

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



Διπλωματική Εργασία:

**Εκτίμηση της αποδοτικής λειτουργίας δεξαμενοπλοίου μέσω του
εγχειριδίου SEEMP**

ΔΗΜΟΣ ΜΙΧΑΛΗΣ

Επιβλέπων:

Γ. Γρηγορόπουλος

Αθήνα

Νοέμβριος 2020

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υπεύθυνο της διπλωματικής μου εργασίας, Καθηγητή του Ε.Μ.Π. , Γρηγόριο Γρηγορόπουλο, για την ανάθεση του θέματος. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, τους φίλους μου και τον αδερφό μου που με στήριξαν κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας αλλά και κατά τη διάρκεια των σπουδών μου. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δημοσθένη Τριπερίνα, ο οποίος με βοήθησε σε όλες τις δυσκολίες που αντιμετώπισα κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής.

Στη γιαγιά μου

Αγγελική Δήμου.

Contents

1.	Εισαγωγή.....	4
1.1	Σκοπός διπλωματικής.....	4
1.2	Μόλυνση θαλάσσιου περιβάλλοντος.....	4
1.3	Πλάνο SEEMP, η ανάπτυξη και η εφαρμογή του.....	5
2.	Περιγραφή και δεδομένα πλοίου.....	9
2.1	Περιγραφή πλοίου.....	9
2.2	Χρήση προγράμματος Autocad για την επεξεργασία των δεδομενων.....	10
2.3	Δεδομένα πλοίου (model test, shoptest, noon reports).....	12
2.3.1	Model tests.....	12
2.3.2	Shoptest.....	13
2.3.3	Noon reports.....	14
2.4	Προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν.....	16
2.4.1	Frank.....	16
2.4.2	SPP86.....	17
3.	Αντίσταση-Πρόωση – Μέθοδοι υπολογισμού στην εργασία.....	19
3.1	Αντίσταση πλοίου (γενικές έννοιες – τρόποι υπολογισμού).....	19
3.1.1	Γενικές έννοιες.....	19
3.1.2	Fouling.....	19
3.1.3	Trim.....	20
3.1.4	Τρόποι υπολογισμού αντίστασης στην εργασία.....	20
3.2	Χαρακτηριστικά έλικας.....	29
3.2.1	Συντελεστής ώσης και ροπής ($K_T - K_Q$).....	29
3.2.2	Thrust deduction factor – wake fraction.....	33
3.3	Ισχύς και οι συνιστώσες της.....	33
3.4	Χρήση ειδικής φόρμας excel στον υπολογισμό απαιτούμενης ισχύος.....	34
4	Αποτελέσματα.....	37
5	Συμπεράσματα.....	46

1. Εισαγωγή

1.1 Σκοπός διπλωματικής

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η αξιολόγηση της καλής χρήσης του καυσίμου του πλοίου, μέσω της εφαρμογής του εγχειριδίου SEEMP. Πιο συγκεκριμένα θα γίνει συγκριτική μελέτη, για ένα υπαρκτό πλοίο, ανάμεσα σε μεγέθη που θεωρητικά θα έπρεπε να έχει σε πραγματικές συνθήκες, και σε report τα οποία λαμβάνονται κατά τη διάρκεια του ταξιδιού. Αφού ληφθούν λοιπόν δεδομένα του πλοίου, όπως δεδομένα για τη γεωμετρία του πλοίου, για τεστ μοντέλου, τεστ μηχανής, τεστ ταχύτητας πλοίου, θα επεξεργαστούν κατάλληλα, όπως θα περιγραφεί παρακάτω. Ύστερα με χρήση κατάλληλων προγραμμάτων θα παραχθούν αποτελέσματα για υπαρκτές καταστάσεις από τα report του πλοίου. Τα αποτελέσματα αυτά στη συνέχεια θα συγκριθούν με τις πραγματικές τιμές στις αντίστοιχες καταστάσεις, που έχουν καταγραφεί από το πλήρωμα. Μεγέθη που μας ενδιαφέρουν να εξάγουμε από την επεξεργασία των δεδομένων είναι στροφές κινητήρα, και ισχύς. Ύστερα η ισχύς μπορεί να μεταφραστεί σε κατανάλωση καυσίμου για τη σύγκριση.

Το πλοίο που μελετήθηκε είναι ένα δεξαμενόπλοιο συνολικού μήκους (Ο.Α.) 183 μέτρων, και χωρητικότητας 38500 τόνων. Ο σκοπός είναι, αφού αξιοποιηθούν τα δεδομένα για τη γεωμετρία του πλοίου, να δημιουργηθεί ένα αρχείο εισόδου για το πρόγραμμα που θα χρησιμοποιηθεί (FRANK) το οποίο θα δώσει την πρόσθετη αντίσταση του πλοίου σε κυματισμούς. Αφού υπολογιστούν και οι υπόλοιπες αντιστάσεις (ήρεμου νερού, ανέμου), με όλες τις παραδοχές και υποθέσεις που θα γίνουν, με χρήση άλλων εργαλείων να εξαχθεί η απαιτούμενη ισχύ και στροφές κινητήρα που χρειάζεται το πλοίο για να λειτουργήσει σε αυτές τις συνθήκες με συγκεκριμένη ταχύτητα.

1.2 Μόλυνση θαλάσσιου περιβάλλοντος

Ως ειδικευμένη υπηρεσία των Ηνωμένων Εθνών, ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO) είναι η παγκόσμια αρχή καθορισμού προτύπων για την ασφάλεια και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της διεθνούς ναυτιλίας. Ο βασικός ρόλος της, είναι η δημιουργία ενός πλαισίου κανονισμών για τη βιομηχανία της ναυτιλίας, το οποίο να είναι δίκαιο και αποτελεσματικό, καθώς και να υιοθετείται και να εφαρμόζεται παγκοσμίως. (4)

Καθώς οι ανησυχίες για την αύξηση των εκπομπών αέριων του θερμοκηπίου και της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων, ο IMO έχει ήδη κάνει βήματα εφαρμόζοντας τη χρήση του δείκτη EEDI για τον περιορισμό των εκπομπών CO₂ και άλλων βλαβερών ρυπαντών από τα πλοία. Ως αέρια του θερμοκηπίου (greenhouse gases – GHG), ορίζονται οι ρυπαντές που αντανakλούν τη θερμότητα που ακτινοβολεί η γη και τη στέλνουν πίσω σε αυτή, όπως CO₂, NO_x, SO_x, μεθάνιο και άλλοι. Η ιδέα της χρήσης του δείκτη EEDI, είναι για τη βελτίωση της μορφής της γάστρας, και της λειτουργίας του μηχανολογικού εξοπλισμού, με αποτέλεσμα την αύξηση της απόδοσης του πλοίου, τη μείωση της

κατανάλωσης και κατ' επέκταση την μείωση των βλαβερών ρύπων. Έτσι το πλάνο SEEMP, πρέπει να αναπτυχθεί και να εφαρμοστεί από τους πλοιοκτήτες, με σκοπό την μείωση των λειτουργικών κοστών του πλοίου, με επέκταση την κατανάλωση και τις εκπομπές. (9)

1.3 Πλάνο SEEMP, η ανάπτυξη και η εφαρμογή του

Η χρήση του δείκτη EEDI (ENERGY EFFICIENCY DESIGN INDEX) έγινε υποχρεωτική για όλα τα καινούρια πλοία και το πλάνο SEEMP (SHIP ENERGY EFFICIENCY MANAGEMENT PLAN) για όλα τα πλοία σύμφωνα με την MEPC 62 (επιτροπή προστασίας θαλάσσιου περιβάλλοντος) τον Ιούλιο του 2011, με την υιοθέτηση των τροποποιήσεων του παραρτήματος 6 της MARPOL. Οι βασικές αλλαγές στο παράρτημα 6 της MARPOL, είναι η σταδιακή παγκόσμια μείωση των ρύπων SO_x, NO_x, και σωματιδίων, καθώς και η παρουσίαση των περιοχών ECAs (Emission Control Areas), για τον περιορισμό των ρύπων εντός αυτών.

Ο δείκτης EEDI, είναι ο πιο σημαντικός τεχνικός δείκτης για ένα καινούριο πλοίο, και αποσκοπεί στην χρήση πιο αποδοτικών, και με μικρότερη έκλυση ρύπων, εξοπλισμών και μηχανής. Ο δείκτης αυτός πρέπει να έχει για κάθε κατηγορία πλοίου μια κατώτατη τιμή. Η τιμή αυτή αναφοράς θα πρέπει να μικραίνει με την πάροδο των χρόνων, έτσι ώστε για να την τηρεί το εκάστοτε πλοίο, θα πρέπει να αναβαθμίζει όλα τα μηχανήματα που σχετίζονται την αποδοτικότητα του καυσίμου. Όμως δεν υπάρχουν περιορισμοί στο είδος του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται, εφόσον ο δείκτης βρίσκεται στα επιθυμητά όρια. Ο δείκτης αυτός μετριέται σε γραμμάρια διοξειδίου του άνθρακα ανά χωρητικότητα-μίλια (τονομίλι) του πλοίου.

Το SEEMP, είναι ένα μέτρο που χρησιμοποιεί έναν μηχανισμό ώστε να βελτιωθεί η ενεργειακή απόδοση ενός πλοίου, με οικονομικά αποδοτικό τρόπο. Επίσης δίνει την δυνατότητα στις ναυτιλιακές εταιρίες να παρακολουθούν την αποδοτικότητα του πλοίου η του στόλου τους σε βάθος χρόνου χρησιμοποιώντας για παράδειγμα τον δείκτη EEOI (Energy Efficiency Operational Index). Για την ανάπτυξη του SEEMP για νέα η και υπάρχοντα πλοία, ενσωματώνονται πρακτικές για τη λειτουργία του πλοίου με αποδοτικότητα στην κατανάλωση καυσίμου, καθώς και καθοδήγηση για την χρήση του δείκτη EEOI. Ο τελευταίος δείκτης επιτρέπει στον χειριστή να μετρήσει την αποδοτικότητα του καυσίμου σε ένα πλοίο εν λειτουργία, καθώς και την επίδραση των αλλαγών λειτουργίας του, όπως για παράδειγμα ο συχνότερος καθαρισμός της προπέλας. Ως συνέπεια, το SEEMP ωθεί τον πλοιοκτήτη στη συνεχή αναζήτηση νέων τεχνολογιών και μεθοδολογιών που θα οδηγήσουν στη βελτιστοποίηση της απόδοσης του πλοίου. Σύμφωνα με τον κανονισμό 22 της MARPOL Annex VI, κάθε πλοίο υποχρεούται να τηρεί ένα SEEMP τηρώντας και τους κανονισμούς του οργανισμού. (2, 5, 6)

Υπάρχουν δύο κομμάτια. που συντελούν το SEEMP. Το πρώτο μέρος αποσκοπεί στην παρακολούθηση της απόδοσης του πλοίου και γενικά του στόλου, σε βάθος χρόνου, καθώς και κάποιες επιλογές για την βελτιστοποίηση της απόδοσης του πλοίου. Το δεύτερο μέρος παρέχει τις μεθοδολογίες για πλοία ολικής χωρητικότητας 5000 τόννων και πάνω, που θα πρέπει να χρησιμοποιούνται για τη συλλογή των δεδομένων σύμφωνα με τον κανονισμό 22Α του παραρτήματος VI της MARPOL. (6)

Μέρος πρώτο του SEEMP

Το πρώτο μέρος του εγχειριδίου SEEMP αποσκοπεί στην εδραίωση ενός μηχανισμού που θα οδηγήσει στην αύξηση της απόδοσης της λειτουργίας του πλοίου. Αρκετές εταιρίες ήδη αναπτύσσουν και εφαρμόζουν ένα σύστημα διαχείρισης ασφάλειας (Safety Management System). Σε αυτή την περίπτωση το πρώτο μέρος του SEEMP μπορεί να αποτελέσει μέρος του συστήματος αυτού. Το SEEMP πρέπει να στοχεύει στην βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του πλοίου, μέσω των εξής βημάτων: προγραμματισμός, εφαρμογή, παρακολούθηση και αυτοαξιολόγηση και βελτίωση.

Προγραμματισμός. Το πιο σημαντικό κομμάτι του πρώτου μέρους του SEEMP. Σε αυτό το στάδιο καθορίζεται η παρούσα κατάσταση κατανάλωσης ενέργειας του πλοίου, και η αναμενόμενη βελτίωση της απόδοσης κατανάλωσης ενέργειας. Παρόλο που υπάρχουν αρκετοί τρόποι βελτίωσης της απόδοσης, όπως βελτιστοποίηση ταχύτητας, επιλογή διαδρομής με βάση τον καιρό, συντήρηση γάστρας κτλ, πρέπει εξ αρχής να καθορίζεται η επιλεγμένη μέθοδος, ανάλογα και με το είδος του φορτίου που μεταφέρεται, το είδος του πλοίου, ή και τις διαδρομές που θα ακολουθήσει. Συνεπώς δεν μπορούν όλοι οι τρόποι βελτίωσης να εφαρμοστούν σε όλα τα πλοία. Η αύξηση της απόδοσης μπορεί να εξαρτάται από πολλούς ενδιαφερόμενους όπως ναυπηγεία επισκευής, πλοιοκτήτες, ναυλωτές, ιδιοκτήτες φορτίου και άλλους. Είναι σωστό λοιπόν η ναυτιλιακή εταιρία, στην προσπάθεια να ελέγχει τα πλοία της, να δίνει κατευθύνσεις στους λοιπούς ενδιαφερόμενους. Σημαντικό επίσης είναι η αντίστοιχη εκπαίδευση του προσωπικού και πάνω στο πλοίο, αλλά και εκτός. Στο τελευταίο κομμάτι του προγραμματισμού, είναι η θέσπιση στόχων.

