

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΝΑΥΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ



Διπλωματική Εργασία

**“ Ανάλυση καταγραφών καταναλώσεων πλοίου
μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων ”**

Παπαχριστοφόρου Παναγιώτης

Επιβλέπων : Καθηγητής Γ. Γρηγορόπουλος

Αθήνα 2021

Περιεχόμενα

Σύνοψη	3
1. Αποδοτικότητα Πλοίου	4
1.1 Γενικές έννοιες	4
1.2 Δείκτες Ενεργειακής Αποδοτικότητας Πλοίου	6
1.3 Σχέδιο Διαχείρισης Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίου - SEEMP	8
2. Περιγραφή και δεδομένα πλοίου	10
2.1 Περιγραφή πλοίου	10
2.2 Καταστάσεις φόρτωσης	13
2.3 Διαγράμματα Bodyplan	13
2.4 Model Test	16
2.5 Shop Test	18
2.6 Online δεδομένα	20
2.7 Ημερήσιες καταγραφές (Noon Reports)	21
2.8 Πρόγραμμα FRANK	21
3. Αντίσταση πλοίου	22
3.1 Γενικές έννοιες	22
3.2 Αντίσταση σε ήρεμο νερό	23
3.3 Πρόσθετη Αντίσταση λόγω κυματισμού	27
3.4 Αντίσταση Ανέμου	28
3.5 Αντίσταση Παρελκομένων	30
4. Πρόωση πλοίου	31
4.1 Τύποι ελίκων	31
4.2 Συνθήκες ροής γύρω από την έλικα	32
4.3 Βαθμοί απόδοσης	34
4.4 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά έλικας	37
4.5 Συντελεστές έλικας (J , K_T , K_Q)	39
4.6 Συνιστώσες Ισχύος	41
4.7 Μέθοδος υπολογισμού	42
5. Σύγκριση εκτιμώμενων και πραγματικών τιμών	45
5.1 Προσδιορισμός επιμέρους παραμέτρων	45
5.2 Συλλογή Αποτελεσμάτων - Διαγράμματα	47
5.3 Έλεγχος κατανάλωσης πριν και μετά το δεξαμενισμό, προσθήκη νέου βολβού	62
5.4 Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα	65
Αναφορές	67

Σύνοψη

Ο σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής είναι η σύγκριση της πραγματικής κατανάλωσης καυσίμου ενός containership, σε σχέση με την αναμενόμενη κατανάλωση βάσει πειραματικών αποτελεσμάτων και δοκιμών μοντέλων (model test), καθώς και εκτεταμένων υπολογισμών για την απόδοση του πλοίου τόσο σε ήρεμο νερό, όσο και σε τυχαίους κυματισμούς. Η σύγκριση αυτή θα οδηγήσει στον προσδιορισμό των παραγόντων που επηρεάζουν την απόδοση του πλοίου και στη σύσταση μέτρων για τη βελτίωσή της, όπως απαιτείται από το Εγχειρίδιο του Σχεδίου Διαχείρισης Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίου (SEEMP). Οποιαδήποτε βελτίωση του λειτουργικού προφίλ του πλοίου θα έχει επίδραση στη μείωση του λειτουργικού κόστους, των καταναλώσεων καθώς και των εκπομπών του πλοίου.

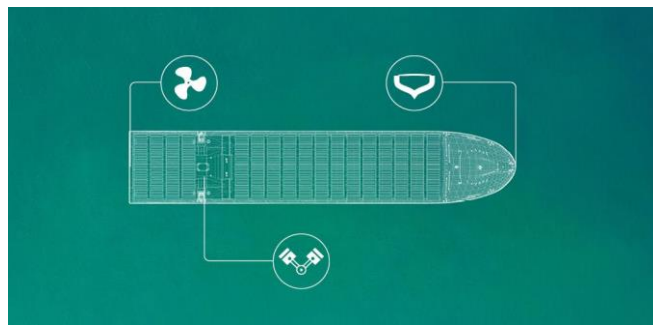
Για τη διενέργεια των εκτεταμένων υπολογισμών του πλοίου θα χρησιμοποιηθούν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της μορφής της γάστρας και της έλικας, ορισμένες αντιπροσωπευτικές συνθήκες φόρτωσης που περιγράφονται στο εγχειρίδιο Trim and Stability, οι τυπικές διαδρομές του πλοίου και τέλος, τα χαρακτηριστικά της κύριας μηχανής (shop test) και της έλικας. Όλες οι συνιστώσες της αντίστασης πρόκειται να εκτιμηθούν. Στη συνέχεια, θα γίνει βελτίωση των αναλυτικών αποτελεσμάτων που θα προκύψουν, με βάση τα αποτελέσματα που περιγράφονται στα model test.

Τα δεδομένα που θα χρησιμοποιηθούν βασίζονται σε καταγραφές από τις ημερήσιες αναφορές (noon reports), καθώς και στις ενδείξεις του εξοπλισμού μέτρησης υψηλής ακρίβειας που διαθέτει το υπό μελέτη πλοίο. Το σύνολο των παραπάνω δεδομένων κοινοποιούνται απευθείας (online) στα κεντρικά γραφεία της ναυτιλιακής εταιρίας. Επιπρόσθετα, πρόκειται να υλοποιηθούν υπολογισμοί και να προσδιοριστούν οι διαφορές που εντοπίζονται πριν και μετά το δεξαμενισμό του πλοίου, όπου έγινε καθαρισμός της γάστρας και της έλικας. Παράλληλα, κατά το δεξαμενισμό τοποθετήθηκε νέος βολβός στο πλοίο, ο οποίος θα μελετηθεί αναλυτικά. Έπειτα, θα χρησιμοποιηθούν KPI σε γραφική μορφή, ώστε να είναι δυνατή η φιλική προς το χρήστη παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Τέλος, πρόκειται να γίνει εκτίμηση των αποτελεσμάτων, δίνοντας επεξηγήσεις τόσο για την ακρίβεια της μεθόδου, όσο και για τις αποκλίσεις που ενδέχεται να προκύψουν.

1. Αποδοτικότητα Πλοίου

1.1 Γενικές έννοιες

Ο όρος Αποδοτικότητα Πλοίου δεν θα πρέπει να συνδέεται αποκλειστικά με την Ενεργειακή Αποδοτικότητα του πετρελαίου, η οποία πράγματι αποτελεί βασική συνιστώσα της Αποδοτικότητας του πλοίου, στην προσπάθεια περαιτέρω μείωσης της κατανάλωσης. Περιλαμβάνει επιπρόσθετα την Αποδοτικότητα Ταξιδιού, μέσω της βελτιστοποίησης του ταξιδιού και των λειτουργικών επιδόσεων, κι ακόμα την Αποδοτικότητα Στόλου, μέσω της βελτίωσης της επικοινωνίας μεταξύ του προσωπικού (onshore και onboard), με σκοπό την καλύτερη επίγνωση της κατάστασης προκειμένου να επιτυγχάνεται ορθή λήψη αποφάσεων ως προς το πλοίο και το περιβάλλον. (Babicz,2015)



Σχήμα 1.1: Ενεργειακή Αποδοτικότητα Πλοίου

Η Αποδοτικότητα ενός πλοίου είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την κατανάλωση καυσίμου, την ταχύτητα που ταξιδεύει το πλοίο καθώς και τις εκπομπές που έχει. Οι εκπομπές που απαιτούν ιδιαίτερο χειρισμό είναι τα παράγωγα θείου, αζώτου καθώς και διοξειδίου του άνθρακα. Για μεγάλο χρονικό διάστημα, η ενασχόληση με την Αποδοτικότητα του πλοίου ήταν προαιρετική. Έτσι, οι ίδιοι οι πλοιοκτήτες θα έπρεπε να είναι σε θέση να κατανοήσουν την ευθύνη τους απέναντι στο περιβάλλον και στην καλύτερη διαχείριση των πόρων του πλοίου. 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. Γενικότερα, η κατασκευή πλοίων πιο αποδοτικών σε καύσιμο είναι ακριβότερη, ωστόσο, η περίοδος αποπληρωμής μειώνεται σημαντικά, όταν οι τιμές του καυσίμου αυξάνονται. Παράλληλα, οι τιμές των ναύλων παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο. Όταν οι τιμές των ναύλων είναι υψηλές, τα νέα πλοία έχουν μεγάλη ζήτηση και τα ναυπηγεία μπορούν να κατασκευάσουν τυποποιημένα σχέδια, με σχετικά χαμηλό ρίσκο και υψηλό περιθώριο κέρδους. Αντίθετα, όταν οι τιμές των ναύλων είναι χαμηλές, τα ναυπηγεία ανταγωνίζονται για πελάτες και ενδέχεται να είναι πρόθυμα να κατασκευάσουν πιο αποδοτικά πλοία. (Faber&Maarten,2015) Έπειτα, προκειμένου να γίνει μεγιστοποίηση της μεταφορικής ικανότητας σε περιορισμένες περιοχές, οι πλοιοκτήτες συχνά επιλέγουν να μεγιστοποιήσουν τη χωρητικότητα φορτίου, αγνοώντας την αποδοτικότητα καυσίμου. Αυτό μάλιστα είναι ιδιαίτερα ελκυστικό, όταν οι τιμές των ναύλων είναι υψηλές και οι τιμές των καυσίμων χαμηλές.

Σήμερα, το κόστος του πετρελαίου βρίσκεται σε πραγματικά υψηλά επίπεδα και η περιβαλλοντική υποβάθμιση είναι μη αναστρέψιμη. Έτσι, η αποδοτικότητα των καυσίμων των πλοίων είναι μείζον θέμα που απασχολεί κάθε άτομο, εθνικό και διεθνή φορέα που σχετίζεται με τη ναυτιλία.

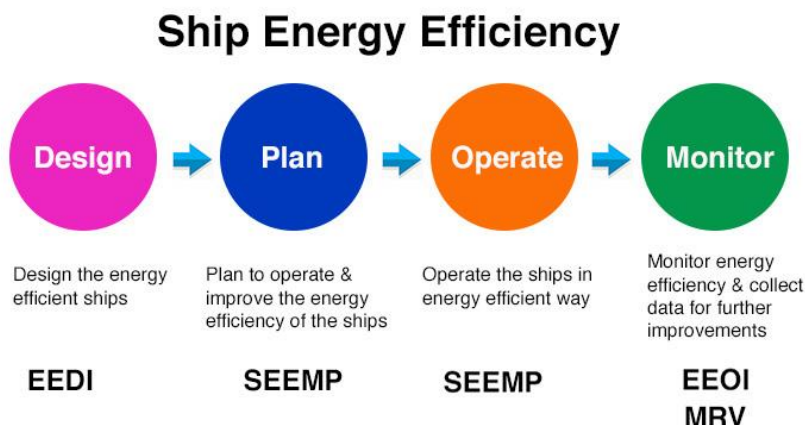
Ο ΙΜΟ έλαβε υπόψη του ότι οι πλοιοκτήτες δεν επρόκειτο να αλλάξουν τη στάση τους απέναντι στη ναυπήγηση πλοίων, καθώς στρέφουν διαρκώς το βλέμμα στο βωμό της κέρδους. Για το λόγο αυτό, ως παγκόσμια αρχή για τη θέσπιση προτύπων για την Ασφάλεια και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της διεθνούς ναυτιλίας, ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός κατέστησε υποχρεωτική την έννοια της ενεργειακής απόδοσης. Στην αρχή, συγκρότησε μια ειδική επιτροπή για την περιβαλλοντική πολιτική (MEPC), με σκοπό να προτείνει μέτρα για τη μείωση των εκπομπών στις επόμενες δεκαετίες, καθώς και για τον περιορισμό των περιβαλλοντικών αποτυπωμάτων των πλοίων. (Grigoropoulos et al., 2012) Έπειτα, από το 2011 κιόλας, θεσπίστηκαν νέοι κανονισμοί, προκειμένου να καθορίσουν τη μορφή της ναυτιλιακής βιομηχανίας για τις επόμενες δεκαετίες, σύμφωνα με τις επιθυμίες του ΙΜΟ.

Η υπερθέρμανση του πλανήτη ως αποτέλεσμα των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (Greenhouse Gas) αποτελεί ένα ιδιαίτερα σημαντικό πρόβλημα. Το κλειδί για την αποφυγή καταστροφικών επιπτώσεων λόγω της κλιματικής αλλαγής είναι ο περιορισμός των αερίων εκπομπών. Ως αέρια του θερμοκηπίου ορίζονται οι ρύποι που απορροφούν και εκπέμπουν υπέρυθη ακτινοβολία όπως τα CO₂, H₂O, N₂O, το μεθάνιο και άλλα σωματίδια. Απαιτείται επομένως προσοχή στον τρόπο διαχείρισης της ενέργειας, ο οποίος συχνά σχετίζεται με την τρόπο με τον οποίο καταναλώνεται.

Η ναυτιλία αντιμετωπίζει αυξανόμενες πιέσεις για την απαλλαγή των λειτουργιών της από τις εκπομπές άνθρακα. Ήδη από τον Απρίλιο του 2018, ο ΙΜΟ υιοθέτησε μια φιλόδοξη στρατηγική σχετικά με την απαλλαγή της ναυτιλίας από τις εκπομπές άνθρακα, όσο το δυνατόν πιο σύντομα, μέσα στον αιώνα που διανύουμε. Λαμβάνοντας το 2008 ως έτος αναφοράς, η στρατηγική αυτή στοχεύει στη μείωση κατά τουλάχιστον 50% των συνολικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τη ναυτιλία έως το 2050. Η επίτευξη αυτών των στόχων απαιτεί την εφαρμογή τεχνολογιών που βρίσκονται ακόμα υπό ανάπτυξη, την αποδοχή χαμηλότερων ταχυτήτων πλεύσης καθώς και την ανάπτυξη μεγάλων ποσοτήτων βιώσιμων καυσίμων, με μηδενικό ή ουδέτερο ισοζύγιο άνθρακα.

Εκτός από τα παράγωγα άνθρακα, οι ναυτικοί κινητήρες εκπέμπουν οξείδια του αζώτου NO_x, κατά την καύση σε υψηλές θερμοκρασίες, και οξείδια του θείου SO_x, λόγω της κακής ποιότητας καυσίμων. Πρόκειται για ιδιαίτερα επικίνδυνες ουσίες για το περιβάλλον. Προκειμένου να επιλυθεί αυτό το πρόβλημα, ο ΙΜΟ εισήγαγε ορισμένες Περιοχές Ελέγχου Εκπομπών Θείου (SECA), όπου η περιεκτικότητα σε θείο δεν πρέπει να υπερβαίνει το 0,1% m/m από το 2015. Μέχρι το 2020, εκτός αυτών των περιοχών, τα όρια έγιναν πολύ αυστηρότερα από τα προηγούμενα χρόνια, καθώς από 3,5% m/m τροποποιήθηκαν σε 0,5% m/m. Προκειμένου να συμμορφωθούν με τους κανόνες, οι πλοιοκτήτες τοποθέτησαν ειδικές διατάξεις καθαρισμού καυσαερίων (Scrubbers), οι οποίες απορροφούν το μεγαλύτερο μέρος των εκπομπών SO_x, και παράλληλα μειώνουν σημαντικά τις εκπομπές σωματιδίων. (Aircim,2011) Ταυτόχρονα, το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στη χρήση εναλλακτικών καυσίμων, όπως LNG, LPG, μεθανόλη, βιοκαύσιμα, υδρογόνο, ή ακόμα και στη χρήση fuel cells, τα οποία αποδεικνύονται ως πολλά υποσχόμενες λύσεις στη ναυτιλία.

Η έννοια της Ενεργειακής Αποδοτικότητας των πλοίων αντικατοπτρίζεται στην παρακάτω απεικόνιση. (Karan, 2021)



Σχήμα 1.2: Ενεργειακή Αποδοτικότητα Πλοίου (Karan,2021)

Η Ενεργειακή Αποδοτικότητα Πλοίου περιλαμβάνει ένα ευρύτερο πλάνο διαχείρισης, γνωστό ως SEEMP ή Ship Energy Efficiency Management Plan, καθώς και ορισμένους δείκτες, οι οποίοι παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Ο πρώτος δείκτης αναφέρεται ως EEDI ή Energy Efficiency Design Index και ο δεύτερος ως EEOI, ή εναλλακτικά Energy Efficiency Operational Indicator. Στη συνέχεια, πρόκειται να γίνει σύντομη περιγραφή των παραπάνω δεικτών.

1.2 Δείκτες Ενεργειακής Αποδοτικότητας Πλοίου

Λαμβάνοντας υπόψη τις αυξανόμενες ανησυχίες για τους ατμοσφαιρικούς ρύπους και την κατανάλωση των ορυκτών καυσίμων, η Επιτροπή Προστασίας Θαλάσσιου Περιβάλλοντος (MEPC), υπό τον IMO, προχώρησε στην εφαρμογή του δείκτη ενεργειακής απόδοσης σχεδιασμού (EEDI) στα νέα πλοία, ο οποίος παρακολουθεί την ποσότητα του CO₂ και άλλων επιβλαβών εκπομπών. Ο δείκτης αυτός αποσκοπεί στη βελτίωση του σχεδιασμού του κύτους και των λειτουργιών του μηχανικού εξοπλισμού, ώστε να μειωθεί η κατανάλωση καυσίμου και συνεπώς οι εκπομπές CO₂, αυξάνοντας έτσι τη συνολική αποδοτικότητα του πλοίου. Οι τροποποιήσεις εγκρίθηκαν τον Ιούλιο του 2011 και τέθηκαν σε ισχύ την 1η Ιανουαρίου 2013. Ένα νέο κεφάλαιο 4 εισήχθη στο παράρτημα VI της MARPOL, καθιστώντας το δείκτη EEDI υποχρεωτικό για τα νέα πλοία, με στόχο την ευρύτερη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης της διεθνούς ναυτιλίας.

Ο EEDI αναφέρεται στους κανονισμούς 20-21 και είναι μη κανονιστικός μηχανισμός, με έμφαση στην απόδοση, επιτρέποντας την επιλογή των τεχνολογιών που θα χρησιμοποιηθούν σε ένα συγκεκριμένο σχέδιο πλοίου από τη βιομηχανία. Εφόσον επιτευχθεί το απαιτούμενο επίπεδο ενεργειακής απόδοσης, οι σχεδιαστές και οι κατασκευαστές πλοίων θα είναι σε θέση να χρησιμοποιούν ελεύθερα την πιο οικονομικά συμφέρουσα λύση για τη συμμόρφωση του πλοίου με τους κανονισμούς. (Resolution MEPC.203,2011)

Ο δείκτης EEDI απαιτείται μόνο για τους ακόλουθους τύπους πλοίων άνω των 400GT (gross tonnages):

- Bulk Carrier
- Gas Carrier
- Tanker
- Container Ship
- Refrigerated Cargo Ship
- General Cargo Ship
- Combination Carrier

Προκύπτουν δύο διαφορετικοί τύποι προσδιορισμού του δείκτη EEDI, ο επιτευχθείς EEDI (attained) και ο απαιτούμενος EEDI (required). Για τους δύο αυτούς όρους πρέπει να ισχύει η ακόλουθη ανισότητα:

$$Attained EEDI \leq Required EEDI = \left(1 - \frac{X}{100}\right) \cdot Reference Line Value$$

Όπου X είναι ο συντελεστής μείωσης που καθορίζεται για κάθε τύπο πλοίου και μέγεθος, για τον υπολογισμό του απαιτούμενου EEDI, σε σύγκριση με τη γραμμή αναφοράς EEDI.

Οι τιμές της γραμμής αναφοράς υπολογίζονται με την εξίσωση:

$$Reference Line Value = a \cdot b^{-c}$$

όπου όλες οι παράμετροι a, b, c και X δίνονται στο ψήφισμα 203(62) της MEPC.

Έπειτα, ο δείκτης EEOI ή Energy Efficiency Operational Indicator ορίζεται ως ο λόγος της μάζας CO₂ που εκπέμπεται ανά μονάδα μεταφορικού έργου, δηλαδή:

$$EEOI = \frac{M_{CO_2}}{transport\ work}$$

Δεδομένου ότι η ποσότητα CO₂ που εκπέμπεται από ένα πλοίο σχετίζεται άμεσα με την κατανάλωση πετρελαίου, 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 τιμή της ενεργειακής απόδοσης της λειτουργίας του πλοίου, κατά τη διάρκεια μιας σταθερής περιόδου, η οποία αντιπροσωπεύει το σύνολο των εμπορικών συναλλαγών του πλοίου. Επιπλέον, η χρήση του EEOI παρέχει διαφανή προσέγγιση σχετικά με την αξιολόγηση της αποδοτικότητας ενός πλοίου ως προς τα αέρια θερμοκηπίου, σε σχέση με τις εκπομπές CO₂.

Ολοκληρώνοντας, ενδέχεται να παρατηρηθεί μεγάλη διαφορά μεταξύ των παραπάνω δεικτών, καθώς ο EEDI είναι το μέτρο της ενεργειακής απόδοσης του πλοίου κατά το σχεδιασμό, ενώ ο EEOI είναι το μέτρο του πόσο αποτελεσματικά λειτουργεί το πλοίο. Με άλλα λόγια, ο EEDI αναφέρεται στο πόσο καλά (ενεργειακά αποδοτικό) είναι κατασκευασμένο ένα πλοίο, ενώ ο EEOI αποτελεί το μέτρο του 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.

1.3 Σχέδιο Διαχείρισης Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίου - SEEMP

Ο IMO έχει αναλάβει ηγετικό ρόλο μέσω της MARPOL και άλλων κανονιστικών οργάνων για την ενίσχυση της ενεργειακής απόδοσης και τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τη ναυτιλία. Τον Ιούλιο του 2011, η Επιτροπή Προστασίας Θαλάσσιου Περιβάλλοντος (MEPC) του IMO ολοκλήρωσε την 62η σύνοδό της, με την έγκριση νέων απαιτήσεων σχετικά με το CO₂, συμπεριλαμβανομένης της καθιέρωσης υποχρεωτικής εφαρμογής του SEEMP για νέα, αλλά και για υπάρχοντα πλοία άνω των 400GT, ανεξαρτήτως σημαίας, από την 1η Ιανουαρίου 2013. Ένα πλάνο SEEMP παρέχει μια δομημένη προσέγγιση για την παρακολούθηση και βελτίωση της απόδοσης του πλοίου και του στόλου, με την πάροδο του χρόνου. Επιπλέον, ενθαρρύνει τον πλοιοκτήτη να εξετάσει νέες τεχνολογίες και πρακτικές σε κάθε στάδιο του πλάνου.

Το SEEMP δεν υπόκειται σε προέγκριση από τα κράτη σημαίας ή τους αναγνωρισμένους οργανισμούς, αλλά θα πρέπει να βρίσκεται επί του πλοίου σε οποιαδήποτε στιγμή πιθανής επιθεώρησης. (Resolution MEPC.203,2011) Το κεφάλαιο 4 του Παραρτήματος της MARPOL απαιτεί, σύμφωνα με τον κανονισμό 22, ότι "Κάθε πλοίο πρέπει να διατηρεί επί του σκάφους ένα Σχέδιο διαχείρισης της ενεργειακής απόδοσης του πλοίου (SEEMP). Αυτό αποτελεί μέρος του συστήματος διαχείρισης της ασφάλειας του πλοίου και πρέπει να αναπτύσσεται λαμβάνοντας υπόψη τις κατευθυντήριες οδηγίες που εκδίδονται από τον IMO".

Ο σκοπός του SEEMP είναι να θεσπίσει ένα μηχανισμό για ένα πλοίο ή μια εταιρεία, προκειμένου να βελτιώσει την ενεργειακή απόδοση της λειτουργίας του πλοίου. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί αφενός μέσω της παρακολούθησης της ενεργειακής απόδοσης του μεταφορικού έργου του πλοίου, και αφετέρου, μέσω της βελτίωσης της απόδοσης σε τακτά χρονικά διαστήματα, λαμβάνοντας υπόψη νέες τεχνολογίες και πρακτικές. Παράλληλα, θα πρέπει να προσαρμόζεται στα χαρακτηριστικά και τις ανάγκες των επιμέρους εταιρειών και πλοίων, ενώ θα ήταν καλό να συνδέεται με την ευρύτερη εταιρική πολιτική διαχείρισης της ενέργειας. Είναι εμφανές ότι μέσω του SEEMP, οι φορείς εκμετάλλευσης των πλοίων θα έχουν την ευκαιρία να μειώσουν σημαντικά το κόστος, καθώς θα εξοικονομήσουν καύσιμα. Δεδομένου ότι ο κανονισμός δεν θέτει απαιτήσεις ενεργειακής απόδοσης, εναπόκειται στην εταιρεία να χρησιμοποιήσει προληπτικά το SEEMP ώστε να διασφαλίσει ότι τα οφέλη από την εξοικονόμηση καυσίμων θα βελτιστοποιηθούν. Πιθανότατα, η βέλτιστη πρακτική εξοικονόμησης καυσίμων που περιέχεται στο SEEMP να είναι η συντήρηση του κύτους, η οποία είναι απαραίτητη για την αποφυγή της βιολογικής ρύπανσης. Έπειτα, η συντήρηση των συστημάτων πρόωσης, με έμφαση στην κύρια μηχανή, καθώς και η χρήση εναλλακτικών καυσίμων, πρόκειται να μειώσουν σημαντικά τις καταναλώσεις καυσίμου.

Το SEEMP αναπτύσσεται για συγκεκριμένο πλοίο και αποτελεί πλάνο του πλοιοκτήτη, του φορέα εκμετάλλευσης ή του ναυλωτή. Αποτελείται από δύο μέρη, όπου το πρώτο μέρος αποσκοπεί στη διαχείριση των περιβαλλοντικών επιδόσεων των πλοίων που διαχειρίζεται η εταιρεία, ώστε να βελτιώσει την αποδοτικότητα. Το δεύτερο μέρος αναφέρεται στο σύστημα συλλογής δεδομένων, όσον αφορά την ετήσια κατανάλωση καυσίμου, τις ώρες εργασίας και τις αποστάσεις ταξιδιού. (Resolution MEPC.282,2016) Τα δεδομένα αυτά αποτελούν τα ποσοφ reports, τα οποία αποστέλλονται από το πλοίο στο τεχνικό τμήμα της ναυτιλιακής εταιρείας σε καθημερινή βάση, προκειμένου να γίνει παρακολούθηση, αλλά και αξιολόγηση των επιδόσεων τού πλοίου.

Πρώτο μέρος SEEMP

Το πρώτο μέρος του εγχειριδίου SEEMP, όπως αναφέρθηκε ήδη, αποσκοπεί στην εδραίωση ενός μηχανισμού που θα οδηγήσει στην αύξηση της απόδοσης της λειτουργίας του πλοίου. Αρκετές εταιρίες αναπτύσσουν και εφαρμόζουν ένα σύστημα διαχείρισης ασφάλειας (Safety Management System). Το πρώτο μέρος του SEEMP μπορεί να αποτελέσει μέρος του συστήματος αυτού. Έπειτα, το SEEMP στοχεύει στην βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του πλοίου, μέσα από μια σειρά βημάτων.

- Προγραμματισμός, όπου καθορίζεται η παρούσα κατάσταση κατανάλωσης ενέργειας του πλοίου και η αναμενόμενη βελτίωση της απόδοσης
- Εφαρμογή, όπου εκτελούνται τα προγραμματισμένα μέτρα
- Παρακολούθηση, μέσω της συνεχούς συλλογής δεδομένων κατά τη λειτουργία του πλοίου και χρήσης καθιερωμένων εργαλείων, όπως ο ΕΕΟΙ
- Αυτοαξιολόγηση και βελτίωση, όπου γίνεται αξιολόγηση των μέτρων που πάρθηκαν και επιλογή αυτών που μπορούν, ή όχι, να εφαρμοστούν στο συγκεκριμένο πλοίο

Δεύτερο μέρος SEEMP

Στο δεύτερο μέρος, το SEEMP συλλέγει τα δεδομένα που καθορίζονται στον κανονισμό 22.1 του παραρτήματος VI της MARPOL, αναπτύσσοντας για κάθε πλοίο, μια ειδική μέθοδο συλλογής, συγκέντρωσης και αναφοράς δεδομένων, τα οποία αφορούν: (Resolution MEPC.282,2016)

- Τύπο καυσίμου
- Ποσότητα κάθε καυσίμου που καταναλώθηκε
- Απόσταση ταξιδιού
- Ώρες πλεύσης

Επιπρόσθετα, η μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου, με παράλληλη αύξηση της λειτουργικής απόδοσης του πλοίου (από το πρώτο μέρος του SEEMP), αποτελεί αντικείμενο μελέτης του δεύτερου μέρους.

2. Περιγραφή και δεδομένα πλοίου

2.1 Περιγραφή πλοίου

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε ένα σύγχρονο containership 8530 TEU της εταιρίας Danaos Shipping, το οποίο διαθέτει εξοπλισμό μέτρησης υψηλής ακρίβειας, σχετικά με τις διάφορες παραμέτρους που επηρεάζουν την απόδοση του πλοίου. Οι παράμετροι αυτοί περιλαμβάνουν την ταχύτητα του πλοίου, speed overground (SOG) και speed through water (STW), την ταχύτητα και τη διεύθυνση του ανέμου, τις στροφές, την ισχύ καθώς και την κατανάλωση πετρελαίου της κύριας προωστήριας μηχανής.

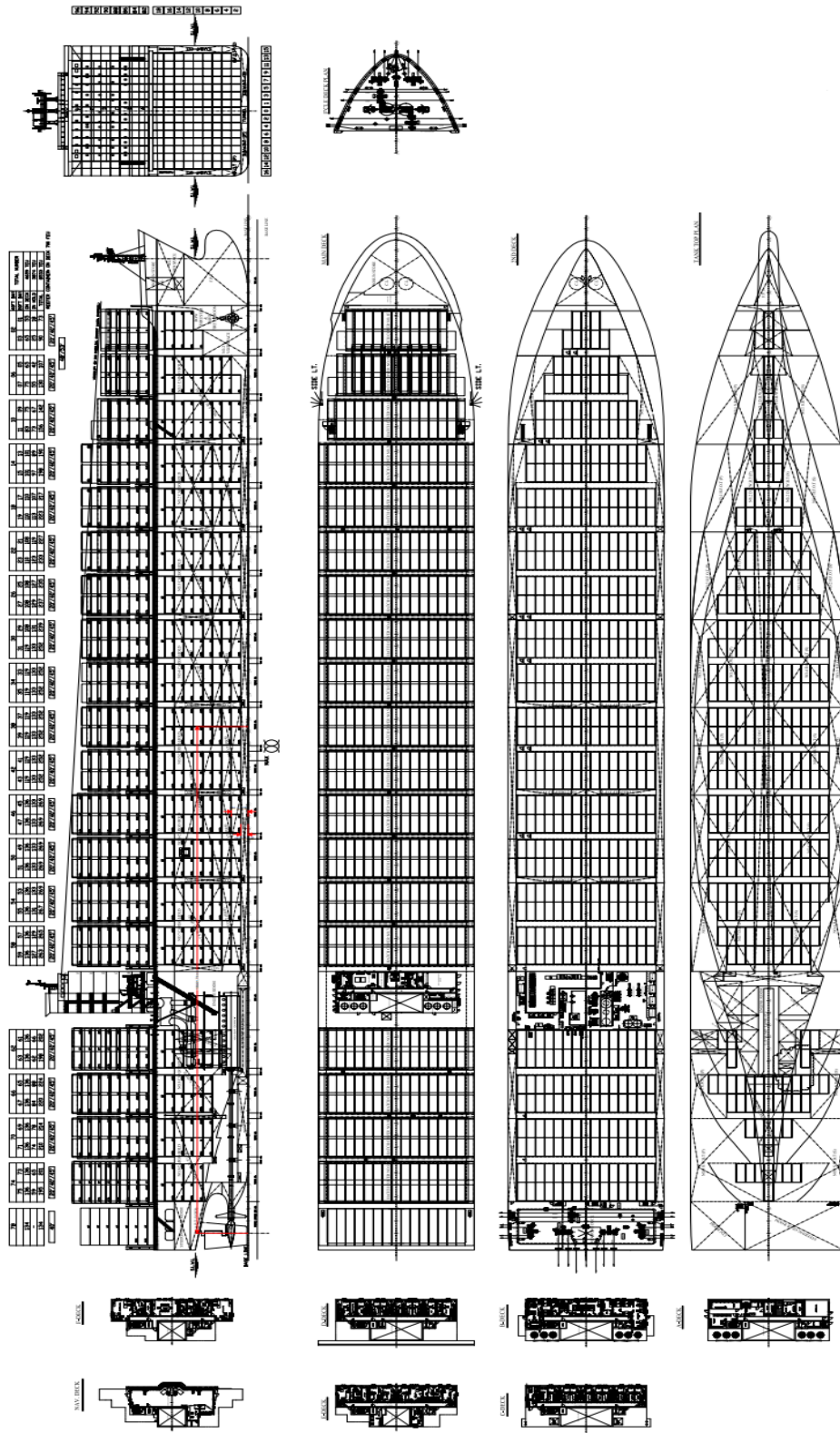
Τα κύρια χαρακτηριστικά του πλοίου είναι τα εξής:

KIND OF SHIP	CONTAINER SHIP
NAVIGATION AREA	OCEAN GOING SERVICE
BUILDER	SHANGAI JIANGNAN CHANGXING HEAVY INDUSTRY CO., LTD
DATE OF KEEL LAID	2010-02-01
LENGTH O.A. (m)	335
LENGTH B.P. (m)	320
BREADTH (MLD) (m)	42.8
DEPTH(MLD) (m)	24.8
DRAFT SCANTLING (m)	14.65
DRAFT DESIGN (m)	13.00
GROSS TONNAGE (tn)	91498
NET TONNAGE (tn)	55432
MAIN ENGINE TYPE	MAN B&W 12K98MC-C
AT MCR	68520 kW x 104.0 RPM
AT NCR	61670 kW x 100.4 RPM
TYPE OF PROPELLER	FPP (FIXED-PITCH)
COMPLEMENT (p)	30
DESIGN SPEED (kn)	25.80

Πίνακας 2.1: Κύρια χαρακτηριστικά πλοίου

Εφόσον λάβαμε από τη διαχειρίστρια εταιρεία όλες τις απαραίτητες πληροφορίες που αφορούσαν τη γεωμετρία της γάστρας, εργαστήκαμε στο σχεδιαστικό πρόγραμμα AutoCAD, προκειμένου να γίνει κατάλληλη επεξεργασία των νομέων, αλλά και της συνολικής γεωμετρίας του πλοίου.

