατάσσεται για τρία συνεχόμενα χρόνια στην κατηγορία D, ή για μια χρονιά στην κατηγορία E, θα πρέπει να αναπτυχθεί πλάνο διορθωτικών ενεργειών, που θα εγκριθεί σαν τμήμα του SEEMP.

Σύμφωνα με το RESOLUTION MEPC.328(76) : AMENDMENTS TO THE ANNEX OF THE PROTOCOL OF 1997 TO AMEND THE INTERNATIONAL CONVENTION FOR THE PREVENTION OF POLLUTION FROM SHIPS, 1973, AS MODIFIED BY THE PROTOCOL OF 1978 RELATING THERETO /2021 REVISED MARPOL ANNEX VI/ REGULATION 26: Κάθε πλοίο πρέπει να διατηρεί επί του σκάφους ένα σχέδιο διαχείρισης της ενεργειακής απόδοσής του, το SEEMP. Αυτό μπορεί να αποτελέσει μέρος του Safety Management System του πλοίου.

---

[27] Βλ. RESOLUTION MEPC 337(76): 2021 GUIDELINES ON THE REFERENCE LINES FOR USE WITH OPERATIONAL CARBON INTENSITY INDICATORS (CII REFERENCE LINES GUIDELINES, G2), 17 JUNE 2021.

[28] Βλ. RESOLUTION MEPC 339(76): 2021 GUIDELINES ON THE OPERATIONAL CARBON INTENSITY RATING OF SHIPS (CII RATING GUIDELINES, G4), 17 JUNE 2021.

[29] Κυρίως του CO_2.

[30] Cargo, RoPax, cruise.

Το SEEMP πρέπει να αναπτυχθεί και να ανανεωθεί λαμβάνοντας υπ' όψιν τις οδηγίες που έχει υιοθετήσει ο IMO[31].

Σκοπός του SEEMP είναι να θεσπίσει μηχανισμό για ένα πλοίο προκειμένου να βελτιώσει την ενεργειακή απόδοση του. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί αφενός μέσω παρακολούθησης μεγεθών σχετικών με την ενεργειακή απόδοση και αφετέρου μέσω διορθωτικών ενεργειών, με σκοπό τη βελτίωση της απόδοσης (βλ. μέτρα παρακάτω), βασιζόμενες εκτός των άλλων και σε νέες τεχνολογίες και πρακτικές. Παράλληλα, ο εν λόγω μηχανισμός θα πρέπει να λαμβάνει υπ' όψιν του την ιδιαιτερότητα του πλοίου (ως προς την κατηγορία, το φορτίο), αλλά και την ευρύτερη πολιτική που ακολουθεί η διαχειρίστρια εταιρεία. Είναι εμφανές ότι μέσω του SEEMP δύναται να μειωθεί το λειτουργικό κόστος του πλοίου, άρα και του στόλου, άρα και να εξοικονομηθεί καύσιμο, κάτι που έχει θετικό αντίκτυπο και στο περιβάλλον. Στο SEEMP περιέχονται διάφορες πρακτικές μείωσης της κατανάλωσης καυσίμου, μερικές από τις οποίες είναι οι εξής: συντήρηση επιφάνειας γάστρας, προς αποφυγή ρύπανσης, συντήρηση συστημάτων πρόωσης (κυρίως κύριας μηχανής), χρήση εναλλακτικών καυσίμων, ή ακόμα και εγκατάσταση συστημάτων ανάκτησης θερμότητας, retrofit, εγκατάσταση πτερυγίων για μεταβολή ροής περιβάλλοντος ρευστού, κτλ.

Το SEEMP αναπτύσσεται για συγκεκριμένο πλοίο και αποτελεί πλάνο του πλοιοκτήτη, του φορέα εκμετάλλευσης ή του ναυλωτή. Αποτελείται από δυο μέρη, όπου το πρώτο αποσκοπεί στην εδραίωση ενός μηχανισμού που θα οδηγήσει στην αύξηση της (ενεργειακής) απόδοσης της λειτουργίας του πλοίου. Το δεύτερο τμήμα αναφέρεται στο σύστημα συλλογής δεδομένων, όσον αφορά την ετήσια κατανάλωση καυσίμου, τις αποστάσεις που διανύει το πλοίο, τις ώρες λειτουργίας[32]. Τα δεδομένα αυτά αποτελούν noon reports και είναι ημερήσια. Παρακάτω, παρατίθενται αναλυτικά στοιχεία για τα μέρη του SEEMP.

1.6.1 PART I OF SEEMP

Το πρώτο μέρος του εγχειριδίου SEEMP (SHIP MANAGEMENT PLAN TO IMPROVE ENERGY EFFICIENCY), όπως έχει ήδη αναφερθεί, αποσκοπεί στην εδραίωση ενός μηχανισμού που θα οδηγήσει στην αύξηση της (ενεργειακής[33]) απόδοσης της λειτουργίας του πλοίου. Αρκετές εταιρείες έχουν ήδη αναπτύξει, εφαρμόσει, διατηρήσει ένα σύστημα διαχείρισης ασφάλειας (Safety Management System) που αφορά (το) σύνολο του στόλου της. Καθ' αυτόν τον τρόπο θα μπορούσε το 1ο μέρος του SEEMP να αποτελεί τμήμα του συστήματος αυτού. Έπειτα, το (1ο μέρος του) SEEMP στοχεύει στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του πλοίου, μέσα από μια σειρά βημάτων, που περιγράφονται αναλυτικά στο RESOLUTION MEPC.282(70): 2016 GUIDELINES FOR THE DEVELOPMENT OF A SHIP ENERGY EFFICIENCY MANAGEMENT PLAN (SEEMP), OCTOBER 2016 και είναι τα ακόλουθα:

- <u>Προγραμματισμός</u>, όπου καθορίζεται η παρούσα κατάσταση κατανάλωσης ενέργειας του πλοίου και η αναμενόμενη βελτίωση της (ενεργειακής) απόδοσης. Σε αυτό το σημείο καθορίζονται τα μέτρα βελτίωσης της απόδοσης, όπως η βελτιστοποίηση της ταχύτητας, η συντήρηση της γάστρας, το weather routing, βελτιστοποίηση διαγωγής, έρματος, κτλ.[34] για το εν λόγω πλοίο, αλλά και τα μέτρα που λαμβάνει η εταιρεία συνολικά προκειμένου η όλη εφοδιαστική αλυσίδα να λειτουργεί βέλτιστα, μέσω επικοινωνίας με τα άλλα μέρη της εφοδιαστικής αλυσίδας, όπως

[31] Βλ. RESOLUTION MEPC.282(70): 2016 GUIDELINES FOR THE DEVELOPMENT OF A SHIP ENERGY EFFICIENCY MANAGEMENT PLAN (SEEMP), OCTOBER 2016.

[32] Βλ. RESOLUTION MEPC.282(70): 2016 GUIDELINES FOR THE DEVELOPMENT OF A SHIP ENERGY EFFICIENCY MANAGEMENT PLAN (SEEMP), OCTOBER 2016.

[33] Με μείωση κατανάλωσης καυσίμου.

[34] Ακόμη και retrofit ή και εγκατάσταση συστημάτων τροποποίησης της ροής γύρω από τη γάστρα ή την έλικα (όπως fins) είναι μερικά μέτρα.

τα λιμάνια[35]. Ακόμη, περιλαμβάνει και τις απαιτούμενες γνώσεις και δεξιότητες του προσωπικού που θα εφαρμόσουν τα εν λόγω μέτρα, αλλά και θέτει τους στόχους αυτών, κάτι που μπορεί να γίνει εθελοντικά. Γενικώς, θα πρέπει να επισημανθεί ότι τα μέτρα που λαμβάνονται και ειδικά αυτά που αφορούν το συγκεκριμένο πλοίο και όχι το στόλο, καθορίζονται ή τουλάχιστον θα πρέπει να καθορίζονται από τον τύπο του πλοίου, του φορτίου, τη διαδρομή, κτλ.

- Εφαρμογή, όπου εκτελούνται τα προγραμματισμένα μέτρα και καθορίζονται οι αρμοδιότητες, αλλά και η περίοδος εφαρμογής (αρχή, λήξη).
- Παρακολούθηση, μέσω συνεχούς συλλογής (ποσοτικών) δεδομένων κατά τη λειτουργία του πλοίου και χρήσης καθιερωμένων ή και εγκεκριμένων εργαλείων, όπως το EEOI. Από την περίοδο παρακολούθησης εξαιρούνται εκείνες στις οποίες το πλοίο συμμετέχει σε έρευνα και διάσωση, παρεκκλίνοντας από το πρόγραμμά του.
- Αυτοαξιολόγηση & Βελτίωση, όπου γίνεται αξιολόγηση των μέτρων που ελήφθησαν και επιλογή αυτών που μπορούν ή όχι να εφαρμοστούν στο συγκεκριμένο πλοίο. Αποτελεί δηλαδή το τελευταίο στάδιο του κύκλου διαχείρισης, όπου εξάγονται τα κατάλληλα συμπεράσματα που θα αξιοποιηθούν για τον επόμενο κύκλο.

Παρακάτω παρατίθεται εικόνα από το παράρτημα 1 του RESOLUTION MEPC.282(70),2016 με δείγμα της φόρμας του 1ου τμήματος του SEEMP:

SAMPLE FORM OF SHIP MANAGEMENT PLAN TO IMPROVE ENERGY EFFICIENCY (PART I OF THE SEEMP)

Name of ship:		Gross tonnage:	
Ship type:		Capacity:	

Date of development:		Developed by:	
Implementation period:	From: Until:	Implemented by:	
Planned date of next evaluation:			

1 MEASURES

Energy efficiency measures	**Implementation** (including the starting date)	**Responsible personnel**
Weather routing	<Example> Contracted with (Service providers) to use their weather routing system and start using on trial basis as of 1 July 2012.	<Example> The master is responsible for selecting the optimum route based on the information provided by (Service providers).
Speed optimization	While the design speed (85% MCR) is 19.0 kt, the maximum speed is set at 17.0 kt as of 1 July 2012.	The master is responsible for keeping the ship's speed. The log-book entry should be checked every day.

2 MONITORING

Description of monitoring tools

3 GOAL

Measurable goals

4 EVALUATION

Procedures of evaluation

ΣΧΗΜΑ 5: ΤΥΠΙΚΗ ΦΟΡΜΑ ΠΡΩΤΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ SEEMP[36]

[35] Βλ. “Just in time”.

[36] Βλ. RESOLUTION MEPC.282(70): 2016 GUIDELINES FOR THE DEVELOPMENT OF A SHIP ENERGY EFFICIENCY MANAGEMENT PLAN (SEEMP), OCTOBER 2016.

1.6.2 PART II OF SEEMP

Το δεύτερο τμήμα του SEEMP (SHIP FUEL OIL CONSUMPTION DATA COLLECTION PLAN) αποσκοπεί στην παρουσίαση των μεθοδολογιών για πλοία από 5000GT και άνω που θα πρέπει να ακολουθηθούν προκειμένου να συλλεχθούν τα απαιτούμενα, από τον κανονισμό 22A του Annex VI της MARPOL, δεδομένα και των διαδικασιών που πρέπει να ακολουθηθούν από το πλοίο κατά την αποστολή των data στις αρμόδιες ελεγκτικές αρχές. Καθορίζονται, λοιπόν από το 2ο τμήμα του SEEMP, για κάθε πλοίο, οι μέθοδοι συλλογής, συγκέντρωσης και αναφοράς δεδομένων, τα οποία αφορούν[37]:

- Τύπος καυσίμου (ορθότερα καυσίμων).
- Ποσότητα κάθε καυσίμου που καταναλώθηκε ετησίως, από οποιαδήποτε εγκατάσταση του πλοίου. Την κύρια μηχανή, τις βοηθητικές μηχανές, τους λέβητες, τους αεριοστροβίλους (αν υπάρχουν), τους inert gas generators, ανεξάρτητα από το αν το πλοίο είναι εν πλω ή όχι.
- Απόσταση που διανύθηκε από το πλοίο σε ναυτικά μίλια (over ground).
- Ώρες πλεύσης (χρησιμοποιώντας το πλοίο δικά του μέσα πρόωσης και δε ρυμουλκείται).
- Ποιότητα δεδομένων, με παράθεση οδηγιών για τον προσδιορισμό σφαλμάτων και διορθώσεων στα δεδομένα.

Επιπρόσθετα, η μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, με παράλληλη αύξηση της λειτουργικής απόδοσης του πλοίου (από το 1ο μέρος του SEEMP) αποτελεί αντικείμενο μελέτης του 2ου τμήματος του SEEMP.

Παρακάτω παρατίθεται εικόνα από το παράρτημα 2 του RESOLUTION MEPC.282(70),2016 με δείγμα της φόρμας του 2ου τμήματος του SEEMP:

[37] Βλ. RESOLUTION MEPC.282(70): 2016 GUIDELINES FOR THE DEVELOPMENT OF A SHIP ENERGY EFFICIENCY MANAGEMENT PLAN (SEEMP), OCTOBER 2016.

SAMPLE FORM OF SHIP FUEL OIL CONSUMPTION DATA COLLECTION PLAN (PART II OF THE SEEMP)

1 Ship particulars

Name of ship	
IMO number	
Company	
Flag	
Ship type	
Gross tonnage	
NT	
DWT	
EEDI (if applicable)	
Ice class	

2 Record of revision of Fuel Oil Consumption Data Collection Plan

Date of revision	Revised provision

3 Ship engines and other fuel oil consumers and fuel oil types used

	Engines or other fuel oil consumers	Power	Fuel oil types
1	Type/model of main engine	(kW)	
2	Type/model of auxiliary engine	(kW)	
3	Boiler	(…)	
4	Inert gas generator	(…)	

4 Emission factor

C_F is a non-dimensional conversion factor between fuel oil consumption and CO_2 emission in the *2014 Guidelines on the method of calculation of the attained Energy Efficiency Design Index (EEDI) for new ships* (resolution MEPC.245(66)), as amended. The annual total amount of CO_2 is calculated by multiplying annual fuel oil consumption and C_F for the type of fuel.

Fuel oil Type	C_F (t-CO_2 / t-Fuel)
Diesel/Gas oil (e.g. ISO 8217 grades DMX through DMB)	3.206
Light fuel oil (LFO) (e.g. ISO 8217 grades RMA through RMD)	3.151
Heavy fuel oil (HFO) (e.g. ISO 8217 grades RME through RMK)	3.114
Liquefied petroleum gas (LPG) (Propane)	3.000
Liquefied petroleum gas (LPG) (Butane)	3.030
Liquefied natural gas (LNG)	2.750
Methanol	1.375
Ethanol	1.913
Other (……)	

5 Method to measure fuel oil consumption

The applied method for measurement for this ship is given below. The description explains the procedure for measuring data and calculating annual values, measurement equipment involved, etc.

Method	Description

6 Method to measure distance travelled

Description

7 Method to measure hours underway

Description

8 Processes that will be used to report the data to the Administration

Description

9 Data quality

Description

ΣΧΗΜΑ 6: ΤΥΠΙΚΗ ΦΟΡΜΑ ΔΕΥΤΕΡΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ SEEMP[38]

1.6.3 IMO DCS (DATA COLLECTION SYSTEM)

Ο κανονισμός 22Α του Annex VI της MARPOL επιβάλλει κάθε πλοίο από 5000GT και άνω, να συλλέγει και να αποστέλλει στην Αρμόδια Αρχή συγκεντρωτικά ετήσια δεδομένα για τις παρακάτω κύριες παραμέτρους:

- Κατανάλωση καυσίμου, ανά τύπο καυσίμου σε μετρητικούς τόνους
- Διανυόμενη απόσταση (με ιδία μέσα)
- Ώρες λειτουργίας (πρόωση πλοίου με ιδία μέσα)
- Στοιχεία για το πλοίο (τύπος, GT, DWT, EEDI, κτλ.).

Οι μέθοδοι για τη συλλογή των δεδομένων θα πρέπει να αναφέρονται. Για την μέτρηση της κατανάλωσης καυσίμου προτείνονται οι εξής μέθοδοι:

- Bunker delivery notes (BDNs)
- Χρήση μετρητικών ροής (flow meters)
- Μέθοδοι παρακολούθησης των δεξαμενών καυσίμου.

Παρακάτω παρατίθεται εικόνα από το παράρτημα 3 του RESOLUTION MEPC.282(70),2016 με δείγμα της φόρμας για το Data Collection System:

[38] Βλ. RESOLUTION MEPC.282(70): 2016 GUIDELINES FOR THE DEVELOPMENT OF A SHIP ENERGY EFFICIENCY MANAGEMENT PLAN (SEEMP), OCTOBER 2016.

STANDARDIZED DATA REPORTING FORMAT FOR THE DATA COLLECTION SYSTEM

Start date (dd/mm/yyyy)	End date (dd/mm/yyyy)	IMO number[1]	Ship type[2]	Gross Tonnage[3]	NT[4]	DWT[5]	EEDI (if applicable)[6] ($gCO_2/t.nm$)	Ice class[7] (if applicable)	Power output[8] (rated power) (kW)		Distance Travelled (nm)	Hours underway (h)	Fuel oil consumption (t)										Method used to measure fuel oil consumption[9]
									Main Propulsion Power	Auxiliary Engine(s)			Diesel/Gas Oil (C_f: 3.206)	LFO (C_f: 3.151)	HFO (C_f: 3.114)	LPG (Propane) (C_f: 3.000)	LPG (Butane) (C_f: 3.030)	LNG (C_f: 2.750)	Methanol (C_f: 1.375)	Ethanol (C_f: 1.913)	Other(……)	(C_f:……)	

1 In accordance with the *IMO Ship Identification Number Scheme*, adopted by the Organization by resolution A.1078(28).
2 As defined in regulation 2 of MARPOL Annex VI or other (to be stated).
3 Gross tonnage should be calculated in accordance with the International Convention on Tonnage Measurement of Ships, 1969.
4 NT should be calculated in accordance with the International Convention on Tonnage Measurement of Ships, 1969. If not applicable, note "N/A".
5 DWT means the difference in tonnes between the displacement of a ship in water of relative density of 1025 kg/m^3 at the summer load draught and the lightweight of the ship. The summer load draught should be taken as the maximum summer draught as certified in the stability booklet approved by the Administration or an organization recognized by it.
6 EEDI should be calculated in accordance with the *2014 Guidelines on the method of calculation of the attained Energy Efficiency Design Index (EEDI) for new ships*, as amended, adopted by resolution MEPC.245(66). If not applicable, note "N/A".
7 Ice class should be consistent with the definition set out in the International Code for ships operating in polar waters (Polar Code), adopted by resolutions MEPC.264(68) and MSC.385(94)). If not applicable, note "N/A".
8 Power output (rated power) of main and auxiliary reciprocating internal combustion engines over 130 kW (to be stated in kW). Rated power means the maximum continuous rated power as specified on the nameplate of the engine.
9 Method used to measure fuel oil consumption: 1: method using BDNs, 2: method using flow meters, 3: method using bunker fuel oil tank monitoring."

ΣΧΗΜΑ 7: ΤΥΠΙΚΗ ΦΟΡΜΑ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ[39]

[39] Βλ. RESOLUTION MEPC.282(70): 2016 GUIDELINES FOR THE DEVELOPMENT OF A SHIP ENERGY EFFICIENCY MANAGEMENT PLAN (SEEMP), OCTOBER 2016.

2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΠΛΟΙΟΥ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ- ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΛΟΙΟΥ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε ένα σύγχρονο Bulk Carrier με DWT 114500MT της εταιρείας MARAN DRY MANAGEMENT, το οποίο διαθέτει εξοπλισμό μέτρησης σχετικά[40] υψηλής ακρίβειας (όχι τόσης όσο ενός tanker της ίδιας εταιρείας), σχετικού με τις διάφορες παραμέτρους που επηρεάζουν την απόδοση του πλοίου. Οι παράμετροι αυτές περιλαμβάνουν:

- την ταχύτητα του πλοίου, τόσο ως προς το νερό (STW: speed through water[41]), όσο και ως προς το έδαφος (SOG: speed over ground[42]),
- τη φαινόμενη ταχύτητα του ανέμου[43],
- το σημαντικό ύψος κύματος, τη σχετική κατεύθυνση του κυματισμού[44],
- το βύθισμα,
- την ισχύ άξονα (SHP),
- την ταχύτητα περιστροφής του άξονα, έλικας.

Επισημαίνεται ότι οι παραπάνω μετρήσεις πραγματοποιούνται με σχετικά μεγάλη συχνότητα (ανά 1h).

Παρακάτω παρατίθεται πίνακας με τα κύρια χαρακτηριστικά του υπό ανάλυση πλοίου:

ΠΙΝΑΚΑΣ 3: ΚΥΡΙΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΛΟΙΟΥ

ΚΥΡΙΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΥΠΟ ΑΝΑΛΥΣΗ BULK CARRIER		
PRINCIPAL PARTICULARS	**KIND OF SHIP**	BULK CARRIER 114500 MT DWT
	NAVIGATION AREA	OCEAN GOING SERVICE
	LENGTH O.A. (m)	249.884
	LENGTH B.P. (m)	240.0
	BREADTH (MLD) (m)	43.0
	DEPTH(MLD) (m)	21.3
	STEM OVERHANG (m)	5.484
	STERN OVERHANG (m)	4.4
	BULB LENGTH (FROM FP) (m)	5.0
	BILGE RADIUS (mm)	2533
	CAMBER (mm)	1050
	DRAFT SCANTLING (m)	15.0
	DRAFT DESIGN (m)	14.5
	DISPLACEMENT AT SCANTLING DRAFT (t)	134376.5
	DISPLACEMENT AT DESIGN DRAFT (t)	129366.9
	DWT AT SCANTLING DRAFT (t)	114013.5
	DWT AT DESIGN DRAFT (t)	109003.9
	GROSS TONNAGE	61504
	NET TONNAGE	35156
	COMPLEMENT	30
	DESIGN SPEED (kn)	14.7

[40] Σύγχρονα.
[41] Η μέτρηση πραγματοποιείται με speed logs.
[42] Η μέτρηση πραγματοποιείται με GPS.
[43] Η μέτρηση πραγματοποιείται με ανεμόμετρο, που είναι εγκατεστημένο επί της γέφυρας του πλοίου. Μάλιστα, καθίσταται αναγκαία η αναφορά στο γεγονός ότι, η σχετική κατεύθυνση του ανέμου δεν περιλαμβάνεται στα operational data.
[44] Περιλαμβάνεται τόσο ο ανεμογενής κυματισμός, όσο και οι αποθάλασσες (swell).

MAIN ENGINE PARAMETERS	**MAIN ENGINE TYPE**	1 x MAN-B&W 7S60MC-C7
	AT MCR	15820 kW x 105.00 RPM
	AT NCR	11518 kW x 99.44 RPM[45]
PROPELLER PARAMETERS	**TYPE OF PROPELLER**	1 x FPP (FIXED-PITCH)
	DIAMETER (m)	7.48
	NUMBER OF BLADES	4

Στην αρχή ελήφθησαν όλες οι απαραίτητες πληροφορίες από τη διαχειρίστρια εταιρεία, που αφορούσαν τη γεωμετρία της γάστρας, των υπερκατασκευών- υπερστεγασμάτων, τα sea trials, τα shop tests της κύριας μηχανής πρόωσης, αλλά και το loading manual. Καθ' αυτόν τον τρόπο μπορούσε να πραγματοποιηθεί εκτίμηση της αντίστασης σε ήρεμο νερό, αλλά και της πρόσθετης αντίστασης κυματισμού και ανέμου, λεπτομέρειες για τα οποία παρατίθενται σε αντίστοιχα εδάφια της παρούσας εργασίας.

Κατά αρχάς, και βάσει των στοιχείων που διαθέταμε, ήταν αναγκαία η επεξεργασία της γεωμετρίας της γάστρας (νομέων και profiles) και γενικότερα του πλοίου με χρήση του σχεδιαστικού προγράμματος AutoCAD. Προκειμένου, όμως, να γίνει αυτό καθίστατο αναγκαία η επιλογή καταλλήλων καταστάσεων φόρτωσης, κάτι που οδηγούσε και σε διαφορετική (για κάθε κατάσταση) επεξεργασία των νομέων. Πιο συγκεκριμένα, επιλέγοντας κατάλληλο συνδυασμό διαγωγής- βυθισμάτων (από το loading manual), γίνεται αντιληπτό ποιοι νομείς και ποια σημεία τους βρίσκονται στα ύφαλα και ποιοι στα έξαλα[46]. Ταυτόχρονα, ιδιαίτερα σημαντικός είναι και ο τρόπος διακριτοποίησης των νομέων με γεωμετρικές ιδιαιτερότητες, όπως του πρωραίου βολβού.

Ο ακριβής προσδιορισμός της γάστρας, που έρχεται σε επαφή με το θαλασσινό νερό, αποτέλεσε σημαντικό αντικείμενο μελέτης. Για το λόγο αυτό, όλοι οι νομείς του πλοίου διαιρέθηκαν σε ισαπέχοντα διαστήματα, οι συντεταγμένες των οποίων ορίστηκαν επακριβώς. Καθ' αυτόν τον τρόπο η περιγραφή της γεωμετρίας της γάστρας ήταν ικανοποιητικά ακριβής. Το σύνολο όλων των γεωμετρικών συντεταγμένων που συγκεντρώθηκε, αποτέλεσε αρχείο εισόδου για τα υπολογιστικά προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν μετέπειτα (FRANK, SWAN 2). Το FRANK σχετίζεται με την εκτίμηση της πρόσθετης αντίστασης κυματισμού. Ενώ το SWAN 2 χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση της αντίστασης κυματισμού σε ήρεμο νερό. Αναλυτικότερη περιγραφή των εν λόγω προγραμμάτων θα πραγματοποιηθεί παρακάτω.

Επισημαίνεται ότι το πρόγραμμα SWAN 2 χρησιμοποιήθηκε, προκειμένου να προσδιοριστεί η αντίσταση κυματισμού σε ήρεμο νερό, από όπου με κατάλληλες αναγωγές (μέθοδο Hughes[47]) και διορθώσεις (πχ αέρα) προέκυπτε η συνολική αντίσταση ρυμούλκησης για τις διάφορες επιλεχθείσες καταστάσεις φόρτωσης. Από εκεί, με γνώση της γεωμετρίας της έλικας, της συμπεριφοράς της σε ελεύθερη ροή, αλλά και την αλληλεπίδρασή της με τη γάστρα προέκυπτε η ισχύς πρόωσης για τις υπό μελέτη ταχύτητες του πλοίου. Αυτή η ισχύς πρόωσης συγκρινόταν για κάθε κατάσταση φόρτωσης, με την αντίστοιχη που αναφερόταν στο sea trials report. Έπρεπε να υπάρχει απόκλιση της ισχύος μικρότερη του 3-3.5% και ταύτιση των στροφών της έλικας. Η προαναφερθείσα διαδικασία πραγματοποιήθηκε, έπειτα από σύσταση του επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής, ελλείψει model tests report.

2.2 ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΦΟΡΤΩΣΗΣ

Οι μετρήσεις που ελήφθησαν από τη ναυτιλιακή εταιρεία καταλαμβάνουν μεγάλο όγκο, ως εκ τούτου και τα βυθίσματα είναι αρκετά. Στην παρούσα εργασία, επιλέχθηκε να μελετηθούν εκτενώς δυο καταστάσεις φόρτωσης του bulk-carrier, από την ευρεία «γκάμα» καταστάσεων που παρατίθενται στο

[45] Στην κατάσταση φόρτωσης στην οποία διενεργήθηκαν οι θαλάσσιες δοκιμές.
[46] Για κατάσταση ισορροπίας.
[47] Αναλυτική περιγραφή διαδικασίας που ακολουθήθηκε γίνεται στην αντίστοιχη ενότητα της παρούσας εργασίας.

loading manual. Εκλέχθηκε, λοιπόν, μια full load και μια ballast condition. Δεδομένου ότι τα operational data στην αρχή δεν υπήρχαν, η επιλογή των καταστάσεων πραγματοποιήθηκε έπειτα από μελέτη συνήθων καταστάσεων[48] λειτουργίας ομοειδών πλοίων, αλλά και των στοιχείων που διαθέταμε από το sea trials report (και τα model tests, που φαίνεται από το sea trials report ότι είχαν πραγματοποιηθεί από το ναυπηγείο). Κατά συνέπεια επιλέχθηκε μια heavy ballast condition, έπειτα και από σύσταση του επιβλέποντα της διπλωματικής, με τη λογική ότι σε μια light ballast κατάσταση το πλοίο είναι περισσότερο επιρρεπές σε κινήσεις διατοιχισμού, παρουσιάζοντας προβλήματα δυναμικής ευστάθειας και απόδοσης. Μάλιστα, σκοπός μας ήταν η επιλεχθείσα ερματισμένη κατάσταση από το loading manual να έχει μέσο βύθισμα και διαγωγή συγκρίσιμη, με τα αντίστοιχα μεγέθη της heavy ballast στην οποία πραγματοποιήθηκαν τα sea trials. Ακόμη, επιλέχθηκε η έμφορτη να αναφέρεται στο βύθισμα αντοχής (scantling draft). Επιπροσθέτως, δεν επιλέχθηκε κάποια half load κατάσταση, με το σκεπτικό ότι τα bulk-carriers δε συνηθίζεται να πλέουν σε τέτοια κατάσταση. Σκοπός των ανωτέρω, ήταν οι επιλεχθείσες καταστάσεις να βρίσκονται όσο το δυνατόν πιο κοντά στις αντίστοιχες για τις οποίες πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις (βλ. operational data), από άποψη βυθίσματος, διαγωγής και εκτοπίσματος, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το όποιο σφάλμα κατά τις αναγωγές των διαφόρων μεγεθών (ισχύς, στροφές, κτλ.) σε αντίστοιχες (με των data points) καταστάσεις αναφοράς, μέσω συντελεστή ναυαρχείου. Κατά την παραλαβή, ωστόσο των operational data διαπιστώσαμε ότι οι προαναφερθείσες επιλογές ήταν σχετικά ικανοποιητικές (ειδικά για την FL), μιας και για σχετικά μεγάλα χρονικά διαστήματα μετρήσεων το μέσο βύθισμα (αυτό μόνο δινόταν και όχι το εκτόπισμα ή η διαγωγή) δεν παρουσίαζε σημαντικές αποκλίσεις σε σχέση με το βύθισμα της. Στη BL ωστόσο, υπήρχε μια απόκλιση που ναι μεν επηρέασε τα τελικά αποτελέσματα (δείκτες), αλλά όχι σε σημαντικό βαθμό.

Σημειώνεται ότι από εδώ και στο εξής στην παρούσα έκθεση η έμφορτη κατάσταση (full load) ενδέχεται να αναγράφεται ως FL, ενώ η ερματισμένη (heavy ballast) ως BL.

Παρακάτω παρατίθεται πίνακας, στον οποίο παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των επιλεγμένων καταστάσεων (από το loading manual):

ΠΙΝΑΚΑΣ 4: ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΦΟΡΤΩΣΗΣ (BL, FL)

ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΦΟΡΤΩΣΗΣ ΑΠΟ STABILITY BOOKLET			
DATA FROM STABILITY BOOKLET	LOAD CONDITIONS	HEAVY BALLAST DEP.	FULL LOAD DEP.
	T_F (m)	8.82	14.992
	T_M (m)	10.003	15.000
	T_A (m)	11.185	15.007
	TRIM= T_F -T_A (BY BOW +) (m)	-2.365	-0.015
	DISPLACEMENT (t)	85054.64	134374.47
	DWT (t)	64691.64	114011.47
	LCG (FROM AP) (m)	125.703	126.648
	VCG (m)	11.56	9.07
	$GM_{CORRECTED}$ (m)	9.47	9.18
CALCULATED	C_B (CALCULATED)	0.8039	0.8469
	LONGITUDINAL PROJECTED AREA (m^2)	2987.335	2013.896
	FRONTAL PROJECTED AREA (m^2)	965.344	712.217
	LENGTH OF WATERLINE (m)	238.000	244.400

[48] Φόρτωσης.

2.3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ BODYPLAN

Στην παρούσα ενότητα της έκθεσης πραγματοποιείται γραφική αναπαράσταση των γραμμών του υπό ανάλυση bulk-carrier. Ο λόγος είναι το γεγονός ότι θέλουμε να εντοπίσουμε τυχόν «εξόφθαλμα»[49] σφάλματα κατά την εξαγωγή των συντεταγμένων από το AutoCAD. Η ανάλυση ξεκίνησε θέτοντας ως background το δοθέν Lines Plan του πλοίου στο AutoCAD. Εν συνεχεία, με χρήση spline (& 3D Polyline) έγινε περιγραφή της πλάγιας όψης (profile) του πλοίου, συμπεριλαμβανομένου του βολβού.

Έπειτα, ο αριθμός των νομέων ελαττώθηκε σημαντικά, λόγω των περιορισμών του προγράμματος FRANK. Όσον αφορά το SWAN 2 δεν υπήρχε τόσο αυστηρός περιορισμός σχετικά με τον αριθμό των νομέων, παρόλα αυτά ο τρόπος λειτουργίας του είναι τέτοιος που δεν έχει νόημα να προσθέσουμε πολλούς άλλους νομείς (βλ. περιορισμό στα XNODE, που σχετίζεται με τη διαμήκη διακριτοποίηση[50] σε σταθμούς (νομείς) της γάστρας). Μάλιστα, με γύρω στους 30 νομείς η περιγραφή της γάστρας είναι σχετικά ικανοποιητική.

Πιο συγκεκριμένα, για τη BL στο αρχείο εισόδου του προγράμματος FRANK (.frk) εισήχθησαν 29 νομείς, ενώ για την FL 31 νομείς. Αναφέρεται, μάλιστα, ότι ο περιορισμός που θέτει το FRANK είναι 32 νομείς. Ο λόγος για τον οποίο επιλέχθηκε η περιγραφή της γάστρας στην FL να γίνεται από περισσότερους νομείς σε σχέση με τη BL είναι το γεγονός ότι στην έμφορτη κατάσταση είναι βυθισμένο μεγαλύτερο τμήμα της γάστρας στο νερό. Μάλιστα, είναι βυθισμένο και μέρος του transom σε αντίθεση με την ερματισμένη κατάσταση. Γενικώς, οι νομείς περιγράφονται στο αρχείο εισόδου του FRANK από 28 σημεία, δηλαδή κατά την επεξεργασία τους στο AutoCAD υποδιαιρέθηκαν σε 27 ισοδιαστήματα με χρήση της εντολής divide. Εξαίρεση αποτελούν ορισμένοι νομείς του πρωραίου βολβού. Γνωρίζοντας, λοιπόν τη διαμήκη θέση κάθε νομέα (άξονας x) ήταν εφικτό να αχθούν οι συντεταγμένες (y,z) για τα διάφορα σημεία, προκειμένου να περιγραφεί με ακρίβεια η γεωμετρία της γάστρας. Καθ' αυτόν τον τρόπο προέκυψε ένα σύνολο συντεταγμένων (y,z) ανά νομέα (x), τα οποία και εισήχθησαν[51] στο FRANK.

Ανάλογα με τα βυθίσματα και τη διαγωγή της εκάστοτε υπό μελέτη κατάστασης φόρτωσης, σχεδιάστηκε στο AutoCAD μια γραμμή που αντιπροσώπευε την ίσαλο. Όσον αφορά, τους νομείς που προορίζονταν για εισαγωγή στο FRANK, τα σημεία άνωθεν της ισάλου αφαιρέθηκαν και το ενδιαφέρον επικεντρώθηκε στα βυθισμένα. Επισημαίνεται ότι αυτό σχετίζεται με το γεγονός ότι το πρόγραμμα FRANK κατά τους υπολογισμούς των επιφανειακών κυμάτων και τον προσδιορισμό των υδροδυναμικών συντελεστών βασίζεται σε τοποθέτηση πόλων[52] στην ίσαλο επιφάνεια. Καθ' αυτό τον τρόπο, το FRANK έχει την απαίτηση κατά την εισαγωγή των σημείων των νομέων, η αρχή των αξόνων να βρίσκεται στην ίσαλο και συγκεκριμένα στη centerline, ενώ ο άξονας των z να έχει φορά προς τα άνω και ο άξονας των y προς την port side. Από το σχεδιαστικό πρόγραμμα AutoCAD προέκυψαν οι ακόλουθες απεικονίσεις των νομέων (Body Plan), για τις καταστάσεις FL και BL.

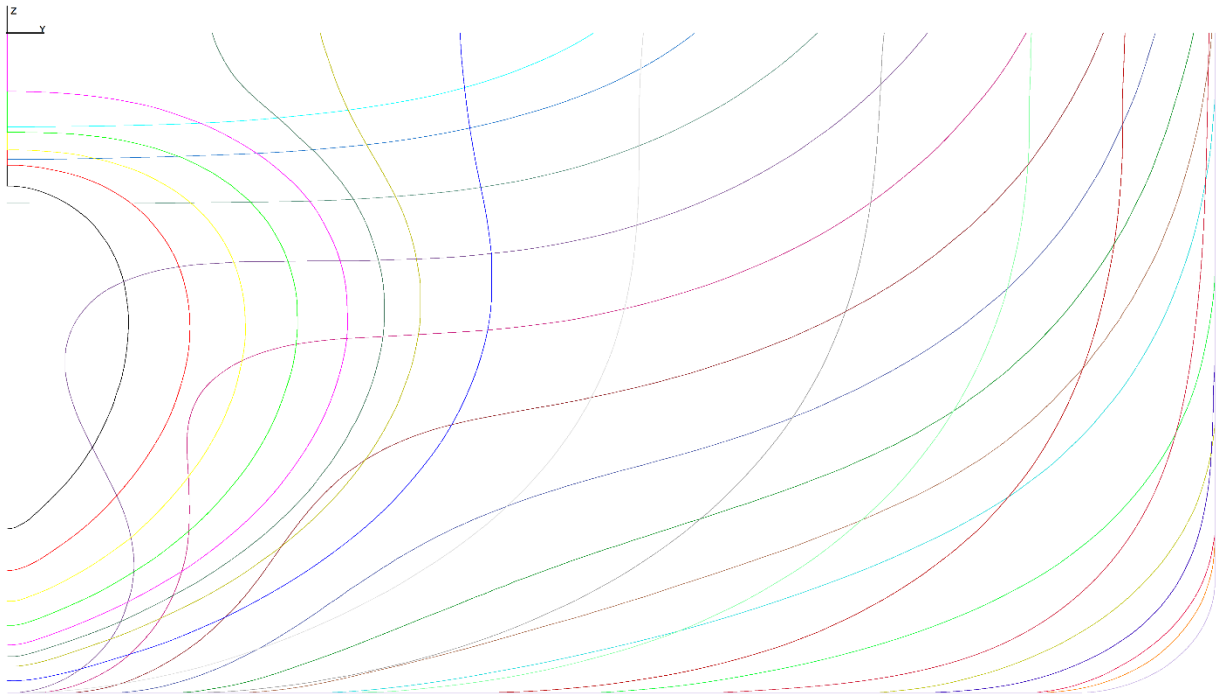
---

[49] Η αναφορά στη λέξη εξόφθαλμα γίνεται, καθώς όταν απαιτείται σοβαρή μελέτη των σφαλμάτων της γεωμετρίας των νομέων, καθίσταται αναγκαία η μελέτη της καμπυλότητας των νομέων και τυχόν εξομαλύνσεις. Βέβαια, εδώ δεν πραγματοποιείται σχεδίαση, αλλά ανάλυση ήδη υπάρχοντος πλοίου, οπότε το σχέδιο γραμμών υπάρχει και η όποια διαδικασία εξομάλυνσης κρίνεται άσκοπη.

[50] Για τα panels.

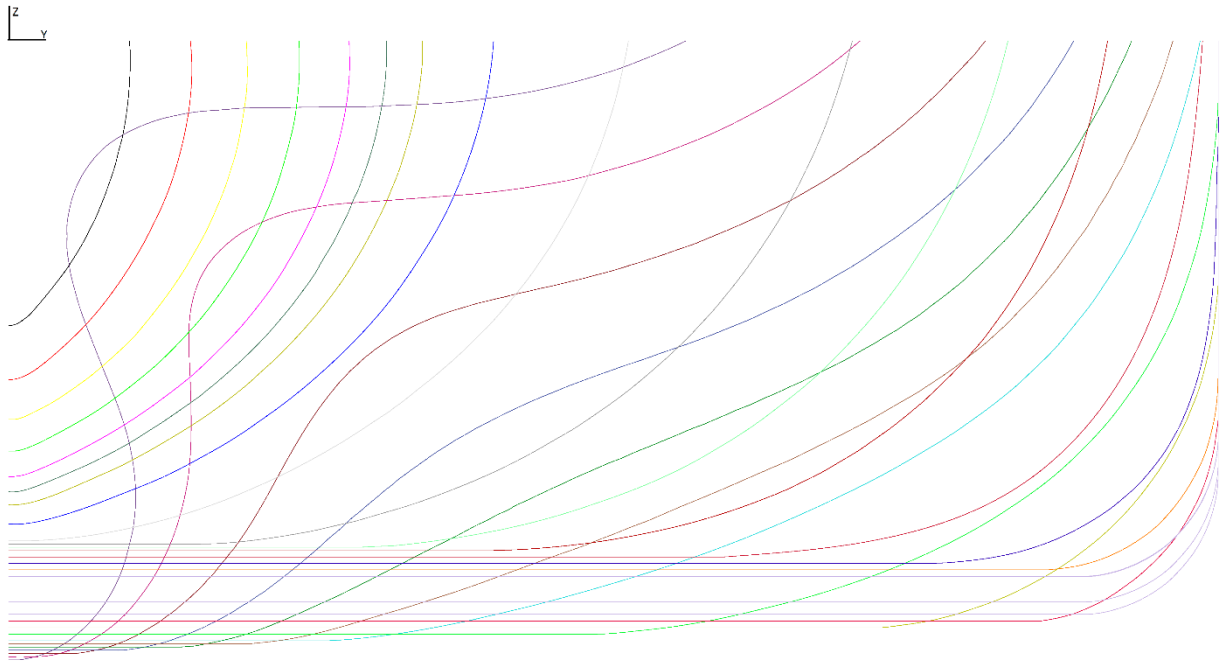
[51] Τονίζεται η φράση εισήχθησαν στο FRANK, μιας και το εν λόγω πρόγραμμα τους νομείς τους επεξεργάζεται με τέτοιον τρόπο που ουσιαστικά να τους διακριτοποιεί αλλιώς. Μέχρι 15 σημεία ανά νομέα επεξεργάζεται το FRANK.

[52] Τον αριθμό τους (των πόλων) τον καθορίζουμε στο αρχείο εισόδου δίνοντας κάποια τιμή στην αντίστοιχη παράμετρο.



ΣΧΗΜΑ 8: LINES PLAN ΣΤΗ FULL LOAD (ΒΑΣΕΙ AUTOCAD)

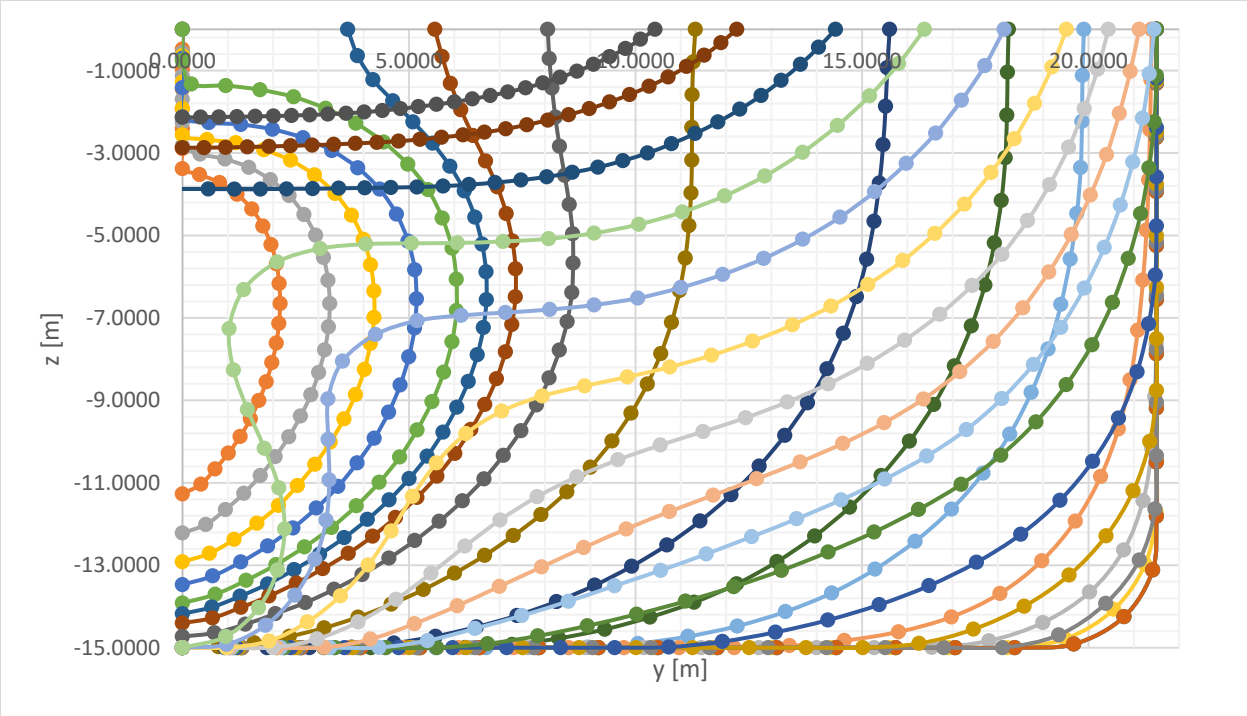
Σημειώνεται ότι οι νομείς τόσο του σχήματος με το σχέδιο γραμμών (από AutoCAD) για τη full load, όσο και οι αντίστοιχοι (δηλαδή στην ίδια διαμήκη θέση) νομείς του σχήματος με το σχέδιο γραμμών (από AutoCAD) της heavy ballast φέρουν το ίδιο χρώμα. Μάλιστα, και στα δυο σχήματα τοποθετήθηκε η αρχή των αξόνων όπως έχει περιγραφεί παραπάνω. Ακόμη, τα εν λόγω δυο σχήματα αφορούν τους νομείς που προορίζονται για το αρχείο εισόδου του προγράμματος FRANK (.frk).



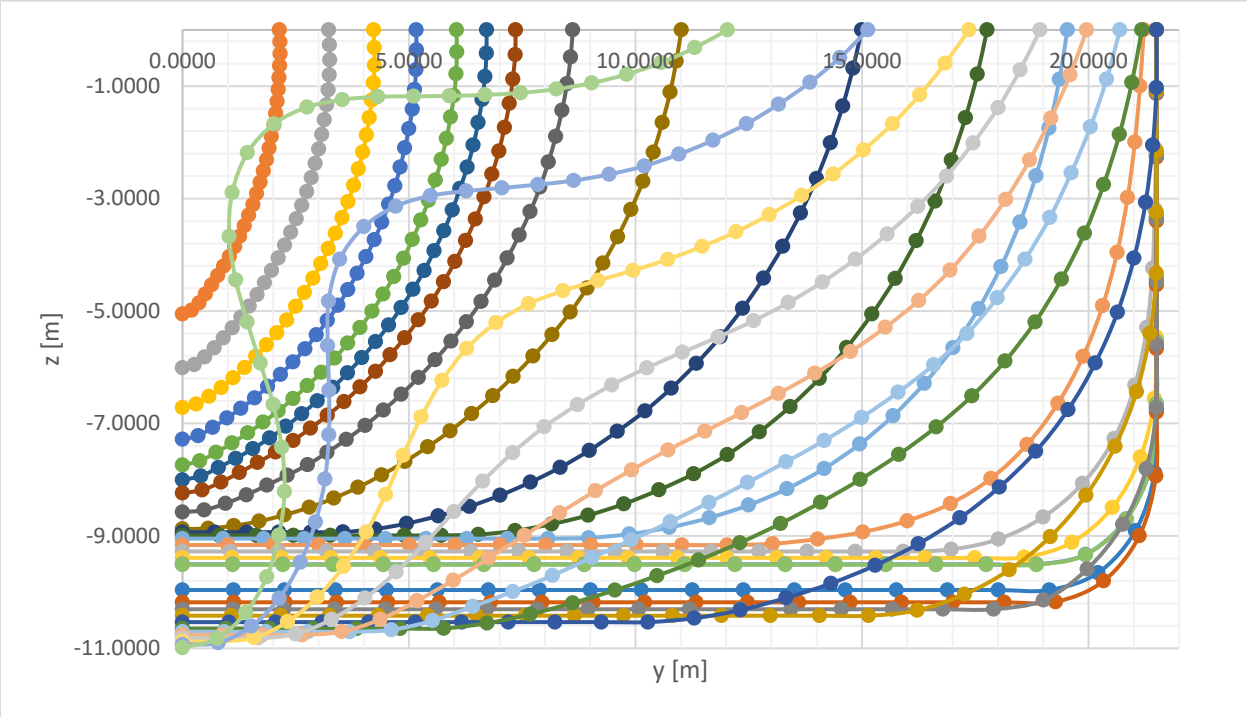
ΣΧΗΜΑ 9: LINES PLAN ΣΤΗ HEAVY BALLAST (ΒΑΣΕΙ AUTOCAD)

Από τα δυο ανωτέρω σχήματα γίνεται αντιληπτό το γεγονός ότι στην FL το πλοίο είναι ισοβύθιστο, καθώς οι νομείς που φτάνουν μέχρι το flat of bottom δεν παρουσιάζουν διακύμανση του βυθίσματός τους (βλ. κάτω μέρος σχημάτων), σε αντίθεση με τη BL. Στη BL παρουσιάζεται αυτή η διακύμανση και μάλιστα γίνεται αντιληπτό ότι το πλοίο παρουσιάζει έμπρυμνη διαγωγή, καθώς οι πρυμναίοι νομείς φτάνουν πιο χαμηλά.

Οι ακριβείς συντεταγμένες των διαφόρων σημείων της γάστρας, οι οποίες εξήχθησαν από το AutoCAD, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, υπέστησαν επεξεργασία κατάλληλα στο υπολογιστικό πρόγραμμα Excel, προκειμένου να γίνει εκ νέου απεικόνιση των νομέων της γάστρας, για τις δυο υπό μελέτη καταστάσεις, προτού εισαχθούν τα σημεία των νομέων στο FRANK. Έτσι, προέκυψαν τα ακόλουθα γραφήματα από το excel:



ΣΧΗΜΑ 10: BODY PLAN ΓΙΑ ΑΡΧΕΙΟ ΕΙΣΟΔΟΥ FRANK ΣΤΗ FULL LOAD (ΒΑΣΕΙ EXCEL)



ΣΧΗΜΑ 11: BODY PLAN ΓΙΑ ΑΡΧΕΙΟ ΕΙΣΟΔΟΥ FRANK ΣΤΗ HEAVY BALLAST (ΒΑΣΕΙ EXCEL)

Σημειώνεται ότι, στα αρχεία εισόδου τόσο του FRANK, όσο και του SWAN 2 γίνεται περιγραφή των νομέων από την πλώρη προς την πρύμνη.

Όσον αφορά το πρόγραμμα SWAN 2, υπάρχουν δύο αρχεία εισόδου. Αυτό που περιγράφει τη γεωμετρία της γάστρας (.pln) και αυτό που αφορά τις παραμέτρους κάθε κατάστασης φόρτωσης (.inp) και θα αναλυθεί παρακάτω στην έκθεση. Στο αρχείο εισόδου (.pln) εισήχθησαν 31 νομείς. Το ίδιο αρχείο .pln χρησιμοποιήθηκε για την FL και τη BL. Επισημαίνεται, ότι για το SWAN 2 υπάρχουν δυο τύποι νομέων. Είναι οι νομείς που περιγράφονται στο επίπεδο yz (Τύπου B), όπως στου FRANK και αυτοί που περιγράφονται στο 3D, με συνδυασμό διαμήκους προφίλ και εγκάρσιας τομής (Τύπου A), για την περιγραφή της πλώρης και της πρύμνης. Στου τύπου A απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στην περιγραφή του πρυμναίου βολβού και ειδικότερα στην περιγραφή του transom. Στην προκειμένη περίπτωση, γενικώς, οι νομείς τύπου B περιγράφονται στο αρχείο εισόδου pln από 28 σημεία, δηλαδή κατά την επεξεργασία τους στο AutoCAD υποδιαιρέθηκαν σε 27 ισοδιαστήματα με χρήση της εντολής divide. Ενώ οι νομείς τύπου A από πολύ περισσότερα σημεία. Γνωρίζοντας, λοιπόν τη διαμήκη θέση κάθε νομέα τύπου B (άξονας x) ήταν εφικτό να αχθούν οι συντεταγμένες (y,z) για τα διάφορα σημεία, και ακολουθώντας την ίδια διαδικασία για τα σημεία των νομέων της πλώρης και της πρύμνης, από όπου άγονται συντεταγμένες (x,y,z) ήταν εφικτό να περιγραφεί με ακρίβεια η γεωμετρία της γάστρας. Καθ' αυτόν τον τρόπο προέκυψε ένα σύνολο συντεταγμένων (y,z) ανά νομέα τύπου B (x), και ένα σύνολο συντεταγμένων (x,y,z) για τους 2 νομείς τύπου A, της πλώρης και της πρύμνης τα οποία και εισήχθησαν[53] στο SWAN 2. Επισημαίνεται ότι το πρώτο σημείο (κατώτερο) του νομέα που περιγράφει την πλώρη πρέπει να βρίσκεται πρώραθεν του επόμενου νομέα. Κατ' αναλογία, το πρώτο σημείο (κατώτερο) που περιγράφει το νομέα της πρύμνης πρέπει να βρίσκεται πρύμνηθεν του προηγούμενου νομέα. Η εν λόγω επισήμανση καθίσταται αναγκαία, προκειμένου να μπορέσει να «τρέξει» με «ασφάλεια» και ικανοποιητικά το πρόγραμμα.

Στην περίπτωση του SWAN 2 κατά την εισαγωγή των σημείων δεν υπήρχε ο αυστηρός περιορισμός του FRANK, όπου οι νομείς δεν υπερβαίνουν την ίσαλο, ούτε η απαίτηση να ληφθεί υπ' όψιν η διαγωγή. Αυτός ήταν και ο λόγος που υπήρχε η δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί το ίδιο .pln αρχείο εισόδου για τις δυο καταστάσεις φόρτωσης. Έτσι, βασιστήκαμε στη γάστρα της έμφορτης κατάστασης (scantling draft), όπου η βρεχόμενη επιφάνεια είναι μεγαλύτερη και θέσαμε σαν ανώτατο όριο των νομέων κατά προσέγγιση 2 m πάνω από την ίσαλο της FL. Μάλιστα, θεωρήθηκε, κατ' αρχάς ισοβύθιστο το πλοίο. Το ότι λαμβάνουμε ένα περιθώριο πάνω από την ίσαλο, οφείλεται στο γεγονός ότι, το SWAN 2, ανάλογα με την ταχύτητα πλεύσης, λαμβάνει μια νέα θέση ισορροπίας για το πλοίο, λόγω της αναδιανομής των πιέσεων γύρω από τη γάστρα. Οπότε, το πλοίο αποκτά κάποια δυναμική βύθιση και διαγωγή, ως εκ τούτου προκειμένου να «τρέξει» το πρόγραμμα θα πρέπει να λάβουμε υπ' όψιν μας το εν λόγω περιθώριο. Για τους νομείς (τύπου B) το σύστημα των αξόνων επιλέγεται όπως του FRANK, και πάλι με αρχή των αξόνων στην ίσαλο. Ακόμη, επιλέγεται οι νομείς τύπου B να περιγράφονται από 28 ισαπέχοντα σημεία, με εξαίρεση. Ακόμη, επιλέγεται οι νομείς τύπου A να περιγράφονται από πολύ περισσότερα σημεία, λόγω του ότι επεκτείνονται σε σημαντικό εύρος κατά το διάμηκες. Ειδικά, ο νομέας τύπου A της πλώρης περιγράφεται στο .pln αρχείο από 65 ισαπέχοντα σημεία και ο αντίστοιχος της πρύμνης από 97 σημεία, λόγω του transom, αλλά και του γεγονότος ότι λάβαμε υπ' όψιν τον πρυμναίο βολβό στην περιοχή της χοάνης. Επισημαίνεται, ακόμη, ότι λόγω της ευαισθησίας του προγράμματος, ήταν σημαντικό να πραγματοποιηθεί αναλυτική περιγραφή της γάστρας και ειδικά της πλώρης, της πρύμνης, αλλά και των βολβών τους (ειδικά του πρωραίου), μιας και η αντίσταση κυματισμού, που υπολογίζεται από το SWAN 2, εξαρτάται από το σύστημα κυματισμών που δημιουργεί κάθε στοιχειώδης επιφάνεια

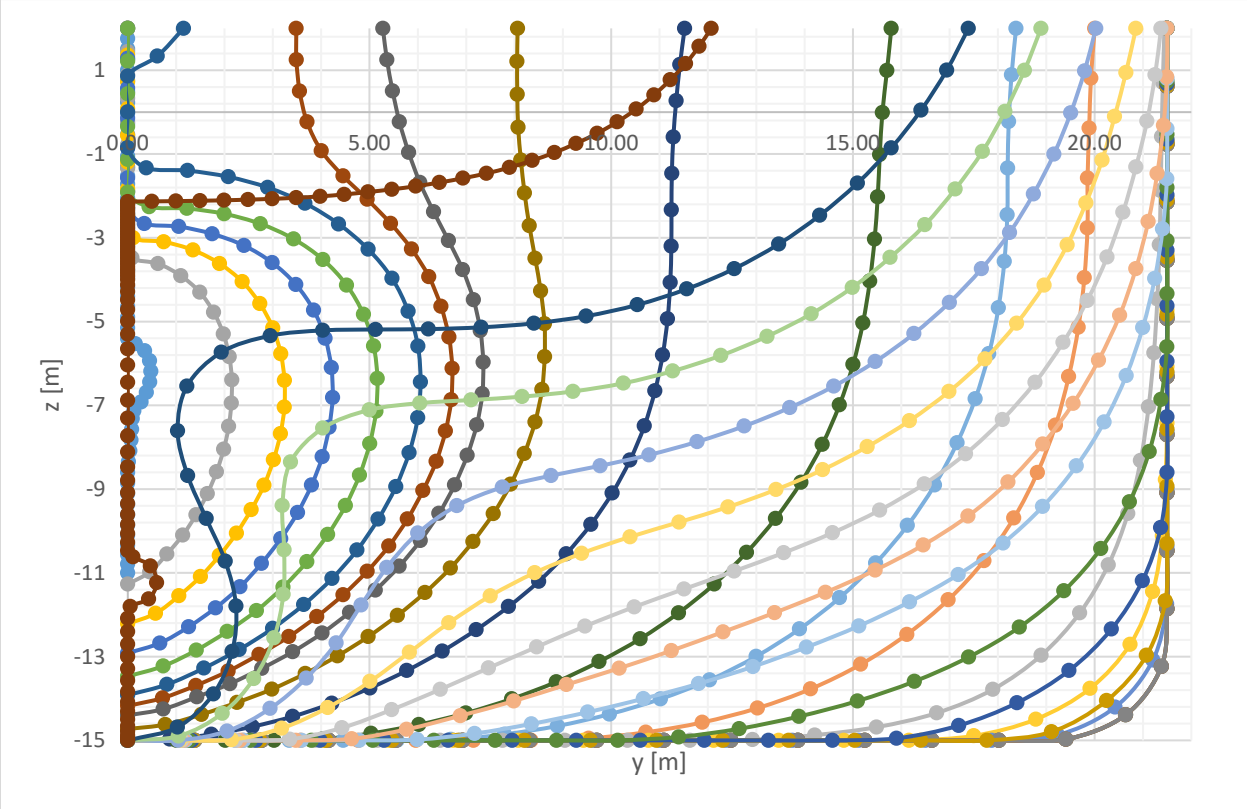
[53] Τονίζεται η φράση εισήχθησαν στο SWAN 2, μιας και το εν λόγω πρόγραμμα τους νομείς τους επεξεργάζεται με τέτοιον τρόπο που ουσιαστικά να τους διακριτοποιεί αλλιώς. Λόγω της περιορισμένης δυνατότητας του προγράμματος να παράγει panels με διακριτοποίηση κατά XNODE, YNODE, που έχουν αυστηρό περιορισμό.

της γάστρας και ειδικά από την πλώρη και την πρύμνη, μιας και τα δυο τελευταία (κύρια) συστήματα κυματισμών και η αλληλεπίδρασή τους είναι που καθορίζουν την εν λόγω αντίσταση. Έτσι, προστέθηκαν νομείς τύπου Β που περιγράφουν τον πρωραίο βολβό, κατά τέτοιον τρόπο που ο πιο πρωραίος νομέας να βρίσκεται πρύμνηθεν του πρώτου σημείου (κατώτερου) του νομέα τύπου Α της πλώρης.

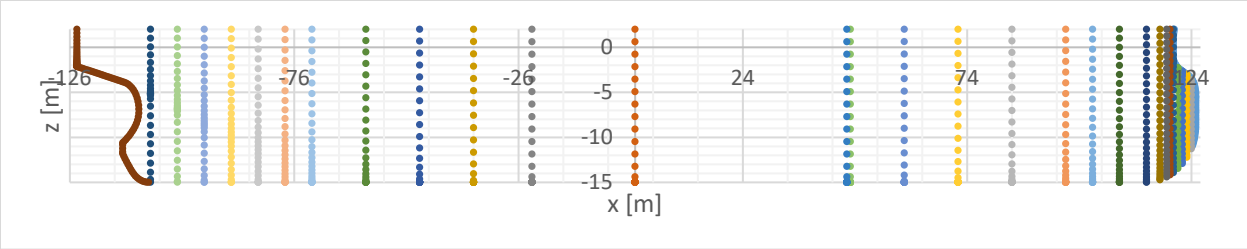
Οι ακριβείς συντεταγμένες των διαφόρων σημείων της γάστρας, οι οποίες εξήχθησαν από το AutoCAD, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, επεξεργάστηκαν κατάλληλα στο υπολογιστικό πρόγραμμα Excel, προκειμένου να γίνει εκ νέου απεικόνιση των νομέων της γάστρας, προτού εισαχθούν τα σημεία των νομέων στο .pln αρχείο εισόδου του SWAN 2. Έτσι, προέκυψαν τα ακόλουθα γραφήματα από το excel.

Προτού παρουσιαστούν τα εν λόγω γραφήματα, καθίσταται αναγκαίο να επισημανθεί ότι: Τα γραφήματα είναι 2 και είναι κοινά για το αρχείο εισόδου .pln και για τις δυο καταστάσεις φόρτωσης (FL, BL). Το ένα αφορά τον άξονα y-z και το άλλο τον άξονα x-z, με το δεύτερο να έχει την αρχή των αξόνων στο μέσο νομέα. Ο λόγος που παρατίθεται το γράφημα του επιπέδου x-z είναι οι δυο νομείς τύπου Α, της πλώρης και της πρύμνης, που είναι τρισδιάστατοι, κάτι που αποδεικνύεται έπειτα από παρατήρηση και του πρώτου γραφήματος (επιπέδου y-z). Σημειώνεται, μάλιστα, ότι για λόγους διευκόλυνσης του αναγνώστη, η χρωματική επιλογή των νομέων δεν είναι τυχαία. Πιο συγκεκριμένα, ένας νομέας έχει το ίδιο χρώμα και στα δυο γραφήματα.

Παρακάτω, ακολουθούν τα εν λόγω δύο γραφήματα:



ΣΧΗΜΑ 12: BODY PLAN (ΕΠΙΠΕΔΟ Y-Z) ΓΙΑ ΑΡΧΕΙΟ ΕΙΣΟΔΟΥ PLN ΤΟΥ SWAN 2 (ΒΑΣΕΙ EXCEL)

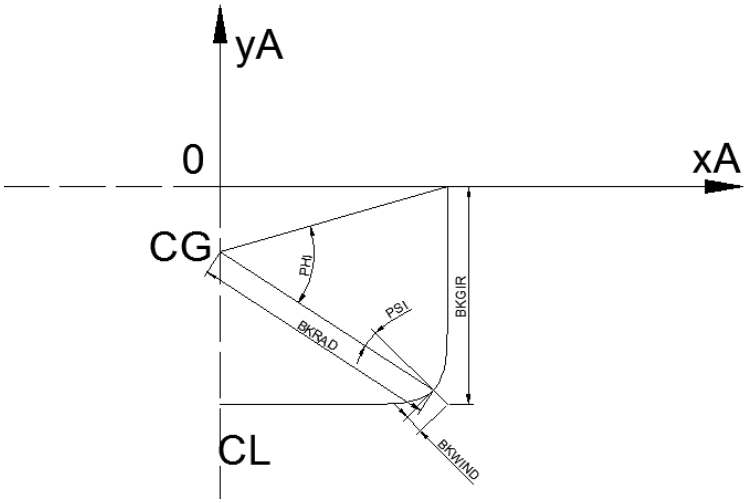


ΣΧΗΜΑ 13: BODY PLAN (ΕΠΙΠΕΔΟ X-Z) ΓΙΑ ΑΡΧΕΙΟ ΕΙΣΟΔΟΥ PLN ΤΟΥ SWAN 2 (ΒΑΣΕΙ EXCEL)

Σε αυτό το σημείο, αξίζει να σημειωθεί ότι το σχεδιαστικό πρόγραμμα AutoCAD χρησιμοποιήθηκε επιπρόσθετα και σε μεταγενέστερα στάδια της μελέτης, καθώς συνέβαλε στον προσδιορισμό κι άλλων σημαντικών γεωμετρικών μεγεθών (όπως και των παρατροπιδίων, κτλ.), με σκοπό να υπολογιστούν όλες οι συνιστώσες της συνολικής αντίστασης. Τα απαιτούμενα μεγέθη περιλαμβάνουν την πλάγια βρεχόμενη επιφάνεια, την προβεβλημένη επιφάνεια (πρόοψη και πλάγια όψη) των εξάλων, των υπερκατασκευών-υπερστεγασμάτων (για την αντίσταση του ανέμου και του αέρα), την θέση της γέφυρας, την επιφάνεια του πηδαλίου και άλλων παρελκόμενων. Τα περισσότερα εξ αυτών υπολογίζονται για κάθε κατάσταση φόρτωσης ξεχωριστά.

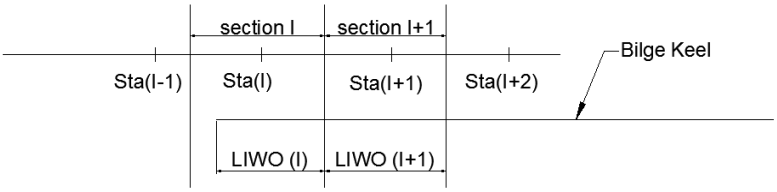
2.3.1 ΠΑΡΑΤΡΟΠΙΔΙΑ

Σε αυτό το σημείο κρίνεται επιβεβλημένη η αναφορά σε παρελκόμενα, των οποίων η γεωμετρία ζητείται να περιγραφεί σε αρχείο εισόδου προγράμματος που χρησιμοποιήθηκε στους υπολογισμούς. Γενικώς, το υπό ανάλυση bulk- carrier διαθέτει τα εξής παρελκόμενα: παρατροπίδια (bilge keels), πηδάλιο (κρεμαστό, ημι-ζυγοσταθμισμένο) και το αντίστοιχο stern horn. Μάλιστα, διαθέτει και PBCF, Mewis duct, κάτι που αναφέρθηκε προφορικά από εκπροσώπους της διαχειρίστριας εταιρείας, χωρίς να υπάρχουν περεταίρω πληροφορίες διαθέσιμες για την παρούσα διπλωματική. Στο αρχείο εισόδου του FRANK (.frk) γίνεται περιγραφή της γεωμετρίας των παρατροπιδίων, που επηρεάζουν την απόκριση του πλοίου σε διατοιχισμό. Τα χαρακτηριστικά των bilge keels που χρειάζεται το πρόγραμμα είναι αυτά που απεικονίζονται στα δυο παρακάτω σχήματα. Ορισμένα εξ αυτών, μάλιστα, εξαρτώνται και από την κατάσταση φόρτωσης του πλοίου, όπως θα φανεί (βλ. «σύνδεση» με CG).



ΣΧΗΜΑ 14: ΓΕΝΙΚΗ ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΤΟΜΗ ΑΝΑΦΕΡΟΜΕΝΗ ΣΕ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΠΑΡΑΤΡΟΠΙΔΙΩΝ

Σημειώνεται ότι στο ανωτέρω σχήμα χρησιμοποιείται το σύστημα των αξόνων του προγράμματος FRANK.



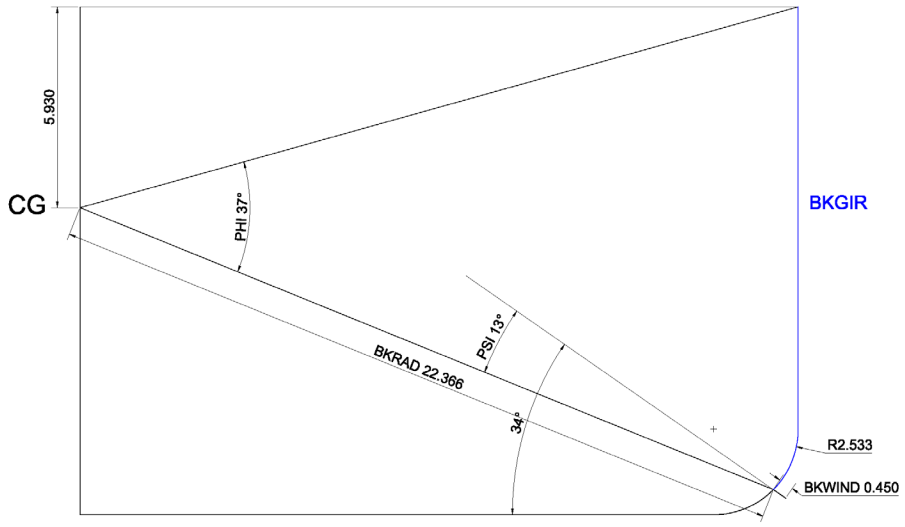
ΣΧΗΜΑ 15: ΔΙΑΜΗΚΕΙΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΑΝΑΦΕΡΟΜΕΝΕΣ ΣΤΑ ΠΑΡΑΤΡΟΠΙΔΙΑ

Τα απεικονιζόμενα στα ανωτέρω σχήματα σύμβολα επεξηγούνται από τα ίδια τα σχήματα. Αυτά τα γεωμετρικά μεγέθη που παραμένουν σταθερά για κάθε κατάσταση φόρτωσης είναι προφανώς αυτά που δε σχετίζονται με το κέντρο βάρους και την ίσαλο και είναι τα εξής: Μήκος στο οποίο επεκτείνονται τα παρατροπίδια, γωνία σε σχέση με οριζόντιο (θεωρώντας μηδενική εγκάρσια κλίση), πλάτος (μήκος κορμού). Για την παρούσα εργασία τα εν λόγω μεγέθη λαμβάνουν τις κάτωθι τιμές:

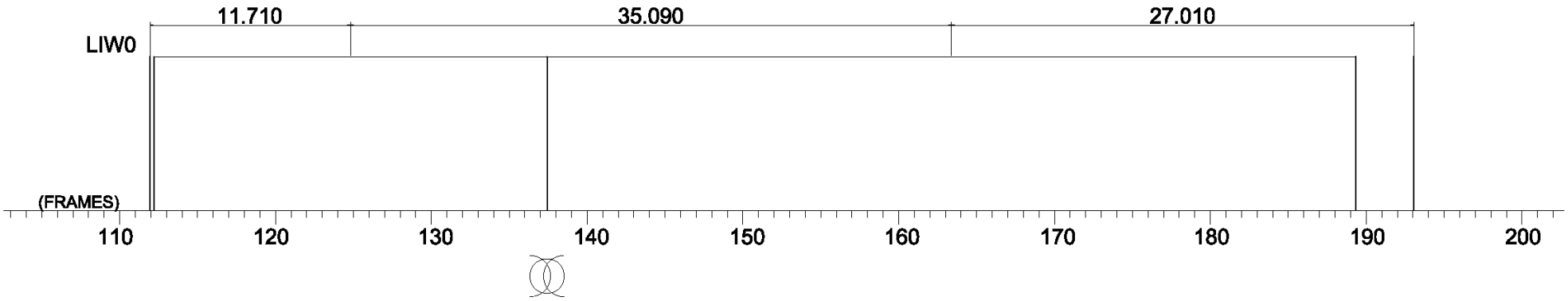
ΠΙΝΑΚΑΣ 5: ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΑΡΑΤΡΟΠΙΔΙΩΝ (ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΩΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΦΟΡΤΩΣΗΣ)

BILGE KEELS	
AFT FRAME	112
X_{AFT} (FROM AP)	87.76
FORE FRAME	193
X_{FORE} (FROM AP)	170.57
WIDTH (mm)	450
ANGLE WITH HORIZONTAL (deg)	34°

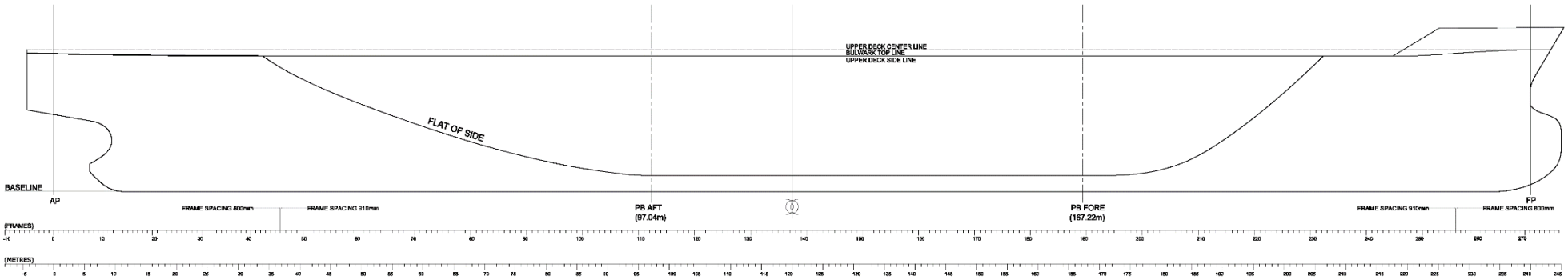
Παρακάτω παρατίθεται ενδεικτική εγκάρσια μέση τομή, για το υπό ανάλυση bulk- carrier στην FL, όπως προέκυψε από το AutoCAD, και στην οποία πραγματοποιείται περιγραφή γεωμετρικών χαρακτηριστικών των παρατροπιδίων.