Εκτέλεση. Αφού η εταιρία αναγνωρίσει τα μέτρα που πρέπει να εφαρμοστούν στο πλοίο, πρέπει να δημιουργήσει ένα σύστημα για την εφαρμογή τους. Τα προγραμματισμένα μέτρα πρέπει να εκτελούνται σύμφωνα με το σύστημα εφαρμογής και να κρατείται αρχείο αυτών.

Παρακολούθηση. Η ενεργειακή απόδοση ενός πλοίου πρέπει να παρακολουθείται ποσοτικά, με κάποια εδραιωμένη μέθοδο με παγκόσμια στάνταρ. Ο ΕΕΟΙ, ανεπτυγμένος από τον οργανισμό, είναι ένα διεθνώς καθιερωμένο εργαλείο που εξυπηρετεί αυτό τον σκοπό. Σε περίπτωση που χρησιμοποιείται, θα πρέπει να έρχεται σε συμφωνία με το SEEMP, ρυθμισμένο κάθε φορά στο συγκεκριμένο πλοίο και εμπόρευμα. Φυσικά εάν υπάρχουν άλλα εργαλεία αποτελεσματικά για μια εταιρία, θα μπορούσαν να

χρησιμοποιηθούν. Για τη σωστή παρακολούθηση, είναι αναγκαία η συνεχής συλλογή δεδομένων της λειτουργίας του πλοίου, από εξειδικευμένο προσωπικό με συγκεκριμένες διαδικασίες.

Αυτοαξιολόγηση. Είναι το τελευταίο στάδιο του πρώτου μέρους, όπου εξάγονται πολύτιμα συμπεράσματα, χρήσιμα για τον επόμενο κύκλο βελτίωσης. Ο σκοπός αυτού του βήματος είναι η αξιολόγηση των μέτρων που πάρθηκαν καθώς και ποια μέρα μπορούν ή όχι να εφαρμοστούν στο συγκεκριμένο πλοίο.

Οδηγίες για λειτουργία αποδοτική σε καύσιμο.

Υπάρχουν τρόποι με τους οποίους κάθε πλοίο μπορεί να διαχειριστεί αποδοτικά την κατανάλωση του καυσίμου του. Συνοπτικά παρουσιάζονται οι κυριότεροι.

- Βελτιωμένο πλάνο διαδρομής ταξιδιού
- Επιλογή διαδρομής με γνώμονα τον καιρό
- Άφιξη έγκαιρα στο επόμενο λιμάνι. Η σωστή επικοινωνία με το εκάστοτε λιμάνι, και η σωστή συνεννόηση, βελτιστοποιεί τον χρόνο που απαιτείται να περάσει το πλοίο στο λιμάνι.
- Βελτιστοποίηση ταχύτητας. Αυτό σημαίνει πρακτικά η ταχύτητα στην οποία το καύσιμο ανα τονομίλι ελαχιστοποιείται, και όχι η ελάχιστη ταχύτητα, η οποία οδηγεί σε αυξημένη κατανάλωση. Σημαντική είναι η προσοχή στα διαγράμματα του κατασκευαστή ισχύος-κατανάλωσης, και του διαγράμματος ζήτησης της προπέλας. Επίσης πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η κίνηση στο επόμενο λιμάνι – σταθμό για την αποφυγή αναμονής.
- Βέλτιστη ισχύς. Είναι προτιμότερο η μηχανή να δουλεύει συνεχώς σε σταθερές στροφές, παρά να γίνονται συνεχής ρυθμίσεις.
- Βέλτιστη διαγωγή. Για κάθε συγκεκριμένο μέσο βύθισμα, υπάρχει βέλτιστη διαγωγή, η οποία ελαχιστοποιεί την κατανάλωση
- Βέλτιστο έρμα. Το έρμα πρέπει να καθορίζεται με βάση τη βέλτιστη διαγωγή και συνθήκες κατεύθυνσης.
- Βέλτιστη επιλογή προπέλας
- Βέλτιστη χρήση πηδαλίου
- Συντήρηση γάστρας.
- Σύστημα πρόωσης. Συγκεκριμένα, οι καινούριου τύπου ηλεκτρονικά ελγχόμενες μηχανές, μπορούν να επιφέρουν κέρδη στην κατανάλωση.
- Συντήρηση συστήματος πρόωσης.
- Σύστημα ανάκτησης θερμότητας αποβλήτων. Η χρήση της θερμότητας από τα καυσαέρια χρησιμοποιείται παραδείγματος χάριν για παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος ή ζεστού νερού.
- Καλύτερη αξιοποίηση του στόλου
- Καλύτερος χειρισμός του φορτίου
- Διαχείριση ενέργειας στο πλοίο

- Τύπος καυσίμου
- Άλλοι παράγοντες

Δεύτερο μέρος SEEMP

Οι οδηγίες του εγχειριδίου SEEMP παρέχουν καθοδήγηση στον τρόπο που γίνεται η συλλογή, συγκέντρωση και αναφορά δεδομένων του πλοίου σχετικά με την ετήσια κατανάλωση καυσίμου, την απόσταση που διένυσε, τις ώρες καθώς και άλλα δεδομένα που απαιτούνται από τους κανονισμούς.

Κατανάλωση καυσίμου. Η συλλογή δεδομένων κατανάλωσης καυσίμου, δεν πρέπει να περιορίζεται στην κατανάλωση μόνο από τις κύριες μηχανές, αλλά να λαμβάνει υπόψη την κατανάλωση στις γεννήτριες, αεριοστροβίλους, μπόιλερ, για κάθε τύπο καυσίμου που καταναλώνεται, ανεξάρτητα τε θέση του πλοίου. Υπάρχουν τρεις τρόποι μέτρησης της κατανάλωσης.

1. Μέθοδος με χρήση σημειώματος δεξαμενής (Bunker Delivery Notes – BDNs). Το πλοίο υποχρεούται να έχει αυτές τις αποδείξεις για τρία χρόνια αφού έχει παραδοθεί το καύσιμο. Το πλάνο συλλογής δεδομένων καθορίζει πως αθροίζονται αυτά τα ποσά.
2. Μέθοδος χρήσης μετρητή παροχής. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί μετρητές παροχής πάνω στο πλοίο κατά τη λειτουργία του.
3. Μέθοδος που χρησιμοποιεί μετρητή στις δεξαμενές καυσίμου.

Κάθε διόρθωση στην πυκνότητα, θερμοκρασία που εφαρμόζεται, καταγράφεται.

Συντελεστής μετατροπής C_F . Εάν το καύσιμο που χρησιμοποιείται δεν συγκαταλέγεται στην κατηγορία που περιγράφεται στις οδηγίες του 2014 για τον υπολογισμό του EEDI, για καινούρια πλοία, και δεν έχει συντελεστή C_F , τότε ο προμηθευτής πρέπει να παρέχει έναν, όπου να υποστηρίζεται από αποδεικτικά στοιχεία.

Απόσταση που διένυσε το πλοίο. Η απόσταση που διανύει το πλοίο πρέπει να καταγράφεται και να παραδίδεται στη διαχείριση.

Ώρες εν λειτουργία. Το προσάρτημα IX του παραρτήματος VI της MARPOL αναφέρει ότι ως ώρες εν λειτουργία αναφέρονται οι ώρες όπου το πλοίο βρίσκεται καθοδόν υπό την δική του πρόωση.

Έλεγχος ποιότητας δεδομένων. Το σύστημα συλλογής δεδομένων πρέπει να έχει έναν τρόπο ελέγχου της ποιότητάς τους, ο οποίος να εμπεριέχεται στο ήδη υπάρχων σύστημα ασφαλείας.

Άμεση μέτρηση ρύπων διοξειδίου του άνθρακα. Ο υπολογισμός των ρύπων διοξειδίου του άνθρακα γίνεται μετρώντας την συγκέντρωση CO_2 και πολλαπλασιάζοντάς την επί την παροχή καυσίμου.

2. Περιγραφή και δεδομένα πλοίου

2.1 Περιγραφή πλοίου

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε ένα πλοίο, συγκεκριμένα ένα chemical/oil tanker 38500 DWT σε 2 διαφορετικές καταστάσεις βυθίσματος. Τα κύρια χαρακτηριστικά του πλοίου, όπως παρουσιάζονται και στο General Arrangement είναι τα εξής:

LENGTH O.A.	183.00m
LENGTH B.P.	174.50m
BREADTH (MLD)	27.40m
DEPTH (MLD)	16.80m
DRAUGHT (DESIGN)	9.55m
DRAUGHT (SCANTLING)	11.60m
SERVICE SPEED	15.2kn

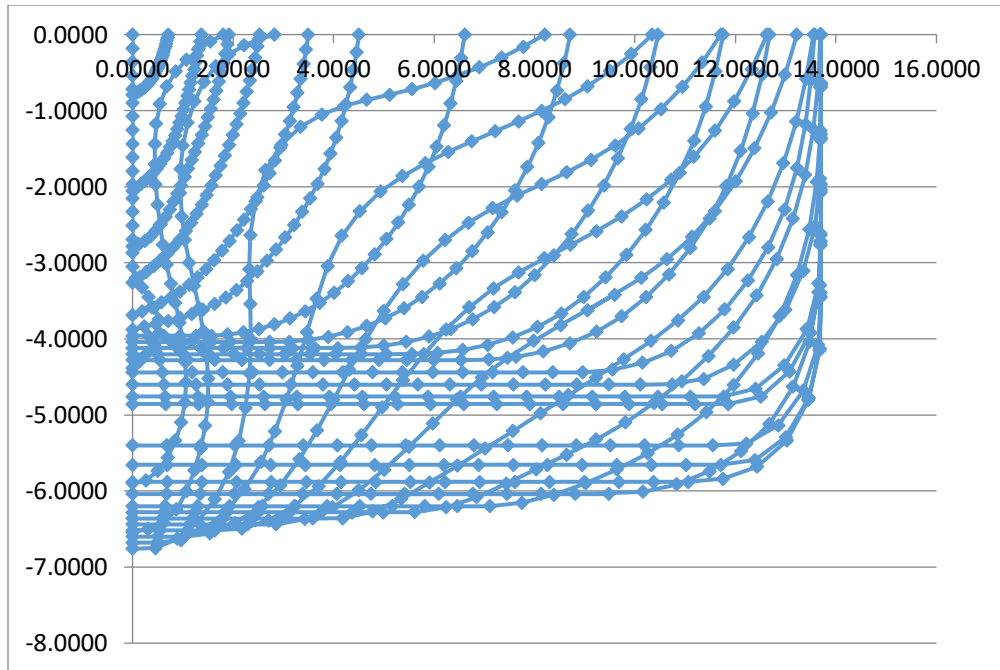
Πίνακας 1 Χαρακτηριστικά πλοίου

Για το πλοίο υπήρχε διαθέσιμη η γεωμετρία της γάστρας του σε μορφή αρχείου από σημεία, όπου με κατάλληλη επεξεργασία, και με χρήση του σχεδιαστικού προγράμματος Autocad, έγινε εξαγωγή κατάλληλων σημείων πάνω στους νομείς της γάστρας, ώστε να δημιουργηθούν τα αρχεία εισόδου για το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε στη συνέχεια. Από το γενικό πλάνο του πλοίου, εξήχθησαν δεδομένα για το πηδάλιο, τα παρατροπίδια καθώς και για τις εκτεθειμένες στον αέρα επιφάνειες πάνω από το επίπεδο του καταστρώματος, για να γίνει ο υπολογισμός της αντίστασης του αέρα. Το πλοίο εξετάστηκε σε 2 διαφορετικές καταστάσεις (ballast, full load). Τα βασικά χαρακτηριστικά για τις δύο καταστάσεις φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

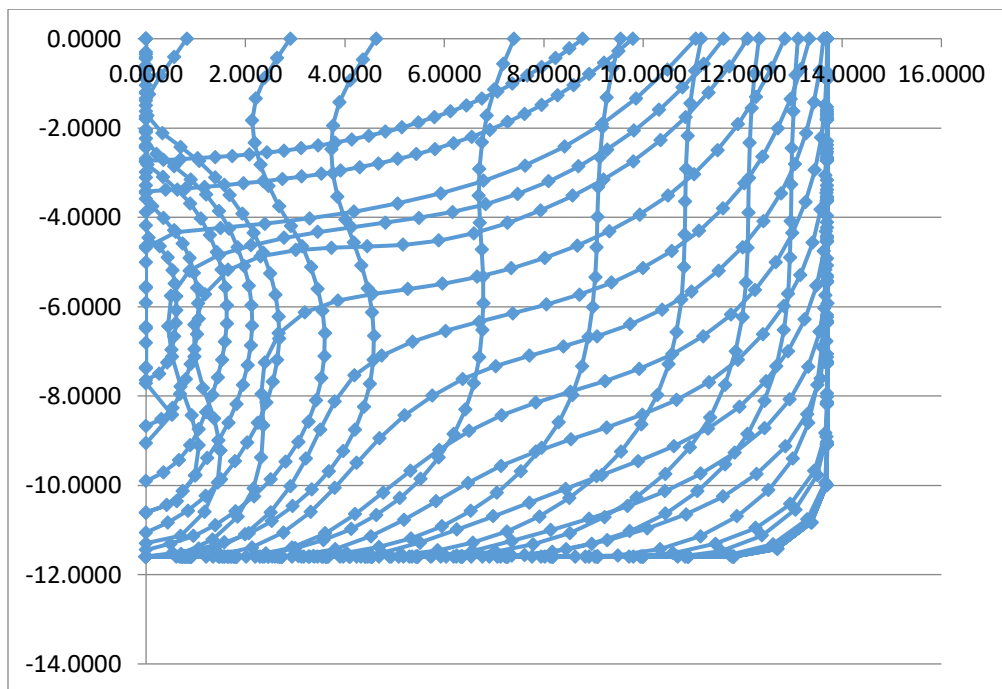
κατάσταση	Ballast	Full load
Df (m)	3.8	11.6
Da (m)	7	11.6
Trim (m)	3.2	0
Βρεχόμενη επιφάνεια (m ²)	5348.62	7949.37
Συντελεστής γάστρας Cb	0.7375	0.8416
Κέντρο βάρους KG (m)		
Μετακεντρικό ύψος GM (m)		

Πίνακας 2 Χαρακτηριστικά καταστάσεων

Παρακάτω φαίνεται το body plan για την κατάσταση ballast και full load αντιστοίχα.