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η γενική διάταξη του πλοίου (General Arrangement), όπου μπορούμε να παρατηρήσουμε τις γεωμετρικές ιδιαιτερότητες που συντελούν τόσο στο Seakeeping, όσο και στην απόδοση της πρόωσης, όπως η χρήση βολβοειδούς πλώρης.



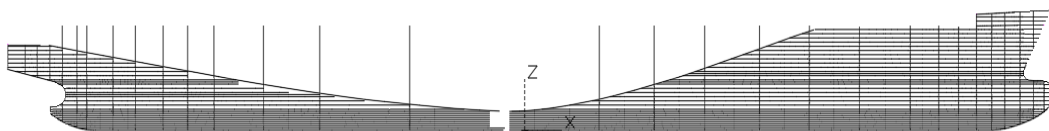
Σχήμα 2.1: General Arrangement του υπο μελέτη Containership



Σχήμα 2.2: Containership

Έπειτα, για κάθε κατάσταση φόρτωσης που ήταν επιθυμητό να μελετηθεί, απαιτούνταν κατάλληλες τροποποιήσεις στα σχέδια του πλοίου και τον αριθμό των νομέων, χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα AutoCAD. Πιο συγκεκριμένα, επιλέγοντας καθορισμένο συνδυασμό διαγωγής – βυθισμάτων για την υπό μελέτη κατάσταση, διακρίναμε ποιοι νομείς βρίσκονταν εντός, και ποιοι εκτός της θάλασσας. Ταυτόχρονα, το ενδιαφέρον επικεντρώθηκε στον τρόπο διακριτοποίησης των νομέων του πλοίου με γεωμετρικές ιδιαιτερότητες, όπως ο βολβός.

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. Το γεγονός ότι τα σημεία κάθε νομέα ισαπέχοντα, προσέφερε τη δυνατότητα περιγραφής της γάστρας με μεγάλη ακρίβεια. Το σύνολο όλων των γεωμετρικών συντεταγμένων που συγκεντρώθηκε, αποτέλεσε αρχείο εισόδου για το υπολογιστικό πρόγραμμα FRANK, το οποίο χρησιμοποιήθηκε στη συνέχεια. Το πρόγραμμα αυτό, όπως θα περιγραφεί αναλυτικά παρακάτω, συντελεί στον προσδιορισμό της πρόσθετης αντίστασης λόγω κυματισμού.



Σχήμα 2.3: Containership – AutoCAD - 31 frames

2.2 Καταστάσεις φόρτωσης

Λαμβάνοντας ένα μεγάλο όγκο μετρήσεων και καταγραφών, επιλέξαμε να ασχοληθούμε εκτενέστερα με δυο συγκεκριμένες καταστάσεις φόρτωσης. Οι καταστάσεις αυτές επιλέχθηκαν τόσο ποσοτικά, όσο και ποιοτικά. Πιο συγκεκριμένα, το πλοίο παρουσίαζε τους συγκεκριμένους συνδυασμούς διαγωγής – βυθισμάτων για μεγάλο αριθμό καταγραφών, επομένως και για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Ταυτόχρονα, οι καταστάσεις που επιλέχθηκαν, αποτελούν σημαντικό αντικείμενο μελέτης για τον τύπο του πλοίου που εξετάσαμε, δηλαδή ένα σύγχρονο containership.

Η πρώτη αναφέρεται στην κατάσταση πλήρους φόρτωσης του πλοίου, δηλαδή στη Full Load ή FL κατάσταση, ενώ η δεύτερη σε μια ενδιάμεση κατάσταση φόρτωσης, στην οποία θα αναφερόμαστε ως Half Load ή HL για το υπόλοιπο της συγκεκριμένης εργασίας.

Τα βασικά χαρακτηριστικά της κάθε κατάστασης παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα:

Κατάσταση	<u>Full Load (FL)</u>	<u>Half Load (HL)</u>
Tfore (m)	14.255	11.458
Tmean(m)	14.236	12.127
Taft (m)	14.217	12.795
Trim = Tfore- Taft (m)	0.038	-1.337
Displacement (tn)	132113.2	108466.6
C_b	0.6426	0.6251

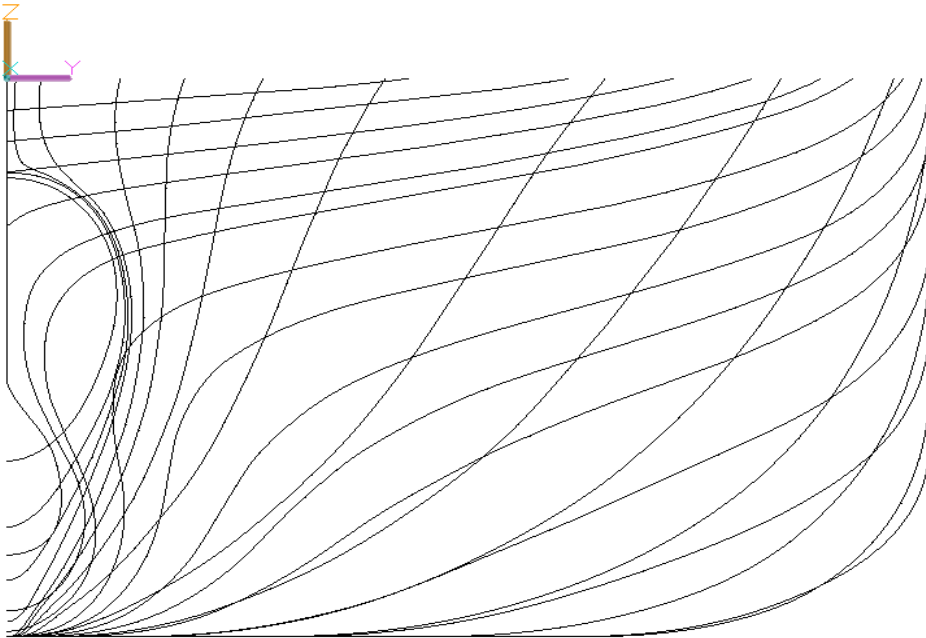
Πίνακας 2.2: Βασικά χαρακτηριστικά καταστάσεων FL και HL

2.3 Διαγράμματα Bodyplan

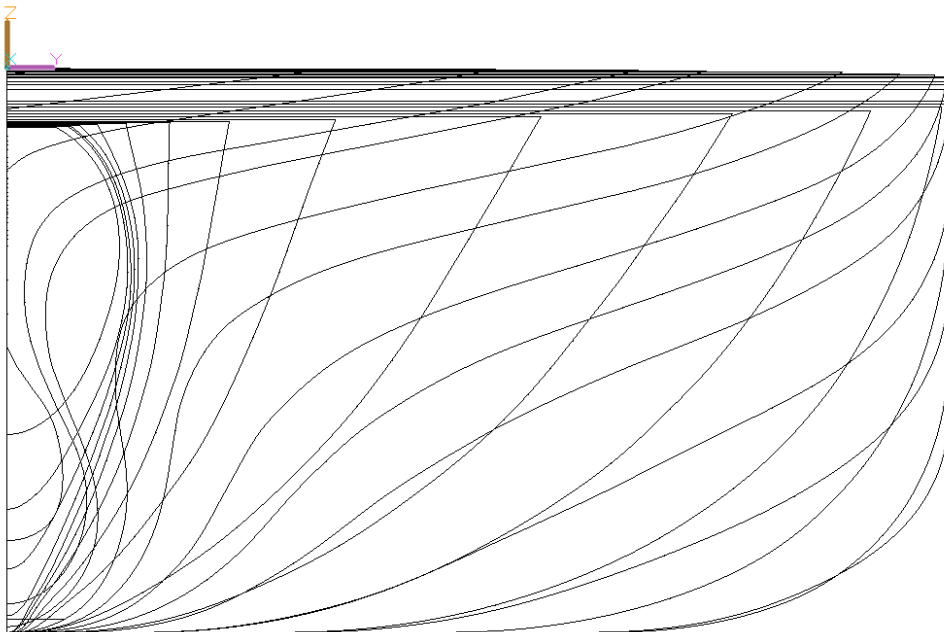
Θέλοντας να μελετήσουμε τις γραμμές του πλοίου, επιδιώξαμε να τις προβάλλουμε γραφικά, ώστε αφενός να έχουμε μια γραφική απεικόνιση των νομέων του πλοίου, κι αφετέρου, να εντοπίσουμε τυχόν σφάλματα κατά την εξαγωγή των συντεταγμένων από το AutoCAD. Η ανάλυση ξεκίνησε θέτοντας ως background το General Arrangement του πλοίου στο AutoCAD. Στη συνέχεια, με χρήση 3D Polyline γραμμών, έγινε περιγραφή της πλάγιας όψης ολόκληρου του πλοίου, συμπεριλαμβανομένου του βολβού. Η τρόπιδα προσεγγίστηκε με μια ενιαία γραμμή στη baseline του πλοίου.

Έπειτα, ο πραγματικός αριθμός των νομέων ελαττώθηκε σημαντικά και τελικά, το πλοίο μελετήθηκε με 31 νομείς. Ο αριθμός αυτός ήταν βασική προ-απαιτήση, προκειμένου να χρησιμοποιηθεί το πρόγραμμα FRANK, το οποίο μπορεί να υλοποιήσει υπολογισμούς με περιορισμένο αριθμό νομέων. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ο κάθε νομέας υποδιαιρέθηκε σε 27 ισαπέχοντα διαστήματα, δίνοντας τη δυνατότητα περιγραφής με συνολικά 28 σημεία. Γνωρίζοντας τη διαμήκη θέση του κάθε νομέα (άξονας x), ήταν εφικτό να πάρουμε τις συντεταγμένες (y,z) για διάφορα σημεία, προκειμένου να περιγράψει η γάστρα με ακρίβεια. Με τον τρόπο αυτό, προέκυψε ένα σύνολο συντεταγμένων (y,z) ανά νομέα (x).

Ανάλογα με τα βυθίσματα και τη διαγωγή της κατάστασης που μελετούσαμε κάθε φορά, σχεδιάστηκε μια ευθεία γραμμή, η οποία αντιπροσώπευε την ίσαλο. Το σύνολο των σημείων που βρίσκονταν πάνω από την ίσαλο γραμμή αφαιρέθηκαν και το ενδιαφέρον επικεντρώθηκε σε πρώτο χρόνο αποκλειστικά στα βυθισμένα σημεία. Από το σχεδιαστικό πρόγραμμα AutoCAD, προέκυψαν οι ακόλουθες γραφικές απεικονίσεις των νομέων της γάστρας (Body Plan), αρχικά για τη Full Load κι έπειτα για τη Half Load κατάσταση.

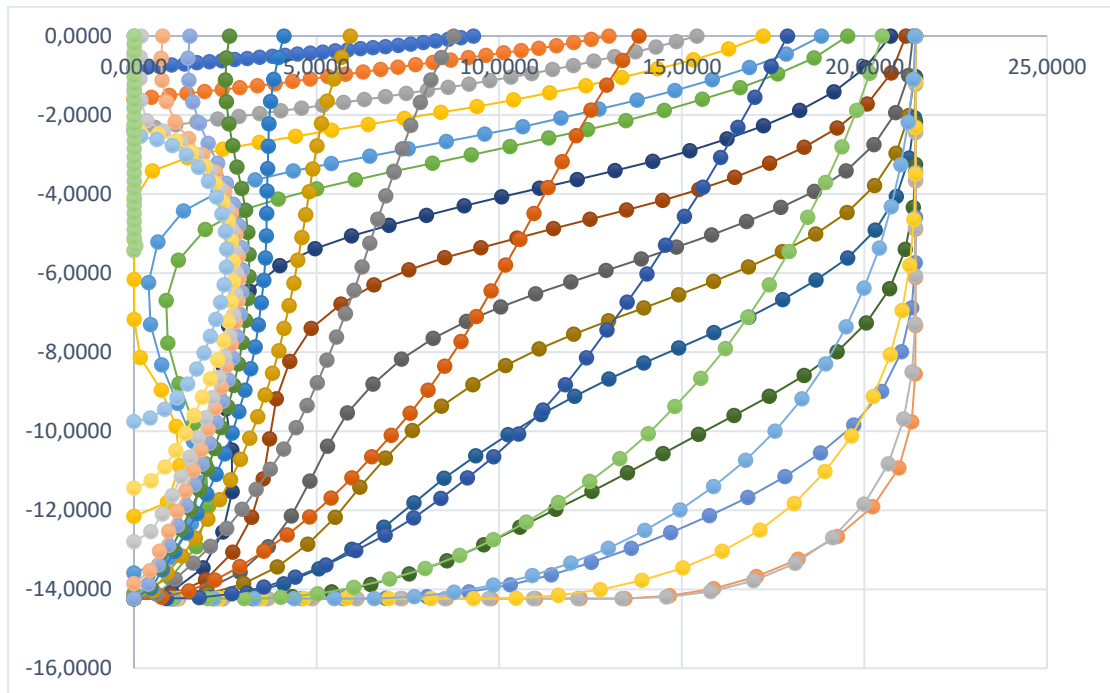


Σχήμα 2.4 : AutoCAD – Full Load

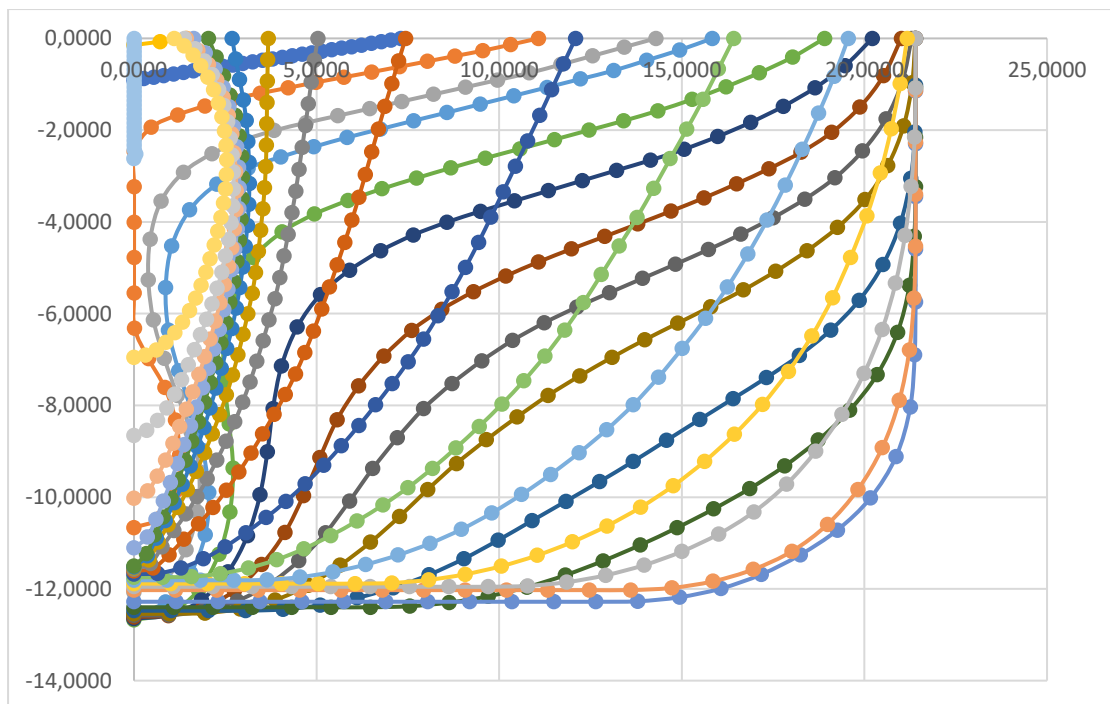


Σχήμα 2.5 : AutoCAD - Half Load

Οι ακριβείς συντεταγμένες των διαφόρων σημείων της γάστρας, οι οποίες εξήχθησαν από το AutoCAD όπως αναφέρθηκε παραπάνω, επεξεργάστηκαν κατάλληλα στο υπολογιστικό πρόγραμμα Excel, προκειμένου να γίνει εκ νέου απεικόνιση των νομέων της γάστρας, για τις δύο υπό μελέτη καταστάσεις. Έτσι, προέκυψαν τα ακόλουθα γραφήματα από το excel:



Σχήμα 2.6: Body plan – Full Load



Σχήμα 2.7: Body plan – Half Load

Ολοκληρώνοντας, αξίζει να σημειωθεί ότι το σχεδιαστικό πρόγραμμα AutoCAD χρησιμοποιήθηκε επιπρόσθετα στα επόμενα στάδια της μελέτης, καθώς συνέβαλε στον προσδιορισμό κι άλλων σημαντικών γεωμετρικών μεγεθών, με σκοπό να υπολογιστούν όλες οι συνιστώσες της συνολικής αντίστασης πλοίου. Τα απαιτούμενα μεγέθη περιλαμβάνουν την πλάγια βρεχόμενη επιφάνεια κάτω από την ίσαλο, την επιφάνεια του πηδαλίου, την ελεύθερη επιφάνεια σε πρόωση και πλάγια όψη του πλοίου, καθώς και τη θέση της γέφυρας.

2.4 Model Test

Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές μοντέλου σε ήρεμο νερό για το συγκεκριμένο containership 8530 TEU. Η αναφορά που προέκυψε μετά την ολοκλήρωση των δοκιμών, παρουσιάζει αποτελέσματα για την πραγματική έλικα σχεδιασμού (design propeller), σε τρία διαφορετικά βυθίσματα και πέντε διαφορετικές συνθήκες διαγωγής για κάθε βύθισμα. Για τις δοκιμές μοντέλου, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο HSVA-model No.486, το οποίο ήταν κατασκευασμένο από ξύλο, σε αναλογία κλίμακας 1:36.11 .

Οι κύριες διαστάσεις τόσο του πλοίου, όσο και του μοντέλου προσδιορίστηκα ως εξής:

	Ship	Model
Number	—	4816
Index	—	1001
L_{PP}	320.00 m	8861.8 mm
B_{WL}	42.80 m	1185.3 mm
$T_{Light\ Loaded}$	10.50 m	290.8 mm
T_{Design}	13.00 m	360.0 mm
$T_{Scantling}$	14.65 m	405.7 mm
$C_{B,Light\ Loaded}$		0.6087
$C_{B,Design}$		0.6430
$C_{B,Scantling}$		0.6650
$\nabla_{Light\ Loaded}$ (excl. appendages)	87543 m ³	1.8593 m ³
∇_{Design} (excl. appendages)	114476 m ³	2.4313 m ³
$\nabla_{Scantling}$ (excl. appendages)	133432 m ³	2.8339 m ³

Πίνακας 2.3: Model tests - Κύριες Διαστάσεις Πλοίου και μοντέλου

Σύμφωνα με την αναφορά, ένα διαχωριστικό διάφραγμα τοποθετήθηκε στο μοντέλο. Προκειμένου να γίνει προσομοίωση τυρβώδους ροής γύρω από το μοντέλο, τοποθετήθηκε μια λωρίδα άμμου πλάτους 60mm. Επιπλέον, μια λωρίδα άμμου πλάτους 30mm τοποθετήθηκε κοντά στο βολβό της πλώρης.

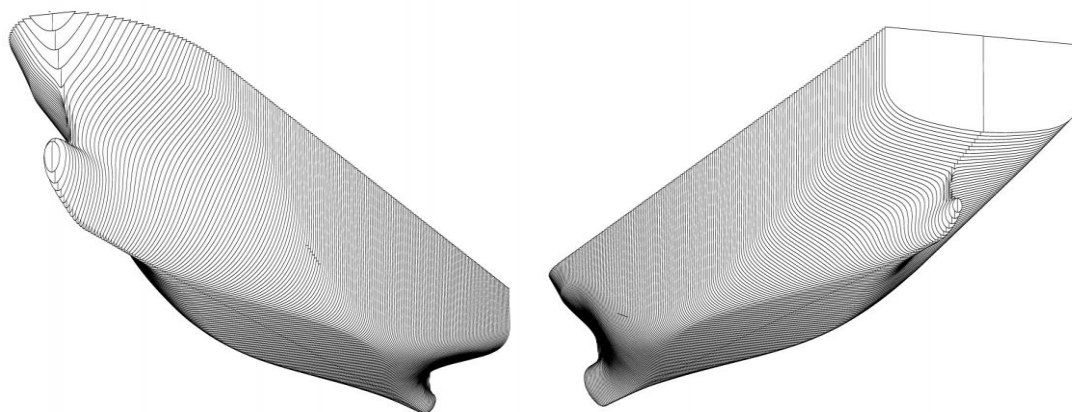
Στη συνέχεια, ένα φωτογραφικό πλέγμα με κατακόρυφη απόσταση 40.00mm (ή 1445mm σε πλήρη κλίμακα) εφαρμόστηκε στην ίσαλο γραμμή των 13.00m , έτσι ώστε να γίνει εκτίμηση του ύψους κυματισμού στην πλώρη και στην πρύμνη αντίστοιχα.

Για τις συγκεκριμένες δοκιμές μοντέλου, χρησιμοποιήθηκε η έλικα HSVA No. 2725. Τα κύρια χαρακτηριστικά της έλικας δίνονται παρακάτω:

	Ship	Model
Propeller No.	—	2725
Diameter	8.800 m	243.70 mm
Hub diameter ratio		0.188
Mean pitch ratio		0.977
Disk area ratio		0.905
Material	—	Brass
Sense of rotation		Right
Number of blades		6
Type		Fixed pitch

Πίνακας 2.4: Model tests - Κύρια χαρακτηριστικά έλικας

Παρακάτω παρατίθεται μια γραφική απεικόνιση τόσο του πηδαλίου, όσο και του βολβού του μοντέλου.



Σχήμα 2.8: Τρισδιάστατη απεικόνιση μοντέλου

Έπειτα, σύμφωνα με την αναφορά από τα model test, το σύνολο των δοκιμών που υλοποιήθηκαν για τους διάφορους συνδυασμούς διαγωγής – βυθισμάτων, αναφέρεται σε εύρος ταχυτήτων πλεύσης μεταξύ 16kn και 22kn.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών που συλλέχθηκαν, αναλύθηκαν σύμφωνα με την τυποποιημένη μέθοδο συσχέτισης HSVA (HSVA Standard Correlation Method). Ο συντελεστής αντίστασης υπολογίστηκε με βάση τη μέθοδο της HSVA και ακολούθησε την ανοχή συσχέτισης ως εξής:

Mean Draught	CA
10.50 m	-0.000053
13.00 m	-0.000084
14.65 m	-0.000107

Πίνακας 2.5: Ανοχή συσχέτισης

Οι πρόσθετες διατάξεις και τα ανοίγματα του πλοίου πραγματικής κλίμακας, όπως τα παρατροπίδια (bilge keels), τα ανοίγματα των bow thrusters κ.λπ., δεν τοποθετήθηκαν στο μοντέλο. Ωστόσο, στις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν, η αντίσταση των παραπάνω διατάξεων προσεγγίστηκε θεωρητικά, με την προσθήκη πρόσθετης αντίστασης τριβής για τις προβλέψεις δοκιμών και υπηρεσίας.

Ολοκληρώνοντας, υλοποιήθηκαν δοκιμές, καθώς και προβλέψεις δοκιμών και υπηρεσίας, με μετωπικό άνεμο. Το εύρος του ανέμου κυμάνθηκε από μηδέν έως έξι Beaufort. Επισημαίνεται επιπρόσθετα στην αναφορά, ότι για τις προβλέψεις υπηρεσίας, λήφθηκε υπόψη ένα περιθώριο θάλασσας 15% (PD).

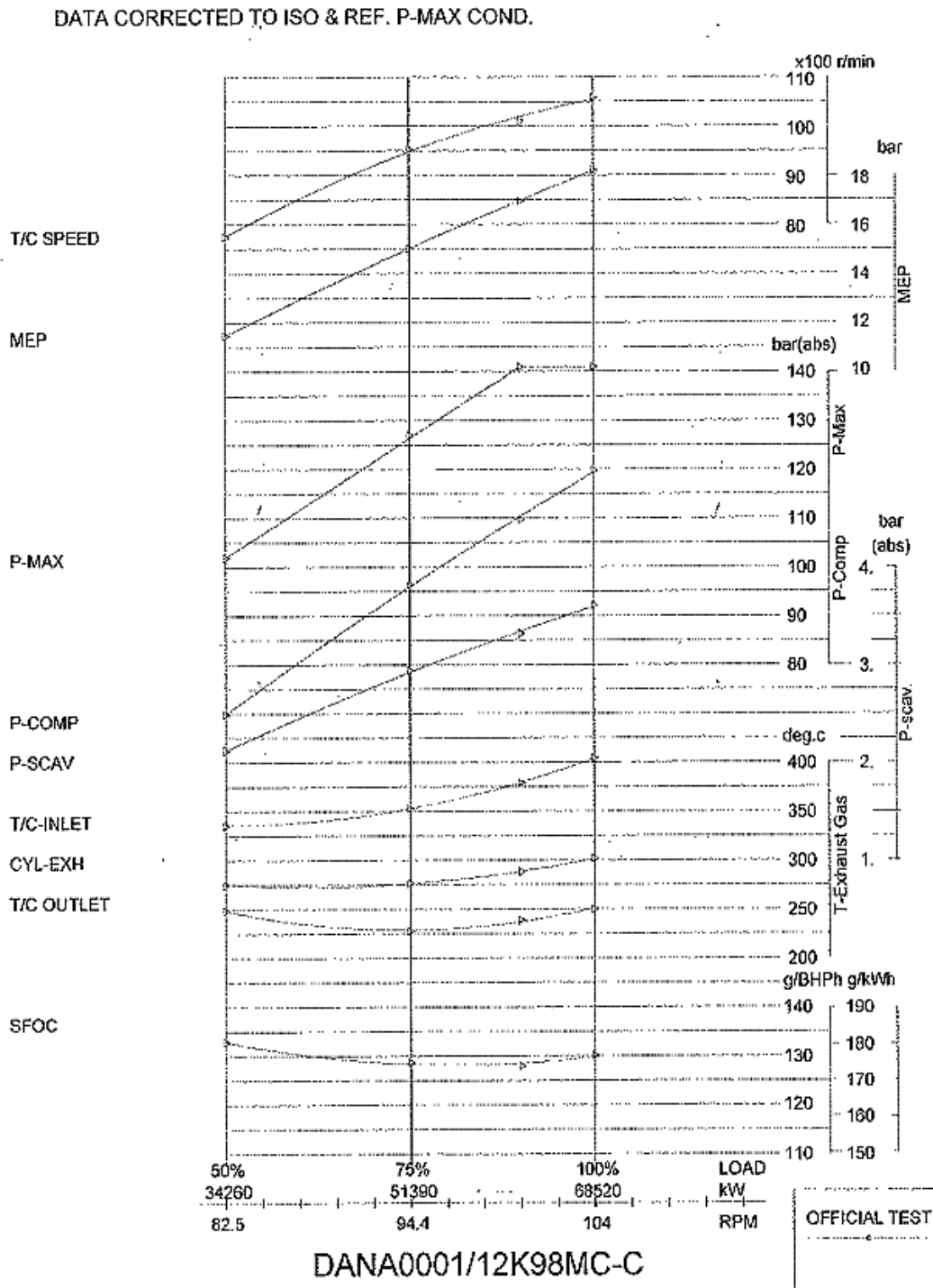
2.5 Shop Test

Οι δοκιμές για την κύρια προωστήρια μηχανή του πλοίου είναι ιδιαίτερα σημαντικές. Τα βασικά χαρακτηριστικά της κύριας μηχανής του πλοίου που μελετήθηκε είναι τα εξής:

MAKER	DOOSAN - MAN
TYPE	K98MC-C
NUMBER OF CYLINDERS	12
PISTON STROKE (mm)	2400
LAYOUT POWER (kW)	68520
LAYOUT SPEED (rpm)	104.0
ROTATIONAL DIRECTION	CLOCKWISE
FIRING ORDER	1-8-12-4-2-9-10-5-3-7-11-6
LCV OF FUEL OIL (kcal/kg)	10028

Πίνακας 2.6: Shop test

Στον παραπάνω πίνακα, ο δείκτης LCV είναι η κατώτερη θερμογόνος δύναμη (Lower Calorific Value) του πετρελαίου που χρησιμοποιήθηκε στις δοκιμές της κύριας μηχανής στα shop trials. Γενικότερα, αυτός ο δείκτης παίζει σημαντικό ρόλο στον προσδιορισμό της τελικής κατανάλωσης. Πολλές φορές απαιτούνται σχετικές διορθώσεις, προκειμένου να γίνει υπολογισμός της κατανάλωσης πετρελαίου των ημερήσιων καταγραφών (noon reports), όπου συχνά εντοπίζεται διαφορετικό LCV από αυτό των Shop Trial. Έπειτα, ακολουθεί το διάγραμμα καμπυλών κινητήρα από τα Shop Test, διορθωμένο κατά ISO.



Σχήμα 2.9: Καμπύλες κινητήρα από Shop Test

Οι κατασκευαστές πραγματοποίησαν επτά δοκιμές της κύριας μηχανής σε διαφορετικές ισχύς κινητήρα, δίνοντας τις αντίστοιχες ειδικές καταναλώσεις πετρελαίου (SFOC) για την καθεμία. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα.

LOAD Power %	25	50	75	90	100 (1)	100 (2)	110
SFOC (g/kW*h) (measured)	193,75	181,78	176,43	176,32	179,55	180,18	185,13
SFOC (g/kW*h) (ISO condition)	191,85	179,87	173,85	173,39	175,91	176,42	181,21

Πίνακας 2.7: Ειδική κατανάλωση καυσίμου

Παρατηρούμε ότι οι μετρούμενες τιμές SFOC είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες τιμές σε ISO Condition. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι μετρούμενες τιμές αντιστοιχούν σε καύσιμο με χαμηλότερη τιμή του δείκτη LCV.

2.6 Online δεδομένα

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία βασίζονται σε πραγματικές ενδείξεις του εξοπλισμού μέτρησης υψηλής ακρίβειας που διαθέτει το πλοίο. Το σύνολο αυτών των δεδομένων κοινοποιούνται απευθείας (online) στα κεντρικά γραφεία της εταιρίας. Πιο συγκεκριμένα, δόθηκαν ωριαίες καταγραφές, σε εύρος έξι μηνών, πριν και μετά το δεξαμενισμό, για διάφορες παραμέτρους που επιδρούν σημαντικά στην απόδοση του πλοίου. Οι παράμετροι αυτοί περιλαμβάνουν:

- Ταχύτητα πλοίου (SOG και STW)
- Πρυμναίο, μέσο και πρωραίο βύθισμα
- Στροφές κινητήρα
- Ροπή
- Ταχύτητα ανέμου
- Sea Force (βάσει κλίμακας Douglas)
- Sea Direction (βάσει κλίμακας Douglas, 0° στην πλώρη)
- Ισχύς άξονα
- Ωριαία κατανάλωση καυσίμου σε λίτρα

Επεξεργαστήκαμε το μεγάλο όγκο δεδομένων με τέτοιο τρόπο ώστε να συνθέσουμε ένα ενιαίο σύνολο πληροφοριών για την κάθε κατάσταση, με βάση την ημέρα και την ώρα. Έπειτα, επιλέξαμε να μελετήσουμε καταστάσεις, οι οποίες παρουσίαζαν ιδιαιτερότητες ως προς κάποια, ή κάποιες από τις παραπάνω παραμέτρους, όπως η ταχύτητα ανέμου, η γωνία πρόσπτωσης ανέμου, η ταχύτητα του πλοίου, οι στροφές της μηχανής ή το σημαντικό ύψος κύματος.