ΣΧΗΜΑ 16: ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΗ ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΜΕΣΗ ΤΟΜΗ ΓΙΑ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ BILGE KEELS



ΣΧΗΜΑ 17: ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΗΚΟΥΣ BILGE KEELS ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΕΙΣΑΓΟΜΕΝΟΥΣ ΝΟΜΕΙΣ ΣΤΟ FRANK



ΣΧΗΜΑ 18: ΠΛΕΥΡΙΚΗ ΟΨΗ ΥΠΟ ΑΝΑΛΥΣΗ BULK CARRIER ΜΕ ΑΝΑΓΡΑΦΟΜΕΝΗ ΚΛΙΜΑΚΑ FRAMES

Παραπάνω, παρατίθενται δυο σχήματα. Το πρώτο αφορά ενδεικτική περιγραφή (αφορά την FL) του μήκους των παρατροπιδίων του υπό ανάλυση bulk-carrier σε σχέση με τους εισαγόμενους στο FRANK νομείς. Μάλιστα, οι διαμήκεις θέσεις των νομέων περιγράφονται με τις πιο παχιές γραμμές (εξαιρούνται οι δυο ακριανές, που αναφέρονται στα άκρα των bilge keels). Όσον αφορά το δεύτερο σχήμα, σε αυτό παρατίθενται το πλευρικό προφίλ της γάστρας, με το Flat Of Side, η κλίμακα των frames[54] σε αντιστοιχία με τον αντίστοιχο διαμήκη άξονα σε m, οι νομείς που οριοθετούν το παράλληλο τμήμα (PB Aft & PB Fore), ο μέσος νομέας, κτλ.

2.4 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΓΙΑ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ

Παραπάνω περιγράφεται η διαδικασία επεξεργασίας των γεωμετρικών στοιχείων της γάστρας του υπό ανάλυση bulk- carrier. Βάσει, λοιπόν, της εν λόγω γεωμετρίας και γνωρίζοντας την ταχύτητα υπηρεσίας, δύναται να πραγματοποιηθούν, κατ' αρχάς[55], υπολογισμοί της αντίστασης ρυμούλκησης για κάποιο εύρος ταχυτήτων. Βάσει, λοιπόν, μόνο της γεωμετρίας της γάστρας και για συγκεκριμένες γωνίες πλεύσης δύναται να υπολογιστεί η αντίσταση ρυμούλκησης σε ήρεμο νερό. Εν συνεχεία, ανάλογα με τις ενδείξεις των μετρητικών οργάνων[56] για τα data points των operational data πραγματοποιούνται προσαυξήσεις ή γενικότερα διορθώσεις[57] για την αντίσταση του ανέμου, την πρόσθετη αντίσταση κυματισμού, όπως θα περιγραφεί αναλυτικά παρακάτω στην εργασία. Όσον αφορά την αντίσταση ρυμούλκησης σε ήρεμο νερό, γενικώς πραγματοποιούνται ικανοποιητικοί, αξιόπιστοι υπολογισμοί με model tests από το ναυπηγείο. Στην παρούσα διπλωματική το αντίστοιχο report με αυτά τα αποτελέσματα δεν υπήρχε. Ως εκ τούτου, βασιστήκαμε στην εκτίμηση της αντίστασης κυματισμού σε ήρεμο νερό με τη χρήση του προγράμματος SWAN 2. Έπειτα, χρησιμοποιώντας τη σχέση της ITTC 57 προσδιορίστηκε η αντίσταση τριβής επίπεδης πλάκας. Η αναγωγή στην αντίσταση ρυμούλκησης γυμνής γάστρας[58] πραγματοποιήθηκε με αξιοποίηση της μεθόδου Hughes. Η εν λόγω μέθοδος, όμως, εμπεριέχει για τους υπολογισμούς το συντελεστή μορφής (k), ο οποίος, επίσης, κανονικά προσδιορίζεται πειραματικά. Εδώ, ο προσδιορισμός του, για κάθε κατάσταση φόρτωσης (FL, BL), πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια αντίστοιχου διαγράμματος (βλ. Harvald), αλλά και στατιστικών από όμοια πλοία. Όλα τα ανωτέρω περιγράφονται και επεξηγούνται αναλυτικά στην αντίστοιχη ενότητα[59] της παρούσας εργασίας. Ακολούθως, η υπολογισθείσα τιμή προσαυξάνεται κατά 3% (βλ. αντίστοιχο πίνακα με στατιστικά στην αντίστοιχη υποενότητα της Αντίστασης) λόγω της αντίστασης των παρελκόμενων. Εν συνεχεία, υπολογίζεται η αντίσταση αέρα, με τη βοήθεια των συντελεστών που αναγράφονται στο report του Blendermann (1996). Όσον αφορά τα operational data, πραγματοποιήθηκαν και άλλες διορθώσεις, βάσει συντελεστών από εμπειρία (σύσταση επιβλέποντα διπλωματικής) σχετικά με το ποσοστό γήρανσης[60] κατασκευής, μηχανολογικών εξαρτημάτων, κτλ. Παρόλα αυτά, στην αρχή, ελλείψει model tests, καλούμασταν να πραγματοποιήσουμε εκτίμηση της αντίστασης ρυμούλκησης, και κατ' επέκταση

---

[54] Όπως και το frame spacing.

[55] Παρακάτω στην εργασία, αναλύεται το πως η αντίσταση ρυμούλκησης ανάγεται στη ζητούμενη αντίσταση πρόωσης, μέσω δηλαδή γνώσης της γεωμετρίας και της συμπεριφοράς της έλικας σε ελεύθερη ροή, αλλά και την αλληλεπίδραση έλικας σε λειτουργία με τη γάστρα.

[56] Βλ. παραπάνω για δοθείσες ενδείξεις μετρητικών οργάνων, πιο συγκεκριμένα βλ. σελ.1.

[57] Μπορεί να είναι ευνοϊκός για την πρόωση ο άνεμος, ανάλογα με την κατεύθυνση του. Βέβαια, στην αξιολόγηση των operational data, η εκτίμηση της πρόσθετης αντίστασης κυματισμού (που εκ φύσεως ο κυματισμός είναι μη αρμονικός) χρησιμοποιούνται (στην παρούσα εργασία) τα αποτελέσματα του προγράμματος FRANK (αρχείο .ver), στο οποίο δε λαμβάνεται υπ' όψιν καθόλου ο ευνοϊκός άνεμος (η πρόσθετη αντίσταση εμφανίζεται με τη μορφή *).

[58] Γάστρα χωρίς έλικα και παρελκόμενα.

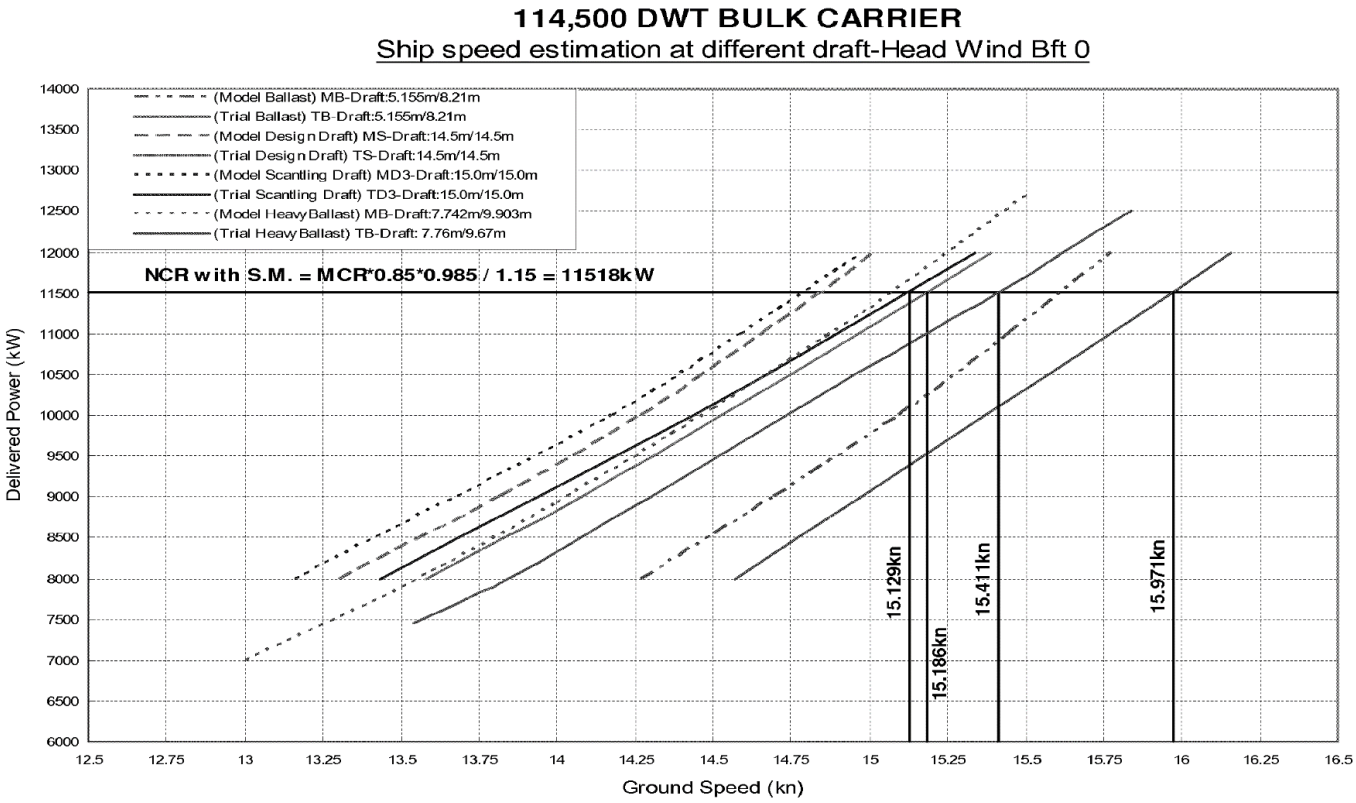
[59] Βλ. ενότητα με Αντίσταση.

[60] Π.χ. μόνιμο βέλος κάμψης άξονα και απώλεια ευθυγράμμισής του, λόγω φορτίσεων λειτουργίας.

της αντίστασης πρόωσης[61], άρα και της αντίστοιχης ισχύος (δεδομένης ταχύτητας), προκειμένου να γίνει σύγκριση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που περιέχονται στο sea trials report (για διάφορες καταστάσεις φόρτωσης) και να αξιολογηθεί η αξιοπιστία των μεθόδων εκτίμησης που χρησιμοποιήσαμε και που αναφέρονται περιληπτικά παραπάνω. Άρα η σύγκριση, γινόταν με στοιχεία για το πλοίο εν όσω ήταν νεότευκτο και έτσι έπρεπε να το αντιμετωπίσουμε και εμείς. Για αυτό σε αυτή την περίπτωση, δεν ελήφθη υπ' όψιν κανένα ποσοστό γήρανσης. Στόχος μας ήταν, η υπολογισθείσα ισχύς παραλαβής[62] (αυτή συγκρίναμε) να είναι για την εκάστοτε κατάσταση φόρτωσης, μεγαλύτερη[63] από την αντίστοιχη που ανάγεται από το sea trials report και με απόκλιση όχι μεγαλύτερη του 3-3.5%[64] (σύσταση επιβλέποντα καθηγητή διπλωματικής). Ακόμη, απαιτούνταν, και αυτό καθίστατο αναγκαίο, να υπάρχει ταύτιση[65] των στροφών της έλικας.

Παραπάνω, γίνεται αναφορά στη σύγκριση της ισχύος που έγινε. Ως γνωστόν, οι θαλάσσιες δοκιμές παραλαβής πραγματοποιούνται σε heavy ballast condition. Ως εκ τούτου, δεν υπάρχουν στοιχεία για άλλες καταστάσεις, όπως τις έμφορτες. Έτσι, καθίσταται αναγκαία η πραγματοποίηση model tests σε διάφορες καταστάσεις φόρτωσης και με κατάλληλες αναγωγές από κλίμακα μοντέλου σε φυσική κλίμακα γίνεται πρόβλεψη της αντίστοιχης αντίστασης για το πραγματικό πλοίο. Στο sea trials report προέκυψε έπειτα από αναγωγές διάγραμμα ισχύος παραλαβής (DHP) συναρτήσει ταχύτητας για ήρεμο νερό, χωρίς άνεμο, χωρίς επίδραση ρευμάτων[66]. Παρακάτω παρατίθεται το εν λόγω διάγραμμα από το sea trials report:

[61] Έπειτα από κατάλληλες αναγωγές.
[62] Έλικας.
[63] Επεξηγείται ο λόγος στην ενότητα της Αντίστασης της παρούσας εργασίας.
[64] Και το 3-3.5% είναι ελαστικό όριο.
[65] Σχετίζεται με σχεδίαση και επεξηγείται υδροδυναμικά και από θεωρία πρόωσης και ζεύξης έλικας, κύριας μηχανής (όρια ασφαλούς λειτουργίας καθοριζόμενα από κατασκευαστή). Καθορίζεται από παραμέτρους σχεδίασης έλικας, αλλά και από περιθώριο σπηλαίωσης, αντοχή.
[66] Για αυτό δε δίνεται έμφαση στο αν η ταχύτητα του εν λόγω διαγράμματος είναι over ground ή through sea.



ΣΧΗΜΑ 19: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ DHP-SOG ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΦΟΡΤΩΣΗΣ ΚΑΙ ΗΡΕΜΟ ΝΕΡΟ, ΧΩΡΙΣ ΑΝΕΜΟ, ΡΕΥΜΑ (ΑΠΟ SEA TRIALS REPORT)

2.5 SHOP TESTS

Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν για την κύρια μηχανή πρόωσης του υπό ανάλυση πλοίου είναι ιδιαίτερα σημαντικές. Ιδιαίτερη σημασία, μάλιστα, έχουν τα αποτελέσματα για την κατανάλωση καυσίμου, μιας και αυτά τα στοιχεία θα χρησιμοποιούνταν σαν τιμές αναφοράς, προκειμένου να υπολογίζονταν οι αντίστοιχοι δείκτες KPI. Βέβαια, στα δοθέντα operational data δεν υπάρχουν στοιχεία από τα μετρητικά όργανα για την κατανάλωση καυσίμου (τόσο της κύριας μηχανής πρόωσης, όσο και των Η/Π ζευγών, boilers, κτλ.), κάτι που καθιστά την εκτίμηση τέτοιων δεικτών ανέφικτη. Παρόλα αυτά καθίσταται αναγκαία η αναφορά σε ορισμένα στοιχεία. Βάσει του δοθέντος από τη διαχειρίστρια εταιρεία shop tests report, τα βασικά χαρακτηριστικά της κύριας μηχανής πρόωσης του υπό ανάλυση πλοίου είναι τα κάτωθι:

ΠΙΝΑΚΑΣ 6: ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΥΡΙΑΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΥΠΟ ΑΝΑΛΥΣΗ BULK- CARRIER

SPECIFICATION OF MAIN ENGINE		
GENERAL	**ENGINE TYPE**	1 x MAN-B&W 7S60MC-C7
	BUILDER	HYUNDAI HEAVY INDUSTRIES
	POWER AT MCR (kW)	15820
	SPEED AT MCR (kW)	105
	POWER AT NCR (kW)	11518
	SPEED AT NCR (kW)	99.44

PARTICULARS	**NUMBER OF CYLINDERS**	7
	BORE (mm)	600
	STROKE (mm)	2400
	AHEAD ROTATIONAL DIRECTION	CLOCKWISE
	FIRING ORDER	AH-> 1-7-2-5-4-3-6-1 <-AS[67]
	CYLINDER CONSTANT	1.131
T/C	**TYPE OF T/C**	2 x TPL77B11
SHOP TEST REPORT RESULTS	**LCV OF FUEL OIL (kcal/kg)**	10200
	CONDITIONS	ISO

Στον παραπάνω πίνακα, ο δείκτης LCV είναι η κατώτερη θερμογόνος δύναμη (Lower Calorific Value) του καυσίμου της κύριας μηχανής, στο οποίο αναφέρονται τα αποτελέσματα από τα shop tests. Στην προκειμένη περίπτωση στις δοκιμές κλίνης της κύριας μηχανής τα αποτελέσματα των καταναλώσεων έχουν διορθωθεί κατά τέτοιον τρόπο ώστε να αναφέρονται στην αναγραφόμενη στον παραπάνω πίνακα θερμογόνο ισχύ και σε συνθήκες ISO. Γενικότερα, τόσο ο εν λόγω δείκτης, όσο και οι συνθήκες (πίεσης, θερμοκρασίας μηχανοστασίου, άρα και αέρα εισαγωγής) διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στον προσδιορισμό της τελικής κατανάλωσης. Πολλές φορές απαιτούνται σχετικές διορθώσεις, προκειμένου να γίνει υπολογισμός της κατανάλωσης καυσίμου των data points των operational data, όπου συχνά οι εν λόγω παράμετροι κατά την πραγματική λειτουργία του πλοίου παρουσιάζουν διαφορές σε σχέση με των shop tests.

Πράγματι, οι διορθώσεις[68] που συνήθως γίνονται στα αποτελέσματα των shop trials στην κατανάλωση καυσίμου, προκειμένου να υπολογιστεί η αναμενόμενη για κάθε data point κατανάλωση είναι οι εξής:

- 5% προσαύξηση για τις συνθήκες δοκιμών της κύριας μηχανής πρόωσης,
- 2% προσαύξηση για την «απώλεια» ευθυγράμμισης του άξονα,
- 5% προσαύξηση για την απόδοση του κινητήρα (σχετικό με κατάστασή του)
- X[69]%, για τη διαφορά LCV καυσίμου (μεταξύ shop trials και λειτουργίας).

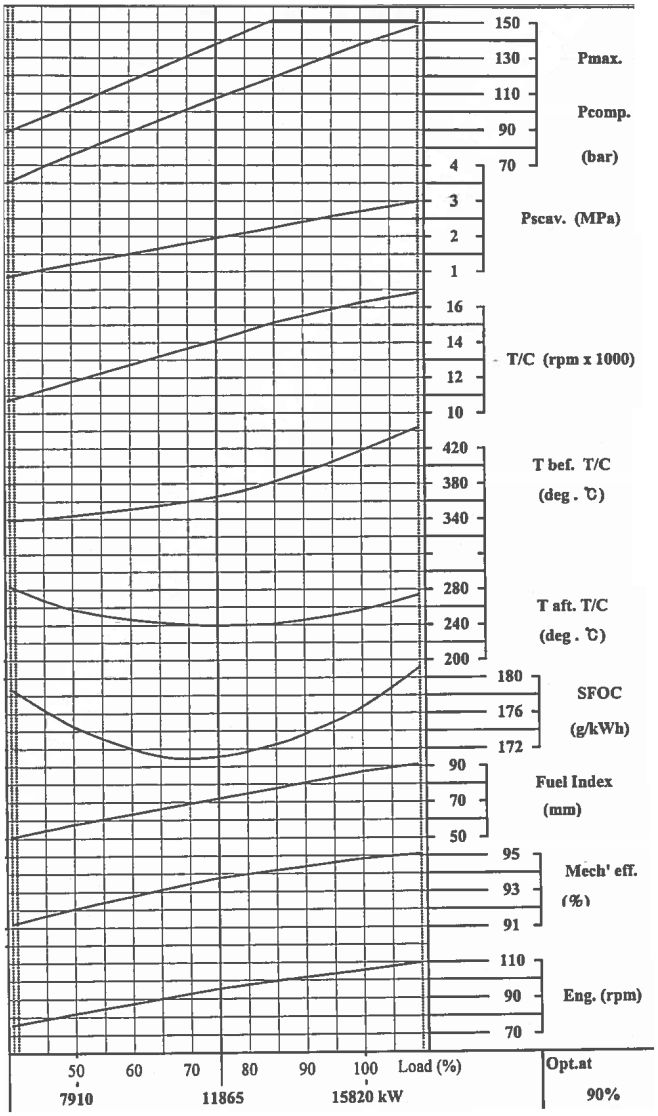
Βέβαια, ελλείψει στοιχείων για ωριαία κατανάλωση (τόσο κύριας μηχανής πρόωσης όσο και άλλων εγκατεστημένων συστημάτων, μηχανών) δεν είχε νόημα η χρησιμοποίηση των εν λόγω διορθώσεων.

Έπειτα, ακολουθεί το διάγραμμα καμπυλών κινητήρα από τα Shop Tests, διορθωμένο κατά ISO.

[67] AH= Ahead, AS= Astern.

[68] Επισημαίνεται ότι οι εν λόγω διορθώσεις σχετίζονται με την κατάσταση λειτουργίας της κύριας μηχανής και το καύσιμο.

[69] X=(10200-LCV)/10200*100, με 10200kcal/kg να είναι η θερμογόνος δύναμη του καυσίμου κατά ISO, ενώ LCV η αντίστοιχη του χρησιμοποιούμενου καυσίμου κατά τη λειτουργία του πλοίου.



ΣΧΗΜΑ 20: ENGINE PERFORMANCE ΚΑΤΑ ΤΑ SHOP TESTS ΓΙΑ MAN-B&W 7S60MC-C7

Ο κατασκευαστής του κινητήρα πραγματοποίησε επτά δοκιμές της κύριας μηχανής πρόωσης (στην κλίνη) σε διαφορετικές ιπποδυνάμεις, δίνοντας τις αντίστοιχες ειδικές καταναλώσεις καυσίμου για την καθεμιά. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα:

ΠΙΝΑΚΑΣ 7: ΕΙΔΙΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ (ΑΠΟ SHOP TESTS)

LOAD POWER (%)	25	50	75	85	90	100 (1)	100 (2)
SFOC (measured) (g/kWh)	189.28	179.16	175.57	176.89	178.17	180.77	180.78
SFOC (ISO cond.) (g/kWh)	184.40	174.32	170.88	172.28	173.48	176.21	176.21

Βάσει του ανωτέρω πίνακα, παρατηρούμε ότι οι μετρούμενες τιμές SFOC είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες τιμές σε ISO Condition. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι μετρούμενες αντιστοιχούν σε καύσιμο με χαμηλότερη τιμή του δείκτη LCV, και (δευτερευόντως) σε διαφορετικές συνθήκες (θερμοκρασίας αναρροφώμενου αέρα, σχετικής υγρασίας, βαρομετρικής πίεσης, θερμοκρασίας μέσου ψύξεως του αέρα).

2.6 ONLINE OPERATIONAL DATA

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία βασίζονται σε πραγματικές ενδείξεις του εξοπλισμού μέτρησης υψηλής ακριβείας που διαθέτει το υπό ανάλυση bulk- carrier. Το σύνολο αυτών των δεδομένων κοινοποιούνται απευθείας (online) στα κεντρικά γραφεία της διαχειρίστριας εταιρείας. Πιο συγκεκριμένα, δόθηκαν ωριαίες καταγραφές, σε εύρος 2636 data points, για διάφορες παραμέτρους που επηρεάζουν σημαντικά την απόδοση του πλοίου. Οι παράμετροι αυτές περιλαμβάνουν:

- την ταχύτητα του πλοίου, τόσο ως προς το νερό (STW: speed through water), όσο και ως προς το έδαφος (SOG: speed over ground),
- τη φαινόμενη ταχύτητα του ανέμου,
- το σημαντικό ύψος κύματος, τη σχετική κατεύθυνση του κυματισμού,
- το βύθισμα,
- την ισχύ άξονα (SHP)
- τις στροφές της έλικας (rpm).

Επεξεργαστήκαμε το μεγάλο όγκο δεδομένων με τέτοιον τρόπο, ώστε να συνθέσουμε ένα ενιαίο σύνολο πληροφοριών για την κάθε κατάσταση, με βάση την ημέρα και την ώρα. Έπειτα, βάσει των διαφόρων καταστάσεων κυματισμών, ανέμου δύναται να εκτιμηθεί η απαιτούμενη (σε σχέση με το ήρεμο νερό, χωρίς άνεμο) αύξηση της ισχύος άξονα. Σε αυτό βοηθούν παράμετροι, όπως η ταχύτητα ανέμου, σημαντικό ύψος κύματος, γωνία πρόσπτωσης κύματος (ανεμογενείς κυματισμοί και swell). Ακόμη, η διαφορά μεταξύ velocity over ground και velocity through sea υποδεικνύει την ύπαρξη ρεύματος. Αν η πρώτη είναι μεγαλύτερη της δεύτερης τότε το ρεύμα είναι ευνοϊκό για το πλοίο, ειδάλλως αυξάνεται ο χρόνος του ταξιδιού, κάτι που είναι ανεπιθύμητο.

Επισημαίνεται, ότι το γεγονός ότι τα operational data είναι online και όχι noon reports (ημερήσιες καταγραφές) αυξάνει την αξιοπιστία, αλλά και τη δυνατότητα να υπολογιστούν δείκτες απόδοσης, από τους οποίους μπορούν να εξαχθούν ουσιώδη συμπεράσματα. Ακόμη, για μεγάλη συχνότητα μετρήσεων (της τάξης του λεπτού), υπάρχει η δυνατότητα να εξαλείψουμε και τα όποια μεταβατικά φαινόμενα, που ενδεχομένως να οδηγούσαν σε λανθασμένα συμπεράσματα.

2.7 FRANK- ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ

Προκειμένου να υπολογιστεί η πρόσθετη αντίσταση κυματισμού που ασκείται στο πλοίο και να μελετηθούν οι αγόμενες κινήσεις του λόγω αυτού, απαιτείται η επίλυση των εξισώσεων κίνησης του περιρρεόντος νερού. Θεωρώντας ασυμπίεστο, μη συνεκτικό, αστρόβιλο ρευστό και το πλάτος των κινήσεων, ταχυτήτων αρκετά μικρό ώστε να είναι επιτρεπτή η γραμμικοποίηση των εξισώσεων, τότε δύναται το πρόβλημα που αντιμετωπίζεται να αχθεί σε πρόβλημα δυναμικού ταχύτητας, καθιστώντας το πιο εύκολο. Το πρόγραμμα FRANK επιλύει ένα τέτοιο (υδροδυναμικό) πρόβλημα με χρήση θεωρίας λωρίδων. Σύμφωνα με τη θεωρία λωρίδων το 3D πρόβλημα του προσδιορισμού των αποκρίσεων του πλοίου, επιλύεται με κατά το διάμηκες ολοκλήρωση των αποκρίσεων των εγκαρσίων τομών του. Δηλαδή το 3D πρόβλημα ανάγεται σε επιμέρους απλούστερα 2D. Μια συνάρτηση δυναμικού που επιλύει για κάθε νομέα την εξίσωση και τις συνοριακές συνθήκες συμπεριλαμβανομένης και της συνθήκης ελεύθερης επιφάνειας είναι αυτή που προτάθηκε από το FRANK (1967). Η εν λόγω συνάρτηση δυναμικού βασίζεται στην κατανομή σημειακών πηγών στη βρεχόμενη επιφάνεια (ορθότερα καμπύλη) του νομέα.

Με προσδιορισμένο το δυναμικό ταχύτητας και με χρήση της γραμμικοποιημένης εξίσωσης Bernoulli (για το 2D) δύναται να βρεθεί η πίεση σε τυχούσα θέση στο 2D και έτσι να βρεθούν αδρανειακοί υδροδυναμικοί συντελεστές και συντελεστές απόσβεσης. Σημειώνεται ότι, λόγω του ότι το δυναμικό του FRANK ικανοποιεί και τη συνθήκη της ελεύθερης επιφάνειας, τα εισαγόμενα σημεία στο αρχείο εισόδου φτάνουν μέχρι την ίσαλο, όχι παραπάνω. Επισημαίνεται, επιπλέον, ότι το FRANK δεν προσδιορίζει την φόρτιση λόγω περίθλασης, ενώ θεωρεί μονοκατευθυντικό κυματισμό (και όχι short-crested).

Παρακάτω παρατίθεται ενδεικτικά σε μορφή εικόνας το αρχείο εξόδου (.ver) του προγράμματος FRANK για irregular, μετωπικούς (long crested) κυματισμούς, για λόγους πληρότητας.

SHIP SPEED = 7.562 m/sec HEADING ANGLE = 180.000 DEG.

							-- ABS.VERT.ACCEL.--|			-- REL.VERT.MOTIONS --|			-- REL.VERT.VELOC. --|			--ALA-|
Tp	H(1/3)	HEAVE	PITCH	ROLL	ADDRES	POINT1	POINT2	POINT3	POINT1	POINT2	POINT3	POINT1	POINT2	POINT3	POINT1
7.00	1.000	0.019	0.019	0.000	389.	0.059	0.043	0.101	0.367	0.263	0.374	0.682	0.540	0.646	*******
8.00	1.000	0.017	0.021	0.000	884.	0.046	0.031	0.076	0.310	0.252	0.320	0.530	0.445	0.510	0.000
9.00	1.000	0.022	0.035	0.000	1374.	0.044	0.026	0.069	0.279	0.244	0.310	0.425	0.375	0.425	0.000
10.01	1.000	0.032	0.060	0.000	1867.	0.050	0.024	0.080	0.256	0.235	0.333	0.350	0.319	0.378	0.000
11.01	1.000	0.047	0.086	0.000	2272.	0.059	0.025	0.097	0.233	0.225	0.368	0.293	0.275	0.354	0.000
12.01	1.000	0.065	0.110	0.000	2525.	0.067	0.028	0.111	0.211	0.213	0.399	0.248	0.238	0.340	0.000
13.01	1.000	0.084	0.129	0.000	2606.	0.073	0.031	0.121	0.190	0.198	0.417	0.211	0.207	0.327	0.000
14.01	1.000	0.102	0.143	0.000	2525.	0.077	0.033	0.126	0.171	0.183	0.422	0.182	0.180	0.312	0.000

ΣΧΗΜΑ 21: ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΟ ΑΡΧΕΙΟ ΕΞΟΔΟΥ (.ver) FRANK ΓΙΑ ΥΠΟ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΛΟΙΟ

2.8 SWAN 2- ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ

Το Swan 2 δύναται να επιλύσει επίσης γραμμικοποιημένο πρόβλημα δυναμικού. Με τη διαφορά ότι αυτό γίνεται στο 3D. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται η συνάρτηση Green που βασίζεται στην κατανομή πηγών Rankine (τμήμα της ελεύθερης επιφάνειας και το στερεό σύνορο διακριτοποιούνται σε Rankine Panels) στο στερεό σύνορο και την ελεύθερη επιφάνεια. Μάλιστα, δεν ικανοποιείται η συνθήκη της ελεύθερης επιφάνειας, για αυτό δύναται στο αρχείο εισόδου .pln η επιφάνεια της γάστρας να ξεπερνά την ίσαλο και δε μας ενδιαφέρει αν θα εισαχθούν τα σημεία με διαγωγή. Λόγω περιορισμών του προγράμματος, ο μέγιστος αριθμός των panels είναι περιορισμένος (βλ. Xnode, Ynode), ως εκ τούτου το διακριτοποιημένο τμήμα της ελεύθερης επιφάνειας είναι συγκεκριμένο (1.5Lpp πρύμνηθεν της πρύμνης, 0.5Lpp πρώραθεν από την πλώρη και 1Lpp από τη CL). Μάλιστα, το πρόγραμμα θεωρεί αποσβενύμενους κυματισμούς που στα όρια της μελετούμενης περιοχής μηδενίζονται. Αυτός είναι και ο λόγος που τα αποτελέσματα του Swan 2 όσον αφορά το seakeeping δεν είναι τόσο αξιόπιστα, όσο του FRANK. Κατ' ουσίαν, γίνεται υπολογισμός των πιέσεων, λόγω της αλληλεπίδρασης των συστημάτων κυματισμού πρώρας, πρύμνης, ενώ λαμβάνεται υπ' όψιν και το wake wash. Μάλιστα, λόγω της ταχύτητας αλλάζει το πεδίο των πιέσεων γύρω από τη γάστρα, οπότε λαμβάνει υπ' όψιν και τη δυναμική βύθιση και διαγωγή που αποκτά το πλοίο κατά την πλεύση. Ακόμη, λόγω του ότι το πρόβλημα είναι δυναμικό (στο πεδίο του χρόνου), κατά την ολοκλήρωση ο χρόνος (t) και το dt, τα οποία επιλέγει ο χρήστης, μπορούν και πρέπει να είναι βέλτιστοι.

Παρακάτω παρατίθεται ενδεικτικά σε μορφή εικόνας το αρχείο εξόδου (.out) του προγράμματος Swan 2, για λόγους πληρότητας.

```
*****************************************
*                                       *
*            SWAN2 2002  SOLVE          *
*                                       *
*                                       *
*          Copyright (C) 2002           *
*   Massachusetts Institute of Technology *
*      Boston Marine Consulting Inc.    *
*                                       *
*****************************************

GRID INFORMATION
Name  :  full load SSG File

Sheet#  NP1   NP2   NP   KP   MP
  1     23    106  2438   3    0
  2      4     54   216   3    0
  3     37     10   370   2    1
  4     10     10   100   1    0

PRINCIPAL HYDROSTATIC PARTICULARS
density (kg/m^3)= 1025.000  gravity (m/s^2)=  9.800

Waterline Length     (m) :  2.494E+2
Waterline Beam       (m) :  4.300E+1
Maximum Draft        (m) :  1.555E+1
Displacement       (m^3) :  1.343E+5
Wetted Surface Area (m^2) :  1.572E+4
LCB (from origin)    (m) :  6.250E+0
TCB (from origin)    (m) :  0.000E+0
VCB (from origin)    (m) :  -7.307E+0

Waterplane Area    (m^2) :  9.762E+3
LCF (from origin)    (m) :  -2.538E+0
Metacentric height   (m) :  8.895E+0

Mass                (kg) :  1.344E+8
Mass/density       (m^3) :  1.311E+5
LCG (from origin)    (m) :  6.648E+0
TCG (from origin)    (m) :  0.000E+0
VCG (from origin)    (m) :  -5.929E+0
Radii of Gyration    (m) :  1.505E+1 (roll)
  (about CG)         (m) :  6.210E+1 (pitch)
                     (m) :  6.210E+1 (yaw)

STEADY FORCE AND RESPONSE

Ship Speed        (m/s) :  7.562E+0
Ship Speed       (knots) :  1.468E+1
Wetted Surface Area (m^2) :  1.572E+4
Rw                 (kN) :  3.008E+2
Cw                      :  6.529E-4
Sinkage              (m) :  -5.381E-1
Trim at CG         (deg) :  7.133E-2
```

ΣΧΗΜΑ 22: ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΟ ΑΡΧΕΙΟ ΕΞΟΔΟΥ (.out) SWAN 2 ΓΙΑ ΥΠΟ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΛΟΙΟ

3 ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ

3.1 ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΡΥΜΟΥΛΚΗΣΗΣ ΣΕ ΗΡΕΜΟ ΝΕΡΟ ΧΩΡΙΣ ΑΝΕΜΟ

3.1.1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Ένα από τα σημαντικότερα αντικείμενα που καλείται να μελετήσει ένας ναυπηγός μηχανικός είναι αυτό της αντίστασης. Μέσω αυτής μπορεί να προβλεφθεί και κατ' επέκταση να βελτιστοποιηθεί η υδροδυναμική απόδοση του πλοίου, άρα και η κατανάλωση καυσίμου. Ως εκ τούτου αποτελεί ένα θέμα ειδικού οικονομικού, αλλά και περιβαλλοντικού ενδιαφέροντος.

Το υπό ανάλυση πλοίο είναι τύπου bulk carrier, οπότε λόγω των «χαμηλών» αριθμών Fr είναι (υδροδυναμικά) πλοίο εκτοπίσματος. Λόγω του ότι είναι ημιβυθισμένο, τα ύφαλά του βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, ενώ τα έξαλα και οι υπερκατασκευές- υπερστεγάσματα είναι εκτεθειμένα στον αέρα. Το πλοίο, λοιπόν, αλληλεπιδρά και με τα δύο αυτά ρευστά. Παρόλα αυτά η επίδραση του νερού σε αυτού του είδους το πλοίο (εκτοπίσματος) είναι πολύ μεγαλύτερη και η όλη ανάλυση που ακολουθεί βασίζεται σε αυτή, ενώ η αλληλεπίδραση με τον αέρα (σαν αέρα και άνεμο) λαμβάνεται σαν προσαύξηση.

Σε κάθε σημείο της γάστρας ασκείται από το περιβάλλον ρευστό[70] μιας στοιχειώδης δύναμη, η οποία μπορεί να αναλυθεί σε δυο συνιστώσες. Σε αυτήν που είναι κάθετη στην εκάστοτε στοιχειώδη επιφάνεια, που οφείλεται στην πίεση και σε αυτήν που είναι εφαπτόμενη και οφείλεται στη συνεκτικότητα του ρευστού. Η αντίσταση του πλοίου είναι η προβολή κατά τη διεύθυνση κίνησης του πλοίου των στοιχειωδών αυτών δυνάμεων στην επιφάνεια της γάστρας. Ως εκ τούτου, η αντίσταση έχει δυο βασικές συνιστώσες: Την αντίσταση τριβής και την αντίσταση πίεσης.

- Αντίσταση τριβής: είναι η συνιστώσα της αντίστασης που παράγεται με ολοκλήρωση στην επιφάνεια της γάστρας των εφαπτομενικών τάσεων (τάσεις συνεκτικότητας) και προβολή κατά τη διεύθυνση της κίνησης του πλοίου.
- Αντίσταση πίεσης: είναι η συνιστώσα της αντίστασης που παράγεται με ολοκλήρωση στην επιφάνεια της γάστρας των κάθετων τάσεων (πιέσεις) και προβολή κατά τη διεύθυνση της κίνησης του πλοίου.

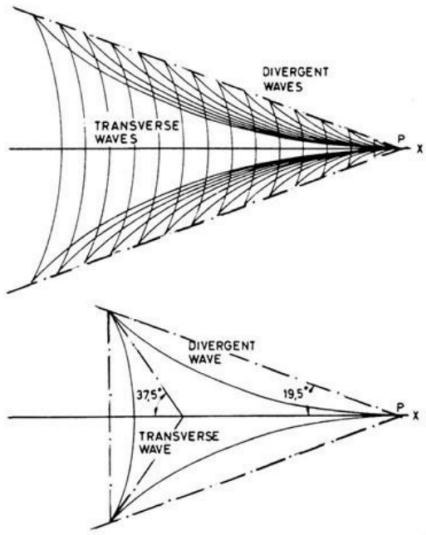
Αν το περιρρέον ρευστό ήταν ιδανικό (μη συνεκτικό) τότε η αντίσταση τριβής θα ήταν μηδενική. Επιπροσθέτως, όπως έχει αποδειχθεί και η αντίσταση πίεσης για τυχαία γεωμετρία σώματος είναι μηδενικής (παράδοξο D' Alembert). Ως εκ τούτου για ιδανικό ρευστό η συνολική αντίσταση είναι μηδενική. Κάτι τέτοιο, όμως, είναι ιδεατό μιας και τόσο το νερό, όσο και ο αέρας είναι συνεκτικά ρευστά.

Η ύπαρξη του οριακού στρώματος, όπως και επακόλουθα αυτού, όπως η αποκόλληση ροής, αλλά και ο δρόμος δινών επιδρούν στη ροή του περιρρέοντος ρευστού, με στένωση της κατά σημεία. Ως εκ τούτου, λόγω θεωρήματος Bernoulli μεταβάλλεται το πεδίο πιέσεων του περιβάλλοντος ρευστού, εν συγκρίσει με αυτή του ιδανικού ρευστού. Κάτι τέτοιο, οδηγεί στην ανάπτυξη μιας ακόμη, συνιστώσας της αντίστασης πίεσης, που οφείλεται στη συνεκτικότητα, γνωστής ως αντίσταση πίεσης λόγω συνεκτικότητας. Κατά συνέπεια, η αντίσταση τριβής ($C^{71}{}_{F_cb}$) και η αντίστασης πίεσης λόγω συνεκτικότητας (C_{VP}) αποτελούν την αντίσταση συνεκτικότητας (C_V). Δηλαδή: $C_{VP} + C_{F_cb} = C_V$

[70] Αφορά την αλληλεπίδραση με το νερό. Παρόλα αυτά, κάτι αντίστοιχο ισχύει και με την αλληλεπίδραση με τον αέρα. Γενικώς, κάθε αναφορά στον όρο ρευστό υπονοεί το νερό, όπως έχει επισημανθεί.

[71] Σημειώνεται ότι το C συμβολίζει το συντελεστή αντίστασης (αδιάστατος) και κατ' ουσίαν συσχετίζει το μέγεθος της αντίστασης με την ανηγμένη σε όλη τη βρεχόμενη επιφάνεια της γάστρας δυναμική πίεση του περιρρέοντος ρευστού.

Παράλληλα, η παρουσία της ελεύθερης επιφάνειας προσθέτει μια ακόμη συνιστώσα. Την αντίσταση κυματισμού (C_W). Η εν λόγω αντίσταση σχετίζεται με τη δημιουργία κύματος που οφείλεται στην ενέργεια που διοχετεύεται συνεχώς από το πλοίο στο νερό κατά την πλεύση του και είναι κυρίαρχα αντίσταση πίεσης. Πιο συγκεκριμένα, η γάστρα προκαλεί μετατόπιση της ελεύθερης επιφάνειας, ασκώντας της πιέσεις. Τα μόρια του νερού στην εν λόγω περιοχή αντιδρούν σε αυτή τη μετατόπιση λόγω βαρύτητας και προσπαθούν να επανέλθουν στην αρχική τους θέση. Έτσι, παράγονται κυματισμοί. Οι εν λόγω κυματισμοί δημιουργούν ένα τρισδιάστατο σύστημα που για σχετικά μεγάλα βάθη[72] έχει τη μορφή που περιέγραψε ο Kelvin (με εγκάρσιους και αποκλίνοντες κυματισμούς που περιορίζονται μεταξύ δύο ευθειών που σχηματίζουν γωνία 19.5^o μεταξύ τους), κάτι που παρουσιάζεται στο κάτωθι σχήμα.



4.3.6. Crests of a Kelvin wave group caused by a traveling disturbance at *P*.

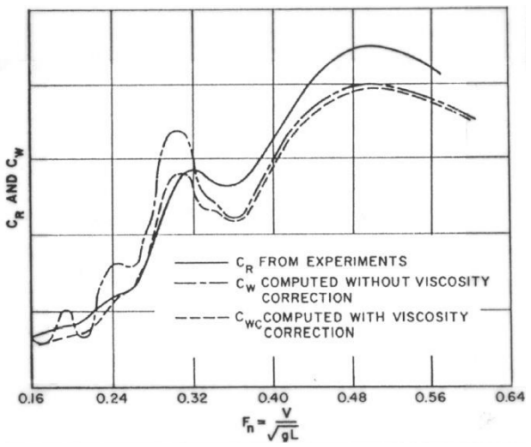
ΣΧΗΜΑ 23: ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΣ KELVIN (ΣΕ ΒΑΘΥ ΝΕΡΟ)

Επισημαίνεται ότι η wave-making resistance επηρεάζεται έντονα από την αλληλεπίδραση των τεσσάρων κυρίων συστημάτων κυματισμών, τα οποία δημιουργούνται:

- στην πλώρη, ξεκινώντας με μια κορυφή,
- στο μπροστινό κυρίως τμήμα, ξεκινώντας με μια κοιλάδα,
- στο πίσω κυρίως τμήμα, ξεκινώντας με μια κοιλάδα,
- στην πρύμνη ξεκινώντας με μια κορυφή.

Σε αυτό το σημείο κρίνεται αναγκαία η αναφορά στο εάν κατά τον προσδιορισμό του συντελεστή αντίστασης κυματισμού (C_W) λαμβάνεται υπ' όψιν η συνεκτικότητα του περιβάλλοντος νερού. Παρατηρώντας το σχήμα που παρατίθεται παρακάτω, γίνεται αντιληπτό ότι για Fr κοντά στο 0.15, όπως του υπό ανάλυση bulk carrier, η επίδραση της συνεκτικότητας είναι αμελητέα στο C_w, ως εκ τούτου δύναται να αγνοηθεί, προκειμένου να γίνουν και ευκολότεροι και απλούστεροι οι υπολογισμοί για την περιβάλλουσα ροή. Κάτι τέτοιο συμβαίνει και με το πρόγραμμα Swan 2.

[72] Μείωση του βάθους εκτός των άλλων επιδρά και σε μεταβολή της μορφής των κυματισμών που παράγει το πλοίο κατά την πλεύση του, μιας και το σύστημά τους δεν ακολουθεί τη μορφή που περιέγραψε ο Kelvin.



ΣΧΗΜΑ 24: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΕ ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΠΡΟΒΛΕΨΕΙΣ ΤΟΥ C_W

Μάλιστα, στο παραπάνω σχήμα παρατίθεται και καμπύλη με το συντελεστή C_R, οπότε δύναται να συγκριθεί με το C_W.

Οι προαναφερθείσες συνιστώσες της αντίστασης είναι οι πρωτεύουσες. Εκτός αυτών υπάρχουν και οι δευτερεύουσες. Μερικές εξ αυτών είναι οι εξής:

- Αντίσταση θραύσεως κύματος[73], αφρού[74]
- Αντίσταση παρελκομένων
- Αντίσταση αέρα
- Πρόσθετη αντίσταση λόγω στροφής
- Επαγόμενη αντίσταση[75]

Σημειώνεται ότι σαν αντίσταση κυματισμού από εδώ και στο εξής λογίζεται αυτή η συνιστώσα που οφείλεται τόσο στο σχηματισμό κυματισμών, όσο και στη θραύση κύματος πρώρας.

Ως εκ τούτου η συνολική αντίσταση (C_T) απαρτίζεται κυρίως από την αντίσταση κυματισμού, την αντίσταση συνεκτικότητας, αλλά και τις δευτερεύουσες συνιστώσες.

Καθίσταται αναγκαίο να σημειωθεί ότι οι δυο σημαντικές αδιάστατες παράμετροι στην αντίσταση πλοίου είναι ο:

- Αριθμός Reynolds ($\mathrm{Re} = \mathrm{VL_{WL}}/\nu$)[76], που από φυσικής άποψης σχετίζεται με τις επιδράσεις της συνεκτικότητας,
- Αριθμός Froude ($\mathrm{Fr} = \mathrm{V}/\sqrt{\mathrm{gL_{WL}}}$), που από φυσικής άποψης σχετίζεται με τη δημιουργία σχηματισμών (εξ ου και σχέση με τη βαρύτητα).

[73] Σχετίζεται με το σπάσιμο των κυμάτων στην πλώρη, κάτι που είναι πιο σύνηθες στα πιο αργόπλοα πλοία, όπως τα bulk carriers. Το φαινόμενο του σπασίμου του κύματος πλώρης, αποτελεί και το βασικό λόγο που τα αργόπλοα πλοία φέρουν πρωραίο βολβό, προκειμένου να μειωθεί η αντίστοιχη αντίσταση (που μπορεί να ανέρχεται έως και 15% της συνολικής αντίστασης κατά τους Larsson & Raven).

[74] Η αντίσταση αφρού εμφανίζεται για μεγάλους αριθμούς Fr.

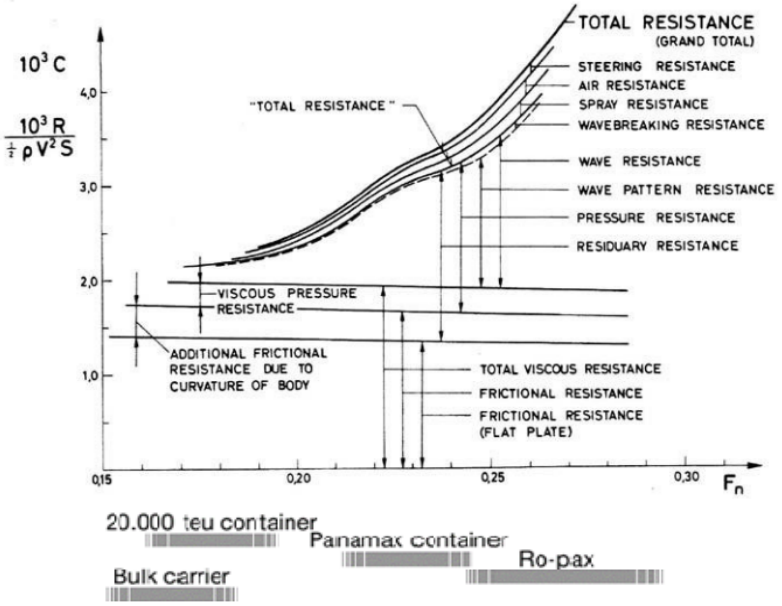
[75] Σχετίζεται με τη δυναμική διαγωγή που αποκτά το πλοίο κατά την πλεύση του. Στα πλοία εκτοπίσματος δεν είναι τόσο σημαντική, όσο στα ταχύπλοα.

[76] Σημειώνεται ότι οι υιοθετούνται οι συμβολισμοί της βιβλιογραφίας, που είναι και διεθνώς καθιερωμένοι, κάτι που καθιστά την περεταίρω επεξήγηση άσκοπη.

Επισημαίνεται ότι η έως τώρα ανάλυση αφορά την αντίσταση ρυμούλκησης, η οποία πρέπει να ισούται με μια ιδεατή δύναμη που απαιτείται για να ρυμουλκηθεί το πλοίο σε μια ταχύτητα, σε ήρεμο νερό. Στην εν λόγω περίπτωση θεωρείται ότι το πλοίο δεν είναι αυτοπροωθούμενο, μιας και η έλικα δε βρίσκεται σε λειτουργία[77]. Μάλιστα, θεωρείται ότι δεν φέρει έλικα. Όπως θα φανεί παρακάτω, στόχος μας είναι ο υπολογισμός της αντίστασης πρόωσης, η οποία αφορά αυτοπροωθούμενο πλοίο (με έλικα σε λειτουργία).

Η αντίσταση τριβής αναλύεται, επίσης, σε δυο συνιστώσες: Στην αντίσταση τριβής επίπεδης πλάκας (C_{F_fp}) και στην πρόσθετη αντίσταση τριβής λόγω καμπυλότητας ($C_{F_fp\rightarrow cb}$). Η πρώτη μπορεί να προσδιοριστεί σχετικά απλά με διάφορους τρόπους. Έχει καθιερωθεί να υπολογίζεται βάσει της σχέσης που υιοθέτησε η ITTC το 1957, κατά την οποία: $C_F = \frac{0.075}{(\log Re-2)^2}$, όπου από εδώ και στο εξής με C_F θα συμβολίζεται η συνιστώσα C_{F_fp}. Όπως γίνεται λογικό κατά τον υπολογισμό της αντίστασης τριβής επίπεδης πλάκας ναι μεν ο αριθμός Re, που είναι η μοναδική παράμετρος, λαμβάνεται ίσος με αυτόν του υπό ανάλυση πλοίου, παρόλ' αυτά αγνοείται η καμπυλότητα της γάστρας. Εισάγονται, λοιπόν, δυο ακόμη μεγέθη: Η αντίσταση μορφής (C_{FORM}), που ισούται με τη διαφορά της αντίστασης συνεκτικότητας από την αντίσταση τριβής επίπεδης πλάκας. Και η υπόλοιπη αντίσταση (C_R), που ισούται με τη διαφορά της συνολικής (μη λαμβάνοντας υπ' όψιν τις δευτερεύουσες συνιστώσες της αντίστασης (βλ. παραπάνω)) από την αντίσταση τριβής επίπεδης πλάκας.

Παρακάτω παρατίθεται σχήμα, όπου επεξηγείται ο καταμερισμός της αντίστασης, τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά συναρτήσει του αριθμού Fr.



ΣΧΗΜΑ 25: ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ ΑΝΙΣΤΑΣΗΣ ΥΠΟ ΜΟΡΦΗ ΑΔΙΑΣΤΑΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ C ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ FROUDE (HARVALD)

Τρεις είναι οι σημερινές μέθοδοι προσδιορισμού της αντίστασης ενός πλοίου: δοκιμές επί προτύπου, εμπειρικές, θεωρητικές (αριθμητικές) μέθοδοι. Στην παρούσα ανάλυση δεν θα γίνει καμιά αναφορά στις τελευταίες, μιας και κάτι τέτοιο ξεφεύγει από τα όρια της εργασίας.

[77] Στην ανάλυση που θα γίνει παρακάτω θεωρείται ότι παρόλο που το πλοίο δεν είναι αυτοπροωθούμενο φέρει παρελκόμενα.

Ένα σημαντικό ζήτημα που τίθεται είναι το κατά πόσον οι προαναφερθείσες συνιστώσες είναι μετρήσιμες. Δεν είναι τυχαίο ότι προκειμένου να φτάσουμε στην εν λόγω ανάλυση ελήφθη υπ' όψιν η παράμετρος της μετρησιμότητας. Στόχος οποιασδήποτε μεθόδου είτε εμπειρικής είτε πειράματος σε κλίμακα είναι η εύρεση της συνολικής αντίστασης του πραγματικού πλοίου. Ως εκ τούτου κρίνεται καίρια η αναγωγή των επιμέρους συνιστωσών της αντίστασης στη συνολική. Όπως, είναι γνωστό, αλλά και θα φανεί και παρακάτω ακόμη περισσότερο, η αντίσταση εξαρτάται από την ταχύτητα, τις φυσικές παραμέτρους (σταθερές[78]) του περιβάλλοντος ρευστού, αλλά κυρίως[79] από τη γεωμετρία της βρεχόμενης γάστρας[80]. Κατά συνέπεια, οι συντελεστές της αντίστασης, όπως υιοθετείται από οποιαδήποτε πηγή της βιβλιογραφίας, και προκύπτει μέσω διαστατικής ανάλυσης (θεώρημα Π Buckingham) εξαρτώνται από δυο αδιάστατες παραμέτρους. Τους αριθμούς Re, Fr (βλ. παραπάνω για ορισμούς). Τα πειράματα με μοντέλα, που αποτελούν εκτός των άλλων και τη βάση των συστηματικών σειρών, πραγματοποιούνται σε δεξαμενές περιορισμένων διαστάσεων (ως εκ τούτου και τα μοντέλα είναι περιορισμένων διαστάσεων). Όπως αποδεικνύεται στη βιβλιογραφία (βλ. Αντίσταση-Πρόωση Πολίτη) δεν μπορεί να υπάρξει ταυτόχρονη ισότητα αριθμών Fr, Re, παρά μόνο σε φυσική κλίμακα, ως εκ τούτου δε μπορεί να υπάρξει πλήρης ομοιότητα μεταξύ πραγματικού πλοίου και μοντέλου. Συνήθως λαμβάνεται ισότητα των Fr, προκειμένου να παρουσιάζεται μεταξύ φυσικής και πειραματικής κλίμακας ίδια συμπεριφορά δημιουργούντος κύματος, ενώ υπάρχει διαφορά των Re[81], για την οποία πραγματοποιείται διόρθωση, μέσω του συντελεστή συσχέτισης (C_A), αλλά και χρήσης διεγερτών τύρβης. Στα πειράματα (ρυμούλκησης), λοιπόν, πραγματοποιείται υπολογισμός της συνολικής αντίστασης του προτύπου, ενώ με χρήση της σχέσης της ITTC 57 υπολογίζεται η C_F. Επομένως, προκύπτει η υπόλοιπη αντίσταση του προτύπου. Αυτό είναι και το κρίσιμο σημείο, καθώς μέσω αυτής της συνιστώσας πραγματοποιείται η αναγωγή από κλίμακα μοντέλου σε φυσική κλίμακα. Υπάρχουν διάφορες θεωρίες που έχουν αναπτυχθεί. Μερικές εξ αυτών, ίσως και οι σημαντικότερες, είναι του: Froude, Hughes.

Ο Froude υπέθεσε ότι η υπόλοιπη αντίσταση εξαρτάται αποκλειστικά από τον αριθμό Fr, και καθόλου από το Re. Κατά συνέπεια, η υπόλοιπη αντίσταση εκφυλίζεται σε αντίσταση κυματισμού. Έτσι, η αναγωγή σε φυσική κλίμακα πραγματοποιείται με ισότητα Fr, άρα με ισότητα C_R.

Ο Hughes, αντίθετα, δεν αγνόησε την ύπαρξη της αντίστασης πίεσης λόγω συνεκτικότητας. Θεώρησε ότι: $C_R(Re, Fr) = C_{FORM}(Re) + C_W(Fr)$ και εισήγαγε το λόγο k (συντελεστής μορφής), που προέκυψε από μεγάλο αριθμό πειραμάτων που πραγματοποίησε προκειμένου να υπολογίσει το συντελεστή αντίστασης μορφής ($C_{FORM}(Re)$). Έτσι, $k = C_{FORM}(Re)/C_F(Re)$, με το k να θεωρείται σταθερό και ανεξάρτητο του αριθμού Re για δεδομένη γάστρα. Επομένως, επάγεται ότι: $C_T(Re, Fr) = (k + 1)C_F(Re) + C_W(Fr)$. Οπότε, η αναγωγή σε φυσική κλίμακα πραγματοποιείται με ισότητα Fr, άρα με ισότητα C_W.

Όπως γίνεται κατανοητό η μέθοδος Hughes είναι μια γενίκευση της μεθόδου Froude, μιας και αν $k = 0$, τότε η πρώτη εκφυλίζεται στη δεύτερη.

Παρακάτω παρατίθεται διάγραμμα (από Harvald) της τιμής του συντελεστή (1+k), με παράμετρο το συντελεστή λυγηρότητας ($L/\nabla^{1/3}$) και συναρτήσει του συντελεστή γάστρας C_B. Επισημαίνεται ότι το εν

[78] Συνεκτικότητα, πυκνότητα.

[79] Δεν είναι τυχαίο ότι οι καμπύλες αντίστασης ρυμούλκησης- ταχύτητας πλοίου, που προκύπτουν εν τέλει χαρακτηρίζονται ως ταυτότητα του πλοίου, λόγω της εξάρτησής τους από τη γεωμετρία της γάστρας.

[80] Προφανώς και από την κατάσταση της γάστρας, όπως την τραχύτητα, που με τη σειρά της συνδέεται και με τη γεωμετρία, μιας και διαταράσσει τις δυναμικές ροές του περιβάλλοντος ρευστού.

[81] Σε φυσική κλίμακα Re της τάξης 10^8 και για το μοντέλο της τάξης 10^6. Διαφορετικά Re συνεπάγεται διαφορετικό οριακό στρώμα. Μάλιστα, το πραγματικό πλοίο βρίσκεται σε υπερκρίσιμη περιοχή (τυρβώδης ροή), ενώ το πρότυπο ναι μεν επίσης στην υπερκρίσιμη περιοχή, αλλά πολύ κοντά στην κρίσιμη (περιοχή μετάβασης από στρωτή σε τυρβώδη ροή, για $Re=10^5 \div 10^6$).

λόγω διάγραμμα είναι εμπειρικό και βασίζεται σε παλιές μορφές γάστρας και ως εκ τούτου δεν αποτελεί και τόσο αξιόπιστη πηγή. Παρόλα αυτά είναι μια καλή προσέγγιση για αρχική τιμή (σε περίπτωση επαναληπτικής διαδικασίας), ελλείψει στοιχείων από model tests. Βάσει των ανωτέρω και δεδομένου ότι το υπό ανάλυση bulk- carrier είναι σύγχρονης σχεδίασης, μέσω του εν λόγω διάγραμμα υπερεκτιμάται εν τέλει η αντίσταση.

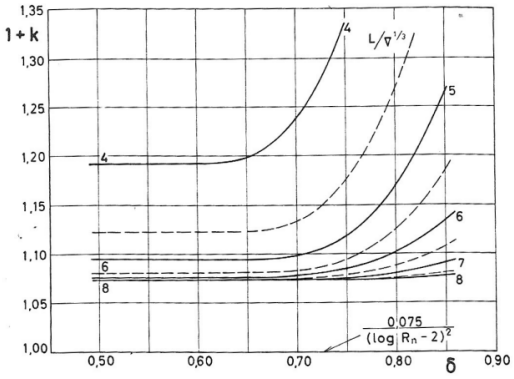


Figure 5.2.6. The $1 + k$ variation with δ and $L/\nabla^{1/3}$.

ΣΧΗΜΑ 26: ΤΥΠΙΚΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΟΥ ΜΟΡΦΗΣ FROUDE (ΚΑΤΑ HARVALD)

Παραπάνω δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στις πειραματικές μεθόδους πρόβλεψης της αντίστασης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ακόμη και σήμερα παρά την πρόοδο των υπολογιστικών μεθόδων είναι αναγκαία η διεξαγωγή πειραμάτων μοντέλων , όταν πρόκειται για μεγάλα εμπορικά πλοία (όπως το υπό ανάλυση στην παρούσα εργασία), λόγω της αξιοπιστίας που παρέχουν. Αξιοπιστία που είναι απαραίτητη, γιατί μια υπερεκτίμηση της πρόβλεψης της αντίστασης οδηγεί σε αύξηση του κόστους για το ναυπηγείο, ενώ μια υποεκτίμηση σε κίνδυνο μη ικανοποίησης των προδιαγραφών- απαιτήσεων του πλοιοκτήτη που αναγράφονται ρητά στα σχετικά συμβόλαια, κάτι που ενδέχεται να οδηγήσει ακόμη και σε μη παραλαβή του πλοίου.

Γίνεται, λοιπόν, από τα ανωτέρω, σαφής ο λόγος που επιβάλλει την ύπαρξη model tests. Μάλιστα, η αξιοπιστία τους αν πραγματοποιούνται ειδικά για το υπό ανάλυση πλοίο είναι μεγάλη, περιορίζοντας καθ΄ αυτό τον τρόπο τα όποια σφάλματα (είτε τυχαία είτε συστηματικά).

Ως γνωστόν, οι δοκιμές παραλαβής πραγματοποιούνται σε κατάσταση heavy ballast. Επομένως, χάρη στα model tests μπορεί να πραγματοποιηθεί πρόβλεψη της αντίστασης και για άλλες καταστάσεις φόρτωσης (όπως τη full load) για το μοντέλο και με κατάλληλη αναγωγή σε φυσική κλίμακα για το πραγματικό πλοίο. Τα sea trials πραγματοποιούνται κοντά στο χώρο του ναυπηγείου και φροντίζεται ώστε η επίδραση των ανέμων, του εξωγενούς κυματισμού, αλλά και του βάθους του πυθμένα (βλ. αντίστοιχες απαιτήσεις ISO-15016) να μην είναι τόσο σημαντική. Κατά συνέπεια, η αναγωγή στην ιδεατή (μη ρεαλιστική) κατάσταση ήρεμου νερού (χωρίς ρεύματα και κύματα), χωρίς άνεμο μπορεί να πραγματοποιηθεί χωρίς «σημαντικά» σφάλματα. Κάτι τέτοιο ενισχύεται από το γεγονός ότι το υπό ανάλυση πλοίο είναι πλοίο εκτοπίσματος (υδροδυναμικά), οπότε δεν είναι τόσο επιρρεπές σε μεταβολή της κινητικής του κατάστασης, λόγω εξωγενών συνθηκών (επηρεαζόμενων από τις προαναφερθείσες παραμέτρους) όσο τα ταχύπλοα. Κάτι τέτοιο περιορίζει, τουλάχιστον για τους σκοπούς της ανάλυσης που γίνεται στην παρούσα εργασία την αναγκαιότητα αξιοποίησης των αποτελεσμάτων προσομοίωσης, σε τούτη την φάση (στα operational data θα αξιοποιηθούν τα αποτελέσματα του προγράμματος FRANK ή και άλλων (περιγραφικών) μεθόδων[82], ελλείψει αποτελεσμάτων από seakeeping model tests για το υπό

[82] Kreitner, Liu- Papanikolaou, Stawave 2 (που αποτελεί και πρόταση της ITTC).

ανάλυση bulk- carrier), των εξωτερικών συνθηκών, κατά την πραγματοποίηση των model tests, η οποία αυξάνει ακόμη περισσότερο την αβεβαιότητα, άρα και το σφάλμα. Αβεβαιότητα, η οποία οφείλεται στην τυχαιότητα των πραγματικών ανέμων και κυματισμών.

Επισημαίνεται ότι τα model tests που πραγματοποιούνται δεν αφορούν μόνο πειράματα ρυμούλκησης, αλλά και πειράματα έλικας σε ελεύθερη ροή, και αυτοπροωθούμενου πλοίου. Ως εκ τούτου, όπως θα αναλυθεί εκτενέστερα και παρακάτω, δύναται να πραγματοποιηθεί η αναγωγή από αντίσταση ρυμούλκησης σε αντίσταση πρόωσης. Με αυτό τον τρόπο, καθίσταται ικανός ο υπολογισμός της απαιτούμενης από την έλικα ισχύος άξονα (SHP) προκειμένου να παραγάγει την κατάλληλη ώση που θα υπερνικήσει την αντίσταση, κινώντας το πλοίο σε μια «ορισμένη»[83] ταχύτητα.

Βάσει των ανωτέρω, μπορεί να προσδιοριστεί η καμπύλη απαιτούμενης ισχύος από την έλικα προκειμένου το πλοίο να κινείται σε μια «συγκεκριμένη» ταχύτητα, συναρτήσει της εν λόγω ταχύτητας, για διάφορες καταστάσεις φόρτωσης (εκτοπίσματα, βυθίσματα, διαγωγές), για καθαρή γάστρα, χωρίς προσαυξήσεις λόγω γήρανσης (βέλος κάμψης=>απώλεια ευθυγράμμισης άξονα), αλλά και για ήρεμο νερό, χωρίς ανέμους.

Επισημαίνεται ότι προτού πραγματοποιηθεί η αναγωγή από αντίσταση ρυμούλκησης σε αντίσταση πρόωσης κρίνεται επιβεβλημένη η διόρθωση της αντίστασης ρυμούλκησης. Το πείραμα ρυμούλκησης ενδέχεται, για παράδειγμα, να πραγματοποιείται για γυμνή γάστρα (χωρίς την παρουσία παρελκομένων[84]), ανάλογα με την πρακτική της εκάστοτε δεξαμενής (κάτι που γίνεται στην παρούσα εργασία με το Swan 2, και για αυτό το λόγο χρησιμοποιείται και η προσαύξηση 3% στην αντίσταση ρυμούλκησης λόγω παρελκομένων (βλ. παρακάτω αντίστοιχη υποενότητα)). Καθίσταται, λοιπόν, αναγκαίο να εξεταστεί η επίδραση των δευτερευουσών συνιστωσών της αντίστασης στη συνολική αντίσταση ρυμούλκησης σε calm water, χωρίς άνεμο. Μερικές εξ αυτών είναι:

- Αντίσταση αέρα
- Αντίσταση παρελκομένων
- Λοιπή αντίσταση (ρύπανση- τραχύτητα, γήρανση, πρόσθετη αντίσταση λόγω στροφής)

3.1.2 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί ο υπολογισμός της αντίστασης ρυμούλκησης σε ήρεμο νερό, χωρίς άνεμο, στην παρούσα εργασία ακολουθείται η μέθοδος του Hughes, οπότε ανάγεται σε προσδιορισμό της αντίστασης κυματισμού, αλλά και στου συντελεστή μορφής (k). Ελλείψει δεδομένων για τα model tests (ρυμούλκησης (ενδιαφέρει σε τούτη την ενότητα), αλλά και έλικας σε ελεύθερη ροή και αυτοπροωθούμενου πλοίου (τα δυο τελευταία αφορούν περισσότερο την ενότητα της Πρόωσης)) ο προσδιορισμός του συντελεστή αντίστασης κυματισμού (C_W) στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται με χρήση του προγράμματος **Swan2** (για το οποίο γίνεται αναλυτική αναφορά στην παρούσα έκθεση στην ενότητα της Περιγραφής του Πλοίου). Το εν λόγω πρόγραμμα εκ φύσεως προορίζεται περισσότερο για ταχύπλοα πλοία (αρκετά μεγαλύτερους αριθμούς Fr από το ≈0.15 που μας ενδιαφέρει για το υπό ανάλυση πλοίο), ενώ είναι και ιδιαίτερα «ευαίσθητο[85]» (σχετίζεται με τον περιορισμένο αριθμό Rankine

[83] Η χρήση των εισαγωγικών γίνεται λόγω συνεχών διακυμάνσεων της ταχύτητας κατά την πραγματική λειτουργία του πλοίου, οφειλόμενων σε συνεχή διαταραχή του πεδίου πιέσεων του περιβάλλοντος νερού.

[84] Σαν παρελκόμενα λογίζονται τα bilge keels, τα πηδάλια, οι άξονες, τα bossings, τα στηρίγματα των αξόνων, τα skegs, κτλ.

[85] Μικρή μεταβολή της γεωμετρίας των νομέων (αρχείου εισόδου .pln) ή και μικρή μεταβολή των παραμέτρων (πχ των Xnode, Ynode) που καθορίζουν τον τρόπο μοντελοποίησης ή και μελέτης της περιρρέουσας ροής (αρχείου εισόδου .inp) δύναται να επηρεάσει κατά πολύ μεγάλο βαθμό τα αποτελέσματα (αρχεία εξόδου .out, που

Panels που δύναται να διαχειριστεί το Swan 2, σε συνδυασμό με την παλαιότητα του ως πρόγραμμα), κάτι που αυξάνει τον κίνδυνο σφάλματος. Ως εκ τούτου, καλούμαστε προκειμένου να αξιολογήσουμε την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων του προγράμματος Swan 2 να ανάγουμε, έπειτα από τις προαναφερθείσες διορθώσεις, την αντίσταση ρυμούλκησης σε αντίσταση πρόωσης, άρα και ισχύ πρόωσης, προκειμένου να συγκριθεί με τις αντίστοιχες τιμές, (ήρεμο νερό, χωρίς άνεμο, με ίδια πυκνότητα, αλατότητα, σύσταση νερού, αέρα) για την εκάστοτε κατάσταση φόρτωσης, που αναγράφονται στο sea trials report, (λεπτομέρειες για την εν λόγω σύγκριση παρατίθενται παρακάτω (βλ. ενότητα Πρόωσης), ενώ ενδεικτικά αναφέρεται ότι: η απαίτηση είναι να επιτυγχάνονται στις επιλεχθείσες καταστάσεις (FL, BL) οι ίδιες στροφές (λόγω υδροδυναμικής, διαδικασίας σχεδίασης έλικας, αξονικού συστήματος και περιορισμών κατασκευαστών κύριων μηχανών), μεγαλύτερη (μέχρι 3-4%[86]) ή ίση SHP (με την αντίστοιχη που άγεται από το sea trials report), (λόγω απαίτησης για αποφυγή υποεκτίμησης κατά τις θεωρητικές εκτιμήσεις για το ναυπηγείο)). Παρόλα αυτά κάτι τέτοιο προϋποθέτει γνώση της συμπεριφοράς της έλικας σε ελεύθερη ροή, στοιχεία που, επίσης, δεν έχουμε. Προς τούτο, επιλέχθηκε έλικα τύπου Wageningen-B με παραπλήσια γεωμετρικά χαρακτηριστικά (βλ. αναλυτικά παρακάτω) με του υπό ανάλυση πλοίου. Κάτι τέτοιο, όμως, αυξάνει κατά πολύ την αβεβαιότητα, άρα και την πιθανότητα σφάλματος. Κατά συνέπεια, υπάρχει σοβαρός κίνδυνος η προκύπτουσα αντίσταση πρόωσης να μην ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα. Μια λύση είναι να πραγματοποιήσουμε reversible engineering, δηλαδή βάσει των στοιχείων του sea trials report να αχθεί κάποια EHP[87] και να

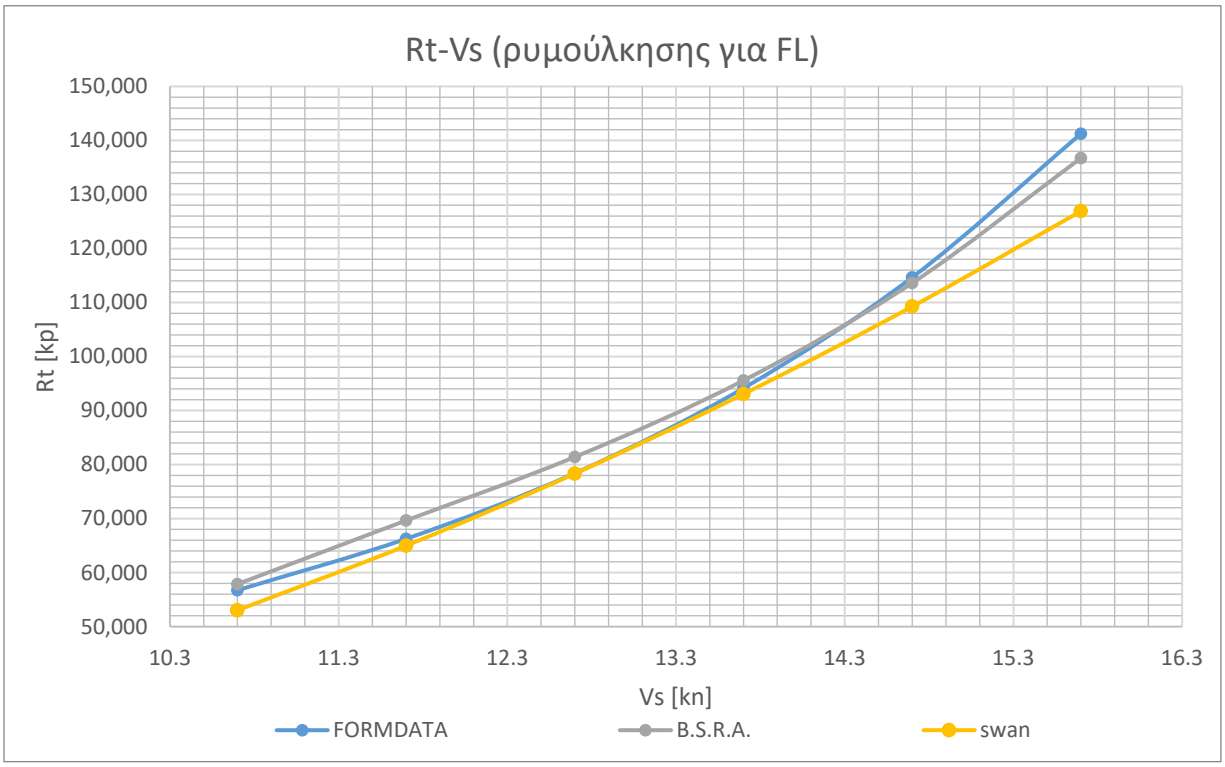
ενδιαφέρουν στην παρούσα εργασία). Οπότε, μια κατάσταση ευσταθούς ισορροπίας, λόγω της ιδιομορφίας του προγράμματος, μπορεί να μετατρέπεται σε ασταθούς ισορροπίας.