Σχήμα 1 Body plan ballast



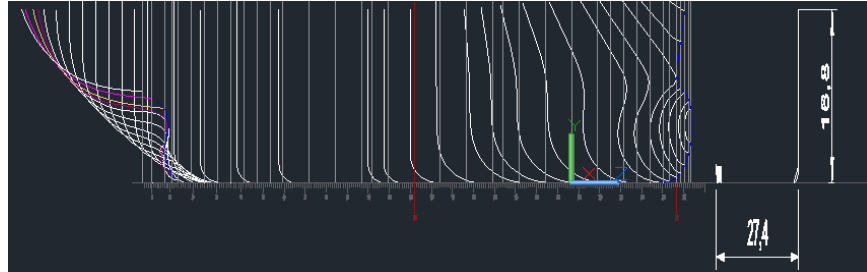
Σχήμα 2 Body plan full load

2.2 Χρήση προγράμματος Autocad για την επεξεργασία των δεδομενων
 Τα δεδομένα του πλοίου δόθηκαν σε μορφή πίνακα με offset. Ουσιαστικά ένα σύνολο σημείων ανά νομέα που περιγράφουν τη γάστρα. Χρησιμοποιώντας το σχεδιαστικό πρόγραμμα Autocad, αρχικά τοποθετήθηκε στο background το σχέδιο του πλοίου από το general arrangement. Με spline, μέσω πολλών σημείων περιγράφηκε η πλάγια όψη

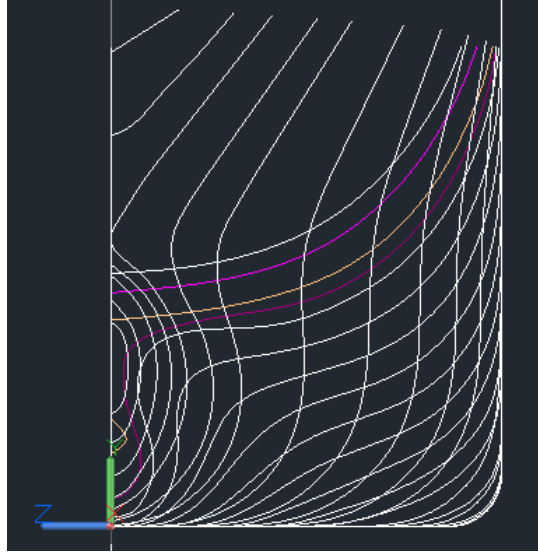
της πλώρης, μαζί με το βολβό, και την πρύμνη, και με ενιαία γραμμή η τρόπιδα. Ύστερα περιγράφηκαν όλοι οι νομείς, δηλαδή το σύνολο σημείων που τους αποτελούν, γνωρίζοντας από τα δεδομένα την θέση του καθενός. Ύστερα σε κάθε νομέα ξεχωριστά, το καμπύλο τμήμα του περιγράφηκε με spline, ώστε να υπάρχει με αρκετά καλύτερη ακρίβεια στον νομέα. Έπειτα σε κάθε νομέα τοποθετήθηκαν πάνω στην τελική του καμπύλη σημεία που ισαπέχουν, έτσι ώστε στο σύνολο να είναι 28 ανά νομέα. Τέλος τοποθετήθηκε ευθεία γραμμή, η οποία αντιπροσωπεύει την ίσαλο, ανάλογα με κάθε κατάσταση βύθισης. Τα σημεία των νομέων που βρίσκονται πάνω από την ίσαλο αφαιρέθηκαν, και κρατήθηκαν μόνο αυτά που είναι βυθισμένα. Έτσι σαν είσοδο στο πρόγραμμα Frank χρησιμοποιήθηκε το σύνολο ισαπέχοντων σημείων των νομέων κάτω από την ίσαλο, έτσι ώστε να περιγράφεται με ακρίβεια η γάστρα που έρχεται σε επαφή με το νερό.

Ακόμα. Με χρήση κάποιων εντολών του προγράμματος Autocad, υπολογίστηκε η βρεχόμενη επιφάνεια, η επιφάνεια του πηδαλίου, η ελεύθερη επιφάνεια σε πλάγια όψη και σε πρόοψη στην οριζόντια θέση που βρίσκεται η γέφυρα, δεδομένα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν αργότερα για να υπολογιστούν διάφορες αντιστάσεις.

Παρακάτω φαίνονται δύο στιγμιότυπα με όλους τους νομείς με γραμμές spline. Πάνω σε αυτό το σχήμα τοποθετήθηκε η ίσαλος γραμμή ανάλογα με το βύθισμα ώστε να εξαχθούν τα offset των νομέων που βρίσκονται στο νερό.



Σχήμα 3 Σχέδιο πλοίου σε Autocad



Σχήμα 4 Body plan Autocad

2.3 Δεδομένα πλοίου (model test, shoptest, noon reports)

2.3.1 Model tests

Οι γραμμές της γάστρας του πλοίου σχεδιάστηκαν από το GSIC. Το ακριβές μοντέλο με μήκος 6,06 μέτρα, κατασκευάστηκε σύμφωνα με αυτές τις γραμμές με κλίμακα 1 προς 28,7948. Για τα πειράματα πρόωσης χρησιμοποιήθηκαν 2 προπέλες, η Stock και η Design. Τα τεστ περιλάμβαναν δοκιμές σε ανοιχτή θάλασσα, τεστ αντίστασης και πρόωσης σε καταστάσεις full load, design load και ballast. Για τη μελέτη που κάναμε στην παρούσα διπλωματική, χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα με την προπέλα design. Τα τεστ για resistance, propulsion, open water, wake survey και stream test, έγιναν σύμφωνα με τις παρακάτω συνθήκες.

No.2 Towing Tank Dimensions:	192×10×4.2 m
Max. Towing carriage speed:	8.0 m/s
Ship Model:	6.06 m in Length (<u>L_{bp}</u>), of wood
Propeller Model:	200.8 mm, 199.03 mm in diameter, of <u>Babbit</u>
Ship Model Stimulator:	Two tripwires at station 19 & at Mid-point of bulbous bow length
Appendage:	Rudder
Frictional Coefficient:	1957 ITTC Friction Line $C_f = 0.075 / (\lg(Rn))^{-2}$
Propulsion Test Method:	British Method
Seawater Temperature:	15° C
Tank Blockage Correction:	Schuster Formula: $\Delta V/V = m_1 / (1 - m_1 - F_n h^2)$

Σχήμα 5 Model test conditions

Για το open water test χρησιμοποιήθηκε δυναμόμετρο H29 (Kempf & Remmers, Germany). Για το wake survey test χρησιμοποιήθηκε σωλήνας Pitot (5 holes) και μανόμετρο νερού. Για το stream test, ένα μίγμα λαδιού και μπογιάς. Παρακάτω παρατίθενται στοιχεία για τις προπέλες που χρησιμοποιήθηκαν.

		Stock Propeller		Design Propeller	
		Ship	Model	Ship	Model
Diameter	D(m)	5.782	0.2008	5.731	0.19903
Pitch Ratio at .75 R	P/D	0.727		0.762	
Blade Area Ratio	A_e/A_o	0.528		0.555	
Chord Length at .75 R	C(m)	1.679	0.0583	1.6954	0.0589
Blade Thickness at .75 R	T(m)	0.0853	0.00296	0.08221	0.00286
Number of Blades	Z	4		4	
Blade Type		MAU		Skew	
<u>Rotative</u> Direction		Right		Right	

Σχήμα 6 Model test propeller characteristics

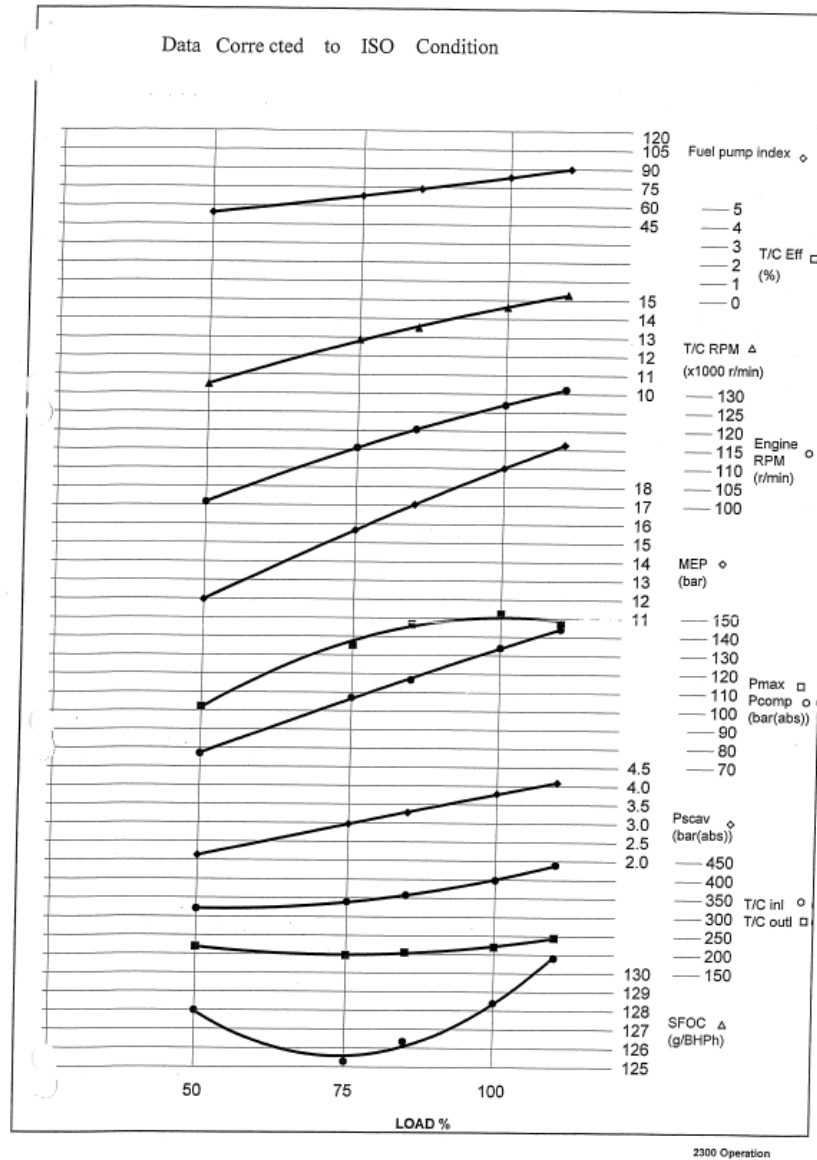
Οι προβλεπόμενες ταχύτητα πλοίου και στροφές προπέλας, αντίστοιχα με την δοκιμή ανοιχτής θάλασσας σε βαθύ νερό, ήρεμη θάλασσα και χωρίς αέρα είναι οι ακόλουθες.

	Load Conditions	P_{dt} (kW)	V_s (kn)	N_t (r/min)
Stock Propeller	Design Load T=9.55m	6867	15.37	121.8
	Full Load T=11.6m	6867	14.69	120.6
	Ballast T=3.8/7.0m	6867	15.96	121.2
Design Propeller	Design Load T=9.55m	6867	15.47	118.6
	Full Load T=11.6m	6867	14.80	119.0
	Ballast T=3.8/7.0m	6867	16.10	118.6

Σχήμα 7 Model test

2.3.2 Shoptest

Ο κινητήρας του πλοίου είναι κατασκευασμένος από την εταιρία DALIAN MARINE DIESEL- MAN B&W, τύπου 6S50MC-C. Έχει 6 κυλίνδρους, ονομαστική ισχύ 12889 BHP και ονομαστικές στροφές 127 rpm. Έχει εγκατεστημένο στροβιλοϋπερπληρωτή της εταιρίας MAN B&W, τύπου TCA66-20032, με μέγιστες στροφές 16000. Παρακάτω φαίνονται τα διαγράμματα του κινητήρα, διορθωμένα σε συνθήκες ISO.