2.7 Ημερήσιες καταγραφές (Noon Reports)

Η σημασία του προσδιορισμού των παραμέτρων που επιδρούν σημαντικά στην απόδοση του πλοίου, αναδείχθηκε μεγάλη ήδη από πολύ νωρίς. Για το λόγο αυτό, οι τιμές των επιμέρους παραμέτρων καταγράφονταν, προκειμένου να κοινοποιηθούν αργότερα στο τεχνικό τμήμα της διαχειρίστριας εταιρίας, όπου πρόκειται να γίνει αξιολόγηση. Η διαδικασία αυτή καλείται ως Noon Reports. Πρόκειται ουσιαστικά για ένα δελτίο δεδομένων, το οποίο συντάσσεται από τον αρχιμηχανικό του πλοίου σε καθημερινή βάση. Η έκθεση αναφέρει τη θέση του πλοίου και άλλα σχετικά τυποποιημένα δεδομένα, τα οποία αφορούν την απόδοση του πλοίου, με βάση τη ταχύτητά του, αλλά και περιβαλλοντικές δυνάμεις, συμπεριλαμβανομένων των καιρικών συνθηκών.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, η πλειοψηφία των πληροφοριών μάς δόθηκε με βάση τα online δεδομένα-ενδείξεις του εξοπλισμού μέτρησης που διαθέτει το πλοίο. Ωστόσο, απαιτούνταν επιπρόσθετες πληροφορίες, κυρίως ως προς τον καιρό, τις οποίες λάβαμε από τα noon reports. Η συγκεκριμένη εταιρία καταχωρεί τις πληροφορίες για τον καιρό με βάση την κλίμακα Douglas, τόσο για τη Sea Force/Direction, όσο και για τη Swell Force/Direction. Όπως πρόκειται να αναλυθεί εκτενέστερα παρακάτω, λάβαμε υπόψη την επίδραση των κυματισμών όχι μόνο λόγω swell, αλλά και λόγω πνέοντος ανέμου, κάνοντας υπέρθεση των επιμέρους κυματισμών, ώστε τελικά να προκύψει το πραγματικό σημαντικό ύψος κύματος.

2.8 Πρόγραμμα FRANK

Το πρόγραμμα FRANK χρησιμοποιεί ως είσοδο τις συντεταγμένες των σημείων που βρίσκονται στο περίγραμμα μιας εγκάρσιας τομής της γάστρας. Έπειτα, αξιοποιώντας τις συντεταγμένες των σημείων τού κάθε νομέα, υπολογίζει το διαδιάστατο δυναμικό για κάθε μία από τις κινήσεις Heave, Sway και Roll του πλοίου, καθώς ορίζονται κατανομημένες πηγές σε όλο το περίγραμμα της διατομής. Τέλος, μέσω της ολοκλήρωσης, υπολογίζει τους υδροδυναμικούς παράγοντες της πρόσθετης μάζας νερού και της απόσβεσης, για δεδομένη συχνότητα.

Στην περίπτωση του πλοίου που εξετάζουμε, ο αριθμός των νομέων ελαττώθηκε σημαντικά και τελικά το πλοίο μελετήθηκε με 31 νομείς. Ο αριθμός αυτός ήταν βασική προ-απαίτηση, προκειμένου να χρησιμοποιηθεί το πρόγραμμα FRANK, καθώς είναι σε θέση να κάνει υπολογισμούς μέχρι 32 νομείς. Για την κατάσταση που μελετούσαμε κάθε φορά, το ενδιαφέρον επικεντρωνόταν κυρίως στα βυθισμένα σημεία. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ο κάθε νομέας υποδιαιρέθηκε σε 27 ισαπέχοντα διαστήματα κι έτσι δημιουργήθηκε ένα σύνολο συντεταγμένων (y,z) ανά νομέα (x) . Εισάγοντας τις συντεταγμένες των σημείων που περιγράφουν τη γάστρα, το σημαντικό ύψος κύματος, τη γωνία συνάντησης του πλοίου με τα κύματα, την ταχύτητα του πλοίου (V_{ship}) καθώς και τη συχνότητα κυματισμού που συναντούσε, ήμασταν σε θέση να “τρέξουμε” το πρόγραμμα FRANK, για μια συγκεκριμένη κατάσταση. Θα αναφερθούμε εκτενέστερα στην ενότητα 3.3 στον τρόπο με τον οποίο υπολογίστηκε τελικά η συνολική πρόσθετη αντίσταση λόγω κυματισμού, αξιοποιώντας τις δυνατότητες του FRANK και λαμβάνοντας υπόψη το πραγματικό σημαντικό ύψος κύματος $H_{1/3}$.

3. Αντίσταση πλοίου

3.1 Γενικές έννοιες

Η θεωρία της αντίστασης πλοίου αποτέλεσε αντικείμενο μελέτης για πολλούς ναυπηγούς μηχανικούς, προκειμένου να γίνει πρόβλεψη της απόδοσής του, μέσω κατάλληλων δοκιμών με μοντέλα (model test). Όπως είναι γνωστό, το νερό δεν είναι ένα ιδανικό ρευστό, και ως εκ τούτου, κάθε ημιβυθισμένο σώμα σε νερό θα δεχτεί αντίσταση. Η αντίσταση αυτή οφείλεται κυρίως σε απώλειες ενέργειας λόγω της αλληλεπίδρασης του πλοίου με το νερό. Για να γίνει πιο εύκολα κατανοητή, θα μπορούσαμε να θεωρήσουμε ότι η αντίσταση του πλοίου είναι η δύναμη που πρέπει να δίνει η προπέλα στο πλοίο διαρκώς, προκειμένου να συνεχίζει να κινείται με την ίδια ταχύτητα.

Η συνολική αντίσταση (C_T) που δέχεται το πλοίο αποτελείται από την ιξώδη αντίσταση (C_v) και την αντίσταση των κυμάτων (C_w). Η πρώτη αναλύεται σε αντίσταση τριβής, η οποία υπολογίζεται με ολοκλήρωση των εφαπτομενικών τάσεων στην επιφάνεια της γάστρας, καθώς και σε αντίσταση πίεσης λόγω συνεκτικότητας, η οποία υπολογίζεται με ολοκλήρωση των κάθετων δυνάμεων στην επιφάνεια της γάστρας. (Politis,2018) Έπειτα, η αντίσταση κυματισμού συναντάται κυρίως σε πλοία εκτοπίσματος σε μεγαλύτερες ταχύτητες. Είναι συνάρτηση της μορφής της γάστρας και ουσιαστικά είναι αντίσταση πίεσης.

Επιπρόσθετα, σε ένα πλοίο υπάρχουν και δευτερεύουσες αντιστάσεις, όπως η αντίσταση θραύσεως κύματος, παρελκομένων, η αντίσταση αέρα, η πρόσθετη αντίσταση λόγω στροφής, οι οποίες μαζί με την αντίσταση των κυμάτων, αποτελούν την υπολειπόμενη αντίσταση. Η υπολειπόμενη αντίσταση προκαλείται από την κατανομή της πίεσης που αναπτύσσεται γύρω από το κύτος, λόγω των κυμάτων και των στροβίλων που δημιουργούνται από την κίνηση του πλοίου. Ο Froude ασχολήθηκε εκτεταμένα με τον υπολογισμό αυτού του είδους την αντίσταση και η συνεισφορά του έργου του παραμένει τεράστια. (Molland et al.,2011) Μέχρι και σήμερα, οι ναυπηγοί είναι σε θέση να κάνουν κάποιες χρήσιμες εκτιμήσεις αντίστασης των πλοίων μέσω της μεθόδου του. Δεδομένου ότι η αντίσταση ενός πλοίου πλήρους κλίμακας δεν μπορεί να μετρηθεί άμεσα, η πηγή ουσιαστικής γνώσης προέρχεται αποκλειστικά από δοκιμές με μοντέλα που κατασκευάζονται για το σκοπό αυτό. Οι δοκιμές μοντέλου παραμένουν το σημαντικότερο εργαλείο στη διάθεση των μηχανικών, προκειμένου αφενός να γίνει πρόβλεψη, κι αφετέρου, προσπάθεια για περαιτέρω μείωση της αντίστασης που συναντούν τα πλοία.

Μετά την ολοκλήρωση των κατάλληλων δοκιμών με μοντέλα, ακολουθούν οι δοκιμές στη θάλασσα (sea trials). Εφόσον το νέο πλοίο έχει πλέον κατασκευαστεί, οι αρχές του ναυπηγείου εκτελούν δοκιμές, έτσι ώστε να γίνει επαλήθευση αντίστασης του πλοίου, εξετάζοντας την ισχύ του άξονα (Shaft Horsepower) της κύριας προωστήριας μηχανής, σε σχέση με τη σταθερή ταχύτητα του πλοίου που έχει επιτευχθεί. (Lewis,1988) Στην περίπτωση που ο συνδυασμός των δύο αυτών παραμέτρων είναι εκτός των απαιτήσεων και των προτύπων, το ναυπηγείο καλείται να αποζημιώσει τον πλοιοκτήτη αδρά. Είναι εμφανές ότι το εκάστοτε ναυπηγείο προσπαθεί να αποφεύγει τέτοιες δυσάρεστες καταστάσεις και να παραμένει στην ασφάλή μεριά κάθε φορά, καθώς οι δοκιμές πραγματικής κλίμακας είναι αδύνατο να πραγματοποιηθούν, κυρίως λόγω του τεράστιου κόστους του χάλυβα της γάστρας.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, προσεγγίσαμε τη συνολική αντίσταση που δέχεται το πλοίο, αναλύοντας και μελετώντας τις επιμέρους συνιστώσες της:

- Αντίσταση σε ήρεμο νερό
- Πρόσθετη αντίσταση κυματισμού
- Αντίσταση ανέμου
- Αντίσταση παρελκομένων

Στη συνέχεια, ακολουθεί λεπτομερής περιγραφή της κάθε συνιστώσας ξεχωριστά, καθώς και του τρόπου με τον οποίο την εξετάσαμε.

3.2 Αντίσταση σε ήρεμο νερό

Η συνολική αντίσταση που δέχεται το πλοίο μπορεί επίσης να αναφέρεται ως αντίσταση σε ήρεμο νερό (Calm Water Resistance), απουσία κυματισμού και ανέμου. Για δεδομένη ταχύτητα, η αντίσταση σε ήρεμο νερό είναι γενικά σταθερή και εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένης της ταχύτητας του πλοίου. (Nastia,2017) Επιπρόσθετα, η μορφή της γάστρας, τα γενικά χαρακτηριστικά του πλοίου, οι θερμοκρασίες του νερού και το ιξώδες επηρεάζουν σημαντικά την αντίσταση αυτή.

Η καμπύλη της αντίστασης σε ήρεμο νερό συναρτήσει της ταχύτητας του πλοίου, στην πραγματικότητα δεν είναι γραμμική, αλλά έχει την τάση να αυξάνεται σημαντικά, καθώς το πλοίο κινείται σε υψηλότερες ταχύτητες. Αυτό είναι αποτέλεσμα της μη γραμμικής αύξησης της αντίστασης των κυμάτων, καθώς σε υψηλότερες ταχύτητες, το πλοίο δαπανά όλο και περισσότερη ενέργεια. Η ενέργεια αυτή διαχέεται και μετατρέπεται σε παραγόμενα κύματα.

Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, η αντίσταση σε ήρεμο νερό είναι η δύναμη αντίστασης για ένα πλοίο που κινείται προς τα εμπρός, σε ήρεμο νερό, χωρίς κυματισμούς λόγω swell και ακίνητο αέρα. Σε αυτή την περίπτωση, τα σωματίδια του ρευστού προσκολλώνται στο ημιβυθισμένο τμήμα του, με αποτέλεσμα το σχηματισμό ενός "οριακού στρώματος", όπου η ροή αλλάζει γρήγορα ταχύτητα. Δύο μορφές αντίστασης συμβαίνουν ως αποτέλεσμα του ιξώδους, αποτελώντας την ιξώδη αντίσταση. Αυτές είναι οι η αντίσταση τριβής και η αντίσταση ιξώδους πίεσης. (MAN,2013) Για ένα containership, η αντίσταση τριβής ενδέχεται να αποτελεί περισσότερο από το μισό της συνολικής αντίστασης που δέχεται το πλοίο σε ήρεμο νερό.

Στη συγκεκριμένη εργασία, ακολουθήσαμε μια λογική διαδικασία για τον υπολογισμό της αντίστασης σε ήρεμο νερό, τόσο για την Full Load (FL), όσο και για την Half Load (HL) κατάσταση. Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, έγινε η θεώρηση ότι η αντίσταση σε ήρεμο νερό είναι η κύρια συνιστώσα της συνολικής αντίστασης που δέχεται το σκάφος, καθώς το πλοίο που εξετάζουμε είναι ένα containership, με μεγάλο συντελεστή μπλοκ c_B (block coefficient). Από τα στοιχεία που είχαμε διαθέσιμα, το ενδιαφέρον επικεντρώθηκε στις δοκιμές μοντέλου (model test), για τα διάφορα βυθίσματα που πρόκειται να μας απασχολήσουν. Σκοπό αποτελεί ο προσδιορισμός της απαιτούμενης ισχύος άξονα (Shaft Horsepower - SHP) και έπειτα της αντίστασης του πλοίου, συναρτήσει της ταχύτητας με την οποία κινείται.

Για την κατάσταση FL έχουμε εκτόπισμα $\Delta_{full}=132113,2$ tn, ενώ για την κατάσταση HL $\Delta_{half}= 108466,6$ tn. Ανατρέχοντας στις τυπικές καταστάσεις φόρτωσης από το Trim and Stability Booklet, τα εκτοπίσματα για αυτές τις καταστάσεις διαφέρουν. Πιο συγκεκριμένα, το εκτόπισμα για την πρώτη κατάσταση είναι 133522 tn κι αντίστοιχα, 114566 tn για τη δεύτερη. Παρατηρείται επομένως μία σημαντική διαφορά. Προκειμένου να γίνει εκτίμηση των ζητούμενων μεγεθών και για χάρη απλούστευσης της ανάλυσης, επιλέξαμε να ασχοληθούμε με την πιο σημαντική παράμετρο, δηλαδή το εκτόπισμα του πλοίου. Τέλος, στην παρούσα εργασία δεν λάβαμε υπόψη την επίδραση των μεταβολών της θάλασσας και η γωνία διαγωγής.

Για τον τρόπο με τον οποίο το εκτόπισμα επηρεάζει την ισχύ άξονα, εφαρμόστηκε ο τύπος του Αγγλικού Ναυαρχείου. (Papanikolaou,2009) Έτσι, σε προωστήρια εγκατάσταση για αργόστροφο δίχρονο κινητήρα Diesel, εισάγεται ένας νέος συντελεστής C. Ο συντελεστής αυτός αναπτύχθηκε από το Βρετανικό Ναυαρχείο στις αρχές του 19ου αιώνα. Αναφέρεται ουσιαστικά σε ένα πηλίκο, όπου στον αριθμητή, το εκτόπισμα Δ υψώνεται εις τη δύναμη 2/3 και πολλαπλασιάζεται με την ταχύτητα πλεύσης εις τον κύβο, ενώ στον παρονομαστή βρίσκεται η ισχύς άξονα. Επομένως, ο συντελεστής C δίνεται από τη σχέση:

$$C = \frac{\Delta^{2/3} * V_{ship}^3}{SHP}$$

Στον παραπάνω τύπο, το εκτόπισμα Δ μετριέται σε tons, η ταχύτητα V σε knots και η ισχύς P (SHP) σε kW. (Babicz,2015) Οι τιμές του πηλίκου κυμαίνονται μεταξύ 400 και 600, ενώ όσο υψηλότερη είναι αυτή η τιμή, τόσο πιο οικονομικό είναι το πλοίο. Για ένα δεδομένο πλοίο, ο συντελεστής αυτός είναι περίπου σταθερός και ιδιαίτερα χρήσιμος, όταν απαιτούνται απλές εκτιμήσεις για ένα δεδομένο πλοίο. Δοθείσας της ταχύτητας V και του εκτοπίσματος Δ του πλοίου, γίνεται μια προσέγγιση της απαιτούμενης ισχύος άξονα SHP. Στην πραγματικότητα, ο συντελεστής αυτός δεν είναι σταθερός και μπορεί να θεωρηθεί ότι μεταβάλλεται γραμμικά, σύμφωνα με τη φαινόμενη ολίσθηση. Ωστόσο, στην παρούσα εργασία θα θεωρηθεί σταθερός, προκειμένου να γίνει ο υπολογισμός της απαιτούμενης μεταβολής της ισχύος, λόγω της διαφοράς των εκτοπισμάτων.

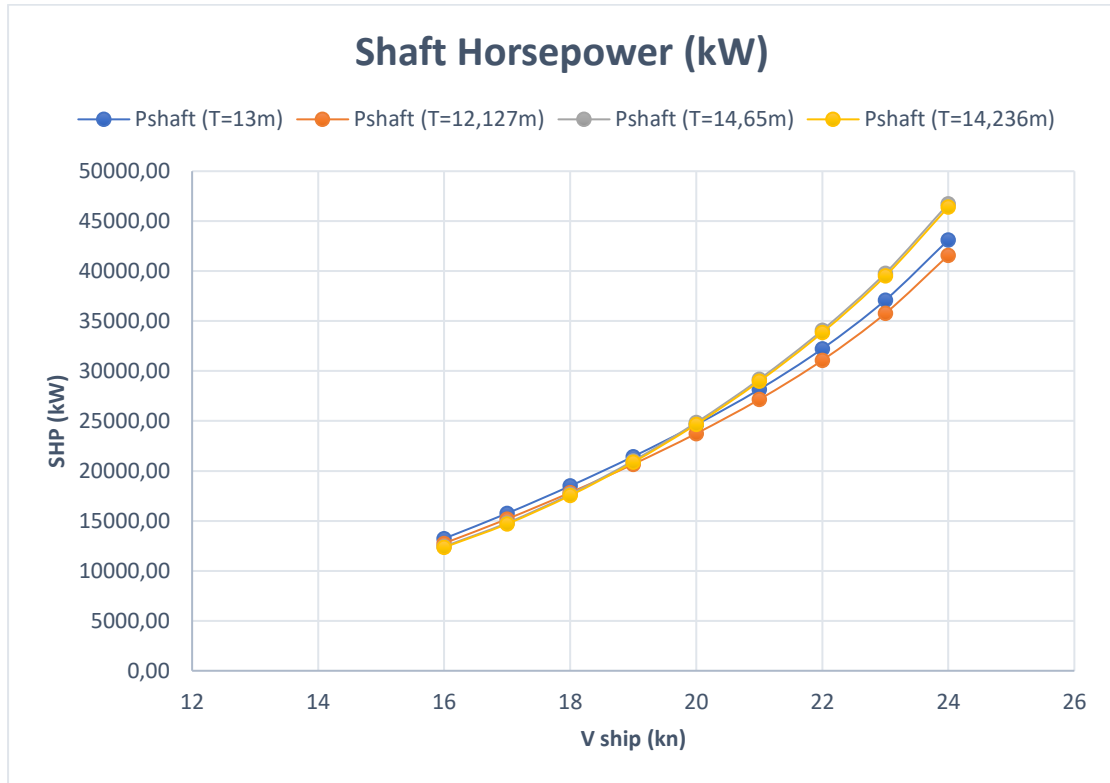
Η ισχύς που δίνεται στα model test του συγκεκριμένου πλοίου είναι η $P_{delivered}$, δηλαδή η ισχύς που βγαίνει αμέσως πριν την προπέλα. Διαιρώντας αυτή την ισχύ με ένα υποθετικό βαθμό απόδοσης αξονικού συστήματος $n_s=0.98$, προκύπτει η ισχύς άξονα:

$$SHP = \frac{P_{delivered}}{n_s}$$

Για την ίδια μετρούμενη ταχύτητα του πλοίου, σύμφωνα με τον κανόνα του Αγγλικού Ναυαρχείου, η Shaft Horsepower μπορεί να επεκταθεί από μια δεδομένη κατάσταση, σε μια άλλη με διαφορετικό εκτόπισμα, ως εξής:

$$SHP_1 = SHP_2 \times \left(\frac{\Delta_2}{\Delta_1}\right)^{2/3}$$

Στη συνέχεια, με βάση τα δεδομένα που είχαμε στη διάθεση μας, έγινε ο υπολογισμός της ζητούμενης Shaft Horsepower, για τις ακόλουθες καταστάσεις:



Σχήμα 3.1: Διάγραμμα SHP(kW) - V_{ship} (kn)

Παρατηρώντας το παραπάνω διάγραμμα, είναι εμφανές ότι προκύπτουν μικρές διαφορές της ισχύος άξονα, καθώς είναι περίπου 3% στην περίπτωση HL και κάτω από 0,5% για τη περίπτωση FL.

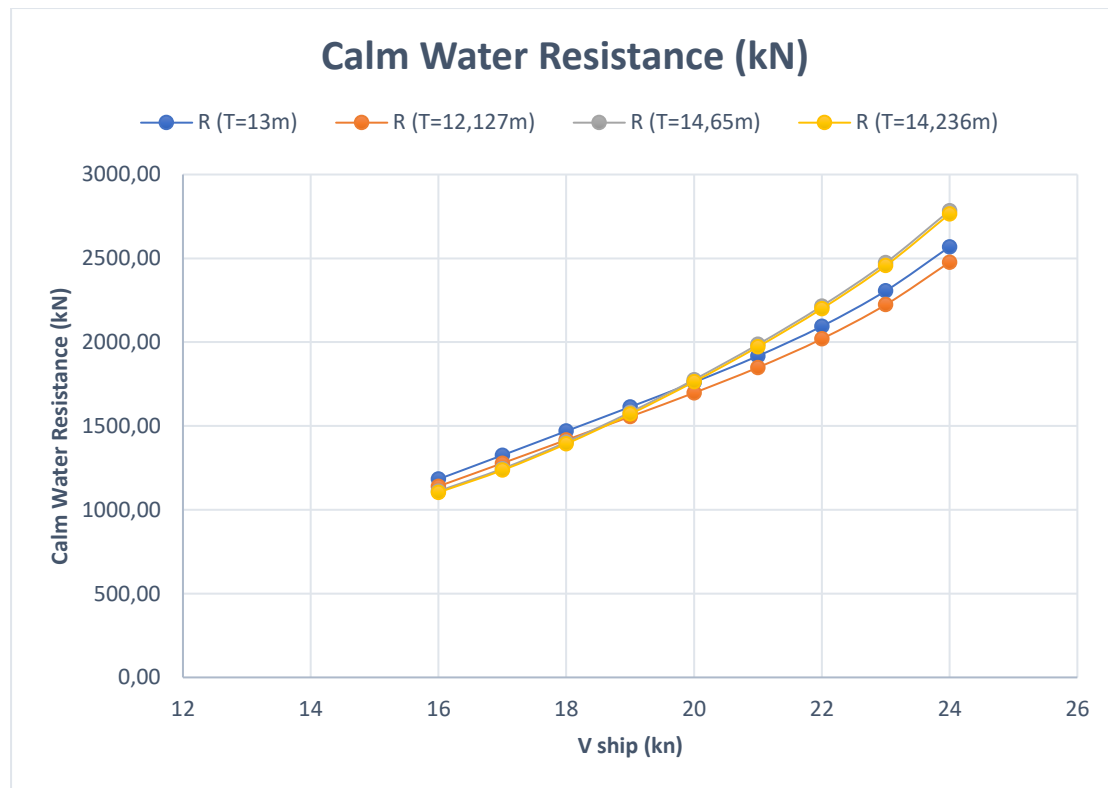
Έπειτα, οι τιμές της ισχύος θα πρέπει να εκφραστούν ως αντίσταση πλοίου. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω των αδιάστατων συντελεστών της πρόωσης πλοίου, οι οποίοι βρίσκονται στις δοκιμές μοντέλου. Πιο συγκεκριμένα, μας ενδιαφέρει ο βαθμός απόδοσης της γάστρας η_H , ο βαθμός απόδοσης περιστροφής η_R , ο βαθμός απόδοσης της έλικας σε ανοιχτό νερό η_0 και ακόμα, ο βαθμός απόδοσης μετάδοσης του άξονα η_S . Αξιοποιώντας τους συντελεστές αυτούς, προκύπτει η πραγματική ισχύς EHP (Effective Horsepower). Πρόκειται για την ισχύ που απαιτείται ώστε να κινηθεί το πλοίο, με όλα τα παρελκόμενα και σε συγκεκριμένη ταχύτητα, εν απουσία του συστήματος της προπέλας. Η EHP δίνεται από τη σχέση:

$$EHP = SHP \times \eta_H \times \eta_R \times \eta_0 \times \eta_S$$

Είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι οι παραπάνω συντελεστές μεταβάλλονται ανάλογα με την ταχύτητα που κινείται το πλοίο. Έτσι, η αντίσταση σε ήρεμο νερό ($R_{\text{calm water}}$ ή R_{cw}) προέκυψε (σε kilorond) από τη σχέση:

$$R_{cw} = \frac{EHP \times 75}{V_{ship}}$$

Στον παραπάνω τύπο, η ταχύτητα μετράται σε m/s, ενώ η EHP σε Pferdestärke (αγγλική μονάδα Horsepower PS, όπου $1PS=0,7355kW$). Κάνοντας τις κατάλληλες μετατροπές μονάδων, προκύπτει το ακόλουθο γράφημα της αντίστασης σε ήρεμο νερό R_{cw} (kW), συναρτήσεως της ταχύτητας V_{ship} (kn):



Σχήμα 3.2: Διάγραμμα Calm Water Resistance (kN) - V_{ship} (kn)

Παρατηρώντας το παραπάνω διάγραμμα, είναι εμφανές ότι προκύπτουν μικρές διαφορές, καθώς στην περίπτωση HL, η διαφορά της αντίστασης σε ήρεμο νερό φτάνει περίπου το 3% για ταχύτητα έως 24kn και μειώνεται, καθώς η ταχύτητα ελαττώνεται προς τους 16kn. Έπειτα, για την περίπτωση FL, η διαφορά παραμένει κάτω από το 0,5%, για όλο το εύρος των ταχυτήτων.

Στο σημείο αυτό αξίζει να παρατηρήσουμε ότι μέχρι τους 21kn, οι τιμές της αντίστασης σε ήρεμο νερό δεν απέχουν σημαντικά ανάμεσα στις καταστάσεις που μελετάμε, παρόλο που το εκτόπισμα διαφέρει. Αν και η αντίσταση τριβής είναι μικρότερη σε καταστάσεις με μικρότερο βύθισμα, όπως παραδείγματος χάρη στην κατάσταση HL σε σχέση με την FL, καθώς η βρεχόμενη επιφάνεια είναι μικρότερη, η αυξανόμενη υπολειπόμενη αντίσταση, συμπεριλαμβανομένης της αντίστασης κυματισμού, εξισορροπεί κατά κάποιο τρόπο την κατάσταση, φτάνοντας σε παρόμοια αποτελέσματα αντίστασης σε ήρεμο νερό.

3.3 Πρόσθετη Αντίσταση λόγω κυματισμού

Οι άνεμοι που πνέουν στη θάλασσα συνήθως συντελούν στη δημιουργία κυματισμού, ακόμα και αν προέρχονται από μακρινές καταιγίδες. Τα κύματα φτάνουν στο πλοίο και προκαλούν σημαντική πρόσθετη αντίσταση λόγω κυματισμού. Με τον όρο αυτό αναφερόμαστε στο φαινόμενο κατά το οποίο παρατηρείται απώλεια ενέργειας λόγω της δημιουργίας κυμάτων, ως συνέπεια των κινήσεων του πλοίου, λόγω των θαλάσσιων κυμάτων. Το φαινόμενο οφείλεται αφενός στην επίδραση της περίθλασης των κυμάτων πάνω στο κινούμενο κύτος και αφετέρου, στην έμμεση επίδραση των κινήσεων που προκαλούνται από τα κύματα.

Αξιοποιώντας το πρόγραμμα FRANK, υπολογίσαμε την πρόσθετη αντίσταση λόγω κυματισμού, εκτελώντας τρέξιμα για ακανόνιστα κύματα (irregular waves). Πιο συγκεκριμένα, εισαγάγαμε κάθε φορά το σημαντικό ύψος κύματος, το οποίο επιλέξαμε να κρατήσουμε σταθερό και ίσο με 1m, καθώς και τη γωνία πορείας του πλοίου με τα κύματα, η οποία θεωρήσαμε ότι είναι ίδια με τη γωνία πορείας του ανέμου, σε εύρος γωνιών μεταξύ 90°-180°. Για το συγκεκριμένο πρόγραμμα, οι 180° αντιστοιχούν σε μετωπικές θάλασσες. Επιπρόσθετα, εισαγάγαμε σε κάθε τρέξιμο την ταχύτητα του πλοίου (V_{ship}) και τη συχνότητα κυματισμού που συναντούσε.

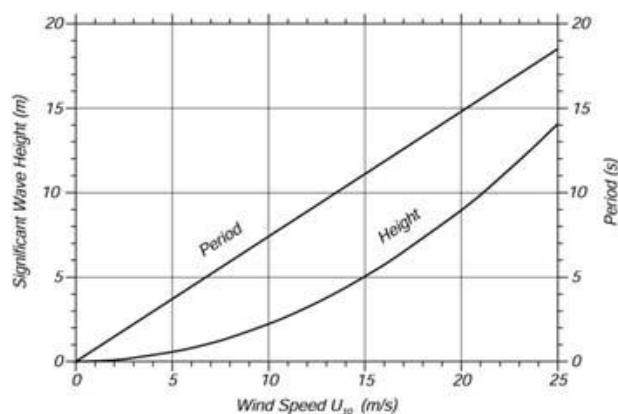
Η σωστή περιγραφή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του πλοίου αποτελεί βασική παράμετρο για το πρόγραμμα FRANK. Μετά από κατάλληλη επεξεργασία, εισαγάγαμε τους νομείς του πλοίου, ο καθένας από τους οποίους αποτελούταν από ένα σύνολο ισαπέχοντων σημείων, προκειμένου να περιγραφεί με ακρίβεια. Ταυτόχρονα, ορίσαμε τη σχετική θέση του κάθε νομέα ως προς το μέσο του πλοίου. Έπειτα, εισαγάγαμε τις πληροφορίες που είχαμε στη διάθεση μας σχετικά με τα παρατροπίδια, όπως τη θέση, το μήκος καθώς και τη γωνία τους σε σχέση με το πλοίο.

Συνεχίζοντας, για κάθε κατάσταση φόρτωσης υπήρξε η απαίτηση για επιπλέον πληροφορίες που αφορούσαν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πλοίου, όπως:

- Το μήκος L_{pp}
- Το πλάτος B
- Το βύθισμα T_m
- Τον πρισματικό συντελεστή C_b
- Την απόσταση X_{LBP}
- Την βρεχόμενη επιφάνεια γάστρας
- Το μετακεντρικό ύψος GM
- Τη θέση της γέφυρας

Έχοντας ως ιδιαίτερα αξιόπιστο δεδομένο την ταχύτητα του ανέμου, η οποία προέκυπτε κάθε φορά από τις ενδείξεις του εξοπλισμού μέτρησης υψηλής ακρίβειας που διαθέτει το πλοίο, εργαστήκαμε με βάση το διάγραμμα από τους Pierson- Moskowitz για πλήρως ανεπτυγμένη θάλασσα. Το διάγραμμα αυτό αναφέρεται όχι μόνο στην περίοδο κυματισμού, αλλά και στο σημαντικό ύψος κύματος, συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου που επικρατεί.

Στην ακόλουθη απεικόνιση παρατίθεται το διάγραμμα από τους Pierson- Moskowitz:



Σχήμα 3.3: Διάγραμμα Pierson- Moskowitz

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, κάθε φορά γινόταν υπολογισμός της πρόσθετης αντίστασης λόγω κυματισμού (σε kp), για το υποτιθέμενο ακανόνιστο κύμα με μοναδιαίο σημαντικό ύψος κύματος. Στη συνέχεια, κάνοντας υπέρθεση τόσο του ύψους κυματισμού λόγω του ανέμου που έπνεε στην περιοχή, όσο και του ύψους κυματισμού λόγω swell, το οποίο μας δόθηκε από τα ποση reports του πλοίου, γινόταν εκτίμηση του πραγματικού σημαντικού ύψους κύματος $H_{1/3}$. Υψώνοντας στο τετράγωνο το πραγματικό σημαντικό ύψος κύματος και πολλαπλασιάζοντας με την τιμή της πρόσθετης αντίστασης, όπως προέκυψε από τους υπολογισμούς του FRANK, γινόταν τελικά υπολογισμός της συνολικής πρόσθετης αντίστασης λόγω κυματισμού σε κάθε κατάσταση.