[86] Το περιθώριο αυτό είναι σχετικά μεγάλο, παρόλα αυτά στην FL δεν έχουν πραγματοποιηθεί θαλάσσιες δοκιμές και όποια στοιχεία υπάρχουν είναι από τα model tests, που πραγματοποίησε το ναυπηγείο. Ακόμη, τις καμπύλες από τα πειράματα σε μοντέλο τα προμηθευτήκαμε για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας από το sea trials report, ελλείψει model tests report. Ως εκ τούτου, δεν είναι γνωστή η διαδικασία που ακολούθησε το ναυπηγείο κατά την πραγματοποίησή των model tests, άρα δεν δύναται να αξιολογηθεί η αξιοπιστία τους. Ως εκ τούτου, τίθεται το «υπερβολικό» όριο του 3-4%. Στη BL δεν είναι τόσο έντονο το πρόβλημα, λόγω του ότι είναι κοντινή κατάσταση με τη heavy ballast, στην οποία πραγματοποιήθηκαν οι θαλάσσιες δοκιμές, υπό την επίβλεψη εποπτικών αρχών (νηογνώμονα) και εκπροσώπων της πλοιοκτήτριας εταιρείας.

[87] Σύμφωνα με αυτή την αντίστροφη διαδικασία ισχύει ότι: Το μοναδικό στοιχείο που συσχετίζει τους συντελεστές αλληλεπίδρασης (t, w, η_R) και το βαθμό απόδοσης έλικας σε ελεύθερη ροή (η_0) με το υπό ανάλυση bulk- carrier είναι κάποιοι πίνακες που παρατίθενται στο sea trials report και δίνουν μόνο (και τίποτα άλλο) το βαθμό απόδοσης έλικας- πλοίου η_D. Σύμφωνα με αυτά, η_D =0.6935 για τη heavy ballast condition των sea trials και για την ταχύτητα υπηρεσίας (14.7kn). Θεωρώντας το βαθμό απόδοσης του αξονικού συστήματος που αναφέρει το ναυπηγείο (0.995), προκύπτει: PC=0.69+. Ως γνωστόν, PC=$\eta_H\eta_0\eta_R\eta_s$ (βλ. ενότητα Πρόωσης για επεξήγηση). Σε αυτή τη φάση, δύναται να πραγματοποιηθεί προεκτίμηση των εν λόγω συντελεστών (για τις FL, BL(και θεωρηθεί κοντινή στη heavy ballast των sea trials)), βάσει εμπειρικών σχέσεων (για τους t, w, η_R). Πιο συγκεκριμένα, το w μπορεί να εκτιμηθεί ως η μέση τιμή των εμπειρικών σχέσεων: w=0.75C_B-0.24(Kruger), w=0.7C_P-0.18(Hecksher), w=0.25+2.5(C_B-0.6)^2 (Troost). Το t μπορεί να εκτιμηθεί ως η μέση τιμή των εμπειρικών σχέσεων: t = w(1.57 -2.3C_B/C_{WL}+1.5C_B) (S.S.P.A.), t = 0.5C_P - 0.12(Hecksher), t = 0.5C_B - 0.15(Danckwardt). Το η_R μπορεί να εκτιμηθεί κατά Holtrop-Mennen 1978: $\eta_R = 0.9922 - 0.05908\frac{A_E}{A_0} + 0.07424(C_p - 0.0225lcb)$, με lcb=LCB-$L_{BP}$/2 (δηλαδή ως προς το μέσο νομέα), $\frac{A_E}{A_0} = 0.55$. Ως εκ τούτου, προκύπτει: w=0.3918 (FL), w=0.3172 (BL), t=0.2679 (FL), t=0.2360 (BL), η_R=1.0094 (FL), η_R=1.0081 (BL). Οπότε, η_H=1.2038 (FL), η_H= 1.1190(BL). Επισημαίνεται, ότι αυτές οι τιμές των εν λόγω συντελεστών είναι προεκτιμήσεις, βασιζόμενες σε παλιές, παρωχημένες εμπειρικές σχέσεις και παρατίθενται ενδεικτικά μόνο για τους σκοπούς της ανάλυσης της αντίστροφης διαδικασίας, που εν τέλει θα αγνοηθεί (τόσο εκείνη, όσο και οι εν λόγω τιμές των συντελεστών) κατά τους υπολογισμούς. Ακόμη, θεωρώντας ότι το σημείο σχεδίασης της έλικας είναι πιο κοντά στην FL, σε σχέση με τη BL (ως γίνεται συνήθως), το βέλτιστο σημείο λειτουργίας της έλικας είναι πιο κοντά (ίσως και να ταυτίζεται) με της FL, οπότε κανονικά στην FL ο β.α. η_0 αναμένεται μεγαλύτερος από ό,τι στη BL. Παρόλα αυτά, σε αυτή την ανάλυση λογίζονται ως ίσοι, για λόγους σιγουριάς. Βάσει, λοιπόν, των προαναφερθέντων αναμένεται για την FL να ισχύει: PC≈73%÷74% (που για καλοσχεδιασμένο νεότευκτο συνήθως

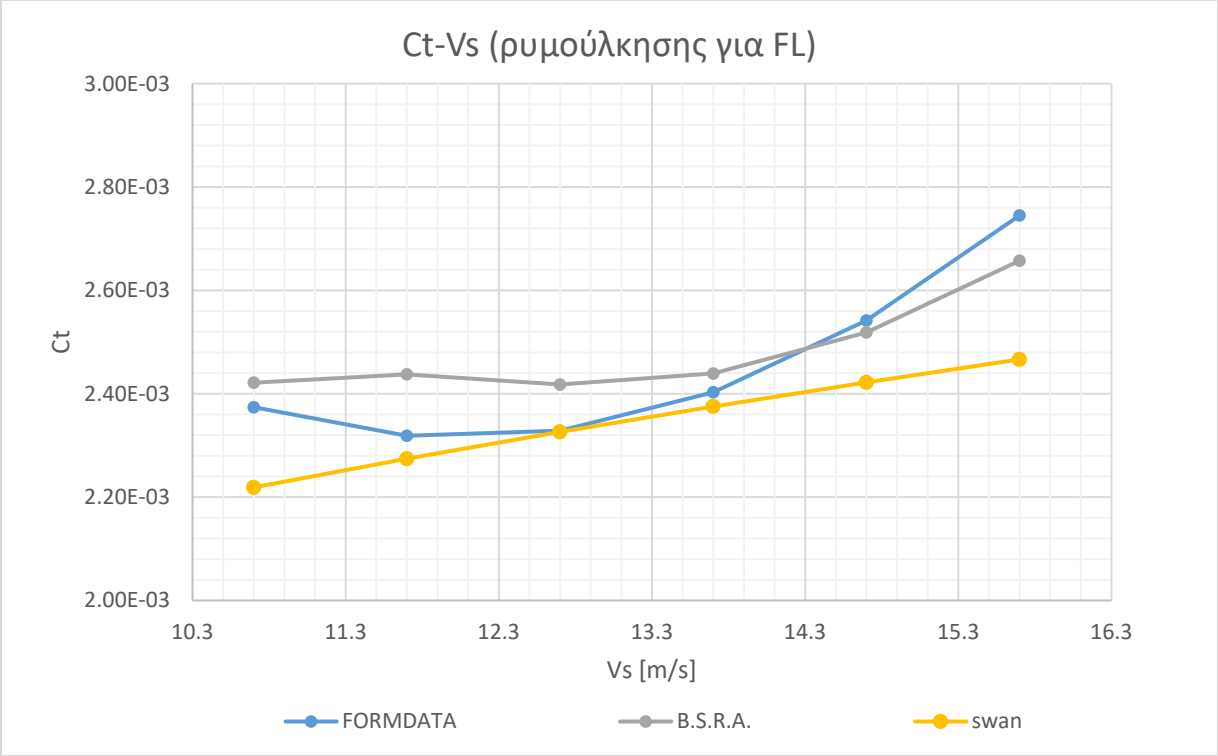
γίνει ποιοτική σύγκριση (δηλαδή κατά πόσον τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το Swan2 ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα και δεν είναι «ουτοπικά»). Κάτι τέτοιο, όμως είναι ριψοκίνδυνο, λόγω αυξημένης αβεβαιότητας. Μια άλλη λύση είναι η εκτίμηση για το υπό ανάλυση πλοίο στις διάφορες καταστάσεις φόρτωσης (ειδικά στην FL, λόγω μεγαλύτερης αβεβαιότητας, έστω και ενδεικτικά) της ζητούμενης αντίστασης ρυμούλκησης με χρήση συστηματικών σειρών. Μερικές εξ αυτών είναι η Formdata, η BSRA (η οποία χρησιμοποιείται και στο δοθέν sea trials report για διορθώσεις), αλλά και η Lap-Keller (η οποία δε λαμβάνει υπ' όψιν κατά τους υπολογισμούς την ύπαρξη του πρωραίου βολβού, γεγονός που την καθιστά λιγότερο αξιόπιστη από τις άλλες δυο προαναφερθείσες μεθόδους). Κάτι τέτοιο, επίσης, αποσκοπεί στην ποιοτική σύγκριση και όχι στην ποσοτική (βλ. και παραπάνω).

Παρακάτω παρατίθενται ενδεικτικά (δίνεται έμφαση στην FL) διαγράμματα με την αντίσταση και το συντελεστή ρυμούλκησης συναρτήσει της ταχύτητας για το υπό ανάλυση bulk- carrier κατά Formdata, BSRA, αλλά και κατά τη διαδικασία που ακολουθήθηκε στην παρούσα εργασία και περιγράφεται και παραπάνω (Swan 2, Hughes, προτεινόμενη διαδικασία ITTC). Επισημαίνεται ότι ο υπολογισμός βάσει του Swan 2 πραγματοποιήθηκε κυρίως για την ταχύτητα υπηρεσίας. Όσον αφορά τις υπόλοιπες ταχύτητες, είτε θεωρώντας (κατά sea trials report) $P=cV^{3.276}$, είτε τρέχοντας το Swan 2 δεν υπάρχει απόκλιση.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 1: ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΡΥΜΟΥΛΚΗΣΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ (FL)

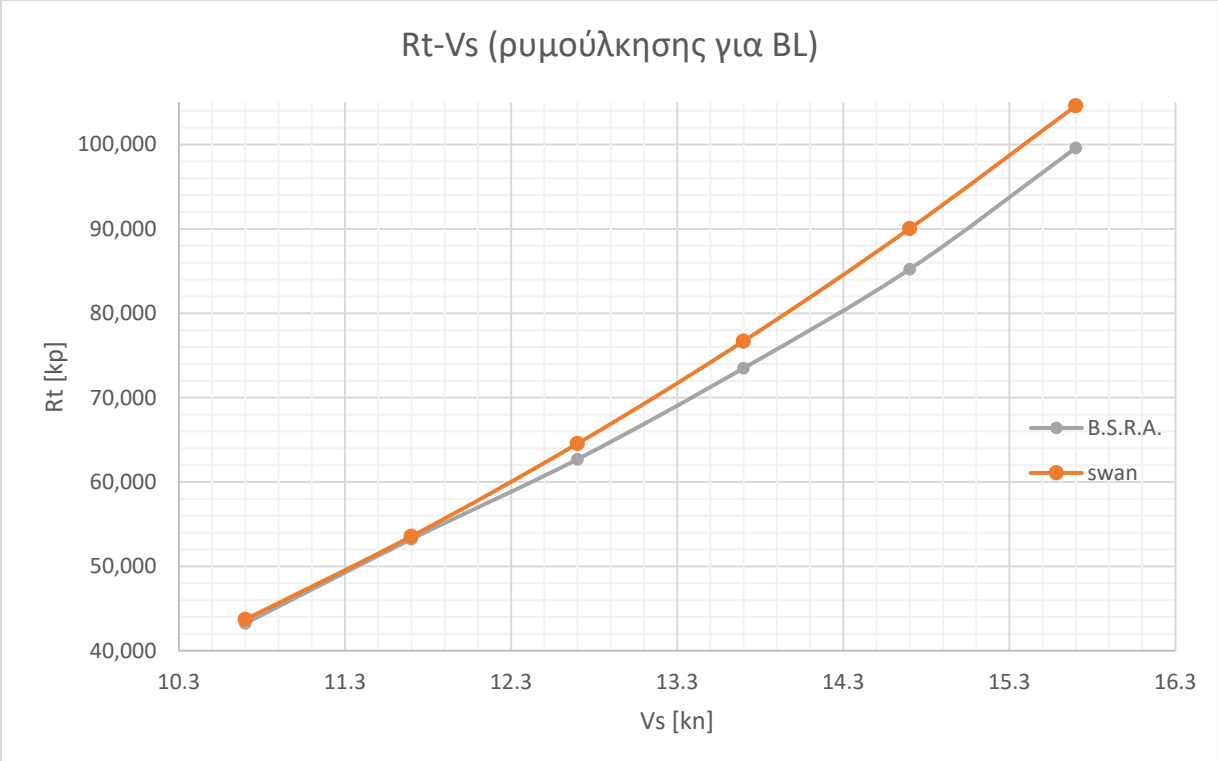
70%÷75%), θεωρώντας ίδιο η_s. Ακόμη, από το sea trials report γνωρίζουμε ότι στην FL για την ταχύτητα υπηρεσίας DHP≈14359.97PS και λόγω του ότι $DHP=SHP\cdot\eta_s$, SHP=EHP/PC, EHP=Rt·Vs, με Vs=7.5623m/s, η_s =0.995, προκύπτει ότι: Rt=1080.253 kN. Συνεπώς, η αντίσταση ρυμούλκησης για την FL (για την αντίστροφη διαδικασία ενδεικτικά μόνο αυτή παρουσιάζεται) επιθυμούμε να είναι μικρότερη των 1080.253 kN για την ταχύτητα υπηρεσίας (κάτι που επιβεβαιώνεται και από τους αντίστοιχους υπολογισμούς).



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 2: ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΡΥΜΟΥΛΚΗΣΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ (FL)

Βάσει των ανωτέρω διαγραμμάτων γίνεται σαφές ότι στην FL η καμπύλη της συνολικής αντίστασης ρυμούλκησης, που προέκυψε από τη διαδικασία που ακολουθήθηκε στην παρούσα εργασία δεν παρουσιάζει σημαντική απόκλιση σε σχέση με τις FORMDATA, BSRA. Μάλιστα, θα μπορούσε κανείς να ισχυριστεί ότι οι FORMDATA, BSRA υπερεκτιμούν την αντίσταση , κάτι που είναι αναμενόμενο, λόγω της παλαιότητας των μεθόδων (βασίζονται δηλαδή σε γάστρες παλαιάς σχεδίασης), λόγω του ότι κατ' ουσίαν για το υπό ανάλυση πλοίο είναι περιγραφικές και δεν εισάγεται κάπου η ακριβής γεωμετρία των νομέων. Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι τα εν λόγω διαγράμματα παρατίθενται ενδεικτικά και δεν θα χρησιμοποιηθούν στους υπολογισμούς, ως εκ τούτου δίνεται έμφαση στην FL, λόγω της μεγαλύτερης αβεβαιότητας, ελλείψει model tests και καθώς οι θαλάσσιες δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε heavy ballast κατάσταση, οπότε τα σφάλματα λιγότερα. Παρόλα αυτά, για λόγους πληρότητας πραγματοποιείται και σύγκριση της συνολικής αντίστασης ρυμούλκησης (και μόνο) που υπολογίστηκε με τη διαδικασία που περιγράφεται και παραπάνω, με την αντίστοιχη της BSRA, για τη BL. Επισημαίνεται ότι τα αποτελέσματα της BSRA δεν είναι και τόσο αξιόπιστα στο παρακάτω διάγραμμα, λόγω του γεγονότος ότι η BL παρουσιάζει έμπρυμνη διαγωγή[88], σε αντίθεση με την FL, που λογίζεται σαν ισοβύθιστη. Παρόλα αυτά δεν φαίνεται να υπάρχει σημαντική απόκλιση, παρατηρώντας το κάτωθι διάγραμμα.

[88] Δε δίνεται ιδιαίτερη έμφαση, μιας και «ξεφεύγει» από το σκοπό της παρούσας διπλωματικής.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3: ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΡΥΜΟΥΛΚΗΣΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ (BL)

Επισημαίνεται ότι τα άνωθι διαγράμματα (βλ. **ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ *1*,ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ *2*,ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ *3***) αφορούν ήρεμο νερό, χωρίς άνεμο, χωρίς ρεύματα και για καθαρή γάστρα, έλικα νεότευκτου πλοίου.

3.1.3 ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΑΕΡΑ

Η αντίσταση αέρα αποτελεί μια δευτερεύουσα συνιστώσα της συνολικής αντίστασης ρυμούλκησης σε ήρεμο νερό, χωρίς άνεμο, η οποία σχετίζεται με την αλληλεπίδραση των εξάλων, αλλά και των υπερκατασκευών- υπερστεγασμάτων του πλοίου με τον περιβάλλοντα αέρα. Όπως γίνεται κατανοητό, προκειμένου να προσδιοριστεί για τις διάφορες καταστάσεις φόρτωσης ακολουθείται η ίδια διαδικασία που ακολουθείται για την αντίσταση του ανέμου, καθιστώντας την κατ' ουσίαν μια υποπερίπτωσή της. Προκειμένου, λοιπόν, να υπολογιστεί η αντίσταση αέρα θεωρείται ότι υπάρχει μετωπικός άνεμος, με σχετική ταχύτητα ως προς το πλοίο ίση με την ταχύτητα του (σαν μέτρο). Μάλιστα, γίνεται χρήση των αποτελεσμάτων των πειραμάτων σε αεροδυναμική σήραγγα που πραγματοποίησε συστηματικά ο Blendermann (βλ. Blendermann 1996). Σημειώνεται ότι εκτενής αναφορά στη διαδικασία που ακολουθεί ο Blendermann πραγματοποιείται στην ενότητα της παρούσας έκθεσης που σχετίζεται με την αντίσταση του ανέμου, μιας και ακολουθείται η ίδια διαδικασία.

3.1.4 ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΠΑΡΕΛΚΟΜΕΝΩΝ

Παραπάνω έγινε ουσιαστική αναφορά στην αντίσταση παρελκομένων. Η εν λόγω συνιστώσα της συνολικής αντίστασης είναι επίσης δευτερεύουσα και σχετίζεται με την αντίσταση που οφείλεται σε όλα τα προαναφερθέντα (βλ. υποσημείωση 84 της παρούσας έκθεσης) προσαρτήματα της γάστρας. Μάλιστα, το υπό ανάλυση πλοίο (bulk carrier) διαθέτει μόνο πηδάλιο, παρατροπίδια, αλλά και stern horn, λόγω του τύπου του πηδαλίου (semi-spade rudder). Μάλιστα, διαθέτει και PBCF, Mewis duct, κάτι που αναφέρθηκε προφορικά από εκπροσώπους της διαχειρίστριας εταιρείας, χωρίς να υπάρχουν περεταίρω πληροφορίες διαθέσιμες για την παρούσα διπλωματική. Όπως προαναφέρθηκε κάθε δεξαμενή ακολουθεί δική της πρακτική, προκειμένου να λάβει υπ' όψιν της την εν λόγω συνιστώσα.

Παρακάτω παρατίθεται πίνακας (βλ. Αντίσταση-Πρόωση, Πολίτη), που προέκυψε από στατιστικά από πειράματα μοντέλων. Στον εν λόγω πίνακα παρατίθενται τυπικές τιμές της αντίστασης παρελκομένων εκφρασμένης σαν % ποσοστό της αντίστασης γυμνής γάστρας.

ΠΙΝΑΚΑΣ 8: ΤΥΠΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΠΑΡΕΛΚΟΜΕΝΩΝ ΩΣ ΠΟΣΟΣΤΟ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΡΥΜΟΥΛΚΗΣΗΣ (ΠΟΛΙΤΗΣ)

ΤΥΠΟΣ ΠΛΟΙΟΥ	$V/\sqrt{L}$, V σε κόμβους, L σε πόδια		
	0.7	1.00	1.6
Μεγάλο, γρήγορο, 4 έλικες	10-16%	10-16%	-
Μικρό, γρήγορο, 2 έλικες	20-30%	17-25%	10-15%
Μικρό, μέση ταχύτητα, 2 έλικες	12-30%	10-23%	-
Μεγάλο, μέση ταχύτητα, 2 έλικες	8-14%	8-14%	-
Όλα τα μονέλικα πλοία	2-5%	2-5%	-

Στην παρούσα εργασία, η αντίσταση ρυμούλκησης λαμβάνεται σαν 3% της συνολικής αντίστασης ρυμούλκησης σε ήρεμο νερό, χωρίς άνεμο, έπειτα από σύσταση του επιβλέποντα καθηγητού.

3.1.5 ΛΟΙΠΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ

Σαν λοιπή αντίσταση λαμβάνεται η δευτερεύουσα συνιστώσα της συνολικής, η οποία περιλαμβάνει ποικίλες επουσιώδεις. Είναι δηλαδή, κάτι σαν συγκεντρωτική αντίσταση των επουσιωδών δευτερευουσών συνιστωσών. Μερικές εξ αυτών είναι οι κάτωθι:

- Τραχύτητα- Ρύπανση γάστρας: οφείλεται με την τραχύτητα που παρουσιάζει η επιφάνεια της γάστρας και η οποία σχετίζεται με τον τρόπο κατασκευής της, το είδος της χρησιμοποιούμενης βαφής, αλλά και κυρίως τη ρύπανση από θαλάσσιους οργανισμούς (κυρίως των πλευρικών τοιχωμάτων και όχι τόσο του πυθμένα, λόγω της καθ' ύψους διαφοράς θερμοκρασίας). Στην προκειμένη περίπτωση, έχει θεωρηθεί ότι το πλοίο μόλις έχει καθελκυστεί και είναι νεότευκτο, επομένως η εν λόγω συνιστώσα αμελείται.
- Επιπρόσθετη αντίσταση λόγω στροφής: οφείλεται στη στροφή του πηδαλίου προκειμένου να παραγάγει την κατάλληλη άνωση που χρειάζεται για την πραγματοποίηση ενός ελιγμού. Το παρόν bulk carrier θεωρείται ότι πλέει με σταθερή πορεία και ότι δεν πραγματοποιεί μανούβρες. Ωστόσο, η εν λόγω συνιστώσα της αντίστασης σχετίζεται και με τις διορθώσεις (από τον αυτόματο πιλότο) της γωνίας πηδαλίου λόγω απώλειας ευστάθειας πορείας, λόγω δυναμικών φαινομένων (περιγράφονται και στην υποσημείωση 83 της παρούσας έκθεσης) που λαμβάνουν χώρα στο περιβάλλον ρευστό. Μάλιστα, θεωρείται καλή η σχεδίαση ως προς αυτή την παράμετρο τόσο της γάστρας όσο και του πηδαλίου του παρόντος πλοίου. Για πλοίο εκτοπίσματος (όπως το υπό ανάλυση) και για τα υπό ανάλυση Fr (κοντά στο 0.15) η εν λόγω συνιστώσα θεωρείται αμελητέα.
- Γήρανση: οφείλεται στις μόνιμες παραμορφώσεις και τα βέλη κάμψης, που προκύπτουν σε κατασκευαστικά στοιχεία του πλοίου, στο αξονικό σύστημα, κατά τη λειτουργία του, λόγω των φορτίσεων (τόσο των εξωτερικών, όσο και των εσωτερικών). Στην παρούσα φάση, το υπό ανάλυση πλοίο θεωρείται νεότευκτο, κατά συνέπεια δε λαμβάνεται υπ' όψιν η προσαύξηση της αντίστασης λόγω γήρανσης. Παρόλα αυτά, κατά την ανάλυση των λειτουργικών δεδομένων, που πραγματοποιείται στο τέλος της εργασίας θα ληφθεί υπ' όψιν σαν προσαύξηση στην κατανάλωση (σε περίπτωση που περιλαμβάνονται μετρήσεις κατανάλωσης στα operational

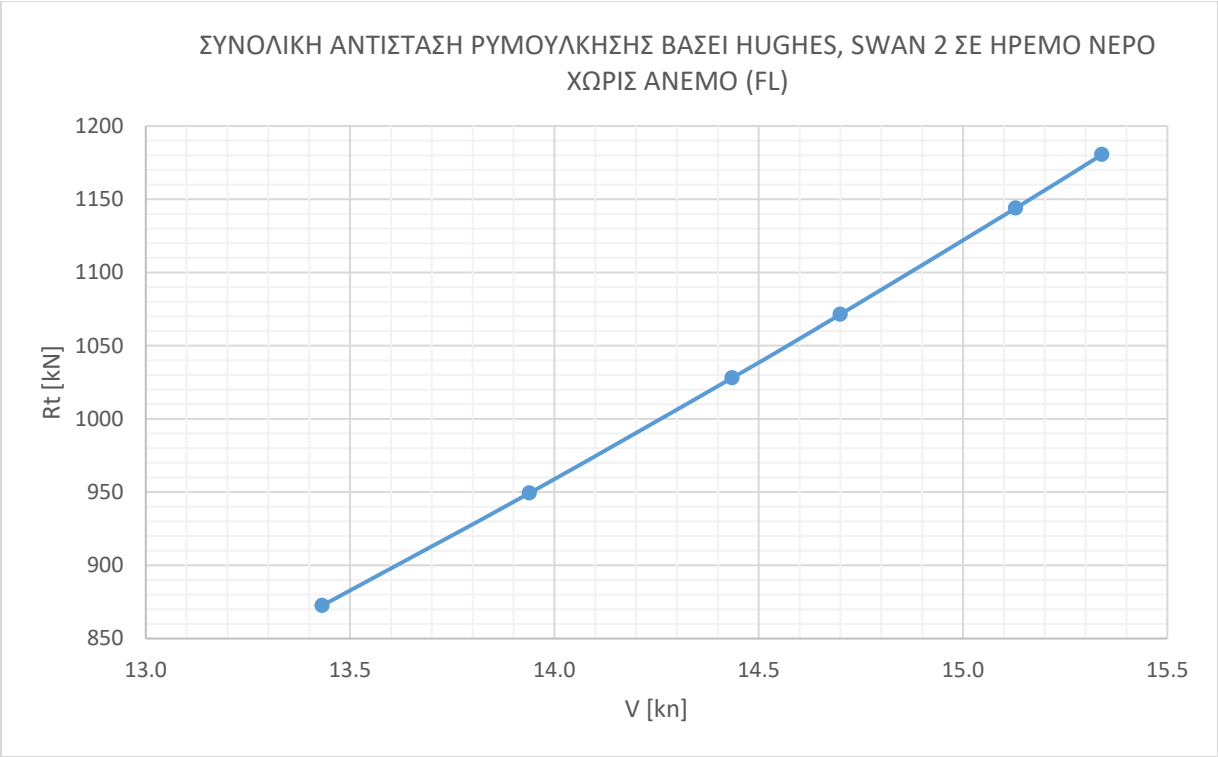
data), αλλά και σαν μείωση του β.α. του αξονικού συστήματος (η_s από 0.995 σε 0.98). Πιο συγκεκριμένα, κατά την επεξεργασία των operational data, είθισται η αναμενόμενη (τιμή αναφοράς) κατανάλωση (που προκύπτει βάσει των shop trials) να προσαυξάνεται, εκτός των άλλων, κατά 2% λόγω απώλειας ευθυγράμμισης και 5% λόγω πτώσης απόδοσης κύριας μηχανής. Προς το παρόν, το όποιο ποσοστό γήρανσης θεωρείται μηδέν.

3.1.6 ΕΙΔΙΚΑ ΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥΣ

Παρακάτω παρατίθενται πίνακας με το αντίστοιχο διάγραμμα της συνολικής αντίστασης για διάφορες ταχύτητες (εκατέρωθεν της ταχύτητας υπηρεσίας= 14.7kn), όπως εκτιμήθηκαν βάσει της διαδικασίας που περιγράφεται παραπάνω (τόσο για την FL, όσο και για τη BL). Δηλαδή, βασίζεται στον υπολογισμό της αντίστασης κυματισμού με χρήση του προγράμματος Swan 2 (ελλείψει model tests report) και στην αναγωγή στη συνολική μέσω μεθόδου Hughes. Ακόμη, έχει γίνει η προσαύξηση κατά 3% λόγω παρελκομένων, αλλά και της αντίστασης του αέρα, βάσει Blendermann (1996). Ακόμη, δεν έχει ληφθεί υπ' όψιν κανένα ποσοστό ρύπανσης (της γάστρας, της έλικας) ή γήρανσης, θεωρώντας ότι οι υπολογισμοί αφορούν την περίοδο καθέλκυσης του πλοίου και λογίζεται ως νεότευκτο.

ΠΙΝΑΚΑΣ 9: ΥΠΟΛΟΓΙΣΘΕΙΣΑ ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΡΥΜΟΥΛΚΗΣΗΣ ΣΤΗΝ FL

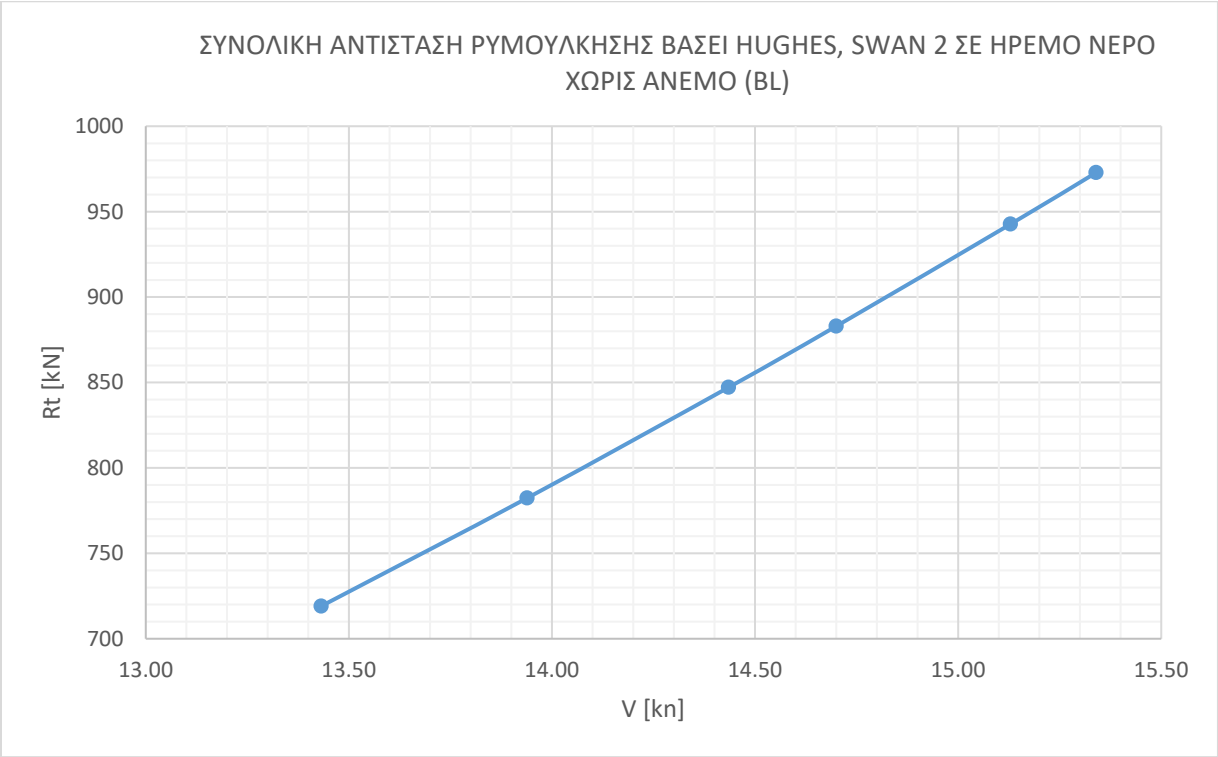
V [kn]	Re	C_F [-]	R_F [kN]	C_W [-]	R_W [kN]	C_{AA} [-]	R_{AA} [kN]	k	C_T [-]	Rt [kN]
13.432	1.79E+09	1.43E-03	526.34	5.81E-04	223.35	0.9	14.80	0.16	2.36E-03	872.57
13.939	1.86E+09	1.42E-03	564.32	6.10E-04	252.75	0.9	16.00	0.16	2.39E-03	949.34
14.435	1.93E+09	1.41E-03	602.67	6.38E-04	283.52	0.9	17.20	0.16	2.41E-03	1027.97
14.7	**1.96E+09**	**1.41E-03**	**623.65**	**6.53E-04**	**300.80**	**0.9**	**17.84**	**0.16**	**2.42E-03**	**1071.42**
15.129	2.02E+09	1.41E-03	658.32	6.76E-04	330.01	0.9	18.89	0.16	2.44E-03	1143.91
15.34	2.05E+09	1.40E-03	675.70	6.88E-04	345.36	0.9	19.00	0.16	2.45E-03	1180.54



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4: ΥΠΟΛΟΓΙΣΘΕΙΣΑ ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΡΥΜΟΥΛΚΗΣΗΣ ΣΤΗΝ FL

ΠΙΝΑΚΑΣ 10: ΥΠΟΛΟΓΙΣΘΕΙΣΑ ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΡΥΜΟΥΛΚΗΣΗΣ ΣΤΗ BL

V [kn][89]	Re	C_F [-]	R_F [kN]	C_W [-]	R_W [kN]	C_{AA} [-]	R_{AA} [kN]	k	C_T [-]	Rt [kN]
13.432	1.76E+09	1.43E-03	445.61	4.90E-04	153.05	0.8	17.47	0.18	2.31E-03	719.09
13.939	1.83E+09	1.42E-03	477.76	5.20E-04	175.07	0.8	18.81	0.18	2.33E-03	782.35
14.435	1.89E+09	1.42E-03	510.23	5.49E-04	198.17	0.8	20.17	0.18	2.35E-03	847.15
14.7	**1.93E+09**	**1.41E-03**	**527.99**	**5.53E-04**	**207.10**	**0.8**	**20.92**	**0.18**	**2.36E-03**	**882.96**
15.129	1.98E+09	1.41E-03	557.34	5.88E-04	233.18	0.8	22.16	0.18	2.38E-03	942.70
15.34	2.01E+09	1.41E-03	572.05	6.00E-04	244.45	0.8	22.78	0.18	2.39E-03	972.89



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5: ΥΠΟΛΟΓΙΣΘΕΙΣΑ ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΡΥΜΟΥΛΚΗΣΗΣ ΣΤΗ BL

Βάσει των ανωτέρω πινάκων διαπιστώνεται ότι ο συντελεστής αντίστασης C_w ισούται κατά προσέγγιση με το 75%-80% του C_R στην FL και με το 70%-75% του C_R στη BL (βλ. **ΣΧΗΜΑ 24**). Τα εν λόγω ποσοστά είναι αναμενόμενα. Ακόμη, επισημαίνεται ότι ο λόγος απόκλισης των αριθμών Re για την ίδια ταχύτητα μεταξύ FL, BL οφείλεται στο διαφορετικό μήκος ισάλου επιφάνειας, βάσει του οποίου υπολογίζεται ο Re. Όσον αφορά την αντίσταση του αέρα, αυτή υπολογίζεται βάσει των συντελεστών (για την εγκάρσια προβεβλημένη επιφάνεια) C_{AA}, όπως προκύπτουν από το αντίστοιχο report του Blendermann (1996), για το οποίο γίνεται εκτενής αναφορά παρακάτω στην έκθεση. Μάλιστα, για την εκάστοτε κατάσταση φόρτωσης για κάθε ταχύτητα ο συντελεστής C_{AA} είναι συγκεκριμένος, μιας και εξαρτάται αποκλειστικά από τη γεωμετρία της προβεβλημένης επιφάνειας του πλοίου (έξαλα, υπερστεγάσματα-υπερκατασκευές). Τέλος, αναφορικά με το συντελεστή μορφής k (του Hughes), ελλείψει στοιχείων για

[89] Επισημαίνεται ότι επιλέχθηκαν οι εν λόγω ταχύτητες, λόγω του γεγονότος ότι είναι ίσες με τις μέσες τιμές των ταχυτήτων στις οποίες πραγματοποιήθηκαν οι θαλάσσιες δοκιμές.

model tests, βασίστηκαν σε αντίστοιχο διάγραμμα (βλ. Harvald), που παρατίθεται και στην παρούσα εργασία. Βέβαια, το εν λόγω διάγραμμα βασίζεται σε παλαιάς γεωμετρικής σχεδίασης γάστρας και είναι εμπειρικό, ως εκ τούτου τα αποτελέσματά που άγονται από αυτό δεν είναι και τόσο αξιόπιστα, κάτι που καθιστά αναγκαία διόρθωση βάσει πιο πρόσφατων στατιστικών. Βάσει, λοιπόν, της συσσωρευμένης εμπειρίας και έπειτα από συζητήσεις με τον επιβλέποντα επιλέχθηκαν οι αναγραφόμενες στους άνωθι πίνακες τιμές για το k. Δηλαδή περί το 0.2.

3.1.7 ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Τα ανωτέρω αφορούν τον υπολογισμό της συνολικής διορθωμένης αντίστασης ρυμούλκησης σε ήρεμο νερό, χωρίς άνεμο.

Τόσο κατά τη σύνθεση της συνολικής αντίστασης σε ήρεμο νερό, όσο και μετέπειτα κατά τον υπολογισμό της συνολικής υπό οποιεσδήποτε συνθήκες αντίστασης γίνεται χρήση της αρχής της επαλληλίας. Ως γνωστόν, η αρχή της επαλληλίας (ή αρχή της υπέρθεσης) μπορεί να εφαρμοστεί σε διανυσματικά μεγέθη. Δεδομένου ότι, όλες οι συνιστώσες της αντίστασης κείνται επί του διαμήκους άξονα του πλοίου, σαν διανύσματα που είναι (δυνάμεις) φέρουν την ίδια διεύθυνση. Κατά συνέπεια, η ολική αντίσταση μπορεί να προκύψει σαν άθροισμα των επιμέρους. Κατ' επέκταση, λόγω του ότι οι διακυμάνσεις της ταχύτητας είναι αμελητέες, η αρχή της υπέρθεσης ισχύει και για το συντελεστή αντίστασης (βλ. ορισμό του).

Επομένως, η ολική αντίσταση, που θα υπολογιστεί εν τέλει και εμμέσως[90] θα συγκριθεί με τα πραγματικά λειτουργικά δεδομένα, προκύπτει σαν υπέρθεση των εξής συνιστωσών:

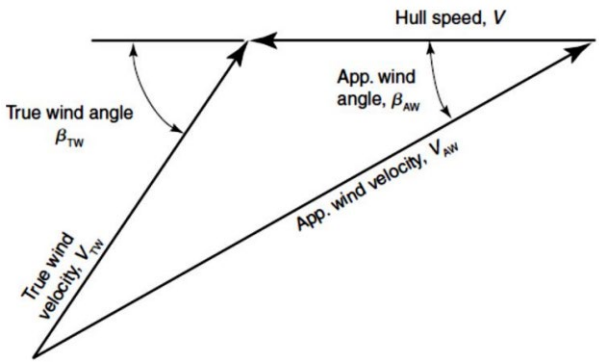
- Αντίσταση σε ήρεμο νερό (χωρίς εξωγενείς κυματισμούς, χωρίς ρεύματα), χωρίς ανέμους
- Αντίσταση ανέμου
- Επιπρόσθετη αντίσταση κυματισμού
- Αντίσταση ρευμάτων

Επισημαίνεται ότι, η θεωρητική (-ποιοτική) ανάλυση για την αντίσταση σε ήρεμο νερό, χωρίς άνεμο παρουσιάστηκε εκτενώς παραπάνω. Όσον αφορά τις επιπρόσθετες συνιστώσες γίνεται ενδελεχής αναφορά παρακάτω.

3.2 ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΑΝΕΜΟΥ

Όπως αναφέρθηκε και στην αντίστοιχη ενότητα παραπάνω στην παρούσα έκθεση, ένα πλοίο που πλέει σε ήρεμο νερό, χωρίς ανέμους δέχεται την αντίσταση του αέρα. Αυτή εξαρτάται από την εγκάρσια επιφάνεια των εξάλων, υπερκατασκευών- υπερστεγασμάτων, από την φαινόμενη ταχύτητα του «ανέμου» (ως προς το πλοίο), που στην προκειμένη περίπτωση ισούται με την ταχύτητά του πλοίου, αλλά και από τις φυσικές σταθερές που χαρακτηρίζουν τον περιβάλλοντα αέρα. Όταν, όμως, πνέει άνεμος, οι παράμετροι που επηρεάζουν την αντίσταση του ανέμου πλέον, δηλαδή η φαινόμενη (ως προς το πλοίο) ταχύτητα του ανέμου, όπως και η προβεβλημένη επιφάνεια των εξάλων, υπερκατασκευών-υπερστεγασμάτων μεταβάλλονται. Ειδικότερα, η φαινόμενη ταχύτητα προκύπτει βάσει του σχήματος που παρουσιάζεται παρακάτω.

[90] Μέσω ισχύων.



ΣΧΗΜΑ 27: ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΣ –ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΣ ΑΝΕΜΟΣ

Βάσει του ανωτέρω σχήματος γίνεται σαφές ότι το μέτρο της φαινόμενης ταχύτητας προκύπτει από το νόμο των συνημιτόνων. Δηλαδή:

$$V_{AW} = \sqrt{V_{TW}^2 + V^2 + 2VV_{TW}\cos\beta_{TW}}$$

$$(\varepsilon =)\beta_{AW} = \tan^{-1}\left(\frac{V_{TW}\sin\beta_{TW}}{V + V_{TW}\cos\beta_{TW}}\right)$$

Τα σύμβολα των προαναφερθέντων σχέσεων επεξηγούνται από το σχήμα που παρατίθεται παραπάνω.

Σχετικά με τον υπολογισμό της αντίστασης του ανέμου, η παρούσα εργασία βασίστηκε στην έρευνα του Blendermann (Blendermann 1996). Στην εν λόγω έρευνα υλοποιήθηκαν αρκετές δοκιμές μοντέλων σε αεροδυναμική σήραγγα για διάφορους τύπους πλοίων. Ειδικότερα, οι δοκιμές έγιναν σε σήραγγα με επιφάνεια ροής 1.75m * 1.05m, μέγιστη ταχύτητα 35m/s, (ένταση τύρβης) turbulence intensity ≈0.5%.

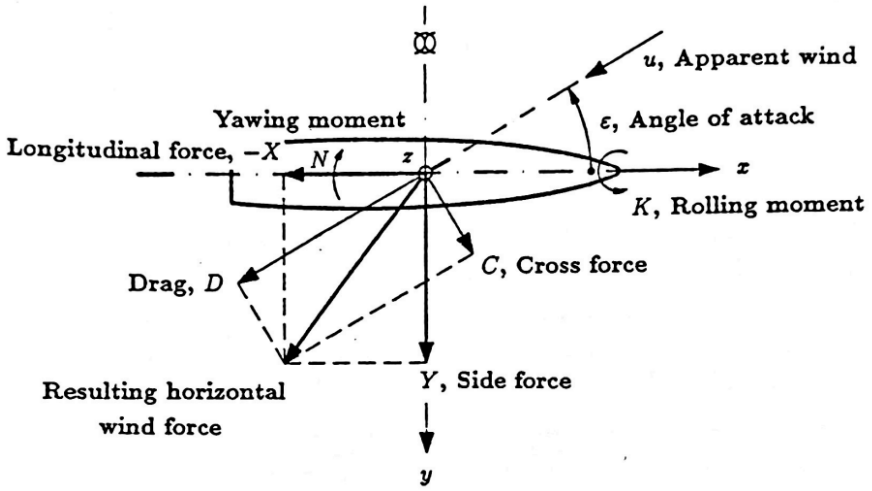
Ο αριθμός Reynolds βασίζεται στο ολικό μήκος του πλοίου (L_{OA}) και προκύπτει ως: $Re = uL_{OA}/\nu$, με u την φαινόμενη ταχύτητα, κινηματική συνεκτικότητα αέρα (ν).

Σύμφωνα με την έρευνα οι αριθμοί Re των προτύπων κυμάνθηκαν από $2*10^6 \div 3*10^6$.[91]

Μάλιστα, κατά την πραγματοποίηση των πειραμάτων δόθηκε ιδιαίτερα έμφαση ώστε τα αποτελέσματα να μην επηρεάζονται από παραμέτρους (όπως την πιθανή απόκτηση εγκάρσιας κλίσης του μοντέλου ή και το δημιουργούμενο οριακό στρώμα γύρω από το pivot point), που δεν θα έπρεπε. Αναλυτική αναφορά σε αυτά γίνεται στο report του Blendermann (1996).

Εν συνεχεία, το ενδιαφέρον της εν λόγω έρευνας επικεντρώθηκε στις δυνάμεις και τις ροπές, οι οποίες εκφράζονται στο ακόλουθο εικονιζόμενο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων.

[91] Αυτό (δηλαδή το εύρος του Re) οφείλεται στις δυνατότητες, άρα και τους περιορισμούς της αεροδυναμικής σήραγγας (βλ. παραπάνω). Ακόμη, βρίσκεται στην υπερκρίσιμη περιοχή (τυρβώδης ροή), κάτι που ισχύει και για την φυσική κλίμακα.



ΣΧΗΜΑ 28: ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΥΝΕΤΑΓΜΕΝΩΝ- ΔΥΝΑΜΕΙΣ, ΡΟΠΕΣ ΑΝΕΜΟΥ (BLENDERMANN 1996)

Παρατηρώντας το παραπάνω σύστημα, είναι εμφανές ότι:

- ο άξονας των x ταυτίζεται με διαμήκη άξονα συμμετρίας του πλοίο, με φορά από την πρύμνη προς την πλώρη
- ο άξονας των y ταυτίζεται με εγκάρσιο άξονα του πλοίου, με φορά από την port side στη starboard
- ο άξονας των z είναι ο κατακόρυφος άξονας (με φορά από τον πυθμένα)
- η αρχή των αξόνων κείται επί του μέσου νομέα του πλοίου στο ύψος της εκάστοτε ισάλου

Όσον αφορά τις δυνάμεις, η δύναμη X είναι ομόρροπη του άξονα των x, η δύναμη Y ομόρροπη του άξονα των y. Στη διεύθυνση της φαινόμενης (ως προς το πλοίο) ταχύτητας του ανέμου συναντάται η οπισθέλκουσα δύναμη D (Drag), ενώ κάθετα σε αυτήν διακρίνεται η δύναμη C (Cross Force). Η ε αποτελεί την φαινόμενη γωνία του ανέμου και όπως επισημαίνεται και από την αναφορά του Blendermann (1996), ε=0°, για μετωπικό άνεμο.

Οι δυνάμεις που ασκούνται από τον άνεμο εκφράζονται στις ακόλουθες αδιάστατες μορφές:

$$\mathrm{CX_{AF}} = \frac{\mathrm{X}}{\mathrm{q \cdot A_F}},\ \mathrm{CX} = \frac{\mathrm{X}}{\mathrm{q \cdot A_L}}, \mathrm{CY} = \frac{\mathrm{Y}}{\mathrm{q \cdot A_L}}$$

Όπου:

q : η δυναμική πίεση του περιβάλλοντος αέρα, με $\mathrm{q} = \frac{\rho}{2}u^2$, με ρ την πυκνότητα του περιβάλλοντος αέρα, $\mathrm{A_F}$: η εγκάρσια εκτεθειμένη στον άνεμο επιφάνεια του πλοίου (Frontal Area), $\mathrm{A_L}$: η διαμήκης εκτεθειμένη στον άνεμο επιφάνεια του πλοίου (Lateral Area).

Οι αντίστοιχοι αδιάστατοι συντελεστές για τις δυνάμεις C, D είναι: $\mathrm{CD} = \frac{\mathrm{D}}{\mathrm{q \cdot A_L}}, \mathrm{CC} = \frac{\mathrm{C}}{\mathrm{q \cdot A_L}}$ και συνδέονται με τους ανωτέρω ως εξής:

$$\begin{bmatrix} \mathrm{CX} \\ \mathrm{CY} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos\varepsilon & \sin\varepsilon \\ \sin\varepsilon & \cos\varepsilon \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathrm{CD} \\ \mathrm{CC} \end{bmatrix}$$

Όπως επισημαίνεται και στην έκθεση του Blendermann (1996) η αποκόλληση ροής στα συμβατικής σχεδίασης πλοία (όπως το υπό ανάλυση bulk carrier) λαμβάνει χώρα σε σημείο, που να μην επηρεάζει τις συνολικές δυνάμεις (που αναφέρονται και παραπάνω). Καθ' αυτόν τον τρόπο οι διαφορές του αριθμού Re δεν επηρεάζουν τα αποτελέσματα. Ως εκ τούτου, οι αδιάστατοι συντελεστές φόρτισης που παρουσιάζονται σε πινακοποιημένη μορφή και σε διαγράμματα στην έκθεση του Blendermann (1996) και αφορούν τα μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν χωρίς διορθώσεις και αναγωγές στο πραγματικό πλοίο (φυσική κλίμακα).

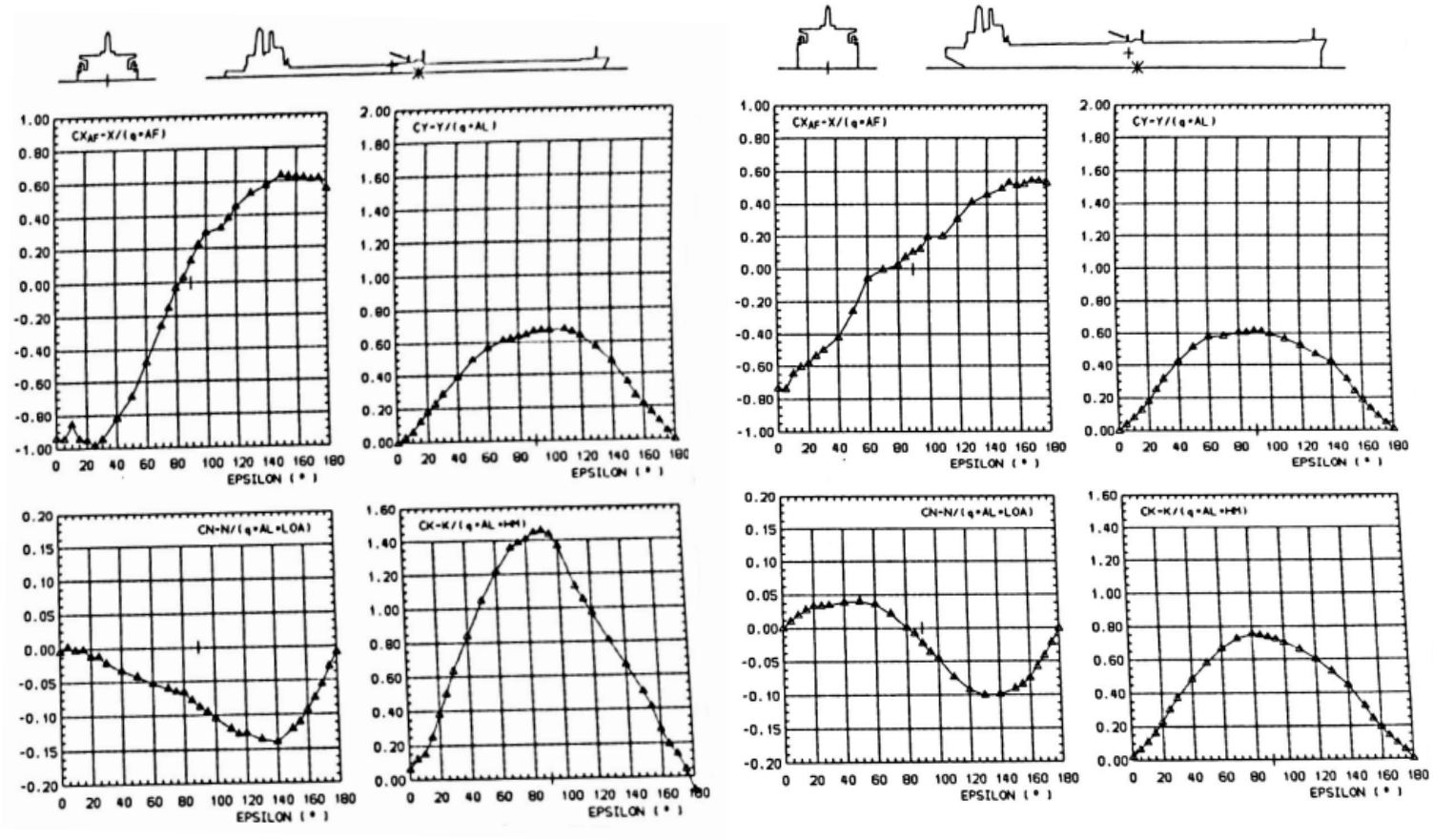
Επιπροσθέτως, κρίνεται επιβεβλημένη η αναφορά στο γεγονός ότι η καθ' ύψος ύπαρξη του οριακού στρώματος επηρεάζει την τιμή της πραγματικής ταχύτητας του πλοίου (V_{TW}). Μάλιστα, ο Blendermann στην αναφορά του (1996) προτείνει η V_{TW} να μεταβάλλεται βάσει του νόμου: $V_{TW}(z) = V_{TW_h}(z/h)^{1/n}$, όπου:

n=10, για ανοικτή θάλασσα[92] (όπως την παρούσα περίπτωση), z: η απόσταση από την επιφάνεια της θάλασσας στην οποία αναφέρεται η φαινόμενη ταχύτητα (συνήθως το ύψος αναφοράς λαμβάνεται ίσο με 10m για το βύθισμα σχεδίασης (εδώ 14.5m)). V_{TW_h}: η πραγματική ταχύτητα σε κάποιο ύψος αναφοράς h, όπως το ανεμόμετρο. Στην παρούσα εργασία, σαν z ελήφθη το ύψος του εκάστοτε κέντρου εκτεθειμένης επιφάνειας στον άνεμο. Ακόμη, θεωρήθηκε ότι το ανεμόμετρο του υπό ανάλυση bulk carrier είναι αρκετά ψηλά, ώστε η πραγματική ταχύτητα του ανέμου να μην επηρεάζεται από την ύπαρξη του οριακού στρώματος. Οπότε, $V_{TW_h} = V_{TW}$.

Ανατρέχοντας στα αποτελέσματα της έρευνας του Blendermann (1996) διαπιστώνεται ότι δεν υπάρχουν στοιχεία για bulk carrier. Το πιο κοντινό, γεωμετρικά (ως προς γάστρα και υπερκατασκευές-υπερστεγάσματα), είδος πλοίων που υπάρχει είναι το δεξαμενόπλοιο[93]. Παρακάτω, παρατίθενται εικονογραφημένοι οι πίνακες και τα αντίστοιχα διαγράμματα, με τα αποτελέσματα, όπως προκύπτουν από την έρευνα του Blendermann (1996).

[92] Και όχι λιμάνια.

[93] Τίθενται τρία ζητήματα: α) Η πλάγια-διαμήκης όψη των bulk carriers περιέχουν σαν προεξοχές τα στόμια των αμπαριών, που ενδεχομένως να επηρεάζουν τη ροή. Βέβαια, το ύψος τους είναι σχετικά μικρό (λιγότερο από 1m), οπότε θεωρούμε την επίδραση στη μορφή του οριακού στρώματος αμελητέα. β) Τα αποτελέσματα που παρατίθενται στο report του Blendermann (1996) έχουν αναχθεί σε πλοία διαφορετικών διαστάσεων, από του υπό ανάλυση πλοίου. Κάτι τέτοιο, απαιτεί και διόρθωση λόγω Re. Όμως, όπως αναφέρεται και παραπάνω, οι συντελεστές αντίστασης που υπολογίστηκαν από τον Blendermann αφορούν πρότυπο με Re της τάξης του 10^6. Τα πραγματικά πλοία έχουν Re της τάξης 10^8. Αναφέρεται, ότι οι εν λόγω συντελεστές αντίστασης δεν διορθώνονται για φυσική κλίμακα. Ως εκ τούτου, και για το υπό ανάλυση πλοίο, όπου η διαφορά των Re δεν είναι τόσο μεγάλη δεν θα γίνει διόρθωση. γ) Το report του Blendermann (1996) παρουσιάζει αποτελέσματα για την ερματισμένη κατάσταση για δυο είδη δεξαμενοπλοίων. Για MR (Medium Range), VLCC. Το ιδανικό για την περίπτωσή μας θα ήταν το AFRAMAX. Οι λόγοι των διαστάσεων και η μορφή των προβεβλημένων επιφανειών του υπό ανάλυση πλοίου είναι πιο κοντά στου VLCC. Μάλιστα, το MR διαθέτει πρύμνη καταδρομικού (και όχι καθρέφτη) και δεν διαθέτει πρωραίο βολβό. Μάλιστα, οι λόγοι των γεωμετρικών διαστάσεων (που περιλαμβάνουν L_{PP}, T, B, A_L) για το υπό ανάλυση bulk- carrier είναι πιο κοντά στους αντίστοιχους του VLCC, παρά σε αυτούς του MR. Επίσης, στο report του Blendermann (1996) δεν παρατίθενται οι συντελεστές για την έμφορτη κατάσταση για το MR, παρά μόνο για το VLCC.



ΣΧΗΜΑ 29: ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ CX ΓΙΑ FULL LOAD (ΔΕΞΙΑ) & BALLAST (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) ΚΑΤΑ BLENDERMANN 1996

Εν τέλει (στα αποτελέσματα) ελήφθη υπ' όψιν μόνο η δύναμη κατά το διαμήκη άξονα του πλοίου, μιας και η εγκάρσια δύναμη θεωρείται, χωρίς βλάβη της γενικότητας, ότι εκπίπτει[94].

Παρακάτω, παρατίθενται διαγράμματα για κάθε κατάσταση φόρτωσης ξεχωριστά (FL, BL) με την X force συναρτήσει της σχετικής γωνίας του ανέμου σε σχέση με το πλοίο, με παράμετρο την πραγματική ταχύτητα του ανέμου (σε κλίμακα Bft[95]).

Πρώτα, όμως, παρουσιάζεται για λόγους πληρότητας πίνακας με την κλίμακα Beaufort, όμοιας του προτύπου ISO15016, βάσει του οποίου προέκυψαν τα διάφορα σενάρια που αναλύονται στα παρακάτω διαγράμματα.

[94] Στα ιστιοπλοϊκά θα λαμβανόταν υπ' όψιν.

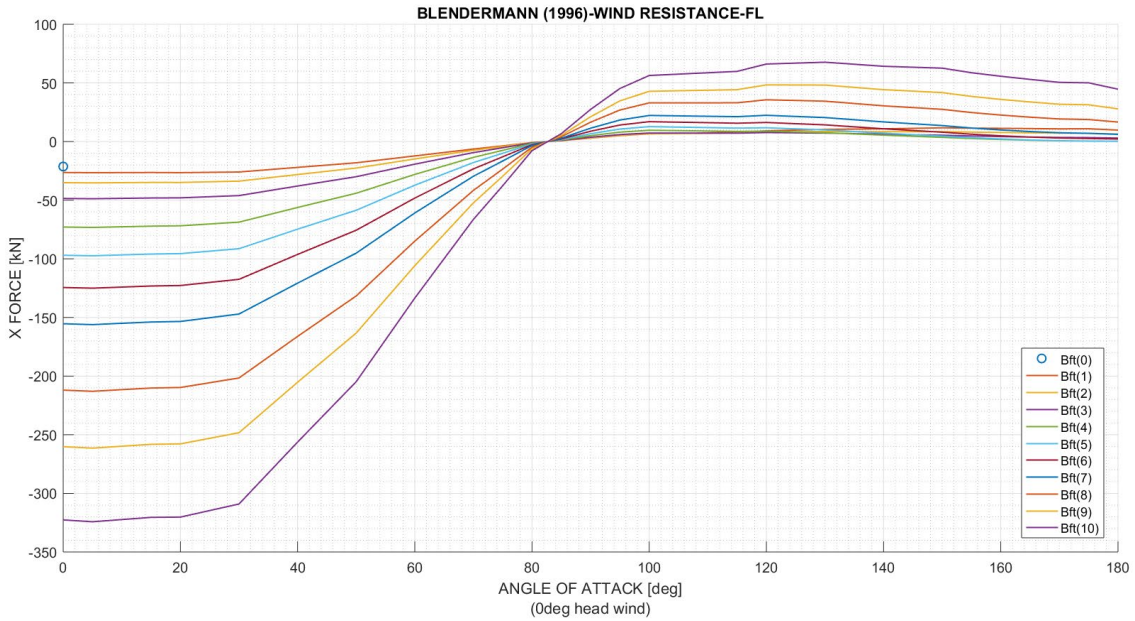
[95] Στο πρότυπο ISO15016:2015(E) παρατίθεται πίνακας με την αντιστοιχία εύρους πραγματικών ταχυτήτων ανέμου (σε διάφορες μονάδες μέτρησης μεταξύ των οποίων και [kn]) με την κλίμακα Bft. Προκειμένου να αχθούν τα παρακάτω διαγράμματα ελήφθησαν για κάθε Bft ελήφθη μια μέση πραγματική ταχύτητα ανέμου.

ΠΙΝΑΚΑΣ 11: ΚΛΙΜΑΚΑ BEAUFORT

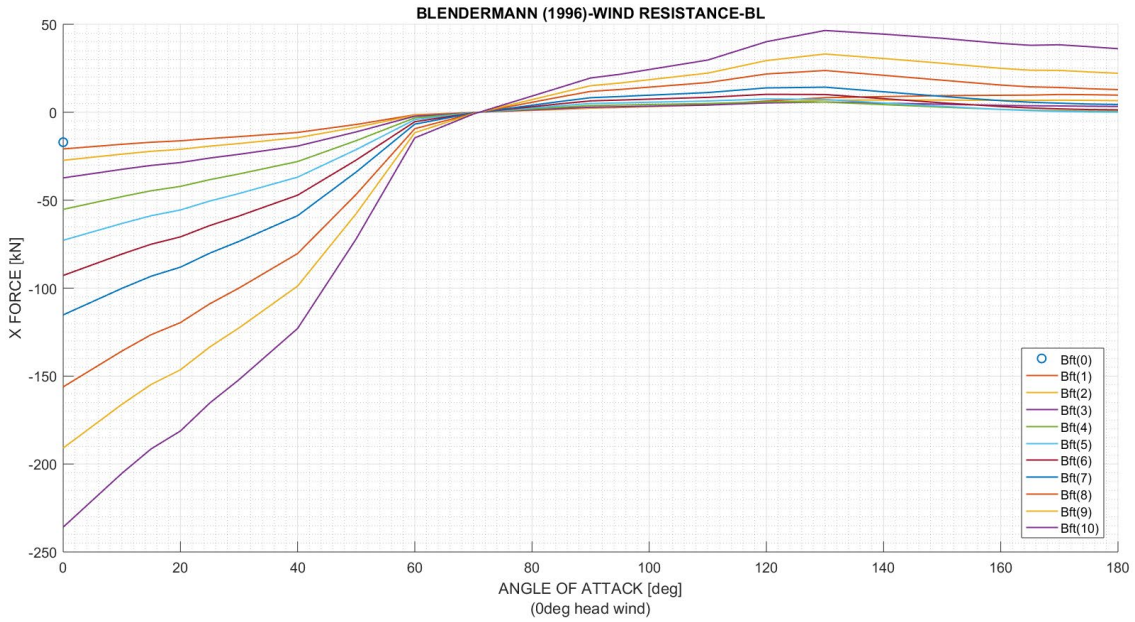
BFT NO	DESCRIPTIVE TERM	MEAN VELOCITY[96]	PROBABLE WAVE HEIGHT
0	Calm	< 1 knot	0 m
1	Light air	1–3 knots	0–0.3 m
2	Light breeze	4–6 knots	0.3–0.6 m
3	Gentle breeze	7–10 knots	0.6–1.2 m
4	Moderate breeze	11–16 knots	1–2 m
5	Fresh breeze	17–21 knots	2–3 m
6	Strong breeze	22–27 knots	3–4 m
7	Near gale	28–33 knots	4–5.5 m
8	Gale	34–40 knots	5.5–7.5 m
9	Strong gale	41–47 knots	7–10 m
10	Storm	48–55 knots	9–12.5 m
11	Violent storm	56–63 knots	11.5–16 m
12	Hurricane force	≥ 64 knots	≥ 14 m

Σημειώνεται, ότι η μορφή των παρακάτω διαγραμμάτων επηρεάζεται από τη διακριτοποίηση των γωνιών από το Blendermann (ανά 5°). Ακόμη, γίνεται σαφές ότι για μετωπικό άνεμο (0°) η αντίσταση είναι μέγιστη, κοντά στις 90° μηδενίζεται και για γωνίες μεταξύ 90° και 180°, ο άνεμος είναι ευνοϊκός, χωρίς, ωστόσο, να είναι και τόσο σημαντική η εν λόγω «εξοικονόμηση».

[96] Επισημαίνεται ότι η ταχύτητα του ανέμου αναφέρεται σε ύψος 10m πάνω από ανοιχτή επίπεδη επιφάνεια, προκειμένου να μην υπάρχει επίδραση του οριακού στρώματος.



ΣΧΗΜΑ 30: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ XFORCE ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΣΧΕΤΙΚΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΑΝΕΜΟΥ ΓΙΑ FL ΜΕ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟ ΤΗΝ ΚΛΙΜΑΚΑ BEAUFORT (ΚΑΤΑ BLENDERMANN 1996) ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ (14.7kn)



ΣΧΗΜΑ 31: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ XFORCE ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΣΧΕΤΙΚΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΑΝΕΜΟΥ ΓΙΑ BL ΜΕ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟ ΤΗΝ ΚΛΙΜΑΚΑ BEAUFORT (ΚΑΤΑ BLENDERMANN 1996) ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ (14.7kn)

Τα παραπάνω διαγράμματα για τις διάφορες πραγματικές ταχύτητες ανέμου συμπεριλαμβάνουν στο τελικό αποτέλεσμα και τη δύναμη Χ που αντιστοιχεί στην αντίσταση αέρα. Μάλιστα, υπάρχει και σημείο που αναπαρίσταται με κύκλο (για μηδενική γωνία) και το οποίο αναφέρεται στην αντίσταση του αέρα για την ταχύτητα υπηρεσίας του πλοίου (14.7kn). Ακόμη, όλες οι καμπύλες αναφέρονται σε αυτή την ταχύτητα (14.7 kn). Τέλος, όπου 0°, μετωπικός κυματισμός.

3.3 ΕΠΙΠΡΟΣΘΕΤΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥ

Η επιπρόσθετη αντίσταση κυματισμού σε αντίθεση με την προαναφερθείσα αντίσταση κυματισμού, οφείλεται σε εξωγενείς σε σχέση με το πλοίο παράγοντες. Θα μπορούσε, λοιπόν, να είναι αποτέλεσμα ανέμων (ανεμογενείς) ή και αποθάλασσες[97] (swell), (όπου δεν υπάρχει άνεμος στην περιοχή του πλοίου). Η εν λόγω συνιστώσα της αντίστασης οφείλεται εν μέρει στην ανάκλαση[98] των κυμάτων πάνω στην κινούμενη γάστρα και εν μέρει στην έμμεση επίδραση των κινήσεων του πλοίου που προκαλούνται από τα κύματα[99] (εξαναγκασμένη ταλάντωση του πλοίου). Οι εν λόγω επαγόμενες κινήσεις του πλοίου εξαρτώνται από τη σχετική κατεύθυνση των κυμάτων ως προς το κινούμενο πλοίο. Για παράδειγμα, κατά το μετωπικό κυματισμό, που είναι και ο δυσμενέστερος, το πλοίο υπόκειται (κυρίως) σε heave και pitch. Όταν, όμως, ο κυματισμός είναι πλευρικός (λοξός), τότε εμφανίζεται έντονη κίνηση roll και yaw.

Στην παρούσα εργασία ο προσδιορισμός της πρόσθετης αντίστασης για διάφορα σενάρια κυματισμών πραγματοποιείται με χρήση του προγράμματος FRANK. Εν συνεχεία, τα επαγόμενα αποτελέσματα συγκρίνονται με εμπειρικές μεθόδους, όπως του Kreitner (1939), του ISO-15016, αλλά και δημοσιευμένου report των Liu-Παπανικολάου (2020). Η εν λόγω σύγκριση γίνεται καθαρά για ποιοτικούς και όχι ποσοτικούς λόγους. Δηλαδή εν τέλει, στους υπολογισμούς θα ληφθούν υπ' όψιν μόνο τα αποτελέσματα του προγράμματος FRANK.

Αρχικά ο υπολογισμός της πρόσθετης αντίστασης κυματισμού πραγματοποιήθηκε με χρήση του προγράμματος FRANK. Πιο συγκεκριμένα, έγιναν εν τέλει «τρεξίματα» του χρησιμοποιούμενου κώδικα για ακανόνιστα κύματα (irregular waves), καθώς στην φύση αρμονικά κύματα είναι έννοια ιδεατή. Ειδικότερα, επιλέχθηκε εισαγωγή σταθερού σημαντικού ύψους κύματος και ίσου με 1m, ενώ για τη γωνία του κυματισμού σε σχέση με τη διεύθυνση κίνησης του πλοίου επιλέχθηκε να κυμαίνεται στο εύρος $90^o \div 180^o$[100] και με βήμα 30°. Στο εν λόγω πρόγραμμα, ο μετωπικός κυματισμός θεωρείται ότι έχει γωνία 180° ως προς το σκάφος. Επιπροσθέτως, εισήχθησαν και οι ταχύτητες του πλοίου (ως προς το νερό), αλλά και οι περίοδοι των κυματισμών (modal periods[101]) που συναντούσε (βλ. αναλυτικότερα ενότητα για operational data).

Επισημαίνεται ότι πρόγραμμα FRANK δεν υπολογίζει τη συνιστώσα της περίθλασης, κάτι που καθιστά τα αποτελέσματα για σχετικά μήκη κύματος ($\lambda/L_{pp}<0.5$) αναξιόπιστα. Ακόμη, κατά τον υπολογισμό των μη αρμονικών κυμάτων δεν πραγματοποιούνται οι υπολογισμοί της πρόσθετης αντίστασης κυματισμού για τους ακολουθούντες και γενικότερα για τους κυματισμούς με ευνοϊκές γωνίες, δηλαδή για εκείνους τους κυματισμούς που ενδεχομένως να συνεισφέρουν στην πρόωση.

Η σωστή περιγραφή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του πλοίου αποτελεί βασική παράμετρο για τη λειτουργία και εν τέλει την αξιοπιστία του προγράμματος FRANK. Μετά από κατάλληλη επεξεργασία αρχικά στο σχεδιαστικό πρόγραμμα AutoCAD, έγινε εισαγωγή των νομέων του πλοίου , ο καθένας από

---

[97] Θα μπορούσε πχ να προέρχονται από μακρινές καταιγίδες ή και από ανέμους που η πηγή τους βρίσκεται αρκετά μακριά από το πλοίο.

[98] Περίθλαση

[99] Ακτινοβολία κυμάτων.

[100] Ο λόγος που δεν επιλέχθηκαν γωνίες από $0^o \div 90^o$ (0°=ακολουθούν κυματισμός κατά το σύστημα του FRANK) σχετίζεται με το γεγονός ότι το FRANK κατά τον υπολογισμό της πρόσθετης αντίστασης των irreg έχει τροποποιηθεί κατά τέτοιον τρόπο (ο κώδικάς του) ώστε να μη λαμβάνονται υπ' όψιν οι «ευεργετικοί» άνεμοι, δηλαδή αυτή που δεν αυξάνουν συνήθως την αντίσταση. Μάλιστα, στο αρχείο εξόδου (.ver) τα αποτελέσματα στις εν λόγω γωνίες εμφανίζονται με *. Ακόμη, όταν το πλοίο συναντά beam κυματισμό (90°) η πρόσθετη αντίσταση είναι 0. Επίσης, κάτι που καθίσταται αναγκαίο να αναφερθεί είναι το γεγονός ότι το FRANK ασχολείται με μονοκατευθυντικούς (long crested) κυματισμούς.

[101] Βάσει τύπου για fully developed waves (Pierson- Moskowitz), βλ. παρακάτω.

τους οποίους αποτελούνταν από ένα σύνολο ισαπεχόντων σημείων (βλ. γραφήματα με offsets για κάθε κατάσταση φόρτωσης[102] σε προηγούμενη ενότητα της παρούσας έκθεσης), προκειμένου να περιγραφεί με ακρίβεια. Ταυτόχρονα, ορίστηκε η σχετική θέση εκάστου νομέα ως προς το μέσον του πλοίου. Έπειτα, εισήχθη η διαθέσιμη γεωμετρική πληροφορία για τα παρατροπίδια του υπό ανάλυση bulk carrier για κάθε κατάσταση φόρτωσης. Παράλληλα, για κάθε κατάσταση φόρτωσης υπήρξε απαίτηση για καθορισμό κάποιων παραμέτρων στο αρχείο εισαγωγής (.frk). Αυτές ήταν οι ακόλουθες:

- Συντελεστής γάστρας (C_B)
- Μήκος (απόσταση μεταξύ του πιο πρυμναίου και πιο πρωραίου νομέα)
- Πλάτος του πλοίου (B)
- Βύθισμα στο μέσον του πλοίου (T_M)
- Διαμήκης θέση κέντρου βάρους ως προς το μέσο του πλοίου (LCG)
- Κατακόρυφη θέση κέντρου βάρους ως προς την εκάστοτε ίσαλο (VCG)
- Μετακεντρικό ύψος (GM)
- Θέση γέφυρας

Λαμβάνοντας υπ' όψιν τα ανωτέρω, πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί της πρόσθετης αντίστασης κυματισμού, για διάφορα σενάρια ακανόνιστου κύματος. Σενάρια[103] τα οποία προέκυπταν από τα operational data (βάσει διαφόρων μετρητικών οργάνων στο πλοίο), που προμηθευτήκαμε από τη διαχειρίστρια ναυτιλιακή εταιρεία για το υπό ανάλυση bulk carrier. Τα αποτελέσματα που άγονταν από το πρόγραμμα FRANK αφορούσαν μοναδιαίο σημαντικό ύψος κύματος και αναγράφονταν σε μονάδες [kp]. Σε αυτό το σημείο, κρίνεται αναγκαία η αναφορά στο γεγονός ότι κατά την εκτίμηση της πρόσθετης αντίστασης κυματισμού θα πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν η προέλευση του κύματος, δηλαδή το εάν είναι ανεμογενής κυματισμός ή swell. Αυτό εκτός των άλλων[104] γίνεται μέσω του σημαντικού ύψους κύματος. Θα πρέπει, λοιπόν, να γίνει υπέρθεση των δυο αυτών συνιστωσών κύματος. Στην προκειμένη περίπτωση, στα operational data, έχει γίνει εκ των προτέρων από τη διαχειρίστρια ναυτιλιακή εταιρεία η εν λόγω υπέρθεση (τουλάχιστον το σημαντικό ύψος κύματος αναφέρεται σε συνολικό κυματισμό). Δηλαδή, στο δοθέν σημαντικό ύψος κύματος ανά χρονική στιγμή μέτρησης έχει ληφθεί υπ' όψιν η υπέρθεση ανεμογενούς κυματισμού και swell. Στη συνέχεια, η υπολογισθείσα από το Frank τιμή της πρόσθετης αντίστασης κυματισμού (για μοναδιαίο σημαντικό ύψος κύματος) πολλαπλασιαζόταν με το τετράγωνο του εκάστοτε σημαντικού ύψους κύματος[105] $H_{1/3}$, προκειμένου να προκύψει κάποια εκτίμηση για την πρόσθετη αντίσταση κυματισμού.