Σχήμα 8 Shoptest engine curves

2.3.3 Noon reports

Από το αρχείο με τα report του πλοίου (telexes), η επιλογή των καταστάσεων που χρησιμοποιήθηκαν για τη σύγκριση με τα θεωρητικά αποτελέσματα έγινε ως εξής. Αρχικά έπρεπε να βρεθούν καταστάσεις κοντά στις ήδη υπάρχουσες από τα model test. Οπότε επιλέχτηκαν δύο καταστάσεις:

- Μια ισοβύθιστη με βύθισμα 10,95 μέτρα η οποία θα συγκριθεί με την κατάσταση full load 11,6 μέτρα
- Μια κατάσταση με βυθίσματα $D_f = 6.2 \text{ m}$, $D_a = 7.2\text{m}$, η οποία συγκρίνεται με την κατάσταση ballast ($D_f= 3.8\text{m}$, $D_a= 7\text{m}$)

Ύστερα επιλέχθηκαν οι καταστάσεις θάλασσας. Στο report είχε διάφορα κριτήρια επιλογής των καταστάσεων. Αρχικά έπρεπε να επιλεγθεί ο τύπος του report. Επιλέχθηκε ο τύπος A, δηλαδή να βρίσκεται τις τελευταίες 24 ώρες στη θάλασσα. Ένα τελευταίο κριτήριο επιλογής ήταν η κατεύθυνση του ανέμου να είναι από 0 έως 90 μοίρες, και από 270 έως 360 (0, 360 μοίρες είναι στην πλώρη). Τελικά επιλέχθηκαν 11 report για την κατάσταση με μέσο βύθισμα 6,7 μέτρα, και 9 για εκείνη με 10,95. Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται κάποια βασικά στοιχεία από τα επιλεγθέντα report για τις 2 καταστάσεις, 6,7 (ballast) και 10,95 (full load) αντίστοιχα.

Sea (m)	Wind dir. (degrees)	Wind fr. (beaufort)	Avg speed (knots)
2	80	5	15.5
2	50	5	14.67
3.5	360	6	14.29
3.5	40	6	14.39
2	60	5	14.21
0	50	2	12.33
2	60	5	11.98
0	320	3	12.9
2	290	5	13.6
1	60	4	13.7
2	290	5	13

Πίνακας 3 Noon report ballast

Sea (m)	Wind dir. (degrees)	Wind fr. (beaufort)	Avg speed (knots)
0	280	2	13.3
0	30	3	13.08
1	40	4	12.92
0	40	2	12.88
0	300	3	13.42
0	30	3	13.13
1	20	4	13.25
0	40	3	12
1	300	4	12.9

Πίνακας 4 Noon report full load

Όπου sea, το ύψος κύματος λόγω ανέμου σε μέτρα, όπως προκύπτει από το διάγραμμα Pierson- Moskowitz για πλήρως ανεπτυγμένη θάλασσα, όπως αναφέρεται παρακάτω, wind dir η κατεύθυνση ανέμου σε μοίρες (0 πλήρη), wind fr η ένταση του ανέμου σε μποφόρ και avg speed η ταχύτητα του πλοίου σε κόμβους. Στα report ήταν καταγεγραμμένα το ύψος κύματος λόγω ανέμου, και λόγω φουσκοθαλασσιάς, αλλά δεν συνδέονταν λογικά με τις εντάσεις ανέμου, που θεωρείται ότι είναι πιο ακριβείς οι μετρήσεις τους σε σχέση με το κύμα. Οπότε θεωρήθηκε σαν τιμή αναφοράς η ταχύτητα ανέμου, και με βάση αυτήν υπολογίστηκε το κύμα. Σαν swell θεωρήθηκαν μηδενικές τιμές.

2.4 Προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν

2.4.1 Frank

Το πρόγραμμα Frank, χρησιμοποιεί σαν είσοδο τις συντεταγμένες στα περιγράμματα των νομέων του πλοίου και υπολογίζει το διδιάστατο δυναμικό για κάθε μία από τις κινήσεις heave, sway και roll. Αυτό επιτυγχάνεται καθορίζοντας κατανεμημένες πηγές στο περίγραμμα των νομέων. Ύστερα, ολοκληρώνοντας υπολογίζει τους υδροδυναμικούς παράγοντες της πρόσθετης μάζας νερού και του damping για δεδομένη συχνότητα. Οι παρακάτω παραδοχές γίνονται:

1. Το ρευστό υποτίθεται ασυμπίεστο και μη συνεκτικό
2. Η επιφανειακή τάση δεν λαμβάνεται υπόψιν
3. Το περιβάλλον υδροδυναμικό πεδίο υποτίθεται αστρόβιλο
4. Οι κινήσεις θεωρούνται αρκετά μικρές, ώστε οι γραμμικοί όροι της συνθήκης ελευθέρας επιφάνειας, και η γραμμικοποιημένη εξίσωση Bernoulli, να ισχύουν. \

Το δυναμικό ταχύτητας που υπολογίζεται είναι το εξής:

$$\Phi^{(m)}(x, y, t) = \text{Re}\{\phi^{(m)}(x, y) \cdot e^{-i\omega t}\}$$

Όπου m υποδηλώνει το είδος της ταλάντωσης και ικανοποιεί τις επόμενες συνθήκες:

- Εξίσωση Laplace, για μέσα στο υδροδυναμικό πεδίο

$$\nabla^2 \phi^{(m)} = \frac{\partial^2 \phi^{(m)}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi^{(m)}}{\partial y^2} = 0.$$

- Συνθήκη ελεύθερης επιφάνειας για $y=0$ και πέρα από τη διατομή

$$\frac{\partial^2 \phi^{(m)}}{\partial t^2} + g \frac{\partial \phi^{(m)}}{\partial y} = 0.$$

- Συνθήκη θαλάσσιου πυθμένα

$$\lim_{y \rightarrow -\infty} |\nabla \phi^{(m)}| = 0$$

- Κινηματική οριακή συνθήκη για την ταχύτητα στο περίγραμμα της τομής

$$\vec{n} \cdot \vec{\nabla} \phi^{(m)} = v_n$$

- Συνθήκη ακτινοβολίας. Αυτή η κατάσταση απαιτεί από την διαταραγμένη επιφάνεια να βρίσκεται μακριά από το ταλαντούμενο σώμα και να έχει ημιτονοειδή μορφή κύματος.

2.4.2 SPP86

Το πρόγραμμα SPP-86 υπολογίζει τις αποκρίσεις του πλοίου στους πέντε βαθμούς ελευθερίας (δεν υπολογίζει την οριζόντια ταλάντωση, surge) για αρμονικούς και τυχαίους κυματισμούς. Οι κινήσεις υπολογίζονται στο επίπεδο της ισάλου, κατά τον διαμήκη άξονα συμμετρίας, σε σημείο που ορίζεται από τον χρήστη. Επιπρόσθετα, ο χρήστης μπορεί να ορίσει σημεία στα οποία να υπολογιστούν απόλυτες και σχετικές κατακόρυφες κινήσεις, ταχύτητες, επιταχύνσεις καθώς και απόλυτες εγκάρσιες επιταχύνσεις. Ακόμα μπορούν να προβλεφθούν δυναμικές φορτίσεις. Για τυχαίους κυματισμούς, τυχαία γεγονότα όπως διαβροχή καταστρώματος, σφυρόκρουση πλώρας και ανάδυση έλικας μπορούν να εκτιμηθούν.

Η θεωρία που χρησιμοποιείται είναι η εκδοχή της θεωρίας λωρίδων του Salvesen, Tuck και Faltisen (1970). Τα διδιάστατα χαρακτηριστικά των λωρίδων (πρόσθετη μάζας και απόσβεση) υπολογίζονται αναλυτικά είτε με σύμμορφη απεικόνιση της τομής σε κύλινδρο για τον οποίο το πρόβλημα έχει αντιμετωπιστεί ήδη αναλυτικά με τη βοήθεια σειράς πολυπόλων (Ursell 1949a,b), είτε με κατανομή παλλόμενων πηγών στο βρεχόμενο περίγραμμα της τομής που πρότεινε ο Jones (1949) και αντιμετώπισε ο Frank (1967). Στην πρώτη από τις παραπάνω περιπτώσεις χρησιμοποιείται η τρι-παραμετρική μορφή Extended Lewis, οικογένεια απεικονίσεων που περιγράφεται από τους Αθανασούλη και Λουκάκη (1985) και είναι επέκταση της δι-παραμετρικής οικογένειας που προτάθηκε από τον Lewis (1929). Η οικογένεια Lewis χρησιμοποιεί το λόγο πλάτους

προς βύθισμα και τον συντελεστή επιφανείας της τομής, ενώ η οικογένεια Αθανασούλη και Λουκάκη κάνει χρήση της κατακόρυφης θέσης του κέντρου βάρους της τομής. Στην δεύτερη περίπτωση, η γεωμετρία των νομέων περιγράφεται με ευθύγραμμα τμήματα προσδιορισμένα από τις συντεταγμένες των άκρων τους. Η μέθοδος της σύμμορφης απεικόνισης είναι ταχύτερη από τη μέθοδο Frank αλλά απαιτεί πολλούς συντελεστές για την περιγραφή μη-συμβατικών γεωμετριών, ενώ η μέθοδος Frank αποτυγχάνει να δώσει σωστή λύση σε ορισμένες συχνότητες (irregular frequencies). Για τους τυχαίους κυματισμούς, θεωρούνται μονοκατευθυντικές θάλασσες (long-crested). Ο χρήστης μπορεί είτε να περιγράψει το φάσμα της θάλασσας είτε να χρησιμοποιήσει το προεπιλεγμένο, το οποίο σε αυτή την περίπτωση είναι το διπαραμετρικό φάσμα Bretschneider για ανεπτυγμένες, αποσβενύμενες ή πλήρως ανεπτυγμένες θάλασσες.

Το πρόγραμμα μπορεί να υπολογίσει τόσο σε μετρικές όσο και σε αγγλικές μονάδες. Ωστόσο, για υπολογισμούς viscous roll damping, η διάσταση του μήκους θεωρείται είτε σε πόδια είτε σε μέτρα, συνεπώς αν ζητούνται οι αποκρίσεις και στους πέντε βαθμούς ελευθερίας, οι διαστάσεις μήκους πρέπει να είναι σε πόδια ή μέτρα. Μόνο για κάθετες αποκρίσεις, μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιαδήποτε μονάδα μήκους (π.χ. ίντσες ή εκατοστά). Αν επιθυμούμε υπολογισμό καμπτικών ροπών, συστήνεται να χρησιμοποιούνται σαν μονάδα μάζας λίμπρες [lbs] ή κιλά [kg] για πλοία μικρότερα των 50 ποδών και τόνους σε άλλη περίπτωση. Όλα τα αποτελέσματα (εκτός των κινήσεων στο σημείο ορισμού) θα είναι σε διαστατές μονάδες όπως εισήχθησαν.

Οι δυνατές επιλογές στο χρήστη είναι πολυάριθμες και το πρόγραμμα μπορεί να κάνει μόνο περιορισμένο αριθμό ελέγχων των δεδομένων εισόδου. Κατ' αυτή την έννοια το πρόγραμμα δεν μπορεί να θεωρηθεί ασφαλές, οπότε ο χρήστης πρέπει να έχει κατανοήσει πλήρως την μορφή των απαιτούμενων δεδομένων εισόδου πριν το εκτελέσει.

Το κέντρο των αξόνων στο σύστημα συντεταγμένων, βρίσκεται στην ίσαλο του πλοίου και στο μέσο νομέα αυτού. Οι άξονες είναι έτσι τοποθετημένοι ώστε ο άξονας των x να έχει την κατεύθυνση της ταχύτητας του πλοίου και ο άξονας z θετικός προς τα πάνω. Η γωνία πρόσπτωσης κυματισμών είναι 180° για τους μετωπικούς (head seas), 90° για τους πλάγιους (beam) και 0° για τους ακολουθούντες κυματισμούς. (following).

Οι υπολογισμοί της πρόσθετης αντίστασης γίνονται μόνο για μετωπικές θάλασσες και βασίζονται στη θεωρία των Gerittsma-Beukelman.

3. Αντίσταση-Πρόωση – Μέθοδοι υπολογισμού στην εργασία

3.1 Αντίσταση πλοίου (γενικές έννοιες – τρόποι υπολογισμού)

3.1.1 Γενικές έννοιες

Η αντίσταση ενός πλοίου οφείλεται σε απώλειες ενέργειας λόγω αλληλεπίδρασης με το νερό. Ουσιαστικά η αντίσταση του πλοίου, είναι η δύναμη που πρέπει να δίνει η προπέλα σε αυτό, ώστε να συνεχίζει να κινείται με την ίδια ταχύτητα. Για απλούστευση του φαινομένου αυτού, η αντίσταση χωρίζεται σε κάποιες βασικές αντιστάσεις. Ειδικότερα αποτελείται από την αντίσταση συνεκτικότητας (C_v) και την αντίσταση κυματισμού. Η πρώτη αναλύεται σε αντίσταση τριβής, όπου είναι εκείνη που υπολογίζεται με ολοκλήρωση στην επιφάνεια της γάστρας των εφαπτομενικών τάσεων, και σε αντίσταση πίεσης λόγω συνεκτικότητας, όπου είναι εκείνη που υπολογίζεται με ολοκλήρωση στην επιφάνεια της γάστρας των κάθετων δυνάμεων. Η δεύτερη αντίσταση (κυματισμού), συναντάται κυρίως σε μεγαλύτερες ταχύτητες σε πλοία εκτοπίσματος, είναι συνάρτηση της μορφής της γάστρας και ουσιαστικά είναι αντίσταση πίεσης. Ο κύριος λόγος που υπάρχει η αντίσταση αυτή, είναι γιατί τα σημεία της γάστρας, ως κινούμενα σημεία πίεσης, μετατοπίζουν την ελεύθερη επιφάνεια, με επακόλουθο την δημιουργία ενός συστήματος κυματισμού που εκτείνεται πίσω από τη γάστρα. Η ενέργεια αυτή που δαπανάται από το πλοίο για τη δημιουργία και συντήρηση των κυματισμών αυτών, είναι η ενέργεια κυματισμού.