3.4 Αντίσταση Ανέμου

Ένα πλοίο, το οποίο κινείται σε θάλασσα χωρίς κυματισμούς και σε περιβάλλον με ήρεμο ή χωρίς αέρα, δέχεται αντίσταση λόγω της κίνησης της επιφάνειας που βρίσκεται πάνω από το νερό, μέσα στον ατμοσφαιρικό αέρα. Η αντίσταση αυτή εξαρτάται από την ταχύτητα του πλοίου, το μέγεθος καθώς και το σχήμα των επιφανειών του πλοίου. Στην περίπτωση που πνέει άνεμος, η αντίσταση του αέρα εξαρτάται τόσο από την ταχύτητα, όσο και από τη σχετική κατεύθυνση τού ανέμου.

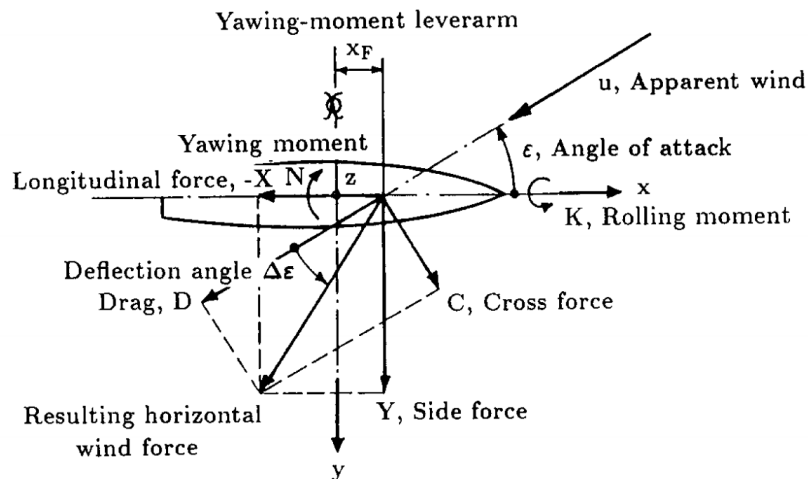
Σχετικά με τον υπολογισμό της αντίστασης του ανέμου για τις ελεύθερες επιφάνειες του πλοίου, η παρούσα εργασία βασίστηκε στη δημοσιευμένη έρευνα του Blendermann. (Blendermann, 1996) Στην έρευνα αυτή, υλοποιήθηκαν μια σειρά από δοκιμές σε αεροδυναμική σήραγγα, για διάφορους τύπους πλοίων. Πιο συγκεκριμένα, οι δοκιμές έγιναν σε σήραγγα με επιφάνεια ροής 1.75m x 1.05m, μέγιστη ταχύτητα ροής 35m/s και ένταση στροβιλότητας 0.5%.

Οι αριθμοί Reynolds, βασιζόμενοι στο συνολικό μήκος, υπολογίστηκαν με βάση τη σχέση:

$$Re = \frac{u * L_{OA}}{v}$$

Σύμφωνα με την έρευνα, οι αριθμοί Reynolds κυμάνθηκαν μεταξύ 2×10^6 και 3×10^6 . Το μοντέλο ήταν δεμένο και γυρισμένο προς τη ροή του ανέμου. Επιπλέον, οι μετρήσεις έγιναν στη ροή του ανέμου από τη σήραγγα, με φυσική ανάπτυξη οριακού στρώματος.

Στη συνέχεια, το ενδιαφέρον επικεντρώθηκε στις δυνάμεις και τις ροπές, οι οποίες εκφράζονται στο ακόλουθο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων.



Σχήμα 3.4: Σύστημα συντεταγμένων (δυνάμεις και ροπές ανέμου)

Παρατηρώντας το παραπάνω σύστημα, είναι εμφανές ότι ο άξονας x είναι ο άξονας συμμετρίας του πλοίου, ο y είναι ο κάθετος σε αυτόν και παράλληλος στην επιφάνεια του νερού, ενώ ο z είναι ο κατακόρυφος άξονας. Όσον αφορά τις δυνάμεις, η δύναμη X είναι παράλληλη στον x , ενώ η δύναμη Y είναι παράλληλη στον y . Στην διεύθυνση του φαινόμενου ανέμου συναντάμε την οπισθέλκουσα δύναμη D (Drag), ενώ κάθετα σε αυτή, διακρίνουμε τη δύναμη C (Cross Force). Έπειτα, παρατηρούμε τη γωνία ϵ (angle of attack), η οποία είναι η γωνία μεταξύ του φαινόμενου ανέμου και του άξονα συμμετρίας του πλοίου.

Οι δυνάμεις δίνονται από τους ακόλουθους τύπους:

$$CX = \frac{X}{q * AL}$$

$$CY = \frac{Y}{q * AL}$$

$$CXAF = \frac{X}{q * AF}$$

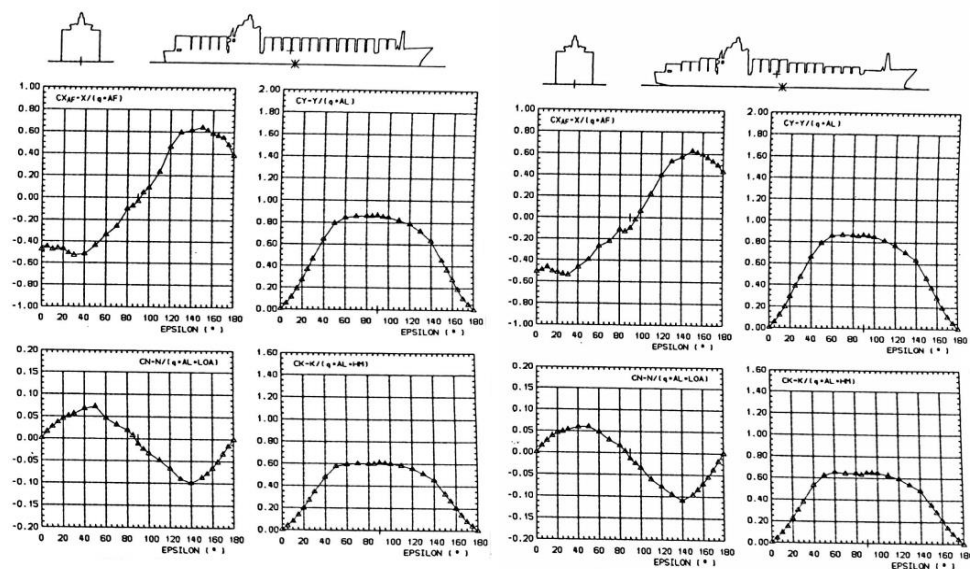
Όπου η πυκνότητα του αέρα προκύπτει από τον τύπο:

$$q = \frac{\rho}{2} * u^2$$

Στις παραπάνω σχέσεις, ρ είναι η πυκνότητα του αέρα, ενώ AF και AL είναι οι ελεύθερες στον αέρα επιφάνειες. Πιο συγκεκριμένα, η AF αναφέρεται στην μπροστινή επιφάνεια (Frontal Area) και η AL στην πλαϊνή επιφάνεια (Lateral Area) του πλοίου.

Με το νόμο των συνημίτονων, έγινε ο υπολογισμός της σχετικής ταχύτητας ανέμου, λαμβάνοντας υπόψη την πραγματική ταχύτητα ανέμου καθώς και την ταχύτητα του πλοίου. Τέλος, έγινε ο υπολογισμός της γωνίας της σχετικής ταχύτητας ανέμου με την πλώρη, η οποία, όπως αναφέρθηκε, συμβολίζεται με ϵ και είναι γνωστή ως angle of attack.

Ανατρέχοντας στη δημοσιευμένη έρευνα για τύπο πλοίου containership και έχοντας υπολογίσει τη γωνία ϵ , ήμασταν σε θέση να προσδιορίσουμε κάθε φορά το συντελεστή CX_{AF} τόσο για την κατάσταση Full Load, όσο και για την Half Load.



Σχήμα 3.5: Συντελεστές αντίστασης ανέμου CX_{AF} για την κατάσταση Full Load (αριστερά) και Half Load (δεξιά)

Ολοκληρώνοντας, στην παρούσα διπλωματική εργασία δεν λάβαμε υπόψη την αντίσταση στον άξονα γ .

3.5 Αντίσταση Παρελκομένων

Η αντίσταση λόγω παρελκομένων περιλαμβάνει την αντίσταση που προκαλείται από όλα τα συστήματα και τους μηχανισμούς που βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, όπως η προπέλα, ο άξονας της προπέλας, το πηδάλιο και τα παρατροπίδια. Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, λάβαμε υπόψη την προστιθέμενη αντίσταση των εξαρτημάτων αυτών, ως ποσοστό της αντίστασης του πλοίου σε ήρεμο νερό, όπως αυτή υπολογίστηκε με βάση τα model test. Πιο συγκεκριμένα, συμπεριλάβαμε την αντίσταση λόγω παρελκομένων ως το 3% της αντίστασης σε ήρεμο νερό σε κάθε τρέξιμο.

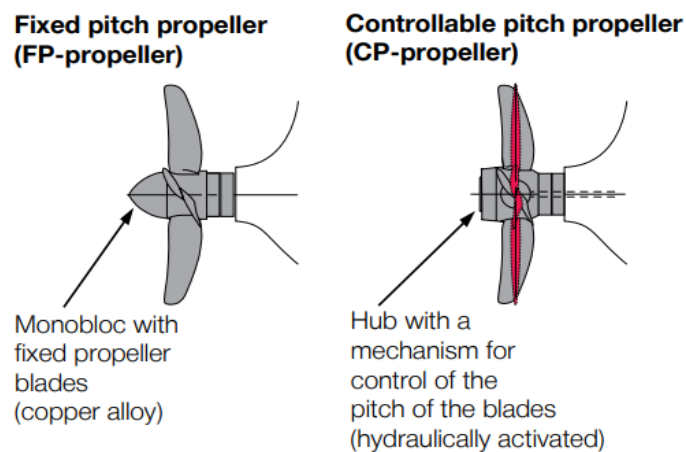
4. Πρόωση πλοίου

4.1 Τύποι ελίκων

Το παραδοσιακό μέσο που χρησιμοποιείται για την κίνηση ενός πλοίου στο νερό είναι η έλικα. Αποτελεί ένα πρωταρχικό μέλος του πλοίου, καθώς παρέχει την απαραίτητη δύναμη προώθησης του πλοίου για την αντίστοιχη αντίσταση, την ώση. Μερικές φορές μάλιστα, απαιτούνται δύο και σε σπανιότερες περιπτώσεις, περισσότερες από δύο έλικες.

Οι έλικες χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες, οι οποίες είναι (Κυρτάτος,2007):

- Έλικες σταθερού βήματος - fixed pitch propeller (FP-propeller)
- Έλικες μεταβλητού βήματος - controllable pitch propeller (CP-propeller)



Σχήμα 4.1: Τύποι ελίκων (MAN,2013)

Οι έλικες σταθερού βήματος είναι ενιαία χυτά κομμάτια και συνήθως κατασκευάζονται από κράμα χαλκού. Η θέση των πτερυγίων, και συνεπώς το βήμα της έλικας, είναι ίσο και σταθερό για όλα, το οποίο δεν μπορεί να αλλάξει κατά την λειτουργία του πλοίου. Αυτό σημαίνει ότι όταν η έλικα λειτουργεί σε πραγματικές συνθήκες, όπως για παράδειγμα σε συνθήκες άσχημου καιρού, οι καμπύλες απόδοσης της έλικας, δηλαδή ο συνδυασμός ισχύος και ταχύτητας (r/min), θα αλλάζουν ακολουθώντας τους φυσικούς νόμους. Παράλληλα, το πλήρωμα δεν είναι σε θέση να μεταβάλει την πραγματική καμπύλη της έλικας. Στην πραγματικότητα, τα περισσότερα πλοία που δεν χρειάζονται ειδικές ικανότητες ελιγμών, είναι εφοδιασμένα με έλικες σταθερού βήματος.

Έπειτα, οι έλικες μεταβλητού βήματος έχουν μεγαλύτερη πλύμνη σε σχέση με τις έλικες σταθερού βήματος, επειδή η πλύμνη πρέπει να έχει αρκετό χώρο για τον υδραυλικό μηχανισμό ελέγχου της γωνίας (βήματος) των πτερυγίων. Οι έλικες μεταβλητού βήματος είναι σχετικά ακριβές, καθώς η τιμή τους είναι τρεις με τέσσερις φορές πιο μεγάλη, σε σχέση με τις έλικες σταθερού βήματος. Επιπλέον, λόγω της μεγαλύτερης πλύμνης, η απόδοση αυτού του είδους της έλικας είναι ελαφρώς χαμηλότερη.

Οι έλικες μεταβλητού βήματος χρησιμοποιούνται συνήθως στα κρουαζιερόπλοια και στα ferries, όπου απαιτούν υψηλές ικανότητες ελιγμών. Για τα συνηθισμένα πλοία, όπως τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, φορτίου χύδην και τα δεξαμενόπλοια, που πλέουν για μεγάλα χρονικά διαστήματα σε κανονική θάλασσα και με δεδομένη ταχύτητα, θα ήταν γενικά αντισυμβατικό να εγκατασταθούν έλικες μεταβλητού βήματος, αντί για σταθερού. Τέλος, μια έλικα μεταβλητού βήματος είναι πιο περίπλοκη και συνοδεύεται από υψηλότερο ρίσκο εμφάνισης προβλημάτων κατά την λειτουργία της.

4.2 Συνθήκες ροής γύρω από την έλικα

Συντελεστής ποσοστού ομόρρου w

Όταν το πλοίο κινείται, η τριβή της γάστρας θα δημιουργήσει μία λεγόμενη ζώνη τριβής ή οριακό στρώμα νερού γύρω από την γάστρα. Στη ζώνη αυτή, η ταχύτητα του νερού στην επιφάνεια της γάστρας είναι ίση με αυτή του πλοίου, αλλά μειώνεται με την απόσταση από την επιφάνεια της γάστρας. Σε μία ορισμένη απόσταση από την γάστρα και, εξ' ορισμού, ίση με την απόσταση της εξωτερικής επιφάνειας της ζώνης τριβής, η ταχύτητα του νερού, σε σχέση με την περιβάλλουσα υδάτινη μάζα, είναι ίση με το μηδέν.

Το πάχος της ζώνης τριβής αυξάνει με την απόστασή του από το πρωραίο τμήμα της γάστρας. Επομένως, η ζώνη τριβής είναι παχύτερη στο πρυμναίο άκρο της γάστρας και το πάχος της είναι σχεδόν ανάλογο με το μήκος του πλοίου. (Gartygspropellrar,1985) Αυτό σημαίνει ότι θα υπάρχει κάποια ταχύτητα του ομόρρου, που προκαλείται από την τριβή κατά μήκος των πλευρών της γάστρας. Επιπρόσθετα, το εκτοπιζόμενο νερό από το πλοίο θα προκαλέσει κύματα, τόσο προς την πλώρα, όσο και την πρύμνη. Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, η έλικα πίσω από την γάστρα θα λειτουργεί σε ένα πεδίο ομόρρου.

Το νερό στην έλικα έχει μία πραγματική ταχύτητα ομόρρου V_w , με ίδια κατεύθυνση όπως και η ταχύτητα του πλοίου V , κυρίως λόγω του ομόρρου τριβής. Αυτό σημαίνει ότι η ταχύτητα με την οποία φθάνει το νερό στην έλικα V_A (ίση με την ταχύτητα προχώρησης της έλικας), εκφραζόμενη ως μέση ταχύτητα στον δίσκο της έλικας, είναι κατά V_w χαμηλότερη από την ταχύτητα του πλοίου V . Συνεπώς, η πραγματική ταχύτητα του ομόρρου στην έλικα είναι ίση με $V_w = V - V_A$ και μπορεί να εκφρασθεί σε αδιάστατη μορφή μέσω του συντελεστή ποσοστού ομόρρου.

Ο συντελεστής ποσοστού ομόρρου που χρησιμοποιείται συνήθως, συμβολίζεται με w και δίνεται από τη σχέση (Taylor):

$$w = \frac{V_w}{V} = \frac{V - V_A}{V}$$

Η τιμή του συντελεστή ποσοστού ομόρρου εξαρτάται σημαντικά από το σχήμα της γάστρας, τη θέση της έλικας καθώς και το μέγεθός της. Παράλληλα, επηρεάζει σημαντικά την απόδοσή της.

Η διάμετρος της έλικας ή, ακόμη καλύτερα, η σχέση της διαμέτρου της έλικας d και του μήκους του πλοίου L_{WL} επηρεάζει τον συντελεστή ποσοστού ομόρρου, καθώς ο λόγος d/L_{WL} δίνει μία προσεγγιστική ένδειξη του βαθμού στον οποίο η έλικα λειτουργεί στον ομόρρου της γάστρας. Έτσι, όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος d/L_{WL} , τόσο μικρότερο είναι το w . Γενικά, ο συντελεστής ποσοστού ομόρρου αυξάνει όταν η γάστρα είναι ρυπασμένη.

Για πλοία με μία έλικα, ο συντελεστής ποσοστού ομόρρου w είναι κανονικά στην περιοχή του 0.20 έως 0.45 και αντιστοιχεί σε μία ταχύτητα προχώρησης της έλικας V_A της τάξης του 0.55 έως 0.80 της ταχύτητας του πλοίου. Τα πλοία με μεγάλο συντελεστή γάστρας έχουν μεγάλο συντελεστή ποσοστού ομόρρου. Σε πλοία με δύο έλικες και ένα συμβατικό πρυμναίο τμήμα γάστρας, οι έλικες θα βρίσκονται κανονικά έξω από την ζώνη τριβής, οπότε ο συντελεστής ποσοστού w , στην περίπτωση αυτή, θα είναι κατά πολύ χαμηλότερος.

Πάντως, ένας υψηλός συντελεστής ποσοστού ομόρρου αυξάνει τον κίνδυνο για σπηλαίωση της έλικας, καθώς, κάτω από τέτοιες συνθήκες, η κατανομή της ταχύτητας του νερού γύρω από την έλικα είναι γενικά ανομοιογενής.

Μερικές φορές μπορεί να χρειάζεται ένα περισσότερο ομοιογενές πεδίο ομόρρου για μια έλικα με επίσης υψηλότερη ταχύτητα προχώρησης V_A . Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με διαφόρους τρόπους, όπως για παράδειγμα, έχοντας έλικες σε διατάξεις ακροφυσίων (δακτυλίων). Προφανώς, η καλύτερη μέθοδος είναι να βεβαιωθεί ήδη από το στάδιο της σχεδίασης, ότι το πρυμναίο τμήμα της γάστρας έχει τέτοιο σχήμα που επιτυγχάνεται το βέλτιστο πεδίο ομόρρου.

Συντελεστής μείωσης ώσης t

Η περιστροφή της έλικας προκαλεί την αναρρόφηση του νερού που βρίσκεται μπροστά της. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μία επιπλέον αντίσταση στην γάστρα, που συνήθως ονομάζεται "αύξηση αντίστασης". Εναλλακτικά, σε σχέση με την συνολική απαιτούμενη δύναμη ώσης T στην έλικα, ονομάζεται "ποσοστό μείωσης ώσης" F . Αυτό σημαίνει ουσιαστικά ότι η ώση T στην έλικα πρέπει να υπερνικήσει και την αντίσταση του πλοίου R_T , καθώς και αυτή την "απώλεια ώσης" F .

Το ποσοστό μείωσης ώσης F μπορεί να εκφραστεί, σε αδιάστατη μορφή, μέσω του συντελεστή μείωσης ώσης t και ορίζεται ως εξής:

$$t = \frac{F}{T} = \frac{T - R_T}{T}$$

Γενικά το μέγεθος του συντελεστή μείωσης ώσης t αυξάνει όταν ο συντελεστής ποσοστού ομόρρου w αυξάνει. Το σχήμα της γάστρας ενδέχεται να έχει σημαντική επίδραση. Παραδείγματος χάρη, μία βολβοειδής πλώρα μπορεί κάτω από ορισμένες συνθήκες, όπως χαμηλές ταχύτητες πλοίου, να μειώσει το t . Το μέγεθος του συντελεστή μείωσης ώσης t για ένα πλοίο με μία έλικα κυμαίνεται στην περιοχή μεταξύ 0.12 έως 0.30 υπό κανονικές συνθήκες. Ένα πλοίο με ένα μεγάλο συντελεστή γάστρας, πρόκειται να έχει ένα μεγάλο συντελεστή μείωσης ώσης. Για πλοία με δύο έλικες, ο συντελεστής μείωσης ώσης t θα είναι πολύ μικρότερος, καθώς οι έλικες "αναρροφούν" μακρύτερα από τη γάστρα.

4.3 Βαθμοί απόδοσης

Βαθμός απόδοσης γάστρας η_H

Ο βαθμός απόδοσης γάστρας η_H ορίζεται ως ο λόγος μεταξύ της ισχύος ρυμουλκήσεως P_E και της ισχύος ώσης, που η έλικα προσδίδει στο νερό P_T . Δίνεται επομένως από τη σχέση:

$$\eta_H = \frac{P_E}{P_T} = \frac{R_T \times V}{T \times V_A} = \frac{R_T/T}{V_A/V} = \frac{1-t}{1-w}$$

Για ένα πλοίο με μία έλικα, ο βαθμός απόδοσης γάστρας η_H κυμαίνεται συνήθως στην περιοχή από 1.1 έως 1.4, με την υψηλή τιμή για πλοία με υψηλό συντελεστή γάστρας. Για πλοία με δύο έλικες και συμβατική πρύμνη, ο βαθμός απόδοσης γάστρας η_H είναι περίπου 0.95 έως 1.05, πάλι με την υψηλή τιμή για υψηλό συντελεστή γάστρας.



Σχήμα 4.2: Βαθμός απόδοσης γάστρας η_H (MAN,2013)

Βαθμός απόδοσης σχετικής περιστροφής η_R

Η πραγματική ροή του νερού που ρέει προς την έλικα πίσω από την γάστρα δεν είναι ούτε σταθερή, ούτε σε ορθή γωνία προς τον δίσκο της έλικας. Στην πραγματικότητα είναι ένα είδος περιστροφικής ροής. Συνεπώς, σε σχέση με την λειτουργία της έλικας σε ελεύθερη ροή, ο βαθμός απόδοσης της έλικας επηρεάζεται από τον συντελεστή η_R , ο οποίος ονομάζεται βαθμός απόδοσης της σχετικής περιστροφής. Σε πλοία με μία έλικα, ο βαθμός απόδοσης σχετικής περιστροφής είναι κανονικά μεταξύ 1.0 και 1.07, επομένως η περιστροφή του νερού έχει ευεργετικό αποτέλεσμα. Ο βαθμός απόδοσης σχετικής περιστροφής σε ένα πλοίο με συμβατικό σχήμα γάστρας και δύο έλικες θα είναι κανονικά μικρότερος, περίπου ίσος με 0.98.

$$\eta_R = \frac{P_{D0}}{P_D}$$

Σε συνδυασμό με τα w και t που αναλύθηκαν παραπάνω, ο η_R χρησιμοποιείται συχνά προκειμένου τα αποτελέσματα των δοκιμών σε πειραματικές δεξαμενές να προσαρμοστούν στους θεωρητικούς υπολογισμούς.

Βαθμός απόδοσης έλικας η_0 σε ελεύθερη ροή

Ο βαθμός απόδοσης έλικας η_0 σχετίζεται με ελεύθερη ροή, δηλαδή, όταν η έλικα λειτουργεί σε ομοιογενές πεδίο ομόρρου χωρίς γάστρα μπροστά της. Πιο συγκεκριμένα, ο βαθμός απόδοσης της έλικας εξαρτάται ιδιαίτερα από την ταχύτητα προχώρησης V_A , την ώση T , το ρυθμό περιστροφής n και τη διάμετρο d . Επιπρόσθετα, εξαρτάται από τη σχεδίαση της έλικας, δηλαδή, τον αριθμό των πτερυγίων, τον λόγο εκτεταμένης επιφάνειας, και τη σχέση βήμα προς διάμετρο, η οποία θα μελετηθεί αναλυτικά παρακάτω.

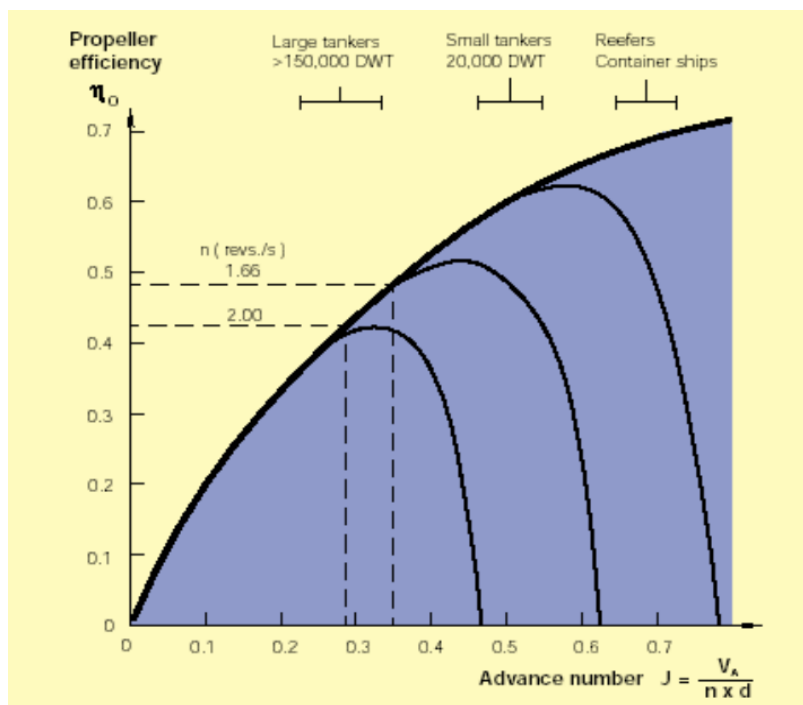
Ο βαθμός απόδοσης έλικας η_0 μπορεί να ποικίλει περίπου μεταξύ 0.35 και 0.75, με την υψηλή τιμή να ισχύει για έλικες με υψηλή ταχύτητα προχώρησης V_A . (Harvald,1983)

$$\eta_0 = \frac{P_T}{P_{D_0}} = \frac{T \times V_A}{2\pi \times n \times Q_0}$$

Το σχήμα που ακολουθεί, δείχνει τον βαθμό αποδόσεως της έλικας η_0 που μπορεί να επιτευχθεί συναρτήσει της ταχύτητας προχώρησης V_A . Σε αδιάστατη μορφή δίνεται από τη σχέση:

$$J = \frac{V_A}{n \times d}$$

όπου J είναι ο συντελεστής προχώρησης της έλικας.



Σχήμα 4.3: Βαθμός απόδοσης έλικας – ελεύθεση ροή (Harvald,1983)

Βαθμός απόδοσης της έλικας η_B που λειτουργεί πίσω από το πλοίο

Ο λόγος της ισχύος ώσης P_T , που η έλικα προσδίδει στο νερό και της ισχύος P_D , που προσδίδεται στην έλικα, αποτελεί το βαθμό απόδοσης της έλικας η_B , για μία έλικα που λειτουργεί πίσω από το πλοίο. Έτσι, δίνεται από τη σχέση :

$$\eta_B = \frac{P_T}{P_D} = n_0 \times n_R$$

Βαθμός απόδοσης πρόωσης η_D

Ο βαθμός απόδοσης πρόωσης η_D , που δεν πρέπει να συγχέεται με τον βαθμό απόδοσης της έλικας σε ελεύθερη ροή η_0 , είναι ίσος με τον λόγο ισχύος ρυμουλκήσεως P_E προς την απαιτούμενη ισχύ που προσδίδεται στην έλικα P_D , δηλαδή :

$$\eta_D = \frac{P_E}{P_D} = \frac{P_E}{P_T} \times \frac{P_T}{P_D} = \eta_H \times \eta_B = \eta_H \times n_0 \times n_R$$

Όπως είναι εμφανές, ο βαθμός πρόωσης η_D είναι ίσος με το γινόμενο του βαθμού απόδοσης της γάστρας η_H , του βαθμού απόδοσης της έλικας σε ελεύθερη ροή η_0 και του βαθμού απόδοσης σχετικής περιστροφής η_R . Ο καλύτερος βαθμός απόδοσης πρόωσης επιτυγχάνεται, όταν η έλικα λειτουργεί σε ένα ομοιογενές πεδίο ομόρρου.

Βαθμός απόδοσης άξονα η_S

Ο βαθμός απόδοσης άξονα η_S εξαρτάται μεταξύ άλλων από την ευθυγράμμιση και την λίπανση των εδράνων του άξονα καθώς και του μειωτήρα, εάν υπάρχει. Ο βαθμός απόδοσης του άξονα είναι ίσος με τον λόγο της ισχύος P_D που προσδίδεται στην έλικα και της ισχύος πέδησης P_B , που παράγει η κύρια προωστήρια μηχανή, δηλαδή:

$$\eta_S = \frac{P_D}{P_B}$$

Ο βαθμός απόδοσης του άξονα είναι κανονικά περίπου 0.985, αλλά μπορεί να μεταβάλλεται από 0.96 έως 0.995.

Ολικός βαθμός απόδοσης η_T

Ο ολικός βαθμός απόδοσης η_T είναι ίσος με τον λόγο της ισχύος ρυμουλκήσεως P_E προς την απαιτούμενη ισχύ πέδησης P_B , η οποία παράγεται από την κύρια προωστήρια μηχανή. Έτσι, δίνεται από τη σχέση:

$$\eta_T = \frac{P_E}{P_B} = \frac{P_E}{P_D} \times \frac{P_D}{P_B} = \eta_D \times \eta_S = \eta_H \times n_0 \times n_R \times \eta_S$$

4.4 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά έλικας

Τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά της έλικας είναι εξής:

- Διάμετρος έλικας (D)
- Αριθμός πτερυγίων (z)
- Συντελεστής εκτεταμένης επιφάνειας (A_E/A_0 ratio)
- Λόγος βήματος προς διάμετρο (P/D ratio)
- Skew angle
- Rake angle

Διάμετρος έλικας (D)

Προκειμένου να επιτευχθεί υψηλότερος βαθμός απόδοσης προώσεως η_D , θα προτιμηθεί συνήθως η μεγαλύτερη δυνατή διάμετρος έλικας d . Όπως είναι εμφανές, μία μεγάλη διάμετρος d θα έχει κανονικά ως αποτέλεσμα έναν χαμηλό ρυθμό περιστροφής n . Ταυτόχρονα, υπάρχουν ειδικές συνθήκες, όπως περιορισμοί ανάλογα με το είδος του πλοίου, τις οποίες θα πρέπει κανείς να λάβει υπόψη. Παραδείγματος χάρη, για πλοία φορτίου χύδην και δεξαμενόπλοια, τα οποία πολύ συχνά πλέουν στην κατάσταση ερματισμού, υπάρχουν συχνά απαιτήσεις που ορίζουν η έλικα να είναι πλήρως βυθισμένη, ακόμη και σε αυτήν την κατάσταση. Με τον τρόπο αυτό θέτονται κάποιοι περιορισμοί όσον αναφορά το μέγεθος της έλικας. Ωστόσο, ο περιορισμός του μεγέθους της έλικας δεν έχει τόση σημασία για πλοία εμπορευματοκιβωτίων (containership), όπως το πλοίο που μελετάμε στην παρούσα εργασία, καθώς αυτού του είδους τα πλοία πλέουν σπάνια σε κατάσταση ερματισμού. Τέλος, χρήσιμο εμπειρικό κανόνα αποτελεί η προσέγγιση που αναφέρει ότι για πλοία εμπορευματοκιβωτίων (containership), ο λόγος d/D θα ήταν καλό να είναι μικρότερος από 0.74.

Αριθμός πτερυγίων (z)

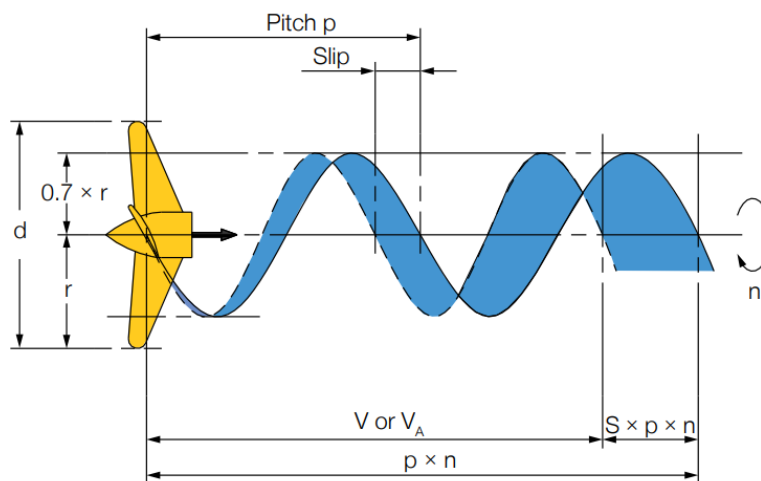
Υπάρχει η δυνατότητα κατασκευής ελίκων με 2, 3, 4, 5, ή και 6 πτερύγια. Όσο λιγότερος ο αριθμός των πτερυγίων, τόσο μεγαλύτερος ο βαθμός αποδόσεως της έλικας. Όμως, για λόγους αντοχής, οι έλικες που πρόκειται να υποστούν ισχυρά φορτία, θα ήταν προτιμότερο να κατασκευασθούν με περισσότερα από 2 ή 3 πτερύγια. Έλικες με δύο πτερύγια χρησιμοποιούνται σε μικρά σκάφη, ενώ 4, 5 και 6 πτερύγια χρησιμοποιούνται κυρίως σε μεγάλα πλοία. Έπειτα, πλοία με σχετικά μεγάλες απαιτήσεις ισχύος και αντίστοιχα, έλικες που λειτουργούν με υψηλή φόρτιση, όπως για παράδειγμα σε πλοία εμπορευματοκιβωτίων, ενδέχεται να χρειάζονται έλικες με 5 ή 6 πτερύγια.