Παρακάτω παρατίθεται ενδεικτικό διάγραμμα των Pierson- Moskowitz για πλήρως αναπτυγμένη θάλασσα. Το διάγραμμα αυτό αναφέρεται όχι μόνο στην περίοδο κυματισμού, αλλά και στο σημαντικό ύψος κύματος, συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου που επικρατεί. Το εν λόγω διάγραμμα, λοιπόν, προέκυψε από τη συνάρτηση φασματικής πυκνότητας των Pierson- Moskowitz .

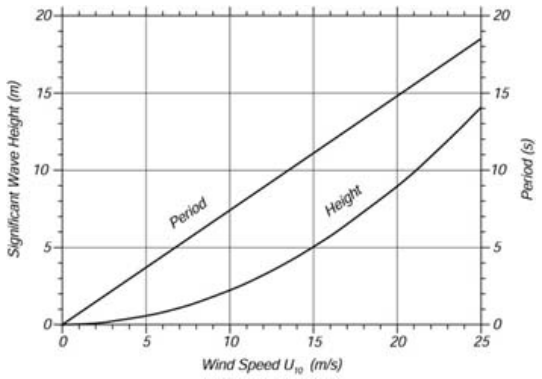
---

[102] Έμφορτη, ερματισμένη.

[103] Για διάφορες modal periods (Βασιστήκαμε στη σχέση των Pierson-Moskowitz, αν και σχετίζεται μόνο με ανεμογενείς κυματισμούς (ελλείψει στοιχείων για swell, αλλά και περίοδο, μήκος κύματος, αλλά και βάθους), σύμφωνα με την οποία: $T_P = 2\pi/\omega_p$, όπου: $\omega_p = 0.4013\sqrt{g/H_{1/3}}$) (για fully developed waves), ταχύτητες πλεύσης του πλοίου, διευθύνσεις κύματος.

[104] Διεύθυνση, ένταση, κτλ., για τα οποία δεν υπάρχουν στοιχεία στα operational data.

[105] Αυτό σχετίζεται και με το γεγονός ότι οι υπολογισμοί στο FRANK πραγματοποιήθηκαν για $H_{1/3}$ =1m.



ΣΧΗΜΑ 32: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ PIERSON- MOSKOWITZ ΓΙΑ ΠΛΗΡΩΣ ΑΝΑΠΤΥΓΜΕΝΗ ΘΑΛΑΣΣΑ

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται υπολογισμός της πρόσθετης αντίστασης κυματισμού με χρήση του προγράμματος Frank. Ταυτόχρονα, για καθαρά ποιοτικούς λόγους γίνεται εκτίμηση της εν λόγω συνιστώσας της αντίστασης με χρήση:

- του εμπειρικού τύπου του Kreitner, τον οποίο και προτείνει η ITTC
- της εμπειρικής μεθόδου Stawave2 που παρατίθεται στο παράρτημα Δ του ISO 15016:2015(E)
- της φόρμουλας που προτείνουν οι Liu-Papanikolaou, σε δημοσιευμένο report του 2020, και η οποία έχει προκύψει από ενδελεχή μελέτη στατιστικών στοιχείων από υπαρκτά πλοία.

<u>Επισημαίνεται ότι όλα τα διαγράμματα που παρατίθενται στην παρούσα ενότητα της διπλωματικής εργασίας και σχετίζονται με την εκτίμηση της πρόσθετης αντίστασης κυματισμού του υπό ανάλυση bulk-carrier, με τις διάφορες μεθόδους, αναφέρονται στην ταχύτητα υπηρεσίας του πλοίου (14.7kn).</u>

3.3.1.1 KREITNER

Η ITTC προτείνει μια απλοποιημένη μέθοδο για την εκτίμηση της πρόσθετης αντίστασης λόγω κυματισμού (ΔR_T), που βασίζεται στον εμπειρικό τύπο του Kreitner. Σύμφωνα με αυτόν:

$\Delta R_T = 0.64\xi_w^2 B^2 C_B \rho / L_{WL}$, όπου:

ξ_w: σημαντικό ύψος κύματος (μέχρι 1.5m με 2m πιο αξιόπιστος ο Kreitner), σε [m],

ρ: ειδικό βάρος νερού, σε [N/m^3],

L_{WL}: μήκος ισάλου, σε [m].

Γίνεται σαφές ότι, η παραπάνω σχέση αφορά την εκτίμηση πρόσθετης αντίστασης για μετωπικούς[106] κυματισμούς. Παρόλ' αυτά στο sea trials report του υπό ανάλυση πλοίου (bulk carrier), όπου χρησιμοποιείται η σχέση του Kreitner, προτείνεται σαν διόρθωση για την κυριαρχούσα γωνία του κυματισμού (α) ο συντελεστής: $0.667 + 0.333\cos(\alpha)$ [107], με $\alpha = 0^0$ για μετωπικό κυματισμό. Οπότε:

$$R_{AW} = 0.64\xi_w^2 B^2 C_B \rho / L_{WL}(\,0.667 + 0.333\cos(\alpha))$$

[106] Κυριαρχούσα διεύθυνση τυχαίων κυματισμών.

[107] Ο εν λόγω συντελεστής διόρθωσης γωνίας αναφέρεται στο sea trials report και πουθενά αλλού. Δεν αποτελεί δηλαδή πρόταση της ITTC, ούτε και τεκμηριώνεται βάσει στατιστικών ή πειραματικών μελετών. Ως εκ τούτου, θα μπορούσε να είναι και αυθαίρετος, κάτι που αυξάνει το ποσοστό αβεβαιότητας.

3.3.1.2 ISO 15016:2015(E)

Το παράρτημα Δ του ISO 15016:2015(E) είναι αποκλειστικά αφιερωμένο στην παρουσίαση μεθόδων εκτίμησης της πρόσθετης αντίστασης κυματισμού. Πιο συγκεκριμένα, το εν λόγω πρότυπο προτείνει τέσσερις μεθόδους για την εκτίμηση της εν λόγω συνιστώσας της αντίστασης που είναι οι εξής:

- Stawave 1: Αποτελεί απλοποιημένη μέθοδο (συνήθως ελλείψει επαρκών στοιχείων) για την περίπτωση περιορισμένων κινήσεων heave, pitch, λόγω περιορισμένων υψών κυμάτων. Ιδανικό, λοιπόν, για τα speed trials. Επίσης, αφορά long-crested waves, δηλαδή κύματα σαφούς διεύθυνσης διάδοσης.
- Stawave 2: Είναι εμπειρική μέθοδος και προσμετρά την επίδραση των heave, pitch. Αφορά, λοιπόν μεγαλύτερα μήκη κύματος από την προηγούμενη μέθοδο. Για αυτό το λόγο, μάλιστα, θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία. Για περεταίρω ανάλυση βλ. παρακάτω.
- Θεωρητική μέθοδος με απλοποιημένα tank tests για short waves. Συνήθως όταν Cp, Cwp καμπύλες διαθέσιμες (από stability booklet), βασιζόμενη στους τύπους των Maruo, Tsujimoto.
- Πραγματοποίηση seakeeping test για μοντέλο (ή και με αναλυτικές μεθόδους), που αποτελεί και την πιο αξιόπιστη μέθοδο. Τα πειράματα πραγματοποιούνται για αρμονικά κύματα διαφορετικών χαρακτηριστικών παραμέτρων (ίδιου ύψους (άρα και ενέργειας), αλλά διαφορετικών μηκών κυμάτων και γωνιών και σε διάφορες ταχύτητες). Από αυτά προκύπτει συνάρτηση μεταφοράς, με ολοκλήρωση της οποίας και αφού ληφθεί υπ' όψιν το φάσμα του κύματος διέγερσης προκύπτει η συνολική πρόσθετη αντίσταση.

Γενικώς, το πρότυπο ISO15016 βασίζει τον υπολογισμό στη διαδικασία, που περιγράφεται από την εξής σχέση: $\mathrm{R_{AW}} = 2\int_0^{2\pi}\int_0^{\infty}\frac{\mathrm{R_{wave}}(\omega,\alpha,\mathrm{V_s})}{\zeta_A^2}\mathrm{E}(\omega,\alpha)\mathrm{d}\omega\mathrm{d}\alpha$, όπου:

$\mathrm{R_{AW}}$: μέση πρόσθετη αντίσταση, σε [N], για μη αρμονικά κύματα (και για short- crested)

$\mathrm{R_{wave}}(\omega,\alpha,\mathrm{V_s})$: μέση αύξηση της αντίστασης για αρμονικά κύματα, σε [N].

ζ_A : πλάτος κύματος, σε [m].

ω : κυκλική συχνότητα αρμονικών κυμάτων, σε [rad/s].

α : γωνία μεταξύ διεύθυνσης πλοίου και κύματος «συνιστώσας», σε [rad], με 0 για μετωπικό κύμα.

$\mathrm{V_s}$: velocity through sea του πλοίου, σε [m/s].

E : το γωνιακό φάσμα, σε [m^2s].

$\mathrm{E} = S_n(\omega)\mathrm{G}(\alpha)$, όπου: $S_n(\omega)$ είναι η φασματική συνάρτηση, σε [m^2s], που για ανεμογενείς κυματισμούς λαμβάνεται ίσο με τον τροποποιημένο τύπο των Pierson-Moskowitz (έπειτα από μελέτες σχετικές με ωκεανογραφία), που έχει υιοθετηθεί από την ITTC το 1978 και είναι ο ακόλουθος:

$\mathrm{S_n}(\omega) = \frac{\mathrm{A_{fw}}}{\omega^5}\mathrm{e}^{-\frac{\mathrm{B_{fw}}}{\omega^4}}$, με $\mathrm{A_{fw}} = 173\frac{\mathrm{H_{1/3}^2}}{\mathrm{T_{01}^4}}, \mathrm{B_{fw}} = \frac{691}{\mathrm{T_{01}^4}}, \mathrm{T_{01}} = 2\pi\frac{\mathrm{m_0}}{\mathrm{m_1}}$ ($\mathrm{T_{01}}$: μέση περίοδος), όπου:

$\mathrm{H_{1/3}}$: σημαντικό ύψος κύματος, σε [m],

ω: κυκλική συχνότητα αρμονικών κυμάτων, σε [rad/s],

$\mathrm{m_n}$: n-οστή ροπή φασματικής συνάρτησης (όπου ενδεικτικά $\mathrm{H_{1/3}} = 4\sqrt{\mathrm{m_0}}$).

Η παραπάνω σχέση αφορά έντονα «ανακατεμένους» κυματισμούς που διαδίδονται προς διάφορες διευθύνσεις (short-crested), εξ ου και η ολοκλήρωση ως προς τη γωνία (α).

Επισημαίνεται ότι, η φασματική συνάρτηση έχει σαν ανεξάρτητη μεταβλητή τη κυκλική συχνότητα (ω) και σαν παραμέτρους το σημαντικό ύψος κύματος ($H_{1/3}$) και την μέση περίοδο (T_{01}). Στην παρούσα εργασία στους υπολογισμούς, έχει θεωρηθεί ότι $H_{1/3} = 1m$, και ότι η μέση περίοδος λαμβάνει διάφορες τιμές, προκειμένου να παρουσιαστούν τα διαγράμματα της πρόσθετης αντίστασης κυματισμού (irregular) συναρτήσει του λόγου μήκους κύματος προς μήκους μεταξύ καθέτων. Η περίοδος συνδέεται μέσω της, γνωστής από την Θεωρία Υδροδυναμικής, εξίσωσης διασποράς, που για βαθύ νερό αποκτά την εξής μορφή: $\lambda = \frac{gT^2}{2\pi}$. Ως εκ τούτου για κάθε φασματική συνάρτηση θα πρέπει να ελεγχθεί κατά πόσον ικανοποιείται η ισότητα $4\sqrt{m_0} = 1$ και $T_{01} = 2\pi\frac{m_0}{m_1}$, κάτι που γίνεται, καθιστώντας έτσι την τροποποιημένη φασματική συνάρτηση των Pierson- Moskowitz (ITTC 1978) αποδεκτή.

Γενικώς η εν λόγω ανάλυση (ISO15016) έχει την εξής βάση, όπως γίνεται αισθητό και από τα προαναφερθέντα: Θεωρείται ότι άπειρα αρμονικά κύματα διαφορετικής διεύθυνσης (α), διαφορετικής κυκλικής συχνότητας (ω), πλάτους (ζ_A[108]) συντίθενται προκειμένου να προκύψει ο τελικός, πραγματικός τυχαίος κυματισμός (irregular). Η πρόσθετη αντίσταση που οφείλεται σε κάθε αρμονικό κύμα, δηλαδή η $R_{wave}(\omega, \alpha, V_s)$ ανάγεται μέσω καταλλήλων πολλαπλασιασμών και ολοκληρώσεων (βλ. παραπάνω σχέσεις) στη συνολική (μέση) πρόσθετη αντίσταση τυχαίου κυματισμού. Κατ' ουσίαν το R_{wave}/ζ_A^2 αποτελεί μια συνάρτηση μεταφοράς (RAO) που αναφέρεται στα αρμονικά κύματα- συνιστώσες. Μάλιστα, η μέθοδος Stawave-2, που θα περιγραφεί και παρακάτω, υπολογίζει συνάρτηση μεταφοράς. Προκειμένου να προκύψει από τη συνάρτηση μεταφοράς η πρόσθετη αντίσταση τυχαίου κυματισμού απαιτείται η γνώση της φασματικής συνάρτησης, που περιγράφεται και παραπάνω στην έκθεση. Επειδή οι πραγματικοί κυματισμοί είναι τυχαίοι και όχι αρμονικοί, η περιγραφή τους γίνεται κυρίως με πιθανοθεωρητικό τρόπο, δηλαδή λογίζονται σαν στοχαστικά μοντέλα. Αποδεικνύεται, εύκολα, βάσει της θεωρίας των πιθανοτήτων ότι, για κάθε κατάσταση (συγκεκριμένη παρεχόμενη ενέργεια από τη διέγερση), υπάρχουν κάποιες χαρακτηριστικές παράμετροι. Δηλαδή κάποια μεγέθη μπορούν να θεωρηθούν χωρίς βλάβη της γενικότητας ή και είναι σταθερά (διασπορά ή και μέσες τιμές). Έτσι, σε μια συγκεκριμένη κατάσταση θάλασσας (βλ. αντίστοιχη κλίμακα (βλ. **ΠΙΝΑΚΑΣ 11**)), μια παράμετρος που σχεδόν πάντα (συνδέεται με ενέργεια) είναι σταθερή είναι το σημαντικό ύψος κύματος, ενδεχομένως και κάποια (χαρακτηριστική) περίοδο (εξαρτάται και από το κατά πόσον είναι αναπτυγμένος ο κυματισμός). Το σημαντικό ύψος κύματος συνδέεται με το μέγεθος της ενέργειας (βλ. σχέση με διασπορά) που παρέχεται από τη διέγερση στην θάλασσα, προκαλώντας τον κυματισμό. Ενώ η περίοδος συνδέεται με το ρυθμό με τον οποίο η διέγερση προσδίδει ενέργεια, αλλά και το εύρος της ζώνης της συνάρτησης της φασματικής πυκνότητας. Το φάσμα, από μαθηματικής άποψης, αποτελεί το μετασχηματισμό Fourier της συνάρτησης της αυτοσυνδιακύμανσης. Αναφέρεται στο πεδίο των συχνοτήτων, κάτι που καθιστά τη μελέτη των κυματισμών πιο απλή, κατανοητή, αλλά και απαλλαγμένη από στοιχεία των μεταβατικών φαινομένων (σε σχέση με το πεδίο του χρόνου, όπου εκτός των άλλων η μελέτη δεν αφορά πεπερασμένο πεδίο). Η συνάρτηση αυτοσυνδιακύμανσης συνδέεται άμεσα με τη διασπορά (ως γνωστόν από θεωρία πιθανοτήτων). Καθ' αυτόν τον τρόπο το φάσμα συνδέεται με την ενέργεια διέγερσης του κυματισμού. Μάλιστα, το εμβαδόν που περικλείεται από τη φασματική συνάρτηση και τον άξονα των συχνοτήτων ισούται ποσοτικά με την εν λόγω ενέργεια, άρα και με το τετράγωνο κάποιου ισοδύναμου πλάτους κυματισμού.

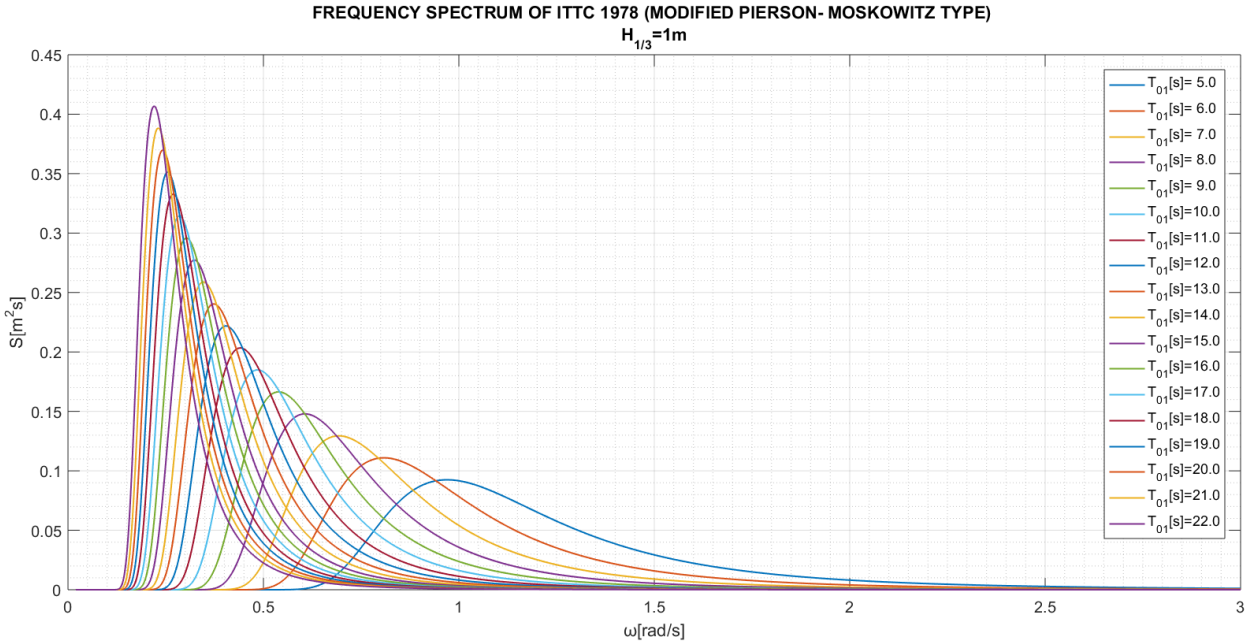
[108] Συνήθως ενός μέτρου, αλλά ούτως ή άλλως απαλείφεται.

Ενώ $G(\alpha)$, που είναι τη γωνιακή συνάρτηση διαταραχής, αποτελεί διόρθωση του φάσματος, αν αυτό αφορά μετωπικό κύμα, όπως εδώ. Το εν λόγω πρότυπο ISO προτείνει:

$$G(\alpha) = \frac{2^{2s}}{\pi}\frac{\Gamma^2(s+1)}{\Gamma(2s+1)}\cos^{2s}(\alpha - \theta_m), \text{ για } -\pi/2 \leq \alpha - \theta_m \leq \pi/2$$

Σύμφωνα με την ανωτέρω σχέση η $G(\alpha)$ εξαρτάται από τρεις παραμέτρους. Την παράμετρο s, όπου s=1 για ανεμογενή κυματισμό, s=75 για swell. Τον όρο θ_m που αποτελεί την κυριαρχούσα γωνία του πραγματικού, συνολικού κυματισμού (με $\theta_m = 0$ rad για μετωπικό κυματισμό). Και την ανεξάρτητη μεταβλητή α που είναι η γωνία κάθε αρμονικού κύματος σε σχέση με το μετωπικό ($\alpha = 0$rad για μετωπικό κύμα). Ακόμη, το Γ αποτελεί τη συνάρτηση γάμμα.

Παρακάτω παρατίθενται καμπύλες της συνάρτησης φασματικής πυκνότητας ανεμογενούς κυματισμού (κατά τον τροποποιημένο τύπο των Pierson- Moskowitz της ITTC 1978), χωρίς τη γωνιακή διόρθωση, για διάφορες περιόδους T_{01} (για το εύρος [5,22]sec[109]) και για $H_{1/3} = 1$m.



ΣΧΗΜΑ 33: ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΟΥΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥ (ITTC 1978) ΓΙΑ $H_{1/3}$=1m

Βάσει του παραπάνω διαγράμματος, όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της μέσης περιόδου T_{01} στην οποία αναφέρεται μια καμπύλη φάσματος τόσο πιο εύκολα μπορεί να χαρακτηριστεί ως φάσμα στενής λωρίδας, κάτι που σημαίνει ότι υπάρχει μια «σαφώς» κυριαρχούσα κυκλική συχνότητα, για τη δεδομένη κατάσταση θάλασσας. Αντιθέτως, όσο μικρότερη είναι η τιμή της μέσης περιόδου T_{01} στην οποία αναφέρεται μια καμπύλη φάσματος τόσο πιο εύκολα μπορεί να χαρακτηριστεί ως φάσμα ευρείας ζώνης, κάτι που σημαίνει ότι <u>δεν</u> υπάρχει μια «σαφώς» κυριαρχούσα κυκλική συχνότητα, για τη δεδομένη κατάσταση θάλασσας. Κάθε άλλο.

[109] Αντιστοιχεί στο εύρος $\lambda/L_{pp} \approx [0.15,3]$ για βαθύ νερό.

Βάσει των ανωτέρω η R_{AW} (που εν τέλει υπολογίζεται) αποτελεί μια μέση τιμή που αναφέρεται, όμως, σε συγκεκριμένα $H_{1/3}, T_{01}, \theta_m$. Μάλιστα, προσμετρώνται και οι ανεμογενείς κυματισμούς, αλλά και τα swells (στην τελευταία περίπτωση αλλάζει το φάσμα).

Παρακάτω πραγματοποιείται ανάλυση της STAWAVE-2, η οποία και χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία.

3.3.1.2.1 STAWAVE-2

Η STAWAVE-2, που αναπτύχθηκε από τη MARIN και παρατίθεται στο πρότυπο ISO15016:2015(E), αποτελεί εμπειρική μέθοδο και έχει αναπτυχθεί για να υπολογίζει συναρτήσεις μεταφοράς (βάσει του R_{wave} (βλ. παραπάνω για επεξήγηση) της μέσης δηλαδή πρόσθετης αντίστασης λόγω αρμονικών μετωπικών κυμάτων, με κύριες παραμέτρους τις διαστάσεις και την ταχύτητα του πλοίου. Επίσης, αφορά long-crested irregular waves, δηλαδή μη αρμονικά κύματα σαφούς διεύθυνσης διάδοσης. Μάλιστα, η εφαρμογή της μεθόδου περιορίζεται σε κύματα με διεύθυνση ±45° σε σχέση με τους μετωπικούς. Τα κύματα σε αυτό το εύρος γωνιών λογίζονται σαν μετωπικά, ενώ τα κύματα έξω από αυτό το παραλείπονται. Η εκτίμηση της επιπρόσθετης αντίστασης του τυχαίου κυματισμού πραγματοποιείται με χρήση του εξής ολοκληρώματος: $R_{AWL} = 2\int_0^{\infty} \frac{R_{wave}(\omega, V_s)}{\zeta_A^2} S_n(\omega) d\omega$. Το εν λόγω ολοκλήρωμα, σε σχέση με το γενικού τύπου που αφορά short-crested κύματα, δεν περιλαμβάνει ολοκλήρωση ως προς την εκάστη γωνία (α) των επιμέρους κυμάτων, ούτε και τη γωνιακή συνάρτηση $G(\alpha)$ διόρθωσης του φάσματος. Γίνεται, λοιπόν, σαφές ότι αφορά τον υπολογισμό πρόσθετης αντίστασης μη αρμονικών κυμάτων, που είναι long-crested. Παράλληλα, τίθενται και άλλοι περιορισμοί στην εφαρμογή της εν λόγω μεθόδου (που για το υπό ανάλυση bulk- carrier τηρούνται), οι οποίοι είναι οι κάτωθι:

- $75(m) \leq L_{pp}$,
- $4.0 \leq \frac{L_{pp}}{B} \leq 9.0$,
- $2.2 \leq \frac{B}{T_M} \leq 9.0$,
- $0.10 < Fr < 0.30$,
- $0.50 < C_B < 0.90$.

Σύμφωνα με τη STAWAVE-2, η εμπειρική συνάρτηση μεταφοράς R_{wave} αναλύεται σε δυο συνιστώσες: στη μέση πρόσθετη αντίσταση λόγω της περίθλασης (R_{AWRL}) και την αντίστοιχη λόγω εξαναγκασμένων ταλαντώσεων (R_{AWML}[110]). Οπότε: $R_{wave} = R_{AWRL} + R_{AWML}$. Οι υπολογισμοί γίνονται ως εξής:

$R_{AWML} = 4\rho_s g \zeta_A^2 \frac{B^2}{L_{pp}} \overline{r_{aw}}(\omega)$, με:

$$\overline{r_{aw}}(\omega) = \overline{\omega}^{b_1} e^{\frac{b_1}{d_1}(1-\overline{\omega}^{d_1})} \alpha_1 Fr^{1.5} e^{-3.5Fr}, \ \overline{\omega} = \frac{\sqrt{\frac{L_{pp}}{g}}\sqrt[3]{k_{yy}} Fr^{0.143}}{1.17}\omega, \ \alpha_1 = 60.3 C_B^{1.34},$$

$$b_1 = \begin{cases} 11.0, \text{για } \overline{\omega} < 1 \\ -8.5, \text{για } \overline{\omega} \geq 1 \end{cases}, \ d_1 = \begin{cases} 14.0, \text{ για } \overline{\omega} < 1 \\ -566\left(L_{pp}/B\right)^{-2.66}, \text{ για } \overline{\omega} \geq 1 \end{cases}, \text{ και:}$$

$R_{AWRL} = \frac{1}{2}\rho_s g \zeta_A^2 B^2 \alpha_1(\omega)$, με:

[110] Αυτή η συνιστώσα δε λαμβάνεται υπ' όψιν από τη μέθοδο STAWAVE-1, αμελώντας καθ' αυτό τον τρόπο την επίδραση των κινήσεων heave, pitch. Κάτι τέτοιο ισχύει μόνο για «χαμηλής ενέργειας» κύματα, συνθήκες που παρουσιάζονται κατά τη διεξαγωγή των sea trials, όχι όμως κατά την πλεύση του ποντοπόρου πλοίου σε ανοικτή θάλασσα. Αυτός είναι και ο λόγος που δε λαμβάνεται υπ' όψιν η STAWAVE-1 στην παρούσα εργασία.

$\alpha_1(\omega) = \frac{\pi^2 I_1^2(1.5kT_M)}{\pi^2 I_1^2(1.5kT_M)+K_1^2(1.5kT_M)} f_1$, $f_1 = 0.692\left(\frac{V_s}{\sqrt{T_M g}}\right)^{0.769} + 1.81C_B^{6.95}$, όπου:

ρ_s: πυκνότητα θαλασσινού νερού, σε φυσική κλίμακα, σε [kg/m^3],

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

ζ_A : πλάτος κύματος, σε [m],

L_{pp}: μήκος μεταξύ καθέτων, σε [m],

T_M: μέσο βύθισμα πλοίου, σε [m],

C_B : συντελεστής γάστρας, [-],

Fr: αριθμός Froude, [-],

V_s: ταχύτητα πλοίου σε σχέση με νερό (μετρούμενη με speed logs), σε [m/s],

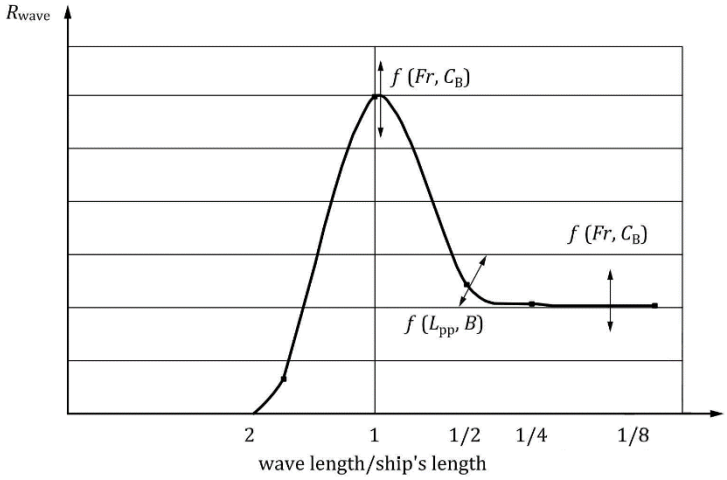
k_{yy}: λόγος ακτίνας αδρανείας ως προς pitch (συνήθως λαμβάνεται ως το 25% του L_{pp}) προς L_{pp}, [-],

I_1 : τροποποιημένη συνάρτηση Bessel 1^{ου} είδους, 1^{ης} τάξης,

K_1 : τροποποιημένη συνάρτηση Bessel 2^{ου} είδους, 1^{ης} τάξης,

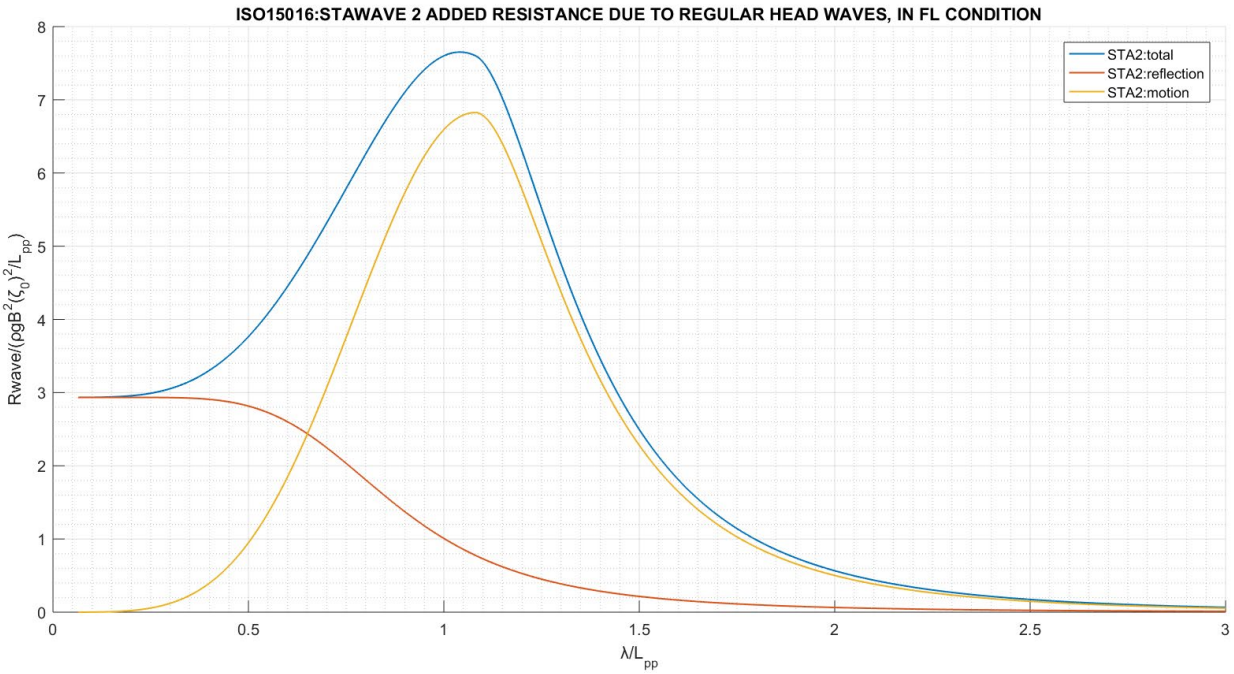
k: αριθμός κύματος, σε [rad/m].

Παρακάτω παρατίθεται σχήμα με την αναμενόμενη (γενική) μορφή του διαγράμματος $R_{wave} - \lambda/L_{pp}$, όπως παρατίθεται στο πρότυπο ISO15016:2015(E). Μάλιστα, η εν λόγω καμπύλη είναι παραμετρική.

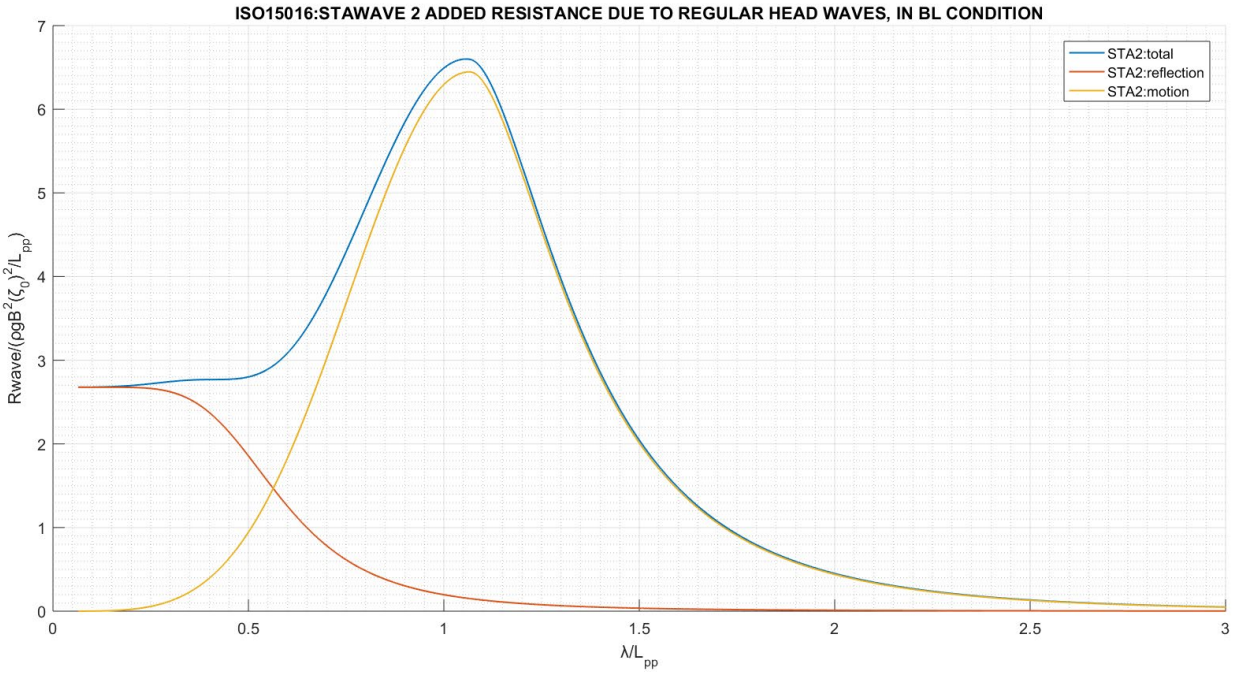


ΣΧΗΜΑ 34: ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ ΠΡΟΣΘΕΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΣΕ ΑΡΜΟΝΙΚΟ ΚΥΜΑ ΚΑΤΑ STAWAVE2

Παρακάτω παρατίθενται διαγράμματα του αδιάστατου συντελεστή πρόσθετης αντίστασης κυματισμού ($R_{wave}/(\rho g B/L_{pp}\zeta_A^2)$) συναρτήσει του λόγου μήκους κύματος προς μήκος μεταξύ καθέτων (λ/L_{pp}). Μάλιστα, τα εν λόγω διαγράμματα αφορούν regular μετωπικό κυματισμό και αφορούν τις δυο υπό μελέτη καταστάσεις φόρτωσης (FL, BL) του υπό ανάλυση bulk- carrier. Επισημαίνεται ότι στα εν λόγω διαγράμματα παρατίθενται και οι καμπύλες των συνιστωσών (περίθλασης και αγόμενης από εξαναγκασμένη ταλάντωση πλοίου) της επιπρόσθετης αντίστασης κυματισμού.



ΣΧΗΜΑ 35: ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΑΔΙΑΣΤΑΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΠΡΟΣΘΕΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΣΥΝΙΣΤΩΣΩΝ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΛΟΓΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΟΣ ΠΡΟΣ ΜΗΚΟΣ L_{pp} <3 , ΜΕΤΩΠΙΚΟ ΑΡΜΟΝΙΚΟ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟ, ΣΤΗΝ FL ΚΑΤΑ STAWAVE 2



ΣΧΗΜΑ 36: ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΑΔΙΑΣΤΑΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΠΡΟΣΘΕΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΣΥΝΙΣΤΩΣΩΝ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΛΟΓΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΟΣ ΠΡΟΣ ΜΗΚΟΣ L_{pp} <3 , ΜΕΤΩΠΙΚΟ ΑΡΜΟΝΙΚΟ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟ, ΣΤΗΝ BL ΚΑΤΑ STAWAVE 2

Από σύγκριση των διαγραμμάτων (που παρατίθενται στα παραπάνω σχήματα: **ΣΧΗΜΑ 34**, **ΣΧΗΜΑ 35**, **ΣΧΗΜΑ 36**) διαπιστώνεται ότι η μορφή των αντίστοιχων καμπυλών, που αναφέρονται στη συνολική πρόσθετη αντίσταση και που προκύπτουν για το υπό ανάλυση bulk- carrier είναι η αναμενόμενη. Και τούτο, διότι παρουσιάζουν μέγιστη τιμή (κορυφή) για λ/L_{pp} =1 (όπου κυριαρχεί η συνιστώσα ακτινοβολίας), για λ/L_{pp} <0.5 οι εν λόγω καμπύλες οριζιντιοποιούνται[111], αποκτώντας δηλαδή σταθερή τιμή, που εξαρτάται μόνο από τις τιμές των Fr, C_B (στη FL η εν λόγω σταθερή τιμή είναι μεγαλύτερη από ό,τι στη BL), (επίδραση σχεδόν αποκλειστικά από συνιστώσα περίθλασης). Ακόμη, για λ/L_{pp} ≥2.5 οι καμπύλες σχεδόν μηδενίζονται και τείνουν «ασυμπτωτικά» στον οριζόντιο άξονα. Επιπροσθέτως, γίνεται αντιληπτό ότι στην έμφορτη κατάσταση η επίδραση της περίθλασης, τόσο στην περιοχή της κορυφής των καμπυλών, όσο και στην περιοχή της οριζόντιας, σταθερής τιμής, για μικρά (σχετικά) μήκη κύματος, είναι μεγαλύτερη και πιο ουσιαστική από ό,τι στην ερματισμένη κατάσταση. Αυτά είναι μερικά από τα πιο σημαντικά συμπεράσματα που άγονται από τα ανωτέρω διαγράμματα.

3.3.1.3 LIU- PAPANIKOLAOU

Στη δημοσιευμένη μελέτη των Liu- Papanikolaou του 2020, παρατίθεται εμπειρική μέθοδος για τον προσδιορισμό της πρόσθετης αντίστασης αρμονικών κυμάτων διαφόρων διευθύνσεων σε σχέση με το πλοίο (και όχι μόνο για μετωπικά ή ακολουθούντα κύματα), βελτιώνοντας έτσι παλαιότερες δημοσιευμένες φόρμουλές τους (2015, 2016). Μάλιστα, έχουν πραγματοποιηθεί για διάφορα σενάρια υπολογισμοί σφαλμάτων της νέας αυτής μεθόδου, καθιστώντας την έτσι πιο αποτελεσματική. Προκειμένου να πραγματοποιηθούν τα ανωτέρω, οι Liu- Papanikolaou βασίστηκαν στη δημιουργία βάσης δεδομένων[112] με διάφορα είδη, μεγέθη πλοίων, αποτελούμενης από στοιχεία των τελευταίων πέντε δεκαετιών, είτε δημοσιευμένων και αναλυτικών (ως προς μορφή γαστρών) πειραματικών μελετών, είτε αδημοσίευτων, είτε άλλων πρόσθετων δεδομένων (από joint industry projects[113]). Η μελέτη αφορά εκτίμηση της εν λόγω πρόσθετης αντίστασης τόσο για ερματισμένη, όσο και για έμφορτη κατάσταση. (Για περίθλαση βασίστηκαν στον Faltinsen 1980 με διορθώσεις βάσει της βάσης δεδομένων).

Παρακάτω παρατίθενται οι σχέσεις, που προκύπτουν από regression analysis, και οι οποίες οδηγούν στην εκτίμηση της πρόσθετης αντίστασης λόγω αρμονικού κυματισμού, βάσει του report των Liu-Papanikolaou 2020. Επισημαίνεται, μάλιστα, ότι ο δείκτης R αναφέρεται στη συνιστώσα της περίθλασης (reflection= diffraction) και ότι ο δείκτης M αναφέρεται στη συνιστώσα της ακτινοβολίας (radiation, motion induced). Ακόμη, οι παρακάτω σχέσεις δύναται να αποτελέσουν τη βάση για εκτίμηση τόσο τυχαίων κυματισμών (short-crested, random), όσο και μονοκατευθυντικών (long- crested) διαφόρων κατευθύνσεων, λόγω της επίδρασής τους από τη γωνία α. Στην παρούσα εργασία, λόγω του ότι σκοπός ήταν η σύγκριση με τα αποτελέσματα που άγονται από το πρόγραμμα FRANK, οι υπολογισμοί περιορίστηκαν σε μονοκατευθυντικούς κυματισμούς, κάτι που συμβαίνει και με το FRANK.

$$R^1_{AWR} = \frac{2.25}{4}\rho g B \zeta_A^2 \alpha_{T^*}\left(\sin^2(E_1-\alpha) + \frac{2\omega_0 U^{114}}{g}(\cos E_1 \cos(E_1-\alpha) - \cos\alpha)\right)\left(\frac{0.87}{C_B}\right)^{(1+4\sqrt{Fr})f(\alpha)}$$, για

$E_1 \le \alpha \le \pi$,

$$R^2_{AWR} = \frac{2.25}{4}\rho g B \zeta_A^2 \alpha_{T^*}\left(\sin^2(E_1+\alpha) + \frac{2\omega_0 U}{g}(\cos E_1 \cos(E_1+\alpha) - \cos\alpha)\right)\left(\frac{0.87}{C_B}\right)^{(1+4\sqrt{Fr})f(\alpha)}$$, για

---

[111] Πρόταση ITTC. Βέβαια, δεν είναι ακριβώς οριζόντια γραμμή, μιας και υπάρχουν διακυμάνσεις, λόγω απόσβεσης.
[112] Αποτελούμενης από 3000 στοιχεία για 130 πλοία (βλ. report Liu-Papanikolaou 2020). Από αυτά τα 1500 αναφέρονται σε μετωπικά κύματα και τα υπόλοιπα σε άλλες κατευθύνσεις.
[113] Μνημόνια συνεργασίας.
[114] $V_s = U\ [\frac{m}{s}]$.

$\pi - E_1 \leq \alpha \leq \pi$,

$$R_{AWR}^3 = -\frac{2.25}{4}\rho g B \zeta_A^2 \alpha_{T^*}\left(\sin^2(E_2+\alpha) + \frac{2\omega_0 U}{g}(\cos E_2 \cos(E_2+\alpha) - \cos\alpha)\right), \text{ για } \pi - E_2 \geq \alpha \geq 0 ,$$

$$R_{AWR}^4 = -\frac{2.25}{4}\rho g B \zeta_A^2 \alpha_{T^*}\left(\sin^2(E_2-\alpha) + \frac{2\omega_0 U}{g}(\cos E_2 \cos(E_2-\alpha) - \cos\alpha)\right), \text{ για } E_2 \geq \alpha \geq 0 ,$$

$$R_{AWM} = 4\rho_s g \zeta_A^2 \frac{B^2}{L_{pp}} \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \bar{\omega}^{b_1} e^{\frac{b_1}{d_1}(1-\bar{\omega}^{d_1})} ,$$

$$\bar{\omega} = 2.142\sqrt{\frac{L_{pp}}{\lambda}}\sqrt[3]{k_{yy}}\left(1 - \frac{0.111}{C_B}\ln\left(\frac{B}{2.75T_{max}}\right)\right)\left(\frac{C_B}{0.65}\right)^{0.17}\left((-1.377Fr^2 + 1.157Fr)|\cos\alpha| + \frac{0.618(13+\cos(2\alpha))}{14}\right),$$

$$b_1 = \begin{cases} 11.0, \text{ για } \bar{\omega} < 1 \\ -8.5, \text{ για } \bar{\omega} \geq 1 \end{cases}, \quad d_1 = \begin{cases} 566\left(L_{pp}C_B/B\right)^{-2.66}, & \text{ για } \bar{\omega} < 1 \\ -566\left(L_{pp}/B\right)^{-2.66}\left(4 - \frac{125\tan^{-1}|T_a - T_f|}{L_{pp}}\right), & \text{ για } \bar{\omega} \geq 1 \end{cases},$$

$$\alpha_2 = \begin{cases} 0.0072 + 0.1676Fr, \text{ για } Fr < 0.12 \\ Fr^{1.5}\exp(-3.5Fr), \text{ για } Fr \geq 0.12 \end{cases}, \quad \alpha_3 = 1 + 28.7\tan^{-1}\left(\frac{|T_a - T_f|}{L_{pp}}\right),$$

$$\alpha_1 = \begin{cases} 60.3C_B^{1.34}\left(4k_{yy}\right)^2\left(\frac{0.87}{C_B}\right)^{-(1+Fr)\cos(\alpha)}\left(\ln\left(\frac{B}{T_{max}}\right)\right)^{-1}\frac{(1-2\cos\alpha)}{3}, & \frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \pi \\ \text{γραμμική παρεμβολή μεταξύ ακολουθούντος και κύματος "beam"}, & 0 < \alpha < \frac{\pi}{2} \\ f\left(U, V_g\right), & \alpha = 0 \end{cases},$$

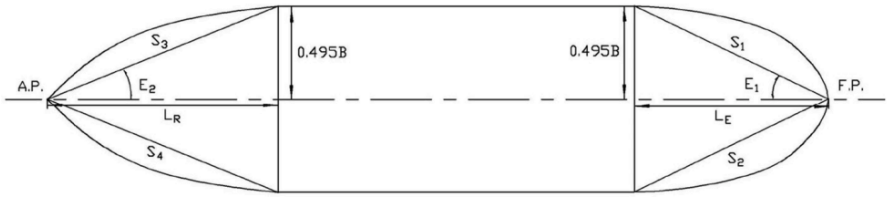
Όσον αφορά τον ακολουθούντα κυματισμό (α=0) ο συντελεστής α_1 εξαρτάται από το βάθος του νερού, που εδώ θεωρείται άπειρο.

$$f(\alpha) = \begin{cases} -\cos\alpha, & \pi - E_1 \leq \alpha \leq \pi \\ 0, & \alpha \leq \pi - E_1 \end{cases},$$

$$\alpha_{T^*} = \begin{cases} 1 - e^{-4\pi\left(\frac{T^*}{\lambda} - \frac{T^*}{2.5L_{pp}}\right)}, & \lambda/L_{pp} \leq 2.5 \\ 0, & \lambda/L_{pp} > 2.5 \end{cases},$$

$$T^* = T_{max}, \text{ για } S_1, S_2 \text{ segments}, \quad T^* = T_{max}\begin{cases} 4 + \sqrt{|\cos\alpha|}, & C_B \leq 0.75 \\ 2 + \sqrt{|\cos\alpha|}, & C_B > 0.75 \end{cases}, \text{ για } S_3, S_4 \text{ segments} .$$

Παρακάτω, παρατίθεται σχήμα, αντλούμενο από το προαναφερθέν report των Liu- Papanikolaou 2020 και στο οποίο επεξηγούνται τα σύμβολα S_1, S_2, S_3, S_4, αλλά και οι γωνίες E_1, E_2.



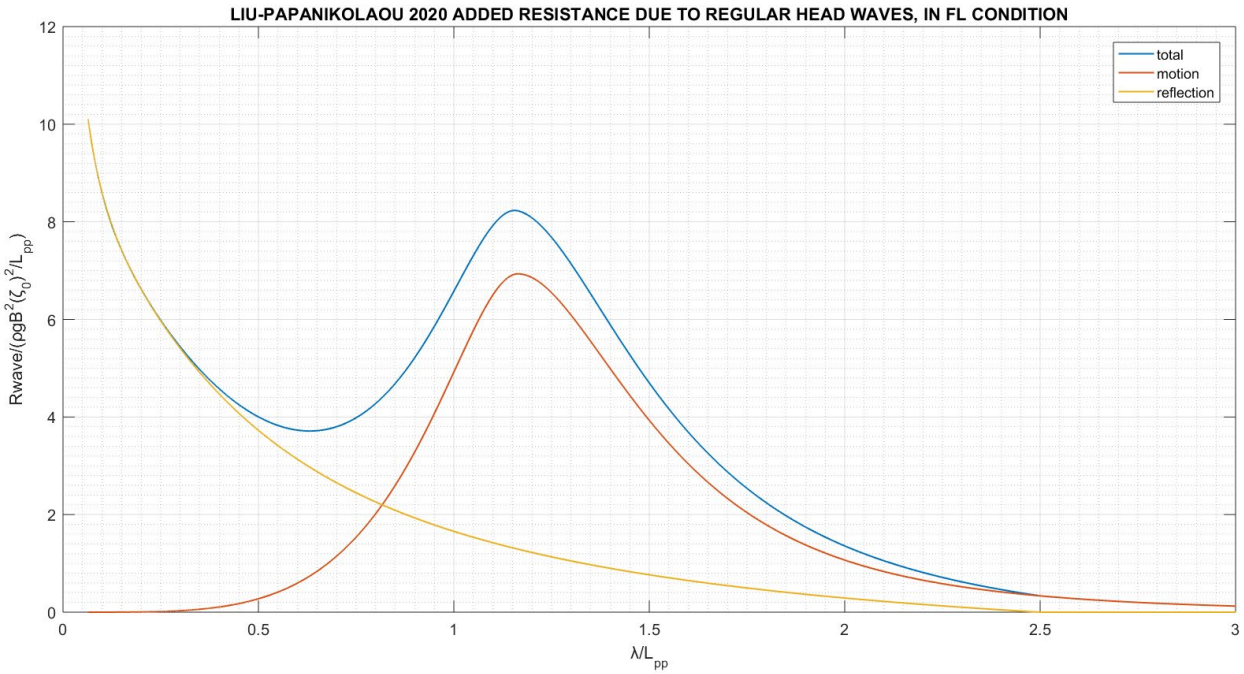
ΣΧΗΜΑ 37: ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΙΣΑΛΟΥ ΚΑΤΑ LIU- PAPANIKOLAOU

$$R_{AWR} = \sum_{i=1}^{4} R_{AWR}^i$$

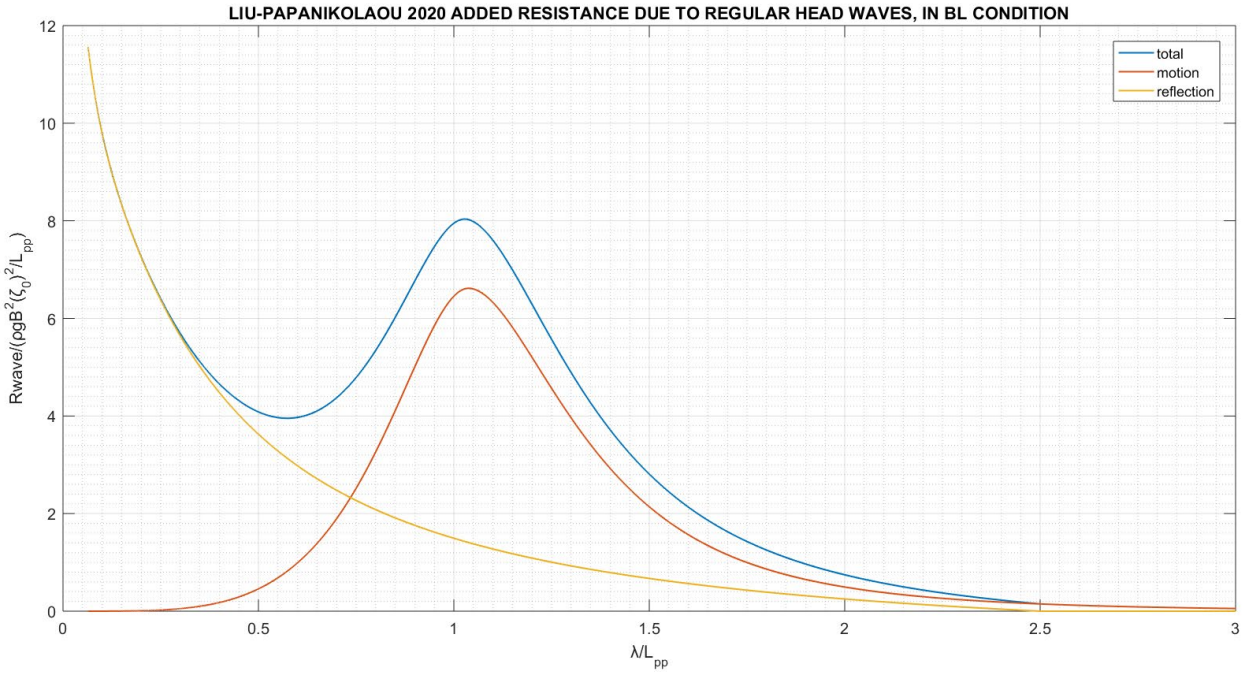
$$R_{wave} = R_{AWM} + R_{AWR}$$

Επισημαίνεται ότι, χάριν απλότητας, για τα περισσότερα σύμβολα των μεγεθών που παρατίθενται στις παραπάνω σχέσεις παραλείπεται η επεξήγησή τους και τούτο γιατί, τα περισσότερα εξ αυτών χρησιμοποιούνται και στη μέθοδο Stawave- 2, όπου και επεξηγούνται αναλυτικά.

Παρακάτω παρατίθενται διαγράμματα του αδιάστατου συντελεστή πρόσθετης αντίστασης κυματισμού ($R_{wave}/(\rho g B/L_{pp}\zeta_A^2)$) συναρτήσει του λόγου μήκους κύματος προς μήκος μεταξύ καθέτων (λ/L_{pp}). Μάλιστα, τα εν λόγω διαγράμματα αφορούν regular μετωπικό κυματισμό και αφορούν τις δυο υπό μελέτη καταστάσεις φόρτωσης (FL, BL) του υπό ανάλυση bulk- carrier. Επισημαίνεται ότι στα εν λόγω διαγράμματα παρατίθενται και οι καμπύλες των συνιστωσών (περίθλασης και αγόμενης από εξαναγκασμένη ταλάντωση πλοίου) της επιπρόσθετης αντίστασης κυματισμού.

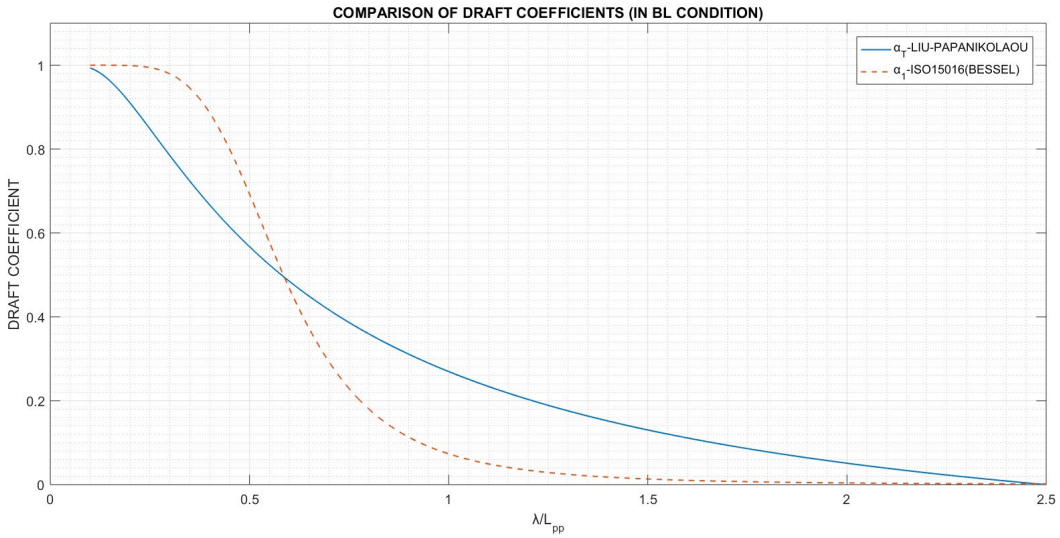


ΣΧΗΜΑ 38: ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΑΔΙΑΣΤΑΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΠΡΟΣΘΕΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΣΥΝΙΣΤΩΣΩΝ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΛΟΓΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΟΣ ΠΡΟΣ ΜΗΚΟΣ L_{pp} <3 , ΜΕΤΩΠΙΚΟ ΑΡΜΟΝΙΚΟ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟ, ΣΤΗΝ FL ΚΑΤΑ LIU- PAPANIKOLAOU 2020



ΣΧΗΜΑ 39: ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΑΔΙΑΣΤΑΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΠΡΟΣΘΕΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΣΥΝΙΣΤΩΣΩΝ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΛΟΓΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΟΣ ΠΡΟΣ ΜΗΚΟΣ L_{pp} <3 , ΜΕΤΩΠΙΚΟ ΑΡΜΟΝΙΚΟ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟ, ΣΤΗΝ BL ΚΑΤΑ LIU- PAPANIKOLAOU 2020

Παρατηρώντας τα ανωτέρω διαγράμματα (βλ. **ΣΧΗΜΑ 38**, **ΣΧΗΜΑ 39**) γίνεται σαφές ότι δεν υπάρχουν ουσιαστικές διαφορές με τα αντίστοιχο της μεθόδου Stawave 2. Δηλαδή, για λ/L_{pp} κοντά στο 1 (ειδικά στη BL, καθώς στην FL αυτό συμβαίνει κοντά στο 1.2) παρουσιάζουν κορυφή (τοπικό μέγιστο), που εξαρτάται, κυρίως, από τη συνιστώσα της ακτινοβολίας. Ακόμη, για $\lambda/L_{pp} \geq 2.5$ οι καμπύλες σχεδόν μηδενίζονται και τείνουν «ασυμπτωτικά» στον οριζόντιο άξονα. Ωστόσο, για $\lambda/L_{pp} \leq 0.5$ η επίδραση της ακτινοβολίας είναι αμελητέα και επικρατεί η περίθλαση. Μάλιστα, η περίθλαση στη συγκεκριμένη περιοχή, σε αντίθεση με τη μέθοδο Stawave 2, δε οριζοντιοποιείται, δηλαδή δεν αποκτά σταθερή τιμή. Αντ' αυτού για πολύ μικρά μήκη κύματος (κοντά στο 0) τείνει στο άπειρο, δηλαδή τείνει ασυμπτωτικά στον κατακόρυφο άξονα. Αυτό, βέβαια, σχετίζεται με το γεγονός ότι ο συντελεστής διόρθωσης του βυθίσματος (α_{T^*}), δεν υπολογίζεται, βάσει των τροποποιημένων συναρτήσεων Bessel, αλλά βάσει εκθετικών συναρτήσεων. Παρακάτω, παρατίθεται συγκριτικό διάγραμμα (αγόμενο από το Matlab) των προαναφερθέντων συντελεστών διόρθωσης βυθίσματος (ενδεικτικά) για την ερματισμένη κατάσταση του υπό ανάλυση bulk- carrier. Πιο συγκεκριμένα, παρατίθενται καμπύλες του εν λόγω συντελεστή διόρθωσης συναρτήσει του λ/L_{pp}. Οι εν λόγω συντελεστές εμπεριέχονται στη συνιστώσα της περίθλασης, άρα αναμένεται η μορφή τους να επηρεάσει τη μορφή της συνολικής πρόσθετης αντίστασης κυματισμού για μικρές τιμές του μήκους κύματος και ειδικά για $\lambda/L_{pp} < 0.5$. Ο συντελεστής που χρησιμοποιείται από Liu- Papanikolaou είναι: $\alpha_{T^*} = \begin{cases} 1 - e^{-4\pi\left(\frac{T^*}{\lambda} - \frac{T^*}{2.5L_{pp}}\right)}, & \lambda/L_{pp} \leq 2.5 \\ 0, & \lambda/L_{pp} > 2.5 \end{cases}$ και η αντίστοιχη από το Stawave 2 είναι: $\alpha_1 = \frac{\pi^2 I_1^2(1.5kT_M)}{\pi^2 I_1^2(1.5kT_M) + K_1^2(1.5kT_M)}$[115].



ΣΧΗΜΑ 40: ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΙΟΡΘΩΤΙΚΩΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΒΥΘΙΣΜΑΤΟΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ λ/L_{pp}

Βάσει του ανωτέρω σχήματος γίνεται σαφές ότι ο συντελεστής που εμπεριέχει τις τροποποιημένες συναρτήσεις Bessel οριζοντιοποιείται για μικρά (σχετικά) μήκη κύματος, σε αντίθεση με τον αντίστοιχο συντελεστή, που χρησιμοποιεί η σχέση Liu- Papanikolaou. Αυτός είναι και ο λόγος που η συνιστώσα της περίθλασης για μικρά (σχετικά) μήκη κύματος είναι με τη μέθοδο Stawave 2 σταθερή (οριζόντια), σε αντίθεση με τη μέθοδο Liu- Papanikolaou, που για μήκη κύματος κοντά στο 0, τείνει στο άπειρο. Το

[115] Τα όποια σύμβολα μεγεθών επεξηγούνται λεπτομερώς στην αντίστοιχη υποενότητα για την κάθε μέθοδο της παρούσας έκθεσης. Ακόμη, για το συντελεστή α_1 του Stawave 2 δεν περιέχεται ο συντελεστής f1, που εξαρτάται από Fr, C_B, καθώς τότε δεν θα είχε νόημα η σύγκριση που λαμβάνει χώρα εδώ.

παραπάνω διάγραμμα αφορά τη BL κατάσταση του υπό ανάλυση bulk- carrier και παρατίθεται ενδεικτικά. Για αυτό το λόγο δεν παρατίθεται το αντίστοιχο για την έμφορτη κατάσταση (FL), μιας και κάτι τέτοιο θα ήταν πλεονασμός και περιττό.

3.3.1.4 ΣΥΝΟΨΗ ΜΕΘΟΔΩΝ

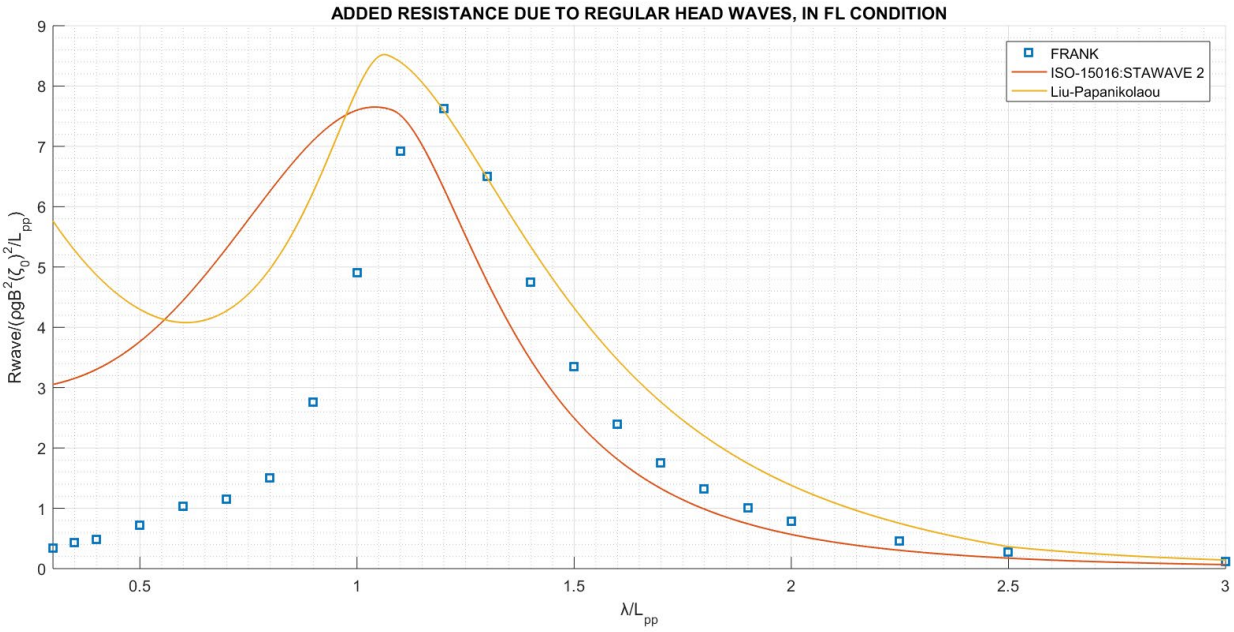
Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η εκτίμηση της πρόσθετης αντίστασης κυματισμού στα operational data πραγματοποιήθηκε με FRANK, έπειτα από σύσταση του επιβλέποντα καθηγητού. Οι υπόλοιπες μέθοδοι παρατίθενται, περισσότερο για ποιοτικούς λόγους, προκειμένου να διαπιστωθεί αν και κατά πόσον δύναται να εξαγάγουν το ίδιο ικανοποιητικά αποτελέσματα με το FRANK, τουλάχιστον για τους σκοπούς και το εύρος ανάλυσης της παρούσας εργασίας. Βέβαια, το FRANK παρουσιάζει όχι και τόσο αξιόπιστα αποτελέσματα για μικρά μήκη κύματος ($\lambda/L_{pp}<0.5$) και αυτό σχετίζεται με το γεγονός ότι δεν κάνει ολοκλήρωση των πιέσεων στην επιφάνεια της γάστρας, άρα δεν πραγματοποιεί υπολογισμούς για περίθλαση (παρά μόνο για την αντίδραση που άγεται από τις κινήσεις την εξαναγκασμένη ταλάντωση του πλοίου, λόγω κυμάτων). Σημειώνεται, ότι το Stawave 2 παρουσιάζει αποτελέσματα μόνο για μετωπικούς κυματισμούς, όπως και ο Kreitner (αν και το sea trials report του υπό ανάλυση πλοίο παραθέτει ένα συντελεστή διόρθωσης ανάλογα με τη γωνία[116]). Αντίθετα, στο πιο πρόσφατο report (2020) των Liu- Papanikolaou οι συναρτήσεις μεταφοράς, παρατίθενται για arbitrary heading, οπότε δύναται να εξαχθούν αποτελέσματα και για short-crested κύματα, και όχι μόνο για μονοκατευθυντικά. Ακόμη, ο τύπος των Liu- Papanikolaou δίνει έμφαση στην περιγραφή κυματισμών με μικρό μήκος κύματος σε σχέση με το FRANK (λόγω του ότι λαμβάνει υπ' όψιν την επίδραση της περίθλασης). Παρακάτω παρουσιάζονται διαγράμματα, εξαγόμενα από το Matlab. Το εύρος τιμών του λόγου λ/L_{pp} (οριζοντίου άξονα)επιλέχθηκε να είναι συμβατό με το αντίστοιχο που αντιμετωπίζει το υπό ανάλυση πλοίο κατά την πλεύση του (βάσει operational data). Οπότε, δεν θα επέτρεπε να ξεπερνά το 1, παρόλ' αυτά για όλες τις μεθόδους παρατίθενται και τα αντίστοιχα διαγράμματα για $\lambda/L_{pp}<3$[117].

Παρακάτω παρατίθενται διαγράμματα του αδιάστατου συντελεστή πρόσθετης αντίστασης κυματισμού $(R_{wave}/(\rho g B/L_{pp}\zeta_A^2))$ συναρτήσει του λόγου μήκους κύματος προς μήκος μεταξύ καθέτων (λ/L_{pp}). Μάλιστα, τα εν λόγω διαγράμματα αφορούν regular κυματισμό και αφορούν τις δυο υπό μελέτη καταστάσεις φόρτωσης (FL, BL). Ακόμη, όπως γίνεται και φανερό από παραπάνω ανάλυση, στην τεταγμένη των εν λόγω διαγραμμάτων έχει γίνει απαλοιφή του τετραγώνου του πλάτους του αρμονικού κύματος, οπότε δεν εξαρτάται από αυτό. Επισημαίνεται, ότι τα γραφήματα για το FRANK άγονται από το αρχείο εξόδου .RR0 του προγράμματος. Επιπλέον, η μέθοδος Kreitner αφορά irregular κυματισμούς, οπότε δεν δύναται να αναπαρασταθούν τα διαγράμματα για αρμονικά κύματα. Σημειώνεται, επίσης ότι οι εν λόγω αρμονικοί κυματισμοί είναι μετωπικοί.

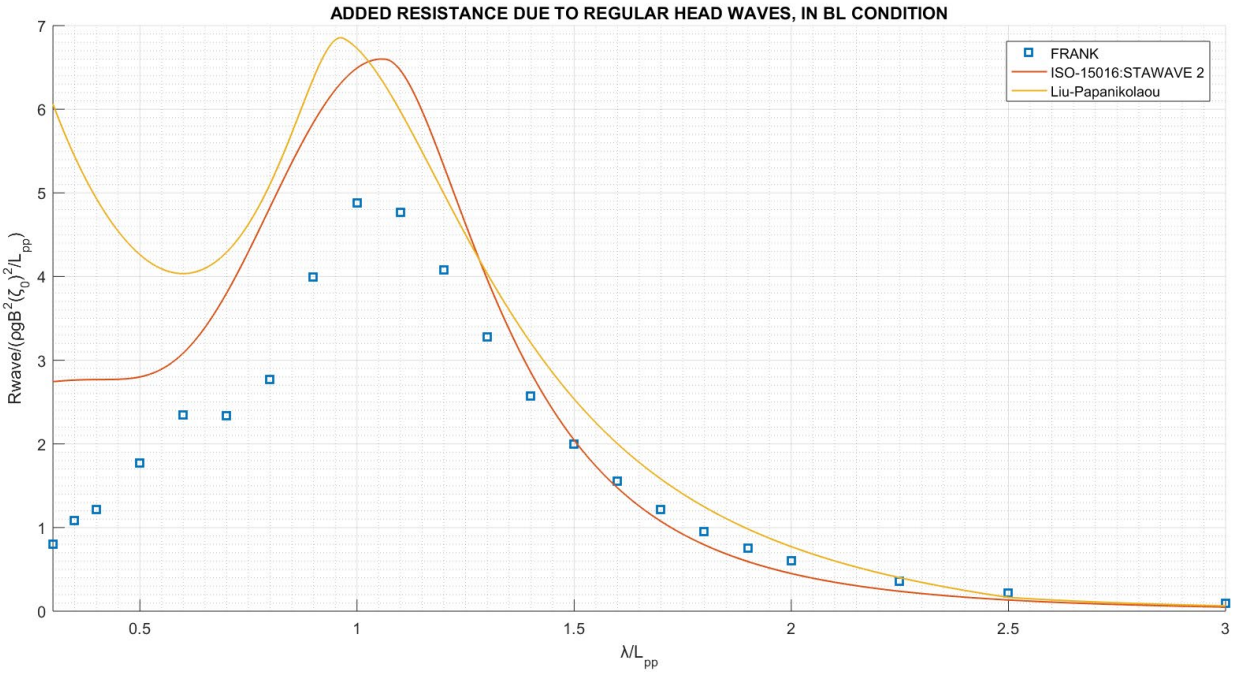
---

[116] Για τη μέθοδο Kreitner.

[117] Που και πάλι, γύρω στο 2.5 θα μπορούσε να είναι το άνω όριο του εν λόγω λόγου. Πέρα από αυτό το εύρος συζητάμε για καταστάσεις που συναντά το πλοίο σπάνια κατά τη διάρκεια της «ζωής» του και για τις οποίες πραγματοποιείται η μελέτη αντοχής, προκειμένου να ληφθούν υπ' όψιν οι καταστάσεις sagging, hogging. Σε αυτές τις περιπτώσεις οι συνθήκες κυματισμών είναι πολύ ακραίες και συνήθως τα σύγχρονα ποντοπόρα, οι ναυτιλιακές εταιρείες φροντίζουν να τις αποφεύγουν, μέσω weather routing και αλλαγής πορείας. Για αυτό το λόγο η ανάλυση που γίνεται δεν αφορά σχετικά μεγάλα μήκη κύματος.