Εκτός από αυτές τις βασικές αντιστάσεις, υπάρχουν και οι δευτερεύουσες αντιστάσεις όπως αντίσταση θραύσεως κύματος, παρελκομένων, αέρα, πρόσθετη αντίσταση λόγω στροφής, και επαγόμενη. (8)

3.1.2 Fouling

Ένα μέγεθος που σχετίζεται άμεσα με την αντίσταση του πλοίου, και συγκεκριμένα με την αντίσταση τριβής, είναι η ρύπανση της γάστρας (fouling). Ο όρος είναι μια λέξη η οποία αναφέρεται στη ρύπανση της γάστρας του πλοίου από φυτά, όπως φύκια και θαλάσσια χόρτα, και ζωντανούς οργανισμούς, όπως στρείδια, μύδια, ανεμόνες, κ.ά. . Η ρύπανση αυτή μπορεί να χωριστεί σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με το μέγεθος των ζωντανών οργανισμών:

- Macrofouling, όπου αναφέρεται στα φυτά και τα οστρακοειδή που προαναφέραμε,
- Microfouling, όπου αναφέρεται σε γλίτσα η οποία αποτελείται από βακτήρια και άλλους μικροοργανισμούς.

Η συνεισφορά του δεύτερου είδους ρύπανσης είναι αισθητά μικρότερη από την πρώτη.

Οι ζωντανοί αυτοί οργανισμοί, τρέφονται από το νερό που ρέει στη γάστρα καθώς κινείται το πλοίο. Οι ταχύτητες 0 έως 10 κόμβοι, είναι ιδανικές για την ανάπτυξη αυτών

των οργανισμών. Η τραχύτητα της επιφάνειας της γάστρας του πλοίου, οφείλεται σε διάβρωση, ξεφλούδισμα πολλών στρωμάτων μπογιάς, μη σωστή τήρηση μέτρων προστασίας, καθώς και μηχανικών βλαβών. Η ανάπτυξη των οργανισμών πάνω στη γάστρα εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως γεωγραφικούς, ωκεανογραφικούς, εποχιακούς, τα υλικά που χρησιμοποιούνται, καθώς και τις διαδρομές και την ταχύτητα του πλοίου. Η ρύπανση της γάστρας αυξάνει την αντίσταση, και μειώνει την ταχύτητα του πλοίου κατά 10 με 15% σε ίδια ισχύ κινητήρα. Για να κρατηθεί η ίδια ταχύτητα, πρέπει να αυξηθεί η ισχύς κατά 23 με 38%, και κατ'έπекταση η κατανάλωση κατά 25 – 40 %. Αυτό καθιστά αναγκαία τη διαδικασία antifouling, όπου ουσιαστικά κρατείται η επιφάνεια της γάστρας όσο πιο λεία γίνεται με χρήση ειδικών μπογιών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την οικονομία μέσω της μείωσης της κατανάλωσης, οπότε επιφέρει κέρδη σαν μείωση των δαπανών. Επίσης αν χρησιμοποιείται διαδικασία antifouling, το πλοίο περνά λιγότερο χρόνο αραγμένο για διαδικασία καθαρισμού, με αποτέλεσμα πάλι την αύξηση των κερδών του. (12)

3.1.3 Trim

Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει την αντίσταση του πλοίου είναι η διαγωγή του, και πώς αυτή αλλάζει με τις αλλαγές της ταχύτητας.

Δυναμική διαγωγή (running trim), είναι το φαινόμενο κατά το οποίο το πλοίο αλλάζει τη διαγωγή και το βύθισμα του καθώς αναπτύσσει ταχύτητα, σε σχέση με την ακινησία, λόγω αλλαγής στις δυνάμεις πίεσης και συνεκτικότητας που αναπτύσσονται στη γάστρα. Τα αποτελέσματα αυτού του φαινομένου είναι σε χαμηλές ταχύτητες να υπάρχει μια ελαφρά παράλληλη βύθιση, λόγω πτώσης πίεσης στη γάστρα, και μια ελαφρά πρωραία διαγωγή, λόγω δράσης των δυνάμεων τριβής. Καθώς όμως αυξάνεται η ταχύτητα, σε περίπου αριθμό $Fr=0.3$ και πάνω, αντιστρέφεται η κίνηση της πλώρης και ανυψώνεται και η πρύμνη βυθίζεται. Σε συνηθισμένου τύπου εμπορικά πλοία, η προυμεναία διαγωγή οδηγεί σε αύξηση της αντίστασης σε χαμηλές ταχύτητες και μείωση σε υψηλές. Στις χαμηλές ταχύτητες, το αυξημένο προυμεναίο βύθισμα ανεβάζει την αντίσταση μορφής λόγω πιο γεμάτης πρύμνης, ενώ στις υψηλές αυτό αντισταθμίζεται λόγω μείωσης αντίστασης κυματισμού επειδή η πλώρη είναι πιο λεπτόγραμμη με την αντίστοιχη διαγωγή. (8)

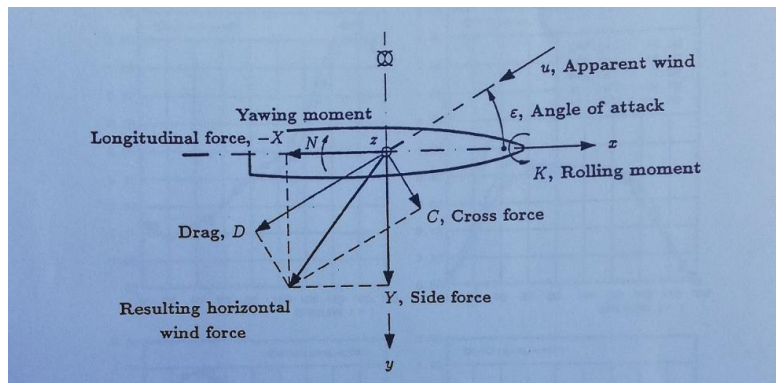
3.1.4 Τρόποι υπολογισμού αντίστασης στην εργασία

Στην παρούσα διπλωματική, η συνολική αντίσταση που υπολογίστηκε, χωρίστηκε σε 4 συνιστώσες. Αντίσταση ανέμου, αντίσταση σε ήρεμο νερό, πρόσθετη αντίσταση κυματισμού λόγω κατάστασης θάλασσας και αντίσταση παρελκομένων. Η αντίσταση σε ήρεμο νερό, ουσιαστικά περιλαμβάνει τις 2 βασικές συνιστώσες αντίστασης, συνεκτικότητας και κυματισμού.

3.1.4.1 Αντίσταση ανέμου

Ο συντελεστής αντίστασης ανέμου, και κατ'επέκταση η αντίσταση του ανέμου για τις ελεύθερες επιφάνειες του πλοίου, υπολογίστηκε από το paper του Blendermann, όπου μια σειρά από τεστ σε αεροδυναμική σήραγγα για δεδομένους τύπους πλοίου, παρουσιάζεται. Συγκεκριμένα μοντέλα από πολλά δεδομένα πλοία δοκιμάστηκαν στη σήραγγα και παρουσιάζονται πίνακες με τα αποτελέσματα των δοκιμών.

Οι δοκιμές έγιναν σε σήραγγα με επιφάνεια ροής 1,75 επί 1,05 μέτρα, με μέγιστη ταχύτητα ροής 35m/s και ένταση στροβιλότητας 0,5%. Οι αριθμοί Reynolds στο μοντέλο βασισμένοι στο συνολικό μήκος ($Re=u*Loa/v$) βρίσκονταν μεταξύ $2*10^6$ και $3*10^6$. Το μοντέλο ήταν δεμένο και γυρισμένο προς τη ροή του ανέμου. Το σημείο δημιουργίας του ανέμου βρισκόταν σε απόσταση 1,1 μέτρων από την έξοδο της σήραγγας. Οι δοκιμές έδειξαν ότι η πίεση ήταν σταθερή σε όλο το πλάτος του μοντέλου, μετα από μια απότομη αύξηση πίσω από την άκρη του. Οι μετρήσεις έγιναν στη ροή του ανέμου από τη σήραγγα, με φυσική ανάπτυξη οριακού στρώματος πάνω από την επιφάνεια του πατώματος. Οι δυνάμεις και οι ροπές εκφράζονται σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων, το οποίο παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 9 Σύστημα αναφοράς ταχυτήτων ανέμου

Όπως φαίνεται στο σχήμα, x είναι ο άξονας συμμετρίας του πλοίου, y ο κάθετος σε αυτόν, και παράλληλος στην επιφάνεια του νερού, και ο z ο κατακόρυφος. Η δύναμη X είναι αυτή παράλληλη στον x ενώ η δύναμη Y είναι παράλληλη στον y. Στην διεύθυνση του φαινόμενου ανέμου συναντάμε την δύναμη D (drag) και κάθετα σε αυτή την δύναμη C. Η γωνία ε είναι η γωνία μεταξύ φαινόμενου ανέμου και άξονα συμμετρίας του πλοίου. Οι δυνάμεις εκφράζονται από τους παρακάτω τύπους συναρτήσεων των συντελεστών.

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

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

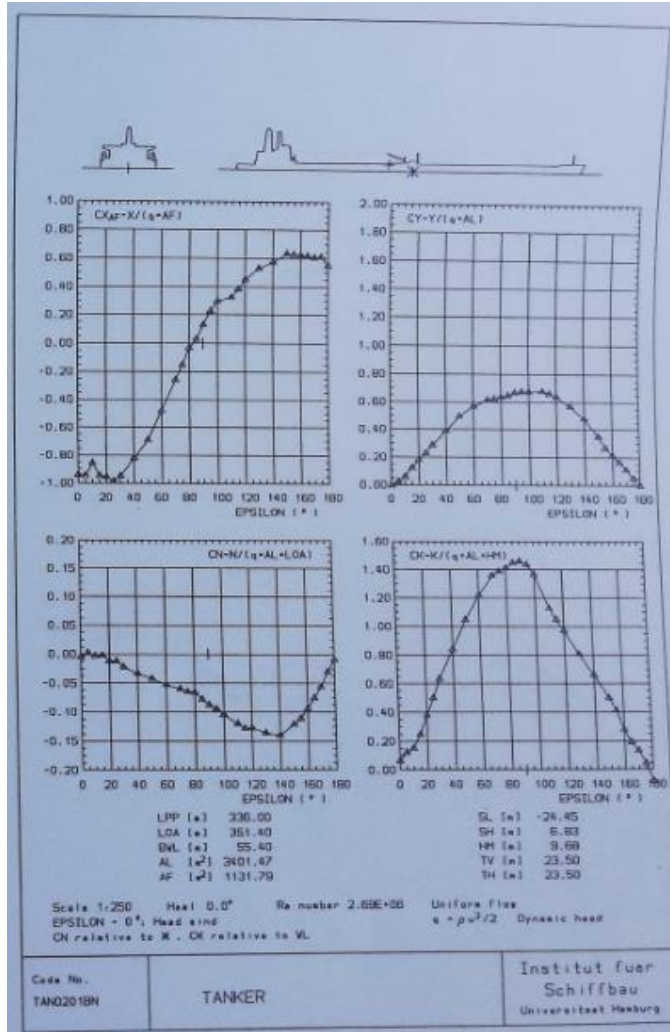
$$C_{XAF} = \frac{X}{q \cdot A_F}$$

Όπου $q = \frac{\rho}{2} \cdot u^2$, ρ η πυκνότητα του αέρα, A_F , A_L οι ελεύθερες στον αέρα επιφάνειες, οι εμπρός και πλαϊνές αντίστοιχα (frontal, lateral).

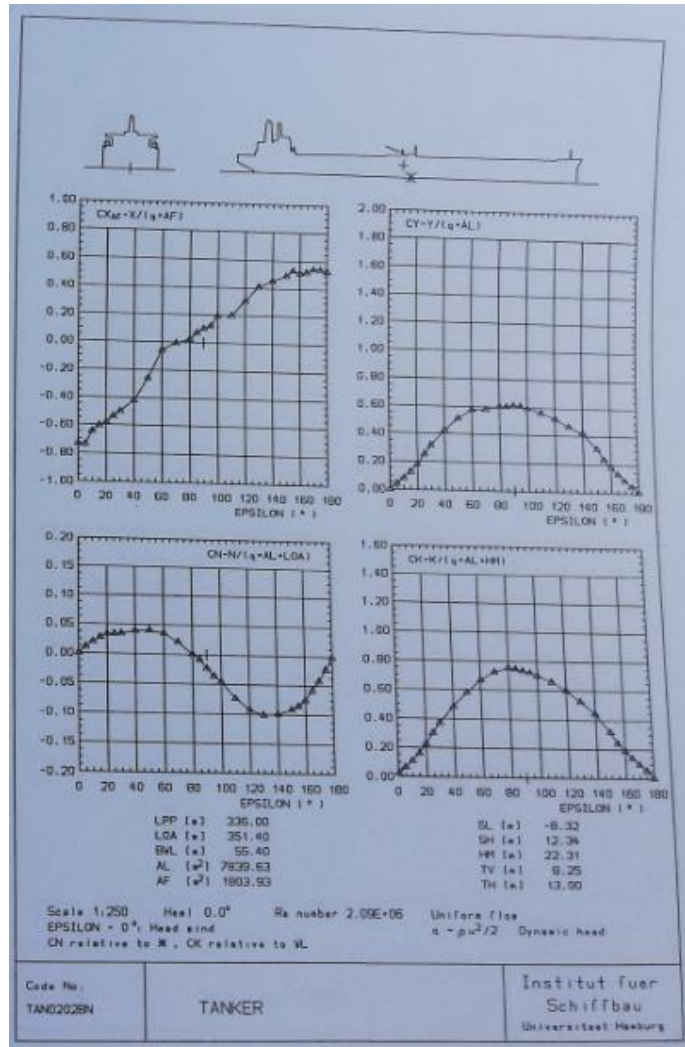
Με το νόμο των συνημίτονων υπολογίστηκε η σχετική ταχύτητα ανέμου από την πραγματική και την ταχύτητα του σκάφους, και έπειτα υπολογίστηκε και η σχετική γωνία αυτής (ε) με την πλώρη (angle of attack). Από το paper, από πίνακες για κατάσταση full load και ballast αντίστοιχα για δεξαμενόπλοιο, υπολογίστηκε με βάση την γωνία ε ο συντελεστής C_{XAF} , οπότε σύμφωνα με τον τύπο:

$$C_{XAF} = \frac{X}{q \cdot A_F}$$

και με δεδομένη την ελεύθερη επιφάνεια από την πρόοψη του πλοίου (μέσω του σχεδιαστικού προγράμματος Autocad), υπολογίστηκε η αντίσταση στον άξονα X του πλοίου. Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται οι συντελεστές C_{XAF} .