Συντελεστής εκτεταμένης επιφάνειας (A_E/A_0 ratio)

Ο συντελεστής εκτεταμένης επιφάνειας, ή εναλλακτικά συντελεστής εκτεταμένης επιφάνειας δίσκου, ορίζει την ανεπτυγμένη επιφάνεια της έλικας, σε σχέση με την επιφάνεια του δίσκου της. Ένας συντελεστής 0.55 θεωρείται ότι είναι καλός. Για πλοία με ιδιαίτερα φορτισμένες έλικες, συχνά με 5 ή 6 πτερύγια, ο συντελεστής μπορεί να έχει μία υψηλότερη τιμή. Τέλος, σε πολεμικά πλοία μπορεί να φθάσει έως και 1.2.

Λόγος βήματος προς διάμετρο (P/D ratio)

Ο λόγος βήματος προς διάμετρο p/d εκφράζει τον λόγο του βήματος της έλικας p προς την διάμετρο της d . Το βήμα, p , είναι η απόσταση που η έλικα "βιδώνεται" προς τα μπροστά μέσα στο νερό ανά περιστροφή, υπό την προϋπόθεση ότι δεν υπάρχει ολίσθηση. Καθώς το βήμα μπορεί να ποικίλει κατά μήκος της ακτίνας του πτερυγίου, ο λόγος αυτός συνήθως αναφέρεται στο βήμα στα $0,7 \cdot r$, όπου $r=d/2$ είναι η ακτίνα της έλικας. Προκειμένου να επιτευχθεί ο καλύτερος βαθμός απόδοσης προώσεως για δεδομένη διάμετρο της έλικας, πρέπει να βρεθεί ένας βέλτιστος λόγος βήματος προς διάμετρο, ο οποίος πάλι αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο ρυθμό περιστροφής σχεδιάσεως. Παραδείγματος χάρη, εάν υπάρχει η απαίτηση για χαμηλότερο ρυθμό περιστροφής σχεδιάσεως, ο λόγος βήματος προς διάμετρο πρέπει να αυξηθεί, και αντίστροφα. Το γεγονός αυτό θα έχει κόστος στην απόδοση. Από την άλλη μεριά, η επιλογή μίας μεγαλύτερης έλικας, εφόσον το επιτρέπει το βύθισμα του πλοίου, μπορεί να επιτρέψει χαμηλότερο ρυθμό περιστροφής σχεδιάσεως και ταυτόχρονα, να αυξήσει τον βαθμό απόδοσης της έλικας.



Σχήμα 4.4: Pitch και slip έλικας (MAN,2013)

Θέλοντας να ασχοληθούμε περισσότερο με την ολίσθηση, υποθέτουμε ότι εάν η έλικα δεν ολίσθαινε καθόλου, δηλαδή εάν το νερό μέσα στο οποίο "βιδώνεται" δεν υποχωρούσε, δηλαδή εάν το νερό δεν επιταχυνόταν προς τα πίσω, η έλικα θα προχωρούσε μπροστά με ταχύτητα $p \times n$, όπου n είναι ο ρυθμός περιστροφής της έλικας. Επειδή όμως το νερό είναι ρευστό και πράγματι υποχωρεί, δηλαδή επιταχύνει προς τα πίσω, η πραγματική ταχύτητα της έλικας μειώνεται και γίνεται ίση με την ταχύτητα του πλοίου V . Έτσι, η φαινόμενη ολίσθηση μπορεί έτσι να εκφρασθεί ως $(p \times n - V)$.

Ο φαινόμενος λόγος ολίσθησης S_A , που είναι αδιάστατος, ορίζεται από τη σχέση:

$$S_A = \frac{p \times n - V}{p \times n} = 1 - \frac{V}{p \times n}$$

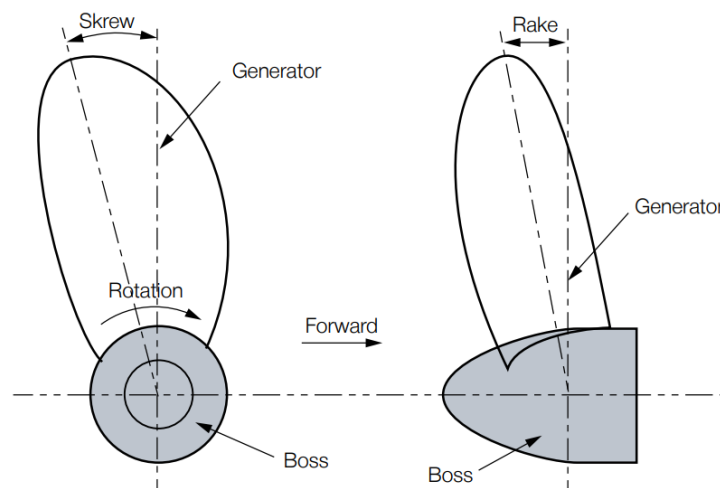
Ο φαινόμενος λόγος ολίσθησης S_A , που υπολογίζεται από το πλήρωμα, δίνει μία αποτύπωση των φορτίων, που ασκούνται στην έλικα κάτω από διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας. Ο φαινόμενος λόγος ολίσθησης αυξάνεται, μεταξύ άλλων, όταν το πλοίο πλέει αντίθετα με τον άνεμο ή τα κύματα (σε ρηχά νερά), όταν η γάστρα είναι ρυπασμένη και όταν το πλοίο επιταχύνει. Ο πραγματικός λόγος ολίσθησης θα είναι μεγαλύτερος από το φαινόμενο, γιατί η πραγματική ταχύτητα προχώρησης V_A της έλικας είναι μικρότερη από την ταχύτητα του πλοίου V . Ο πραγματικός λόγος ολίσθησης S_R , που δίνει μία πιο αληθινή εικόνα λειτουργία της έλικας, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$S_R = 1 - \frac{V_A}{p \times n} = 1 - \frac{V \times (1 - w)}{p \times n}$$

Σε δοκιμές στην αποβάθρα, όπου η ταχύτητα του πλοίου είναι $V=0$, οι δύο παραπάνω λόγοι ολίσθησης είναι 1.0. Συνήθως, οι λόγοι ολίσθησης δίνονται σε ποσοστά επί τοις εκατό.

Γωνίες skew και rake

Όσον αφορά τις γωνίες rake και skew, το ακόλουθο σχήμα δίνει μια απεικόνιση των δύο αυτών μεγεθών. Για κανονικά εμπορικά πλοία, τα πτερύγια έχουν συνήθως κλίση προς τα πίσω προκειμένου να αυξηθεί η απόσταση μεταξύ του κύτους και της έλικας. Η κλίση εισάγεται ώστε να βελτιώσει τα χαρακτηριστικά κραδασμών.



Σχήμα 4.5: Rake και skew (MAN,2013)

4.5 Συντελεστές έλικας (J , K_T , K_Q)

Η θεωρία ελίκων βασίζεται σε μοντέλα, ωστόσο, προκειμένου να διευκολυνθεί η γενική χρήση της θεωρίας, έχουν εισαχθεί ορισμένοι αδιάστατοι συντελεστές έλικας. Οι συντελεστές αυτοί σχετίζονται με τη διάμετρο d , τον ρυθμό περιστροφής n και την πυκνότητα μάζας του νερού ρ .

Αρχικά, έχει οριστεί ο συντελεστής προχώρησης της έλικας J , όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, ο οποίος είναι μία αδιάστατη έκφραση της ταχύτητας προχώρησης της έλικας V_A και δίνεται από τη σχέση:

$$J = \frac{V_A}{n \times d}$$

Στη συνέχεια, η δύναμη ώσης T εκφράζεται αδιάστατα με την βοήθεια του συντελεστή ώσης K_T , ο οποίος προκύπτει από τη σχέση:

$$K_T = \frac{T}{\rho \times n^2 \times d^4}$$

Όσον αφορά τη ροπή, γνωρίζουμε από τη θεωρία ότι ισχύει ο τύπος:

$$Q = \frac{P_D}{2\pi \times n}$$

Έτσι, η ροπή εκφράζεται αδιάστατα με τη βοήθεια του συντελεστή ροπής K_Q ως:

$$K_Q = \frac{Q}{\rho \times n^2 \times d^5}$$

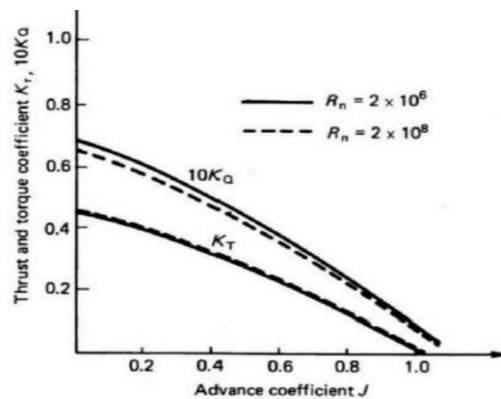
Ο βαθμός απόδοσης της έλικας η_0 , μπορεί επιπρόσθετα να υπολογιστεί με την βοήθεια των προαναφερθέντων συντελεστών, δηλαδή ισχύει η σχέση:

$$\eta_0 = \frac{P_T}{P_D} = \frac{T \times V_A}{Q \times 2\pi \times n} = \frac{K_T}{K_Q} \times \frac{J}{2\pi}$$

Με την βοήθεια ειδικών διαγραμμάτων της έλικας, που περιέχουν μεταξύ άλλων καμπύλες των J , K_T και K_Q , είναι δυνατό να υπολογιστούν οι διαστάσεις της έλικας, ο βαθμός απόδοσης, η ώση, η ισχύς, κ.λ.π.

Όλα αυτά αναφέρονται σε συνθήκες έλικας ανοιχτού νερού, όπου αργότερα παραμετροποιούνται για το αυτοπροωθούμενο πλοίο. Στις δοκιμές μοντέλου, οι μετρήσεις της ώσης T και της ροπής Q προέρχονται από το δυναμόμετρο, το οποίο είναι συνδεδεμένο με το μοντέλο. (Politis, 2018) Προκειμένου οι τελικοί υπολογισμοί να μεταφερθούν στο πλοίο πραγματικής κλίμακας, οι προαναφερθέντες συντελεστές λαμβάνονται υπόψη με τις αντίστοιχες επιδράσεις των διαφορετικών αριθμών Reynolds, καθιστώντας όλο το πείραμα για το αυτοπροωθούμενο πλοίο πραγματικά περίπλοκο.

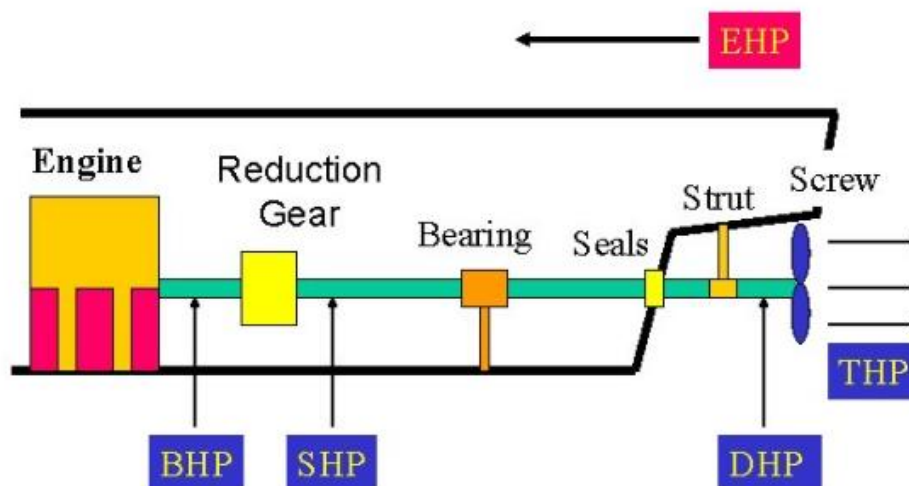
Όπως φαίνεται από το ακόλουθο σχήμα, ο αριθμός Reynolds επηρεάζει τους K_T και K_Q .



Σχήμα 4.6: Επίδραση αριθμού Reynolds στους συντελεστές K_T και K_Q

4.6 Συνιστώσες Ισχύος

Με τον όρο αυτοπροωθούμενο πλοίο, νοείται το πλοίο που χρησιμοποιεί σαν σύστημα πρόωσης την προπέλα, η οποία είναι συνδεδεμένη μέσω ενός άξονα, καθώς και ενός μειωτήρα, ο οποίος βρίσκεται αμέσως μετά την κύρια μηχανή. Στα μεγάλα εμπορικά πλοία, δεν χρησιμοποιούνται μειωτήρες, καθότι είναι πιο αποδοτική η χρήση βραδύστροφων μηχανών. Έτσι, η προπέλα έχει τις ίδιες στροφές με τον κινητήρα. Η ισχύς που βγαίνει από τη μηχανή, μέχρι να φτάσει στην προπέλα περνά από διάφορα στάδια, όπου χάνει ένα μέρος της. Ειδικότερα, η μηχανή δουλεύει και βγάζει μια ισχύ SHPe (Shaft Horsepower Engine) ή αλλιώς BHP (Break Horsepower). Αυτή η ισχύς περνά από τον μειωτήρα, στην περίπτωση που υπάρχει, όπου ένα μέρος "χάνεται", καθώς μετατρέπεται σε SHP (Shaft Horsepower). Στην περίπτωση που δεν υπάρχει μειωτήρας, η SHP είναι ίση με τη BHP. Ύστερα, η ισχύς αυτή, μεταφέρεται μέσω του άξονα στην έλικα, με μια μικρή απώλεια ενέργειας στον άξονα, τα έδρανα και τη χοάνη. Η ισχύς που φτάνει τελικά στην έλικα ονομάζεται Delivered Horsepower ή DHP.



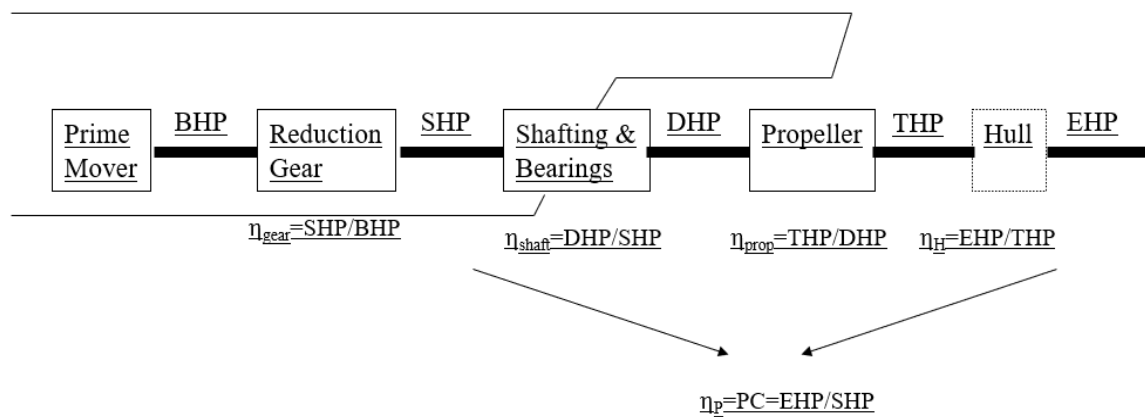
Σχήμα 4.7: Συνιστώσες Ισχύος

Έπειτα, όπως αναφέρθηκε και στο τρίτο κεφάλαιο, το γινόμενο της αντίστασης ρυμούλκησης R_T και της ταχύτητας V του πλοίου ορίζει τη πραγματική ισχύ Effective Horsepower (EHP) ή P_E . Η EHP μπορεί να θεωρηθεί ως το ωφέλιμο έργο που γίνεται για την πρόωση του πλοίου. Ο λόγος μεταξύ της ισχύος του άξονα και της πραγματικής ισχύος είναι το μέτρο της συνολικής απόδοσης πρόωσης που επιτυγχάνεται και ονομάζεται συντελεστής πρόωσης P.C. Ο συντελεστής αυτός προκύπτει εν μέρει από την απόδοση της έλικας και εν μέρει από την αλληλεπίδραση της έλικας και του κύτους. Η EHP δεν υπερβαίνει στην καλύτερη περίπτωση το 75% της SHP και συνήθως είναι περίπου 67%. Η απόδοση πρόωσης ορισμένων τύπων ναυτικών σκαφών μπορεί να είναι ακόμα μικρότερη από αυτή την τιμή. Η ρύπανση των ελίκων μπορεί να μειώσει σημαντικά την απόδοσή τους και έτσι, να οδηγήσει σε αύξηση της απαιτούμενης SHP για τη διατήρηση μιας δεδομένης ταχύτητας.

Η EHP δίνεται από τη σχέση:

$$EHP = \frac{V \times R_T}{75}$$

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, καθώς και τους βαθμούς απόδοσης που περιγράφηκαν στην ενότητα 4.3, προκύπτει το ακόλουθο γράφημα των επιμέρους συνιστωσών της ισχύος:



Σχήμα 4.8: Το σύστημα κίνησης στην πρόωση των πλοίων

4.7 Μέθοδος υπολογισμού

Μετά τον υπολογισμό της συνολικής αντίστασης στο κεφάλαιο 3, ο συντελεστής ώσης K_T υπολογίζεται με τη βοήθεια δύο διαφορετικών προσεγγίσεων, οι τιμές των οποίων θα πρέπει να εξισωθούν.

Αρχικά, έχοντας ως δεδομένα εισόδου το συντελεστή αφαίρεσης ώσης t , το κλάσμα w , τη διάμετρος της έλικας D , τη ταχύτητα του πλοίου V_S και τη συνολική αντίσταση R_T , διαιρούμε και τα δύο μέλη της εξίσωσης του K_T , με το J^2 .

$$K_T = \frac{T}{\rho \times n^2 \times D^4} \quad \eta \quad \frac{K_T}{J^2} = \frac{T}{\rho \times n^2 \times D^4 \times J^2} = \frac{T}{\rho \times V_A^2 \times D^2}$$

Καθώς γνωρίζουμε ότι:

$$J = \frac{V_A}{n \times D}$$

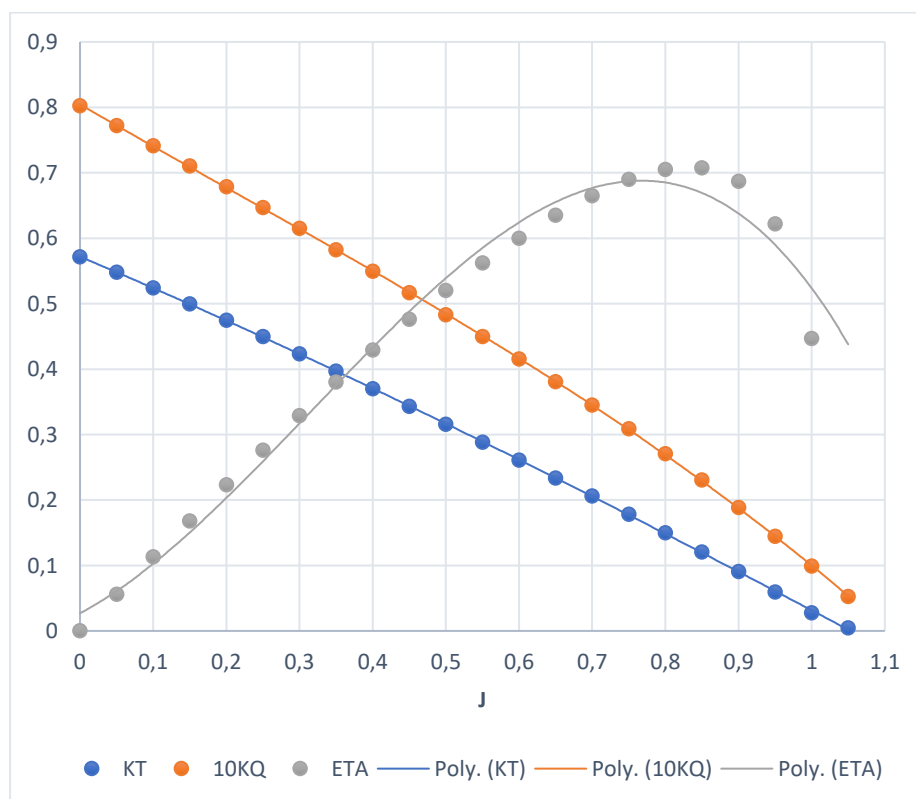
Ακόμη, ισχύουν οι σχέσεις:

$$V_A = V_S \times (1 - w)$$

$$T = \frac{R_T}{1 - t}$$

Στην περίπτωση του πλοίου που μελετάμε, λαμβάνουμε πληροφορίες για τις τιμές του συντελεστή ώσης K_T από τις δοκιμές μοντέλου (model test), συναρτήσει του συντελεστή προχώρησης. Το ίδιο ισχύει και για τον συντελεστή ροπής K_Q και το βαθμό απόδοσης ανοιχτής θάλασσας. Τα δεδομένα αυτά δίνονται σε πίνακα. Επομένως, στο υπολογιστικό πρόγραμμα excel, κατασκευάσαμε πολυώνυμα τρίτου βαθμού, τα οποία εκφράζουν τη σχέση εξάρτησης των K_T και K_Q και η_T , με τον συντελεστή προχώρησης.

Έτσι, κατασκευάσαμε το ακόλουθο διάγραμμα για τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά έλικας σε πλήρη κλίμακα:



Σχήμα 4.9: Υδροδυναμικά χαρακτηριστικά έλικας σε πλήρη κλίμακα

Προκειμένου να επιτευχθεί ο ίδιος συντελεστής ώσης, έγιναν δοκιμές τιμών για τον συντελεστή προχώρησης J , στις δύο διαφορετικές εξισώσεις για τον K_T , μέχρις ότου γίνουν ίσες. Από φυσικής σημασίας, με τον τρόπο αυτό γίνεται προσπάθεια εξίσωσης της απαιτούμενης ώσης του πλοίου, με αυτήν που δίνει η προπέλα. Η απαιτούμενη ώση προκύπτει αθροίζοντας όλες τις επιμέρους αντιστάσεις, που έχουν υπολογιστεί για την εκάστοτε κατάσταση πλοίου και της θάλασσας, ενώ η ώση της προπέλας προκύπτει μέσω της πολυωνυμικής προσέγγισης.

Μετά από την παραπάνω επαναληπτική διαδικασία και τον προσδιορισμό της τελικής τιμής του J , υπολογίζονται οι απαιτούμενες στροφές του κινητήρα καθώς και η ισχύς που βγαίνει αμέσως πριν την προπέλα, Delivered Horsepower ή P_D .

Τα παραπάνω μεγέθη δίνονται από τις σχέσεις:

$$n = \frac{V_A}{J \times D}$$

$$P_D = 2\pi \times \rho \times n^3 \times D^5 \times K_Q(J)$$

Πλέον, για την κάθε κατάσταση ξεχωριστά, έχουν υλοποιηθεί υπολογισμοί σχετικά με τις απαιτήσεις πρόωσης του πλοίου, ώστε να ταξιδεύει με ταχύτητα V_{ship} σε συγκεκριμένες συνθήκες. Το επόμενο και ιδιαίτερα σημαντικό βήμα είναι να υπολογίσουμε την ωριαία κατανάλωση καυσίμου, για την κάθε κατάσταση. Για την τιμή της ισχύος που υπολογίσαμε (Delivered Horsepower), μπορούμε να προσδιορίζουμε αντίστοιχα τη Shaft Horsepower και τη Brake Horsepower, οι οποίες ταυτίζονται στην περίπτωση που μελετάμε. Έτσι, θα βρούμε το ποσοστό που αντιστοιχεί επί του συνόλου BHP της κύριας μηχανής. Με γραμμική παρεμβολή, μεταξύ των τιμών της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου, πρόκειται να υπολογίσουμε την τελική τιμή της κατανάλωσης πετρελαίου.

Ιδιαίτερα σημαντικός κρίνεται ο έλεγχος για πιθανή διαφορά των LCV (Lower Calorific Value), μεταξύ του καυσίμου που χρησιμοποιήθηκε στα Shop Test, το οποίο είχε $LCV=10028\text{kcal/kg}$, και του καυσίμου που χρησιμοποιήθηκε κατά τη λειτουργία του πλοίου, στις διάφορες καταστάσεις που εξετάζουμε.

Σύμφωνα με τις πληροφορίες που μας δόθηκαν από τη διαχειρίστρια εταιρία, το πλοίο χρησιμοποιούσε HSFO στο μεγαλύτερο χρονικό διάστημα της λειτουργίας του, με $LCV=9700\text{kcal/kg}$. Επομένως, οι ειδικές καταναλώσεις πετρελαίου της ενότητας 2.5, θα χρειαστούν διόρθωση. Πιο συγκεκριμένα, καθώς το καύσιμο που χρησιμοποιήθηκε κατά τη λειτουργία του πλοίου έχει χαμηλότερη LCV σε σχέση με την αντίστοιχο κατά ISO, οι τελικές τιμές ειδικής κατανάλωσης (SFOC) θα είναι μεγαλύτερες.

5. Σύγκριση εκτιμώμενων και πραγματικών τιμών

5.1 Προσδιορισμός επιμέρους παραμέτρων

Προκειμένου να γίνει εκτίμηση της απόδοσης του πλοίου τόσο σε ήρεμο νερό, όσο και σε τυχαίους κυματισμούς, εργαστήκαμε με τον τρόπο που περιεγράφηκε αναλυτικά παραπάνω, για τις διάφορες καταστάσεις. Επιτεύχθηκαν ιδιαίτερα χρήσιμα αριθμητικά αποτελέσματα σχετικά με τις ωριαίες απαιτήσεις του πλοίου που αφορούν την ισχύ άξονα (SHP), αλλά και την κατανάλωση καυσίμου της κύριας προωστήριας μηχανής (Fuel Oil Consumption ή FOC). Το υπολογιστικό πρόγραμμα excel συνέβαλλε στην εξαγωγή KPI σε γραφική μορφή, ώστε αφενός να γίνει φιλική προς το χρήστη παρουσίαση των αποτελεσμάτων, κι αφετέρου, να επιτευχθεί εποπτική εκτίμηση κι αξιολόγηση.



Σχήμα 5.1: Key Performance Indicator (KPI)

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκαν μια σειρά προσομοιώσεων για τη Full Load και τη Half Load κατάσταση. Θεωρήσαμε ότι το πλοίο κινείται στη θάλασσα σε πραγματικές καταστάσεις, επομένως έρχεται αντιμέτωπο με πνέοντες ανέμους και προσπίπτοντες κυματισμούς. Το πραγματικό σημαντικό ύψος κύματος $H_{1/3}$ που υπολογίσαμε, αποτελεί υπέρθεση τόσο του ύψους κυματισμού λόγω του ανέμου που πνέει στην περιοχή που κινείται το πλοίο, όσο και του ύψους κυματισμού λόγω swell, το οποίο μας δόθηκε από τα noon reports του πλοίου. Οι τιμές που είχαμε στη διάθεση μας αναφέρονταν σε πραγματικές καταστάσεις λειτουργίας, επομένως, κάθε κατάσταση παρουσίαζε ιδιαιτερότητες. Πιο συγκεκριμένα, είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι σε ορισμένες προσομοιώσεις δεν περιλήφθηκε η πρόσθετη αντίσταση λόγω κυματισμού, είτε λόγω της μικρής τιμής του πραγματικού σημαντικού ύψους κύματος, είτε λόγω της γωνίας με την οποία ο άνεμος συναντούσε την πλώρη του πλοίου (angle of attack).

Αξιοποιώντας τις δυνατότητες του υπολογιστικού προγράμματος excel για κάθε τρέξιμο-κατάσταση, ήταν εμφανές ότι οι παράμετροι που μεταβάλλονταν και έπρεπε να εξεταστούν κατάλληλα κάθε φορά, ήταν πολλοί και πολύπλοκοι. Έτσι, κάθε τρέξιμο μπορεί να θεωρηθεί ως μια ξεχωριστή εικόνα της απόδοσης του πλοίου. Όπως πρόκειται να δούμε παρακάτω, η κάθε παράμετρος επηρεάζει με διαφορετικό τρόπο την απόδοση του.

Προκειμένου η κάθε κατάσταση να μελετηθεί με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια, κάθε φορά απαιτούνταν μεταβολές σε διάφορες παραμέτρους, που αφορούν:

- Τη ταχύτητα του πλοίου
- Το εκτόπισμα του πλοίου
- Την αντίσταση σε ήρεμο νερό για συγκεκριμένη ταχύτητα και εκτόπισμα
- Την επιφάνεια του ηδαλίου
- Την πλευρική επιφάνεια του πλοίου πάνω από την ίσαλο
- Τη μετωπική επιφάνεια του πλοίου πάνω από την ίσαλο
- Το μήκος L_{pp}
- Το πλάτος B_{wl}
- Το μέσο βύθισμα T_m
- Την ταχύτητα του ανέμου
- Τη γωνία συνάντησης του ανέμου με την πλώρη
- Το συντελεστής αντίστασης ανέμου (Blendermann)
- Το ύψος κυματισμού λόγω πνέοντος ανέμου
- Το ύψος κυματισμού λόγω swell
- Την τιμή της πρόσθετης αντίστασης λόγω κυματισμού για μοναδιαίο σημαντικό ύψος κύματος (FRANK, σε κρ)
- Το συντελεστής C_B
- Την πυκνότητα του νερού ($\rho_{sw}=1025\text{kg/m}^3$)
- Τη βρεχόμενη επιφάνεια
- Το συντελεστή ποσοστού w (model test)
- Το συντελεστή αφαίρεσης ώσης t (model test)
- Τη διάμετρο της έλικας D_p
- Τα πολυώνυμα των συντελεστών ώσης K_T και ροπής K_Q
- Τις ειδικές καταναλώσεις πετρελαίου (g/kWh) της κύριας μηχανής ως ποσοστά της ισχύος φορτίου

Με βάση τη SHP για την κάθε κατάσταση, έγινε υπολογισμός της ωριαίας κατανάλωσης πετρελαίου. Έπειτα, θεωρήσαμε σημαντικό να γίνουν ορισμένες διορθώσεις στην κατανάλωση, κυρίως λόγω των καταστάσεων λειτουργίας της κύριας μηχανής και του καυσίμου που χρησιμοποιεί. Πιο συγκεκριμένα, οι διορθώσεις αφορούν:

- 3% για τις συνθήκες δοκιμών της κύριας προωστήριας μηχανής
- 2% για την ευθυγράμμιση του άξονα
- 4% για την απόδοση του κινητήρα
- 3% για τη διαφορά LCV καυσίμου (μεταξύ shop test και λειτουργίας)

Όπως αναφέρθηκε ήδη, κάθε τρέξιμο-κατάσταση ολοκληρωνόταν με τη συμπλήρωση της τελευταίας και ιδιαίτερα σημαντικής παραμέτρου. Η παράμετρος αυτή αναφέρεται ως συντελεστής προχώρησης J , ο οποίος εξίσωνε τους διαφορετικούς αδιάστατους συντελεστές ώσης K_T . Τελικά προέκυπτε μέσω πολλαπλών δοκιμών, μέχρις ότου βρεθεί κατάλληλη τιμή. Με τον τρόπο αυτό, ολοκληρωνόταν κάθε φορά η διαδικασία εύρεσης του συνδυασμού απαιτούμενης ισχύος άξονα SHP, στρωφών κινητήρα n και κατανάλωσης FOC για το συγκεκριμένο πλοίο που μελετάμε.