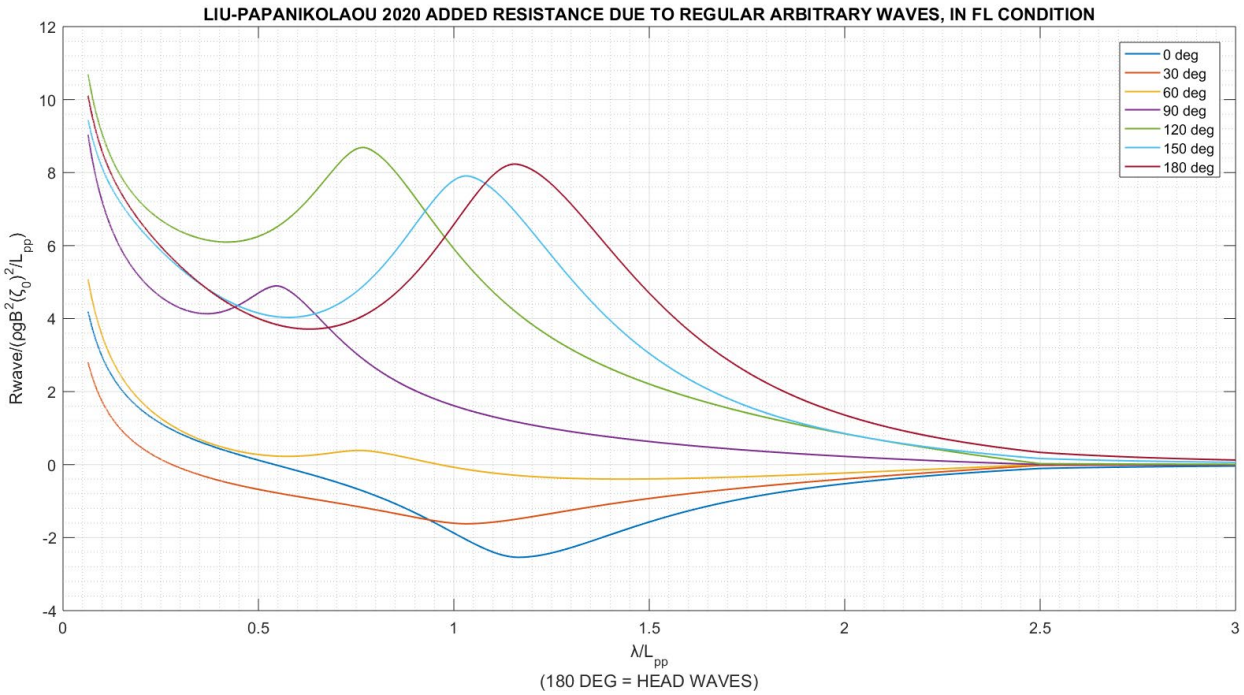
ΣΧΗΜΑ 41: ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΑΔΙΑΣΤΑΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΠΡΟΣΘΕΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΛΟΓΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΟΣ ΠΡΟΣ ΜΗΚΟΣ L_{pp} <3 , ΜΕΤΩΠΙΚΟ ΑΡΜΟΝΙΚΟ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟ, ΣΤΗΝ FL ΜΕ ΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ STAWAVE 2, FRANK, LIU- PAPANIKOALOU



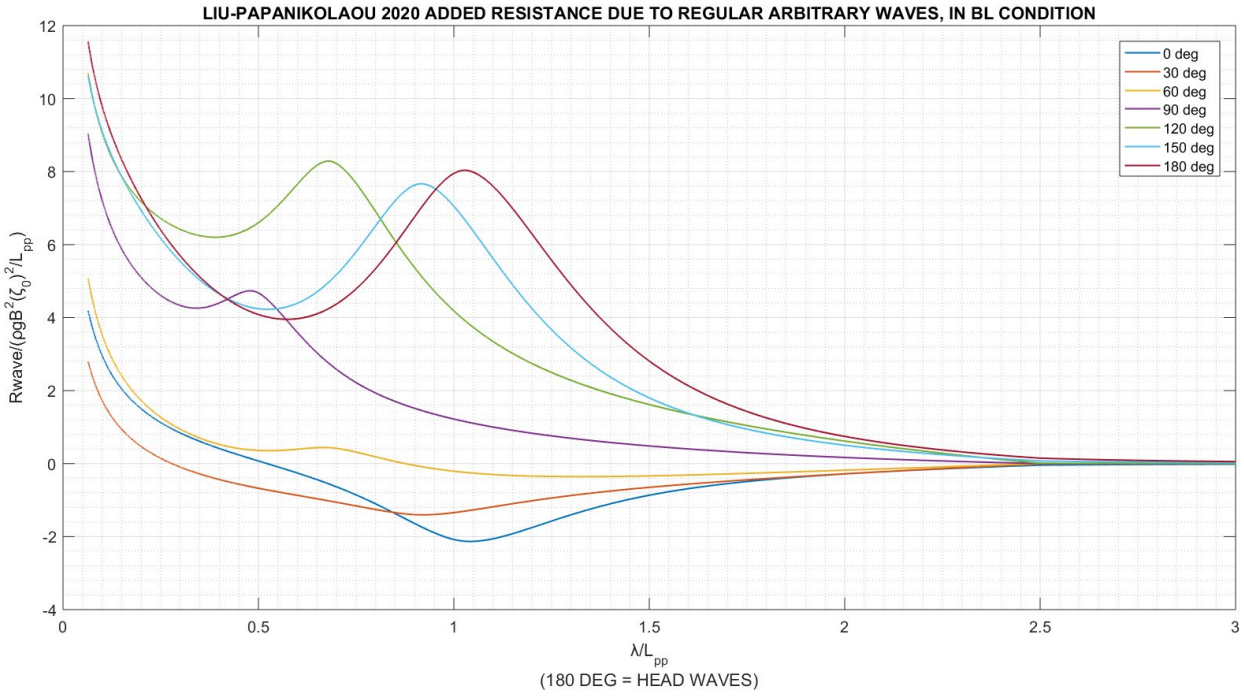
ΣΧΗΜΑ 42: ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΑΔΙΑΣΤΑΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΠΡΟΣΘΕΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΛΟΓΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΟΣ ΠΡΟΣ ΜΗΚΟΣ L_{pp} <3 , ΜΕΤΩΠΙΚΟ ΑΡΜΟΝΙΚΟ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟ, ΣΤΗΝ BL ΜΕ ΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ STAWAVE 2, FRANK, LIU- PAPANIKOALOU

Παρατηρώντας τα δυο ανωτέρω διαγράμματα γίνεται αντιληπτό ότι το εύρος των τιμών του οριζοντίου άξονα (λ/L_{pp}) είναι από 0.3 έως 3. Μετά την τιμή 2.5 οι καμπύλες τείνουν να μηδενιστούν, ενώ για τιμές μικρότερες του 0.5 η επίδραση της αγόμενης από την εξαναγκασμένη ταλάντωση αντίστασης γίνεται αμελητέα, σε σχέση με την περίθλαση (κάτι το οποίο δύναται να αχθεί και από άλλα διαγράμματα της παρούσας εργασίας με τις αντίστοιχες συνιστώσες). Σε αυτή την περιοχή οι μέθοδοι δεν είναι ιδιαίτερα αξιόπιστες, για αυτό το λόγο δεν δίνεται ιδιαίτερη έμφαση. Ακόμη, για $\lambda/L_{pp}<0.5$ η μέθοδος FRANK είναι αύξουσα και μάλιστα μηδενίζεται, κάτι που οφείλεται στο γεγονός ότι δε λαμβάνεται υπ' όψιν η περίθλαση, που κανονικά σε αυτή την περιοχή είναι κυρίαρχη. Όσον αφορά τη μέθοδο Stawave 2 η καμπύλη σταθεροποιείται, όπως αναμενόταν. Μάλιστα, στη BL αυτή η σταθεροποίηση επιτυγχάνεται για $\lambda/L_{pp}<0.5$, ενώ στη FL για $\lambda/L_{pp}<0.3$ (εδώ δεν φαίνεται τόσο). Η Liu-Papanikolaou από την άλλη σε αυτό το εύρος τιμών αδιάστατου μήκους κύματος τείνει στο άπειρο. Επιπροσθέτως και οι τρεις μέθοδοι παρουσιάζουν μέγιστο για λ/L_{pp} κοντά στο 1, κάτι επίσης αναμενόμενο.

Παρακάτω παρατίθενται διαγράμματα του αδιάστατου συντελεστή πρόσθετης αντίστασης κυματισμού ($R_{wave}/(\rho g B/L_{pp}\zeta_A^2)$) συναρτήσει του λόγου μήκους κύματος προς μήκος μεταξύ καθέτων (λ/L_{pp}) για αρμονικά κύματα διαφόρων γωνιών κατά Liu- Papanikolaou 2020 και για τις καταστάσεις φόρτωσης FL, BL. Μάλιστα, όπως γίνεται αντιληπτό, η μορφή τους ομοιάζει με αυτήν που αναλύθηκε στην περίπτωση του μετωπικού κυματισμού.



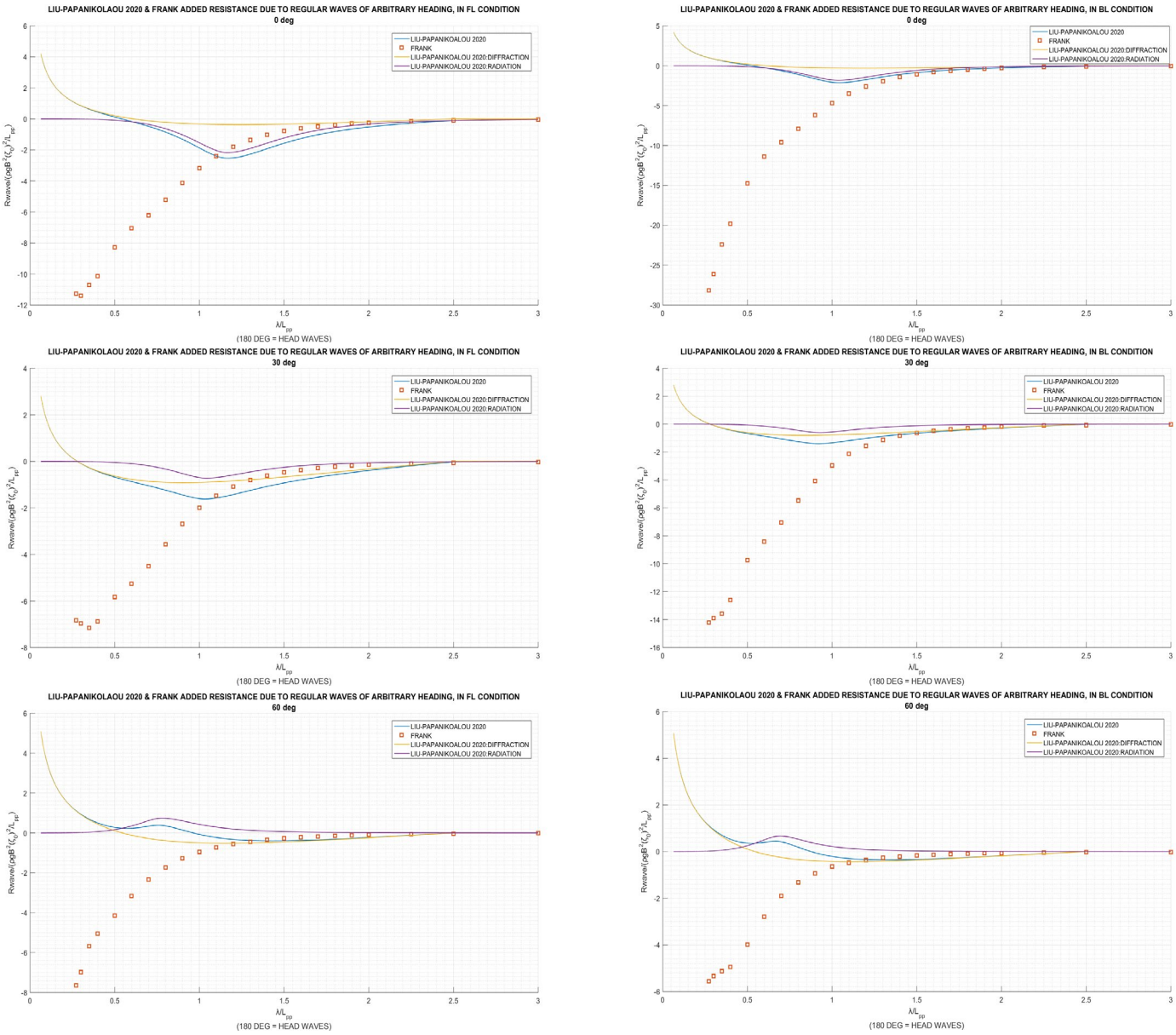
ΣΧΗΜΑ 43: ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΑΔΙΑΣΤΑΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΠΡΟΣΘΕΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΛΟΓΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΟΣ ΠΡΟΣ ΜΗΚΟΣ L_{pp} <3 , ΑΡΜΟΝΙΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥΣ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΓΩΝΙΩΝ, ΣΤΗΝ FL ΚΑΤΑ LIU- PAPANIKOALOU 2020



ΣΧΗΜΑ 44: ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΑΔΙΑΣΤΑΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΠΡΟΣΘΕΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΛΟΓΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΟΣ ΠΡΟΣ ΜΗΚΟΣ L_{pp} <3 , ΑΡΜΟΝΙΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥΣ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΓΩΝΙΩΝ, ΣΤΗΝ BL ΚΑΤΑ LIU- PAPANIKOALOU 2020

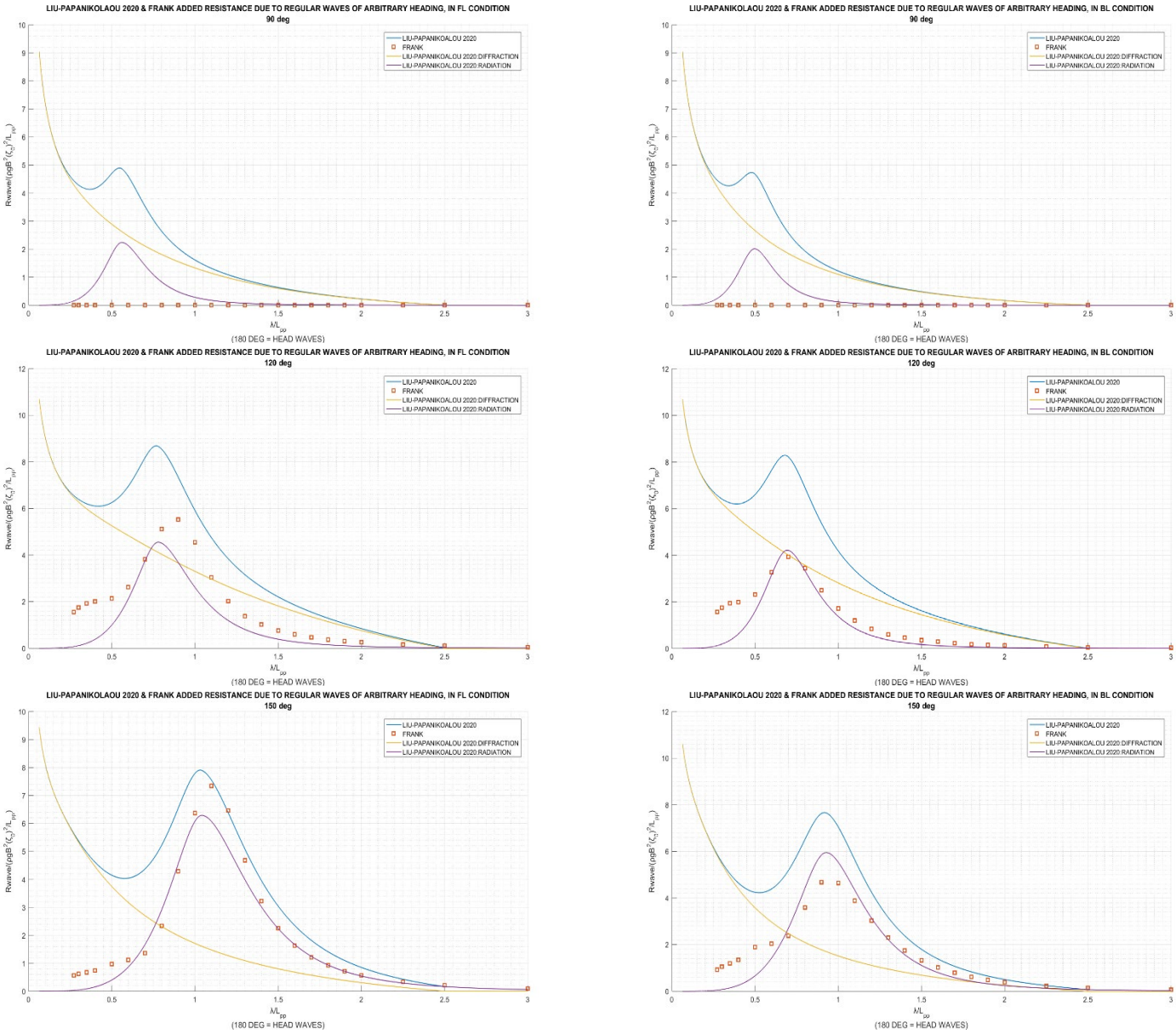
Στα παραπάνω σχήματα (βλ. **ΣΧΗΜΑ 43**, **ΣΧΗΜΑ 44**) οι αρνητικές τιμές της εν λόγω συνιστώσας της αντίστασης αναφέρονται σε ευνοϊκής κατεύθυνσης ανέμους, που συνεισφέρουν δηλαδή στην ώση. Αυτό συμβαίνει για γωνίες μεταξύ 0° και μέχρι 90°, όπου 0° αναφέρεται σε ακολουθούντες κυματισμούς. Σε κάθε περίπτωση για μήκη κύματος με τιμές $\lambda/L_{pp} \geq 2.5$, όλες οι καμπύλες τείνουν ασυμπτωτικά στον οριζόντιο άξονα, κάτι που είναι αναμενόμενο. Γενικώς, η μορφή των καμπυλών είναι ίδια με την αντίστοιχη που αναφέρεται σε μετωπικό κύμα και που έχει ήδη αναλυθεί παραπάνω. Αξίζει, βέβαια, να σημειωθεί ότι για γωνίες μεγαλύτερες των 90° και μέχρι τις 180° η κορυφή (τοπικό μέγιστο) μετατοπίζεται από το $\lambda/L_{pp} \approx 0.5$ (για 90°) στο $\lambda/L_{pp} \approx 1$ (για 180°).

Παρακάτω παρατίθενται διαγράμματα (βλ. **ΣΧΗΜΑ 45**, **ΣΧΗΜΑ 46**) του αδιάστατου συντελεστή πρόσθετης αντίστασης κυματισμού ($R_{wave}/(\rho g B/L_{pp}\zeta_A^2)$) συναρτήσει του λόγου μήκους κύματος προς μήκος μεταξύ καθέτων (λ/L_{pp}) για αρμονικά κύματα διαφόρων γωνιών κατά Liu- Papanikolaou 2020 (συνολική, λόγω περίθλασης και λόγω ακτινοβολίας) και FRANK και για τις καταστάσεις φόρτωσης FL, BL. Σκοπός των εν λόγω διαγραμμάτων είναι η σύγκριση των δυο αυτών μεθόδων για κύματα με γωνίες πέρα των μετωπικών (εδώ 180°). Σημειώνεται ότι οι γωνίες παρατίθενται με βήμα 30°, ενώ λόγω της συμμετρίας ως προς το διάμηκες επίπεδο, που διέρχεται από τη CL του παρόντος πλοίου κρίνεται περιττή η μελέτη άλλων γωνιών (μέχρι 360°). Επισημαίνεται ότι αριστερά παρατίθενται τα διαγράμματα για την FL κατάσταση φόρτωσης και δεξιά για τη BL. Μάλιστα, οι γωνίες χωρίζονται σε αυτές που είναι ευνοϊκές για την κίνηση του πλοίου, συνεισφέρουν δηλαδή στην ώση ($0^o \div 90^o$) και σε αυτές λόγω των οποίων αυξάνεται η αντίσταση ($90^o \div 180^o$). Σημειώνεται, ότι εν τέλει το πρόγραμμα κατά τον εκτίμηση της πρόσθετης αντίστασης λόγω των irregular κυματισμών δε λαμβάνει υπ' όψιν τις ευνοϊκές γωνίες, μιας και τα αποτελέσματα σε αυτή την περιοχή γωνιών κρίνονται αναξιόπιστα.



ΣΧΗΜΑ 45: ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΑΔΙΑΣΤΑΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΠΡΟΣΘΕΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΛΟΓΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΟΣ ΠΡΟΣ ΜΗΚΟΣ L_{pp} <3 , ΑΡΜΟΝΙΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥΣ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΓΩΝΙΩΝ (0°,30°,60°), ΣΤΙΣ FL (ΑΡΙΣΤΕΡΑ), BL (ΔΕΞΙΑ) ΚΑΤΑ LIU- PAPANIKOALOU 2020 ΚΑΙ FRANK

Βάσει των ανωτέρω σχημάτων, παρατηρούμε ότι για τις γωνίες (0°,30°,60°) υπάρχει μεγάλη απόκλιση μεταξύ FRANK και Liu- Papanikolaou (2020) για μικρά (σχετικά) μήκη κύματος (λ/L_{pp} <1), κάτι που οφείλεται στο γεγονός ότι το πρόγραμμα FRANK δε λαμβάνει υπ' όψιν τη συνιστώσα της περίθλασης. Αντιθέτως για μεγαλύτερα μήκη κύματος (λ/L_{pp} >1) παρουσιάζεται μια σύγκλιση μεταξύ των δυο αυτών μεθόδων. Μάλιστα, σύμφωνα και με τις εν λόγω δυο μεθόδους οι καμπύλες τείνουν στον οριζόντιο άξονα, δηλαδή μηδενίζονται. Κάτι που σημαίνει ότι τέτοιοι κυματισμοί δεν επηρεάζουν την κίνηση του πλοίου (ούτε θετικά, ούτε αρνητικά). Όσο πιο κοντά στις 90° είναι η γωνία του κυματισμού, τόσο για πιο μικρά μήκη κύματος παρουσιάζεται η προαναφερθείσα σύγκλιση, που συνδυάζεται με μηδενισμό της αντίστασης.

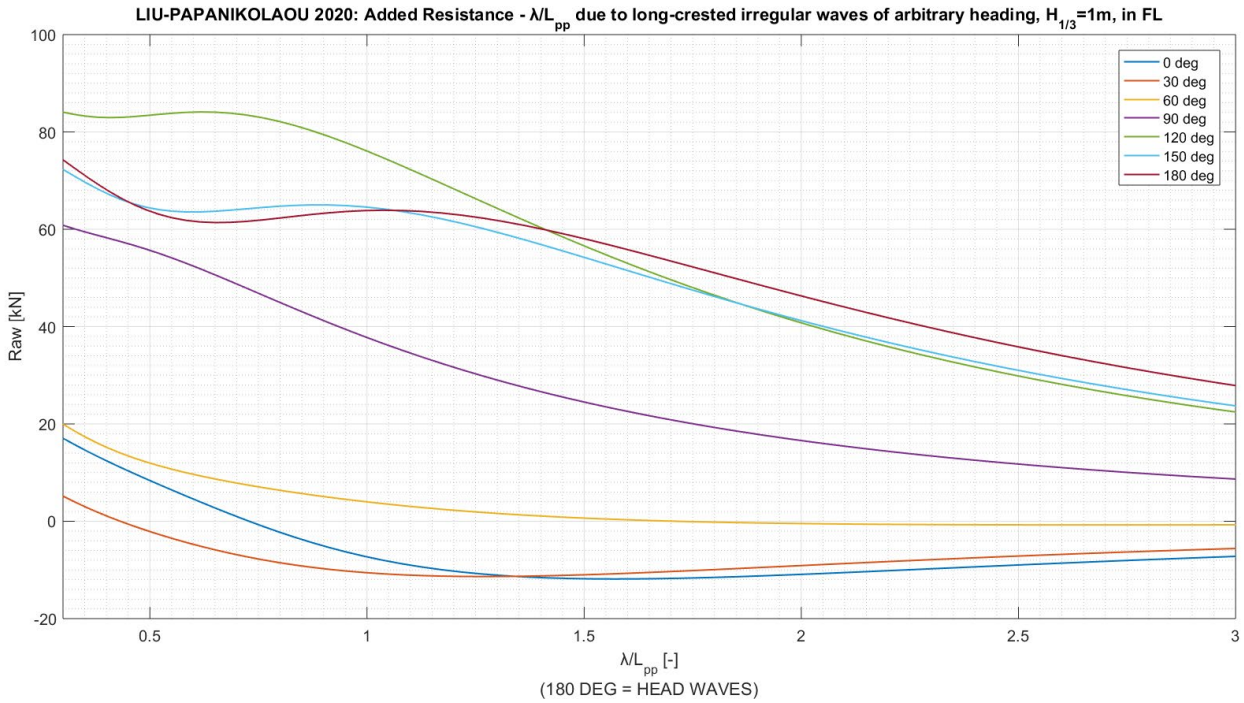


ΣΧΗΜΑ 46: ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΑΔΙΑΣΤΑΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΠΡΟΣΘΕΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΛΟΓΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΟΣ ΠΡΟΣ ΜΗΚΟΣ L_{pp} <3 , ΑΡΜΟΝΙΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥΣ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΓΩΝΙΩΝ (90°,120°,150°), ΣΤΙΣ FL (ΑΡΙΣΤΕΡΑ), BL (ΔΕΞΙΑ) ΚΑΤΑ LIU- PAPANIKOALOU 2020 ΚΑΙ FRANK

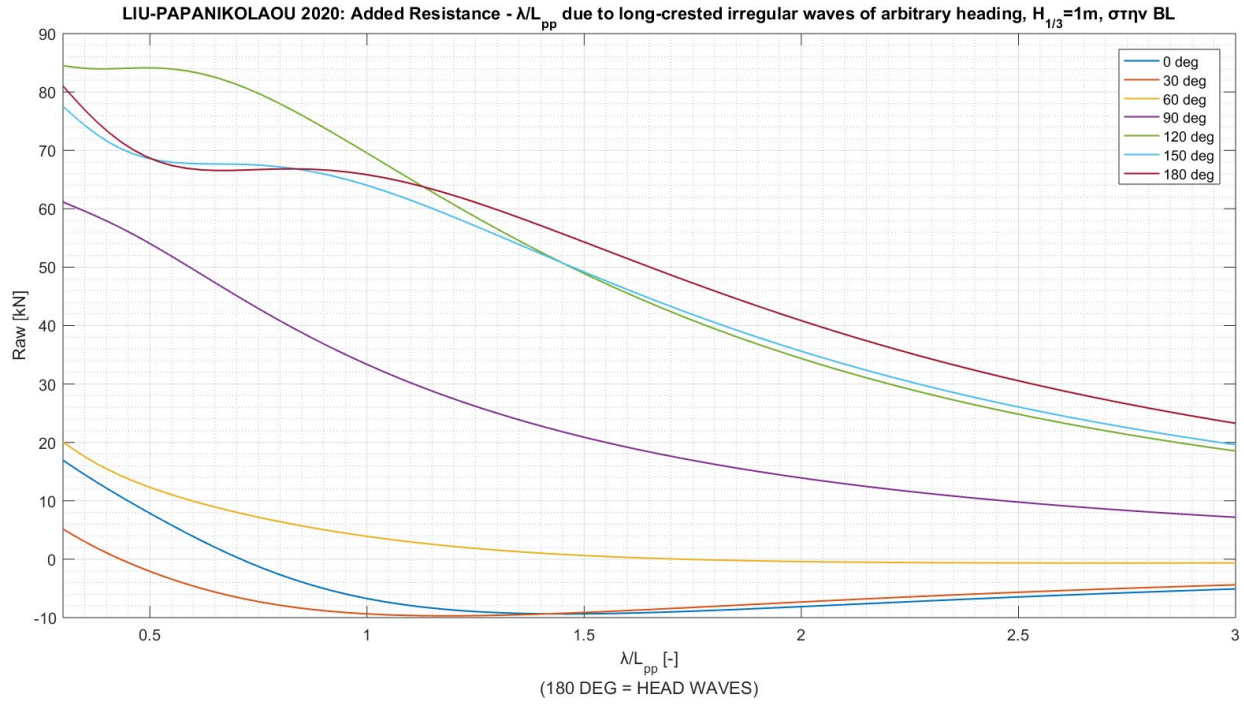
Βάσει των ανωτέρω σχημάτων, παρατηρούμε για τις γωνίες (90°,120°,150°) ότι: Στις 90° από το πρόγραμμα FRANK άγεται ότι για κάθε μήκος κύματος η αντίσταση είναι μηδενική, συμπέρασμα στο οποίο δεν καταλήγουν οι Liu- Papanikoalou (λόγω κυρίως της περίθλασης), αν και από εκεί προκύπτει ότι η πρόσθετη αντίσταση είναι μικρότερη σε σχέση με άλλες γωνίες. Ακόμη, στις γωνίες 120°,150°, ενώ για μικρά (σχετικά) μήκη κύματος παρουσιάζεται μεγάλη απόκλιση, λόγω του ότι το FRANK δεν υπολογίζει την περίθλαση, για λ/L_{pp} =1 (στις 150°) και για λ/L_{pp} ≈0.8 (στις 120°) παρουσιάζουν οι καμπύλες και των δυο μεθόδων τοπικό μέγιστο (κορυφή, δηλαδή περιοχή συντονισμού), ενώ για λ/L_{pp} >1 οι καμπύλες και των δυο μεθόδων τείνουν ασυμπτωτικά στον οριζόντιο άξονα, δηλαδή σχεδόν μηδενίζονται, κάτι που είναι αναμενόμενο. Επιπλέον, όσο πιο κοντά στα μετωπικά κύματα, τόσο καλύτερη σύγκλιση των δυο μεθόδων. Επιπροσθέτως, στη BL η απόκλιση των δυο μεθόδων είναι μεγαλύτερη, σε σχέση με την FL.

Παρατηρώντας, μάλιστα, τις καμπύλες της πρόσθετης αντίστασης λόγω ακτινοβολίας, γίνεται σαφές ότι στην ερματισμένη κατάσταση η καμπύλη του FRANK σχεδόν ταυτίζεται (για λ/L_{pp} >0.5) με την αντίστοιχη των Liu- Papanikolaou, λόγω ακτινοβολίας. Ως εκ τούτου η όποια διαφορά των δυο μεθόδων στη BL οφείλεται αποκλειστικά στην περίθλαση. Όσον αφορά την FL, διαπιστώνεται ότι η καμπύλη που άγεται από το πρόγραμμα FRANK παρουσιάζει μεγαλύτερη τιμή στην κορυφή από ό,τι η καμπύλη πρόσθετης αντίστασης, που οφείλεται στην ακτινοβολία κατά Liu- Papanikolaou. Αυτό, ενδεχομένως να σχετίζεται και με τον τρόπο με τον οποίο το FRANK πραγματοποιεί τους υπολογισμούς. Λόγω του ότι η ίσαλος επιφάνεια και γενικότερα η βρεχόμενη επιφάνεια (και κυρίως το βύθισμα) στην FL είναι μεγαλύτερη από ό,τι στη BL το FRANK θέτει περισσότερες ή και μεγαλύτερης έντασης (παλλόμενες) πηγές (λόγω γεωμετρίας), καθιστώντας το δυναμικό ακτινοβολίας, άρα και τη φόρτωση εξαιτίας αυτού πιο μεγάλη.

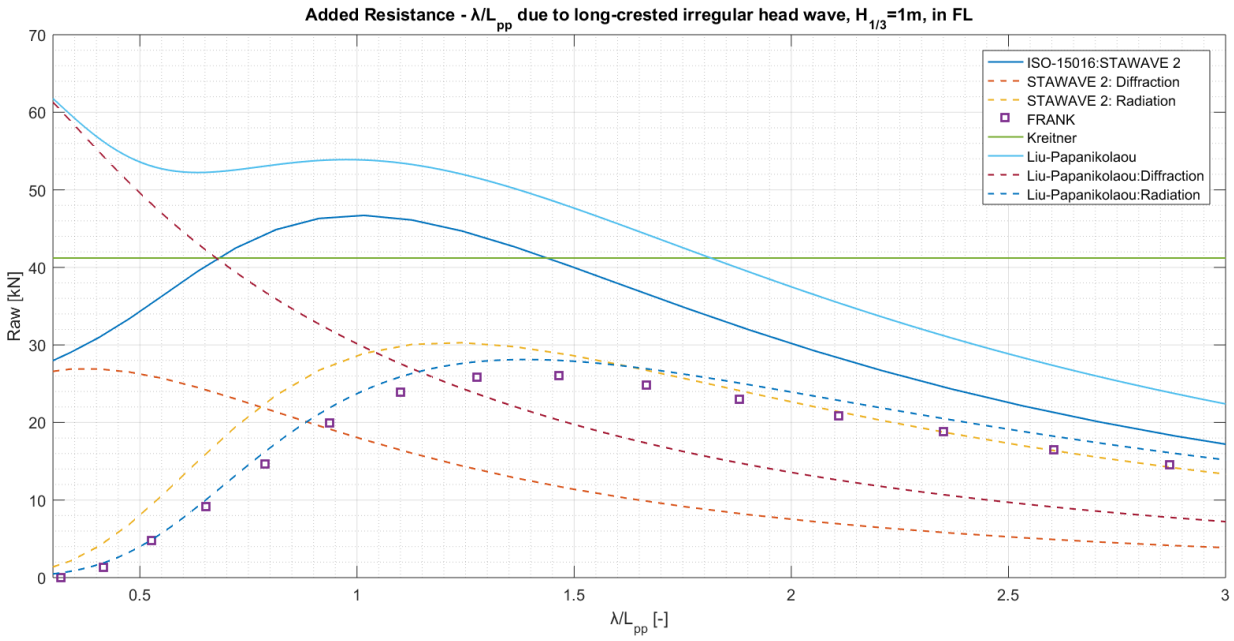
Παρακάτω παρατίθενται διαγράμματα (βλ. **ΣΧΗΜΑ 47**, **ΣΧΗΜΑ 48**) της πρόσθετης αντίστασης κυματισμού (R_{AW}) συναρτήσει του λόγου μήκους κύματος/ μήκος μεταξύ καθέτων (λ/L_{pp}), για μοναδιαίο σημαντικό ύψος κύματος, μονοκατευθυντικό κυματισμό και την εκάστοτε κατάσταση φόρτωσης (FL, BL) και για διάφορες γωνίες κύματος, κατά Liu- Papanikolaou 2020. Ακόμη, τα εν λόγω διαγράμματα αφορούν περίπτωση μοναδιαίου σημαντικού ύψους κύματος ($H_{1/3}$=1m). Σημειώνεται ότι τα εν λόγω διαγράμματα έχουν προκύψει από χρήση της τροποποιημένης φασματικής συνάρτησης των Pierson-Moskowitz, η οποία έχει υιοθετηθεί από την ITTC το 1978 και η οποία αναλύεται παραπάνω στην παρούσα έκθεση αναλυτικά. Μάλιστα, λαμβάνεται υπ' όψιν και η γωνιακή διόρθωση του φάσματος (G(α)). Ακόμη, παρατίθενται διαγράμματα (βλ. **ΣΧΗΜΑ 49**, **ΣΧΗΜΑ 50**) της πρόσθετης αντίστασης κυματισμού (R_{AW}) συναρτήσει του λόγου μήκους κύματος/ μήκος μεταξύ καθέτων (λ/L_{pp}), για μοναδιαίο σημαντικό ύψος κύματος, μονοκατευθυντικό, μετωπικό (μη αρμονικό) κυματισμό και την εκάστοτε κατάσταση φόρτωσης (FL, BL) με τις διάφορες μεθόδους (FRANK, Kreitner, Stawave 2, Liu- Papanikolaou).



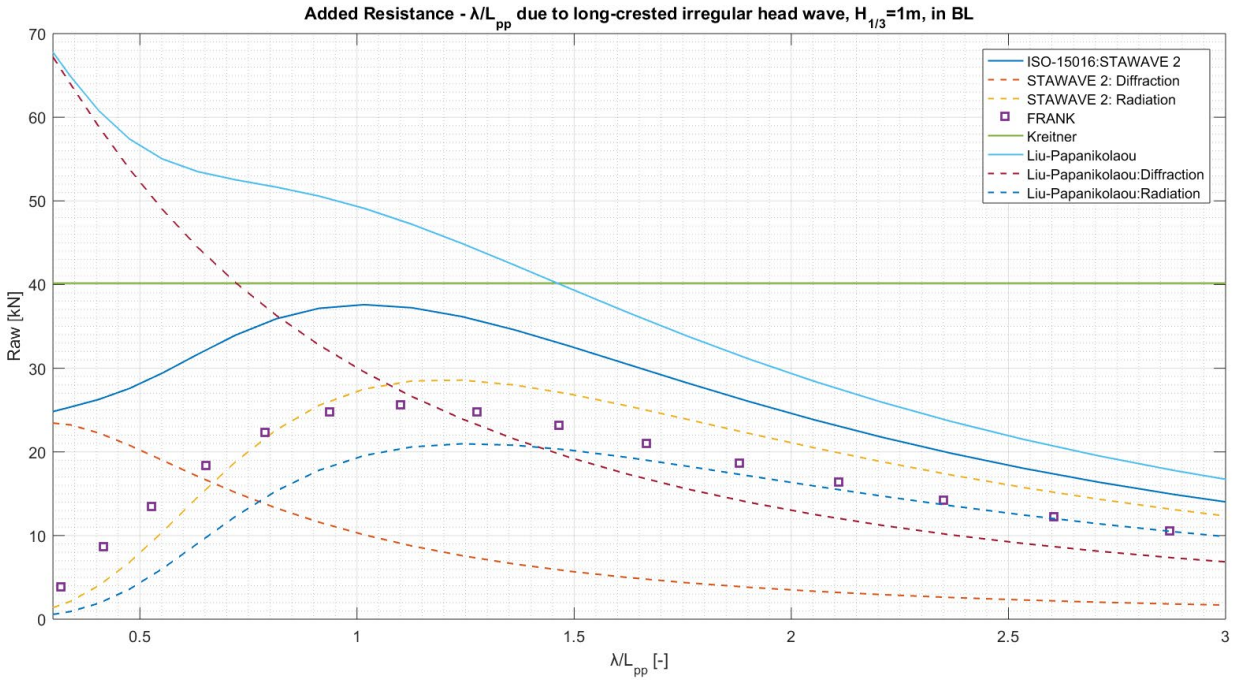
ΣΧΗΜΑ 47: ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΠΡΟΣΘΕΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΛΟΓΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΟΣ ΠΡΟΣ ΜΗΚΟΣ L_{pp} <3 , ΜΗ ΑΡΜΟΝΙΚΟΥΣ ΜΟΝΟΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥΣ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΓΩΝΙΩΝ, ΣΤΗΝ FL ΚΑΤΑ LIU- PAPANIKOALOU 2020



ΣΧΗΜΑ 48: ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΠΡΟΣΘΕΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΛΟΓΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΟΣ ΠΡΟΣ ΜΗΚΟΣ L_{pp} <3 , ΜΗ ΑΡΜΟΝΙΚΟΥΣ ΜΟΝΟΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥΣ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΓΩΝΙΩΝ, ΣΤΗΝ BL ΚΑΤΑ LIU- PAPANIKOALOU 2020



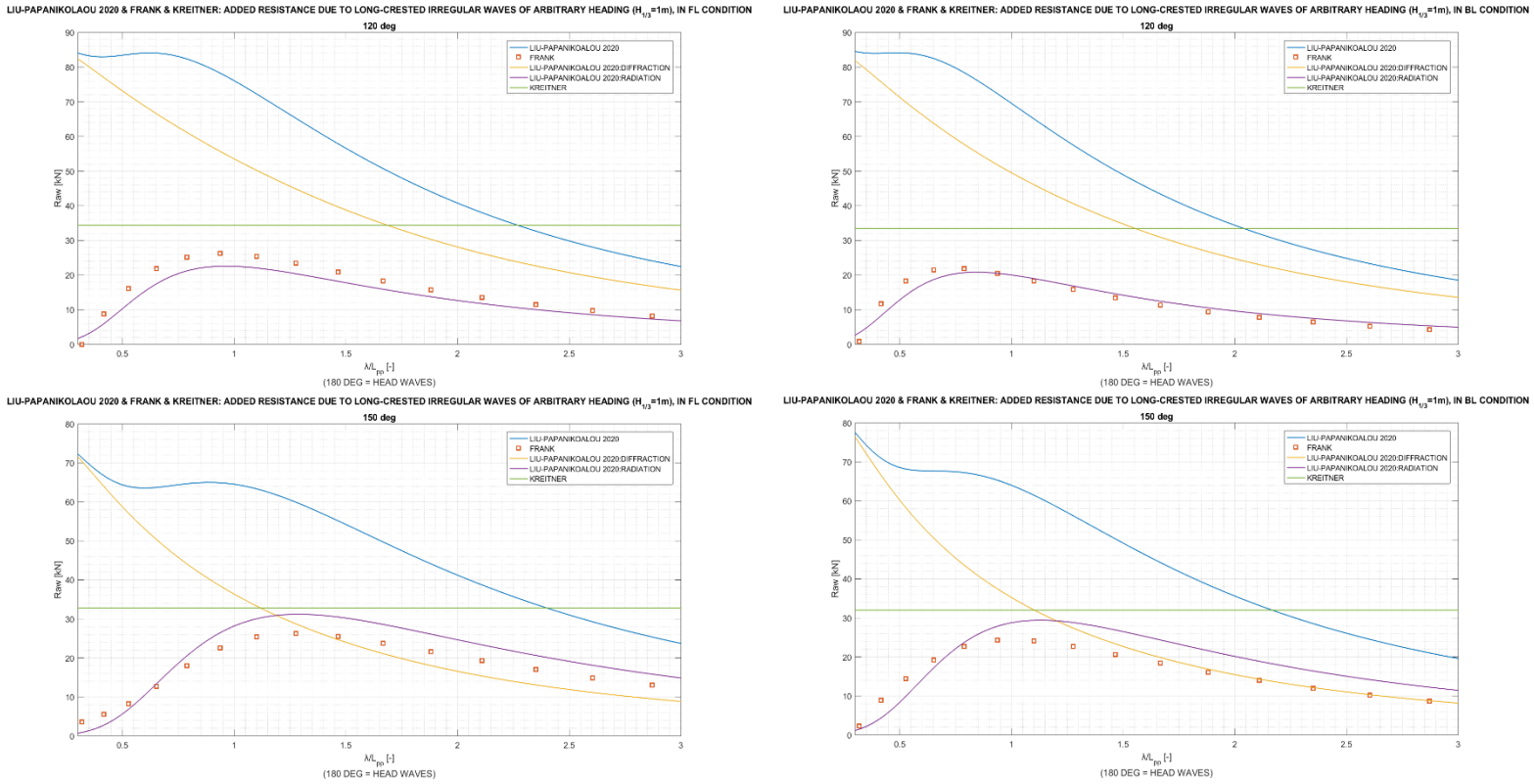
ΣΧΗΜΑ 49: ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΠΡΟΣΘΕΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΛΟΓΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΟΣ ΠΡΟΣ ΜΗΚΟΣ L_{pp} <3 , ΜΗ ΑΡΜΟΝΙΚΟΥΣ ΜΟΝΟΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΟΥΣ ΜΕΤΩΠΙΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥΣ, ΣΤΗΝ FL ΚΑΤΑ STAWAVE 2, FRANK, KREITNER,LIU- PAPANIKOALOU



ΣΧΗΜΑ 50: ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΠΡΟΣΘΕΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΛΟΓΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΟΣ ΠΡΟΣ ΜΗΚΟΣ L_{pp} <3 , ΜΗ ΑΡΜΟΝΙΚΟΥΣ ΜΟΝΟΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΟΥΣ ΜΕΤΩΠΙΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥΣ, ΣΤΗΝ BL ΚΑΤΑ STAWAVE 2, FRANK, KREITNER,LIU- PAPANIKOALOU

Παρατηρώντας τα παραπάνω διαγράμματα, γίνεται αντιληπτό ότι η καμπύλη που άγεται από το FRANK παρουσιάζει μέγιστο για λόγο μηκών κοντά ή και ίσο με 1 (ειδικά στη BL), κάτι που είναι και αναμενόμενο. Ακόμη, η μέθοδος Kreitner δίνει μέση τιμή, λόγω της μη εξάρτησής της από τη modal period, και της εξάρτησής της μόνο από το $H_{1/3}$. Όσον αφορά τις καμπύλες των μεθόδων Stawave 2, Liu-Papanikolaou και FRANK για μήκη κύματος με τιμές $\lambda/L_{pp} \geq 2.5$, όλες τείνουν ασυμπτωτικά στον οριζόντιο άξονα, κάτι που είναι αναμενόμενο. Για σχετικά μικρές τιμές του μήκους κύματος, ωστόσο παρουσιάζεται απόκλιση της FRANK από τις άλλες δυο μεθόδους και ο λόγος είναι το γεγονός ότι το πρόγραμμα FRANK δεν υπολογίζει τη συνιστώσα της περίθλασης (diffraction) που για $\lambda/L_{pp} < 0.5$ είναι η επικρατούσα, όπως έχει ήδη αναλυθεί και παραπάνω. Σημειώνεται, βέβαια ότι η μορφή των συναρτήσεων φασματικής πυκνότητας (τροποποιημένη Pierson- Moskowitz, βλ. ITTC 1978), βάσει των οποίων προκύπτουν οι εν λόγω καμπύλες, είναι βαρύνουσας σημασίας. Επίσης, γίνεται αντιληπτό ότι για λ/L_{pp} κοντά στο 1 τόσο στη BL, όσο και στην FL (κυρίως) οι καμπύλες των Stawave 2, Liu- Papanikolaou παρουσιάζουν κορυφή (τοπικό μέγιστο). Ενδεχομένως να παρουσιάζουν και για $\lambda/L_{pp} < 0.3$, παρόλα αυτά η μελέτη τις εν λόγω περιοχής μηκών κύματος αγνοείται από τα δημοσιευμένα reports των Liu-Papanikolaou (και όχι μόνο), μιας και τα αποτελέσματα που έχουμε για αυτή την περιοχή κρίνονται αναξιόπιστα, λόγω του ότι η πρόσθετη αντίσταση κυματισμού εξαρτάται αποκλειστικά από την περίθλαση, την οποία όπως προαναφέρθηκε και παραπάνω στην έκθεση το Stawave 2 και οι Liu-Papanikolaou αντιμετωπίζουν πολύ διαφορετικά. Μάλιστα, η καμπύλη που άγεται από το FRANK (spline με σημεία παρεμβολής τα σημεία του FRANK) συγκλίνει με τις αντίστοιχες της συνιστώσας της ακτινοβολίας, κατά Stawave 2 και Liu- Papanikolaou (ειδικά στην FL).

Παρακάτω παρατίθενται διαγράμματα (βλ. **ΣΧΗΜΑ 51**) της πρόσθετης αντίστασης κυματισμού (R_{AW}) συναρτήσει του λόγου μήκους κύματος/ μήκος μεταξύ καθέτων (λ/L_{pp}), για μοναδιαίο σημαντικό ύψος κύματος ($H_{1/3}$=1m), μονοκατευθυντικό κυματισμό (long- crested) και την εκάστοτε κατάσταση φόρτωσης (FL, BL) και για διάφορες γωνίες κύματος, κατά Liu- Papanikolaou 2020 (τόσο η συνολική, όσο και οι συνιστώσες περίθλασης και ακτινοβολίας), FRANK, Kreitner. Οι αντίστοιχες καμπύλες, βάσει της μεθόδου Stawave 2 δεν παρουσιάζονται, μιας και η εν λόγω μέθοδος υπολογίζει πρόσθετη αντίσταση μόνο για μετωπικούς κυματισμούς (εδώ 180°) και έχει ισχύ για $\pm 45^o$, λογίζοντας όμως τα κύματα αυτών των περιοχών σαν μετωπικά. Βέβαια, παρακάτω παρατίθενται τα εν λόγω διαγράμματα για τις γωνίες 120°, 150°, όπου για τις τελευταίες θα μπορούσε να ληφθεί υπ' όψιν η πρόσθετη αντίσταση λόγω μετωπικού κυματισμού κατά Stawave 2. Παρόλ' αυτά κάτι τέτοιο δε συμβαίνει στα παρακάτω διαγράμματα, προκειμένου να μην προκληθεί σύγχυση στον αναγνώστη. Επισημαίνεται, ακόμη, ότι οι γωνίες από $0^o \div 90^o$ δεν παρουσιάζονται παρακάτω, λόγω του ότι η πρόσθετη αντίσταση κατά FRANK είτε είναι 0 (για τις 90°), είτε γιατί δεν υπολογίζεται (για γωνίες μικρότερες από 90° και μεγαλύτερες από 0°, που αποτελούν ευνοϊκές γωνίες για το πλοίο). Επιπροσθέτως, παρατίθεται και η καμπύλη της πρόσθετης αντίστασης κυματισμού, κατά Kreitner. Όπως, αναφέρθηκε και στην αντίστοιχη υποενότητα παραπάνω, η μέθοδος Kreitner αφορά μετωπικούς κυματισμούς. Παρόλ' αυτά, στο sea trials report χρησιμοποιείται και για άλλες γωνίες, με χρήση του διορθωτικού συντελεστή διόρθωσης (0.667-0.333cos(α), όπου $\alpha=180^o$ για μετωπικό κυματισμό). Το ίδιο γίνεται και στην παρούσα εργασία.



ΣΧΗΜΑ 51: ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΠΡΟΣΘΕΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΛΟΓΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΟΣ ΠΡΟΣ ΜΗΚΟΣ L_{pp} <3 , ΜΗ ΑΡΜΟΝΙΚΟΥΣ ΜΟΝΟΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥΣ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΓΩΝΙΩΝ (120°, 150°), ΣΤΙΣ FL, BL ΚΑΤΑ FRANK, KREITNER,LIU- PAPANIKOALOU

Βάσει των παραπάνω διαγραμμάτων (βλ. **ΣΧΗΜΑ 51**) παρατηρούμε ότι: Η καμπύλη λόγω Kreitner είναι οριζόντια ευθεία, κάτι που οφείλεται στο γεγονός ότι ο τύπος του Kreitner περιέχει σαν παράμετρο μόνο το σημαντικό ύψος κύματος και όχι κάποια περίοδο ή μήκος κύματος. Μάλιστα, η τιμή της είναι λίγο μεγαλύτερη από το τοπικό μέγιστο της FRANK και της καμπύλης που επάγεται λόγω ακτινοβολίας, κατά Liu- Papanikolaou (για 150° τόσο στην FL, όσο και στη BL). Η καμπύλη πρόσθετης αντίστασης κατά FRANK για τις εν λόγω γωνίες παρουσιάζει την ίδια μορφή με αυτήν που έχει αναλυθεί για τους μετωπικούς κυματισμούς. Μάλιστα, η καμπύλη που προκύπτει από παρεμβολή των σημείων του FRANK συγκλίνει ικανοποιητικά (σχεδόν για όλο το εύρος των $0.3<\lambda/L_{pp}<3$) με την αντίστοιχη της συνιστώσας ακτινοβολίας, που άγεται από τη μέθοδο Liu- Papanikolaou (2020). Ακόμη, με τη μέθοδο FRANK το τοπικό μέγιστο (κορυφή) παρουσιάζεται για το ίδιο (περίπου) λ/L_{pp} με την αντίστοιχη της συνιστώσας ακτινοβολίας, που άγεται από τη μέθοδο Liu- Papanikolaou (2020).

3.4 ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΩΝ

Η αντίσταση ρευμάτων σχετίζεται με τη διαφορά των ταχυτήτων VOG (Velocity over ground), VTS (Velocity through sea). Η πρώτη μετριέται με GPS, ενώ η δεύτερη με speed logs. Λαμβάνεται υπ' όψιν, κυρίως κατά την επεξεργασία των operational data και όχι σαν αύξηση ή μείωση (ανάλογα με την κατεύθυνσή του) της ισχύος, αλλά σαν μεταβολή της ταχύτητας. Η ταχύτητα over ground απασχολεί περισσότερο την εκάστοτε διαχειρίστρια εταιρεία του πλοίου, από αυτή προκύπτει η διανυόμενη απόσταση από το πλοίο και ο χρόνος του ταξιδιού. Από την άλλη, αυτή είναι που λαμβάνει υπ' όψιν την ύπαρξη των ρευμάτων, σε αντίθεση με τη log speed. Όσον αφορά την εκτίμηση της αντίστασης, άρα και ισχύος πρόωσης (τιμή αναφοράς), που περιγράφεται αναλυτικά και παραπάνω, δεν ελήφθη υπ' όψιν η ύπαρξη των ρευμάτων, καθώς η εν λόγω ισχύς συγκρίνεται με την καμπύλη P-V του sea trials report (βλ.

ΣΧΗΜΑ 19). Η εν λόγω καμπύλη αγνοεί την ύπαρξη ρευμάτων, λόγω του γεγονότος ότι κατά τις δοκιμές παραλαβής, κατά τη διαδικασία που περιγράφεται από την ITTC, οι θαλάσσιες δοκιμές πραγματοποιούνται για πορεία, σε σχέση με την οποία το ρεύμα είναι ευνοϊκό και για πορεία, σε σχέση με την οποία η γωνία (ορθότερα) του ρεύματος αυξάνει την αντίσταση. Εν συνεχεία, λαμβάνεται μέση τιμή. Καθαυτό τον τρόπο έχει απαλειφθεί εν μέρει (ίσως και καθολικά) η επίδραση του ρεύματος στην κίνηση του πλοίου.

3.5 ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Παραπάνω παρουσιάζεται το αντίστοιχο θεωρητικό υπόβαθρο του πεδίου της αντίστασης, εφαρμογή του οποίου έγινε κατά τους υπολογισμούς. Ακόμη, παρατίθεται ποιοτικά η διαδικασία που ακολουθήθηκε ειδικά στην παρούσα εργασία, αλλά και οι όποιες αντικειμενικές δυσκολίες, λόγω έλλειψης απαραίτητων δεδομένων. Επιπλέον, πραγματοποιείται εκτενής παρουσίαση των ποσοτικών αποτελεσμάτων, που εν τέλει μας ενδιαφέρουν, και που θα αποτελέσουν τη βάση σύγκρισης με τα λειτουργικά δεδομένα, από όπου και θα προκύψουν τα όποια συμπεράσματα. Συμπεράσματα, που είτε συνδέονται με την κατάσταση (ρύπανση γάστρας, έλικας) και την ενεργειακή απόδοση του πλοίου, είτε με την αξιοπιστία των μεθόδων που χρησιμοποιούμε στην παρούσα εργασία (λαμβάνοντας υπ' όψιν τις όποιες ελλείψεις στοιχείων[118]), είτε με την ακρίβεια και την ορθότητα των μετρήσεων που παρέχουν τα μετρητικά όργανα, ή γενικότερα ο όποιος τρόπος συλλογής δεδομένων από τη ναυτιλιακή εταιρεία. Αυτά όλα, βέβαια, περιγράφονται αναλυτικά στην ενότητα των Operational Data της παρούσας έκθεσης (βλ. παρακάτω).

[118] Για τις οποίες γίνεται εκτενής αναφορά στις αντίστοιχες υποενότητες της παρούσας έκθεσης.

4 ΠΡΟΩΣΗ

4.1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Όπως αναφέρθηκε επανειλημμένως στην ενότητα (της παρούσας έκθεσης) της αντίστασης, από τα πειράματα προτύπων προκύπτει η αντίσταση ρυμούλκησης, η οποία αναφέρεται εκτός των άλλων[119] σε πλοίο χωρίς έλικα. Αυτή, όμως, η αντίσταση (και κατ' επέκταση η ισχύς) που μας ενδιαφέρει λαμβάνει υπ' όψιν της όχι απλώς την ύπαρξη της έλικας, αλλά και τη λειτουργία της και είναι η αντίσταση πρόωσης. Προκειμένου, λοιπόν, να αχθεί η τελευταία από την πρώτη απαιτείται η γνώση όχι απλώς της ακριβούς γεωμετρίας της προπέλας, αλλά και της συμπεριφοράς της σε ελεύθερη ροή, καθιστώντας έτσι αναγκαία την πραγματοποίηση του ομώνυμου πειράματος[120].

Κρίνεται, λοιπόν, σκόπιμη η παράθεση θεωρητικών στοιχείων για την έλικα και τη λειτουργία της.

4.1.1 ΤΥΠΟΙ ΚΑΙ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΕΛΙΚΑΣ

Το παραδοσιακό μέσο πρόωσης που χρησιμοποιείται από τα πλοία είναι η έλικα. Ρόλος της είναι με την περιστροφή της στις κατάλληλες στροφές να δημιουργήσει πεδίο πιέσεων[121] γύρω από τα πτερύγιά της, τέτοιο ώστε να παράγεται, λόγω διαφοράς πίεσης της πίσω (υποπίεσης) από τη μπροστινή (υπερπίεσης) όψη, ικανή ώση που να υπερνικά τη συνολική αντίσταση, προκειμένου εν τέλει το πλοίο να μπορέσει πλεύσει με μια «ορισμένη» ταχύτητα (βλ. αντίστοιχη υποσημείωση από κεφάλαιο αντίστασης (βλ. υποσημείωση 83)).

Βασικές γεωμετρικές παράμετροι που επιδρούν στη συμπεριφορά της και κατ' επέκταση στον υδροδυναμικό βαθμό απόδοσής της είναι οι κάτωθι:

- η διάμετρος (D)
- το ονομαστικό[122] βήμα (P)
- ο αριθμός των πτερυγίων (z)
- ο λόγος εκτεταμένης επιφάνειας (A_E/A_0)

Επισημαίνεται ότι εκτός των ανωτέρω και άλλες παράμετροι επηρεάζουν τη συμπεριφορά της προπέλας. Παράμετροι, όπως:

- Αριθμός ελίκων
- Τύπος έλικας (Σταθερού βήματος (FPP) ή Μεταβλητού βήματος (CPP))
- Μορφή πτερυγοτομών
- Πλευρική απόκλιση (skew)
- Διαμήκης απόκλιση (rake)
- Γεωμετρία πλήμνης
- Καινοτομίες- ειδικές γεωμετρίες (πχ Kappel)

Παρακάτω παρατίθενται αναλυτικότερα χρήσιμα στοιχεία για τις προαναφερθείσες παραμέτρους, που θα βοηθήσουν στην καλύτερη κατανόηση της ακολουθούμενης διαδικασίας της παρούσας εργασίας.

---

[119] Βλ. κεφάλαιο αντίστασης παρούσας έκθεσης για παρελκόμενα.

[120] Επιπροσθέτως, απαιτείται και η διεξαγωγή πειράματος αυτοπροωθούμενου πλοίου, προκειμένου να αχθούν οι συντελεστές αλληλεπίδρασης (t,w,ηR), ώστε να γίνει χρήση της μεθόδου εξίσωσης στροφών - ώσης (βλ. Αντίσταση-Πρόωση Πολίτη).

[121] Εξήγηση (ενδεικτική) βάσει θεωρήματος Bernoulli.

[122] Συνήθως το βήμα της πτερυγοτομής στο 70% της ακτίνας της έλικας.

Πρώτα, όμως παρατίθεται πίνακας με τα βασικά χαρακτηριστικά της έλικας του υπό ανάλυση bulk-carrier:

ΠΙΝΑΚΑΣ 12: ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΛΙΚΑΣ ΥΠΟ ΑΝΑΛΥΣΗ BULK- CARRIER

MAIN PROPELLER DATA	
TYPE	1 x FPP (FIXED-PITCH)
DIAMETER (m)	7.48
PITCH RATIO (MEAN)	0.66
PITCH AT 0.7R (mm)	5032.8
NUMBER OF BLADES	4
DIRECTION OF ROTATION	RIGHT-HANDED
EXPANDED BLADE AREA RATIO	0.55
REVOLUTIONS AT MCR (rpm)	105
SKEW ANGLE (DEG)	24.5^{o}
HUB DIAMETER RATIO	0.151
MATERIAL	Ni-Al-Bronze

4.1.1.1 ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ

Η διάμετρος (D) αποτελεί μια από τις σημαντικότερης (ίσως και τη σημαντικότερη) παράμετρο λειτουργίας και συμπεριφοράς της έλικας. Η τιμή της είναι που καθορίζει το επίπεδο του υδροδυναμικού βαθμού απόδοσης. Όσο μεγαλύτερη διάμετρο φέρει μια προπέλα τόσο μεγαλύτερος είναι και ο βαθμός απόδοσής της[123]. Βέβαια, υπάρχουν και περιορισμοί, όπως οι ανοχές των ακροπτερυγίων και πτερυγοτομών (όπως αυτής στο 70% της ακτίνας) ως προς την πρυμναία περιοχή της γάστρας, το πηδάλιο, που σχετίζονται με το γεγονός ότι κατά την περιστροφή της έλικας προκαλούνται κρουστικά φαινόμενα ταλαντώσεων που εκφράζονται ως διακυμάνσεις της ροπής ώσης της έλικας, και κραδασμοί και θόρυβοι μεταδίδονται μέσω του άξονα στη μηχανή, αλλά και το υπόλοιπο πρυμναίο μέρος της γάστρας. Επίσης, υπάρχει η ανοχή των ακροπτερυγίων ως προς τη baseline[124], που σχετίζεται με την περίπτωση προσάραξης του πλοίου ή και με το δεξαμενισμό. Ίσως ο βασικότερος, όμως, περιορισμός, ειδικά για πλοία που πλέουν συχνά σε ερματισμένη κατάσταση (όπως τα δεξαμενόπλοια ή και τα ξηρού χύδην), είναι αυτός που απαιτεί πλήρη βύθιση της έλικας, καθώς ο αερισμός της επιδρά αρνητικά στην αντοχή του αξονικού, αλλά και της προπέλας, στην υδροδυναμική απόδοση του πλοίου, στην ασφάλεια των επιβατών και γενικότερα του πλοίου (κραδασμοί), κτλ. Επιπροσθέτως, υπάρχει και περιορισμός που σχετίζεται με τις δυνατότητες χύτευσης και τα καλούπια των κατασκευαστών.

4.1.1.2 ΒΗΜΑ

Συνήθως αναφέρεται στο ονομαστικό (βλ. υποσημείωση 122 της παρούσας έκθεσης) και εκφράζεται σαν λόγος βήμα/διάμετρος (P/D). Το βήμα (P) για ακτίνα r[125] και η γωνία βήματος (θ) συνδέονται μεταξύ τους ως εξής: $\theta = \tan^{-1}\left(\frac{P}{2\pi r}\right)$. Το βήμα, κατ' ουσίαν είναι η απόσταση που η έλικα «βιδώνεται» προς τα μπροστά μέσα στο νερό ανά περιστροφή υπό την προϋπόθεση ότι δεν υπάρχει ολίσθηση. Γενικώς, αν δυο έλικες είναι καθ' όλα όμοιες, με εξαίρεση το βήμα, τότε για δεδομένες στροφές και ταχύτητα, η έλικα

[123] Αυτό αποδεικνύεται από την θεωρία ορμής, σύμφωνα με την οποία η ιδανική απόδοση δίνεται από τη σχέση: $\eta_i = 2/(1+\sqrt{1+C_{Thr}})$, όπου: $C_{Thr} = T/(0.5\rho A_0 V_0^2)$, με $A_0 = \pi D^2/4$, T:ώση, ρ:πυκνότητα περιβάλλοντος νερού.
[124] Συνήθως 0.2÷0.3m.
[125] Το βήμα συνήθως δεν είναι σταθερό, για αυτό γίνεται αναφορά σε ακτινική κατανομή του βήματος.

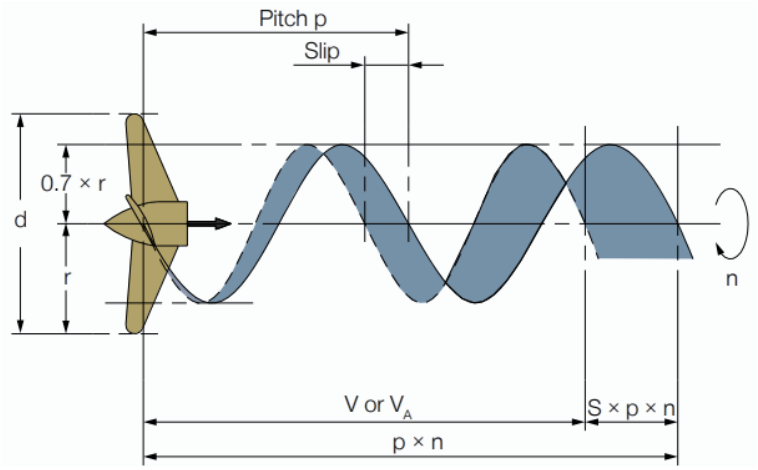
με μεγαλύτερο βήμα θα απορροφά μεγαλύτερη ισχύ και θα αναπτύσσει μεγαλύτερη ώση (βλ. παρακάτω για συντελεστή προχώρησης και τρίγωνο ταχυτήτων πτερυγοτομής έλικας (βλ. **ΣΧΗΜΑ 56**)).

Παραπάνω έγινε αναφορά στο φαινόμενο της ολίσθησης (slip) της έλικας. Αν δεν ολίσθαινε καθόλου η προπέλα (δηλαδή αν το νερό δεν «επιταχυνόταν» προς τα πίσω) τότε θα «προχωρούσε» με ταχύτητα ίση με P·n, όπου P το βήμα και n ο ρυθμός περιστροφής. Βέβαια, το νερό είναι ρευστό, οπότε και υποχωρεί (δηλαδή «επιταχύνει» προς τα πίσω), η πραγματική ταχύτητα της έλικας μειώνεται και γίνεται ίση με την ταχύτητα του πλοίου V. Η φαινόμενη ολίσθηση μπορεί να εκφραστεί έτσι ως (P·n- V). Ο φαινόμενος λόγος ολίσθησης (S_A) ορίζεται ως: $S_A = \frac{P \cdot n - V}{P \cdot n} = 1 - \frac{V}{P \cdot n}$.

Ο φαινόμενος λόγος ολίσθησης (S_A), που υπολογίζεται από το πλήρωμα, δίδει μια αποτύπωση των φορτίων, που ασκούνται στην έλικα κάτω από διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας. Ο φαινόμενος λόγος ολίσθησης αυξάνεται μεταξύ άλλων, όταν το πλοίο πλέει αντίθετα με τον άνεμο ή τα κύματα, σε ρηχά νερά, όταν η γάστρα είναι ρυπασμένη και όταν το πλοίο επιταχύνει. Ο πραγματικός λόγος ολίσθησης θα είναι μεγαλύτερος από τον φαινόμενο, γιατί η πραγματική ταχύτητα προχώρησης V_A της έλικας είναι μικρότερη από την ταχύτητα V του πλοίου (βλ. παρακάτω για ποσοστό ομόρρου). Ο πραγματικός λόγος ολίσθησης S_R, που δίνει μια αληθινή εικόνα της λειτουργίας της έλικας είναι: $S_R = 1 - \frac{V_A}{P \cdot n}$.

Σε δοκιμές στην αποβάθρα, όπου η ταχύτητα του πλοίου είναι 0, και οι δυο προαναφερθέντες αδιάστατοι λόγοι είναι ίσοι με 1. Συνήθως αναφέρονται σαν ποσοστά %.

Παρακάτω, παρατίθεται ενδεικτικό σχήμα, επεξήγησης της ολίσθησης της έλικας.



ΣΧΗΜΑ 52: ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ ΕΛΙΚΑΣ (MAN 2018)

4.1.1.3 ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ

Γενικά, ο αριθμός πτερυγίων z επιλέγεται με σκοπό να αποφευχθεί ο συντονισμός μεταξύ της συχνότητας πτερυγίου (=z*n)[126] και της ιδιοσυχνότητας διαφόρων κατασκευαστικών στοιχείων. Επίσης επιλέγεται έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθούν φαινόμενα δυναμικής καταπόνησης του αξονικού συστήματος (σχετικά με στρεπτικές ταλαντώσεις). Παρόλα αυτά όσο μεγαλώνει ο αριθμός πτερυγίων τόσο μειώνεται και η απόδοση της έλικας[127]. Οι έλικες φέρουν από δύο μέχρι και εφτά πτερύγια. Τα σύγχρονα ποντοπόρα

[126] n=στροφές έλικας

[127]Αυτό οφείλεται και στην αύξηση του λόγου εκτεταμένης επιφάνειας, με αύξηση του αριθμού πτερυγίων. Για αυτό αύξηση των πτερυγίων συνεπάγεται καλύτερη συμπεριφορά σε σπηλαίωση.

πλοία (όπως το υπό ανάλυση bulk carrier) συνήθως φέρουν τετράπτερες ή και πεντάπτερες προπέλες. Το παρόν φέρει τετράπτερη.

4.1.1.4 ΛΟΓΟΣ ΕΚΤΕΤΑΜΕΝΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ

Ο λόγος εκτεταμένης επιφάνειας (A_E/A_0) ισούται με το πηλίκο της εκτεταμένης επιφάνειας (A_E) προς την επιφάνεια του κυκλικού δίσκου της έλικας ($A_0=\pi D^2/4$). Η εκτεταμένη επιφάνεια προκύπτει σαν άθροισμα από όλα τα πτερύγια του εμβαδού που περικλείεται από το εκτεταμένο περίγραμμα κάθε πτερυγίου. Το εκτεταμένο περίγραμμα προκύπτει σαν παρεμβολή των σημείων πρόσπτωσης και εκφυγής των στραμμένων κατά τη γωνία του βήματός τους, αναπτυγμένων πτερυγοτομών[128]. Γενικώς, αύξηση του λόγου εκτεταμένης επιφάνειας επάγει μείωση της έκτασης της σπηλαίωσης, αλλά και μείωση του βαθμού απόδοσης της έλικας που συνδέεται με απώλειες λόγω συνεκτικότητας.

4.1.1.5 ΑΡΙΘΜΟΣ ΕΛΙΚΩΝ

Γενικώς, τα πλοία φέρουν από μία μέχρι και τέσσερις προπέλες (συνήθως 1 με 2) ανάλογα με το είδος τους, αλλά και τη χρήση τους. Τα ποντοπόρα πλοία, όπως το υπό ανάλυση bulk carrier δεν έχουν απαίτηση για αυξημένες ικανότητες πηδαλιουχίας. Ακόμη, το υπό ανάλυση πλοίο ούτε έχει περιορισμένο βύθισμα ούτε απαίτηση για πλεύση σε αβαθή νερά, άρα ούτε και περιορισμό στο ύψος του μηχανοστασίου. Επιπροσθέτως, δύο έλικες συνεπάγονται και (τουλάχιστον) δύο κύριες μηχανές, περιορίζοντας αισθητά το χώρο του μηχανοστασίου. Οι ανωτέρω είναι ορισμένες από τις παραμέτρους που συνιστούν τη χρήση μιας έλικας. Για αυτό και τα περισσότερα ποντοπόρα με αριθμό Fr κοντά στο 0.15, όπως το υπό ανάλυση bulk carrier, είναι μονέλικα.

4.1.1.6 ΤΥΠΟΣ ΕΛΙΚΑΣ

Υπάρχουν δύο είδη ελίκων. Οι σταθερού βήματος (Fixed Pitch Propeller- FPP) και οι μεταβλητού-ρυθμιζόμενου βήματος (Controllable Pitch Propeller- CPP).

Οι σταθερού βήματος προπέλες (FPP), φέρουν πτερύγια σταθερής θέσης, χωρίς δηλαδή να περιστρέφονται, άρα κάθε πτερυγοτομή φέρει ορισμένο βήμα. Ως εκ τούτου δύναται να χυτευτεί ενιαία, οπότε και η κατασκευή της είναι σχετικά απλή, αλλά και οικονομική. Παρόλα αυτά σε περίπτωση κακής θάλασσας, το πλήρωμα δεν έχει τη δυνατότητα να ρυθμίσει το βήμα κατά τέτοιον τρόπο ώστε να μην απαιτείται αύξηση της απαιτούμενης ισχύος από τον κινητήρα (άρα και κατανάλωσης καυσίμου), προκειμένου να παραχθεί η κατάλληλη ώση που θα κινήσει εν τέλει το πλοίο χωρίς μείωση της ταχύτητας. Ακόμη, σε περίπτωση αναπόδισης ή επιβράδυνσης θα πρέπει να σταματήσει τελείως ή κύρια μηχανή και μετά να λειτουργήσει ανάποδα.

Από τη μεριά τους, οι έλικες μεταβλητού βήματος (CPP) έχουν μεγαλύτερη πλήμνη σε σχέση με την έτερη κατηγορία, καθώς η πλήμνη πρέπει να έχει αρκετό χώρο για τον υδραυλικό μηχανισμό ελέγχου της γωνίας- (βήματος) των πτερυγίων. Μάλιστα, είναι πολύ πιο ακριβές από τις έλικες σταθερού βήματος (τρεις με τέσσερις φορές), πιο βαριές, η κατασκευή τους πιο περίπλοκη, ενώ και υπάρχει ρίσκο εμφάνισης προβλημάτων κατά τη λειτουργία της[129]. Επιπλέον, ο μεγάλος λόγος διαμέτρου πλήμνης προς διάμετρο αμβλύνει τον υδροδυναμικό βαθμό απόδοσης.

Πλοία, λοιπόν, χωρίς απαίτηση για αυξημένη ικανότητα ελιγμών[130], όπως τα ποντοπόρα (υπό ανάλυση bulk carrier) φέρουν σχεδόν πάντα έλικα σταθερού βήματος (FPP).

---

[128] Που αναπτύσσονται από τη ρίζα του εκάστου πτερυγίου στην πλήμνη μέχρι το ακροπτερύγιο.

[129] Ή και πιο επιρρεπή στη διάβρωση (χαραγής) λόγω ύπαρξης κοχλιών στη ρίζα των πτερυγίων.

[130] Αλλά και χωρίς απαιτήσεις για πολλαπλά σημεία λειτουργίας, όπως συμβαίνει πχ με τα αλιευτικά (κανονική πλεύση, πλεύση με δίκτυα).

4.1.1.7 ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΕΛΙΚΑΣ

Η σχεδίαση της έλικας δύναται να πραγματοποιηθεί είτε με αναλυτικό τρόπο (πχ θεωρία φερουσών επιφανειών) είτε με βάση συστηματικές σειρές[131] (με πιθανές παρεμβάσεις, κατάλληλες τροποποιήσεις). Αυτό είναι που θα καθορίσει εκτός της γεωμετρίας των πτερυγοτομών, την ακτινική κατανομή του βήματος, του πάχους, την εγκάρσια, τη διαμήκη απόκλιση. Στόχος εν γένει είναι να μην παρουσιάζεται πρόβλημα σπηλαίωσης, αντοχής (να ικανοποιούνται οι κανονισμοί των νηογνωμόνων για το πάχος), και με δεδομένους τους προαναφερθέντες περιορισμούς (βλ. ενότητα παρούσας έκθεσης για διάμετρο), η επιλογή της βέλτιστης δυνατής προωστήριας εγκατάστασης.

Αυτές (οι σειρές) ανάλογα με τις συνθήκες πραγματοποίησης των πειραμάτων και ανάλογα με το αν έγιναν πειράματα σε σήραγγα σπηλαίωσης μπορούν να παρέχουν αξιόπιστα ή μη αποτελέσματα ως προς την αντιμετώπιση του φαινομένου της σπηλαίωσης. Μάλιστα, οι σειρές ταξινομούνται σε υποσπηλαίωσης, υπερσπηλαίωσης και μερικής σπηλαίωσης. Το υπό ανάλυση πλοίο είναι συμβατικό πλοίο εκτοπίσματος, που λόγω Fr, στροφών, διαμέτρου προπέλας, κτλ. δεν είναι τόσο έντονο το φαινόμενο της σπηλαίωσης. Ως εκ τούτου σπηλαίωση μικρότερη του 5% της πίσω όψης του πτερυγίου θα ήταν αποδεκτή. Άρα, η σχεδίαση έλικας βάσει σειράς υποσπηλαίωσης (με τις όποιες μετέπειτα παρεμβάσεις) και αποδεκτή θα είναι και οικονομικώς συμφέρουσα όσον αφορά το κόστος κτήσης. Τα ανωτέρω σε συνδυασμό με την πραγματοποίηση αρκετών πειραμάτων για διάφορες γεωμετρίες ελίκων, καθιστώντας την έτσι αξιόπιστη σειρά, μας οδηγούν στην επιλογή έλικας για το υπό ανάλυση πλοίο βάσει της σειράς Wageningen-B, ελλείψει στοιχείων για πειράματα της έλικας (του υπό ανάλυση bulk- carrier) σε ελεύθερη ροή. Σε αυτή την επιλογή γίνεται αναφορά και παρακάτω στην έκθεση.