Σχήμα 10 Συντελεστές αντίστασης ανέμου full load



Σχήμα 11 Συντελεστές αντίστασης ανέμου ballast

Η αντίσταση στον άξονα Y δεν την λήφθηκε υπόψιν στην παρούσα εργασία. (7)

Η αντίσταση λόγω παρελκομένων υπολογίζεται ως το 3% της αντίστασης σε ήρεμο νερό

3.1.4.2 Αντίσταση σε ήρεμο νερό

Η αντίσταση σε ήρεμο νερό υπολογίστηκε ως εξής. Αρχικά έχοντας τα model test για το πλοίο που μελετάται, χρησιμοποιήθηκε για τις καταστάσεις ballast και full load η ισχύς και η αντίσταση σε ήρεμο νερό, συναρτήσε της ταχύτητας του πλοίου. Για τις δύο καταστάσεις αυτές, δίνονται τα αντίστοιχα εκτοπίσματα, $D_{full}=46431.7$ DWT, $D_{ballast}=19553.8$ DWT. Σύμφωνα με το trim and stability booklet του πλοίου όμως, τα πραγματικά εκτοπίσματα για αυτές τις καταστάσεις είναι $D_{full}= 47846.4$ DWT, και $D_{ballast}= 20206.93$ DWT. Εφόσον υπάρχει μια μικρή, μη αμελητέα διαφορά στα εκτοπίσματα, εφαρμόσθηκε ο τύπος του αγγλικού ναυαρχείου, για να υπολογιστεί η ισχύς για τις καταστάσεις αυτές. Η ισχύς που δίνεται στα model test ήταν η effective (EHP) ισχύς, δηλαδή η ισχύς που απαιτείται για να κινηθεί το πλοίο σε συγκεκριμένη

ταχύτητα, με την απουσία του συστήματος της προπέλας. Με βάση τους βαθμούς απόδοσης που δόθηκαν στα model test, μετατράπηκε η EHP σε Pd (delivered), δηλαδή την ισχύ που βγαίνει αμέσως πριν την προπέλα.

$$Pd = \frac{Pe}{\eta_o * \eta_r * (1-t) * (1-ws)}$$

Από την ισχύ αυτή, διαιρώντας την με έναν υποθετικό βαθμό απόδοσης αξονικού συστήματος 0,98, υπολογίστηκε η Ps.

$$Ps = \frac{Pe}{\eta_s}$$

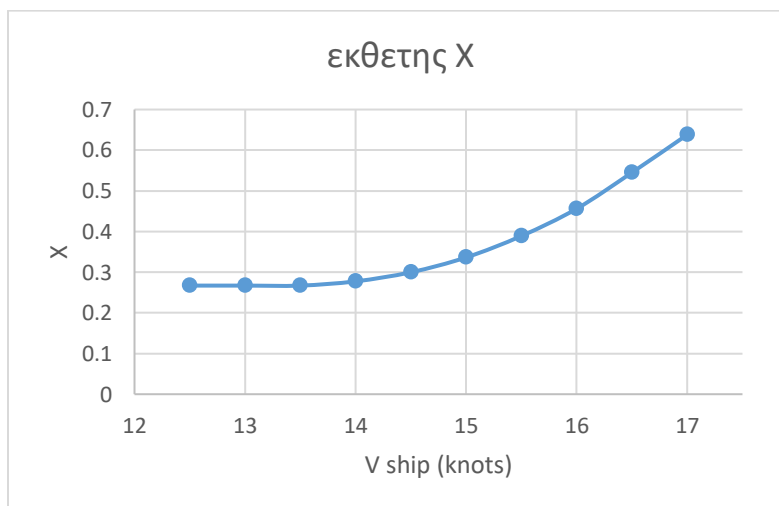
Οπότε εφαρμόζοντας τον συντελεστή του αγγλικού ναυαρχείου (11), υπολογίστηκε η ισχύς Ps για τις καταστάσεις full load και ballast:

$$P1 = P2 * \left(\frac{\Delta 1}{\Delta 2}\right)^{\frac{2}{3}}$$

Ύστερα για να προβλεφθεί η ισχύς στις καταστάσεις από τα report, που διαφέρουν σε βύθισμα και άρα και εκτόπισμα από τις άλλες δύο, χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω σχέση για να βρεθεί ο εκθέτης όπου θα μετατοπίσει κατάλληλα τις καμπύλες ισχύος ανάλογα με τον λόγο εκτοπισμάτων.

$$P_{ballast} = P_{full} * \left(\frac{\Delta_{ballast}}{\Delta_{full}}\right)^X$$

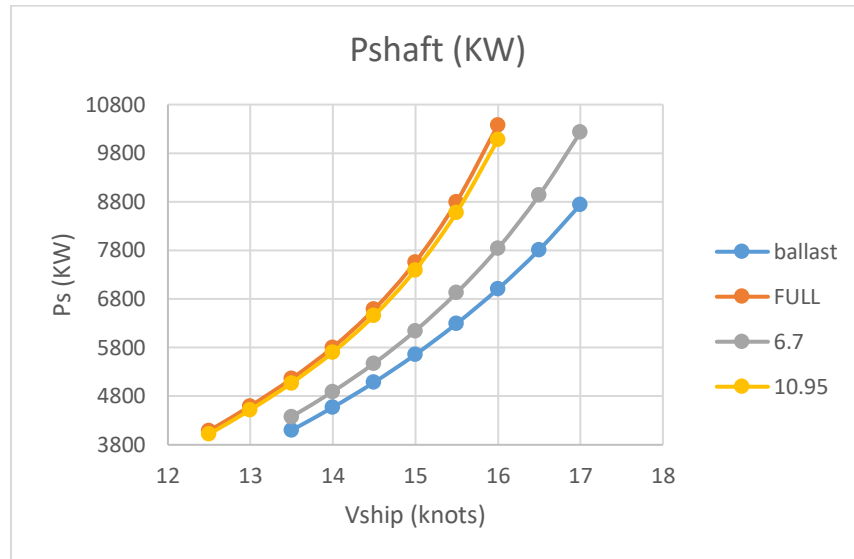
Έτσι υπολογίστηκε ο εκθέτης X για όλες τις ταχύτητες. Παρακάτω φαίνεται το αντίστοιχο διάγραμμα.



Διάγραμμα 1 Εκθέτης X

Στη συνέχεια υπολογίστηκε η ισχύς Ps για τις καταστάσεις από τα report χρησιμοποιώντας τον τύπο με τον εκθέτη, για κάθε ταχύτητα. Παρακάτω παρουσιάζεται

το διάγραμμα με τις ισχύς Ps για τις καταστάσεις full load, ballast, και τις δύο από τα report.

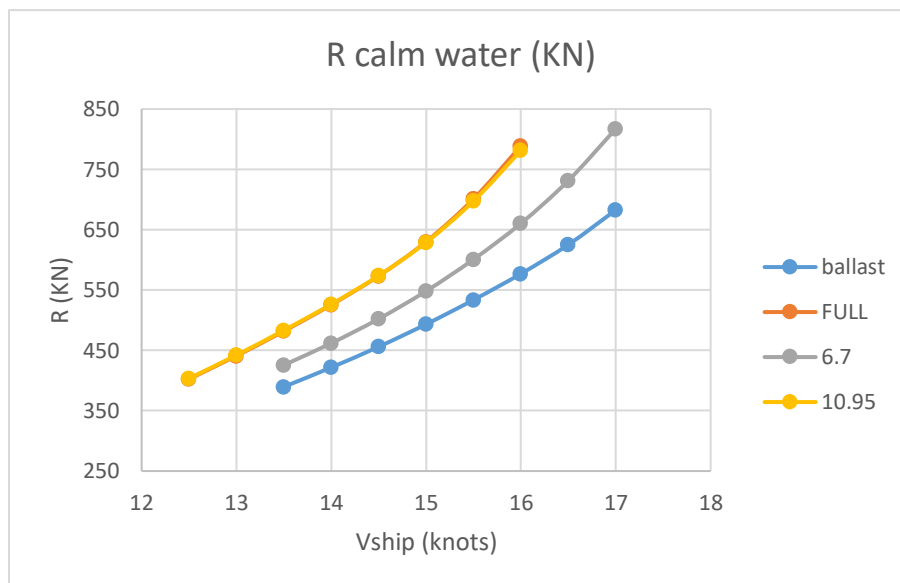


Διάγραμμα 2 Ισχύς σε ήρεμο νερό

Η αντίσταση τόσο στις καταστάσεις full load και ballast, όσο και σε αυτές των report, υπολογίστηκαν από τον εξής τύπο κάνοντας τις κατάλληλες μετατροπές μονάδων και μετατρέποντας την Ps σε Pe στις καταστάσεις των report.

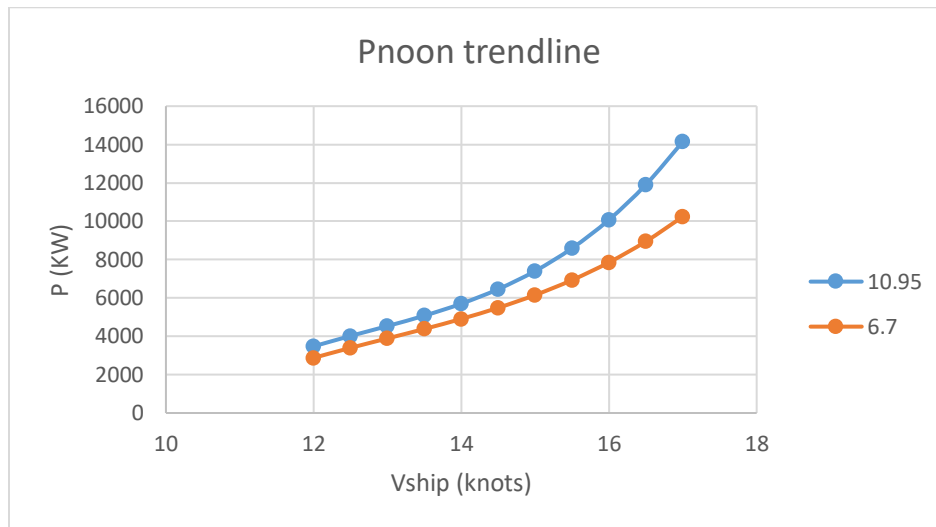
$$Pe = \frac{Rt * Vs}{75}$$

Παρακάτω φαίνεται το αντίστοιχο διάγραμμα.

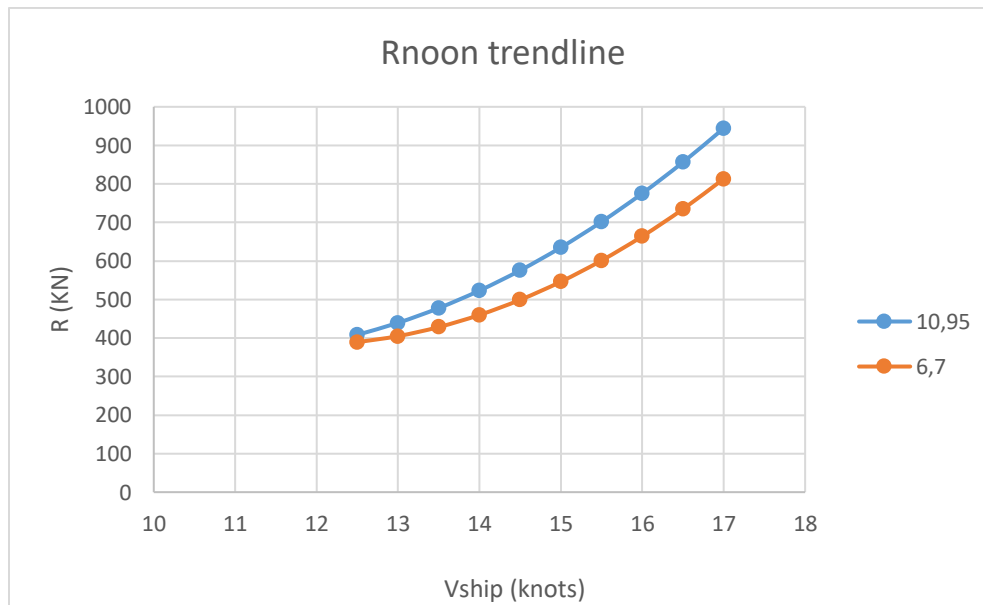


Διάγραμμα 3 Αντίσταση σε ήρεμο νερό

Επειδή στα model test οι δοκιμές μοντέλου έγιναν για διαφορετικές ταχύτητες στις δύο καταστάσεις (12,5 – 16 και 13,5 – 17 knots) με συνέπεια και οι υπόλοιποι υπολογισμοί να γίνουν σε αυτές τις ταχύτητες, χρειάστηκε να γίνει ένα extrapolation στις καμπύλες ισχύος και αντίστασης για να καλυφθεί όλο το εύρος ταχυτήτων ταυτόχρονα. Η διαδικασία αυτή έγινε με πολυώνυμα 2^{ου} και 3^{ου} βαθμού για την αντίσταση και την ισχύ αντίστοιχα. Παρακάτω παρουσιάζονται τα δύο διαγράμματα για τα μεγέθη αυτά.