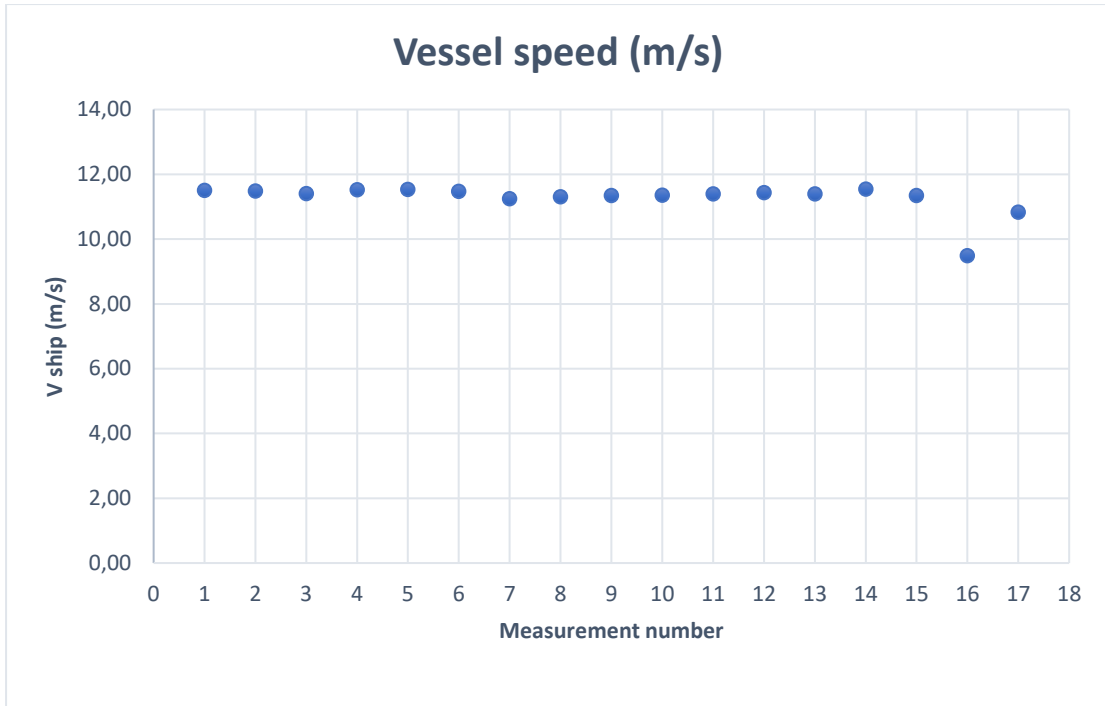
5.2 Συλλογή Αποτελεσμάτων - Διαγράμματα

Τα τελικά αποτελέσματα αναφέρονται στην ισχύ άξονα (SHP), στις στροφές n της κύριας προωστήριας μηχανής καθώς και στην ωριαία κατανάλωση πετρελαίου (FOC), για διάφορες καταστάσεις. Κατασκευάστηκαν αναλυτικά διαγράμματα, ώστε να γίνει άμεση σύγκριση μεταξύ των τιμών που προέκυψαν από τους υπολογισμούς που υλοποιήθηκαν (expected) και των αντίστοιχων πραγματικών τιμών που μας δόθηκαν από τη διαχειρίστρια εταιρία (reported). Παράλληλα, προκειμένου να γίνουν κατανοητές οι διακυμάνσεις της ταχύτητας του πλοίου, της ταχύτητας ανέμου, της κατάστασης θάλασσας, καθώς και της απόδοσης της έλικας σε ελεύθερη ροή, κατασκευάστηκαν επιπρόσθετα διαγράμματα. Το κάθε τρέξιμο-κατάσταση μελετήθηκε ξεχωριστά και φανερώνεται με αύξοντα αριθμό στον οριζόντιο άξονα των ακόλουθων διαγραμμάτων. Οι παράμετροι που αναφέρθηκαν στην ενότητα 5.1 κρίνονται ιδιαίτερα σημαντικοί, διότι επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την ενεργειακή απόδοση του πλοίου. Τέλος, το ενδιαφέρον επικεντρώθηκε στον προσδιορισμό της διαφοράς στην ενεργειακή αποδοτικότητα του πλοίου και συγκεκριμένα στη διαφορά κατανάλωσης καυσίμου, πριν και μετά το δεξαμενισμό. Σύμφωνα με τις πληροφορίες που μας δόθηκαν, εκτός από τον καθαρισμό της γάστρας και της προπέλας, κατά το δεξαμενισμό του πλοίου τοποθετήθηκε νέος βολβός.

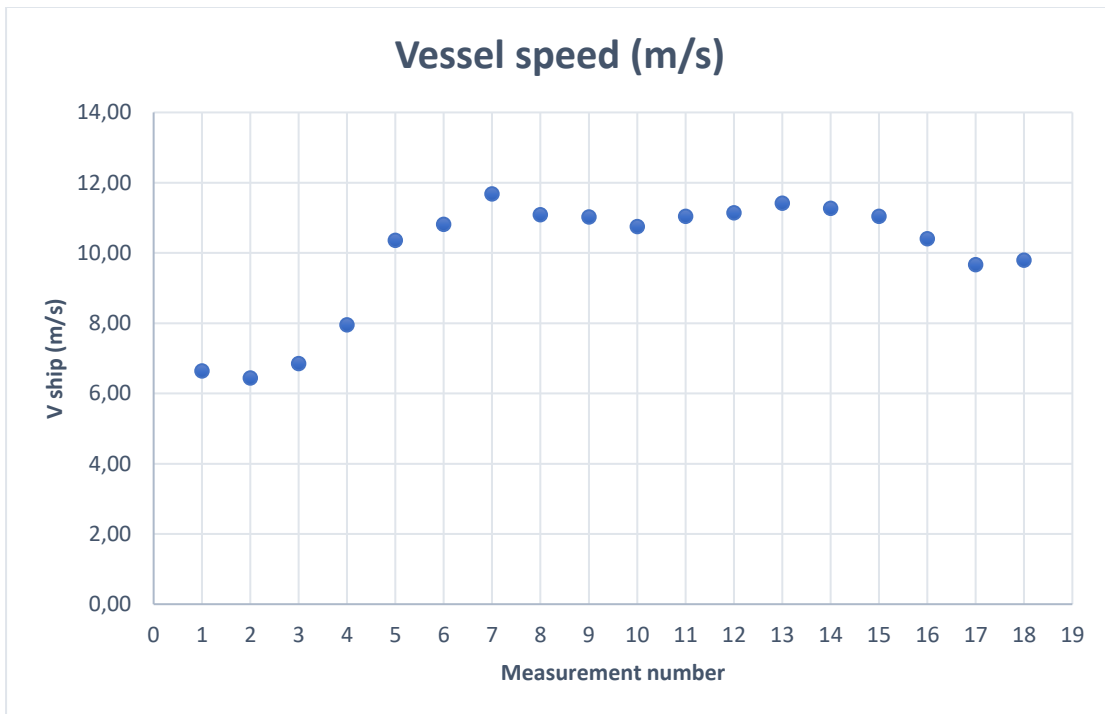
Τα διαγράμματα που μας απασχόλησαν στην παρούσα διπλωματική εργασία, τόσο για τη Full Load, όσο και για τη Half Load κατάσταση, είναι τα εξής:

- Διάγραμμα ταχύτητας πλοίου V_{ship} (m/s) – αριθμός τρεξίματος
- Διάγραμμα ταχύτητας ανέμου V_{wind} (m/s) – αριθμός τρεξίματος
- Διάγραμμα γωνίας πορείας ($^{\circ}$) – αριθμός τρεξίματος
- Διάγραμμα σημαντικού ύψους κύματος H_s (m)- αριθμός τρεξίματος
- Διάγραμμα απόδοσης έλικας η_0 (J) ελεύθερης ροής - αριθμός τρεξίματος
- Διάγραμμα κατανάλωσης καυσίμου FOC (l/hr) – αριθμός τρεξίματος
- Διάγραμμα FOC/n^3 – αριθμός τρεξίματος
- Διάγραμμα Expected ($FOC \cdot 10^2/n^3$) – Reported ($FOC \cdot 10^2/n^3$)
- Διάγραμμα Expected (FOC/n^3) / Reported (FOC/n^3) – αριθμός τρεξίματος
- Διάγραμμα Expected n (rpm) - Reported n (rpm)
- Διάγραμμα Expected n (rpm) / Reported n (rpm) – αριθμός τρεξίματος
- Διάγραμμα Expected SHP (kW) - Reported SHP (kW)
- Διάγραμμα Expected SHP (kW) / Reported SHP (kW) – αριθμός τρεξίματος
- Διάγραμμα FOC difference % (l/h) - V_{ship} (kn) - πριν και μετά το δεξαμενισμό, όπου $FOC \text{ difference } \% = (FOC_{before} - FOC_{after}) / FOC_{after}$
- Διάγραμμα $FOC/n^3 - V_{ship}$ (kn) - πριν και μετά το δεξαμενισμό, όπου $(FOC/n^3) \text{ difference } \% = ((FOC/n^3)_{before} - (FOC/n^3)_{after}) / (FOC/n^3)_{after}$

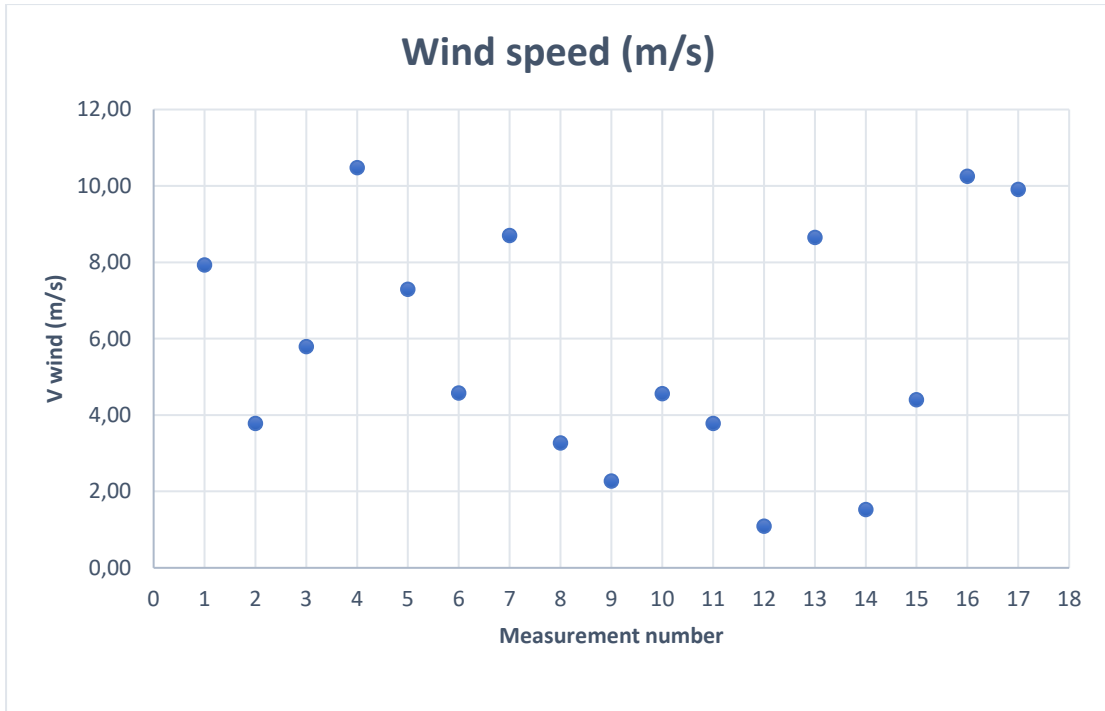
Στη συνέχεια, ακολουθούν τα διαγράμματα που κατασκευάστηκαν για την κάθε περίπτωση. Παράλληλα, πρόκειται να γίνει εκτίμηση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν, έτσι ώστε να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για την επίδραση τής κάθε παραμέτρου ξεχωριστά στην ενεργειακή αποδοτικότητα του πλοίου.



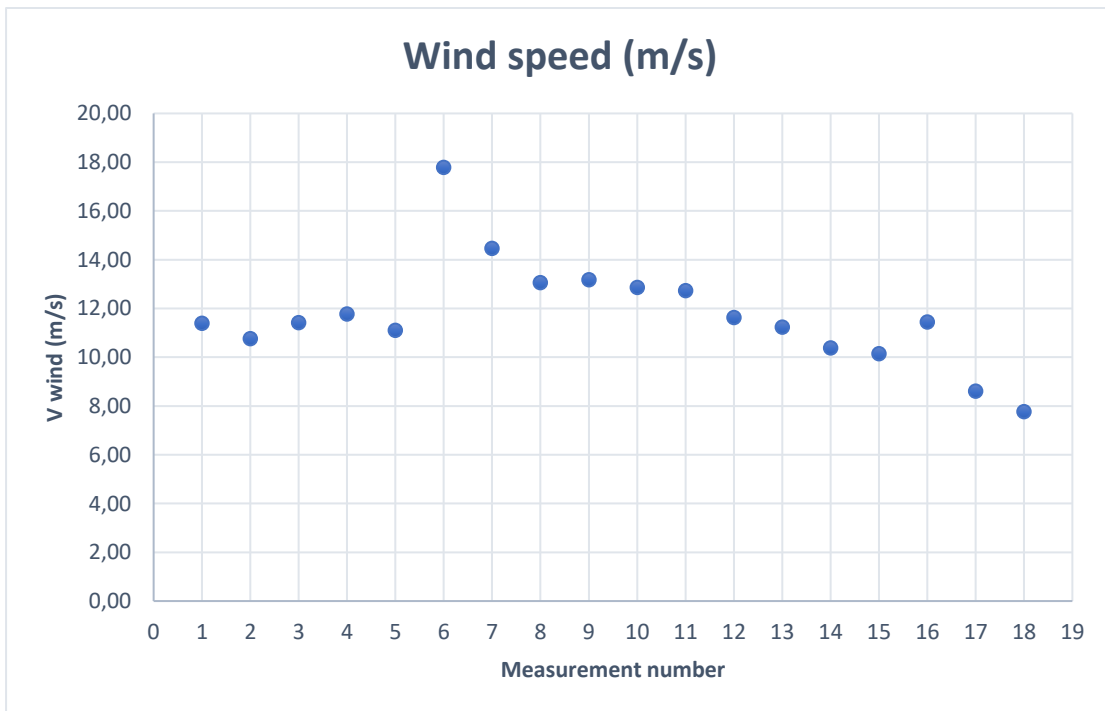
Διάγραμμα 1 (Full Load)



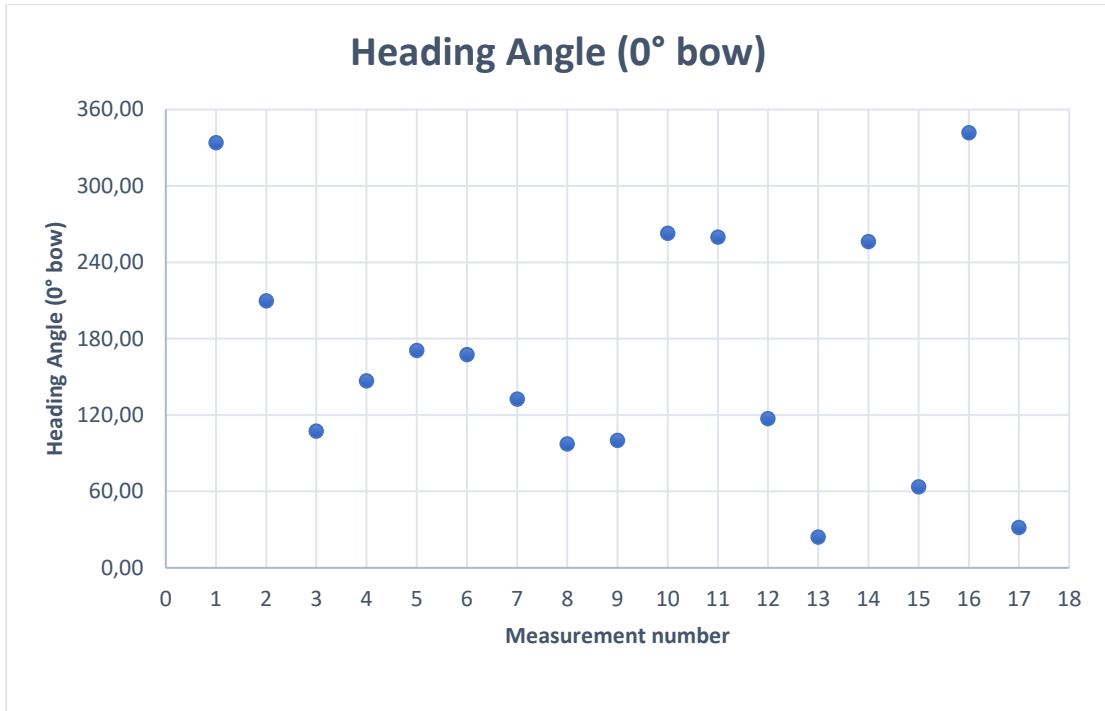
Διάγραμμα 2 (Half Load)



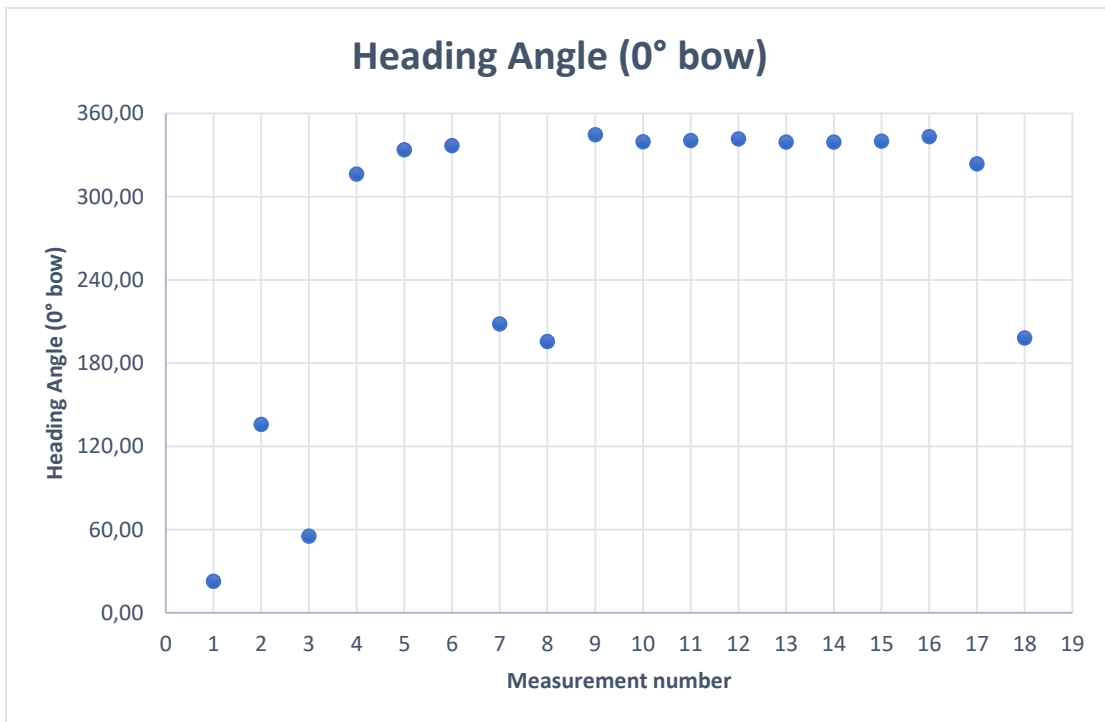
Διάγραμμα 3 (Full Load)



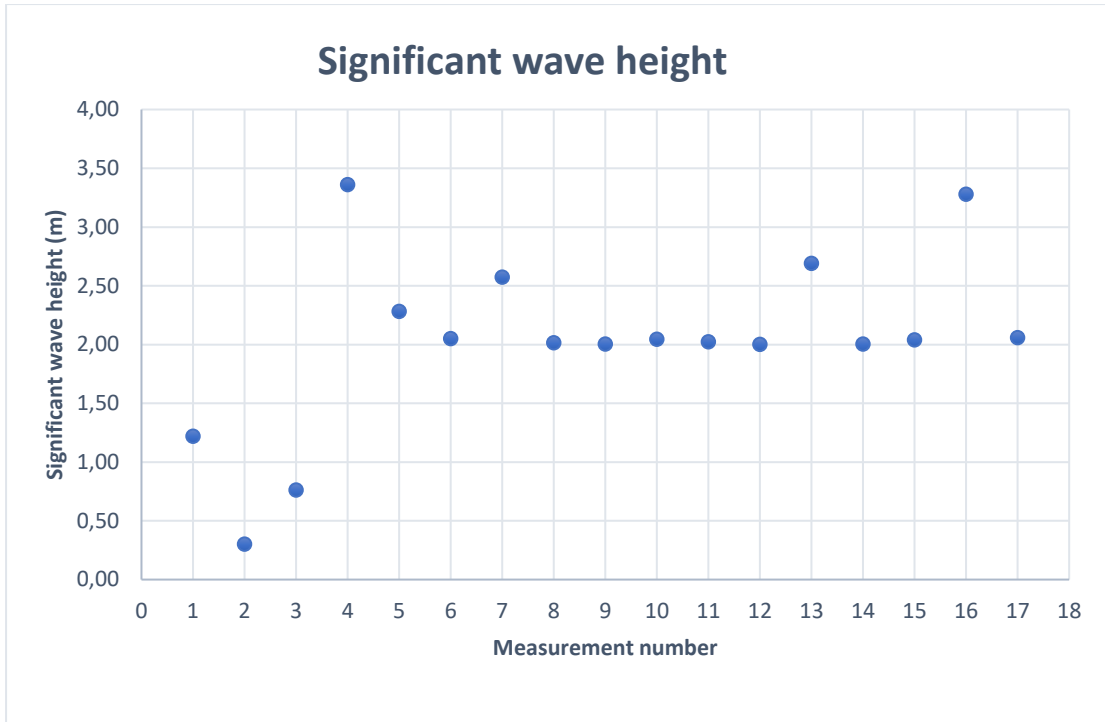
Διάγραμμα 4 (Half Load)



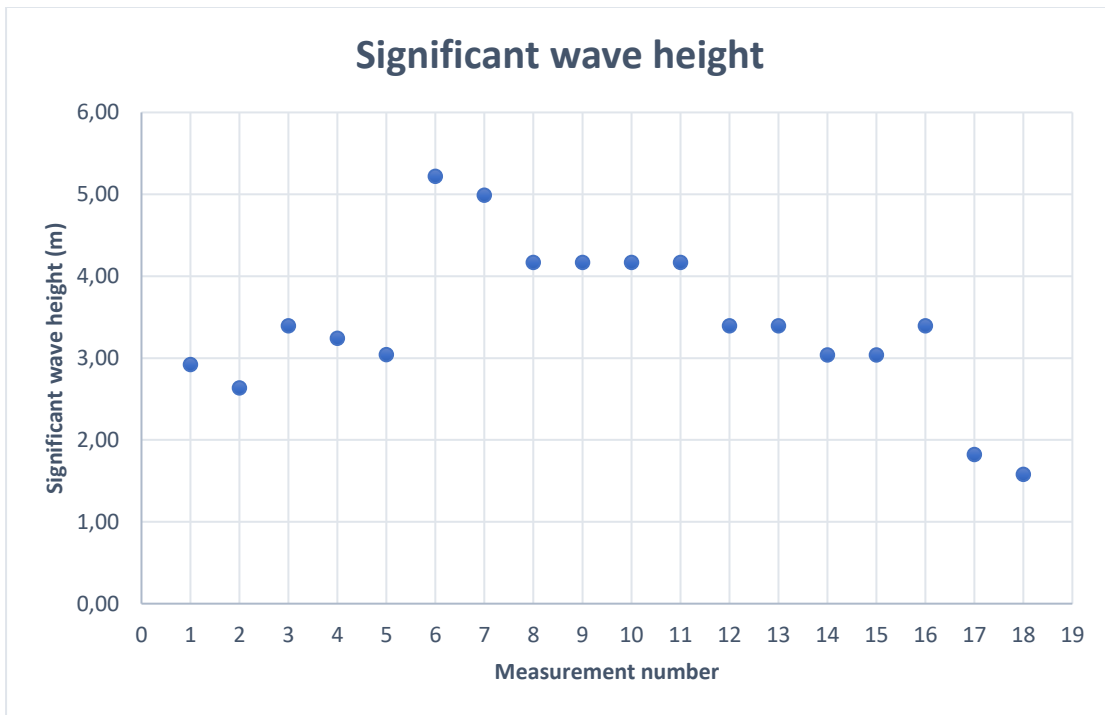
Διάγραμμα 5 (Full Load)



Διάγραμμα 6 (Half Load)



Διάγραμμα 7 (Full Load)

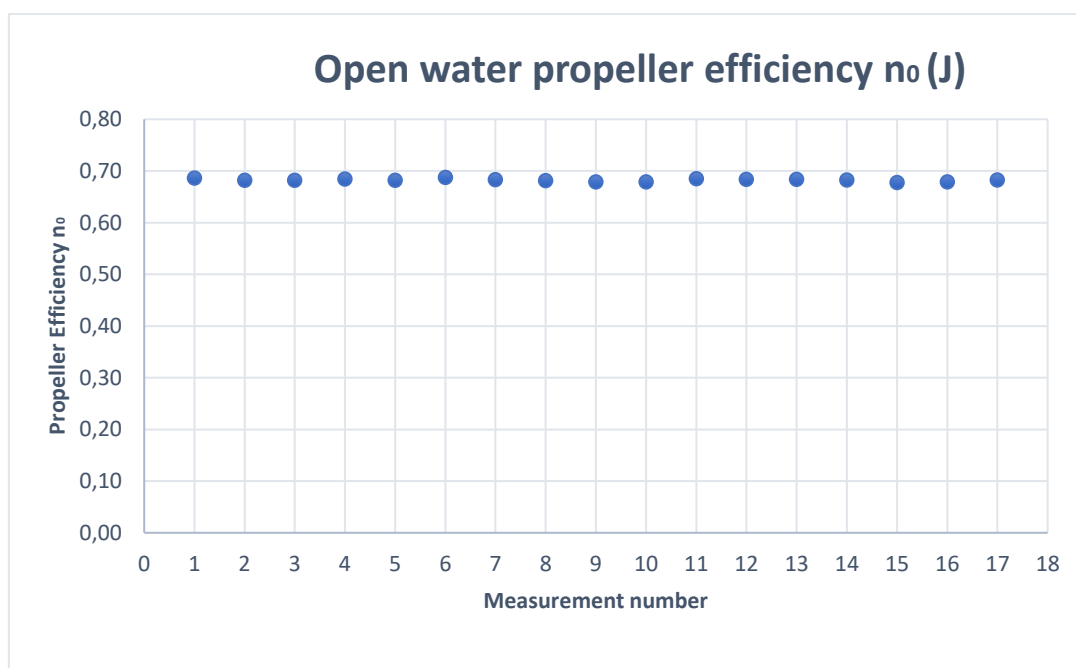


Διάγραμμα 8 (Half Load)

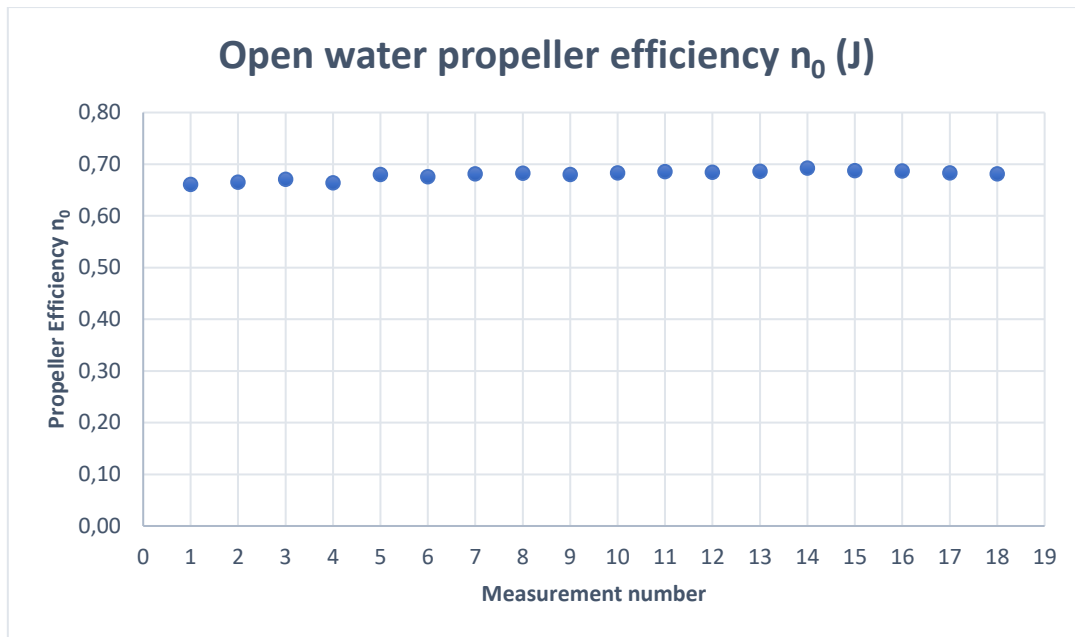
Τα διαγράμματα 1 έως και 8 κατασκευάστηκαν με σκοπό να μελετηθεί το πλοίο σε όσο το δυνατόν πιο αντιπροσωπευτικές καταστάσεις. Οι καταστάσεις που μελετήθηκαν παρουσιάζουν ιδιαιτερότητες ως προς μία ή παραπάνω παραμέτρους, οι οποίες επιδρούν αθροιστικά στην απόδοση του πλοίου. Επιλέχθηκαν καταστάσεις που εμφάνισαν μεγάλη επαναληψιμότητα ανάμεσα στις πραγματικές καταγραφές. Πιο συγκεκριμένα, οι παράμετροι που μελετήθηκαν στα διαγράμματα 1-8 αφορούν την ταχύτητα του πλοίου, την ταχύτητα του ανέμου, τη γωνία συνάντησης του πλοίου με τον άνεμο και το σημαντικό ύψος κύματος. Η κατανομή των επιμέρους περιπτώσεων-καταστάσεων που εξετάστηκαν, βρίσκεται με αύξοντα αριθμό στον οριζόντιο άξονα κάθε γραφήματος. Επομένως, με μια υπέρθεση, είναι εμφανείς οι συνθήκες υπό τις οποίες το πλοίο βρισκόταν σε λειτουργία.

Σύμφωνα με τα διαγράμματα 1-2, το πλοίο γενικά κινούταν με ταχύτητες 6-12m/s ή εναλλακτικά 11.66-23.32kn, ανάλογα με την κατάσταση θάλασσας. Παρατηρούμε ότι παρέμεινε μακριά από την ταχύτητα σχεδιασμού των 25.80kn. Αυτό ενδεχομένως να οδηγεί στο συμπέρασμα ότι προκειμένου να βελτιωθεί η ενεργειακή αποδοτικότητα του πλοίου, ο καπετάνιος επέλεξε να μειώσει την ταχύτητα του πλοίου, ανεξάρτητα από την κατάσταση της θάλασσας. Βέβαια, η επιλογή μείωσης της ταχύτητας, μπορεί να κρύβει επιπρόσθετους λόγους, όπως τις απαιτήσεις του ναυλωτή, την κατάσταση της γάστρας και της προπέλας, αλλά και την πραγματική κατάσταση της θάλασσας, όπου κινούταν το πλοίο.

Έπειτα, η ταχύτητα ανέμου κυμάνθηκε μεταξύ 1.5-11m/s για τη FL κι αντίστοιχα 7.8-18m/s για τη HL (διάγραμμα 3-4). Το εύρος ταχυτήτων του ανέμου είναι αρκετά μεγάλο και αντιπροσωπεύει πολλές πραγματικές καταστάσεις καιρού. Όσον αφορά τη γωνία συνάντησης του κύματος με την πλώρη, για τη FL κατάσταση διακρίνουμε εύρος 24-341° κι αντίστοιχα 22-343° για τη HL (διάγραμμα 5-6). Τέλος, το πραγματικό σημαντικό ύψος κύματος κυμάνθηκε μεταξύ 0.3-3.4m για τη FL και 1.6-5.3m για τη HL (διάγραμμα 7-8). Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, έγινε κατάλληλη επιλογή καταστάσεων, προκειμένου να προκύψει όσο το δυνατόν πιο αντιπροσωπευτική εικόνα σχετικά με τις πιθανές πραγματικές καταστάσεις που μπορεί να βρεθεί το πλοίο κατά τη λειτουργία του.