4.1.2 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΡΟΗΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΕΛΙΚΑ

Προκειμένου να γίνει αναγωγή της αντίστασης ρυμούλκησης σε αντίσταση πρόωσης, εκτός της γνώσης της γεωμετρίας και της συμπεριφοράς της έλικας, απαιτούνται και στοιχεία που αφορούν τη σύζευξη από έλικα σε ελεύθερη ροή και ρυμουλκούμενο πλοίο σε αυτοπροωθούμενο. Αυτή η σύζευξη, που περιγράφεται αναλυτικά σε συγγράμματα πρόωσης (βλ. σχετική βιβλιογραφία- Αντίσταση- Πρόωση Πολίτη), είθισται να πραγματοποιείται με χρήση της μεθόδου στροφών- ώσης (αναφορά για την οποία «ξεφεύγει» από τους σκοπούς της παρούσας διπλωματικής). Έτσι, ορίζονται κάποιοι συντελεστές αλληλεπίδρασης[132], που επιτρέπουν αυτή τη σύζευξη (με ιδιαίτερο ποσοτικό ενδιαφέρον) και οι οποίοι είναι οι εξής:

- Συντελεστής μείωσης ώσης (t)
- Συντελεστής ομόρρου (w)
- Βαθμός απόδοσης σχετικής περιστροφής (η_R)

Οι εν λόγω συντελεστές σχετίζονται με τις διαφορές του πεδίου του περιβάλλοντος ρευστού, στην περίπτωση αυτοπροωθούμενου πλοίου σε σχέση με τις περιπτώσεις ρυμούλκησης πλοίου και έλικας σε ελεύθερη ροή, αποτελώντας δηλαδή διορθώσεις. Προκύπτουν με την πραγματοποίηση και[133] πειράματος αυτοπροωθούμενου πλοίου.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι προαναφερθέντες συντελεστές αναλυτικά.

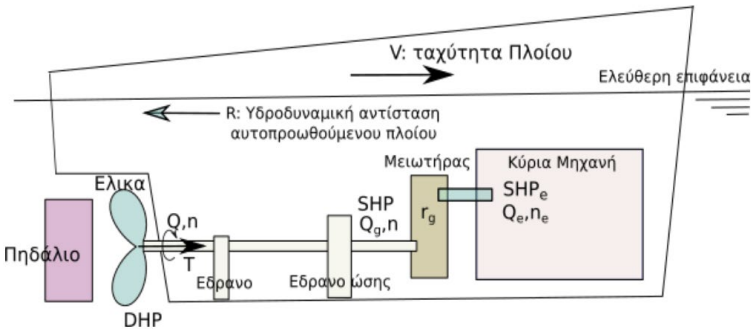
[131] Συνήθως της Wageningen-B.
[132] Αλληλεπίδραση γάστρας με προωστήρια εγκατάσταση.
[133] Συν πείραμα ρυμούλκησης και έλικας σε ελεύθερη ροή.

Πρώτα, όμως, παρατίθεται πίνακας με επεξήγηση συμβόλων που θα χρησιμοποιηθούν αργότερα. Σημειώνεται ότι στον εν λόγω πίνακα παρουσιάζονται τα μεγέθη που αφορούν μόνο τη μέθοδο εξίσωσης στροφών- ώσης, η οποία και χρησιμοποιείται.

ΠΙΝΑΚΑΣ 13: ΣΥΜΒΟΛΑ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥΣ

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
Q	Ροπή προσδιδόμενη στην έλικα σε αυτοπροωθούμενο πλοίο
Q_0	Ροπή προσδιδόμενη στην έλικα σε ελεύθερη ροή
T	Παραγόμενη ώση από την έλικα
R	Συνολική αντίστασης πρόωσης πλοίου
R_0	Συνολική αντίσταση ρυμούλκησης με παρελκόμενα
n	Στροφές έλικας
V	Ταχύτητα πλεύσης πλοίου
V_A	Ταχύτητα προχώρησης
SHP_e =BHP	Ισχύς κύριας μηχανής πρόωσης
SHP	Ισχύς άξονα μετά το μειωτήρα στροφών (αν υπάρχει)
DHP	Ισχύς αποδιδόμενη στην έλικα αυτοπροωθούμενου πλοίου
DHP_0	Ισχύς αποδιδόμενη στην έλικα σε ελεύθερη ροή
THP_0	Ισχύς ώσης που η έλικα προσδίδει στο νερό (σε ελεύθερη ροή)
EHP	Συνολική ισχύς ρυμούλκησης πλοίου

Παρακάτω παρατίθεται ενδεικτικό σχήμα της προωστήριας εγκατάστασης, για πιο παραστατική επεξήγηση συμβόλων που παρατίθενται στον παραπάνω πίνακα.



ΣΧΗΜΑ 53: ΑΥΤΟΠΡΟΩΘΟΥΜΕΝΟ ΠΛΟΙΟ- ΣΧΗΑΜΤΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ- ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ

4.1.2.1 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΙΩΣΗΣ ΩΣΗΣ

Η λειτουργία της έλικας (περιστροφή της) έχει ως αποτέλεσμα την περεταίρω διαταραχή του πεδίου των πιέσεων εκατέρωθεν των πτερυγίων της. Πιο συγκεκριμένα η όψη υποπίεσης (πίσω όψη) κατά την πρόσω πλεύση του πλοίου είναι ανάμεσα στην έλικα και την πρυμναία περιοχή της γάστρας. Ως εκ τούτου, οι πιέσεις της πρυμναίας περιοχής της γάστρας ελαττώνονται σε σχέση με την περίπτωση χωρίς έλικα σε λειτουργία. Η λειτουργία της προπέλας δεν επηρεάζει το πεδίο των πιέσεων του πρωραίου τμήματος της γάστρας, μιας και η προπέλα κείται επί της πρυμναίας περιοχής και είναι κατάντι της ροής. Ως γνωστόν, η αντίσταση πίεσης προκύπτει σαν ολοκλήρωση των προβολών των πιέσεων κάθε

στοιχειώδους επιφάνειας της γάστρας επί του διαμήκους άξονα του πλοίου. Κατά συνέπεια, στην περίπτωση ρυμουλκούμενου πλοίου οι πιέσεις της πλώρης (φορά προς πρύμνη) υπερισχύουν έναντι των πιέσεων της πρύμνης (φορά προς πρώρα). Βάσει της συλλογιστικής πορείας που παρουσιάστηκε παραπάνω, με τη λειτουργία της έλικας, οι πιέσεις της πλώρης υπερισχύουν ακόμη περισσότερο έναντι των αντιστοίχων της πρύμνης. Ακόμη, η λειτουργία της προπέλας τροποποιεί και το οριακό στρώμα στην πρυμναία περιοχή, επιδρώντας και στις εφαπτομενικές τάσεις. Οπότε, υπάρχει αύξηση της αντίστασης, η οποία λαμβάνεται υπ' όψιν με χρήση του συντελεστή μείωσης ώσης (t). Άρα:

$t = \frac{R-R_0}{R}$, όπου: R: αντίστασης πρόωσης του πλοίου, R_0: διορθωμένη αντίστασης ρυμούλκησης του πλοίου, που λαμβάνει υπ' όψιν της τα παρελκόμενα[134], όχι όμως την προπέλα.

Το μέγεθος του συντελεστή μείωσης ώσης (t) για ένα μονέλικο πλοίο κυμαίνεται, εν γένει, στην περιοχή 0.12÷0.30, καθώς ένα πλοίο με μεγάλο συντελεστή γάστρας έχει μεγάλο συντελεστή μείωσης ώσης (βλ. παραπάνω ανάλυση με πεδίο πιέσεων). Για ένα πλοίο με δυο έλικες ο συντελεστής μείωσης ώσης θα είναι αρκετά μικρότερος , μιας και οι έλικες λειτουργούν πιο μακριά από τη γάστρα.

Το t δύναται να εκτιμηθεί ως η μέση τιμή των εμπειρικών σχέσεων: $t = w(1.57 - 2.3C_B/C_{WL} + 1.5C_B)$ (S.S.P.A.), $t = 0.5C_P - 0.12$ (Hecksher), $t = 0.5C_B - 0.15$ (Danckwardt). Και προκύπτει (για το υπό ανάλυση bulk- carrier): t=0.2679 (FL), t=0.2360 (BL). Οι εν λόγω τιμές είναι ενδεικτικές και όπως αναφέρεται και παρακάτω στην έκθεση δεν θα χρησιμοποιηθούν στην έκθεση, απλώς παρατίθενται για λόγους πληρότητας, αλλά και σαν αίσθηση της τάξης μεγέθους του εν λόγω συντελεστή, βάσει παλαιών εμπειρικών σχέσεων.

4.1.2.2 ΠΟΣΟΣΤΟ ΟΜΟΡΡΟΥ

Το ποσοστό ομόρρου (w) αναπαριστά τη διαφορά απόδοσης της έλικας, λόγω του ότι δέχεται ροή μέσης ταχύτητας (V_A=ταχύτητα προχώρησης) διαφορετικής από της ταχύτητας του πλοίου (V), λόγω της λειτουργίας της πίσω από το πλοίο (στο ομόρρου). Είθισται να αναφερόμαστε σε αυτή την αλλαγή της ταχύτητας με τον αδιάστατο συντελεστή:

$\mathrm{w} = (\mathrm{V} - \mathrm{V_A})/\mathrm{V}$, που αποτελεί και τον ορισμό του ποσοστού ομόρρου.

Το προαναφερθέν μέγεθος αποτελεί το συνολικό ποσοστό ομόρρου. Βάσει της ανάλυσης, που θα ακολουθήσει γίνεται σαφές ότι ο εν λόγω συντελεστής αναλύεται σε τρεις επί μέρους συνιστώσες και οι οποίες είναι οι εξής (βάσει Harvald (βλ. και Molland)):potential wake, frictional wake, wave wake.

Λόγω της συνεκτικότητας του περιβάλλοντος νερού, γύρω από τη γάστρα αναπτύσσεται οριακό στρώμα. Ως γνωστόν όσο απομακρυνόμαστε από την πλώρη και πλησιάζουμε την πρύμνη, το πάχος του οριακού στρώματος γίνεται ακόμη μεγαλύτερο. Ως εκ τούτου, το πεδίο των ταχυτήτων των ροών στην περιοχή της πλώρης είναι μειωμένο σε σχέση με την ταχύτητα του πλοίου. Αυτή η μείωση της ταχύτητας της ροής στην περιοχή της προπέλας και που οφείλεται στο ομόρρου του οριακού στρώματος (λόγω συνεκτικότητας ροής), εκφράζεται με αντίστοιχη συνιστώσα του ποσοστού ομόρρου, το frictional wake.

Αν το περιβάλλον ρευστό ήταν μη συνεκτικό, τότε δεν θα υπήρχε οριακό στρώμα. Στην ιδεατή αυτή περίπτωση οι ροές του νερού θα στένευαν στην περιοχή του παραλλήλου τμήματος της γάστρας, ενώ θα αραίωναν στην περιοχή της πρύμνης. Κατά συνέπεια, στην περιοχή του δίσκου της έλικας παρουσιάζεται αύξηση της πίεσης και μείωση της ταχύτητας (λόγω Bernoulli). Αυτή η μείωση της ταχύτητας της ροής

[134] Και την αντίσταση αέρα, όπως και τις τυχούσες λοιπές αντιστάσεις (βλ. αντίστοιχο ενότητα αντίστασης στην παρούσα έκθεση).

στην περιοχή της προπέλας και που οφείλεται στην αλλαγή της γεωμετρίας της γάστρας στην περιοχή της πρύμνης εκφράζεται με αντίστοιχη συνιστώσα του ποσοστού ομόρρου, το potential wake.

Κατά την πλεύση του ένα πλοίο δημιουργεί σύστημα κυματισμών (βλ. ανάλυση εδαφίου της αντίστασης στην παρούσα έκθεση). Το εν λόγω σύστημα προκύπτει σαν υπέρθεση κυμάτων που δημιουργούνται από τα «άπειρα» σημεία της γάστρας. Ως γνωστόν, τα μόρια του νερού κατά την ανάπτυξη κυματισμών ακολουθούν για μεγάλο βάθος κυκλική κίνηση (για τροχοειδές κύμα και έλλειψη για ρηχό νερό). Όσο μεγαλώνει η απόσταση των μορίων από την επιφάνεια της θαλάσσης τόσο μειώνεται και η κινητική τους ενέργεια- ταχύτητά τους. Το πρυμναίο κυρίως σύστημα κυματισμών που παράγεται δηλαδή από την πρύμνη επηρεάζει την ταχύτητα των μορίων του νερού γύρω από την προπέλα. Μάλιστα, όσο πιο κοντά είναι η έλικα στην επιφάνεια της θαλάσσης, κάτι που συμβαίνει πιο πολύ στα διπλέλικα (και όχι στα μονέλικα), τόσο η εν λόγω μεταβολή της ταχύτητας του περιβάλλοντος ρευστού επηρεάζουν την έλικα. Αυτή η μεταβολή της ταχύτητας της ροής στην περιοχή της προπέλας και που οφείλεται στο «ίδιον» κύμα του πλοίου κατά την πλεύση του εκφράζεται με αντίστοιχη συνιστώσα του ποσοστού ομόρρου, το wave wake.

Κατά Harvald (και λιγότερο αναλυτικά κατά Molland) προκύπτουν οι εξής τυπικές τιμές:

- potential wake: 0.08-0.12
- frictional wake: 0.09-0.23
- wave wake: 0.03-0.05

Οι τρεις ανωτέρω συνιστώσες του ομόρρου συντίθενται και από αρχή της επαλληλίας προκύπτει το συνολικό ποσοστό ομόρρου. Η τιμή του συνολικού ποσοστού ομόρρου εξαρτάται σημαντικά από τη γεωμετρία της γάστρας, από την θέση της έλικας, αλλά και από το μέγεθός της. Για μονέλικα πλοία ο πραγματικός (effective[135]) w λαμβάνει συνήθως τιμές στο πεδίο 0.2÷0.45. Τα διπλέλικα λαμβάνουν χαμηλές τιμές w, λόγω του ότι οι προπέλες είναι πιο απομακρυσμένες από τη γάστρα.

Το w δύναται να εκτιμηθεί ως η μέση τιμή των εμπειρικών σχέσεων: $w=0.75C_B-0.24$(Kruger), $w=0.7C_P-0.18$ (Hecksher), $w=0.25+2.5(C_B-0.6)^2$ (Troost). Και προκύπτει (για το υπό ανάλυση bulk- carrier): w=0.3918 (FL), w=0.3172 (BL). Οι εν λόγω τιμές είναι ενδεικτικές και όπως αναφέρεται και παρακάτω στην έκθεση δεν θα χρησιμοποιηθούν στην έκθεση, απλώς παρατίθενται για λόγους πληρότητας, αλλά και σαν αίσθηση της τάξης μεγέθους του εν λόγω συντελεστή, βάσει παλαιών εμπειρικών σχέσεων.

4.1.2.3 ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΣΧΕΤΙΚΗΣ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ

Η λειτουργία της προπέλας στο ομόρρου πίσω από το πλοίο δεν είναι ίδια με τη λειτουργία της σε ελεύθερη ροή, λόγω διαφορετικής ροής περιβάλλοντος ρευστού. Η πραγματική ροή του νερού που ρέει προς την έλικα είναι ένα είδος περιστροφικής ροής και όχι ομοιόμορφης και κάθετης στο δίσκο της έλικας, όπως στην ελεύθερη ροή. Κατά συνέπεια επηρεάζεται ο βαθμός απόδοσης της έλικας. Η εν λόγω μεταβολή (του β.α.) εκφράζεται με τη βοήθεια του βαθμού απόδοσης σχετικής περιστροφής (η_R). Όπου:

$$\eta_R = \frac{DHP_0}{DHP} = \frac{Q_0}{Q}$$

Σε μονέλικα ο η_R είναι κανονικά γύρω στο 1÷1.07, κάτι που καθιστά την προγραφείσα περιστροφή του νερού ευεργετική. Κάτι τέτοιο δε συμβαίνει σε διπλέλικα, όπου συνήθης τιμή είναι το 0.98.

[135] Και όχι ο ονομαστικός (nominal) w, που σχετίζεται με την περίπτωση που δεν είναι σε λειτουργία η προπέλα και έχει πειραματικό ενδιαφέρον, αλλά και πρακτικό για τον υπολογισμό εν τέλει του πραγματικού.

Εκτός των προαναφερθέντων συντελεστών αλληλεπίδρασης, υπάρχουν και άλλα μεγέθη που επηρεάζουν την τελική τιμή της ισχύος πρόωσης, όταν προκύπτει από την ισχύ ρυμούλκησης κατά τους υπολογισμούς, όπως στην παρούσα εργασία. Αυτοί παρατίθενται παρακάτω, όπου και αναλύονται.

Το η_R δύναται να εκτιμηθεί κατά Holtrop-Mennen 1978: $\eta_R = 0.9922 - 0.05908\frac{A_E}{A_0} + 0.07424\left(C_p - 0.0225lcb\right)$, με lcb=LCB-$L_{BP}$/2 (δηλαδή ως προς το μέσο νομέα), $\frac{A_E}{A_0} = 0.55$. Και προκύπτει (για το υπό ανάλυση bulk- carrier): η_R=1.0094 (FL), η_R=1.0081 (BL). Οι εν λόγω τιμές είναι ενδεικτικές και όπως αναφέρεται και παρακάτω στην έκθεση δεν θα χρησιμοποιηθούν στην έκθεση, απλώς παρατίθενται για λόγους πληρότητας, αλλά και σαν αίσθηση της τάξης μεγέθους του εν λόγω συντελεστή, βάσει παλαιών εμπειρικών σχέσεων.

4.1.2.4 ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΓΑΣΤΡΑΣ

Ο βαθμός απόδοσης γάστρας (η_H) ισούται με το λόγο: $\eta_H = (1-t)/(1-w)$ και ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος ρυμούλκησης (EHP) προς την ισχύ ώσης που προσδίδει η έλικα στο νερό (THP_0). Οπότε:

$$\eta_H = \frac{EHP}{THP_0} = \frac{R_0 V}{T V_A} = \frac{R_0/V_A}{T/V} = \frac{1-t}{1-w}$$

Για μονέλικα πλοία ο βαθμός απόδοσης γάστρας κυμαίνεται συνήθως στο εύρος τιμών: 1.1-1.4, με την υψηλή τιμή για πλοία με υψηλό συντελεστή γάστρας. Για διπλέλικα πλοία με συμβατική γάστρα ο βαθμός απόδοσης γάστρας λαμβάνει συνήθως τιμές στο εύρος: 0.95-1.05, με τις υψηλές τιμές για υψηλό συντελεστή γάστρας.

4.1.2.5 ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΕΛΙΚΑΣ ΣΕ ΕΛΕΥΘΕΡΗ ΡΟΗ

Ο βαθμός απόδοσης έλικας (η_0) σχετίζεται με την ελεύθερη ροή, δηλαδή όταν η έλικα δε βρίσκεται πίσω από τη γάστρα και λειτουργεί σε ομοιογενές πεδίο ομόρρου. Ειδικότερα, ο βαθμός απόδοσης της έλικας σε ελεύθερη ροή ορίζεται ως ο λόγος της ωφέλιμης ισχύος της ώσης που αναπτύσσει η έλικα ($THP_0 = V_A T$) προς την ισχύ που δαπανάμε για να την περιστρέψουμε ($DHP_0 = \omega Q = 2\pi n Q$):

$$\eta_0 = \frac{THP_0}{DHP_0} = \frac{V_A T}{\omega Q} = \frac{V_A \frac{T}{\rho n^2 D^4}}{\omega D \frac{Q}{\rho n^2 D^5}} = \frac{V_A}{2\pi n D}\frac{k_T}{k_Q} = \frac{J}{2\pi}\frac{k_T}{k_Q}$$ [136]

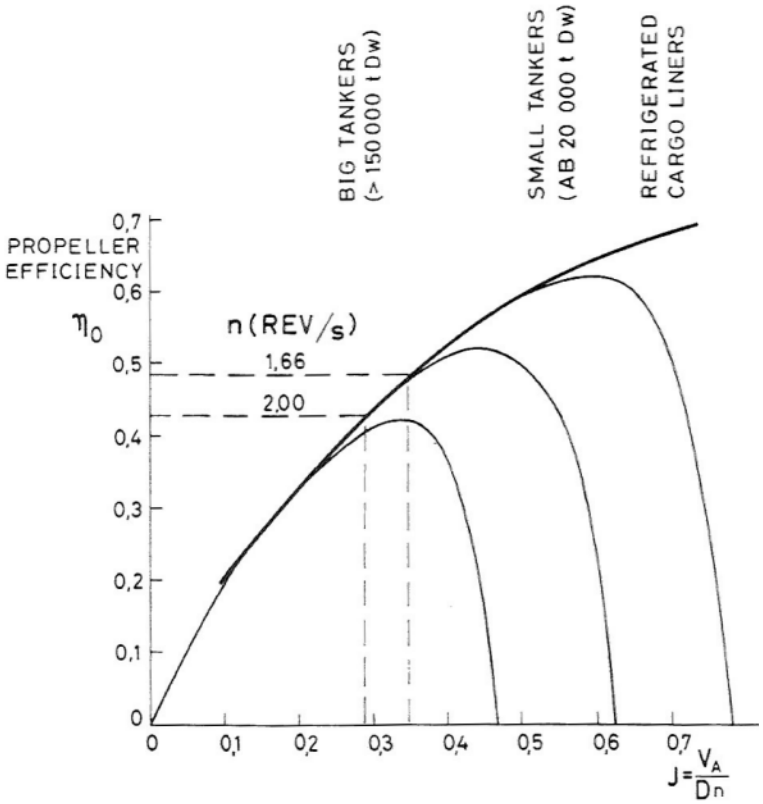
Στην παραπάνω σχέση περιέχονται κάποιοι αδιάστατοι συντελεστές, των οποίων η σημασία θα επεξηγηθεί παρακάτω αναλυτικά, σε άλλα εδάφια. Αυτά τα μεγέθη είναι:

- Ο συντελεστής προχώρησης (J), με $J = \frac{V_A}{2\pi n D}$.
- Ο συντελεστής ώσης (k_T), με $k_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}$.
- Ο συντελεστής ροπής (k_Q), με $k_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5}$.

Ένας από τους πιο συνηθισμένους τρόπους παρουσίασης της συμπεριφοράς της προπέλας σε ελεύθερη ροή είναι το διάγραμμα ελεύθερης ροής. Σε αυτό παρατίθενται τα πειραματικά αποτελέσματα για το συντελεστή ώσης (k_T), ροπής ($10k_Q$), αλλά και βαθμού απόδοσης έλικας (η_0) σε ελεύθερη ροή, συναρτήσει του συντελεστή προχώρησης (J), με παράμετρο το λόγο βήματος (P/D) και για δεδομένες

[136] ρ= πυκνότητα περιβάλλοντος ρευστού.

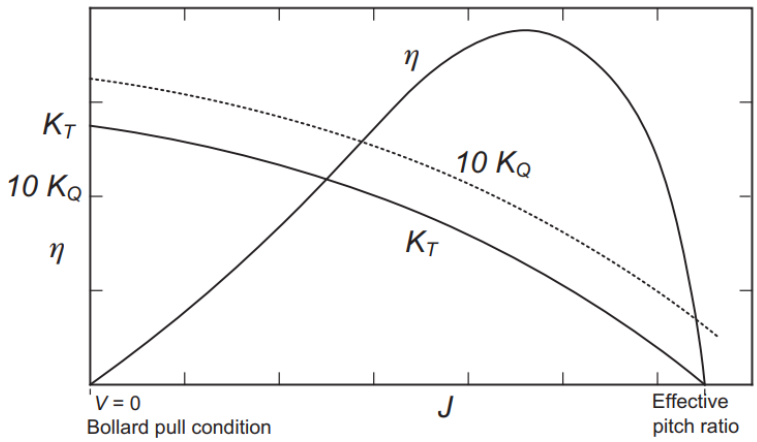
τιμές αριθμού πτερυγίων (z), λόγου εκτεταμένης επιφάνειας (A_E/A_0), αριθμού σπηλαίωσης (σ), αριθμού Re[137]. (Τονίζεται, ότι, γενικώς, αύξηση του Re οδηγεί σε αύξηση του συντελεστή ώσης και μείωση του συντελεστή ροπής, άρα σε αύξηση του βαθμού απόδοσης έλικας σε ελεύθερη ροή). Από αυτό το διάγραμμα γίνεται σαφές ότι: οι καμπύλες βαθμού απόδοσης είναι συνάρτηση των καμπυλών των συντελεστών ροπής και ώσης. Παρακάτω, παρατίθεται εν μέρει ενδεικτικό διάγραμμα ελεύθερης ροής, μιας και υπάρχει μόνο η καμπύλη του βαθμού απόδοσης.



ΣΧΗΜΑ 54: ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΕΛΙΚΑΣ ΣΕ ΕΛΕΥΘΕΡΗ ΡΟΗ (HARVALD)

Ακόμη, παρατίθεται και ένα τυπικό διάγραμμα ελεύθερης ροής μιας τυχαίας έλικας:

[137] Αλλά και αριθμών Fr, Weber (βλ. Αντίσταση –Πρόωση Πολίτη).



ΣΧΗΜΑ 55: ΤΥΠΙΚΗ ΜΟΡΦΗ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΡΟΗΣ ΓΙΑ ΣΥΓΚΕΚΡΙΜΕΝΟ P/D (MOLLAND)

Γενικώς, το η_0 εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της έλικας (διάμετρο, εκτεταμένη επιφάνεια, αριθμό πτερυγίων, ταχύτητα περιστροφής, βήμα, κλπ.). Η μορφή της άνωθι καμπύλης, μάλιστα επηρεάζεται από τα είδη απωλειών, που είναι: frictional losses, rotational, axial jet losses.

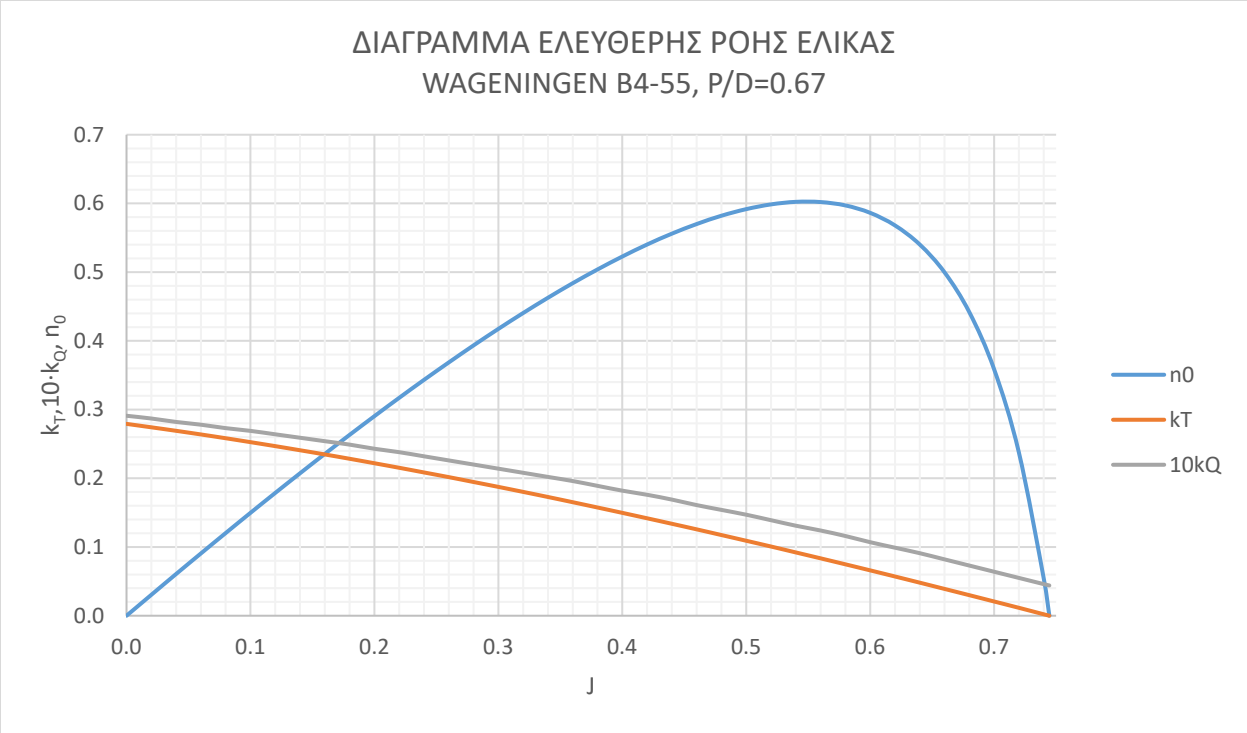
Ο βαθμός απόδοσης της έλικας (η_0) συνήθως κυμαίνεται από 0.35÷0.75.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην προκειμένη εργασία, ελλείψει στοιχείων για το πείραμα έλικας σε ελεύθερη ροή για το υπό ανάλυση bulk- carrier, επιλέχθηκε μια έλικα της σειράς Wageningen με παραπλήσια με την πραγματική έλικα γεωμετρικά στοιχεία, κατά τέτοιον τρόπο που να μην υπάρχει μεγάλη απόκλιση από τη βέλτιστη δυνατή. Πιο συγκεκριμένα, η επιλεχθείσα έλικα φέρει την ίδια διάμετρο (7.48m), τον ίδιο λόγο εκτεταμένων επιφανειών (0.55), τον ίδιο αριθμό πτερυγίων (4) και παραπλήσιο λόγο βήματος P/D (0.67) με της πραγματικής έλικας. Παρακάτω, παρατίθεται το διάγραμμα ελεύθερης ροής της έλικας του υπό ανάλυση bulk- carrier.

Επισημαίνεται, προτού παρουσιαστεί το εν λόγω διάγραμμα, ότι επειδή στο report για τη σειρά ελίκων B- Wageningen δεν παρουσιάζονται στοιχεία για το εν λόγω βήμα. Ως εκ τούτου, για την εύρεση των συναρτήσεων $k_T(J)$, $k_Q(J)$, άρα και[138] $\eta_0(J)$ βασιζόμεθα στις πολυωνυμικές συναρτήσεις, που παρουσιάζονται στην εργασία 'Oosterveld, Ossannen, Further Analyzed Data of the Wageningen B-Screw Series, ISP, July 1975', οι οποίες έχουν ως ανεξάρτητες παραμέτρους τα αδιάστατα μεγέθη: J, P/D, A_E/A_0, z και οι οποίες έχουν την ακόλουθη μορφή:

$k_T = \sum_{n=1}^{39} C_n J^{S_n} (P/D)^{t_n} (A_E/A_0)^{u_n} z^{v_n}$, $k_Q = \sum_{n=1}^{47} C_n J^{S_n} (P/D)^{t_n} (A_E/A_0)^{u_n} z^{v_n}$, όπου οι συντελεστές C_n, S_n, t_n, u_n, v_n δίνονται σε πινακοποιημένη μορφή στο προαναφερθέν report του 1975.

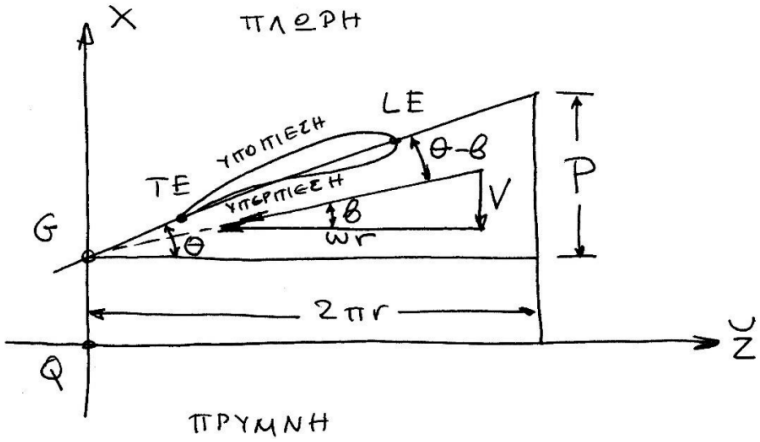
[138] $\eta_0 = \frac{J}{2\pi}\frac{k_T}{k_Q}$



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΡΟΗΣ ΕΛΙΚΑΣ ΥΠΟ ΑΝΑΛΥΣΗ BULK- CARRIER

4.1.2.5.1 ΣΗΜΕΙΩΣΗ

Σε αυτό το σημείο καθίσταται αναγκαία η παράθεση σχήματος, βάσει του οποίου μπορεί να επεξηγηθεί με σαφήνεια (βάσει υδροδυναμικής) το πως επηρεάζεται ο βαθμός απόδοσης της έλικας και γενικότερα της προωστήριας εγκατάστασης με μεταβολή διαφόρων παραμέτρων: γεωμετρικών (πχ βήμα), αλλά και ταχύτητα, στροφές. Το εν λόγω σχήμα αναφέρεται ως τρίγωνο ταχυτήτων της πτερυγοτομής της έλικας ή απλώς σαν τρίγωνο ταχυτήτων για την παρούσα ενότητα της Πρόωσης στην παρούσα έκθεση.



ΣΧΗΜΑ 56: ΤΡΙΓΩΝΟ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΣΕ ΠΤΕΡΥΓΟΤΟΜΗ ΕΛΙΚΑΣ (ΠΟΛΙΤΗΣ)

Επισημαίνεται ότι β είναι η γωνία αδιατάρακτης ροής, θ η γεωμετρική γωνία του βήματος της πτερυγοτομής, θ-β η γωνία πρόσπτωσης της πτερυγοτομής. Μάλιστα, $\tan\beta = \frac{J}{\pi r/R}$, όπου φαίνεται η σχέση της γωνίας β μα το συντελεστή προχώρησης J.

4.1.2.6 ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΕΛΙΚΑΣ ΠΙΣΩ ΑΠΟ ΠΛΟΙΟ

Ο λόγος της ισχύος ώσης που αποδίδει η έλικα στο νερό προς την ισχύ που παραλαμβάνει η έλικα μέσω του άξονα, δηλαδή ο βαθμός απόδοσης της έλικας (η_B) για μια έλικα που λειτουργεί πίσω από το πλοίο ορίζεται ως:

$$\eta_B = \frac{THP_0}{DHP} = \eta_o \eta_R$$

4.1.2.7 ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΕΛΙΚΑΣ- ΠΛΟΙΟΥ

Ο βαθμός απόδοσης έλικας- πλοίου (quasi propulsive efficiency, η_D), ο οποίος ορίζεται από τη σχέση:

$$\eta_D = \frac{EHP}{DHP} = \frac{EHP}{THP_0}\frac{THP_0}{DHP_0}\frac{DHP_0}{DHP} = \eta_H \eta_o \eta_R$$

Γενικά ο καλύτερος βαθμός απόδοσης έλικας- πλοίου επιτυγχάνεται όταν η προπέλα λειτουργεί σε ομοιογενές πεδίο ομόρρου.

4.1.2.8 ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΑΞΟΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Ο βαθμός απόδοσης του αξονικού συστήματος (η_s) εξαρτάται μεταξύ άλλων από την ευθυγράμμιση και τη λίπανση των εδράνων του άξονα. Ισούται με (για επεξήγηση συμβόλων βλ. αντίστοιχο πίνακα παραπάνω):

$$\eta_s = \frac{DHP}{SHP}$$

Τυπικές τιμές του η_s κυμαίνονται στο εύρος 0.96÷0.995.

4.1.2.9 ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΠΡΟΩΣΤΗΡΙΑΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ (ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΠΡΟΩΣΗΣ)

Ο συνολικός βαθμός απόδοσης προωστήριας εγκατάστασης, που ονομάζεται συντελεστής πρόωσης (PC) ορίζεται από τη σχέση:

$$PC = \frac{EHP}{SHP} = \frac{EHP}{DHP}\frac{DHP}{SHP} = \eta_D \eta_s = \eta_H \eta_o \eta_R \eta_s$$ [139]

Σε μια καλοσχεδιασμένη προωστήρια εγκατάσταση ο συντελεστής πρόωσης μπορεί να κυμαίνεται στην περιοχή 70%÷75%. Από στατιστικά, όμως έχουν προκύψει οι ακόλουθες συνήθεις τιμές: 50%÷70%.

[139] Επισημαίνεται ότι το (1-w) είναι στον παρανομαστή της σχέσης από την οποία υπολογίζεται το PC. Αυτό σημαίνει ότι όσο μεγαλύτερο είναι το w τόσο μεγαλύτερος είναι και ο βαθμός απόδοσης της προωστήριας εγκατάστασης. Πρακτικά, αυτό σημαίνει ότι η έλικα κατά την πρόσω κίνηση του (αυτοπροωθούμενου) πλοίου ανακτά μέρος της απολυόμενης ενέργειας λόγω ομόρρου. Πράγματι, αύξηση του w για δεδομένη ταχύτητα του πλοίου συνεπάγεται μείωση της ταχύτητας προχώρησης. Λόγω αυτής της μείωσης της VA, μειώνεται και η γωνία β της αδιατάρακτης ροής, που για δεδομένες στροφές και γεωμετρία της έλικας (κατανομή βήματος) συνεπάγεται αύξηση της γωνίας θ-β (γωνίας πρόσπτωσης), όπου θ η γωνία του βήματος. Έτσι, βάσει Bernoulli, η έλικα παράγει μεγαλύτερη ώση υπό τις προαναφερθείσες συνθήκες, δηλαδή είναι πιο αποδοτική. Άρα, με αύξηση του w αυξάνεται το PC. Αντίθετα, μείωση του w, συνεπάγεται μείωση του PC. Ειδικά, όταν η ταχύτητα πλεύσης του πλοίου ισούται με την ταχύτητα προχώρησης, που συμβαίνει για w=0, τότε μειώνεται κατά πολύ το PC. Αυτός είναι και ο βασικός υδροδυναμικός λόγος, για τον οποίο η έλικα δεν τοποθετείται στην πλώρη, όπως στο πείραμα έλικας σε ελεύθερη ροή.

4.2 ΠΕΡΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ

Παρακάτω παρατίθενται στοιχεία για τη διαδικασία των υπολογισμών της ισχύος πρόωσης, αλλά και αποτελέσματα αυτών σε πινακοποιημένη και γραφική μορφή. Παρόλα αυτά, κρίνεται επιβεβλημένη η αναφορά πρώτα σε ζητήματα που τίθενται και που επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Αυτά σχετίζονται με τον αποκαλούμενο «νόμο» της έλικας και με το συντελεστή ναυαρχείου.

4.2.1 «ΝΟΜΟΣ» ΤΗΣ ΕΛΙΚΑΣ

Προκειμένου η έλικα να παράγει την κατάλληλη ώση ώστε να υπερνικήσει την αντίσταση και να πλεύσει το πλοίο σε «μια» ταχύτητα (V), χρειάζεται να της παρέχεται μέσω του άξονα η κατάλληλη ισχύς (DHP), η οποία με τη σειρά της εξαρτάται από τη ροπή που προέρχεται από την κύρια μηχανή και τις στροφές (n). Αυτή η καμπύλη που περιγράφει τη DHP συναρτήσει των στροφών (n) αποτελεί χαρακτηριστική καμπύλη απαίτησης της έλικας. Πολλές φορές η εν λόγω καμπύλη βασίζεται στο «νόμο»[140] της έλικας, που επιβάλλει την κυβική της μορφή (δηλαδή DHP=c·n^3). Όπως αποδεικνύεται εύκολα (βλ. σύγγραμμα Πολίτη/ Αντίσταση-Πρόωση), ο νόμος της έλικας ισχύει για $\frac{k_T}{J^2} = const$, άρα και για δεδομένη έλικα $k_{Q_0} = const$. Η πρώτη ισότητα ισχύει ικανοποιητικά για μικρές μεταβολές της ταχύτητας, οπότε ο συντελεστής αντίστασης ρυμούλκησης, μπορεί να θεωρηθεί σταθερός. Συνεπώς, σε πολύ μικρές διακυμάνσεις της ταχύτητας του πλοίου (όπως σε μια «ορισμένη» κατάσταση στα operational data) μπορεί κάτω από προϋποθέσεις (αμελητέες μεταβολές ταχύτητας) να εφαρμοστεί ο κυβικός νόμος της έλικας με ικανοποιητική ακρίβεια και με αμελητέο, σχεδόν, σφάλμα, κατά τις διακυμάνσεις της ταχύτητας γύρω από μια συγκεκριμένη τιμή. Ο νόμος της έλικας ισχύει προσεγγιστικά για πλοία εκτοπίσματος με χαμηλές μέσες ταχύτητας (Fr<0.2). Άρα, και για το υπό ανάλυση bulk carrier, θα μπορούσε να εφαρμοστεί προσεγγιστικά. Γενικώς, όμως, ο νόμος της έλικας αποτελεί μια πολύ χρήσιμη προσέγγιση για στάδια προκαταρκτικής μελέτης για την εκτίμηση ισχύος πρόωσης. Παρόλα αυτά, αν υπάρχουν πειραματικά δεδομένα (βλ. model tests) ή δοκιμές (βλ. sea trials), τότε δεν θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ο νόμος της έλικας, παρά μόνο για πολύ μικρές διακυμάνσεις της ταχύτητας. Εν πάσει περιπτώσει, στόχος μας είναι η ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων κατά τους υπολογισμούς.

Σημειώνεται, ότι ο συντελεστής του νόμου της έλικας (c) εξαρτάται από την κατάσταση φόρτωσης του πλοίου (βύθισμα, διαγωγή =>εκτόπισμα), τις καιρικές συνθήκες (κύμα, άνεμο), αλλά και τη ρύπανση της γάστρας.

Παραπάνω γίνεται αναφορά στο νόμο της έλικας. Ο νόμος της έλικας προκειμένου να ισχύσει θα πρέπει να ισχύουν οι κάτωθι παραδοχές. Αναφέρεται ότι ισχύει σε αργόπλοα πλοία (Fr<0.2). Πράγματι, σε αυτή την περίπτωση, η αντίσταση ρυμούλκησης είναι ουσιαστικά αντίσταση τριβής ανάλογης προς το τετράγωνο της ταχύτητας, μιας και η αντίσταση κυματισμού είναι μικρή. Ακόμη, έγινε αναφορά στο $\frac{k_T}{J^2} = \mathrm{const}$ που για δεδομένη έλικα προκύπτει συγκεκριμένο σημείο (k_T, k_Q , J) κάτι που συνεπάγεται ότι κυβικής μορφής είναι και η μεταβολή της DHP συναρτήσει της ταχύτητας του πλοίου V. Υπόθεση η οποία, δεν ισχύει στην πράξη, σε αντίθεση με τις στροφές, όπου εν μέρει είναι λογική. Μάλιστα, σε πλοία με μεγαλύτερους αριθμούς Fr η αντίσταση κυματισμού γίνεται πιο σημαντική και μεταβάλλεται ενδεχομένως και ανάλογα της $4^{ης}$, … δύναμης της ταχύτητας. Σύμφωνα με το βιβλίο Πρόωσης ($1^{ος}$ Τόμος)

[140] Η χρήση των εισαγωγικών για τον όρο νόμο, σχετίζεται με το γεγονός ότι όλα αυτά που αναφέρονται είναι προσεγγιστικά και ισχύουν κάτω από συγκεκριμένες υποθέσεις, που στην πράξη μπορούν να θεωρηθούν έως και ανέφικτες. Δεν υπάρχει, λοιπόν, κάποιος νόμος που να προσδιορίζει επακριβώς τη λειτουργία και τη συμπεριφορά της έλικας.

του Λουκάκη, εμπειρικές σχέσεις, που δίνουν λογικές εκτιμήσεις της ισχύος πρόωσης, συναρτήσει της ταχύτητας ανάλογα με το είδος του πλοίου είναι:

- Για μεγάλα σχετικά ταχύπλοα πλοία, όπως containerships, Ro-Ro, κ.α. θεωρείται ότι: $DHP \sim V^{4.5}$
- Για μεσαίου μεγέθους ταχύπλοα πλοία, όπως φορτηγά, επιβατηγά, reefers, κ.α.: $DHP \sim V^{4}$
- Για αργόπλοα πλοία, όπως tankers, bulk carriers κ.α.: $DHP \sim V^{3.5}$

Βέβαια, και οι παραπάνω σχέσεις είναι εμπειρικές, ως εκ τούτου στην περίπτωσή μας (bulk carrier, με Fr<0.2) θα βασιστούμε στα στοιχεία από τις δοκιμές.

4.2.2 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΝΑΥΑΡΧΕΙΟΥ

Ελλείψει δεδομένων (από model tests), αρκετά συνήθης πρακτική για την εκτίμηση της ισχύος, σε άλλες καταστάσεις φόρτωσης, είναι η χρήση του συντελεστής Αγγλικού ναυαρχείου (CAD=C). $C = \frac{\Delta^{2/3} V^3}{P}$. Αν [Δ]=tn, [V]=kn, [P]=kW, P=SHP[141] τότε τυπικές τιμές, βάσει στατιστικών[142] είναι 400÷600, με 400, να αφορά κακή σχεδίαση και 600 καλή σχεδίαση. Σύμφωνα με το παράρτημα Η του ISO15016:2015(E) για μια δεδομένη ταχύτητα μπορεί να εφαρμοστεί ισότητα συντελεστών ναυαρχείου με ικανοποιητική ακρίβεια μεταξύ δυο καταστάσεων με απόκλιση εκτοπισμάτων μικρότερη ή ίση του 2% (αυστηρό όριο-ίσως μέχρι και 5% κατά ISO19030).

4.2.3 ΕΙΔΙΚΑ ΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥΣ

Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα σε γραφική και πινακοποιημένη μορφή των υπολογισμός της ισχύος πρόωσης για διάφορες ταχύτητες του υπό ανάλυση bulk- carrier, όπως προέκυψαν από κατάλληλη αναγωγή της συνολικής αντίστασης ρυμούλκησης, που υπολογίστηκε στην παρούσα διπλωματική (με χρήση Swan 2, μεθόδου Hughes) και παρουσιάζεται στην ενότητα της Αντίστασης της παρούσας έκθεσης. Επισημαίνεται ότι στα εν λόγω διαγράμματα (τόσο για FL, όσο και για BL) παρατίθενται οι καμπύλες $DHP\text{-}V_G$[143], τόσο οι υπολογισθείσες, όσο και οι αγόμενες από το sea trials report, προκειμένου να φανεί η απόκλισή τους. Τονίζεται, επίσης, ότι η εν λόγω αναγωγή της αντίστασης ρυμούλκησης σε ισχύ πρόωσης για τις διάφορες ταχύτητες πραγματοποιήθηκε με την υπόθεση ότι η έλικα είναι σειράς Wageningen-B, όπως έχει αναλυθεί εκτενώς και παραπάνω στην έκθεση. Μάλιστα, προκειμένου να αχθούν τα κάτωθι αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκαν οι κώδικες σε Fortran 95 grid.f95 του Πολίτη.

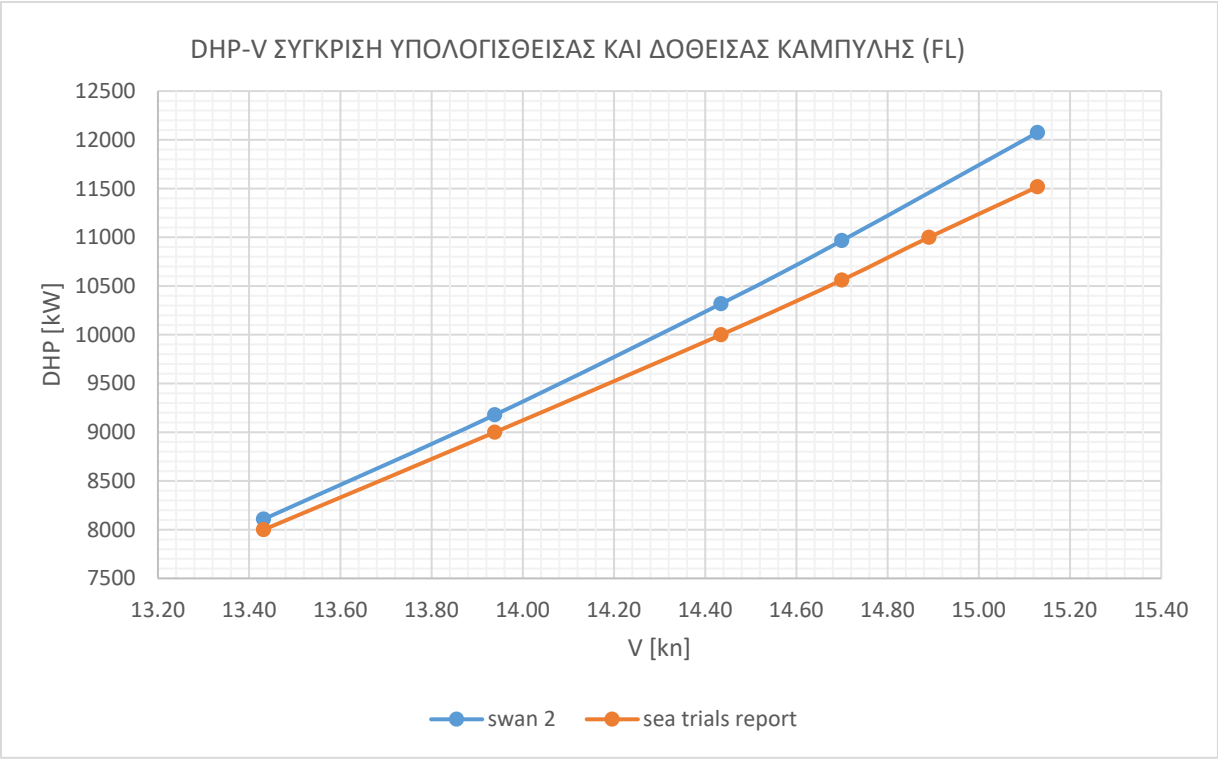
[141] Για 2-Χ αργόστροφους κινητήρες Diesel, όπως στην παρούσα εργασία.

[142] Από ΕΝΘΥ.

[143] Στην παρούσα φάση, έχει απαλειφθεί η επίδραση των ρευμάτων, ως εκ τούτου η ταχύτητα over ground ταυτίζεται με τη through sea. Εδώ χρησιμοποιείται η over ground (V_G), γιατί αυτή έχει «ναυτιλιακό» ενδιαφέρον.

ΠΙΝΑΚΑΣ 14: ΕΚΤΙΜΗΣΗ DHP-V ΓΙΑ ΗΡΕΜΟ ΝΕΡΟ ΧΩΡΙΣ ΑΝΕΜΟ ΣΤΗΝ FL

V [kn]	w	t	η_R	DHP [PS]	DHP [kW]	n [rpm]	PC
13.432	0.424	0.17	1.04	11023.8	8107.991	85.8	0.740
13.939	0.424	0.17	1.04	12479.5	9178.657	89.3	0.738
14.435	0.424	0.17	1.04	14029.2	10318.46	92.8	0.736
14.7	**0.424**	**0.17**	**1.04**	**14910.2**	**10966.43**	**94.7**	**0.735**
15.129	0.424	0.17	1.04	16417.8	12075.27	97.7	0.734
15.34	0.424	0.17	1.04	17197.2	12648.52	99.2	0.733

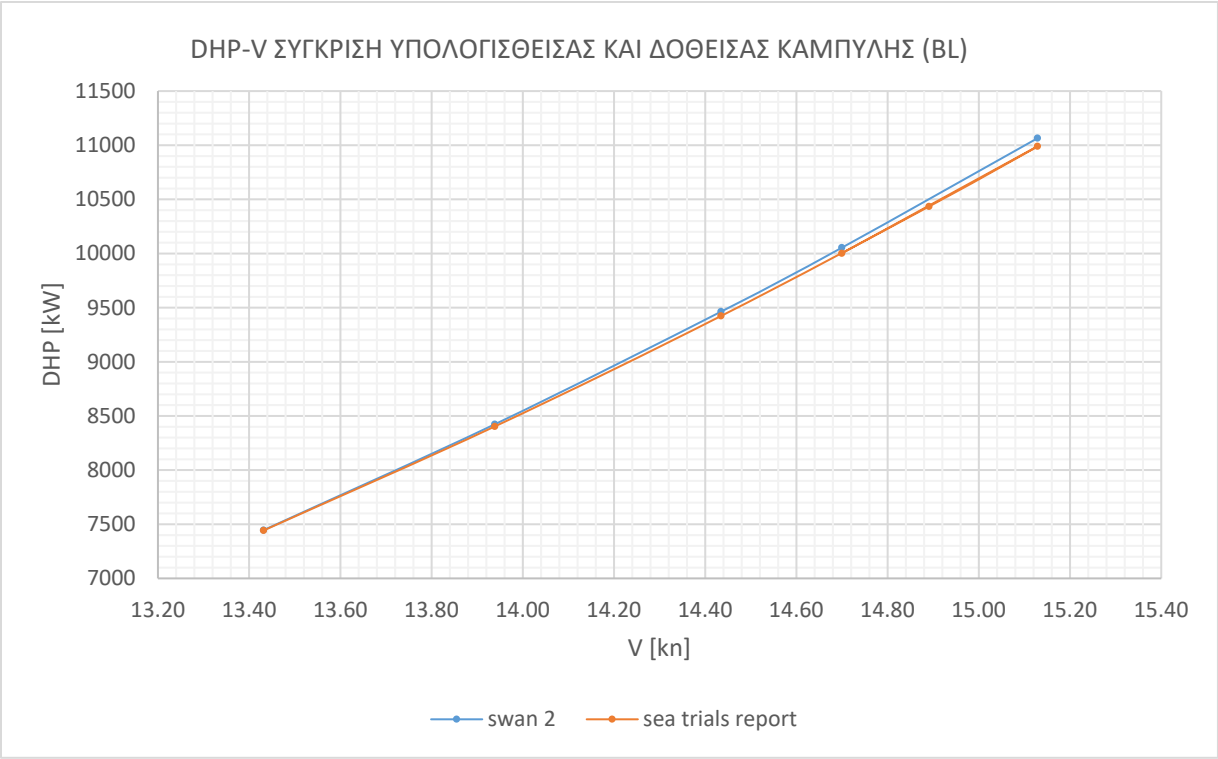


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 7: DHP-V ΓΙΑ ΗΡΕΜΟ ΝΕΡΟ ΧΩΡΙΣ ΑΝΕΜΟ ΣΤΗΝ FL [144]

[144] Οι καμπύλες DHP-V για ήρεμο νερό, χωρίς άνεμο (απουσία ρευμάτων) τόσο στην FL, όσο και στη BL, που σχετίζονται με τις θαλάσσιες δοκιμές, προκύπτουν βάσει αντίστοιχου διαγράμματος που παρατίθεται στο sea trials report και που παρουσιάζεται στην παρούσα έκθεση στην ενότητα της Περιγραφής του πλοίου και των δεδομένων.

ΠΙΝΑΚΑΣ 15: ΕΚΤΙΜΗΣΗ DHP-V ΓΙΑ ΗΡΕΜΟ ΝΕΡΟ ΧΩΡΙΣ ΑΝΕΜΟ ΣΤΗ BL

V [kn]	w	t	η_R	DHP [PS]	DHP [kW]	n [rpm]	PC
13.432	0.3352	0.2	1.011	10124.3	7446.41	85.60	0.664
13.939	0.3352	0.2	1.011	11453.3	8423.888	89.20	0.663
14.435	0.3352	0.2	1.011	12867.2	9463.81	92.60	0.661
14.7	**0.3352**	**0.2**	**1.011**	**13670.7**	**10054.78**	**94.45**	**0.661**
15.129	0.3352	0.2	1.011	15044.9	11065.51	97.40	0.660
15.34	0.3352	0.2	1.011	15755.1	11587.86	98.90	0.659



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 8: DHP-V ΓΙΑ ΗΡΕΜΟ ΝΕΡΟ ΧΩΡΙΣ ΑΝΕΜΟ ΣΤΗ BL [145]

Βάσει των ανωτέρω διαγραμμάτων και πινάκων άγεται ότι η καμπύλη DHP-V που προκύπτει από την αναγωγή της υπολογισθείσας συνολικής αντίστασης ρυμούλκησης παρουσιάζει απόκλιση περί το +0.5% στη BL και περί το +3.5% στην FL στην ταχύτητα υπηρεσίας (14.7kn). Αυτό σημαίνει ότι η εκτιμώμενη ισχύς παραλαβής δεδομένης της ταχύτητας είναι μεγαλύτερη της αντίστοιχης που άγεται με κατάλληλες διορθώσεις και αναγωγές από τις θαλάσσιες δοκιμές, κάτι που είναι επιθυμητό, προκειμένου να υπάρχει κάποιο περιθώριο ασφαλείας και για την περίπτωση σφάλματος κατά τους υπολογισμούς. Ακόμη, στην ερματισμένη κατάσταση η απόκλιση είναι μικρή, ενώ στην έμφορτη σχετικά μεγάλη, λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι η ιδανική θα ήταν μέχρι 1-1.5%. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι θαλάσσιες δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε heavy ballast condition, που είναι πιο κοντινή στην επιλεχθείσα BL, οπότε τα

[145] Οι καμπύλες DHP-V για ήρεμο νερό, χωρίς άνεμο (απουσία ρευμάτων) τόσο στην FL, όσο και στη BL, που σχετίζονται με τις θαλάσσιες δοκιμές, προκύπτουν βάσει αντίστοιχου διαγράμματος που παρατίθεται στο sea trials report και που παρουσιάζεται στην παρούσα έκθεση στην ενότητα της Περιγραφής του πλοίου και των δεδομένων.

στοιχεία που υπάρχουν για την εν λόγω κατάσταση είναι πιο αξιόπιστα (δεδομένου ότι δεν έγιναν αναγωγές από model scale σε full scale, αλλά και λόγω του ότι τα sea trials πραγματοποιούνται παρουσία νηογνώμονα και εκπροσώπων της πλοιοκτήτριας εταιρείας, οπότε δεν επιδέχονται παραποιήσεων) σε σχέση με την έμφορτης κατάστασης. Αντιθέτως, τα αποτελέσματα για την έμφορτη κατάσταση άγονται από αναγωγές (με κατάλληλες διορθώσεις) από model scale σε full scale. Για τα εν λόγω model tests που πραγματοποίησε το ναυπηγείο δεν τέθηκαν στην διάθεσή μας τα αντίστοιχα reports, κατά συνέπεια δεν υπήρχε γνώση της ακολουθούμενης διαδικασίας, αλλά και των αποτελεσμάτων από τα πειράματα σε μοντέλο. Ως εκ τούτου, δεν δύναται να αποφανθεί η αξιοπιστία τους. Επισημαίνεται, ότι οι προκύπτουσες στροφές της έλικας είναι και πρέπει να είναι (βάσει υδροδυναμικής, βλ. τρίγωνο ταχυτήτων) ίδιες με τις αντίστοιχες που άγονται από το sea trials report.

Σε κάθε περίπτωση γίνεται σαφές ότι όσο πιο μικρή είναι η ταχύτητα τόσο πιο μικρή είναι και η απόκλιση μεταξύ της υπολογισθείσας DHP και της αντίστοιχης που άγεται από τα sea trials. Κατά συνέπεια, στην FL για μικρότερες ταχύτητες από την ταχύτητα υπηρεσίας η απόκλιση μειώνεται, μάλιστα για 13.432kn κυμαίνεται περί το 1.3%. Αν αναλογιστούμε ότι στην FL, βάσει των δοθέντων sea trials πλέει σε μικρότερη ταχύτητα από την ταχύτητα υπηρεσίας, αλλά και το ότι το βύθισμα είναι μικρότερο του βυθίσματος αντοχής, καθιστούν την υπολογισθείσα καμπύλη αποδεκτή για «βάση» καμπυλών αναφοράς για τα operational data.

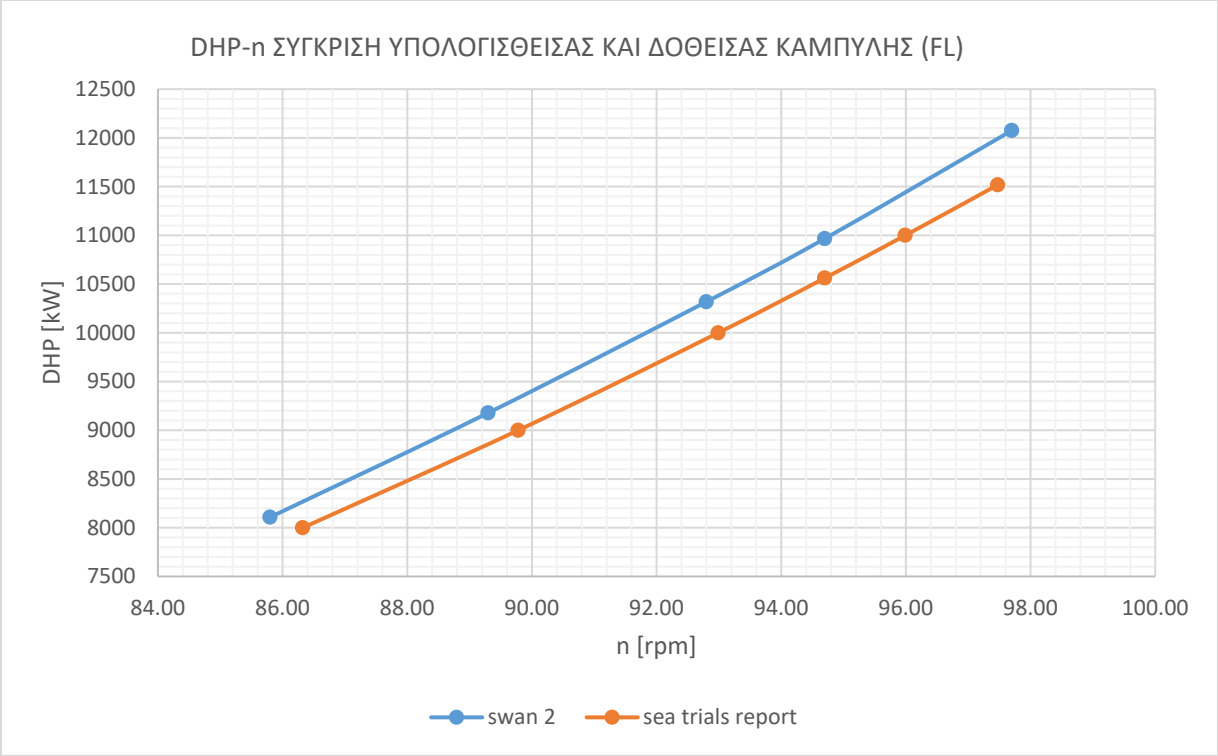
Όσον αφορά, τις μεγάλες[146] τιμές του PC στην FL (μεταξύ 70-75%) αυτό δείχνει ότι βάσει των δοθέντων στοιχείων από το sea trials report το υπό ανάλυση bulk- carrier φαίνεται καλοσχεδιασμένο. Μάλιστα, οι εν λόγω τιμές PC ήταν αναμενόμενες βάσει της ανάλυσης βάσει reversible engineering, που παρουσιάστηκε στην ενότητα της Αντίστασης στην παρούσα έκθεση, σε αντίστοιχη υποσημείωση. Το να είναι, βέβαια τόσο καλοσχεδιασμένο και ελλείψει στοιχείων από model tests είναι κάπως επίφοβο, αυξάνοντας την πιθανότητα αναξιοπιστίας των δοθέντων αποτελεσμάτων για την FL, όπως προέκυψαν από αναγωγές από model tests, που είχαν πραγματοποιηθεί από το ναυπηγείο. Ακόμη, στην FL οι τιμές των συντελεστών αλληλεπίδρασης είναι, ναι μεν αποδεκτές (έπειτα και από διαβεβαίωση του επιβλέποντα καθηγητού), αλλά κοντά στις ακραίες αποδεκτές τιμές (οριακές τιμές), που παρατίθενται παραπάνω στην έκθεση (βλ. υποενότητα της παρούσας έκθεσης θεωρητικό υπόβαθρο του εδαφίου της Πρόωσης). Σε αυτό οφείλεται και ο μεγάλος βαθμός προωστήριας εγκατάστασης. Δεδομένου ότι η επιλεχθείσα της σειράς Wageningen-B έλικα φέρει μικρό σχετικά λόγο βήματος, ο β.α. έλικας σε ελεύθερη ροή είναι μικρότερος σε σχέση με έλικες της ίδιας σειράς με μεγαλύτερα βήματα (βέλτιστη τιμή μικρότερη του 0.6). Αυτό, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι ο συντελεστής προχώρησης (J) είναι σχετικά μικρός, καθιστούν το η_0 για τις υπό μελέτη ταχύτητες (και ειδικά για την ταχύτητα υπηρεσίας) τόσο στην FL, όσο και στη BL μικρότερο του 0.55. Κάτι τέτοιο συνεπάγεται ότι, ενδεχομένως, για την πραγματική έλικα, για την οποία δεν έχουμε βασικά στοιχεία (όπως αποτελέσματα από πείραμα έλικας σε ελεύθερη ροή) να βασίστηκε η σχεδίασή της σε σειρά Wageningen-B[147], αλλά να τροποποιήθηκε κατά τέτοιον τρόπο που να παρουσιάζει μεγαλύτερο β.α. σε μικρότερους συντελεστές προχώρησης (J)[148] και για μικρότερα βήματα. Αυτό θα μπορούσε να επιβεβαιωθεί με αναλυτικούς υπολογισμούς, βάσει φέρουσας γραμμής και φερουσών επιφανειών, αλλά κάτι τέτοιο θα «ξέφευγε» από τους σκοπούς της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

[146] Αλλά αποδεκτές τιμές, λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι αναφέρονται σε FL, που είναι πιο κοντά στο σημείο σχεδίασης (βέλτιστο), ίσως και να ταυτίζονται, αλλά και το ότι το πλοίο λογίζεται στους εν λόγω υπολογισμούς ως νεότευκτο, καθιστώντας μηδενικά τα ποσοστά γήρανσης.

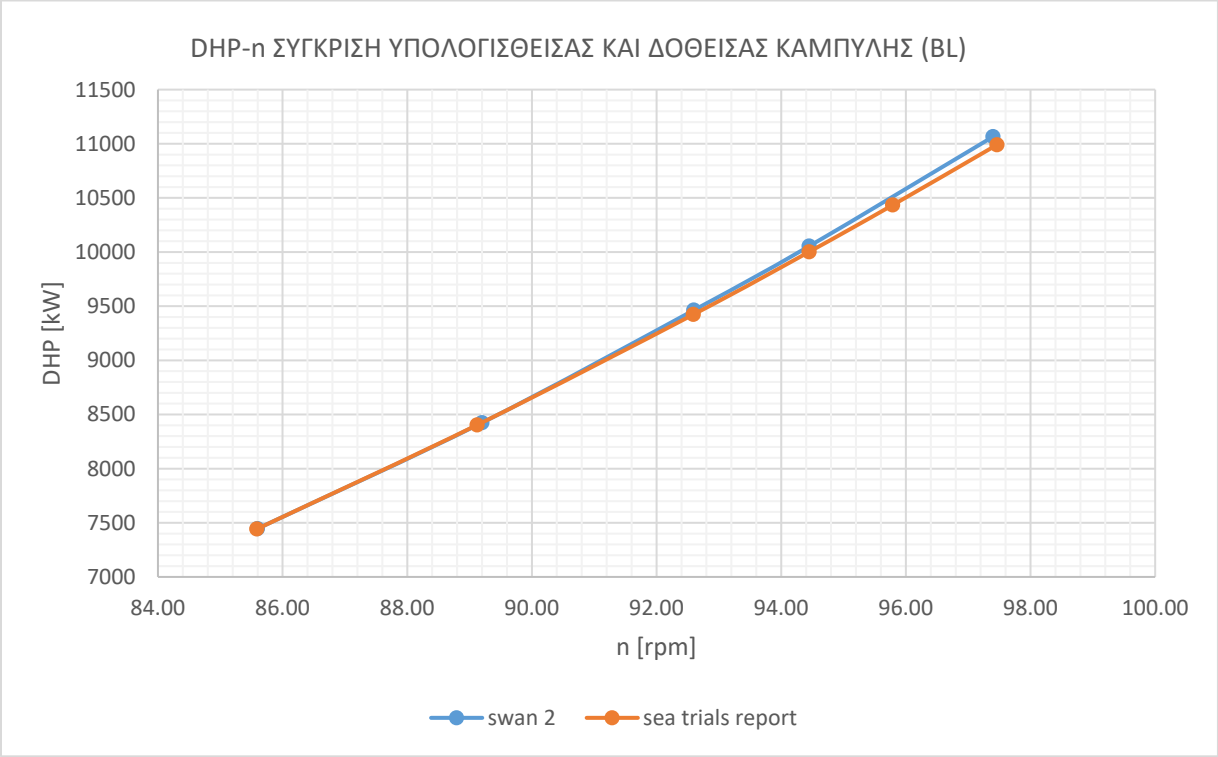
[147] Σε αυτό συνηγορεί και η τυποποιημένη τιμή του λόγου εκτεταμένων επιφανειών (0.55).

[148] J<0.43.

Παρακάτω παρατίθενται καμπύλες DHP-n (τόσο στην FL, όσο και στη BL), καθ' όμοιο τρόπο με τα παραπάνω διαγράμματα. Επισημαίνεται, ότι τα αποτελέσματα βάσει του sea trials report βασίζονται στο κυβικό «νόμο» της έλικας, σε αντίθεση με τα αντίστοιχα που υπολογίστηκαν στην παρούσα εργασία, που βασίζονται στα αγόμενα αποτελέσματα από τον κώδικα grid.f95 του Πολίτη. Να σημειωθεί ότι καταλήγουμε στα ίδια συμπεράσματα με αυτά που αναφέρονται παραπάνω, με τη διαφορά ότι απαιτούνταν οι ίδιες στροφές.

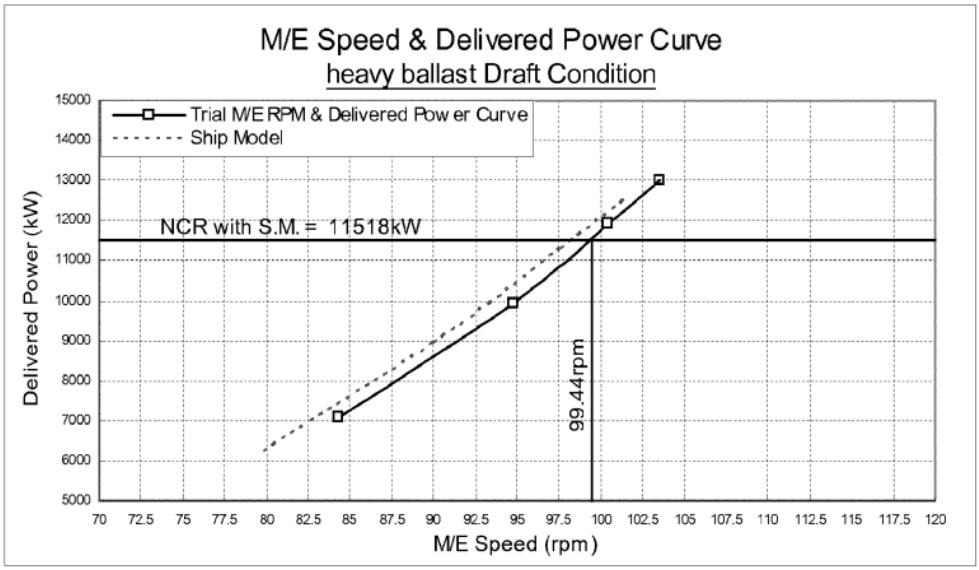


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 9: DHP-n ΓΙΑ ΗΡΕΜΟ ΝΕΡΟ ΧΩΡΙΣ ΑΝΕΜΟ ΣΤΗΝ FL



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 10: DHP-n ΓΙΑ ΗΡΕΜΟ ΝΕΡΟ ΧΩΡΙΣ ΑΝΕΜΟ ΣΤΗ BL

Αξίζει να σημειωθεί ότι από το sea trials report ήταν γνωστή η κάτωθι καμπύλη P-n για τη heavy ballast των δοκιμών, έπειτα από αναγωγή για ήρεμο νερό, χωρίς άνεμο, (απουσία ρευμάτων):



ΣΧΗΜΑ 57: DHP-n ΒΑΣΕΙ SEA TRIALS ΓΙΑ ΗΡΕΜΟ ΝΕΡΟ ΧΩΡΙΣ ΑΝΕΜΟ (ΑΠΟ SEA TRIALS REPORT)[149]

Ακόμη, ήταν γνωστές και οι ονομαστικές στροφές του κινητήρα[150] (105rpm), ως εκ τούτου με κατάλληλες αναγωγές, πραγματοποιήθηκε η εκτίμηση για τις στροφές σε άλλες καταστάσεις φόρτωσης (ελλείψει model tests report). Επισημαίνεται ότι χρησιμοποιήθηκε, ελλείψει άλλων στοιχείων, ο κυβικός «νόμος» της έλικας για κάθε καμπύλη (για κάθε κατάσταση φόρτωσης). Βάσει του λόγου των συντελεστών c (του σχετικού με το «νόμο» της έλικας) των καμπυλών DHP-n προκύπτει η ισχύς για κάθε κατάσταση φόρτωσης. Συγκεκριμένα, το c κάθε κατάστασης φόρτωσης εκτιμάται βάσει αριθμητικού συντελεστή διόρθωσης (για λόγους εχεμύθειας δεν μπορεί να παρατεθεί), που αναγράφεται σε υποσημείωση του sea trials report χωρίς, όμως, σαφήνεια και ακριβή επεξήγηση. Από σύγκριση όμως των εν λόγω (προκυπτουσών) στροφών (αναφοράς) με τις αντίστοιχες των operational data, γίνεται σαφές ότι η ακολουθούμενη διαδικασία είναι αποδεκτή.

Επιπροσθέτως, αξίζει να σημειωθεί ότι η επιλογή των συντελεστών αλληλεπίδρασης (w,t,η_R) θα μπορούσε να γίνει βάσει εμπειρικών σχέσεων που παρουσιάζονται και σε συγγράμματα της Αντίστασης-Πρόωσης (βλ. Πολίτη) και που αναφέρονται στην παρούσα έκθεση παραπάνω (σε υποσημείωση για ανάλυση βάσει reversible engineering στην ενότητα της Αντίστασης). Παρόλα αυτά οι εν λόγω σχέσεις είναι εμπειρικές και βασίζονται σε παλιές μελέτες και γεωμετρίες πλοίων. Ως εκ τούτου, ναι μεν αποτελούν μια καλή τιμή εκκίνησης των υπολογισμών (ειδικά για προκαταρκτικά στάδια μελέτης), προκειμένου να υπάρχει μια αίσθηση της τάξης μεγέθους, αλλά η πρόοδος της επιστήμης, αλλά και τα χαρακτηριστικά κάθε πλοίου επιβάλλουν μια προσεκτική επιλογή των τιμών των εν λόγω συντελεστών. Αν υπήρχαν αποτελέσματα από πειράματα αυτοπροωθούμενου πλοίου για το υπό ανάλυση bulk- carrier, τότε και τα αποτελέσματα θα ήταν πιο αξιόπιστα. Παρόλα αυτά κάτι τέτοιο δε συμβαίνει, ως εκ τούτου βασιζόμαστε σε πρόσφατα στατιστικά και ενδεικτικές τιμές, ενώ η όποια επιλογή ενεκρίθη από τον

[149] Επισημαίνεται ότι η όποια απόκλιση μεταξύ των καμπυλών (DHP-n, DHP-V) της heavy ballast στην οποία έγιναν οι θαλάσσιες δοκιμές και της επιλεχθείσας από το stability booklet BL (επίσης heavy ballast) οφείλεται στο γεγονός ότι οι δυο αυτές καταστάσεις δεν είναι ίδιες (ούτε ως προς μέσο βύθισμα, ούτε ως προς διαγωγή, άρα ούτε και ως προς εκτόπισμα), αν και παραπλήσιες.