Διάγραμμα 4 P calm water trendline



Διάγραμμα 5 R calm water trendline

Από αυτές τις καμπύλες τελικώς υπολογίστηκε η αντίσταση πλοίου σε ήρεμο νερό.

3.1.4.3 Πρόσθετη αντίσταση κυματισμού

Η αντίσταση κυματισμού υπολογίστηκε τρέχοντας το πρόγραμμα Frank για την κατάσταση ballast, και το πρόγραμμα SPP86 για την κατάσταση full load, και υπολογίζοντας έτσι την αντίσταση για μοναδιαίο σημαντικό ύψος κύματος. Πιο συγκεκριμένα εκτός από το κομμάτι της γεωμετρίας του πλοίου, που θα αναφερθούμε παρακάτω, σαν είσοδο στο πρόγραμμα εισήχθη η συχνότητα ω του κυματισμού που συνάντησε το πλοίο, η κατεύθυνσή του, όπου υποτέθηκε ότι ήταν ίδια με αυτήν του ανέμου, και η ταχύτητα του πλοίου. Με βάση το διάγραμμα περιόδου κυματισμού, και σημαντικού ύψους κύματος συναρτήσε της ταχύτητας ανέμου για πλήρως ανεπτυγμένη θάλασσα, από τους Pierson- Moskowitz, υπολογίστηκε η περίοδος και το σημαντικό ύψος κύματος καθώς το μοναδικό αξιόπιστο δεδομένο από τα report ήταν η ταχύτητα ανέμου. Παρακάτω δίνεται το αντίστοιχο διάγραμμα.

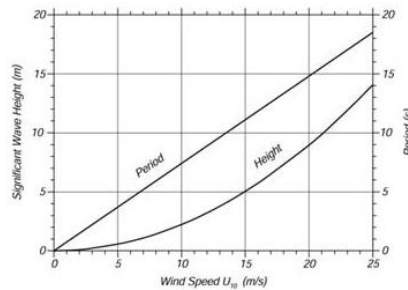


Figure 2 Significant wave-height and period at the peak of the spectrum of a fully developed sea calculated from the Pierson-Moskowitz spectrum.

Διάγραμμα 6 Ύψος κύματος και περίοδος για πλήρως ανεπτυγμένη θάλασσα

Σαν γεωμετρικά χαρακτηριστικά εισόδου του προγράμματος εισήχθησαν οι νομείς του πλοίου, οι οποίοι αποτελούνται ο καθένας από ένα σύνολο ισαπέχοντων σημείων για να τους περιγράψουν. Επίσης η σχετική με το μέσο νομέα ($X=0$) θέση του καθενός. Μπήκαν στοιχεία για τα παρατροπίδια, όπως η θέση τους, το μήκος τους και η γωνία σε σχέση με το σκάφος. Επίσης σαν είσοδο δέχτηκε το συνολικό μήκος L_{pp} , πλάτος B_{wl} , βύθισμα T_m , τον πρισματικό συντελεστή C_b , την βρεχόμενη επιφάνεια γάστρας, τις ακτίνες αδρανείας ως προς XX , YY , ZZ , R_{xx} , R_{yy} , R_{zz} αντίστοιχα και το μετακεντρικό ύψος GM .

Σαν έξοδο του προγράμματος, εξήχθη η πρόσθετη αντίσταση κυματισμού για μοναδιαίο όμως κύμα. Πιο συγκεκριμένα, το αρχείο εξόδου (.VER), αποτελείτο από ένα σύνολο πινάκων για κάθε γωνία κυματισμού, με δεδομένη ταχύτητα, δίνοντας την πρόσθετη αντίσταση για κάθε περίοδο κύματος. Παρατίθεται ένα στιγμιότυπο από ένα κομμάτι-πίνακα από το αρχείο εξόδου.

SHIP SPEED = 6.647 m/sec						HEADING ANGLE = 140.000 DEG.										
TP	H(1/3)	HEAVE	PITCH	ROLL	ADDRESS	ABS.VERT.ACCEL.			REL.VERT.MOTIONS			REL.VERT.VELOC.			ALA	
						POINT1	POINT2	POINT3	POINT1	POINT2	POINT3	POINT1	POINT2	POINT3	POINT1	
4.88	1.000	0.003	0.008	0.005	138.	0.046	0.004	0.020	0.330	0.228	0.216	0.804	0.693	0.633	0.187	
5.16	1.000	0.003	0.008	0.006	211.	0.041	0.005	0.019	0.313	0.231	0.220	0.741	0.648	0.600	0.164	
5.28	1.000	0.003	0.007	0.006	239.	0.039	0.005	0.020	0.307	0.233	0.221	0.717	0.631	0.588	0.156	
5.57	1.000	0.003	0.008	0.007	302.	0.035	0.006	0.020	0.294	0.235	0.228	0.662	0.590	0.557	0.136	
5.86	1.000	0.004	0.010	0.008	358.	0.032	0.007	0.022	0.285	0.237	0.232	0.614	0.554	0.529	0.119	
5.94	1.000	0.004	0.011	0.008	372.	0.032	0.007	0.022	0.282	0.237	0.232	0.602	0.544	0.522	0.115	
7.07	1.000	0.019	0.040	0.010	595.	0.043	0.015	0.048	0.269	0.241	0.258	0.471	0.437	0.440	0.072	
8.66	1.000	0.081	0.120	0.013	1166.	0.096	0.047	0.122	0.266	0.247	0.358	0.361	0.339	0.400	0.050	

Σχήμα 12 Αρχείο εξόδου Frank

Υστερα αυτή πολλαπλασιάστηκε με το τετράγωνο του σημαντικού ύψους κύματος H_s ώστε να υπολογιστεί η συνολική πρόσθετη αντίσταση.

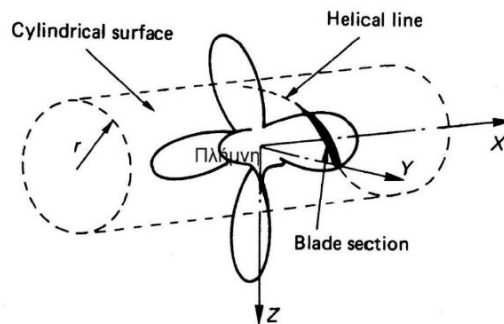
3.2 Χαρακτηριστικά έλικας

3.2.1 Συντελεστές ώσης και ροπής (KT –KQ)

Η έλικα είναι το πιο διαδεδομένο σύστημα που δίνει την απαραίτητη ώση στο πλοίο για να κινηθεί τα τελευταία 150 χρόνια. Η γεωμετρία της μπορεί να περιγραφεί από 2 μεγέθη.

- Την ελικοειδή γραμμή, με βάση την οποία χτίζεται η ελικοειδής επιφάνεια, που είναι η επιφάνεια στην πραγματική τρισδιάστατη γεωμετρία του πτερυγίου
- Την δυσδιάστατη υδροτομή η οποία αποτελεί την διαταραχή της ελικοειδούς επιφάνειας προκειμένου να παραχθεί το πτερύγιο της έλικας.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται τα στοιχεία αυτά.

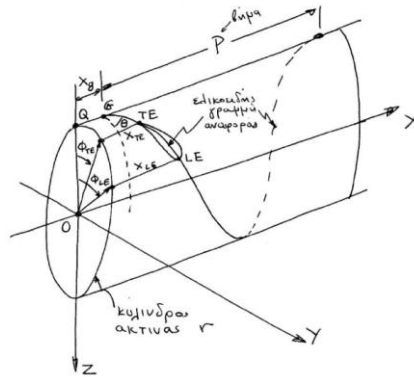


Σχήμα 13 Στοιχεία έλικας

Η πτερυγοτομή έχει το σχήμα υδροτομής, ώστε να παράγει άνωση με μικρή αντίσταση. Η γραμμή πρόσπτωσης και εκφυγής της πτερυγοτομής ορίζουν τη γεωμετρία μιας ελικοειδούς γραμμής, βήματος P και και γωνίας βήματος θ , τα οποία συνδέονται με τη σχέση

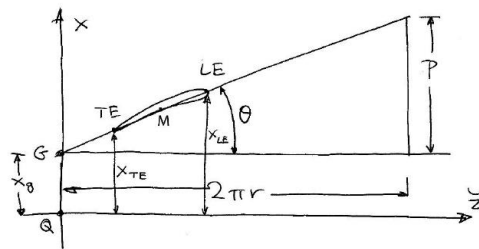
$$\theta = \tan^{-1} \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot r}$$

Η τομή της ελικοειδούς επιφάνειας με το επίπεδο XZ ορίζει τη γενέτειρα γραμμή (generator line) η οποία συνήθως είναι ευθεία γραμμή.



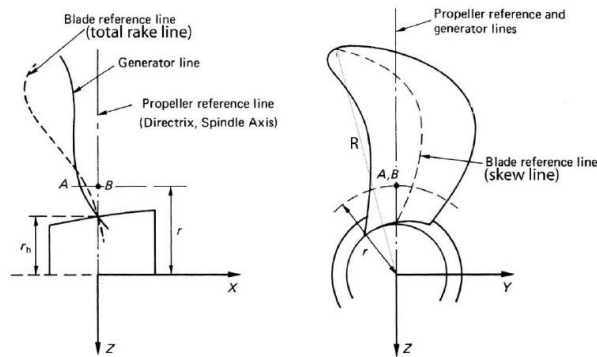
Σχήμα 14 Τομή ελικοειδούς

Η ανάπτυξη του κυλίνδρου φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 15 Ανάπτυξη κυλίνδρου

Το τμήμα LE – TE ονομάζεται χορδή στην ακτίνα r και συμβολίζεται $c(r)$. Επίσης ορίζεται το μέσο M της χορδής, και ο γεωμετρικός τόπος των μέσων των χορδών ορίζει τη γραμμή αναφοράς του πτερυγίου. Η προβολή της γραμμής αναφοράς στον XZ άξονα ονομάζεται γραμμή της ολικής διαμήκουσ απόκλισης (total rake line), ενώ στον YZ άξονα, της πλευρικής απόκλισης (skew line). Και οι δύο αυτές γραμμές είναι πάρα πολύ σημαντικές γιατί εξηγούν πώς τοποθετείται το πτερύγιο στο χώρο. Στο επόμενο σχήμα φαίνονται οι δύο γραμμές.



Σχήμα 16 Γραμμές έλικας

Έλικες με ολική γωνία πλευρικής απόκλισης μεγαλύτερη των 45 μοιρών ονομάζονται έλικες με υψηλή απόκλιση (highly skewed propellers) και έχουν πολύ καλά χαρακτηριστικά σε κραδασμούς και σπηλαιώση. Για μια έλικα με Z πτερύγια, το συνολικό εκτεταμένο εμβαδόν θα είναι:

$$A_E = z \cdot E = z \cdot \int_{r_H}^R c(r) dr$$

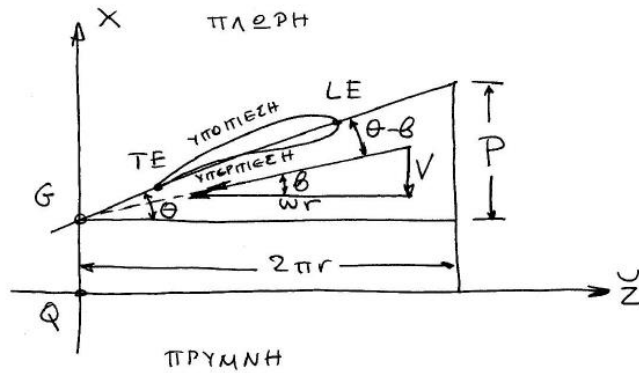
Και ο λόγος εκτεταμένης επιφάνειας της έλικας θα είναι

$$\frac{A_E}{A_0} = \frac{z \cdot \int_{r_H}^R c(r) dr}{\pi \cdot D^2 / 4}$$

Όπου A_0 το εμβαδόν του δίσκου της έλικας. Στην σχεδίαση ελίκων από συστηματικές σειρές, οι ερευνητές χρησιμοποιούν ένα σύνολο παραμέτρων που καθορίζουν την υδροδυναμική συμπεριφορά της έλικας. Αυτές οι παράμετροι είναι:

- Διάμετρος έλικας D
- Βήμα P
- Αριθμός πτερυγιων z
- Λόγος εκτεταμένης επιφάνειας A_E / A_0

Καθώς το πτερύγιο περιστρέφεται, η πτερυγοτομή κινείται με ταχύτητα $\omega \cdot r$ (όπου ω η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής, και r η ακτινα στη θέση της πτερυγοτομής). Το νερό περνά παράλληλα με τον άξονα περιστροφής της έλικας με ταχύτητα V (προχώρηση). Έτσι δημιουργείται το παρακάτω τρίγωνο ταχυτήτων.