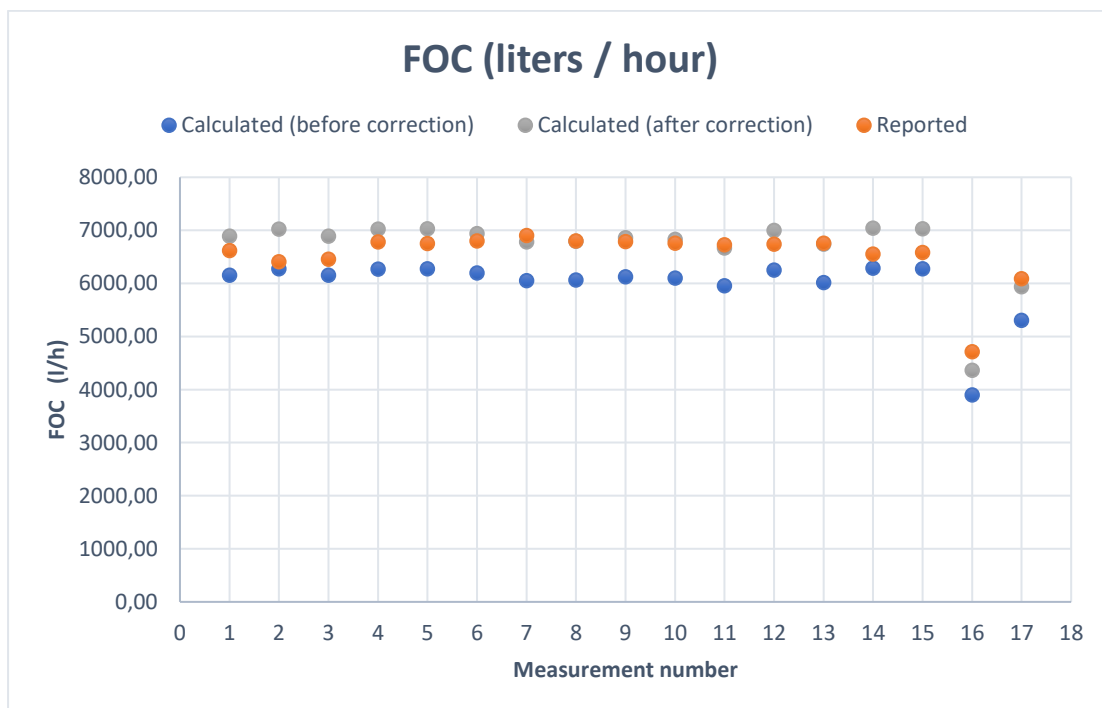


Διάγραμμα 9 (Full Load)

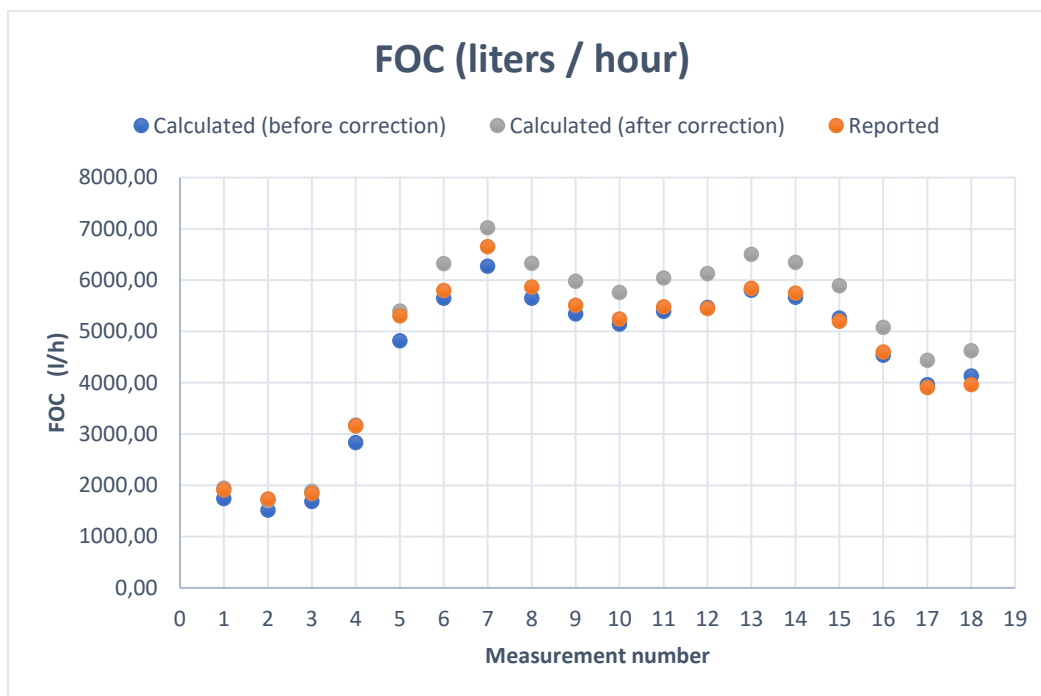


Διάγραμμα 10 (Half Load)

Στα διαγράμματα 9 και 10 φαίνεται ο βαθμός απόδοσης έλικας η_0 σε ελεύθερη ροή, δηλαδή, όταν η έλικα λειτουργεί σε ομοιογενές πεδίο ομόρρου χωρίς γάστρα μπροστά της. Υπολογίζεται συναρτήσει του βαθμού προχώρησης J και μας δίνει πληροφορίες σχετικά με τις συνθήκες υπό τις οποίες λειτουργεί η προπέλα. Για την περίπτωση Full Load, κινήθηκε μεταξύ 67-68%, ενώ στην Half Load 66-69%. Οι τιμές αυτές θεωρούνται αποδεκτές για το υπό μελέτη containership, καθώς βρίσκονται εντός του εύρους 65-75%, το οποίο υποδεικνύεται από τη θεωρία που αναφέρεται στην ενότητα 4.3.



Διάγραμμα 11 (Full Load)

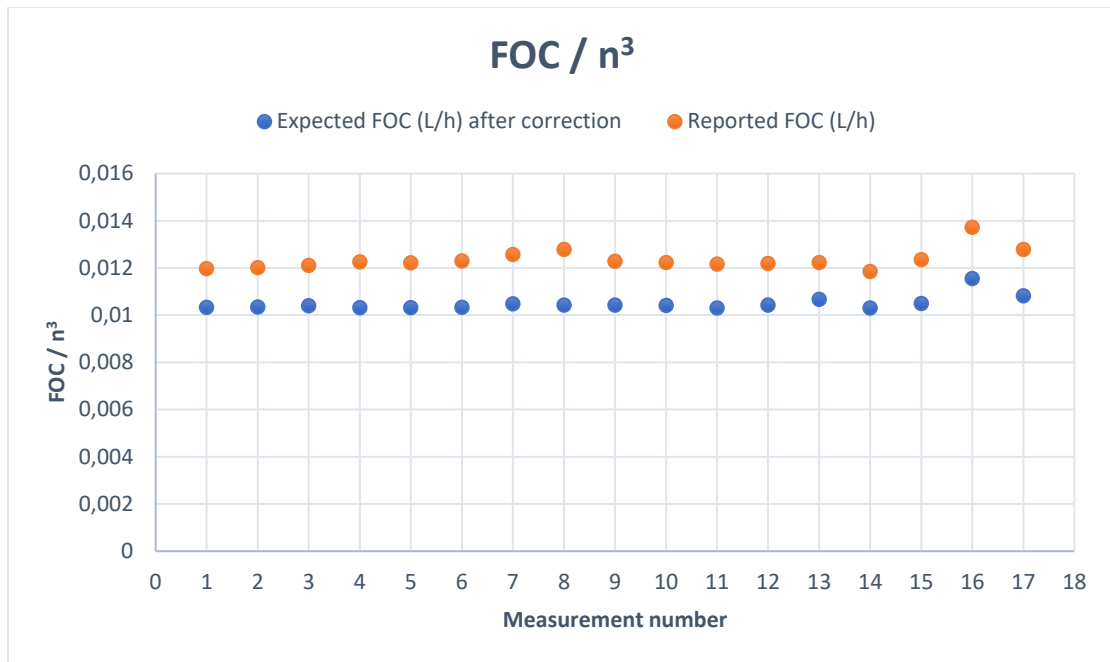


Διάγραμμα 12 (Half Load)

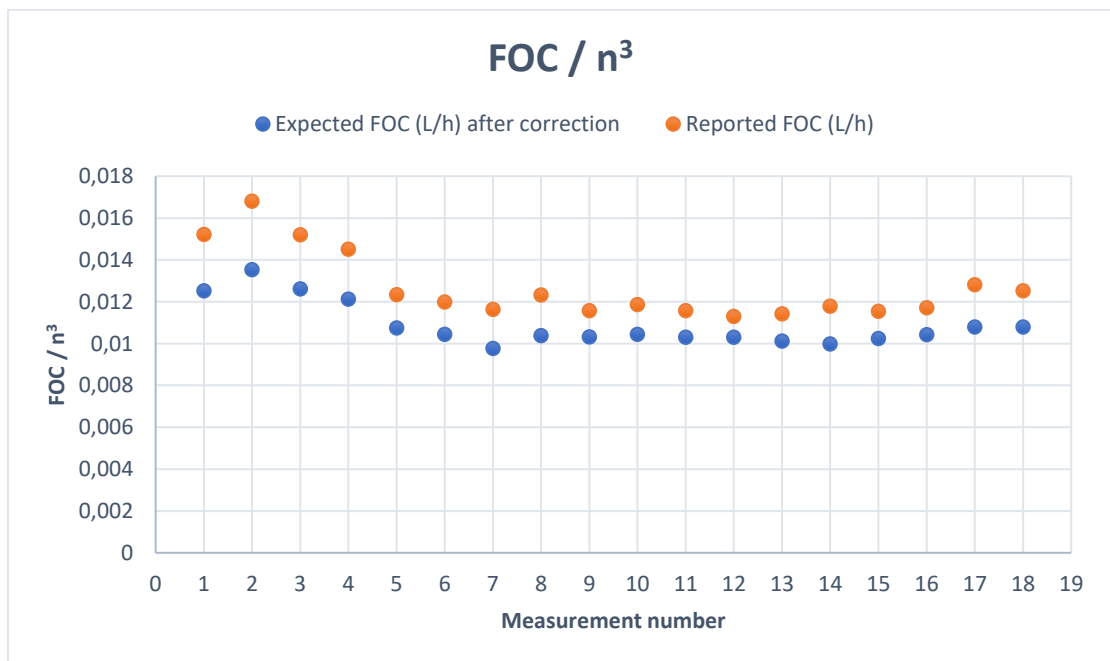
Έπειτα, στα διαγράμματα 11 και 12, παρουσιάζεται η ωριαία κατανάλωση καυσίμου που προέκυψε για κάθε τρέξιμο-κατάσταση. Οι τιμές που παρουσιάζονται αναφέρονται στις αναμενόμενες τιμές από την ανάλυση που υλοποιήθηκε (expected), πριν και μετά τις διορθώσεις, καθώς και στις αντίστοιχες πραγματικές που μας δόθηκαν από τα μετρητικά ακριβείας (reported).

Στην περίπτωση της FL, παρατηρούμε ότι οι τιμές που προέκυψαν πριν τις διορθώσεις, βρίσκονται κοντά και χαμηλότερα σε σχέση με τις τιμές που μας δόθηκαν, ενώ μετά τις διορθώσεις, η διαφορά αυτή καλύπτεται (περιπτώσεις 6-11 και 13) και μάλιστα, μερικές φορές υπερκαλύπτεται (περιπτώσεις 1-5 και 14-15). Γνωρίζουμε ότι η ωριαία κατανάλωση αυξάνεται σημαντικά με την αύξηση της ταχύτητας του πλοίου ή κατά τη συνάντηση του πλοίου με τις μετωπικές θάλασσες. Ωστόσο, η πολυπλοκότητα της ανάλυσης έγκειται στο γεγονός ότι οι παράγοντες που επιδρούν ταυτόχρονα είναι πολλοί, επομένως δεν μπορεί να βγει ασφαλές συμπέρασμα, εξετάζοντας μόνο μια παράμετρο. Παραδείγματος χάρη, στην περίπτωση 16 (διάγραμμα 5 και 7), παρατηρούμε ότι το πλοίο συναντά σχεδόν μετωπικούς κυματισμούς με σημαντικό ύψος κύματος περίπου 3.50 μέτρα. Η πρώτη πιθανή ερμηνεία οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η ωριαία κατανάλωση θα ανέβει, σε σχέση με τις υπόλοιπες υπό μελέτη καταστάσεις. Μολαταύτα, κάτι τέτοιο δεν προκύπτει με εμφανή τρόπο, καθώς το πλοίο φαίνεται πως έχει ελαττώσει ταχύτητα και κινείται με λιγότερο από 9.5m/s (διάγραμμα 1).

Συνεχίζοντας στην περίπτωση HL και παρατηρώντας το διάγραμμα 12 αντικρίζουμε σχεδόν την ίδια εικόνα. Οι τιμές που προέκυψαν πριν τις διορθώσεις βρίσκονται κοντά και σχεδόν πάντοτε πιο χαμηλά σε σχέση με τις τιμές που μας δόθηκαν. Μετά τις διορθώσεις, όμως, η διαφορά αυτή καλύπτεται (περιπτώσεις 1-5) και τις περισσότερες φορές υπερκαλύπτεται (περιπτώσεις 9-18).

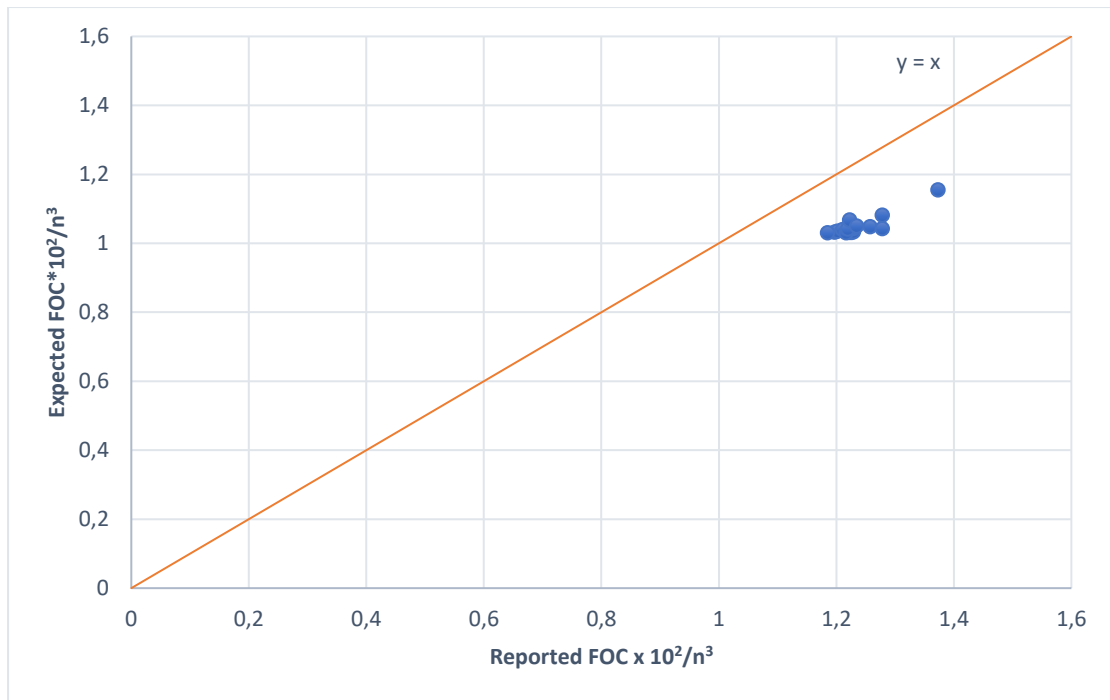


Διάγραμμα 13 (Full Load)

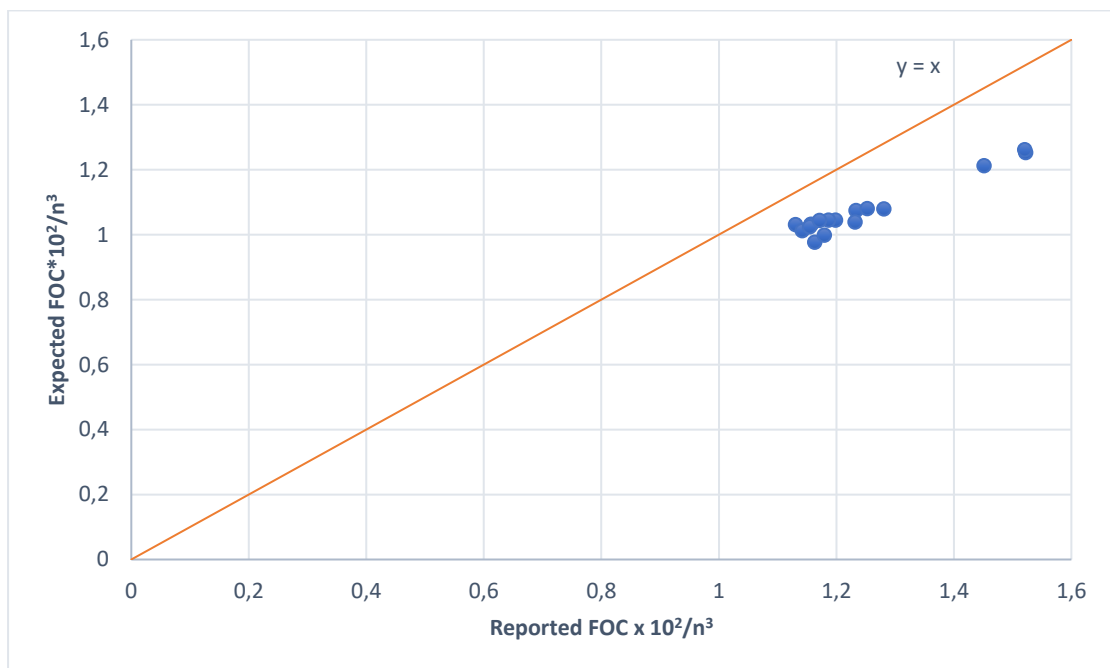


Διάγραμμα 14 (Half Load)

Συνεχίζοντας, τα διαγράμματα 13-14 δείχνουν τη σχέση μεταξύ της κατανάλωσης πετρελαίου και των στροφών της κύριας προωστήριας μηχανής, υψωμένων εις την τρίτη δύναμη. Γνωρίζοντας ότι η κατανάλωση είναι ανάλογη της ισχύος πέδησης P_B , η οποία είναι ανάλογη του ρυθμού περιστροφής εις τον κύβο, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι υπάρχει εξάρτηση μεταξύ της FOC και του μεγέθους n^3 . Παρατηρούμε επιπρόσθετα ότι η πλειονότητα των αποτελεσμάτων είναι κοντά στις τιμές που μας δόθηκαν, γεγονός που αποδεικνύει ότι η ανάλυση που υλοποιήθηκε αποτελεί μια καλή προσέγγιση στις πραγματικές καταστάσεις.

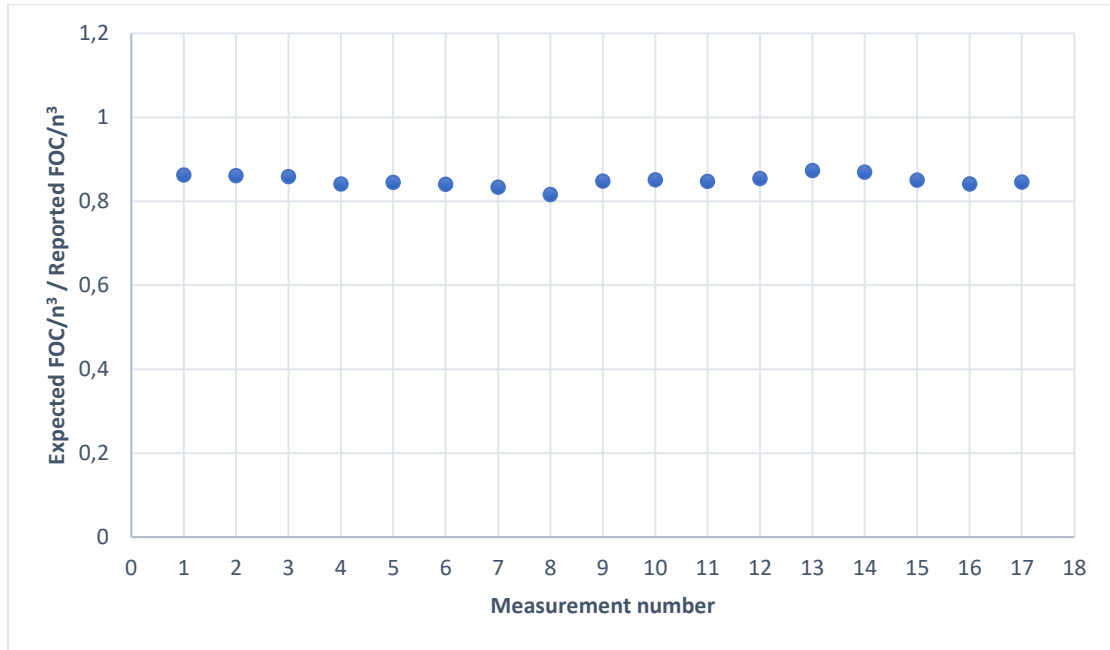


Διάγραμμα 15 (Full Load)

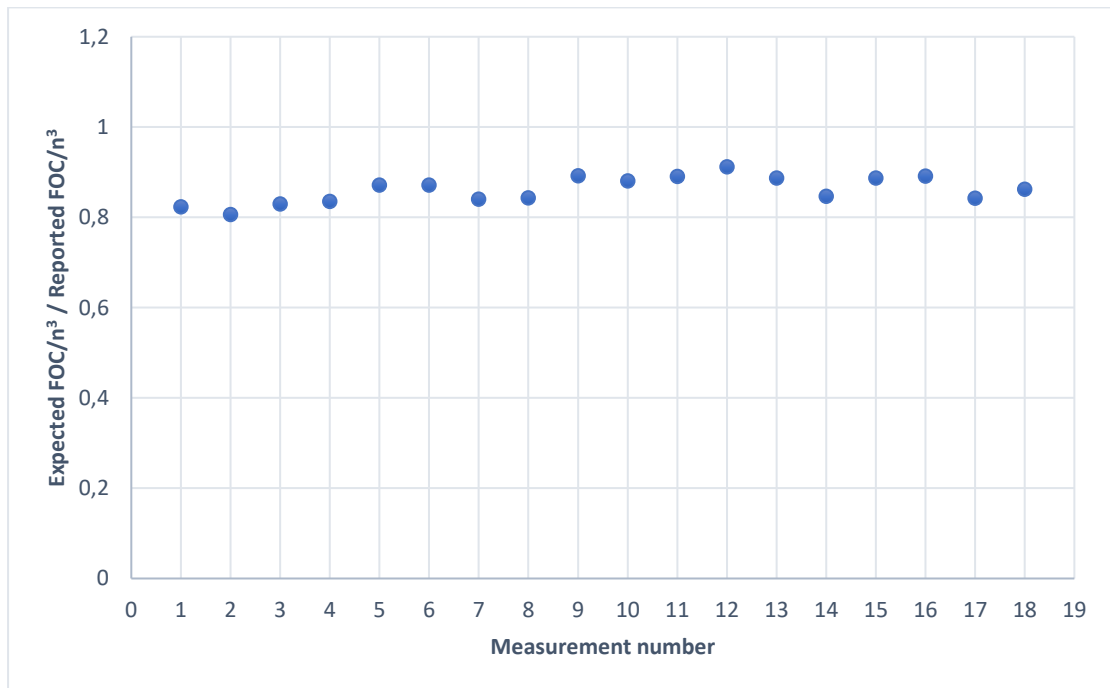


Διάγραμμα 16 (Half Load)

Τα διαγράμματα 15-16 απεικονίζουν τη σύγκριση μεταξύ των διορθωμένων αναμενόμενων τιμών κατανάλωσης (expected) και των αντίστοιχων αναφερόμενων (reported), διαιρεμένες με την ποσότητα n³. Παρατηρούμε ότι οι αναφερόμενες τιμές, είναι υψηλότερες από τις αντίστοιχες αναμενόμενες, τόσο για τη FL, όσο και για τη HL κατάσταση.

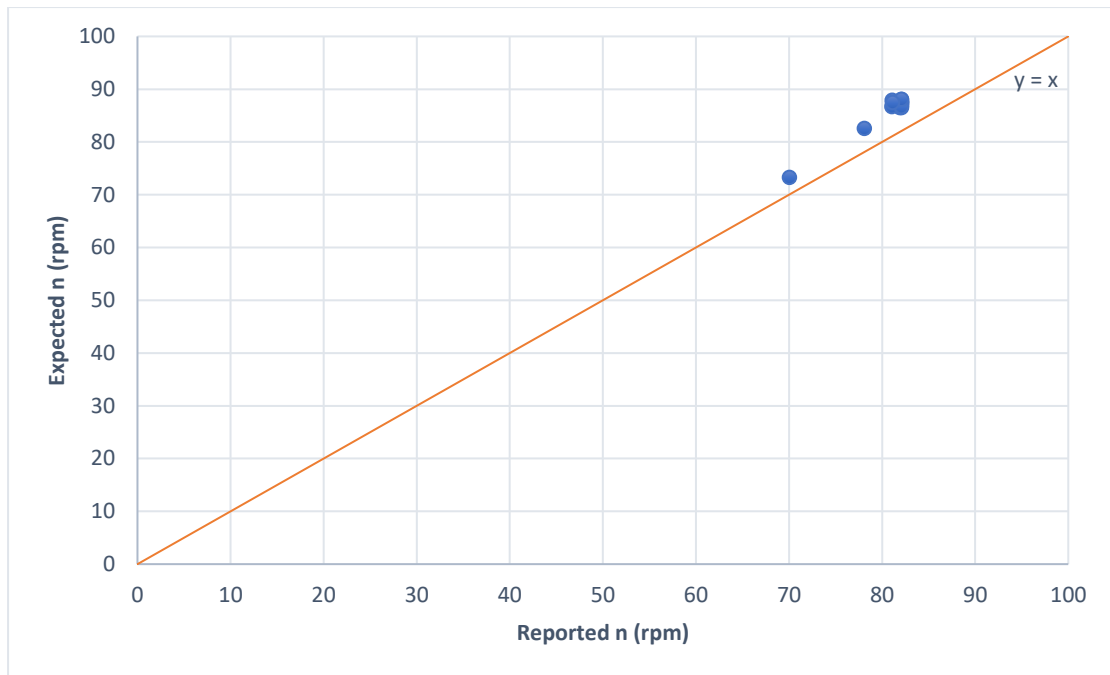


Διάγραμμα 17 (Full Load)

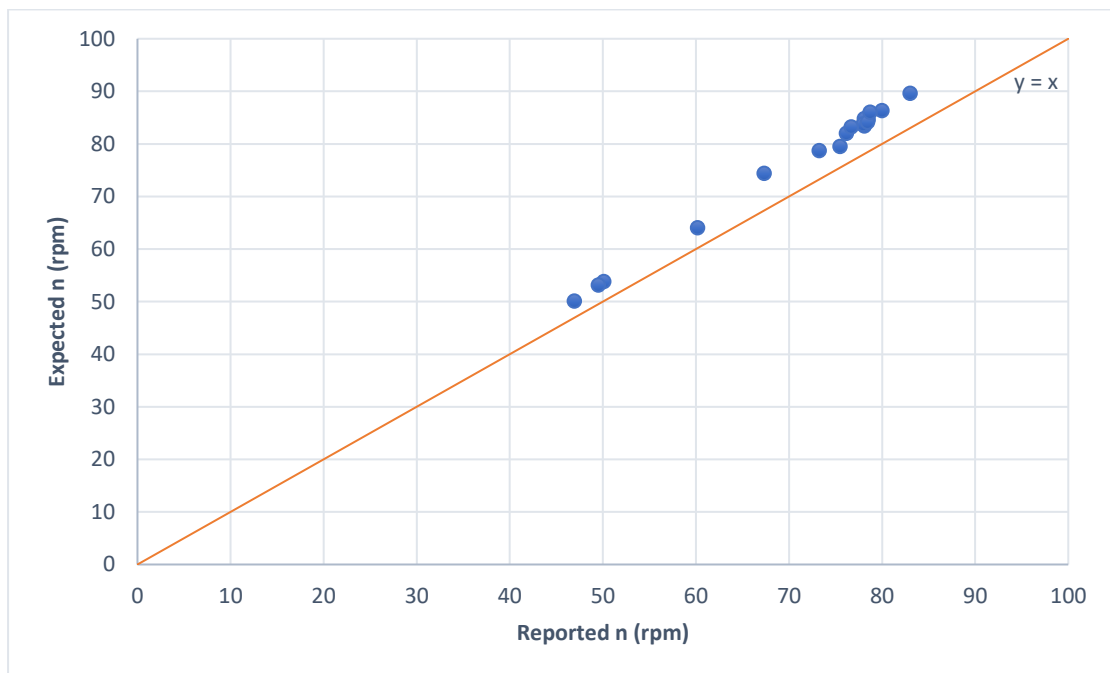


Διάγραμμα 18 (Half Load)

Στη συνέχεια, τα διαγράμματα 17-18 δείχνουν το λόγο των ποσοτήτων που περιγράφηκαν στα διαγράμματα 15-16. Το αξιοσημείωτο και ιδιαίτερα σημαντικό για τα διαγράμματα 13 έως και 18, είναι ότι ακόμα και στην περίπτωση που υπάρχει ενδεχομένως μια σημαντική απόκλιση FOC (στο διάγραμμα 13 ή 14), το κλάσμα FOC/n^3 τείνει να την ομαλοποιήσει με τις υπόλοιπες καταστάσεις, καθώς επιπρόσθετα λαμβάνει υπόψη τον αριθμό των απαιτούμενων στροφών του κινητήρα.

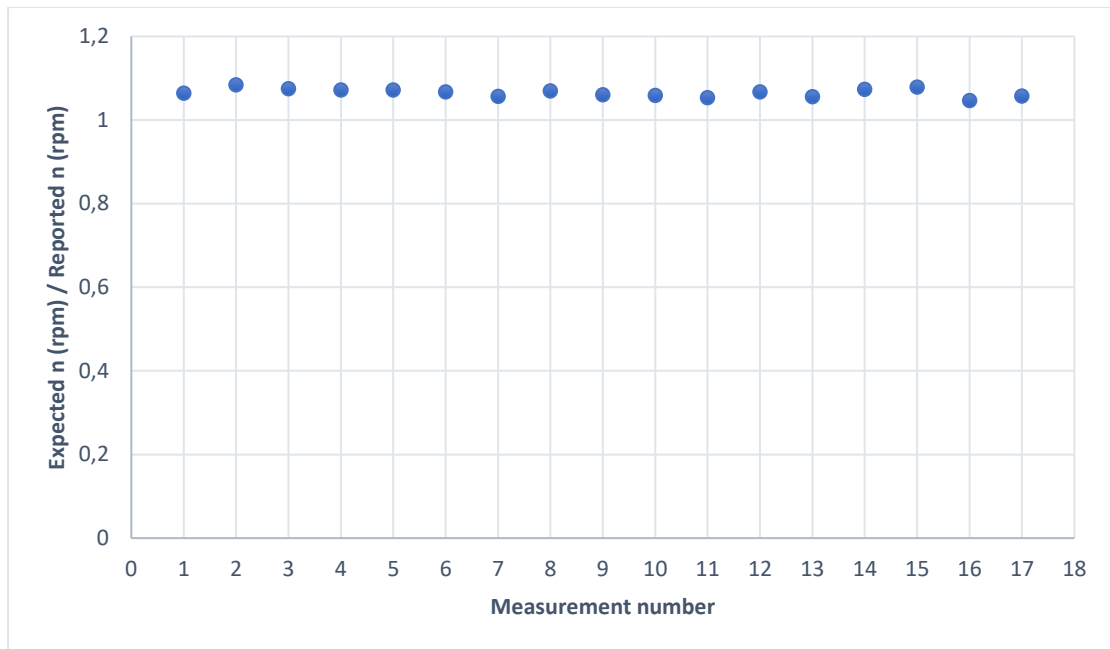


Διάγραμμα 19 (Full Load)

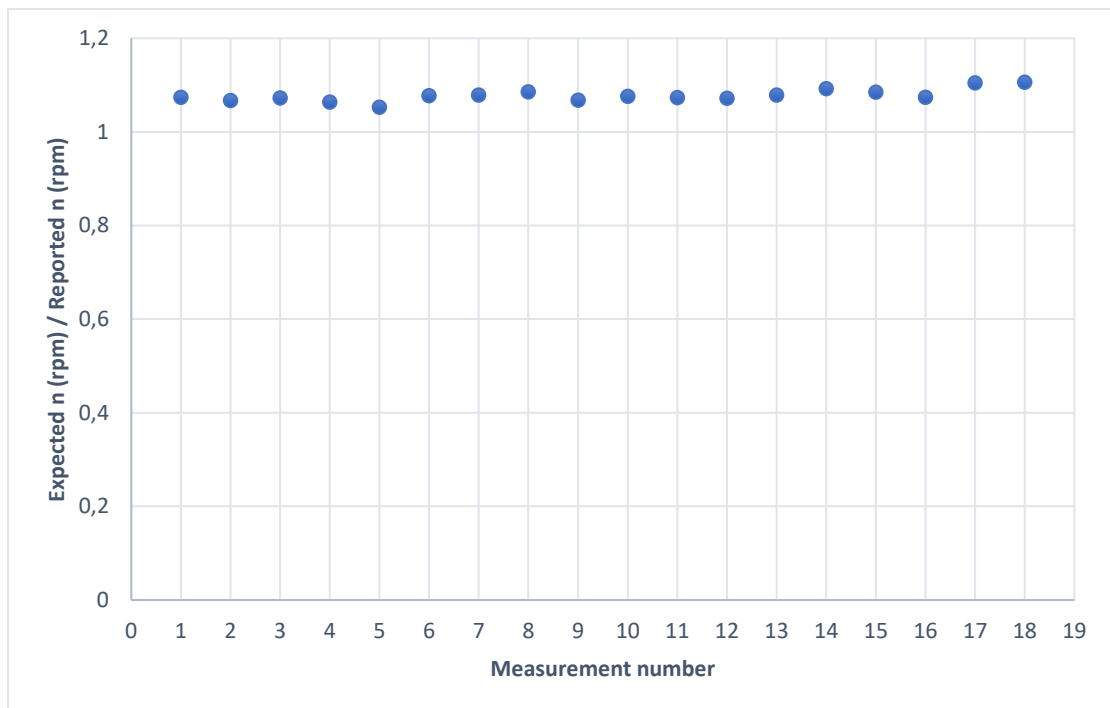


Διάγραμμα 20 (Half Load)

Έπειτα, τα διαγράμματα 19-20 αναφέρονται στη σχέση μεταξύ των στροφών του κινητήρα που υπολογίστηκαν και των αντίστοιχων αναφερθέντων. Παρατηρούμε και στις δύο περιπτώσεις, ότι οι στροφές αυξάνονται ομαλά και ακολουθούν όμοια πορεία, παράλληλα στο $y=x$. Το εύρος κυμαίνεται μεταξύ 48-84rpm για τη περίπτωση FL και 70-83rpm για τη HL αντίστοιχα, με αποκλίσεις 4-7% και 5-9% αντίστοιχα. Οι διαφορές κρίνονται αποδεκτές καθώς είναι μικρές. Παράλληλα, οι πραγματικές συνθήκες λειτουργίας της προπέλας δεν μας επιτρέπουν τον περαιτέρω έλεγχο της ορθότητας της παραμέτρου αυτής.