[150] Κύριας μηχανής πρόωσης.

επιβλέποντα διδάσκοντα. Κάτι τέτοιο επιτρέπει, για την FL, που είναι κοντά στην κατάστασης σχεδίασης, να επιλεγούν τιμές των εν λόγω συντελεστών αλληλεπίδρασης που να είναι υπεραισιόδοξες και κοντά στις «καλές» οριακές τιμές. Δηλαδή, t κάτω από 0.19, w πάνω από 0.4 και η_R πάνω από 0.01. Αντιθέτως, στη BL οι τιμές των εν λόγω συντελεστών δεν είναι το ίδιο «καλές», αν και είναι επίσης ικανοποιητικές[151].

4.3 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΞΗΣΗΣ ΒΑΘΜΟΥ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΠΡΟΩΣΤΗΤΡΙΑΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Σε προηγούμενα εδάφια της παρούσας έκθεσης γίνεται ιδιαίτερη αναφορά σε γεωμετρικά μεγέθη, χαρακτηριστικά, της έλικας (διάμετρος, βήμα, κτλ.) που καθορίζουν το βαθμό απόδοσης σε ελεύθερη ροή και κατ΄ επέκταση το β.α. προωστήριας εγκατάστασης. Παρόλα αυτά ο εν λόγω β.α. δεν εξαρτάται μόνο από την προπέλα, αλλά και από τη γεωμετρία της γάστρας, και τη συμβατότητά- αλληλεπίδρασή της με την έλικα γύρω από το σημείο για το οποίο πραγματοποιήθηκε η σχεδίαση. Εκτός από τα ανωτέρω, η ύπαρξη καταλλήλως σχεδιασμένων συστημάτων δύναται να επηρεάσει τη ροή γύρω από τη γάστρα με την έλικα σε λειτουργία, επιδρώντας έτσι στους συντελεστές αλληλεπίδρασης (t,w,η_R) ή και στη συμπεριφορά της έλικας (με μείωση απωλειών), κατά τέτοιον τρόπο που να αυξάνεται ο β.α. προωστήριας εγκατάστασης. Μάλιστα, αυτό συνδέεται και με μείωση της κατανάλωσης καυσίμου, λόγω απαίτησης για μικρότερη ισχύ παραλαβής, κάτι που καθιστά το πλοίο σύμφωνο με τους κανονισμούς της MARPOL, αλλά και με ικανοποιητικές (αποδεκτές) τιμές δεικτών EEXI, CII, αλλά και EEDI, EEOI (βλ. ενότητα ενεργειακής αποδοτικότητας παρούσας έκθεσης). Επισημαίνεται, ότι τα εν λόγω συστήματα κατανέμονται σε ζώνες ανάλογα με το αν βρίσκονται πρύμνηθεν, πρώραθεν της έλικας ή στην περιοχή της προπέλας. Παρακάτω, παρουσιάζονται μερικά από αυτά τα συστήματα:

4.3.1.1 WAKE EQUALISING DUCT

Λόγω της πολυπλοκότητας του πεδίου του ομόρρου, όπως περιγράφηκε παραπάνω, η ροή που «φτάνει» στην έλικα παρουσιάζει ανομοιομορφίες (καθιστώντας μεταβλητό και το ποσοστό ομόρρου). Ως εκ τούτου, κατά τη λειτουργία της προπέλας υπάρχουν μη μόνιμες[152] δυνάμεις και ροπές που εκτός των άλλων αποτελούν πηγή διέγερσης για κραδασμούς της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου. Προς τούτο, έχει προταθεί η χρήση δακτυλίου (ορθότερα δυο ημιδακτυλίων) ομαλοποίησης του ομόρρου (wake equalising duct) πρώραθεν της έλικας. Μάλιστα, υπάρχει η πρόταση του Schneekluth, σύμφωνα με την οποία η εν λόγω συσκευή αποτελείται από δύο ημικυκλικούς δακτυλίους, στερεωμένους εκατέρωθεν της χοάνης. Σκοπός του δακτυλίου είναι η επιτάχυνση της ροής στο πάνω μισό του κυκλικού δίσκου της έλικας και επιβράδυνση στο κάτω μισό, προκειμένου να επιτευχθεί ομογενοποίηση του πεδίου του ομόρρου. Η χρήση του συνίσταται για μονέλικα πλοία μεγάλου συντελεστή γάστρας. Σύμφωνα με το εγχειρίδιο της MAN (Basic Principles of Ship Propulsion) δύναται να πετύχει αύξηση του β.α. 3-8%[153]. Επισημαίνεται, ότι καθοριστικής σημασίας είναι η σωστή τοποθέτηση του εν λόγω δακτυλίου, κάτι που επιβάλλει εμπεριστατωμένη μελέτη ίσως και πραγματοποίηση πειραμάτων σε δεξαμενή προτύπων. Βέβαια, θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν και η αύξηση της βρεχόμενης επιφάνειας, σαν παρελκόμενο που είναι, κάτι που αυξάνει την αντίσταση.

---

[151] Λαμβάνεται υπ' όψιν ότι το πλοίο είναι νεότευκτο σε αυτή την φάση υπολογισμών και ότι έχει πραγματοποιηθεί το δυνατόν βέλτιστη σχεδίαση γάστρας, έλικας και ζεύξης αυτών από το ναυπηγείο, βάσει και των υψηλών τιμών η_D που αναγράφονται στο sea trials report.

[152] Το μη μόνιμο αυτό πεδίο επιδρά και στη σπηλαίωση, κάτι που επιτρέπει κατά τη σχεδίαση της έλικας την επιλογή μικρότερης εκτεταμένης επιφάνειας, άρα και πιο αποδοτική.

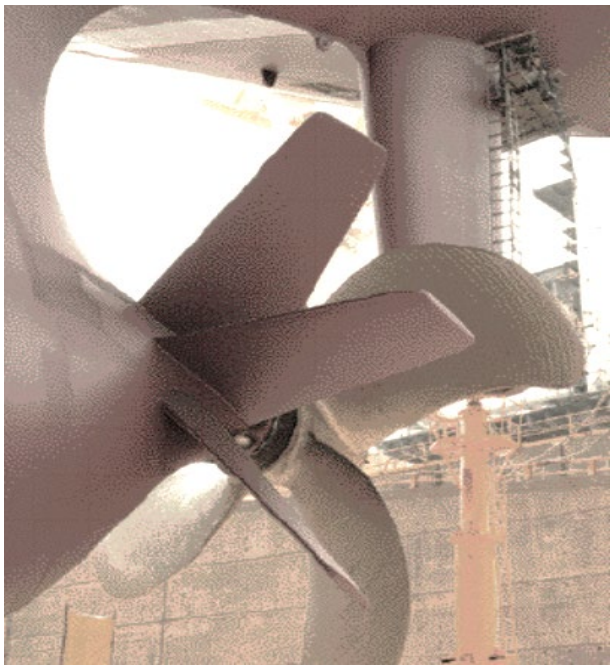
[153] Ο β.α. επηρεάζεται από τη μορφή των ισάλων στο ύψος της της έλικας.

ΕΙΚΟΝΑ 1: SCHNEEKLUTH WAKE EQUALIZING DUCT (ΛΟΥΚΑΚΗΣ)

4.3.1.2 PRE- SWIRL FINS

Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με δακτύλιο πρώραθεν της έλικας. Προσδίδουν μια στροβιλότητα στη ροή, τέτοια που να αυξάνει το η_R. Σύμφωνα με το εγχειρίδιο της MAN (Basic Principles of Ship Propulsion) δύναται να πετύχει αύξηση του β.α. 3-5%. Επισημαίνεται ότι η σχεδίαση των πτερυγίων και η διαμόρφωσή τους γίνεται με μεθόδους υπολογιστικής ρευστομηχανικής ή/ και με πειράματα σε δεξαμενή προτύπων.

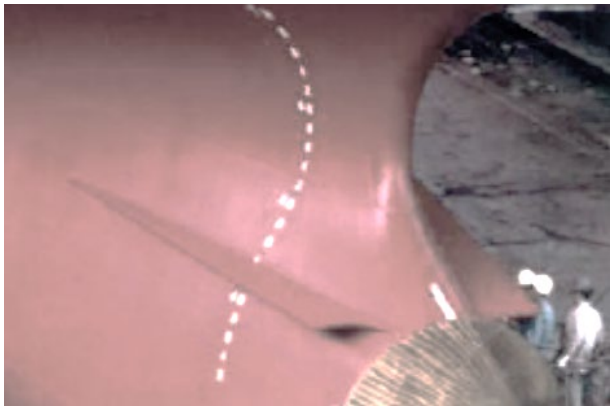
ΕΙΚΟΝΑ 2: ΣΥΔΥΑΣΜΟΣ ΔΑΚΤΥΛΙΟΥ ΜΕ PRE-SWIRL FINS (WÄRTSILÄ ENCYCLOPEDIA)



ΕΙΚΟΝΑ 3: ΠΤΕΡΥΓΙΑ ΠΡΟΣΥΣΤΡΟΦΗΣ (ΛΟΥΚΑΚΗΣ)

4.3.1.3 ΠΤΕΡΥΓΙΑ (FINS) ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΕΛΙΚΑ

Πρόκειται για πτερύγια καταλλήλων διαστάσεων και διατομής τα οποία τοποθετούνται πρώραθεν της έλικας σε ογκώδη και αργόπλοα πλοία (tankers, bulk- carriers) με σκοπό την εξομάλυνση της ροής προς την έλικα. Ο αριθμός, η μορφή , η γεωμετρία των πτερυγίων ποικίλει, με διάφορες προτάσεις να έχουν γίνει κατά καιρούς. Η δράση τους οφείλεται στην τροποποίηση/ εξομάλυνση της ροής προς την έλικα.



ΕΙΚΟΝΑ 4: ΠΤΕΡΥΓΙΑ ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΕΛΙΚΑ (ΛΟΥΚΑΚΗΣ)

4.3.1.4 HUB CAP FINS

Ελληνική απόδοση του όρου δίδεται στο βιβλίο Πρόωση του Λουκάκη και είναι: προστατευτικός κώνος έλικας με πτερύγια. Είναι, λοιπόν, μικρά πτερύγια, που βρίσκονται στην περιοχή της πλήμνης της έλικας πρύμνηθεν των πτερυγίων. Μάλιστα, ομοιάζουν με «μικρή έλικα» που περιστρέφεται με τον ίδιο αριθμό στροφών και φέρει τον ίδιο αριθμό πτερυγίων και υλικό με την έλικα. Σκοπός τους είναι να μετατρέψουν τις δίνες που οφείλονται στην πλήμνη σε επιπλέον ροπή και ώση. Βάσει εφαρμογής σε πραγματικά

πλοία, προκύπτει μείωση των απωλειών της τάξης 2-5%. Μάλιστα, βοηθούν στη μείωση των κραδασμών της πρύμνης, των θορύβων, αλλά και της σπηλαίωσης (κυρίως του πηδαλίου).

ΕΙΚΟΝΑ 5: ΠΤΕΡΥΓΙΑ ΠΛΗΜΝΗΣ ΕΛΙΚΑΣ-PBCF (WÄRTSILÄ ENCYCLOPEDIA)

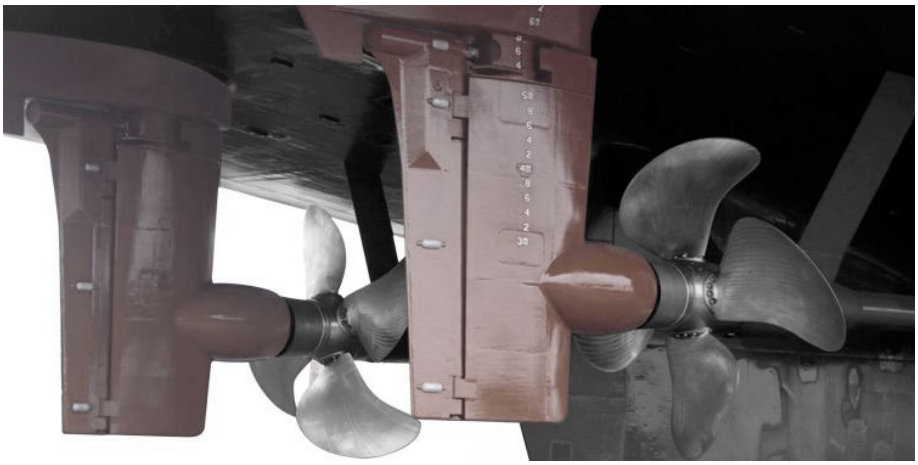
4.3.1.5 KAPPEL DESIGN

Οι εν λόγω έλικες διαφέρουν από τις παραδοσιακές στη γεωμετρία του ακροπτερυγίου. Το ακροπτερύγο δεν ακολουθεί τη λογική της ελικοειδούς επιφάνειας αλλά καμπυλώνεται ομαλά προς την πλευρά υποπίεσης. Από δοκιμές σε πραγματικά πλοία έχει διαπιστωθεί ότι προσφέρει αύξηση του β.α. 3-6%. Σημειώνεται, μάλιστα, ότι η εν λόγω σχεδιαστική καινοτομία είναι πιο αποδοτική για υπερφορτωμένες έλικες (υψηλό C_{Thr}).

ΕΙΚΟΝΑ 6: KAPPEL PROPELLER DESIGN (MAN)

4.3.1.6 RUDDER BULB

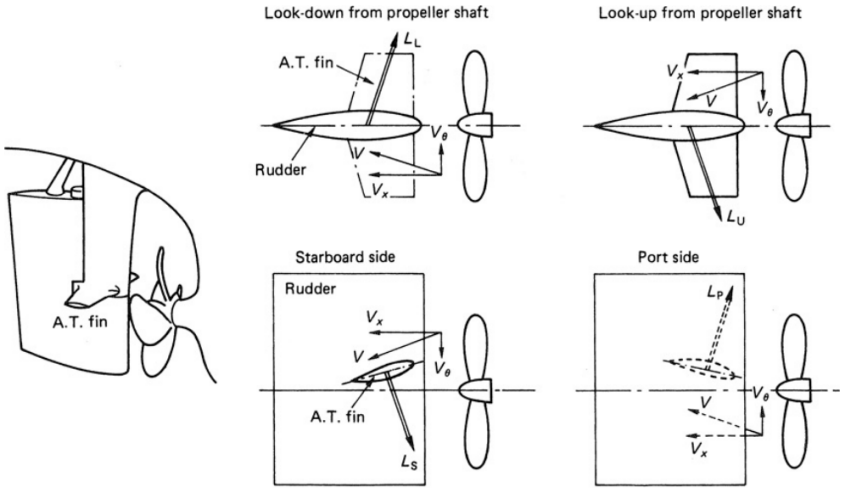
Ο εν λόγω βολβός (συνήθως) τοποθετείται στο χείλος πρόσπτωσης του πηδαλίου. Ρόλος του είναι να ομαλοποιεί τη γεωμετρία του «εμποδίου» άρα και κατ' επέκταση της ροής πρύμνηθεν της έλικας. Καθ' αυτόν τον τρόπο μειώνονται οι απώλειες που σχετίζονται με τις δίνες της πλήμνης. Μάλιστα, έχει διαπιστωθεί από εφαρμογές σε πραγματικά πλοία αύξηση 2-5% του β.α. (βλ. φυλλάδιο Basic Principles of Propulsion της MAN).



ΕΙΚΟΝΑ 7: ΒΟΛΒΟΣ ΠΗΔΑΛΙΟΥ (BECKER)

4.3.1.7 POST- SWIRL FINS

Είναι fins που μπορούν να τοποθετηθούν πρύμνηθεν της έλικας, στο πηδάλιο, στο βολβό του πηδαλίου, κτλ. Ρόλος τους είναι η αύξηση της ώσης. Μάλιστα, έχει διαπιστωθεί από εφαρμογές σε πραγματικά πλοία αύξηση 2-3% του β.α. (βλ. φυλλάδιο Basic Principles of Propulsion της MAN).

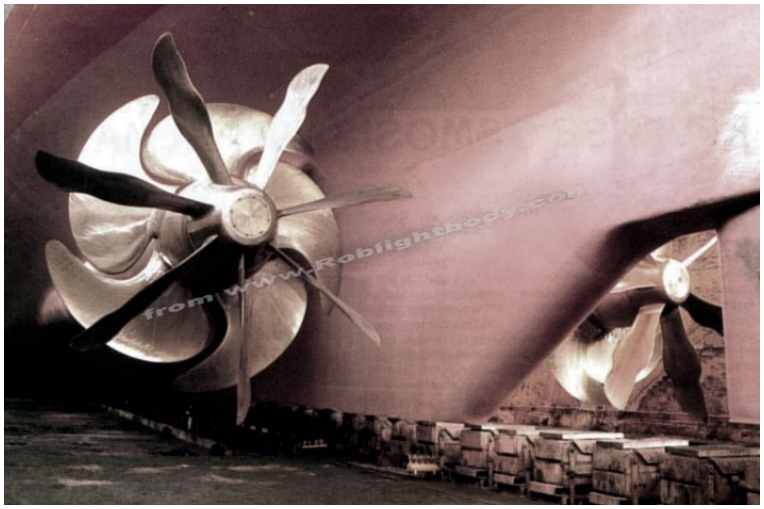


Principle of the A.T. fin for a clockwise propeller. Thrust is produced as propeller axial components of lift L_L, L_U act on the rudder with additional thrust produced as propeller axial components of lift L_S, L_P act on the fin.

ΣΧΗΜΑ 58: ΠΤΕΡΥΓΙΑ ΓΙΑ ΠΡΟΣΘΕΤΗ ΩΣΗ ΠΡΥΜΝΗΘΕΝ ΕΛΙΚΑΣ (CARLTON)

4.3.1.8 ΕΛΕΥΘΕΡΑ ΠΕΡΙΣΤΡΕΦΟΜΕΝΗ ΕΛΙΚΑ

Πρόκειται για έλικα που τοποθετείται πρύμνηθεν της κύριας έλικας του πλοίου και περιστρέφεται ελεύθερα πάνω στον άξονα του πλοίου σε έδρανα κυλίσεως. Η διάμετρός της είναι μεγαλύτερη από της κύριας έλικας, ενώ φέρει από 5 έως 11 πτερύγια. Η έλικα δεν απορροφά ισχύ από τη μηχανή, δεδομένου ότι περιστρέφεται ελευθέρα. Η έλικα περιστρέφεται καθώς το εσωτερικό τμήμα των πτερυγίων της απορροφά ενέργεια από τα «απόνερα» της κύριας έλικας (λειτουργώντας ωσάν στρόβιλο αξονικής ροής), ενώ το εξωτερικό τμήμα αυτών παράγει ώση (λειτουργώντας ωσάν αντλία), κάτι που απαιτεί ιδιαίτερη διαμόρφωση των πτερυγίων. Εκτιμάται (βλ. Λουκάκη Πρόωση) ότι με την εν λόγω έλικα επιτυγχάνεται βελτίωση του β.α. της έλικας κατά 2.5-3%. Βέβαια, παρουσιάζονται προβλήματα τόσο αξονικά (με έδρανα κυλίσεως και δυσκολία προσβασιμότητας), όσο και με τα πτερύγια λόγω δυναμικών καταπονήσεων, αλλά και με δυσκολία αναπόδισης, που καθιστούν την εν λόγω έλικα προβληματική.



ΣΧΗΜΑ 59: ΕΛΕΥΘΕΡΕΣ ΠΕΡΙΣΤΡΕΦΟΜΕΝΕΣ ΕΛΙΚΕΣ (ΛΟΥΚΑΚΗΣ)

4.3.1.9 ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΑ

Ορισμένα από τα προαναφερθέντα συστήματα δύναται να χρησιμοποιηθούν συνδυαστικά, προσφέροντας ακόμη μεγαλύτερη μείωση των απωλειών. Παρόλα αυτά κάτι τέτοιο δεν αποτελεί κανόνα. Δεν μπορούν να συνδυαστούν όλα μεταξύ τους. Γενικώς, από την εμπειρία (όπως αναφέρεται στο φυλλάδιο Basic Principles of Propulsion της MAN) έχει διαπιστωθεί ότι η μέγιστη δυνατή μείωση των απωλειών ανέρχεται σε 10%.

Μάλιστα, υπάρχουν και άλλα παρόμοια συστήματα, όπως οι έλικες αντιθέτου φοράς περιστροφής (επιτυγχάνουν μείωση απαιτούμενης ισχύος για συγκεκριμένη ταχύτητα περί το 10% (βλ. Λουκάκη)), που ωστόσο δεν έχουν δοκιμαστεί σε πολλά πλοία, η όλη διαδικασία υλοποίησης είναι δύσκολη και η τεχνολογία τους είναι ναι μεν υποσχόμενη, αλλά ακόμη σε πειραματικό στάδιο όσον αφορά τη μαζική εφαρμογή της σε πλοία. Βέβαια, δύναται να συνδυαστεί και με πηδάλιο υψηλής απόδοσης, που έχει δηλαδή σχεδιαστεί κατά τέτοιον τρόπο που εν τέλει να μειώνεται η κατανάλωση καυσίμου.

5 OPERATIONAL DATA

5.1 ΑΚΟΛΟΥΘΟΥΜΕΝΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Τα δοθέντα λειτουργικά δεδομένα, φαίνεται να μην χρίζουν απαιτούμενων διορθώσεων, λόγω της μορφής με την οποία παραχωρήθηκαν από τη ναυτιλιακή. Αυτό μπορεί να διαπιστωθεί από το γεγονός ότι όταν αφαιρεθούν εκείνες οι στιγμές της μέτρησης για τις οποίες δεν υπάρχει κάποια μέτρηση ή η ταχύτητα είναι μηδενική (ή κοντά), τότε αν εφαρμοστούν τα κριτήρια Chauvenet και Zscore[154] διαπιστώνεται ότι τα outliers σημεία, δηλαδή αυτά που παρεκτρέπονται είναι ελάχιστα[155]. Ακόμη, όλα τα μετρήσιμα μεγέθη έχουν την ίδια συχνότητα μέτρησης, κάτι που συνηγορεί στην παραπάνω υπόθεση, ότι δηλαδή τα δεδομένα δε χρειάζεται να επεξεργαστούν περεταίρω . Η συχνότητα μέτρησης είναι ανά μια ώρα, άρα δεν έχει νόημα να εξετάσουμε την ικανοποίηση του κριτηρίου τυπικής απόκλισης, μιας και κάτι τέτοιο θα αποσκοπούσε σε εξέταση του εάν είχαμε μεταβατικό φαινόμενο. Οι ανωτέρω έλεγχοι ικανοποίησης των κριτηρίων πραγματοποιήθηκαν προκειμένου να διαπιστωθεί ότι δε χρειάζεται να «αφαιρέσουμε» παρεκτρεπόμενα σημεία. Αυτό, βέβαια, ενδεχομένως να μην οφείλεται στο ότι έχει γίνει κάποια προεργασία από τη ναυτιλιακή, αλλά στη συχνότητα των μετρήσεων που είναι ανά μια ώρα.

Στόχος μας είναι ο υπολογισμός δεικτών KPIs που προτείνονται από την ITTC, προκειμένου να αχθούν τα κατάλληλα συμπεράσματα όσον αφορά την κατάσταση της γάστρας, της έλικας, ή το κατά πόσον οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τις εκτιμήσεις για διόρθωση ισχύος είναι ικανοποιητικές. Μάλιστα, μπορεί να διαπιστωθεί και τυχούσα παρατυπία από πλευράς ναυπηγείου στο sea trials report (μέσω προβλέψεων για άλλες καταστάσεις πέρα της heavy ballast), προκειμένου να γίνει ομαλά η παράδοσή του υπό ανάλυση πλοίου. Μάλιστα, στην παρούσα έκθεση προτείνονται σχεδιαστικές λύσεις, που ενδεχομένως να αυξάναν περεταίρω τον υδροδυναμικό βαθμό απόδοσης, κάτι που θα είχε και αντίκτυπο στους υπολογισθέντες δείκτες.

Δυστυχώς, οι μετρήσεις που δόθηκαν από τη ναυτιλιακή εταιρεία ναι μεν <u>δεν</u> προέρχονται από noon reports[156], κάτι που θα αύξανε περεταίρω την αβεβαιότητα στους υπολογισμούς, άρα και την αναξιοπιστία των δεικτών, αλλά αφορούν συγκεκριμένα μεγέθη, με αποτέλεσμα η ανάλυση να περιορίζεται σε υπολογισμό δεικτών σχετικών μόνο με την ισχύ ή και τις στροφές[157]. Λόγου χάρη, δεν υπάρχουν στοιχεία για κατανάλωση καυσίμου ούτε της κύριας μηχανής, ούτε και των Η/Π ζευγών, των λεβήτων, κοκ. Έτσι, ούτε ειδικές καταναλώσεις δύναται να υπολογιστούν, ούτε και οι (λειτουργικοί) δείκτες ενεργειακής αποδοτικότητας EEOI, CII (ο CII βασίζεται σε δεδομένα που αφορούν ένα ημερολογιακό έτος). Τονίζεται, επίσης, ότι καθ' ομολογία των εκπροσώπων της εν λόγω ναυτιλιακής εταιρείας το δοθέν bulk- carrier δεν διαθέτει τόσο καλής τεχνολογίας, αλλά και ακρίβειας μετρητικά όργανα όσο ένα αντίστοιχο tanker της ίδιας εταιρείας, κάτι που αυξάνει ακόμη περισσότερο την αβεβαιότητα των όποιων υπολογισμών.

Ένας δείκτης που υπολογίζεται είναι αυτός που σχετίζεται με την απόκλιση της ισχύος άξονα. Πιο συγκεκριμένα, αν P_m=SHP είναι η μετρούμενη ισχύς και P_{est} είναι η αναμενόμενη ισχύς, τότε ο δείκτης που μας ενδιαφέρει είναι ο εξής: $PPV=P_d=100(P_m-P_{est})/P_{est,}$ ονομάζεται τιμή απόδοσης και αναφέρεται στην επί τοις εκατό αύξηση της ισχύος. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η εν λόγω σύγκριση της

[154] Η ανάλυση των Chauvenet και Zscore πραγματοποιείται στο πρότυπο ISO19030 και στην παρούσα εργασία παραλείπεται, καθώς κάτι τέτοιο ξεφεύγει από το σκοπό της.

[155] Το ότι υπάρχουν οφείλεται στην αυστηρότητα του κριτηρίου που χρησιμοποιείται, αλλά και στο διαχωρισμό των δεδομένων, που ενδεχομένως να πραγματοποιήθηκε από εμάς με «λάθος»(- άλλες μέρες …)τρόπο λόγω και της κατανομής των δοθέντων data points.

[156] Αλλά από online data, με συχνότητα 1h.

[157] Και όχι με κατανάλωση καυσίμου, κάτι που θα έδινε τη δυνατότητα εκτίμησης της κατάστασης της κύριας μηχανής.

μετρούμενης με την αναμενόμενη τιμή ισχύος για κάθε data point κρίνεται αναγκαία η αναγωγή της αναμενόμενης τιμής στην κατάσταση στην οποία αναφέρεται η μετρούμενη από το μετρητικό όργανο τιμή. Επισημαίνεται, ότι με τον όρο κατάσταση αναφερόμεθα στην κατάσταση φόρτωσης του υπό ανάλυση πλοίου (βύθισμα, διαγωγή, εκτόπισμα), αλλά και στις καιρικές συνθήκες (κατάσταση θάλασσας, ύπαρξη αποθάλασσας, άνεμοι, ρεύματα). Όχι, στη ρύπανση της γάστρας ή της έλικας, μιας και κανονικά σκοπός μας είναι με τον εν λόγω δείκτη να εξετάσουμε την αύξηση της ισχύος, προκειμένου να επιτευχθεί μια συγκεκριμένη ταχύτητα, λόγω της ρύπανσης. Καθίσταται, λοιπόν, αναγκαία για κάθε κατάσταση φόρτωσης η εύρεση της κατάλληλης καμπύλης αναφοράς. Γενικώς, σύμφωνα με το πρότυπο ISO19030, προκειμένου να χρησιμοποιηθεί μια καμπύλη αναφοράς, θα πρέπει να ικανοποιούνται τα κάτωθι κριτήρια: $|100(\Delta_{ref}-\Delta_m)/\Delta_m|<5$, $|trim_{ref}-trim_m|<0.2L_{BP}/100$. Στην περίπτωση του υπό ανάλυση bulk carrier, η διαχειρίστρια εταιρεία στα operational data δε συμπεριέλαβε τις μετρήσεις του εκτοπίσματος και της διαγωγής, παρά μόνο το μέσο βύθισμα, κάτι που αποτελεί και πάγια πρακτική της. Προκειμένου, όμως, να περιοριστεί το όποιο σφάλμα, και εκμεταλλευόμενοι το γεγονός ότι είχαν γίνει εκ των προτέρων διορθώσεις των μέσων βυθισμάτων, έγινε εκτίμηση του εκτοπίσματος, βάσει καταστάσεων που περιέχονται στο stability booklet (κάτι που και πάλι δεν είναι απολύτως σωστό, λόγω του ότι δε λαμβάνονται υπ' όψιν δυναμικά φαινόμενα, αλλά και δυναμική βύθιση, δυναμική διαγωγή, που αποκτά το πλοίο κατά την πλεύση, λόγω διαφοροποίησης του πεδίου του περιβάλλοντος νερού).

Στην προκειμένη περίπτωση, πραγματοποιήθηκε αναγωγή της ισχύος πρόωσης σε ήρεμο νερό που είχε υπολογιστεί, σε εκείνη την ισχύ πρόωσης (αναμενόμενης), στην κατάσταση φόρτωσης στην οποία αναφέρεται το εκάστοτε data point, μέσω συντελεστή ναυαρχείου. Ορθότερα, έγινε εκτίμηση των διορθωμένων καμπυλών αναφοράς (P-V), έπειτα από τις προαναφερθείσες αναγωγές. Στη συνέχεια, για κάθε data point υπολογίστηκε η αναμενόμενη πρόσθετη αντίσταση λόγω κυματισμού, αλλά και η αντίσταση ανέμου. Πιο συγκεκριμένα, από την αντίσταση ανέμου αφαιρέθηκε η αντίσταση αέρα, μιας και η τελευταία συμπεριλαμβάνεται στην υπολογισθείσα αντίσταση πρόωσης σε ήρεμο νερό. Ο υπολογισμός της αντίστασης ανέμου και αέρα πραγματοποιήθηκε ακολουθώντας τη διαδικασία που περιγράφεται στο πρότυπο ISO15016:2015(E) και χρησιμοποιώντας του αδιάστατους συντελεστές που υπολόγισε ο Blendermann (1996), μέσω πειραμάτων μοντέλων σε αεροδυναμική σήραγγα. Ειδικότερα, στα operational data δινόταν η ένδειξη του ανεμομέτρου για την ταχύτητα του ανέμου, η οποία ήταν η φαινόμενη. Από την άλλη, δε δινόταν η κατεύθυνση του ανέμου ανά data point, οπότε ελλείψει δεδομένων, αν και όχι απολύτως ορθώς, θεωρήθηκε ότι η σχετική κατεύθυνση του ανέμου ταυτίζεται με τη σχετική κατεύθυνση του συνολικού κυματισμού, η οποία δινόταν. Όσον αφορά τον υπολογισμό της πρόσθετης αντίστασης κυματισμού, αυτός πραγματοποιήθηκε με χρήση του προγράμματος FRANK, για μοναδιαίο σημαντικό ύψος κύματος. Εν συνεχεία, όπως περιγράφεται και στην αντίστοιχη ενότητα της παρούσας έκθεσης, η προκύπτουσα τιμή της πρόσθετης αντίστασης κυματισμού πολλαπλασιάστηκε με το τετράγωνο του σημαντικού ύψους κύματος, που υπολογίζεται από κατάλληλα μετρητικά όργανα[158] ανά data point. Με αυτόν τον τρόπο πραγματοποιήθηκε εκτίμηση της πρόσθετης αντίστασης λόγω καιρικών συνθηκών και θαλάσσιας κατάστασης. Αυτή με τη σειρά της προστίθεται στην αντίστοιχη αντίσταση ρυμούλκησης σε ήρεμο νερό (χωρίς άνεμο). Αυτή, μέσω του βαθμού απόδοσης προωστήριας εγκατάστασης (PC) (που εκτιμάται όπως περιγράφεται παρακάτω στην παρούσα ενότητα) ανήχθη στην αντίστοιχη αναμενόμενη ισχύ άξονα. Μάλιστα, πραγματοποιούνται διορθώσεις ισχύος άξονα, λόγω γήρανσης (δεκαετία λειτουργίας πλοίου) αξονικών συστημάτων κοκ, που εν μέρει μπορεί να προσμετρηθεί στον PC (στο η_s), αλλά και σε άλλους είδους διορθώσεις (σχετικές με καταναλώσεις καυσίμου, που στην παρούσα εργασία ελλείψει αντίστοιχων στοιχείων δεν πραγματοποιούνται). Καθ'

[158] Καθ' ομολογία εκπροσώπων της ναυτιλιακής το σημαντικό ύψος κύματος λαμβάνεται σαν συνολική τιμή από ocean reports. Ως εκ τούτου, ενδεχομένως να αυξάνεται το σφάλμα και η αβεβαιότητα των υπολογισμών.

αυτόν τον τόπο προκύπτει η αναμενόμενη ισχύς άξονα ανά data point. Αυτή είναι η P_{est} που συγκρίθηκε με την μετρούμενη ισχύ άξονα (P_m).

Η προαναφερθείσα σύγκριση ενδεχομένως να πραγματοποιείται για λογιστικούς[159] λόγους, καθώς προκειμένου να συγκριθούν οι ομοειδείς ιπποδυνάμεις θεωρήθηκε ότι το πλοίο για κάθε data point πλέει με την ίδια ταχύτητα (ground speed, καθώς αυτή ενδιαφέρει τη διαχειρίστρια εταιρεία[160]) στην αναμενόμενη κατάσταση με την πραγματική. Με την ίδια λογική, αν θεωρηθεί ότι η κύρια μηχανή παράγει την ίδια ισχύ άξονα (SHP) στην αναμενόμενη κατάσταση με την πραγματική (μετρούμενη), τότε δύναται να υπολογιστεί η σχετική απώλεια ταχύτητας. Συγκεκριμένα της ground speed, λόγω του ότι αυτή ενδιαφέρει περισσότερο το ναυλωτή. Πιο συγκεκριμένα, θεωρείται ότι τα αναμενόμενα ζεύγη (P_{est},V_G) τόσο κατά το υποθετικό σενάριο σταθερής ταχύτητας (over ground) όσο και κατά το σενάριο σταθερής SHP, ανήκουν, για κάθε data point, στην ίδια καμπύλη αναφοράς, της οποίας η μορφή είναι γνωστή από το sea trials report. Έτσι, προκύπτει μια αναμενόμενη ταχύτητα V_e. Αν V_m η μετρούμενη ταχύτητα, τότε ο σχετικός με την απώλεια ταχύτητας δείκτης είναι ο εξής: $PV=V_d=100(V_m-V_e)/V_e$. Θα αναμενόταν, λόγω της ρύπανσης της γάστρας, της έλικας, ο εν λόγω δείκτης να ελάμβανε κυρίως αρνητικές τιμές (κάτι που θα σήμαινε ότι η μετρούμενη- πραγματική κατάσταση θα ήταν πιο βαριά από την αναμενόμενη), σε περίπτωση που κατά τα operational data για μεγάλο χρονικό διάστημα το πλοίο δε συναντούσε κυματισμούς και ανέμους (ωσάν συνθήκες θαλασσίων δοκιμών), περίπτωση στην οποία δεν θα απαιτούνταν ο προσδιορισμός των αντίστοιχων αντιστάσεων, που όπως αναλύεται στην παρούσα ενότητα, αυξάνει την αβεβαιότητα των υπολογισμών. Μάλιστα, συνεχής διακύμανση των καιρικών συνθηκών, καθιστούν δύσκολη την εξαγωγή συμπερασμάτων για την κατάσταση της γάστρας, της έλικας.

Ακόμη, πραγματοποιείται εκτίμηση των αναμενόμενων στροφών (n_e) για κάθε data point και σύγκρισή του με την μετρηθείσα τιμή (n_m). Η εν λόγω σύγκριση πραγματοποιείται καθ' όμοιο τρόπο με την ισχύ άξονα και την ταχύτητα. Δηλαδή, με υπολογισμό του λόγου n_m/n_e και της επί τοις εκατό απόκλισης $(n_m-n_e)/n_e \cdot 100$. Η εκτίμηση των αναμενόμενων στροφών απαιτεί τη χρήση των διαγραμμάτων ελεύθερης ροής της έλικας. Όπως έχει αναλυθεί εκτενώς σε προηγούμενες ενότητες της παρούσας έκθεσης, για την έλικα του υπό ανάλυση bulk- carrier δεν μας διατέθηκαν τα εν λόγω διαγράμματα, ως εκ τούτου έπειτα από συνεννόηση με τον επιβλέποντα διδάσκοντα επελέγη μια παραπλήσια έλικα από τη σειρά Wageningen-B. Ως εκ τούτου, δύναται υπό αυτό το πρίσμα να χρησιμοποιηθούν οι κώδικες σε Fortran 95, grid.f95, του Πολίτη, που διατίθενται από τη σχολή. Καθ' αυτόν τον τρόπο δύναται να αχθεί δεδομένης της συνολικής αντίστασης ρυμούλκησης (ήρεμου νερού χωρίς άνεμο + επιπρόσθετη αντίσταση κυματισμού + αντίσταση του ανέμου) για κάθε ταχύτητα (για κάθε data point), η απαιτούμενη ισχύς παραλαβής από την έλικα και οι απαιτούμενες στροφές, αλλά και ο β.α. έλικας πλοίου η_D. Μάλιστα, λόγω του ότι πραγματοποιείται αναγωγή από ισχύ ρυμούλκησης σε ισχύ πρόωσης, όπως έχει ήδη αναλυθεί, απαιτείται και ο προσδιορισμός των συντελεστών αλληλεπίδρασης (w,t,η_R) για κάθε data point. Ο εν λόγω προσδιορισμός πραγματοποιείται, για κάθε κατάσταση φόρτωσης (ανάλογα με τους συντελεστές γάστρας κυρίως) των operational data, βάσει των επιλογών που αναφέρονται στην ενότητα της Αντίστασης της παρούσας έκθεσης. Επισημαίνεται ότι δεδομένων των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της έλικας, και του ότι το εν λόγω πρόβλημα είναι πρόβλημα ανάλυσης και όχι σχεδίασης, τρέχοντας τον κώδικα grid.f95 και με σταθερό D (διάμετρο έλικας), στόχος είναι ο προσδιορισμός των στροφών. Γνωρίζοντας ότι k_T/J^2=const είναι γνωστό (λόγω απαλοιφής στροφών) για κάθε data point δύναται να βρεθεί το κοινό σημείο της καμπύλης k_T-J του διαγράμματος ελεύθερης ροής της έλικας με την καμπύλη που περιγράφεται από την εξίσωση $k_T=c\ J^2$ για κάθε data point. Έτσι, προσδιορίζεται το ζεύγος k_T,J, άρα

[159] Υπολογιστικούς, ορθότερα.

[160] Λόγω του οικονομικού ενδιαφέροντος ως προς το χρόνο που χρειάζεται προκειμένου το πλοίο να ολοκληρώσει το προγραμματισμένο ταξίδι του.

και οι στροφές και κατ' επέκταση το η_0[161] και το k_Q, όπως έχει αναλυθεί και στην ενότητα της Πρόωσης της παρούσας έκθεσης. Καθ' αυτόν τον τρόπο προσδιορίζεται η αναμενόμενη ισχύς (και άξονα και παραλαβής), αλλά και οι αναμενόμενες στροφές για κάθε data point. Βέβαια, καθίσταται αναγκαίο να τονιστεί ότι οι εν λόγω τιμές βασίζονται στην υπόθεση ότι η έλικα είναι σειράς Wageningen-B, κάτι που δεν ισχύει οπότε αυξάνεται η όποια αβεβαιότητα. Ακόμη, ο προσδιορισμός των συντελεστών αλληλεπίδρασης δε γίνεται βάσει model tests για αυτοπροωθούμενο πλοίο, αλλά βασίζεται σε επιλογές βάσει εμπειρίας. Σημειώνεται, επιπλέον, ότι επιλέχθηκε ηs=0.98, που αποτελεί λογική τιμή, λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι στο χρονικό διάστημα που αφορούν τα operational data το πλοίο ήταν οκταετίας.

Παρακάτω παρουσιάζεται σε αντίστοιχες υποενότητες αναλυτικότερα η διαδικασία που ακολουθήθηκε προκειμένου να εκτιμηθεί η αναμενόμενη ισχύς άξονα για το κάθε data point. Μάλιστα, ακολουθήθηκε γενικώς, η διαδικασία που περιγράφεται στο πρότυπο ISO15016, εκτός ελαχίστων εξαιρέσεων.

5.1.1 ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΕΞΑΙΤΙΑΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΑΝΕΜΟΥ

Η αντίσταση του ανέμου εξαιτίας του ανέμου εκτιμάται, σύμφωνα με το πρότυπο ISO15016, βάσει της σχέσης:

$R_{AA} = 0.5\rho_A C_{AA}(\psi_{WR,ref}) A_{XV} V_{WR,ref}^2 - 0.5\rho_A C_{AA}(0) A_{XV} V_G^2$, όπου:

- R_{AA}: η αντίσταση λόγω ανέμου, σε [N],
- A_{XV}: η διαμήκης προβεβλημένη επιφάνεια του πλοίου πάνω από την ίσαλο μαζί με τις υπερκατασκευές- υπερστεγάσματα, σε [m^2],
- C_{AA}[162]: ο συντελεστής αντίστασης του ανέμου; $C_{AA}(0)$: ο συντελεστής αντίστασης για μετωπικό άνεμο,
- V_G: η ταχύτητα του πλοίου ως προς τη στεριά (over ground), σε [m/s],
- $V_{WR,ref}$: η φαινόμενη ταχύτητα του ανέμου στο ύψος αναφοράς, σε [m/s],
- $\psi_{WR,ref}$: η σχετική γωνία του ανέμου στο ύψος αναφοράς, σε [^{o}],
- ρ_A: πυκνότητα του αέρα, σε [kg/m^3]. Εδώ λαμβάνεται ίση με 1.18 kg/m3 (για 25°C)[163].

Επισημαίνεται ότι ο όρος $0.5\rho_A C_{AA}(0) A_{XV} V_G^2$ που εμπεριέχεται στη σχέση υπολογισμού της R_{AA} εκφράζει την αντίσταση του αέρα. Κάτι τέτοιο, μπορεί να διαπιστωθεί από σύγκρισή του εν λόγω όρου με τον 1° όρο ($0.5\rho_A C_{AA}(\psi_{WR,ref}) A_{XV} V_{WRref}^2$), που είναι πιο γενικός, οπότε άγεται ότι η σχετική γωνία του ανέμου είναι ίση με <u>0° (μετωπικός άνεμος)</u> και η φαινόμενη ταχύτητα ίση με τη V_G. Γίνεται, λοιπόν, αντιληπτό ότι η R_{AA} είναι η καθαρή αντίσταση του ανέμου, χωρίς να λαμβάνει υπ' όψιν της την αντίσταση του αέρα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η αντίσταση του αέρα έχει ήδη υπολογιστεί και προσμετρηθεί στην αντίσταση ρυμούλκησης σε ήρεμο νερό, χωρίς άνεμο, που αποτελεί τη βάση για την ισχύ αναφοράς (αναμενόμενη), που εν τέλει υπολογίζεται.

Όσον αφορά το συντελεστή αντίστασης ανέμου C_{AA}, αυτός προκύπτει από το report του Blendermann (1996). Σημειώνεται ότι οι πίνακες ($C_{xx} - \varepsilon$) για την κάθε κατάσταση φόρτωσης (αναφοράς) παρατίθενται στην αντίστοιχη υποενότητα του ενότητας της αντίστασης του ανέμου.

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η διόρθωση της αντίστασης του ανέμου, καθίσταται, πρώτα, επιβεβλημένος ο προσδιορισμός της φαινόμενης ταχύτητας και της σχετικής γωνίας του ανέμου στο ύψος αναφοράς ($V_{WR,ref}$, $\psi_{WR,ref}$ αντίστοιχα). Τονίζεται ότι στις δοθείσες από τη διαχειρίστρια εταιρεία

[161] Οπότε και το η_D.

[162] Εδώ $C_{AA} = C_{xx}$.

[163] Ελλείψει σχετικών με την θερμοκρασία μετρήσεων στα operational data.

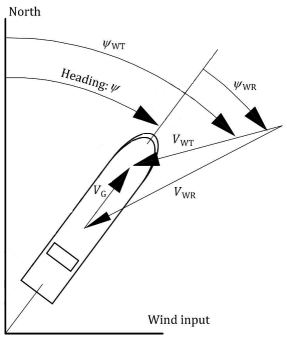
μετρήσεις περιλαμβάνεται, εκτός των άλλων, η φαινόμενη ταχύτητα του ανέμου, σε [kn], στο ύψος του ανεμομέτρου, η σχετική γωνία του κύματος, σε [deg]. Δεδομένου, ότι δεν υπάρχουν στα δοθέντα operational data στοιχεία για τη σχετική γωνία του ανέμου σε σχέση με το ανεμόμετρο, υποθέτουμε ότι αυτή ισούται με τη σχετική γωνία του κύματος (αν και όχι αληθές, λόγω της ύπαρξης του swell, για το οποίο, επίσης, δεν υπάρχουν πληροφορίες). Ως εκ τούτου, θα πρέπει τα δυο προαναφερθέντα μεγέθη (φαινόμενη ταχύτητα και σχετική γωνία) να διορθωθούν κατά τέτοιον τρόπο ώστε να αναφέρονται στο ύψος αναφοράς, το οποίο διαφέρει για κάθε κατάσταση φόρτωσης (μέσο βύθισμα). Προκειμένου να συμβεί αυτό, θα πρέπει πρώτα να υπολογιστεί η πραγματική ταχύτητα και γωνία του ανέμου στο ύψος του ανεμομέτρου. Αυτό γίνεται με χρήση των σχέσεων[164]:

$$V_{WT} = \sqrt{{V_{WR}}^2 + {V_G}^2 - 2V_{WR}V_G\cos\psi_{WR}}\ ,$$

$$\psi_{WT} = \begin{cases} \tan^{-1}\left\{\frac{V_{WR}\sin(\psi_{WR}+\psi)-V_G\sin\psi}{V_{WR}\cos(\psi_{WR}+\psi)-V_G\cos\psi}\right\}, \text{για } V_{WR}\cos(\psi_{WR}+\psi)-V_G\cos\psi \geq 0 \\ \tan^{-1}\left\{\frac{V_{WR}\sin(\psi_{WR}+\psi)-V_G\sin\psi}{V_{WR}\cos(\psi_{WR}+\psi)-V_G\cos\psi}\right\}+180, \text{για } V_{WR}\cos(\psi_{WR}+\psi)-V_G\cos\psi < 0 \end{cases}, \text{ όπου:}$$

- V_{WT}: η πραγματική ταχύτητα του ανέμου σε κάποιο ύψος (γενικό), σε [m/s],
- V_{WR}: η φαινόμενη ταχύτητα του ανέμου σε κάποιο ύψος (γενικό), σε [m/s],
- ψ_{WT}: γωνία του ανέμου, σε κάποιο ύψος (γενικό), σε [^{o}],
- ψ_{WR}: σχετική γωνία του ανέμου σε κάποιο ύψος (γενικό), σε [^{o}],
- ψ: πορεία του πλοίου, σε [^{o}][165].

Παρακάτω παρατίθεται σχήμα, στο οποίο επεξηγούνται πολλά από τα προαναφερθέντα μεγέθη.

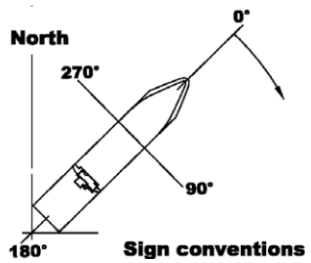


ΣΧΗΜΑ 60: ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΣΥΜΟΛΩΝ ΣΧΕΤΙΚΩΝ ΜΕ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ (ISO 15016)

Ακόμη, παρατίθεται σχήμα όπου παρουσιάζεται η διεύθυνση του ανέμου ως προς τον άξονα του πλοίου.

[164] Οι σχέσεις που παρατίθενται είναι γενικές και δεν αναφέρονται σε ένα συγκεκριμένο ύψος.

[165] Δεδομένα για την πορεία του υπό ανάλυση bulk- carrier δεν δίνονται οπότε θεωρείται ότι πλέει με σταθερή πορεία προς τα βόρεια (0 deg).



ΣΧΗΜΑ 61: ΣΧΕΤΙΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΠΛΟΙΟ (ITTC 2017)

Εν συνεχεία, λαμβάνεται υπ' όψιν η ύπαρξη του οριακού στρώματος. Έτσι, η πραγματική ταχύτητα στο ύψος του ανεμομέτρου διορθώνεται ώστε να αναφέρεται στο ύψος αναφοράς, μέσω της σχέσης (που δίνεται και στο report του Blendermann 1996[166]): $V_{WT,ref} = V_{WT,a}\left(\frac{z_{ref}}{z_a}\right)^{1/10}$, όπου οι δείκτες a, ref αναφέρονται στο ύψος του ανεμομέτρου και αναφοράς, αντίστοιχα. Για κάθε data point, άρα και για κάθε κατάσταση φόρτωσης, θεωρούμε ότι στο ύψος του ανεμομέτρου δεν υπάρχει επίδραση του οριακού στρώματος. Όσον αφορά, το ύψος αναφοράς, αυτό προκύπτει για κάθε μέσο βύθισμα[167] ως εξής: $z_{ref} = \frac{A_{ref}(z_{ref,ref}+\Delta T)+\frac{1}{2}B\Delta T^2}{A}$, $z_a = z_{a,ref} + \Delta T$, $A = A_{ref} + \Delta T \cdot B$, $\Delta T = T_{ref} - T$, όπου:

- ΔT: διαφορά μεταξύ βυθίσματος σχεδίασης T_{ref}[168] και πραγματικού μέσου βυθίσματος T, σε [m],
- $z_{a,ref}$: ύψος ανεμομέτρου άνωθεν της επιφάνειας ισάλου για το βύθισμα σχεδίασης, σε [m],
- $z_{ref,ref}$: ύψος αναφοράς άνωθεν της επιφάνειας ισάλου για το βύθισμα σχεδίασης, σε [m],
- A_{ref}: εγκάρσια προβεβλημένη επιφάνεια, σε [m^2].

Το $z_{ref,ref}$ λαμβάνεται ίσο με 10m, κάτι που αποτελεί συνήθη πρακτική.

Έπειτα, ακολουθείται η αντίστροφη με προηγουμένως διαδικασία, δηλαδή υπολογίζεται η φαινόμενη ταχύτητα και η σχετική γωνία του ανέμου στο ύψος αναφοράς, πλέον, για κάθε μέσο βύθισμα (ανά data point). Αυτό γίνεται με τη χρήση των παρακάτω σχέσεων:

$$V_{WR,ref} = \sqrt{{V_{WT,ref}}^2 + {V_G}^2 + 2V_{WT,ref}V_G\cos(\psi_{WT} - \psi)},$$

$$\psi_{WR,ref} = \begin{cases} \tan^{-1}\left\{\frac{V_{WT,ref}\sin(\psi_{WT}-\psi)}{V_{WT,ref}\cos(\psi_{WT}-\psi)+V_G}\right\}, \text{για } V_{WT,ref}\cos(\psi_{WT} - \psi) + V_G \geq 0 \\ \tan^{-1}\left\{\frac{V_{WT,ref}\sin(\psi_{WT}-\psi)}{V_{WT,ref}\cos(\psi_{WT}-\psi)+V_G}\right\} + 180, \text{για } V_{WT,ref}\cos(\psi_{WT} - \psi) + V_G < 0 \end{cases}$$

Η επεξήγηση των συμβόλων στις δυο τελευταίες σχέσεις πραγματοποιείται αναλυτικά παραπάνω.

Αφού υπολογιστεί η αντίσταση ανέμου, απομένει η εκτίμηση της διορθωμένης αποδιδόμενης ισχύος ($P_{D,corr}$), που προκύπτει με την αφαίρεση της ισχύος λόγω της αντίστασης του ανέμου (ΔP_w):

$P_{D,corr} = P_D - \Delta P_w$, όπου: $\Delta P_w = \frac{R_{AA}\cdot V_G}{\eta_{DO}} + P_D\left(1 - \frac{\eta_{DM}}{\eta_{DO}}\right)$, με:

[166] Ο εκθέτης 1/10 δίνεται για ανοικτή θάλασσα.
[167] Η επίδραση της διαγωγής αμελείται.
[168] Το (moulded) βύθισμα σχεδίασης εδώ ισούται με 14.5m.

η_{DO}: βαθμός απόδοσης έλικας- πλοίου σε ήρεμη κατάσταση, η_{DM}: βαθμός απόδοσης έλικας- πλοίου στην παρούσα κατάσταση και υπολογίζονται σύμφωνα με το πρότυπο ISO15016 ή λαμβάνονται ίσα με 0.7, ελλείψει στοιχείων από πειράματα αυτοπρόωσης μοντέλου. Στην παρούσα περίπτωση, λαμβάνεται $\eta_{DO} = \eta_{DM}$.

5.1.2 ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΕΞΑΙΤΙΑΣ ΠΡΟΣΘΕΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥ

Η πρόσθετη αντίσταση κυματισμού εκτιμάται, όπως έχει ήδη προαναφερθεί, με τη χρήση του προγράμματος FRANK και σε συνδυασμό με τον κώδικα irreg. Καθ' αυτόν τον τρόπο λαμβάνεται υπ' όψιν και η φασματική συνάρτηση, καθιστώντας το υπό ανάλυση σε κάθε τρέξιμο, του προγράμματος, κύμα μη αρμονικό. Με τη βοήθεια του προγράμματος FRANK προκύπτει η πρόσθετη αντίσταση για μονοκατευθυντικούς κυματισμούς, με επιλεχθέν σημαντικό ύψος κύματος ($H_{1/3}$) ίσο με 1m, για βήμα γωνιών 30°, και για γωνίες από 0° έως 180°. Οι γωνίες μέχρι 360° εξαιρούνται λόγω συμμετρίας του πλοίου περί το διάμηκες επίπεδο συμμετρίας. Όσον αφορά τα modal periods, επιλέχθηκαν να είναι λαμβάνουν τιμές στο εύρος των τιμών των modal periods των operational data. Τα modal periods των operational data, ελλείψει σχετικών μετρήσεων, εκτιμήθηκαν με τη χρήση της σχέση των Pierson-Moskowitz (πλήρως αναπτυγμένων θαλασσών), κατά την οποία $T_P = 2\pi/\omega_p$, όπου: $\omega_p = 0.4013\sqrt{g/H_{1/3}}$. Εν συνεχεία, προσδιορίστηκε το εύρος του διαστήματος των modal periods, προκειμένου να γίνουν για αυτό οι υπολογισμοί με το FRANK. Κάτι αντίστοιχο έγινε και με την ταχύτητα πλεύσης του πλοίου. Στην προκειμένη περίπτωση, ενδιαφερόμεθα για τη velocity through sea και το εύρος των ταχυτήτων που μελετήθηκε από το FRANK επιλέχθηκε βάσει του εύρους των STW[169] που εμφανίζεται στα operational data. Καθ' αυτόν τον τρόπο, για τις δυο επιλεχθείσες (εξ αρχής) καταστάσεις φόρτωσης (FL, BL) πραγματοποιήθηκε η εκτίμηση της πρόσθετης αντίστασης κυματισμού. Αυτή, όμως, αφορά μοναδιαίο σημαντικό ύψος κύματος (ανεμογενούς κυματισμού). Έτσι, πραγματοποιείται διόρθωση της υπολογισθείσας τιμής από το FRANK πολλαπλασιάζοντάς την με το τετράγωνο του σημαντικού ύψους κύματος κάθε data point, όπως αυτό προκύπτει από τα μετρητικά όργανα. Επισημαίνεται ότι, στο δοθέν στα operational data $H_{1/3}$ έχει προσμετρηθεί η επίδραση τόσο του ανεμογενούς κυματισμού, όσο και του swell (αποθάλασσας). Μάλιστα, η διαχειρίστρια εταιρεία μας διαβεβαίωσε ότι το συνολικό σημαντικό ύψος κύματος προέκυψε σαν ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων των σημαντικών υψών κύματος της θάλασσας και της αποθάλασσας, δηλαδή προέκυψε ενεργειακά, κάτι που προτείνεται και από το πρότυπο ISO15016. Σημειώνεται, ακόμη, ότι προτού γίνει ο πολλαπλασιασμός με το τετράγωνο του σημαντικού ύψους κύματος, είχε προηγηθεί αναγωγή της προκύπτουσας από το FRANK πρόσθετης αντίστασης από την κατάσταση φόρτωσης αναφοράς, στην αντίστοιχη του εκάστοτε data point. Η εν λόγω αναγωγή πραγματοποιήθηκε με ισότητα συντελεστών ναυαρχείου, μόνο για την εν λόγω συνιστώσα της ισχύος (αγόμενης από την αντίσταση). Τέλος, καθίσταται αναγκαίο να αναφερθεί ότι υπολογίστηκε η διόρθωση της αποδιδόμενης στην έλικα ισχύος λόγω πρόσθετης αντίστασης κυματισμού, όπως ακριβώς και στην περίπτωση της αντίστασης ανέμου, δηλαδή: $\Delta P_{AW} = \frac{R_{AW} \cdot V_G}{\eta_{DO}} + P_D\left(1 - \frac{\eta_{DM}}{\eta_{DO}}\right)$, με τα διάφορα σύμβολα να επεξηγούνται παραπάνω.

5.1.3 ΛΟΙΠΕΣ ΔΙΟΡΘΩΣΕΙΣ

Το πρότυπο ISO15016 προτείνει στη διόρθωση της αποδιδόμενης ισχύος να ληφθεί υπ' όψιν η επίδραση παραγόντων, όπως:

- οι θερμοκρασιακές διαφορές της θάλασσας μεταξύ πραγματικής και θεωρητικής κατάστασης αναφοράς που συνεπάγονται διαφορές πυκνότητας,

[169] Speed Through Water

- η επίδραση του ρηχού νερού

Για τις προαναφερθείσες παραμέτρους δεν υπάρχουν μετρήσεις στα δοθέντα operational data, κάτι που δυσχεραίνει την όποια προσπάθεια να ληφθούν υπ' όψιν. Θεωρήθηκε, ότι το υπό ανάλυση πλοίο πλέει σε βαθιά νερά και ότι η θερμοκρασία του νερού είναι κατά μέσο όρο περίπου 19-20°C ($\rho \approx 1025 kg/m^3$).

Μια ακόμη παράμετρος που καθίσταται αναγκαίο να ληφθεί υπ' όψιν είναι η επίδραση της διαφοράς των εκτοπισμάτων μεταξύ πραγματικής και θεωρητικώς αναμενόμενης κατάστασης (αναφοράς). Αυτή η διόρθωση πραγματοποιείται, όπως έχει προαναφερθεί με τη χρήση του συντελεστή ναυαρχείου και λαμβάνοντας υπ' όψιν τις προϋποθέσεις έχουν προαναφερθεί. Βέβαια, στις μετρήσεις δε συμπεριλαμβάνεται το εκτόπισμα, κάτι που αντιμετωπίζεται με τη χρήση του loading manual, όπως έχει προαναφερθεί.

Παράλληλα, το πρότυπο ISO15016 προβλέπει και διόρθωση της ταχύτητας λόγω της επίδρασης των ρευμάτων. Ελλείψει στοιχείων για την κατεύθυνση των ρευμάτων, αλλά και την έντασή τους, βασιζόμεθα στις δοθείσες ενδείξεις των μετρητικών οργάνων που αφορούν τη SOG=V_G (μετρούμενη μέσω GPS) και τη STW= V_S (μετρούμενη μέσω speed logs). Η διαφορά των V_G, V_S εκφράζει την ταχύτητα του ρεύματος. Εδώ δε χρειάζεται, να γίνει κάποιος περεταίρω υπολογισμός, δοθέντων των SOG, STW για κάθε data point, πέρα από το να ληφθεί υπ' όψιν η μεταβολή της ταχύτητας λόγω ρευμάτων στο διάγραμμα SHP-V, θεωρώντας σταθερή την ισχύ άξονα. Επισημαίνεται ότι η velocity over ground λαμβάνει υπ' όψιν την ύπαρξη των ρευμάτων, ενώ η speed through sea την αγνοεί. Έτσι, η καμπύλη SHP-V μετατοπίζεται, ίσως και λόγω της διακύμανσης της ταχύτητας του ρεύματος ως προς το πλοίο μεταβάλλεται και η μορφή της, στην περίπτωση που ο άξονας των ταχυτήτων αναφέρεται στην over ground.

5.1.4 ΣΥΝΟΨΗ

Βάσει των ανωτέρω στην παρούσα ενότητα, αλλά και βάσει της ανάλυσης που πραγματοποιείται σε προηγούμενες ενότητες της παρούσας εργασίας γίνεται σαφές ποια στοιχεία απαιτούνται προκειμένου να πραγματοποιηθούν οι απαιτούμενοι υπολογισμοί. Πιο συγκεκριμένα, οι παράμετροι που καθίσταται αναγκαίο να προσδιοριστούν για κάθε data point, εκτός των προαναφερθέντων παραπάνω στην παρούσα ενότητα, είναι και αυτές που σχετίζονται με το πρόγραμμα FRANK, και οι οποίες αναλύονται ενδελεχώς στην αντίστοιχη ενότητα. Ενδεικτικά, διάφορες παράμετροι που μας απασχολούν για κάθε data point είναι: η ταχύτητα του πλοίου, το εκτόπισμα, η αντίσταση ρυμούλκησης σε ήρεμο νερό (χωρίς άνεμο) δεδομένου εκτοπίσματος και ταχύτητας, η πλευρική και η μετωπική επιφάνεια του πλοίου πάνω από την ίσαλο, ο συντελεστής αντίστασης ανέμου (κατά Blendermann 1996), το μήκος, το πλάτος, το μέσο βύθισμα, η ταχύτητα και η σχετική διεύθυνση του ανέμου, το σημαντικό ύψος κύματος (και της θάλασσας και του swell), το C_B, η τιμή της πρόσθετης αντίστασης κυματισμού για μοναδιαίο σημαντικό ύψος κύματος (από FRANK), η πυκνότητα του νερού και του αέρα, η βρεχόμενη επιφάνεια, οι συντελεστές αλληλεπίδρασης (w,t,η_R), τα γεωμετρικά στοιχεία της έλικας (διάμετρος, βήμα, λόγος εκτεταμένης επιφάνειας, αριθμός πτερυγίων), τα πολυώνυμα των συντελεστών ώσης (k_T) και ροπής (k_Q), ο β.α. του αξονικού συστήματος, ο β.α. της προωστήριας εγκατάστασης PC.

5.2 ΣΥΛΛΟΓΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ - ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

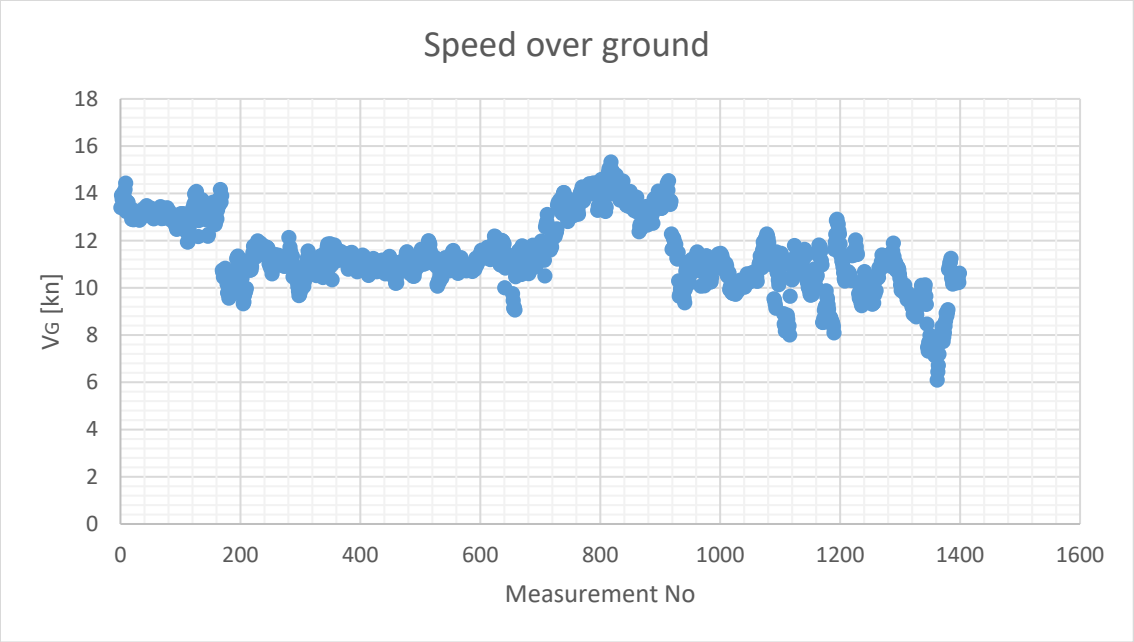
Παρακάτω παρατίθενται διαγράμματα αντλούμενα από τα δοθέντα operational data. Αυτά είναι διαφορετικά για FL, BL και παρατίθενται για αύξοντα αριθμό μέτρησης. Πιο συγκεκριμένα, αποτελούν διαγράμματα των μετρούμενων μεγεθών ανά data point και για κάθε μελετούμενη κατάσταση φόρτωσης ξεχωριστά, ως αναφέρεται παραπάνω. Αυτό γίνεται προκειμένου να μπορεί να αιτιολογηθεί ευκολότερα η όποια απόκλιση μεταξύ μετρούμενων και εκτιμώμενων τιμών που θα παρουσιαστούν αργότερα. Προς το παρόν παρουσιάζονται, τα εξής διαγράμματα (καθένα για FL και BL):

- Διάγραμμα ταχύτητας πλοίου (over ground) V_G [kn] ανά data point.