Διάγραμμα 21 (Full Load)



Διάγραμμα 22 (Half Load)

Τα διαγράμματα 21-22 απεικονίζουν το πηλίκο των στροφών του κινητήρα που περιγράφηκαν στα διαγράμματα 19-20. Παρατηρούμε ότι ο απαιτούμενος αναμενόμενος αριθμός στροφών (expected) είναι μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο που δόθηκε ως δεδομένο (reported). Ωστόσο, οι αποκλίσεις που εντοπίζονται παραμένουν μικρές, καθώς και στις δύο περιπτώσεις, είναι κάτω από 9%.

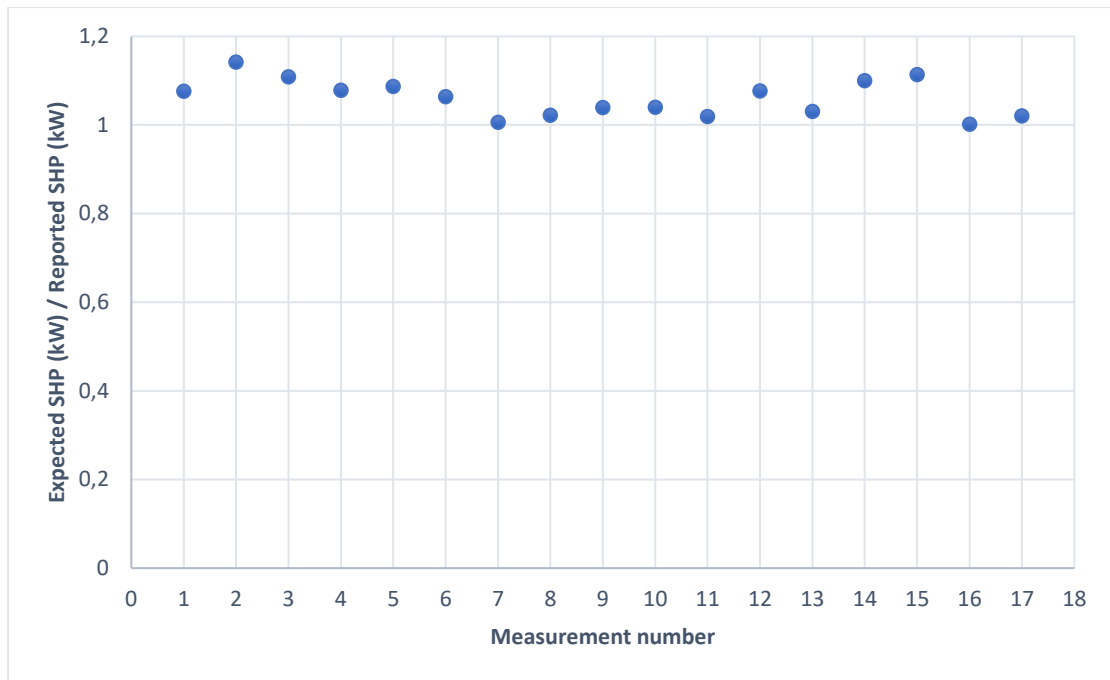


Διάγραμμα 23 (Full Load)

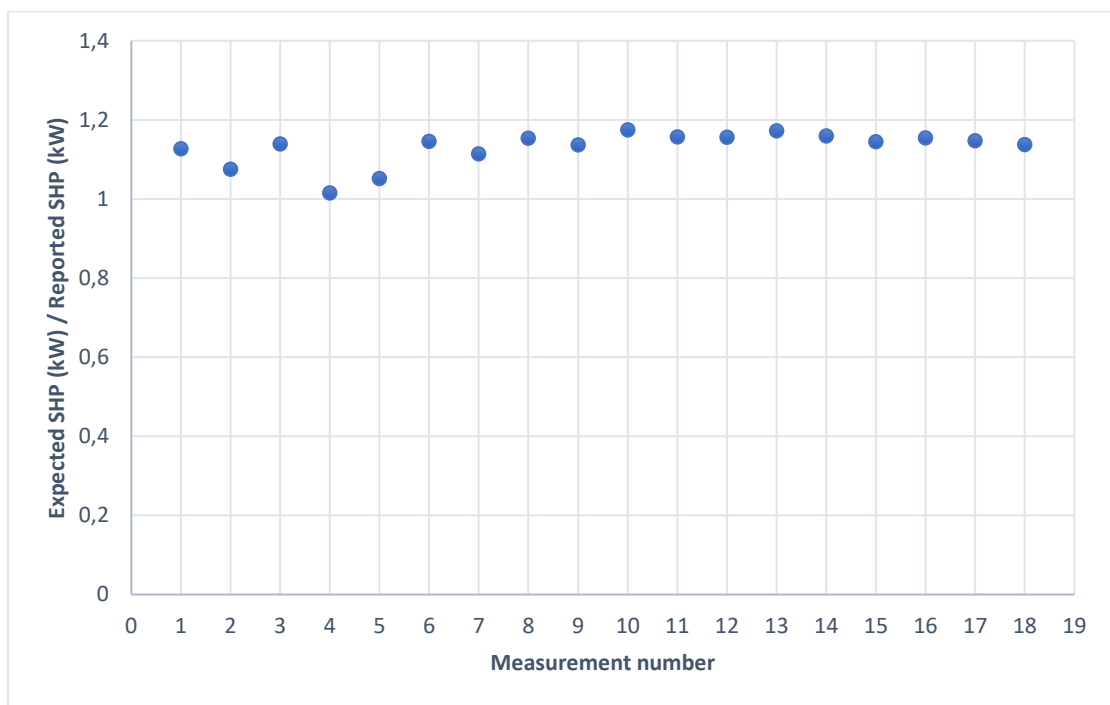


Διάγραμμα 24 (Half Load)

Στη συνέχεια, στα διαγράμματα 23-24 φαίνεται η σχέση μεταξύ της ισχύος άξονα SHP ανάμεσα στις expected και reported τιμές. Παρατηρούνται αποκλίσεις της τάξης του 2-14% για τη FL και 7-17% για τη HL κατάσταση. Εν μέρει, τα διαγράμματα αυτά συνδέονται με τα διαγράμματα 11-12, όπου παρουσιάζεται η ωριαία κατανάλωση πετρελαίου, δεδομένου του σχήματος της καμπύλης της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου. Οριακά αυξημένες τιμές ισχύος πρόκειται να συναντήσουν την καμπύλη της SFOC ελάχιστα πιο χαμηλά, άρα σε μικρότερη τιμή ειδικής κατανάλωσης, καταλήγοντας έτσι σε παρόμοιες τελικές τιμές κατανάλωσης.



Διάγραμμα 25 (Full Load)

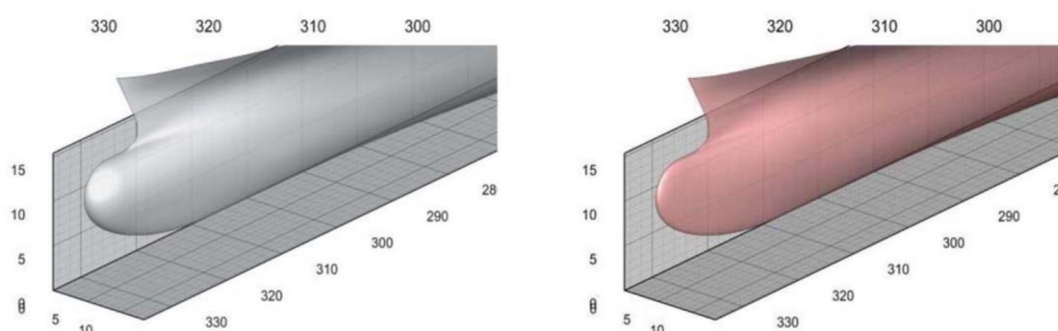


Διάγραμμα 26 (Half Load)

Τα διαγράμματα 25 και 26 απεικονίζουν το λόγο της ισχύος SHP, όπως περιγράφηκαν στα διαγράμματα 23-24. Παρατηρούμε ότι η απαιτούμενη αναμενόμενη τιμή ισχύος είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη αναφερόμενη και πραγματική τιμή (reported). Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, παρατηρούνται διαφορές της τάξης του 2-14% για τη Full Load και 7-17% για τη Half Load κατάσταση.

5.3 Έλεγχος κατανάλωσης πριν και μετά το δεξαμενισμό, προσθήκη νέου βολβού

Στη συνέχεια, το ενδιαφέρον επικεντρώθηκε στην εκτίμηση της διαφοράς κατανάλωσης καυσίμου πριν και μετά το δεξαμενισμό. Θεωρώντας ότι δεν έχουμε καθόλου κυματισμό και άνεμο, ασχοληθήκαμε αποκλειστικά με την αντίσταση σε ήρεμο νερό $R_{\text{calm water}}$. Παράλληλα, σύμφωνα με τις υποδείξεις της διαχειρίστριας εταιρίας, κατά το δεξαμενισμό άλλαξε ο βολβός της γάστρας. Για το λόγο αυτό, πραγματοποιήθηκαν εκ νέου δοκιμές μοντέλου, προκειμένου να εκτιμηθούν οι ιδιότητες του νέου βολβού. Τελικά, αποδείχθηκε ότι ήταν προτιμότερος από πλευράς αντίστασης πλοίου και ισχύς άξονα, σε σχέση με τον αρχικό, στο διάστημα ταχυτήτων 10-21kn.



Σχήμα 5.2: Αρχικός βολβός (αριστερά) και νέος βολβός (δεξιά)

Τα κύρια χαρακτηριστικά του μοντέλου καθώς και του containership δίνονται στους πίνακες 5.1 και 5.2:

Principal particulars	Load Condition			
Ship length overall, L_{OA} , m	320.0			
Breadth, B_{OA} , m	42.8			
Draught (even keel), T , m	12.0	13.0	13.5	14.0
Waterline length, L_{WL} , m	314.0	317.6	320.1	322.7
Volume displacement, ∇ , m^3	103213	114217	119850	125574
Wetted surface area of bare hull, S , m^2	15697	16569	17030	17458
Block coefficient by L_{WL} , C_B	0.640	0.646	0.648	0.649
L_{WL}/B	7.336	7.421	7.479	7.540
B/T	3.567	3.292	3.170	3.057
$L_{WL}/\sqrt[3]{\nabla}$	6.694	6.546	6.492	6.444
Control speed, V_S , kn	12; 15; 18; 21			

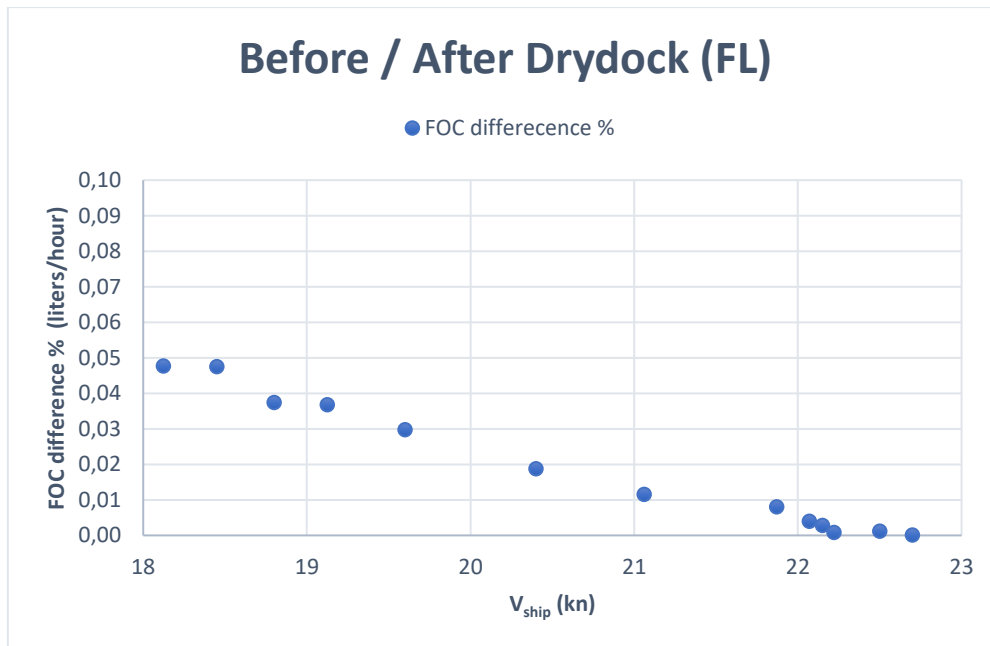
Πίνακας 5.1: Κύρια στοιχεία του πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων

Principal particulars	Load Condition			
Model Scale	35.2			
Breadth, B_{OA} , m	1.216			
Draught (even keel), T , m	0.341	0.369	0.384	0.398
Waterline length, L_{WL} , m	8.920	9.023	9.094	9.168
Volume displacement, ∇ , m^3	2.366	2.619	2.748	2.879
Wetted surface area of bare hull, S , m^2	12.669	13.372	13.745	14.090
Control speed, V_M , m/s	1.04; 1.30; 1.56; 1.82			

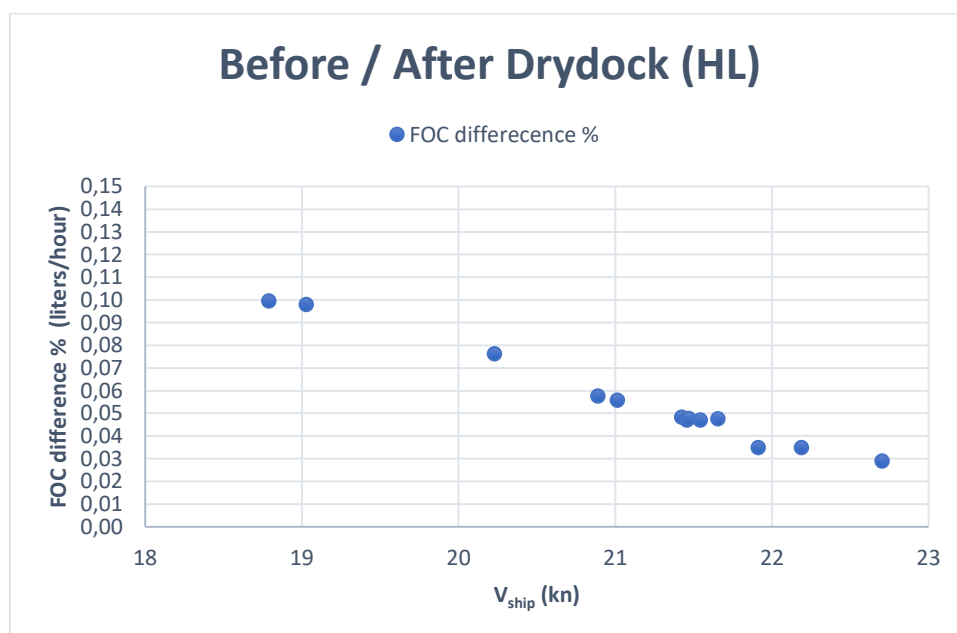
Πίνακας 5.: Κύρια στοιχεία του μοντέλου

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, υλοποιήθηκαν υπολογισμοί σχετικά με την ωριαία κατανάλωση καυσίμου της κύριας μηχανής, πριν και μετά το δεξαμενισμό, για τις διάφορες καταστάσεις. Η ανάλυση επικεντρώθηκε κυρίως στο διάστημα ταχυτήτων 18.8 έως 22.7kn, καθώς, σύμφωνα με τα δεδομένα που είχαμε στη διάθεση μας, το πλοίο βρισκόταν για μεγάλα χρονικά διαστήματα σε αυτό το εύρος ταχυτήτων πλεύσης.

Έτσι, προέκυψαν τα ακόλουθα γραφήματα:



Διάγραμμα 27 (Full Load)



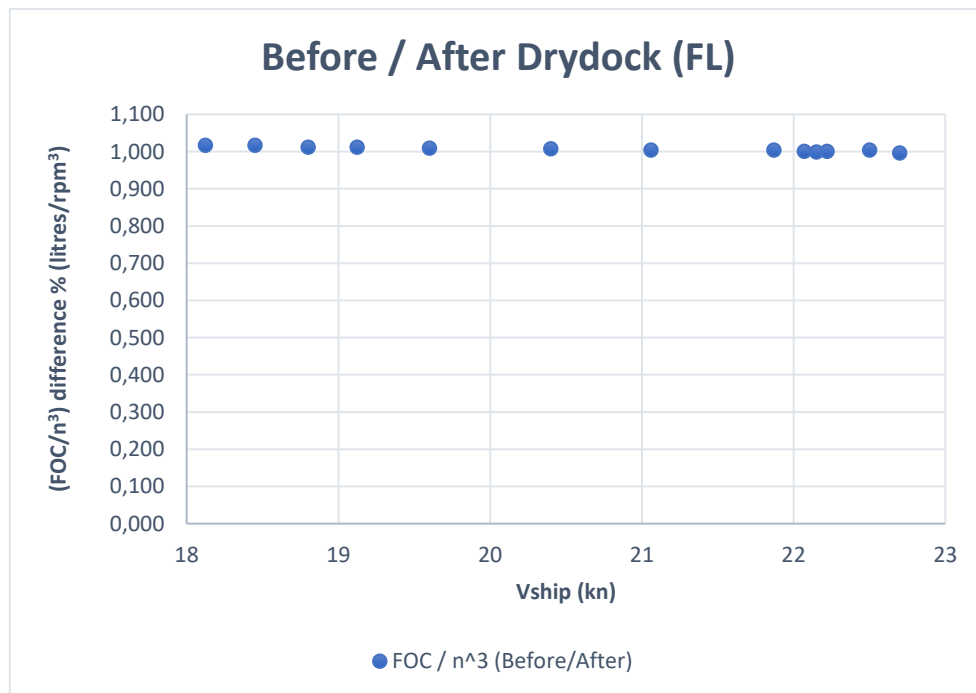
Διάγραμμα 28 (Half Load)

Τα διαγράμματα 27 και 28 αναφέρονται στην ποσοστιαία διαφορά των καταναλώσεων πετρελαίου πριν και μετά το δεξαμενισμό. Υπενθυμίζουμε ότι η τοποθέτηση του νέου βολβού κατά το δεξαμενισμό συνέβαλε σημαντικά στις διαφορές που προκύπτουν. Όπως αναφέρθηκε ήδη, σύμφωνα με τις νέες δοκιμές μοντέλου που υλοποιήθηκαν, ο νέος βολβός είναι προτιμότερος από πλευράς αντίστασης πλοίου και ισχύος άξονα σε σχέση με τον αρχικό, στο διάστημα ταχυτήτων 10-21kn. Ωστόσο, από τους 21kn κι έπειτα, φαίνεται πως επιδρά αρνητικά στην κατανάλωση καυσίμου.

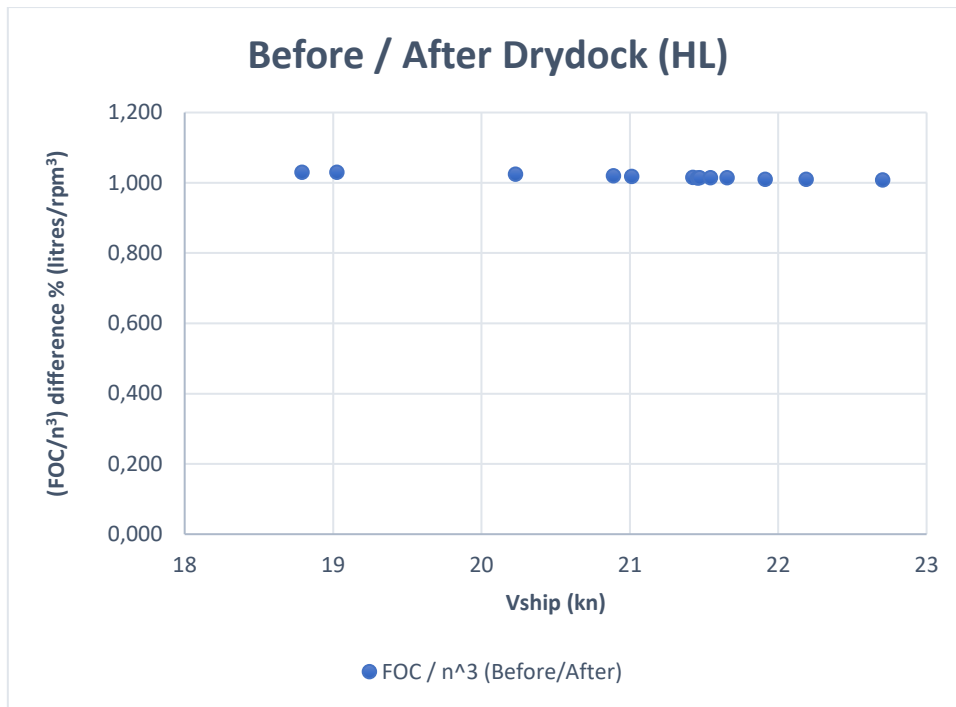
Πιο συγκεκριμένα, για την περίπτωση της κατάστασης Full Load, εντοπίζεται ποσοστιαία διαφορά από 4.8% έως το μηδέν. Όσον αφορά την περίπτωση Half Load, οι ποσοστιαίες διαφορές είναι σημαντικά μεγαλύτερες, καθώς κυμαίνονται από 10% έως 3%. Είναι εμφανές ότι για το ίδιο εύρος ταχυτήτων, η HL βελτιώθηκε ενεργειακά περισσότερο σε σχέση με τη FL κατάσταση. Τέλος, παρατηρούμε και οι δύο καταστάσεις φόρτωσης παρουσιάζουν όμοια συμπεριφορά, διότι οι εκάστοτε ποσοστιαίες διαφορές πριν και μετά το δεξαμενισμό ελαττώνονται, καθώς μεταβαίνουμε από τους 18.8kn στους 22.7kn.

Καθώς το σύνολο των παραπάνω υπολογισμών αναφέρεται σε ωριαίες καταναλώσεις πετρελαίου, οποιαδήποτε θετική ποσοστιαία διαφορά προκύψει μετά το δεξαμενισμό, μπορεί να θεωρηθεί ενεργειακά προτιμότερη και οικονομικά πιο συμφέρουσα.

Ολοκληρώνοντας, ακολουθούν τα διαγράμματα 29 και 30, όπου παρουσιάζεται ο λόγος της ποσότητας FOC/n^3 πριν και μετά το δεξαμενισμό.



Διάγραμμα 29 (Full Load)



Διάγραμμα 30 (Half Load)

Καθώς λαμβάνονται υπόψη οι απαιτούμενες στροφές του κινητήρα, αναμένονται πιο ομαλοποιημένα αποτελέσματα σε σχέση με τα διαγράμματα 27 και 28, δηλαδή μικρότερες ποσοστιαίες αποκλίσεις. Παρατηρούμε ότι για την Full Load κατάσταση εντοπίζονται διαφορές μεταξύ 1.7% και -0.3%, ενώ για τη Half Load 3% έως 0.8% αντίστοιχα. Είναι ορατό ότι ξεπερνώντας τους 22kn, παρά τον καθαρισμό της γάστρας και της προπέλας, δεν είναι εφικτό να υλοποιηθεί περαιτέρω μείωση της κατανάλωσης του πετρελαίου. Παρατηρείται μάλιστα οριακή αύξηση, η οποία εν μέρει θεωρείται αναμενόμενη, με βάση τα model test για το νέο βολβό. Παράλληλα, καθώς η ταχύτητα του πλοίου έχει αυξηθεί σημαντικά, γίνεται όλο και πιο δύσκολο να εντοπίσουμε σαφείς διαφορές ως προς την ενεργειακή αποδοτικότητα του πλοίου, πριν και μετά το δεξαμενισμό. Ολοκληρώνοντας, το αξιοσημείωτο στα διαγράμματα 29 και 30 είναι το γεγονός ότι το πηλίκιο FOC/n^3 ελαττώνεται καθώς η ταχύτητα πλεύσης του πλοίου αυξάνεται.

5.4 Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η εξαγωγή συμπερασμάτων για κάθε διάγραμμα ξεχωριστά αποτελεί πιθανή προσέγγιση της πραγματικής λειτουργίας του πλοίου, καθώς και της Ενεργειακής Αποδοτικότητάς του. Στην παρούσα εργασία, μελετήθηκε ένα containership 8530 TEU σε δύο συγκεκριμένες καταστάσεις φόρτωσης. Η πρώτη αναφέρεται στην κατάσταση πλήρους φόρτωσης, ενώ η δεύτερη σε μια ενδιάμεση κατάσταση φόρτωσης. Η επιλογή βασίζεται στο γεγονός ότι το πλοίο παρουσίαζε τους συγκεκριμένους συνδυασμούς διαγωγής-βυθισμάτων για μεγάλο αριθμό καταγραφών, επομένως και για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Επιπρόσθετα, οι καταστάσεις που επιλέχθηκαν, αποτελούν σημαντικό αντικείμενο μελέτης για το συγκεκριμένο τύπο πλοίου.

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία διαφοροποιείται σε μεγάλο βαθμό από αντίστοιχες εργασίες που βασίζονταν αποκλειστικά σε καταγραφές από τα noon reports του πλοίου. Όπως αναφέρθηκε, μελετήθηκε ένα σύγχρονο πλοίο, το οποίο διαθέτει εξοπλισμό μέτρησης ακριβείας για μεγάλο αριθμό παραμέτρων, οι οποίες επηρεάζουν σημαντικά την απόδοση του πλοίου. Είναι εμφανές ότι οι στιγμιαίες μετρήσεις δίνουν τη δυνατότητα καλύτερης ανάλυσης καθώς και προσέγγισης των παραπάνω μεγεθών με μεγαλύτερη ακρίβεια. Ταυτόχρονα, ενισχύουν την προσπάθεια για πιο ουσιαστική κατανόηση της ευρύτερης συμπεριφοράς του πλοίου. Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τους υπολογισμούς, η μέθοδος που ακολουθήθηκε μπορεί να θεωρηθεί αρκετά ικανοποιητική, σε όλα τα στάδια της, καθώς αποτελεί μια καλή μέθοδο αρχικής εκτίμησης της κάθε κατάστασης για το συγκεκριμένο πλοίο. Παράλληλα, επιτρέπει την προσέγγιση διαφορετικών καταστάσεων και την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων που αφορούν τη χρονική εξέλιξη της ενεργειακής απόδοσής του.

Το πλοίο μελετήθηκε εκτεταμένα πριν και μετά το δεξαμενισμό του. Εκτός από τον καθαρισμό της γάστρας και της έλικας, τοποθετήθηκε νέος βολβός, για τον οποίο υλοποιήθηκαν νέα model test. Εργαζόμενοι όπως πριν και αξιοποιώντας την ίδια μέθοδο, έγινε η θεώρηση ότι το πλοίο λειτουργεί σε ήρεμο νερό, χωρίς άνεμο και κυματισμό. Έτσι, το ενδιαφέρον επικεντρώθηκε αποκλειστικά στον υπολογισμό της ωριαίας κατανάλωσης πετρελαίου καθώς και στην εκτίμηση της βελτίωσης της απόδοσής του, πριν και μετά το δεξαμενισμό.

Όσον αφορά τις όποιες αποκλίσεις των αποτελεσμάτων, ενδέχεται να οφείλονται σε σφάλματα κατά τον υπολογισμό του πραγματικού σημαντικού ύψους κύματος, το οποίο προσεγγίστηκε μέσω της υπέρθεσης κυματισμών, λόγω swell (από noon reports) και λόγω πνέοντος ανέμου (από Pierson-Moskowitz για πλήρως ανεπτυγμένες θάλασσες). Τόσο η χρήση δεδομένων από τα noon reports, όσο και η θεώρηση για πλήρως ανεπτυγμένες θάλασσες, ενδέχεται να εισάγουν στην ανάλυση μας ανακρίβειες. Επιπρόσθετα, οι πιθανές αποκλίσεις ίσως να οφείλονται στη θεώρηση ότι η κατεύθυνση των κυμάτων είναι ίδια με τη διεύθυνση του ανέμου, το οποίο ισχύει πολλές φορές, ωστόσο δεν συμβαίνει υποχρεωτικά.

Έπειτα, γνωρίζουμε ότι τόσο οι συνθήκες του πλοίου, όπως η γωνία διαγωγής και το εκτόπισμα, όσο και οι μεταβολές της θάλασσας, μπορούν να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στα αποτελέσματα της απόδοσής του. Προκειμένου να γίνει εκτίμηση της απαιτούμενης ισχύος άξονα σε ήρεμο νερό και για χάρη απλούστευσης της ανάλυσης, επιλέξαμε στην παρούσα εργασία να ασχοληθούμε κυρίως με την πιο σημαντική παράμετρο, το εκτόπισμα του πλοίου. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιήθηκε ο τύπος του Αγγλικού Ναυαρχείου, ο οποίος αποτελεί ένα ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο για απλές προσεγγίσεις. Ωστόσο, όταν η ανάλυση αναφέρεται στις επιδόσεις ενός πλοίου, αποτυγχάνει να κάνει αποτελεσματική διάκριση μεταξύ των παραμέτρων που σχετίζονται με τον κινητήρα και το κύτος του πλοίου.

Ολοκληρώνοντας, είναι σαφές ότι όλα τα στοιχεία που περιέχονται στη συγκεκριμένη μελέτη 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 περεταίρω έμφαση στην ακρίβεια των μετρήσεων όλων των παραμέτρων που επηρεάζουν την απόδοση. Παράλληλα, η καταγραφή και μελέτη δεδομένων για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα, όπως τέσσερα ή πέντε συναπτά έτη, θα συμβάλλει σημαντικά στην καλύτερη κατανόηση της απόδοσης του πλοίου και ακόμα, θα επιτρέψει πιθανή πρόβλεψη της εξέλιξης της ενεργειακής απόδοσής του.

Αναφορές

- Jan Babicz, “Wärtsilä Insights”, Encyclopedia of Ship Technology, 2015
- Jasper Faber, Maarten Hoen, “Historical trends in ship design efficiency”, Delft, March 2015
- Gregory J. Grigoropoulos, Dimitris Konstantinos N. Theodossiou, “Harmonizing SEEMP with effective vessel operation”, Athens 2012
- Airclim, “Air Pollution from Ships”, Laholm, November 2011
- Karan C., “What is Ship Energy Efficiency Management Plan?”, Marine Insight, January 2021
- Resolution MEPC. 203(62) – “Amendments to MARPOL Annex VI Regulations for the Prevention of Air pollution from ships by inclusion of new regulations on energy efficiency for ships”, July 2011
- Resolution MEPC. 282(70) – “2016 Guidelines for the development of a Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP)”, October 2016
- Gerasimos K. Politis, Ship Resistance & Propulsion, 5th Rev., Athens, May 2018
- Molland A. F. et al., “Ship Resistance and Propulsion”, USA 2011
- Lewis Edward V., “Principles of Naval Architecture”, SNAME Vol. II, USA 1988
- Nastia Degiuli et al., “Increase of ship fuel consumption due to the added resistance in waves”, Zagreb 2017
- MAN Diesel & Turbo, “Basic Principles of Ship Propulsion”, Copenhagen 2013
- Papanikolaou A., “Ship design and equipment”, Athens 2009
- Blendermann W., “Wind loading of ships – Collected data from wind tunnel tests in uniform flow”, Hamburg 1996
- Ν.Π. Κυρτάτος, “Βασικές Αρχές Πρόωσης Πλοίων”, Αθήνα 2007
- Gartygspropellrar och Fartygs Framdrift, Jan Tronblad, KaMc Wa Publication, 1985
- Sv. Aa. Harvald, “Resistance and Propulsion of Ships”, New York, 1983