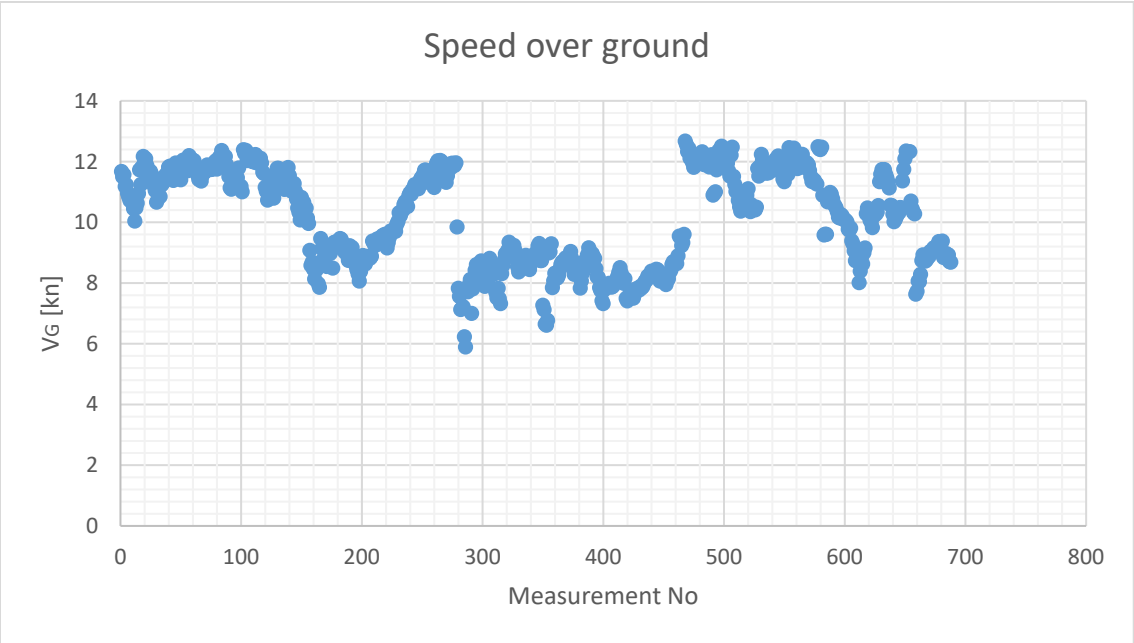
- Διάγραμμα ταχύτητας πλοίου (through sea) V_s [kn] ανά data point.
- Διάγραμμα ισχύος άξονα SHP [kW] ανά data point.
- Διάγραμμα στροφών έλικας n [rpm] ανά data point.
- Διάγραμμα (συνολικού)[170] σημαντικού ύψους κύματος $H_{1/3}$ [m] ανά data point.
- Διάγραμμα φαινόμενης ταχύτητας ανέμου V_{WR} [rpm] ανά data point.
- Διάγραμμα σχετικής διεύθυνσης ανέμου ως προς πλοίο [^{o}] ανά data point.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα προαναφερθέντα διαγράμματα:

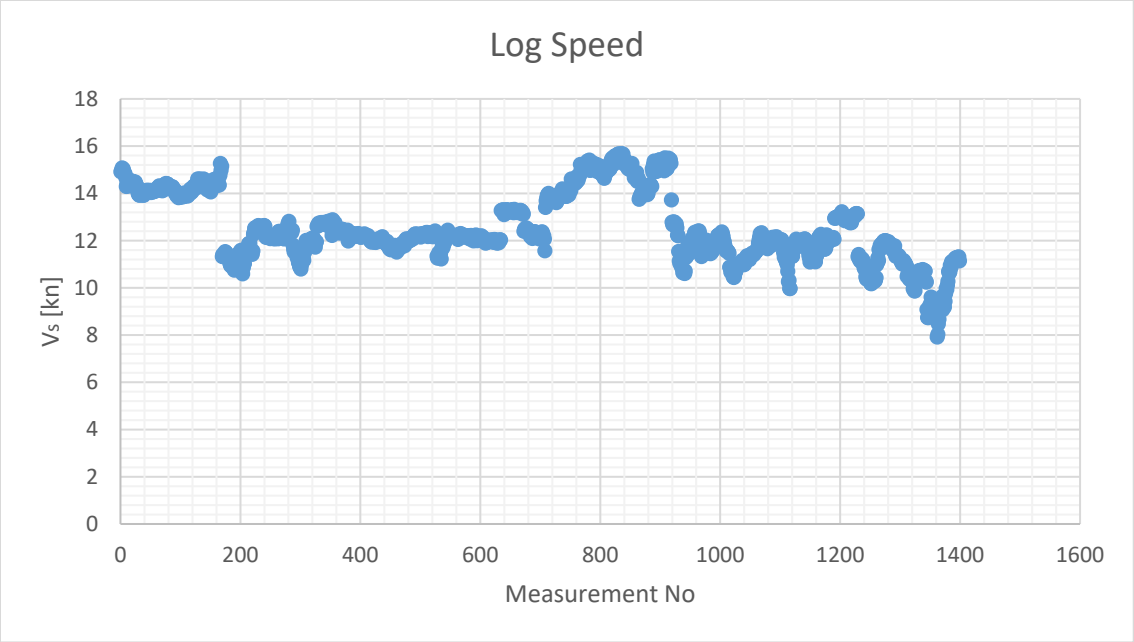
[170] Λαμβάνεται υπ' όψιν και ο ανεμογενής κυματισμός και το swell.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 11: ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΗ SPEED OVER GROUND (FL)

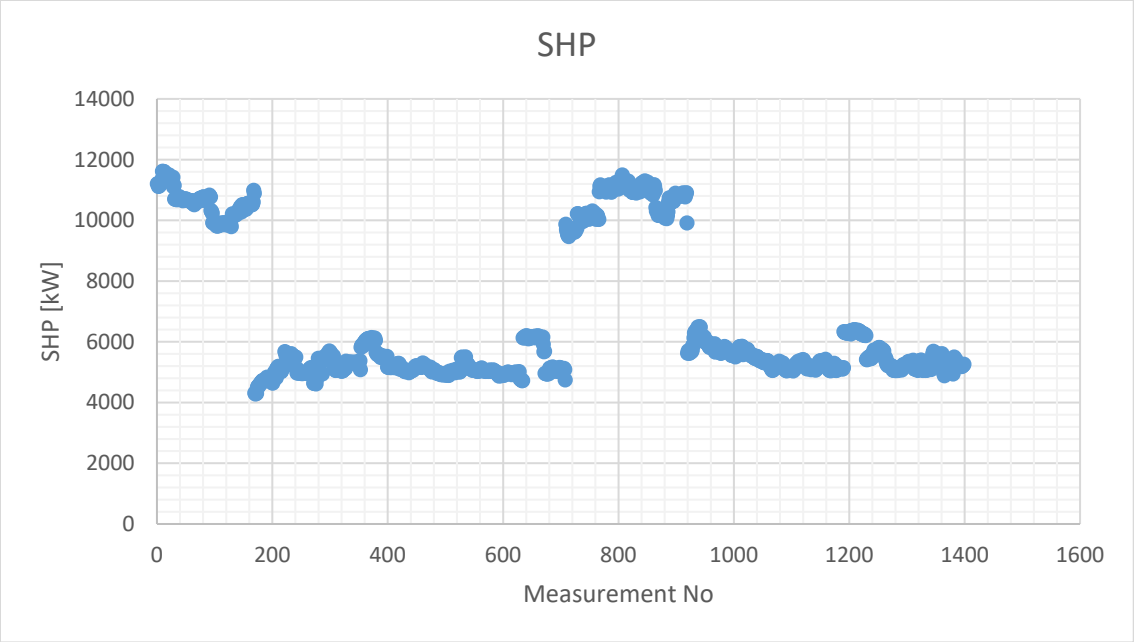


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 12: ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΗ SPEED OVER GROUND (BL)

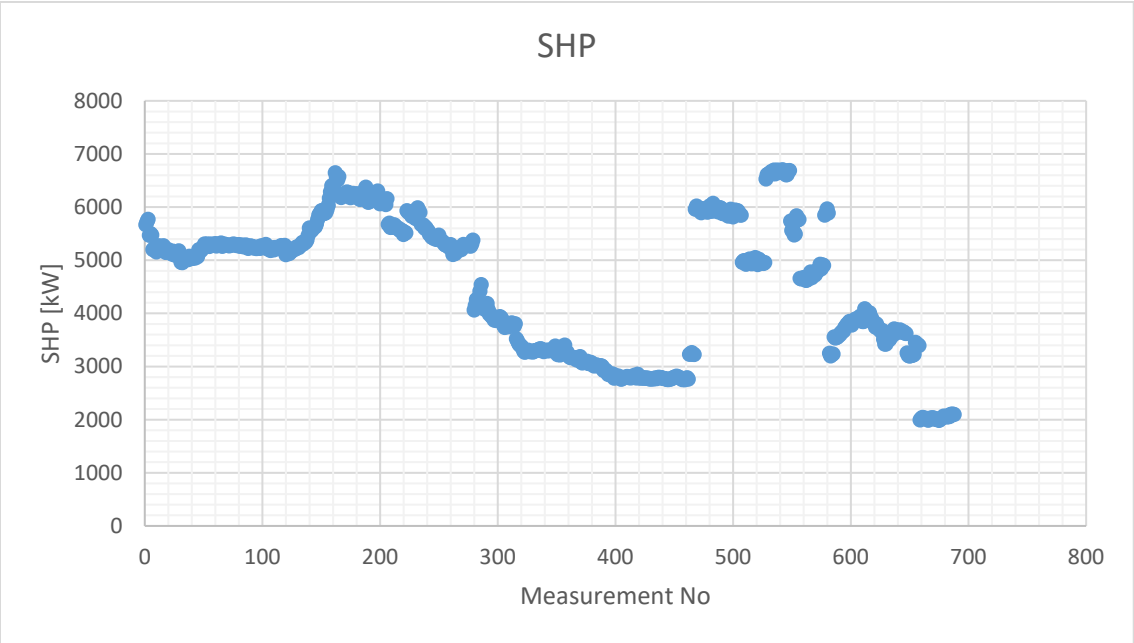


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 13: ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΗ LOG SPEED (FL)

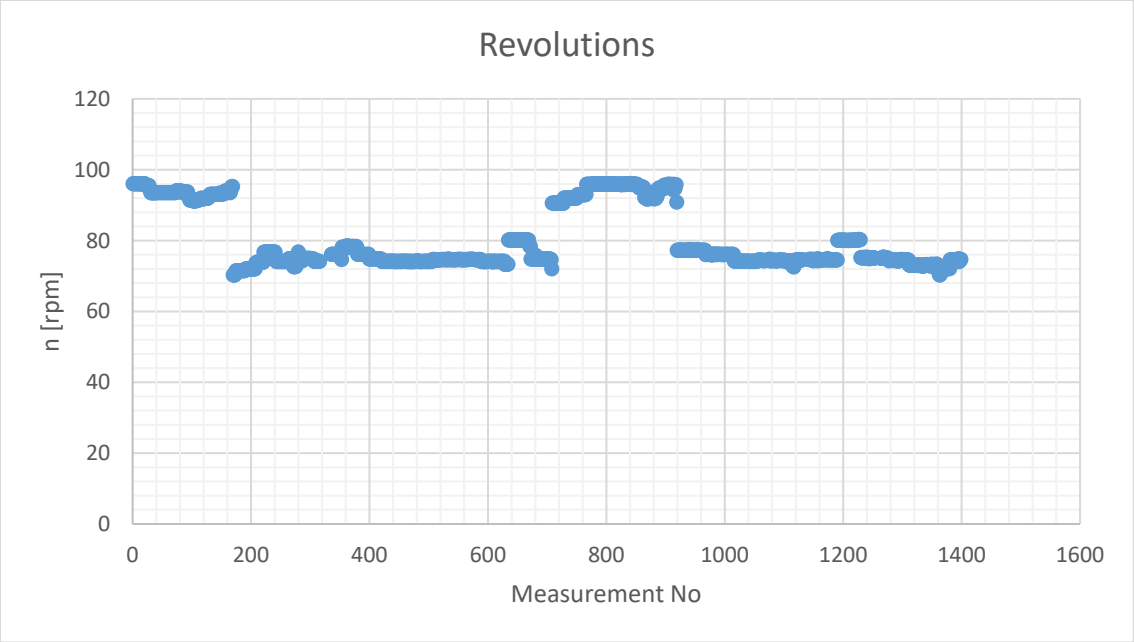
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 14: ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΗ LOG SPEED (BL)



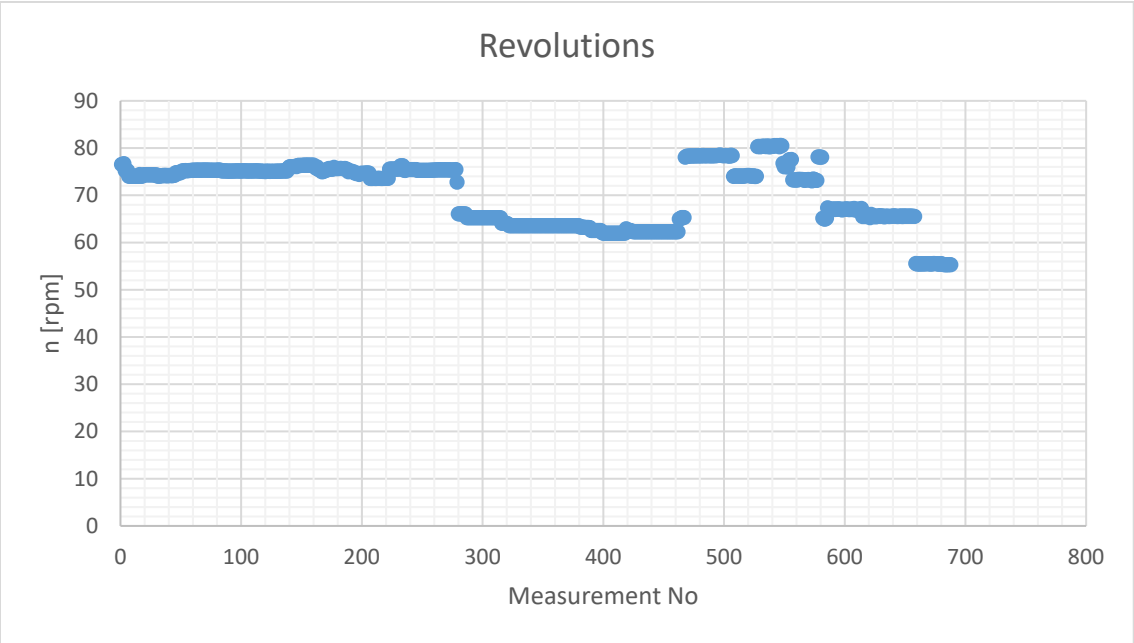
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 15: ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ ΑΞΟΝΑ (FL)



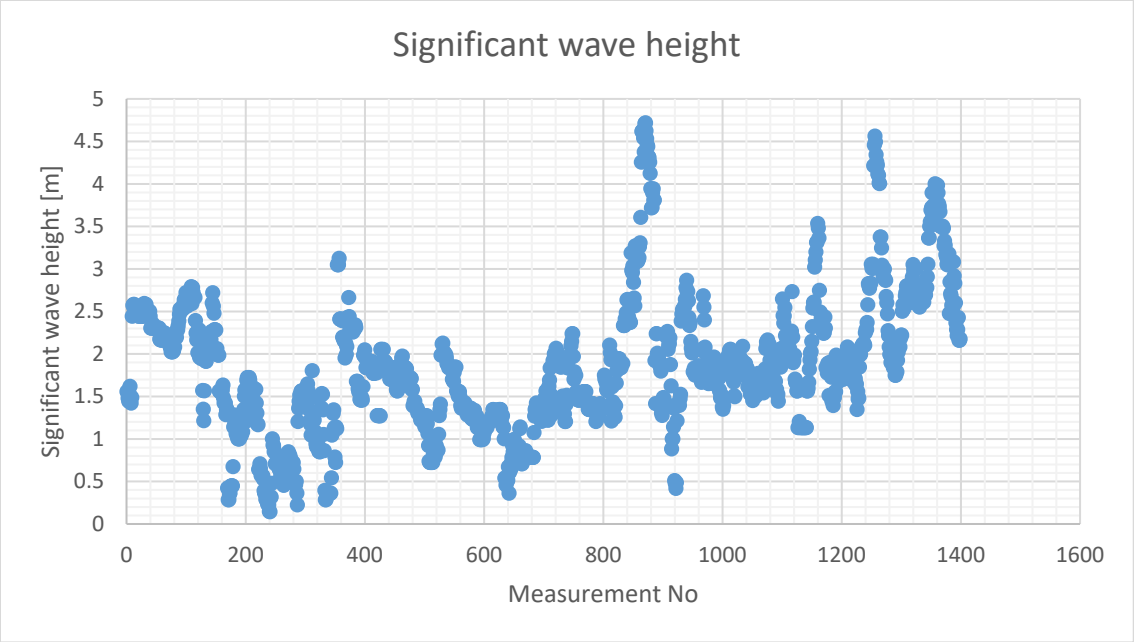
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 16: ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ ΑΞΟΝΑ (BL)



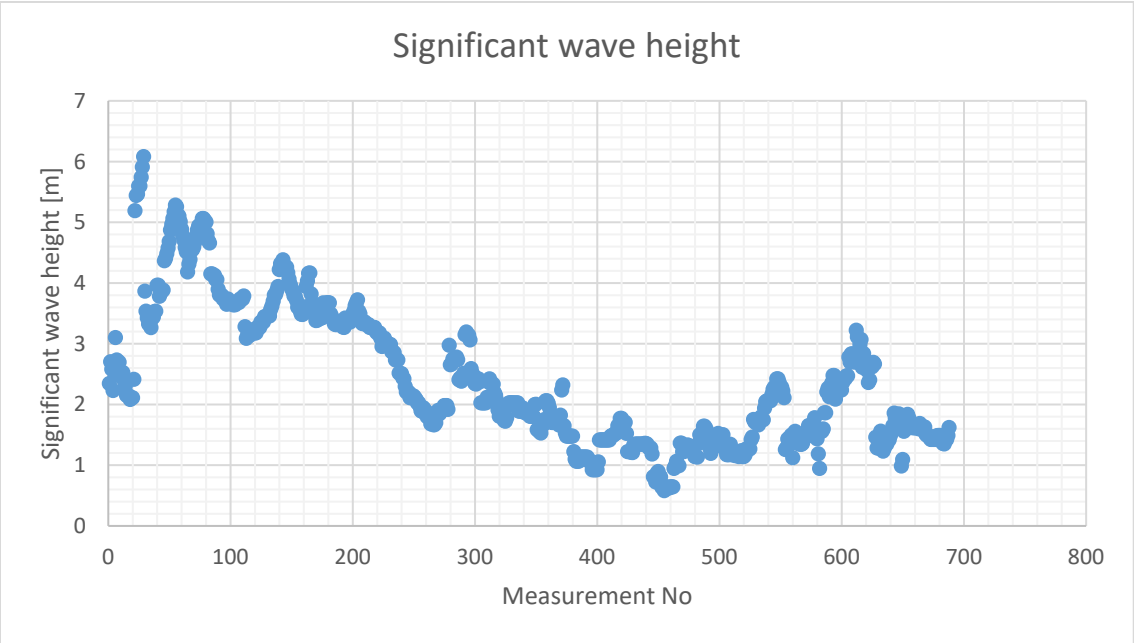
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 17: ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΕΣ ΣΤΡΟΦΕΣ (FL)



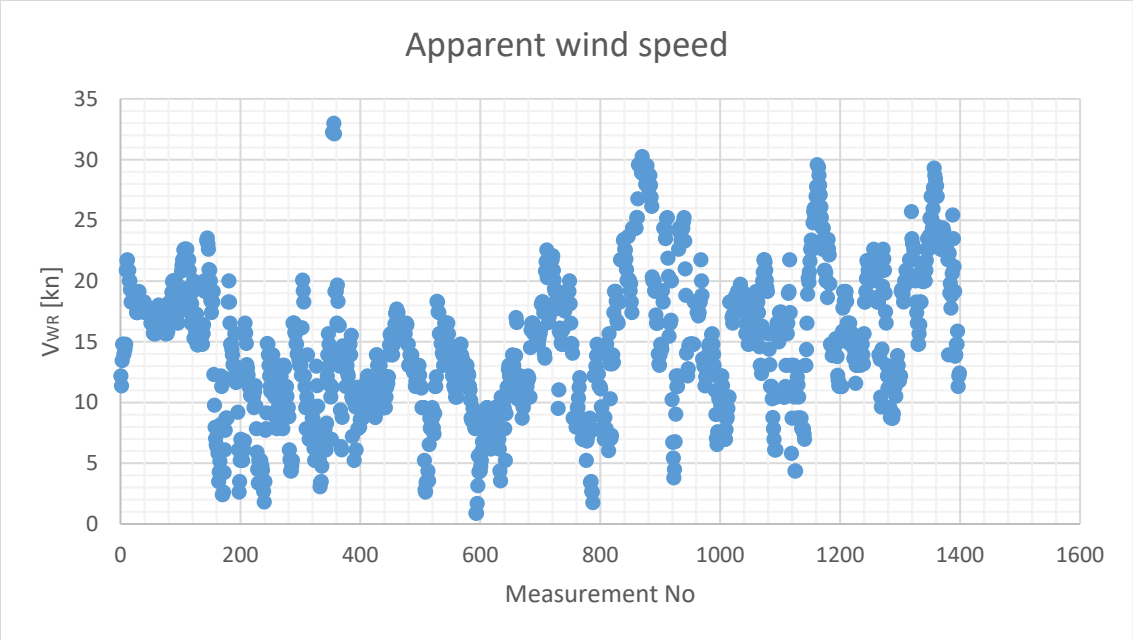
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 18: ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΕΣ ΣΤΡΟΦΕΣ (BL)



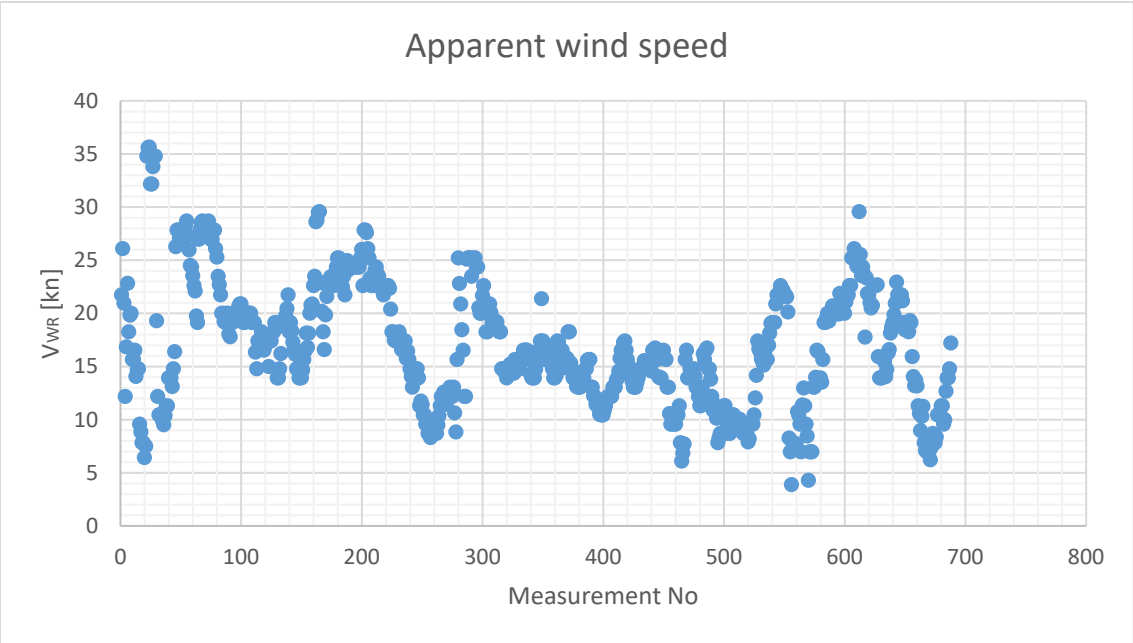
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 19: ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΟ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟ ΥΨΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ (FL)



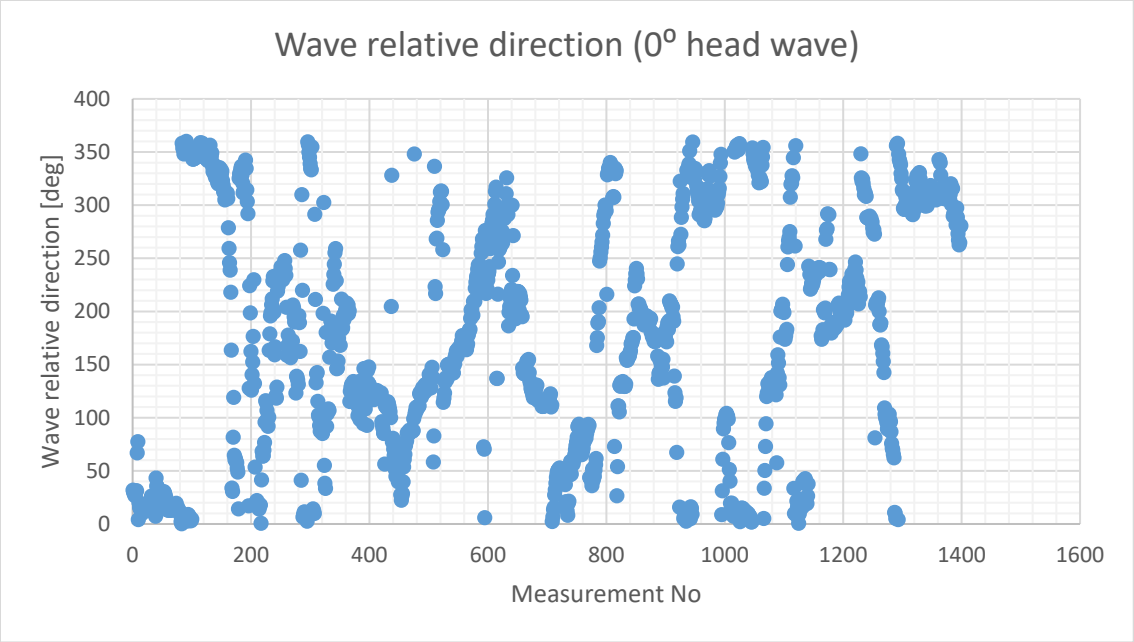
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 20: ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΟ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟ ΥΨΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ (BL)



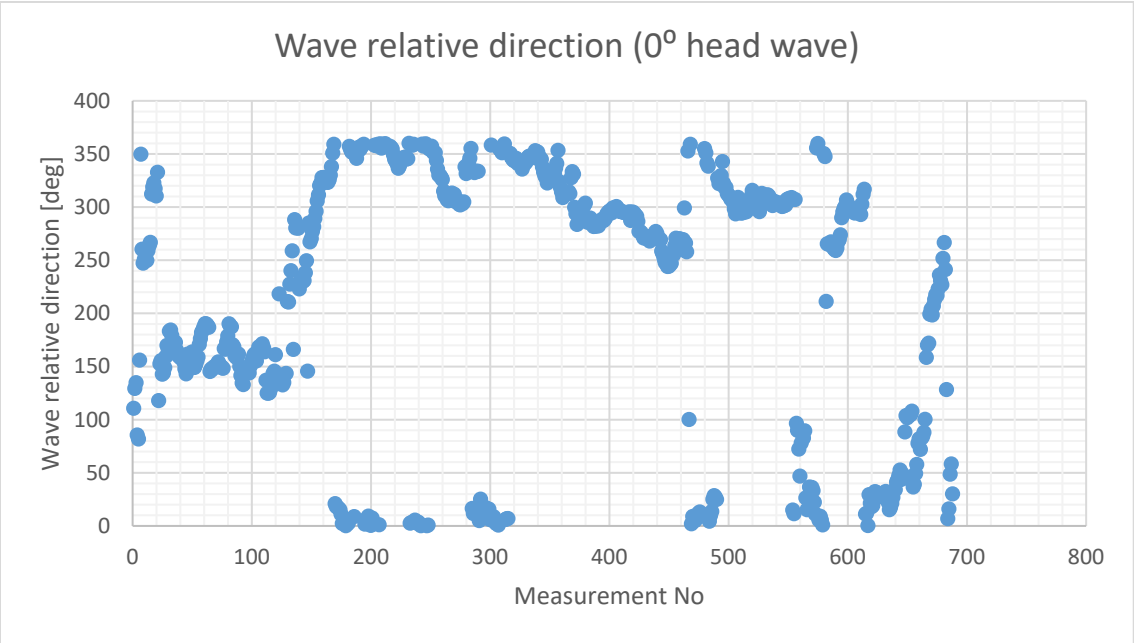
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 21: ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΕΜΟΥ (FL)



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 22: ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΕΜΟΥ (BL)



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 23: ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΗ ΣΧΕΤΙΚΗ ΓΩΝΙΑ ΚΥΜΑΤΟΣ (FL)



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 24: ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΗ ΣΧΕΤΙΚΗ ΓΩΝΙΑ ΚΥΜΑΤΟΣ (BL)

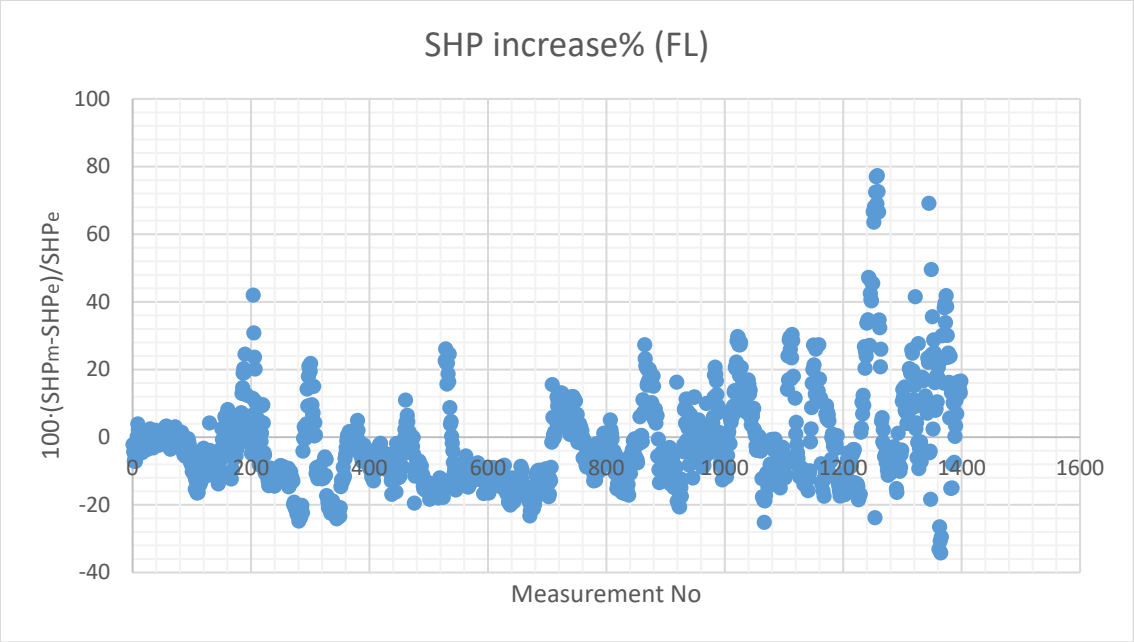
Παρατηρώντας τα παραπάνω διαγράμματα (βλ. **ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 11÷ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 24**) γίνεται σαφές ότι: Η ταχύτητα (over ground, μιας και βάσει αυτής προκύπτει η διανυόμενη απόσταση, καθώς λαμβάνει υπ' όψιν και τα ρεύματα) κυμαίνεται στην FL από 10.5-14kn, χωρίς να παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις, ενώ για μεμονωμένα σημεία φτάνει μέχρι 6kn και 15kn. Από την άλλη, στη BL, κυμαίνεται μεταξύ 8-12kn και μεμονωμένα φτάνει μέχρι 5.8kn και 12.7kn. Γενικώς, στη BL οι διακυμάνσεις είναι πιο έντονες σε σχέση με την FL, ειδικά μετά το 500° σημείο μέτρησης. Μάλιστα, αξίζει να σημειωθεί ότι γενικώς η

ταχύτητα είναι μικρότερη από την ταχύτητα υπηρεσίας (14.7kn), κάτι που μπορεί να οφείλεται σε απόφαση του πλοιάρχου προκειμένου να αυξηθεί η ενεργειακή αποδοτικότητα του πλοίου. Μπορεί, βέβαια, να οφείλεται και στην επίδραση των ρευμάτων. Ακόμη, ενδέχεται και να σχετίζεται με απαίτηση του ναυλωτή, την κατάσταση της γάστρας και της έλικας, την πραγματική κατάσταση της θάλασσας, αλλά και πολιτική της εταιρεία για just in time[171] παράδοση (στα πλαίσια ενεργειακής αποδοτικότητας). Παράλληλα, όσον αφορά τη μετρούμενη SHP γίνεται κατανοητό ότι: στην FL κυμαίνεται γύρω από 11000kW και από 5000 kW, κατ' αντιστοιχία με την ταχύτητα. Γενικώς, δεν παρουσιάζονται μεγάλες διακυμάνσεις, περί τα ±500kW, στη «χειρότερη». Από την άλλη, στη BL οι διακυμάνσεις ισχύος άξονα είναι μεγαλύτερες , ειδικά μετά το 500° σημείο μέτρησης. Αρχικά, στη BL η SHP κυμαίνεται γύρω στα 5300kW, μετά γύρω στα 2700kW, αλλά γενικώς οι πιο ακραίες τιμές είναι 2000kW και 6600kW. Γενικώς, εκεί που φαίνεται ότι μειώνεται η ταχύτητα λόγω καταστάσεων πλεύσης τροποποιείται ανάλογα και η ισχύς, προκειμένου μην υπάρξει εν γένει απώλεια ταχύτητας. Σε αυτό συνηγορεί και η διακύμανση των στροφών, που καθορίζεται από τα μέλη του πληρώματος. Έτσι, στην FL κυμαίνεται γενικώς γύρω από 73-77rpm με μικρέ διακυμάνσεις, αλλά και γύρω στις 93-95rpm με μικρές, επίσης, διακυμάνσεις. Ακόμη, στη BL οι στροφές κυμαίνονται γύρω στις 75rpm και αλλού γύρω στις 63rpm, χωρίς ιδιαίτερες διακυμάνσεις. Βέβαια, μετά το 500° σημείο μέτρησης παρατηρούνται αλλαγές στις στροφές, που συνδέονται με παρεμβάσεις του πληρώματος, λόγω αλλαγής κατάστασης πλεύσης.

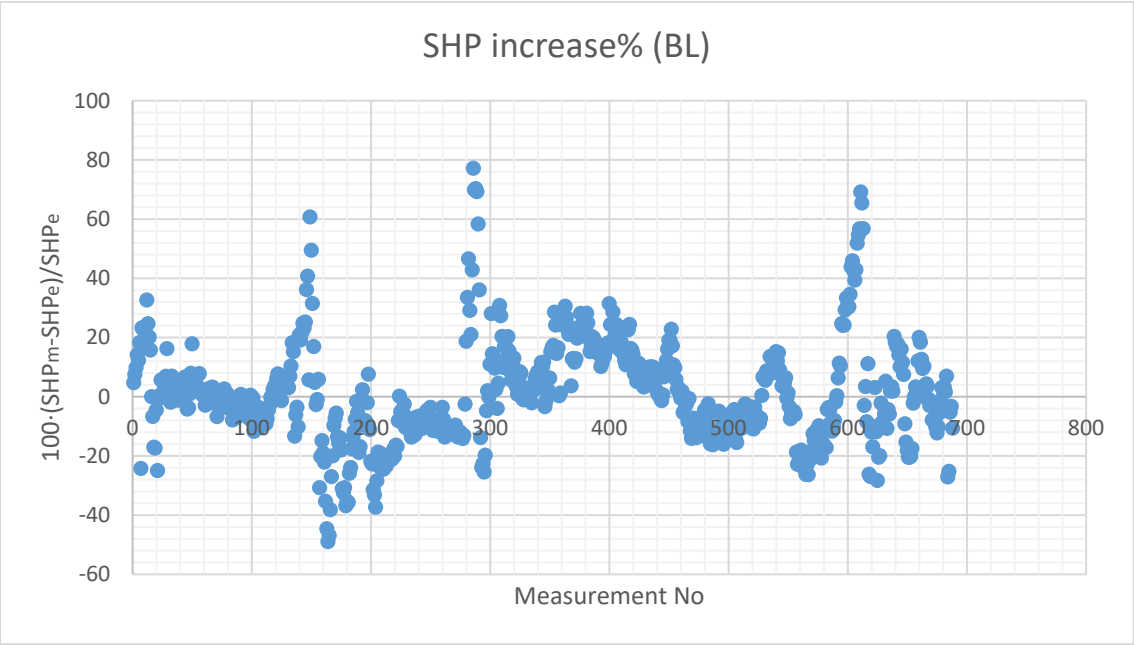
Ακόμη, βάσει των εν λόγω διαγραμμάτων γίνεται αντιληπτό ότι: Το μετρούμενο συνολικό σημαντικό ύψος κύματος κυμαίνεται μεταξύ 0.1m και 4.7m στην FL, με έξαρση στο 850° σημείο μέτρησης και μεταξύ 0.5-6.1m στη BL. Γίνεται, λοιπόν, σαφές ότι συναντά ένα ευρύ φάσμα σημαντικών υψών κυμάτων το πλοίο κατά την χρονική περίοδο που αφορούν τα εν λόγω operational data. Επιπροσθέτως, όσον αφορά τη σχετική γωνία των κυματισμών (0° μετωπικός κυματισμός), για την FL αυτή καλύπτει όλο το φάσμα των γωνιών, ενώ στη BL είναι κυρίως μετωπικοί, οι οποίοι είναι και οι πιο δυσμενείς. Τέλος, όσον αφορά την φαινόμενη ταχύτητα του ανέμου, αυτή κυμαίνεται μεταξύ 0.85-33kn στην FL, και 3.8-35.7kn στη BL, κάτι που σημαίνει ότι το πλοίο συναντά πολλές διαφορετικές καταστάσεις της κλίμακας Bft.

Παρακάτω, παρατίθενται διαγράμματα, που προέκυψαν έπειτα από υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν, βάσει των προαναφερθεισών διαδικασιών. Τα εν λόγω διαγράμματα σχετίζονται με την απόκλιση ισχύος άξονα (δεδομένης ταχύτητας), ταχύτητας (δεδομένης ισχύος), στροφών (δεδομένης ταχύτητας), μεταξύ αναμενόμενης και μετρούμενης τιμής[172].

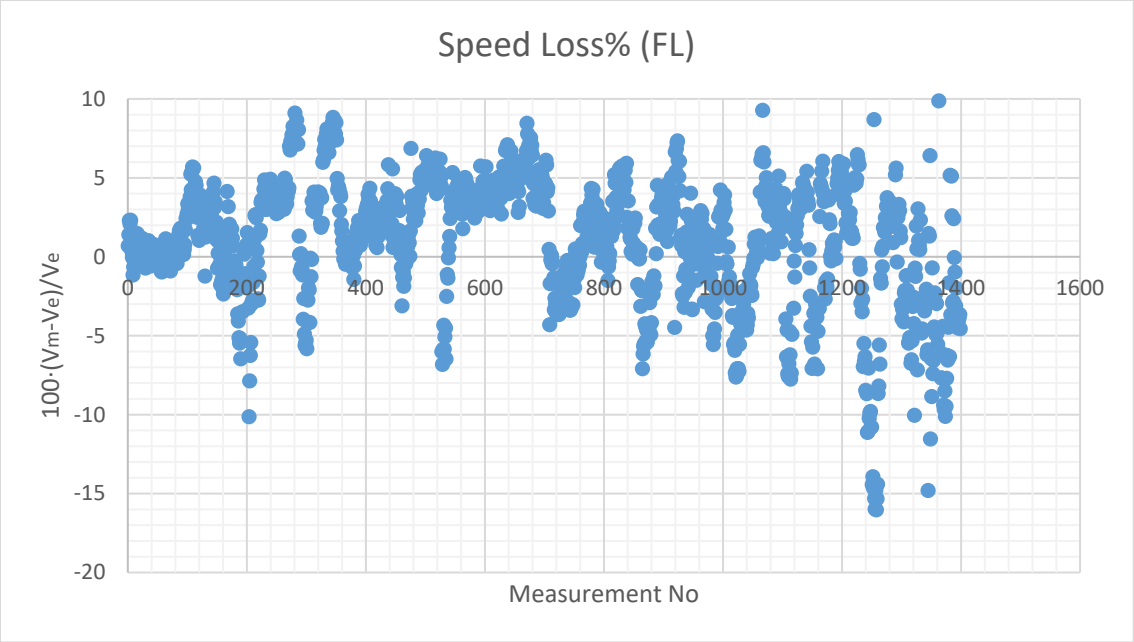
[171] Κάτι που μπορεί να σχετίζεται και με το είδος του μεταφερόμενου φορτίου στην FL.
[172] Καθαρά λογιστικού περιεχομένου.



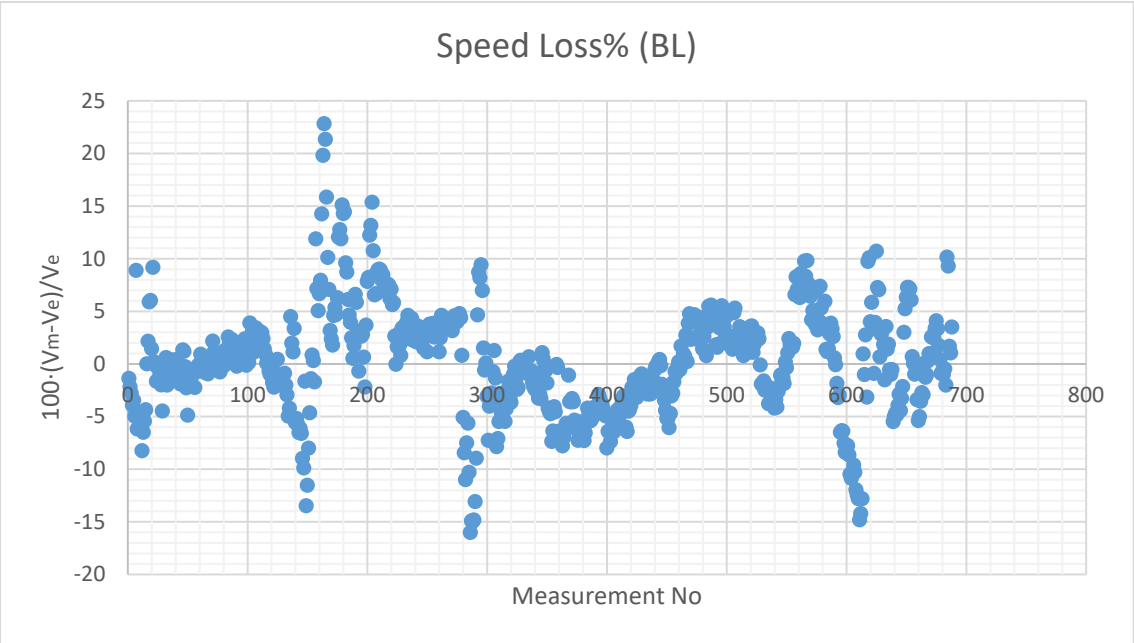
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 25: ΕΠΙ ΤΟΙΣ ΕΚΑΤΟ ΔΙΑΦΟΡΑ ΜΕΤΑΞΥ ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΜΕΝΟΜΕΝΗΣ SHP (FL)



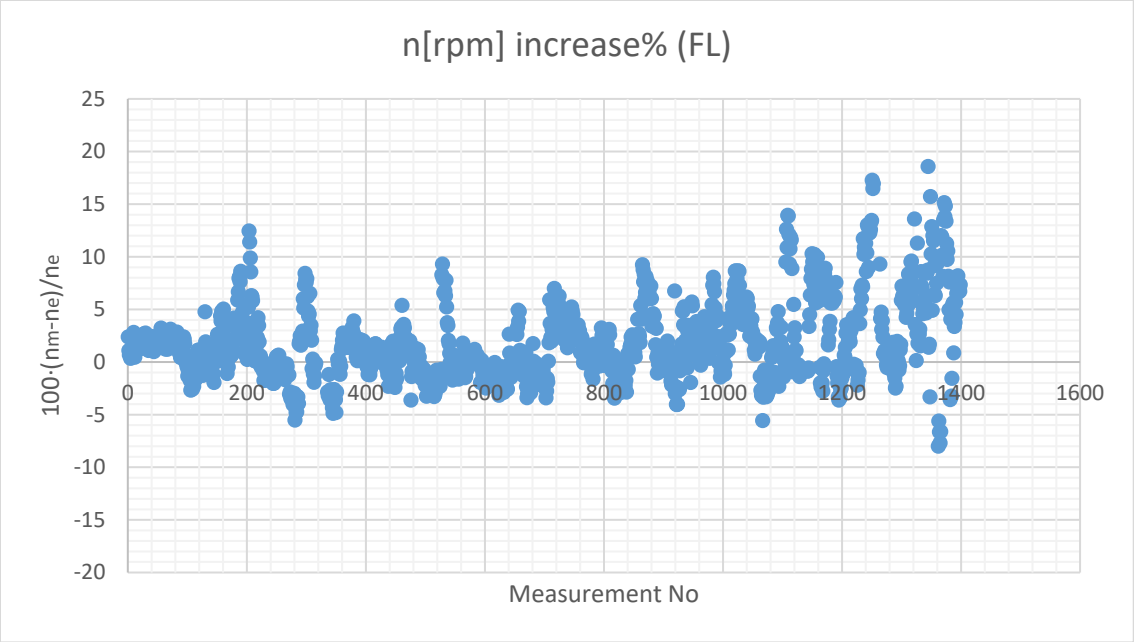
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 26: ΕΠΙ ΤΟΙΣ ΕΚΑΤΟ ΔΙΑΦΟΡΑ ΜΕΤΑΞΥ ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΜΕΝΟΜΕΝΗΣ SHP (BL)



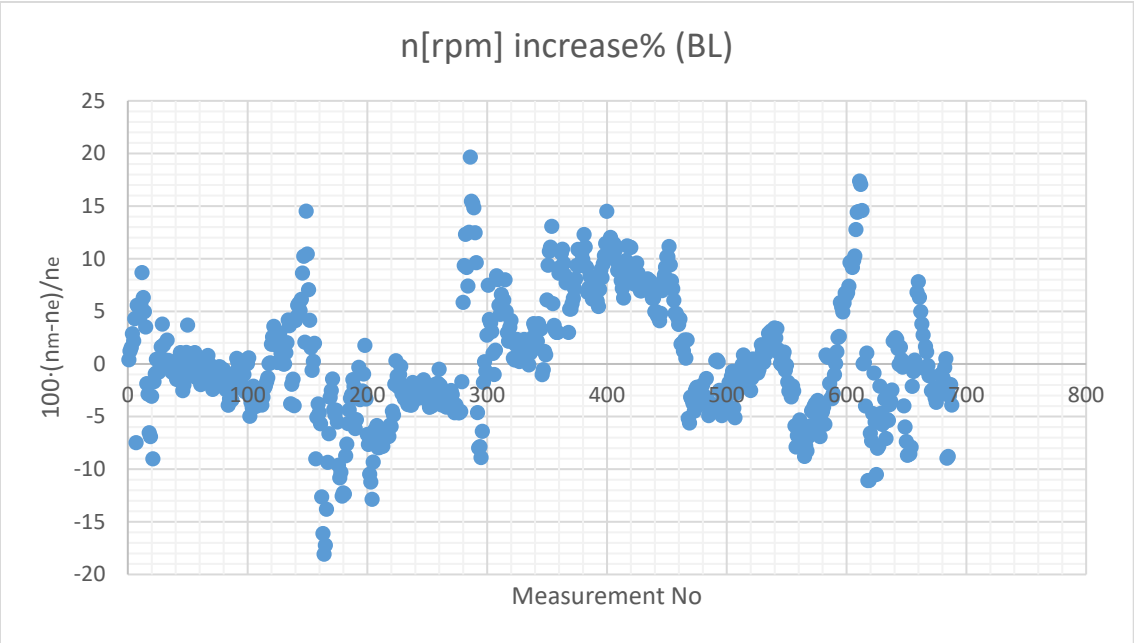
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 27: ΕΠΙ ΤΟΙΣ ΕΚΑΤΟ ΔΙΑΦΟΡΑ ΜΕΤΑΞΥ ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΜΕΝΟΜΕΝΗΣ V (FL)



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 28: ΕΠΙ ΤΟΙΣ ΕΚΑΤΟ ΔΙΑΦΟΡΑ ΜΕΤΑΞΥ ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΜΕΝΟΜΕΝΗΣ V (BL)



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 29: ΕΠΙ ΤΟΙΣ ΕΚΑΤΟ ΔΙΑΦΟΡΑ ΜΕΤΑΞΥ ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΜΕΝΟΜΕΝΩΝ n (FL)



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 30: ΕΠΙ ΤΟΙΣ ΕΚΑΤΟ ΔΙΑΦΟΡΑ ΜΕΤΑΞΥ ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΜΕΝΟΜΕΝΩΝ n (BL)

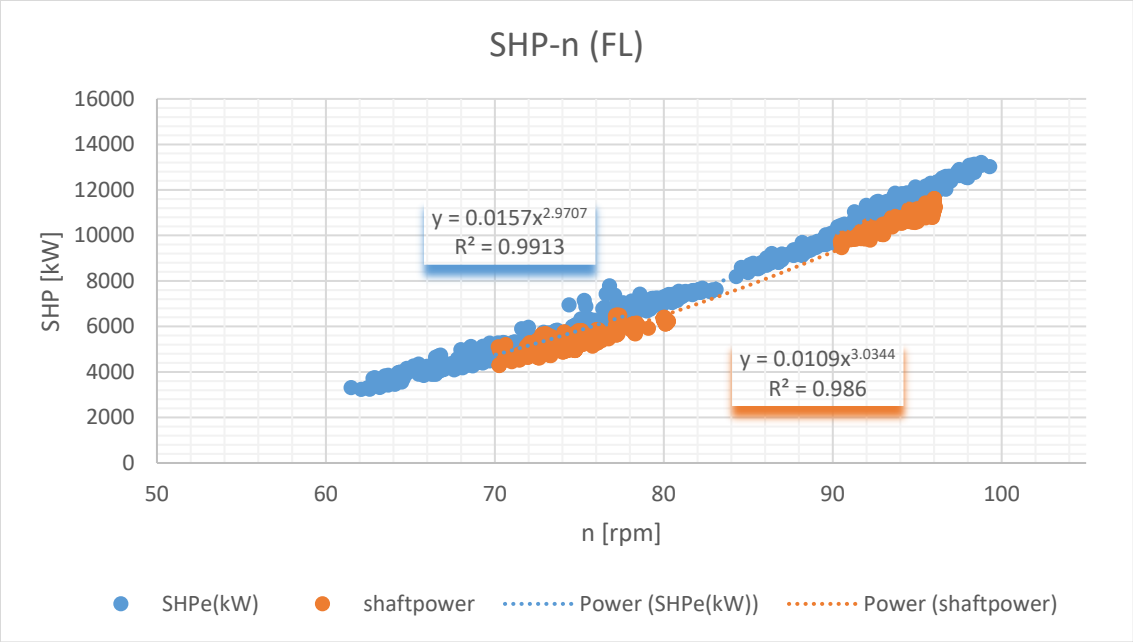
Βάσει των ανωτέρω διαγραμμάτων άγεται ότι: Η απόκλιση μεταξύ ισχύων άξονα[173] αναμενόμενης και μετρούμενης τιμής ($100(P_m-P_{est})/P_{est}$), στην FL γενικώς κυμαίνεται μεταξύ ±20% και μεμονωμένα από -35

[173] Δεδομένης ταχύτητας.

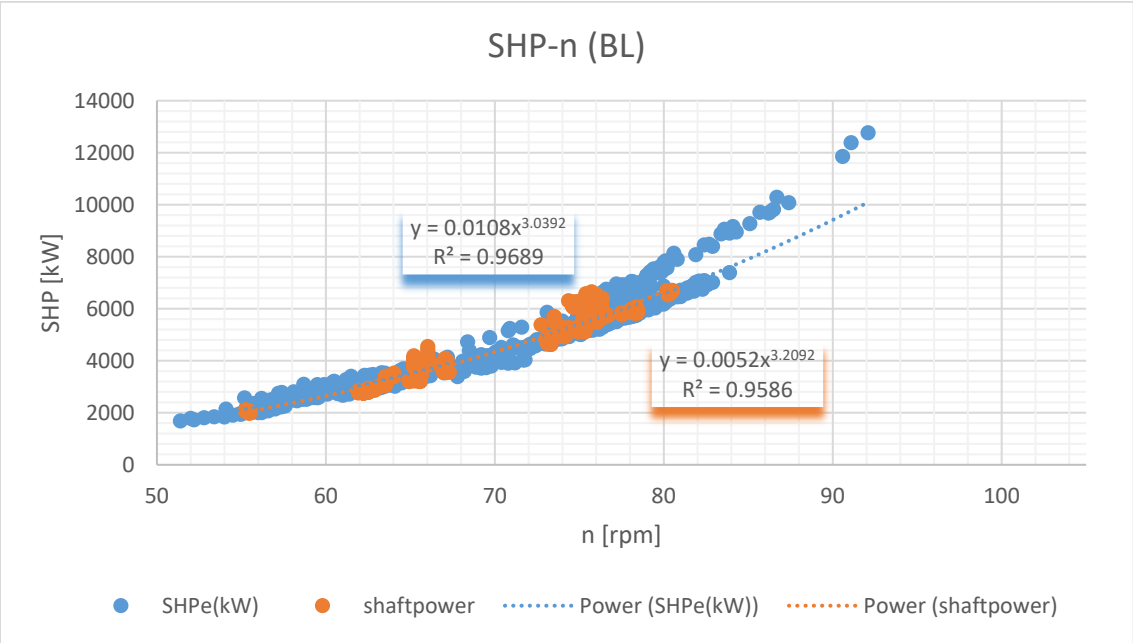
÷80%, ενώ στη BL γενικώς κυμαίνεται μεταξύ ±30% και μεμονωμένα από -50 ÷80%, με τις διακυμάνσεις να είναι πολύ πιο έντονες σε σχέση με την FL. Ακόμη, η απόκλιση των ταχυτήτων[174] (αναμενόμενης και μετρούμενης, $(100(V_m-V_{est})/V_{est})$), στην FL γενικώς κυμαίνεται μεταξύ ±7% και μεμονωμένα από -15 ÷10%, ενώ στη BL γενικώς κυμαίνεται μεταξύ ±10% και μεμονωμένα από -15 ÷20%, με τις διακυμάνσεις να είναι πολύ πιο έντονες σε σχέση με την FL. Επίσης, η απόκλιση των στροφών (αναμενόμενης και μετρούμενης, $(100(n_m-n_{est})/n_{est})$), στην FL γενικώς κυμαίνεται μεταξύ -4÷10% και μεμονωμένα από -8 ÷18%, ενώ στη BL γενικώς κυμαίνεται μεταξύ ±10% και μεμονωμένα από -18 ÷20%, με τις διακυμάνσεις να είναι πολύ πιο έντονες σε σχέση με την FL. Επισημαίνεται ότι οι ακραίες τιμές των αποκλίσεων (ισχύος, ταχύτητας, στροφών) εμφανίζονται στην FL κυρίως μετά το 1200° σημείο μέτρησης και λίγο γύρω από το 200°, ενώ στη BL κυρίως γύρω από τα εξής σημεία μέτρησης: 150°, 300°, 600°.

Ακόμη, παρατίθενται διαγράμματα των SHP-n για την FL και τη BL. Πραγματοποιείται σύγκριση των αναμενόμενων (SHP_e,n_e) και των μετρούμενων (shaftpower[175], n_m) ζευγών.

[174] Δεδομένης ισχύος.
[175] shaftpower= SHP_m.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 31: ΑΝΑΜΕΝΟΜΕΝΕΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ SHP-n (FL)



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 32: ΑΝΑΜΕΝΟΜΕΝΕΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ SHP-n (BL)

Σημειώνεται ότι οι γραμμές τάσεις που παρατίθενται στα ανωτέρω διαγράμματα δεν έχουν νόημα δεδομένου ότι τα διάφορα ζεύγη SHP-n αναφέρονται σε πολλές διαφορετικές καταστάσεις θάλασσας, αποθάλασσας, ανέμου, ίσως και ρύπανσης (αλλά και φόρτωσης, λόγω μεταβολής (όχι σημαντικής) βυθισμάτων). Παρόλα αυτά παρατίθενται προκειμένου να παρουσιαστεί μια μέση κατάσταση και να τονιστεί ότι κατά προσέγγιση ισχύει ο κυβικός νόμος της έλικας. Μάλιστα, η μεγάλη τιμή του R^2 (κοντά στο 1) δείχνει ότι σημαντικό μέρος των δεδομένων επεξηγείται από τη γραμμή τάσης. Η όποια παρέκκλιση σχετίζεται με μεμονωμένα σημεία.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία βασίζεται σε online operational data με συχνότητα μέτρησης ανά 1h. Σε αντίθεση με ημερήσιες καταγραφές (noon reports) ο εν λόγω τρόπος καταγραφής των δεδομένων είναι πιο αξιόπιστος, δεδομένου ότι βασίζεται σε σύγχρονου τύπου μετρητικά όργανα, αλλά και λόγω του ότι δεν παρεμβάλλεται ανθρώπινη καταγραφή, που ενδεχομένως να αυξάνει την αβεβαιότητα. Μάλιστα, δύναται να πραγματοποιηθεί αναλυτικότερη μελέτη των στοιχείων και η εξαγωγή πιο ορθών συμπερασμάτων, αλλά και να πραγματοποιηθούν οι υπολογισμοί των παραπάνω μεγεθών με μεγαλύτερη ακρίβεια. Αξίζει, βέβαια, να σημειωθεί ότι το υπό ανάλυση πλοίο στην παρούσα εργασία είναι τύπου bulk carrier και κατά κοινή ομολογία εκπροσώπων της διαχειρίστριας εταιρείας δεν διαθέτει τόσο καλά συστήματα-όργανα μέτρησης όσο ένα αντίστοιχο tanker, κάτι που καθιστά λιγότερο αξιόπιστες τις μετρήσεις.

Επισημαίνεται ότι οι όποιες αποκλίσεις, αλλά και τα όποια σφάλματα ενδέχεται να προέρχονται από πολλές διαφορετικές πηγές. Πιο συγκεκριμένα:

- Μπορεί να συνδέονται με τις μετρούμενες παραμέτρους, που κατά την κρίση της διαχειρίστριας εταιρείας αυτές είναι που επηρεάζουν την απόδοση του πλοίου, ίσως και με τον τρόπο μέτρησής τους. Ειδικότερα, πάγια τακτική της διαχειρίστριας εταιρείας είναι να μη λαμβάνει δεδομένα για τη διαγωγή, το εκτόπισμα, παρά μόνο για το μέσο βύθισμα. Επισημαίνεται, μάλιστα, ότι τα βυθίσματα που δίνονται στα operational data του παρόντος πλοίου αποτελούν μέση τιμή (κάτι σαν να προέρχονται από noon reports), χωρίς να φαίνονται οι ωριαίες διακυμάνσεις. Ακόμη, το σημαντικό ύψος κύματος προκύπτει από ocean reports, σαν συνολική τιμή για την περιοχή στην οποία πλέει το πλοίο, λαμβάνοντας υπ' όψιν τόσο την θάλασσα (ανεμογενή κυματισμό), όσο και το swell (αποθάλασσα). Εάν υπήρχε μέτρηση του σημαντικού ύψους του ανεμογενούς κυματισμού και της αποθάλασσας ξεχωριστά, τότε το συνολικό θα προέκυπτε σαν ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων. Εδώ κάτι τέτοιο δεν το γνωρίζουμε. Επιπλέον, δεν υπάρχει μέτρηση της σχετικής γωνίας του ανέμου, η οποία αναγκαστικά λαμβάνεται ίση με του συνολικού κυματισμού, στην παρούσα εργασία. Μάλιστα, στη BL όπου τις περισσότερες στιγμές που είναι εν πλω το πλοίο κατά την περίοδο των μετρήσεων, συναντά μετωπικούς ανέμους, που είναι και οι δυσμενέστεροι. Για αυτό το λόγο ενδεχομένως οι αποκλίσεις στην ερματισμένη κατάσταση να είναι πιο έντονες. Ακόμη, δεν υπάρχουν μετρήσεις της πορείας του πλοίου, που χρειάζεται για την εκτίμηση της αντίστασης του ανέμου ανά data point. Θεωρήθηκε σταθερή, ελλείψει άλλων στοιχείων. Αυτό, όμως, δεν επηρεάζει τόσο τα αποτελέσματα. Επιπροσθέτως, δεν υπάρχουν μετρήσεις του βάθους, της θερμοκρασίας του νερού, του αέρα, που επηρεάζουν, ως φαίνεται και παραπάνω τα αποτελέσματα.
- Ενδέχεται να συνδέονται με τη διαδικασία που ακολουθήθηκε προκειμένου να γίνουν οι όποιοι υπολογισμοί. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα FRANK για την εκτίμηση της πρόσθετης αντίστασης κυματισμού. Προκειμένου να πραγματοποιηθούν οι υπολογισμοί για irregular κυματισμούς, που αυτό είναι το ζητούμενο, έπρεπε να εισαχθεί σαν input στο πρόγραμμα ένα εύρος modal periods. Δεδομένου ότι δεν υπήρχαν αντίστοιχες μετρήσεις, βασιστήκαμε στη σχέση που άγεται από τη συνάρτηση φασματικής πυκνότητας Pierson-Moskowitz[176] για πλήρως αναπτυγμένες καταστάσεις θάλασσας. Αυτό, βέβαια, αυξάνει κατά πολύ την αβεβαιότητα, λόγω του ότι η εν λόγω σχέση αφορά ανεμογενείς κυματισμούς και μάλιστα πλήρως αναπτυγμένους και βασίζεται στην τιμή του σημαντικού ύψους κύματος, που στα operational data περιλαμβάνει και το swell, χωρίς να γνωρίζουμε σε τι βαθμό. Ακόμη, εκ

[176] Ίσως και γενικώς η χρήση της συνάρτησης φασματικής πυκνότητας των Pierson-Moskowitz να αυξάνει την αβεβαιότητα.

φύσεως το εν λόγω πρόγραμμα δεν υπολογίζει την περίθλαση, που για μικρά σχετικά μήκη κύματος (λ/L_{pp}<0.5) αποτελεί τη βασική συνιστώσα της πρόσθετης αντίστασης κυματισμού. Λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι ένα σημαντικό ποσοστό των λ/L_{pp} που προκύπτουν βάσει των προαναφερθέντων modal periods (για βαθύ νερό) είναι μικρότερο του 0.5 και σίγουρα μικρότερο του 1, καθίσταται η ύπαρξη αβεβαιότητας σημαντική. Ειδικά, στην περίπτωση μετωπικών κυματισμών (δυσμενέστεροι), όπως συμβαίνει σε μεγάλο βαθμό στη BL. Βέβαια, έπειτα και από πρόταση του επιβλέποντα καθηγητή, προκειμένου να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα που το FRANK δε λαμβάνει υπ' όψιν την περίθλαση, δύναται, όπως και έγινε, για μικρότερα λ/L_{pp} του 0.5 να θεωρηθεί ότι η καμπύλη που άγεται από το FRANK, δε μηδενίζεται αλλά κάπως σταθεροποιείται (συναρτήσει Fr, C_B), κάτι που είναι και πρόταση της ITTC (βλ. ISO15016). Επίσης, μια παράμετρος που επηρεάζει τα αποτελέσματα είναι το γεγονός ότι το FRANK πραγματοποιεί υπολογισμούς για μονοκατευθυντικούς κυματισμούς. Επιπροσθέτως, προκειμένου να υπολογιστούν τα k_T, k_Q, η_0 για κάθε data point, βασιστήκαμε στην επιλογή της έλικας σειράς Wageningen-B, όπως έχει αναλυθεί ενδελεχώς παραπάνω στην παρούσα έκθεση. Αυτό σε συνδυασμό με την επιλογή των συντελεστών αλληλεπίδρασης (w,t,η_R) αυξάνει περισσότερο την αβεβαιότητα, δεδομένου ότι βάσει αυτών προκύπτει η αναγωγή της αντίστασης ρυμούλκησης σε αντίσταση πρόωσης για κάθε data point. Αξίζει, βέβαια να γίνει αναφορά και στο γεγονός ότι ο υπολογισμός της αντίστασης ρυμούλκησης για ήρεμο νερό και χωρίς άνεμο έχει πραγματοποιηθεί με βάση το πρόγραμμα Swan 2, ελλείψει στοιχείων για model tests. Όπως, όμως, έχει ήδη αναλυθεί στην παρούσα έκθεση η εν λόγω διαδικασία έχει κριθεί αξιόπιστη, ειδικά για ταχύτητες μικρότερες της ταχύτητας υπηρεσίας και ειδικά για heavy ballast condition. Ακόμη, το ότι το Swan 2 δε λαμβάνει υπ' όψιν τη συνεκτικότητα, για χαμηλούς αριθμούς Fr (<0.15) αυτό δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα.

- Ενδέχεται οι επιλεχθείσες καταστάσεις φόρτωσης να αυξάνουν περεταίρω την αβεβαιότητα. Όπως έχει ήδη αναλυθεί για τους υπολογισμούς θεωρήθηκαν δυο καταστάσεις φόρτωσης, μια FL και μια BL. Τα operational data αναφέρονται σε διάφορα βυθίσματα. Για απλούστερη μελέτη οι υπολογισμοί ανά βύθισμα είχαν ως βάση αναφοράς αυτό της πλησιέστερης από τις επιλεχθείσες καταστάσεις. Προκειμένου, όμως να γίνει αναγωγή στο μετρούμενο βύθισμα, χρησιμοποιήθηκε ο συντελεστής ναυαρχείου (CAD). Δεδομένου ότι δεν υπήρχαν στοιχεία μέτρησης της διαγωγής, αυτή αγνοήθηκε. Ως εκ τούτου, το ποσοστό αβεβαιότητας των υπολογισμών αυξάνεται ακόμη περισσότερο. Λαμβάνοντας, υπ' όψιν ότι η επιλεχθείσα BL παρουσιάζει μεγαλύτερη απόκλιση (εκτοπισμάτων) από τις πραγματικές ερματισμένες καταστάσεις, στην εν λόγω κατάσταση φόρτωσης αναμενόταν μεγαλύτερη απόκλιση (ή και διακυμάνσεις) σε σχέση με την FL. Ακόμη, στα operational data, όπως έχει ήδη αναφερθεί δεν περιλαμβάνονται μετρήσεις της διαγωγής. Γενικώς, οι έμφορτες καταστάσεις «πλησιάζουν» την ισοβύθιστη, σε αντίθεση με τις ερματισμένες που παρουσιάζουν διακυμάνσεις της διαγωγής, με αποτέλεσμα δεδομένου του μέσου βυθίσματος να ενδέχεται να είναι αρκετά διαφορετικό το εκτόπισμα. Ως εκ τούτου, μπορεί η μεγαλύτερη απόκλιση στη BL σε σχέση με την FL να οφείλεται σε αυτό το γεγονός.
- Με καταναλώσεις ανά data point θα υπήρχε πληρέστερη εικόνα, τόσο για την αποδοτικότητα του πλοίου, όσο και με την κατάσταση της κύριας μηχανής. Παρόλα αυτά δεν διατέθηκαν. Μάλιστα, λόγω αυτού του γεγονότος δεν υπήρχε η δυνατότητα να υπολογιστούν οι EEOI, CII, λειτουργικοί δείκτες που θα ήταν πιο κατατοπιστικοί.

Αξίζει να αναφερθεί ότι αν διατίθενταν επαρκή αποτελέσματα σε ήρεμο νερό (χωρίς άνεμο) για σημαντικό χρονικό διάστημα, οπότε δεν υπάρχουν πρόσθετες αντιστάσεις, θα μπορούσαν να αχθούν συμπεράσματα για την αύξηση της κατανάλωσης καυσίμου, λόγω ρύπανσης της γάστρας και της έλικας,

να προσδιοριστεί το «ποσοστό» ρύπανσης, άρα και να ληφθούν οι κατάλληλες αποφάσεις και να γίνει ο κατάλληλος προγραμματισμός.

Γίνεται σαφές ότι όλα τα στοιχεία που περιέχονται στη συγκεκριμένη ανάλυση απαιτούν συνεχή παρακολούθηση, καθώς και παρουσίαση προκειμένου να γίνεται αξιολόγηση των επιδόσεων του πλοίου σε τακτική βάση. Σε ενδεχόμενη μελλοντική έρευνα θα πρέπει να δοθεί περαιτέρω έμφαση στην ακρίβεια των μετρήσεων όλων των παραμέτρων που επηρεάζουν την απόδοση. Καλό είναι να γίνονται μετρήσεις και της διαγωγής, αλλά και να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στο σημαντικό ύψος κύματος. Ειδικότερα, τα ocean reports αυξάνουν την αβεβαιότητα. Ακόμη, αν κατά τον υπολογισμό του συνολικού σημαντικού ύψους κύματος ληφθεί το διανυσματικό άθροισμα των $H_{1/3}$ του ανεμογενούς κυματισμούς και της αποθάλασσας, και όχι η ενεργειακή μελέτη, τότε αυξάνεται κατά πολύ το σφάλμα ειδικά στους μετωπικούς κυματισμούς. Επιπλέον, ο προσδιορισμός της σχετικής γωνίας του ανέμου με το ανεμόμετρο είναι σημαντικός, καθώς δεν μπορεί να λαμβάνεται ίδια με τη γωνία του συνολικού κυματισμού, καθώς αν η τελευταία τυχαίνει να είναι μετωπική και η γωνία του ανέμου όχι, τότε υπάρχει πιθανότητα υπερεκτίμησης της αντίστασης του ανέμου, ενώ αν χάνεται ο μετωπικός άνεμος τότε υπάρχει πιθανότητα υποεκτίμηση αυτής. Παράλληλα, η καταγραφή και μελέτη δεδομένων για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα, όπως τέσσερα με πέντε χρόνια θα συμβάλλει σημαντικά στην καλύτερη κατανόηση της απόδοσης του πλοίου και ακόμα θα επιτρέψει πιθανή πρόβλεψη της εξέλιξης της ενεργειακής απόδοσής του. Καθ’ αυτόν τον τρόπο και σε συνδυασμό με την απαίτηση από τον IMO από το τέλος του ημερολογιακού έτους του 2023 στο SEEMP να περιλαμβάνεται ο υπολογισμός του δείκτη CII (που χρόνο με το χρόνο θα γίνονται πιο αυστηρά τα όριά του), και η κατηγοριοποίηση του πλοίου σε επίπεδα ενεργειακής αποδοτικότητας (A,B,C,D,E), δύναται να αποφασιστεί κατά πόσον μπορούν να ληφθούν πιο δραστικά μέτρα (λαμβάνοντας υπ’ όψιν και τον οικονομικό παράγοντα), που να σχετίζονται με τη σχεδίαση του πλοίου. Πιο συγκεκριμένα, θα μπορεί να εκτιμηθεί κατά πόσο συμφέρει η εγκατάσταση (ή και αντικατάσταση των υπαρχόντων), για παράδειγμα, συστημάτων που έχουν σαν σκοπό την αύξηση του β.α. της προωστήριας εγκατάστασης, μέσω τροποποίησης της ροής γύρω από την έλικα, όπως Mewis Duct, post-swirl fins, κτλ., όπως περιγράφονται αναλυτικά στην αντίστοιχη υποενότητα της παρούσας έκθεσης. Γενικώς, η διαδικασία που χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση της αντίστασης οδηγεί σε σχετικά ικανοποιητικά αποτελέσματα, και θα μπορούσαν αξιοποιηθούν από τη ναυτιλιακή.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. **ΠΟΛΙΤΗΣ, ΓΕΡ.** *ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΩΣΗ ΠΛΟΙΟΥ.* 5η ΕΚΔΟΣΗ. ΑΘΗΝΑ : ΕΜΠ, 2018.

2. **ΠΟΛΙΤΗΣ, Γ.** *ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΡΟΩΣΗΣ ΠΛΟΙΟΥ.* ΑΘΗΝΑ : ΕΜΠ, 2015.

3. **ΛΟΥΚΑΚΗΣ, Θ.** *ΠΡΟΩΣΗ ΠΛΟΙΟΥ.* Α' ΕΚΔΟΣΗ. ΑΘΗΝΑ : ΣΕΑΒ, 2016. Τόμ. Α', Β'.

4. **ΛΟΥΚΑΚΗΣ, Θ. και ΓΡΗΓΟΡΟΠΟΥΛΟΣ, Γ.** *ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΠΛΟΙΩΝ ΣΕ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥΣ ΣΤΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥΣ.* ΑΘΗΝΑ : ΕΜΠ, 1997.

5. **ΚΥΡΤΑΤΟΣ, Ν.** *ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΠΡΟΩΣΗΣ ΠΛΟΙΩΝ.* ΑΘΗΝΑ : ΕΜΠ, 2007.

6. **ΑΘΑΝΑΣΟΥΛΗΣ, Γ.** *ΑΝΕΜΟΓΕΝΕΙΣ ΘΑΛΑΣΣΙΟΙ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΙ.* ΑΘΗΝΑ : ΕΜΠ, 2007.

7. **PAPANIKOLAOU, A.** *SHIP DESIGN.* ATHENS : SPRINGER, 2014.

8. **MYUNG-IL ROH and KYU-YEUL LEE.** *COMPUTATIONAL SHIP DESIGN.* SEOUL : SPRINGER, 2017.

9. **MOLLAND, A., TURNOCK, S. and HUDSON, D.** *SHIP RESISTANCE AND PROPULSION: PRACTICAL ESTIMATION OF SHIP PROPULSIVE POWER.* 2nd EDITION. SOUTHAMPTON : CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, 2017.

10. **LEWIS, ED.** *PNA: MOTIONS IN WAVES AND CONTROLLABILITY.* NJ : SNAME, 1989. Vol. III.

11. **LEWIS, E.** *PNA: RESISTANCE, PROPULSION AND VIBRATION.* NJ : SNAME, 1988. Vol. II.

12. **HARVALD, S.** *RESISTANCE AND PROPULSION OF SHIPS.* LYNGBY, DENMARK : WILEY INTERSCIENCE, JOHN WILEY & SONS, 1983.

13. **CARLTON, J.** *MARINE PROPELLERS AND PROPULSION.* 2nd EDITION. HYTHE, KENT : ELSEVIER, 2007.

14. **BABICZ, J.** *WÄRTSILÄ ENCYCLOPEDIA OF SHIP TECHNOLOGY.* 2nd EDITION. GDANSK : WÄRTSILÄ CORPORATION, 2015.

15. **MAN ENERGY SOLUTIONS.** *BASIC PRINCIPLES OF SHIP PROPULSION.* COPENHAGEN : MAN, 2018.

16. **LIU, S. and PAPANIKOLAOU, A.** REGRESSION ANALYSIS OF EXPERIMENTAL DATA FOR ADDED RESISTANCE IN WAVES OF ARBITRARY HEADING AND DEVELOPMENT OF A SEMI-EMPIRICAL FORMULA. *OCEAN ENGINEERING.* ELSEVIER, 2020.

17. **LIU, S. and PAPANIKOLAOU.** APPROXIMATION OF THE ADDED RESISTANCE OF SHIPS WITH SMALL DRAFT OR IN BALLAST CONDITION BY EMPIRICAL FORMULA. *PROC. IME M J. ENG. MARIT. ENVIRON.* SAGE, 2019.

18. **RESOLUTION MEPC.308(73).** *2018 GUIDELINES ON THE METHOD OF CALCULATION OF THE ATTAINED ENERGY EFFICIENCY DESIGN INDEX (EEDI) FOR NEW SHIPS.* OCTOBER 2018.

19. **RESOLUTION MEPC.322(74).** *AMENDMENTS TO THE 2018 GUIDELINES ON THE METHOD OF CALCULATION OF THE ATTAINED ENERGY EFFICIENCY DESIGN INDEX (EEDI) FOR NEW SHIPS.* MAY 2019.

20. **RESOLUTION MEPC.332(76).** *AMENDMENTS TO THE 2018 GUIDELINES ON THE METHOD OF CALCULATION OF THE ATTAINED ENERGY EFFICIENCY DESIGN INDEX (EEDI) FOR NEW SHIPS.* JUNE 2021.

21. **MEPC.1/CIRC.855/REV.2.** *2014 GUIDELINES ON SURVEY AND CERTIFICATION OF THE ENERGY EFFICIENCY DESIGN INDEX (EEDI).* JANUARY 2019.

22. **RESOLUTION MEPC.231(65).** *2013 GUIDELINES FOR CALCULATION OF REFERENCE LINES FOR USE WITH THE ENERGY EFFICIENCY DESIGN INDEX (EEDI).* MAY 2013.

23. **MEPC.1/CIRC.896.** *2021 GUIDANCE ON TREATMENT OF INNOVATIVE ENERGY EFFICIENCY TECHNOLOGIES FOR CALCULATION AND VERIFICATION OF THE ATTAINED EEDI AND EEXI.* DECEMBER 2021.

24. **RESOLUTION MEPC.328(76).** *AMENDMENTS TO MARPOL ANNEX VI.* JUNE 2021.

25. **RESOLUTION MEPC.203(62).** *AMENDMENTS TO MARPOL ANNEX VI/ INCLUSION OF REGULATIONS ON ENERGY EFFICIENCY FOR SHIPS IN MARPOL ANNEX VI.* JULY 2011.

26. **RESOLUTION MEPC.333(76).** *2021 GUIDELINES ON THE METHOD OF CALCULATION OF THE ATTAINED ENERGY EFFICIENCY EXISTING SHIP INDEX (EEXI).* JUNE 2021.

27. **RESOLUTION MEPC.334(76).** *2021 GUIDELINES ON SURVEY AND CERTIFICATION OF THE ATTAINED ENERGY EFFICIENCY EXISTING SHIP INDEX (EEXI).* JUNE 2021.

28. **RESOLUTION MEPC.335(76).** *2021 GUIDELINES ON THE SHAFT / ENGINE POWER LIMITATION SYSTEM TO COMPLY WITH THE EEXI REQUIREMENTS AND USE OF A POWER RESERVE.* JUNE 2021.

29. **ClassNK.** [Ηλεκτρονικό] DECEMBER 2021. https://www.classnk.or.jp/hp/pdf/activities/statutory/eexi/eexi_rev3e.pdf.

30. **RESOLUTION MEPC.282(70).** *2016 GUIDELINES FOR THE DEVELOPMENT OF A SHIP ENERGY EFFICIENCY MANAGEMENT PLAN (SEEMP).* OCTOBER 2016.

31. **RESOLUTION MEPC.278(70).** *AMENDMENTS TO MARPOL ANNEX VI/ INCLUSION OF REGULATIONS ON ENERGY EFFICIENCY FOR SHIPS.* OCTOBER 2016.

32. **ClassNK/ MARINE GHG CERTIFICATION DEPARTMENT.** [Ηλεκτρονικό] OCTOBER 2021. https://www.classnk.or.jp/hp/pdf/activities/statutory/seemp/CII_en.pdf.

33. **DNV.** [Ηλεκτρονικό] https://www.dnv.com/maritime/insights/topics/CII-carbon-intensity-indicator/answers-to-frequent-questions.html.

34. **DNV-GL.** [Ηλεκτρονικό] https://www.dnv.com/maritime/insights/topics/eexi/answers-to-frequent-questions.html.

35. **BLENDERMANN, W.** *WIND LOADING OF SHIPS - COLLCTED DATA FROM WIND TUNNEL TESTS IN UNIFORM FLOW.* HAMBURG : INSTITUT FÜR SCHIFFBAU DER UNIVERSITÄT HAMBURG, DEZEMBER 1996.

36. **ISO 15016:2015(E).** *SHIPS AND MARINE TECHNOLOGY – GUIDELINES FOR THE ASSESSMENT OF SPEED AND POWER PERFORMANCE BY ANALYSIS OF SPEED TRIAL DATA.* : ISO, 2015.

37. **ITTC-RECOMENDED PROCEDURES AND GUIDELINES.** *PREPARATION, CONDUCT AND ANALYSIS OF SPEED/POWER TRIALS.* : ITTC, 2017.

38. **BECKER.** [Ηλεκτρονικό] https://www.becker-marine-systems.com/products/manoeuvring-systems/rudder-bulb.html.

39. **RESOLUTION MEPC.304(72).** *INITIAL IMO STRATEGY ON REDUCTION OF GHG EMISSIONS FROM SHIPS.* APRIL 2018.

40. **RESOLUTION MEPC 336(76).** *2021 GUIDELINES ON OPERATIONAL CARBON INTENSITY INDICATORS AND THE CALCULATION METHODS (CII GUIDELINES, G1).* JUNE 2021.

41. **RESOLUTION MEPC 337(76).** *2021 GUIDELINES ON THE REFERENCE LINES FOR USE WITH OPERATIONAL CARBON INTENSITY INDICATORS (CII REFERENCE LINES GUIDELINES, G2).* JUNE 2021.

42. **RESOLUTION MEPC 338(76).** *2021 GUIDELINES ON THE OPERATIONAL CARBON INTENSITY REDUCTION FACTORS RELATIVE TO REFERENCE LINES (CII REDUCTION FACTOR GUIDELINES, G3).* JUNE 2021.

43. **RESOLUTION MEPC 339(76).** *2021 GUIDELINES ON THE OPERATIONAL CARBON INTENSITY RATING OF SHIPS (CII RATING GUIDELINES, G4).* JUNE 2021.

44. **ABS.** [Ηλεκτρονικό] https://ww2.eagle.org/en/Products-and-Services/sustainability/eexi.html.

45. **ITTC- RECOMMENDED PROCEDURES AND GUIDELINES.** *FULL SCALE MEASUREMENTS, SPEED AND POWER TRIALS, ANALYSIS OF SPEED/POWER TRIAL DATA.* : ITTC, 2005.

46. **IMO.** [Ηλεκτρονικό] https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Index-of-MEPC-Resolutions-and-Guidelines-related-to-MARPOL-Annex-VI.aspx.

47. **OOSTERVELD and VAN OOSSANEN.** *FURTHER COMPUTER - ANALYZED DATA OF THE WAGENINGEN B - SCREW SERIES.* ROTTERDAM : N.S.M.B., 1975.

48. **ΑΘΑΝΑΣΟΥΛΗΣ, ΓΕΡ. και ΜΠΕΛΙΜΠΑΣΑΚΗΣ, Κ.** *ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΠΛΟΙΟΥ.* ΑΘΗΝΑ : ΕΜΠ, 2012.

49. **FABER, J. και MAARTEN, H.** *HISTORICAL TRENDS IN SHIP DESIGN EFFICIENCY.* DELFT : CE DELFT, 2015.

50. **FRANK MANUAL.**

51. **SWAN 2 2002.** *SHIP FLOW SIMULATION IN CALM WATER AND IN WAVES: USER MANUAL.* BOSTON : BMC, 2002.