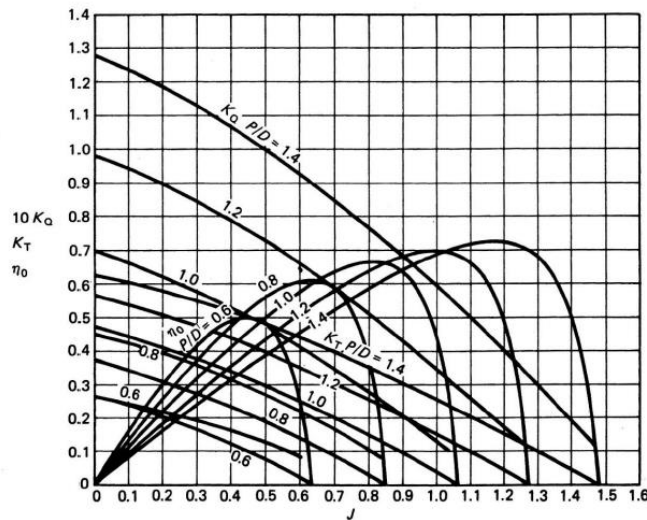


Σχήμα 17 Πτερυγοτομή έλικας

Ο συντελεστής προχώρησης J χαρακτηρίζει την γωνία μεταξύ V και ω^*r και συνδέεται με τον τύπο

$$\tan\beta = \frac{J}{\pi^*r}$$

Ο συντελεστής προχώρησης, μαζί με το βήμα, καθορίζει τις γωνίες πρόσπτωσης των πτερυγοτομών. Για δεδομένο βήμα λοιπόν, αλλαγή του J , επιφέρει αλλαγή στην ροπή και την ώση της έλικας. Ένας τρόπος για τη μελέτη της συμπεριφοράς της έλικας είναι το διάγραμμα ελεύθερης ροής της έλικας. Εκεί παρουσιάζονται πειραματικά αποτελέσματα για το συντελεστή ώσης K_T και το συντελεστή ροπής K_Q , συναρτήσει του συντελεστή προχώρησης J για δεδομένες τιμές αριθμού πτερυγίων, του λόγου εκτεταμένης επιφάνειας, αριθμού σπηλαιώσης, Reynolds, Froude και Weber, και για παράμετρο το λόγο βήματος P/D . Παρακάτω παρουσιάζεται ένα τέτοιο διάγραμμα για μια τυχαία έλικα.



Διάγραμμα 7 Συντελεστές K_Q - K_T

Οι συντελεστές ώσης και ροπής χρησιμοποιήθηκαν από τα model test σε μορφή πίνακα, συναρτήσει του συντελεστή προχώρησης. Έτσι κατασκευάστηκαν πολυώνυμα 3^{ου} βαθμού που εκφράζουν αυτή την σχέση για τον κάθε συντελεστή, και χρησιμοποιήθηκαν στο φύλλο υπολογισμού του excel για να βρεθεί η απαιτούμενη ισχύς και στροφές κινητήρα, όπως θα παρουσιαστούν παρακάτω. (8)

3.2.2 Thrust deduction factor – wake fraction

Όταν ένα πλοίο κινείται χωρίς τη χρήση προπέλας (ρυμουλκείται), δημιουργείται ένα πεδίο πίεσης γύρω από τη γάστρα. Όταν χρησιμοποιηθεί η προπέλα, και το πλοίο κινείται στην ίδια ταχύτητα, το πεδίο πιέσεων αλλάζει, επειδή η προπέλα αυξάνει τις ταχύτητες του ρευστού, και έτσι μειώνει την πίεση στο κομμάτι πίσω από την πρύμνη. Αυτό οδηγεί σε αύξηση της αντίστασης. Ο συντελεστής t εκφράζει το συντελεστή μείωσης της ώσης από την προπέλα λόγω της αλλαγής του πεδίου πιέσεων, και υπολογίζεται από τον τύπο

$$t = 1 - R/T,$$

όπου R η αντίσταση του πλοίου και T η ώση της προπέλας. (14)

Η ταχύτητα του νερού που περνά από τον “δίσκο” της προπέλας V_A , είναι μικρότερη σε σχέση με αυτή που περνά από τη γάστρα του πλοίου V . Η ποσοστιαία αυτή διαφορά ως προς την ταχύτητα του πλοίου είναι γνωστή ως συντελεστής w και δίνεται από τον παρακάτω τύπο.

$$w = \frac{(V - V_A)}{V}$$

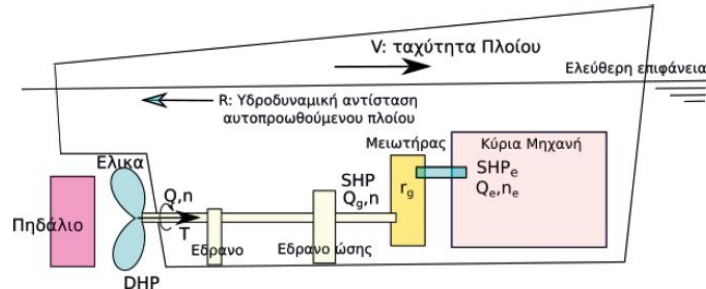
Η τιμή του συντελεστή αυτού κυμαίνεται μεταξύ 0,2 και 0,45, και εξαρτάται κυρίως από το σχήμα της γάστρας. Συνήθως πλοία με μεγάλο συντελεστή C_b , έχουν και μεγάλο w , και η κατανομή των ταχυτήτων του ρευστού γύρω από την προπέλα είναι πολύ ανομοιογενής. (15)

Οι δύο συντελεστές αυτοί δόθηκαν στα model test συναρτήσει της ταχύτητας δοκιμών, και ένας μέσος όρος χρησιμοποιήθηκε για την κάθε κατάσταση.

3.3 Ισχύς και οι συνιστώσες της

Το αυτοπροωθούμενο πλοίο, είναι το πλοίο το οποίο χρησιμοποιεί σαν σύστημα πρόωσης την προπέλα η οποία είναι συνδεδεμένη μέσω ενός άξονα και ενός μειωτήρα με τη μηχανή. Στα μεγάλα εμπορικά πλοία τύπου τάνκερ, δεν χρησιμοποιούνται μειωτήρες, καθότι είναι πιο αποδοτική η χρήση βραδύστροφων μηχανών, και έτσι η προπέλα έχει τις ίδιες στροφές με τον κινητήρα. Η ισχύς που βγαίνει από τη μηχανή, μέχρι να φτάσει στην προπέλα περνά από πολλά στάδια, όπου χάνει ένα μέρος της. Ειδικότερα, η μηχανή δουλεύει και βγάζει μια ισχύ SHP_e (shaft horsepower engine), ή αλλιώς BHP (break horsepower). Αυτή η ισχύς περνά από τον μειωτήρα (αν αυτός υπάρχει) και εκεί χάνεται ένα μέρος, και μετατρέπεται σε SHP (shaft). Σε περίπτωση που

δεν υπάρχει μειωτήρας, SHP=BHP. Ύστερα, η ισχύς αυτή, μεταφέρεται μέσω του άξονα στην έλικα, με μια μικρή απώλεια ενέργειας στην άξονα, τα έδρανα και τη χοάνη. Η ισχύς αυτή που φτάνει στην έλικα λέγεται DHP (delivered horsepower). Παρακάτω παρουσιάζεται ένα σχήμα που εξηγεί αυτές τις ισχύεις.



Σχήμα 18 Ισχύεις στο σύστημα πρόωσης

Επίσης υπάρχει η P_t (thrust) η οποία είναι η ισχύς ώσης της έλικας, και η P_E η ισχύς ρυμούλκησης (16). Στα model test δινόταν η ισχύς ρυμούλκησης του μοντέλου. Έτσι χρησιμοποιήθηκε ο τύπος

$$P_E = \eta_0 * \eta_R * \frac{1-t}{1-w} * P_D$$

Έτσι να μετατραπεί σε ισχύ αποδιδόμενη στην έλικα. Ως η_0 ορίζεται ο βαθμός απόδοσης έλικας σε ελεύθερη ροή, η_R ο βαθμός απόδοσης σχετικής περιστροφής. Στα model test δίνονταν οι συντελεστές αυτοί (και w , t) συναρτήσεως της ταχύτητας. Έπειτα με τον τύπο

$$P_D = \eta_s * P_S$$

μετατράπηκε σε ισχύ άξονα. Στην παρούσα διπλωματική θεωρήθηκε βαθμός απόδοσης αξονικού συστήματος (η_s) 0,98, μια τυπική τιμή δηλαδή.

3.4 Χρήση ειδικής φόρμας excel στον υπολογισμό απαιτούμενης ισχύος

Για να γίνει η σύγκριση μεταξύ report και θεωρητικών αποτελεσμάτων, χρησιμοποιήθηκε ένα excel, το οποίο με βάση όλα τα δεδομένα του πλοίου και της κατάστασης που υπήρχε την χρονική στιγμή του κάθε report, υπολογίζει την απαιτούμενη ισχύ της μηχανής, και τις στροφές της. Ύστερα η απαιτούμενη ισχύς, μεταφράζεται σε κατανάλωση για να συγκριθεί με αυτήν στα report. Το excel εκτός των μετατροπών μονάδων, λειτουργεί ως εξής. Αρχικά παίρνει σαν είσοδο όλες τις αντιστάσεις που έχουν υπολογιστεί (ήρεμου νερού, κυματισμού και ανέμου), όπως περιγράφηκε προηγουμένως. Η αντίσταση παρελκομένων υπολογίζεται ως το 3% επί της συνολικής. Ύστερα τοποθετούνται οι χαρακτηριστικά του πλοίου, για την προσεγγιστική εκτίμηση της αντίστασης της γάστρας κατά IACS. Τα χαρακτηριστικά που εισάγονται είναι τα παρακάτω:

- Εμβαδόν πηδαλίου
- Πρισματικός συντελεστής
- Cw
- Βρεχόμενη επιφάνεια
- Lpp
- Bwl
- Tm
- Dp
- Thrust deduction factor
- Wake fraction
- Χαρακτηριστικές της έλικας (kt, 10kq)

Επίσης για τους υπολογισμούς εισάγονται το ύψος κύματος θάλασσας λόγω ανέμου, καθώς και η ταχύτητα του πλοίου και οι χαρακτηριστικές της έλικας (Kt, 10Kq) που έχουν βρεθεί από τα τεστ του μοντέλου. Το συνολικό ύψος κύματος Hs στη συνέχεια υψώνεται στο τετράγωνο και πολλαπλασιάζεται με την αντίσταση κυματισμού για μοναδιαίο ύψος κύματος που υπολογίστηκε από το πρόγραμμα Frank, ώστε να βγει η συνολική για την κατάσταση της θάλασσας. Αφού εισαχθούν όλες αυτές οι παράμετροι, υπάρχουν δύο κελιά που αντιπροσωπεύουν τον δείκτη Kt, όπου υπολογίζονται με διαφορετικό τρόπο, και αλλάζοντας τον δείκτη J αλλάζει η τιμή του ενός έως ότου εξισωθεί με τον άλλον.

Το ένα κελί Kt υπολογίζεται από την εξίσωση τρίτου βαθμού της έλικας, εισάγοντας την τιμή του J. Το δεύτερο υπολογίζεται από τον τύπο

$$Kt(J) = \frac{T \cdot J^2}{\rho \cdot (u_a \cdot D_p)^2}$$

όπου Dp η διάμετρος της προπέλας, ρ η πυκνότητα του νερού (1025kg/m³), και u_a = V_s·(1-w). V_s είναι η ταχύτητα του πλοίου, και w wake fraction. Όταν εξισωθούν τα δύο κελιά, τότε εξάγουμε την απαιτούμενη ισχύ Pd και τις στροφές του κινητήρα.

Από φυσικής σημασίας, με δοκιμές του δείκτη j, εξισώνεται η απαιτούμενη ώση 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 θάλασσας, ενώ η ώση της προπέλας προκύπτει από τα πολυώνυμά της.

Οι στροφές υπολογίζονται (σε rps) από τον τύπο

$$n = \frac{u_a}{J \cdot D_p}$$

Η ισχύς υπολογίζεται από τον τύπο

$$P_d = \frac{2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot n^3 \cdot D_p^5 \cdot K_Q}{1000}$$

Με τη σειρά του το ΚQ υπολογίζεται από το πολυώνυμο του 10ΚQ της έλικας που εξήχθη γραφικά από τα στοιχεία του model test, αντικαθιστώντας το J που υπολογίστηκε και διαιρώντας το με 10.

Στα ποση report του πλοίου, ήταν διαθέσιμες οι στροφές του κινητήρα, χωρίς όμως να δίνεται η ισχύς, οπότε έπρεπε να ερμηνευτεί η απαιτούμενη ισχύς από τους υπολογισμούς, σε κατανάλωση.

Οπότε από τα shortest της μηχανής, δημιουργήθηκε διάγραμμα ειδικής κατανάλωσης (σε gr/kwh) συναρτήσε της ισχύος. Με χρήση της γραμμικής παρεμβολής, από την απαιτούμενη ισχύ των υπολογισμών, εξήχθη η απαιτούμενη ειδική κατανάλωση. Λόγω του ότι χρησιμοποιήθηκε διαφορετικό καύσιμο στις δοκιμές μηχανής και στο πραγματικό ταξίδι του πλοίου, έγινε αναγωγή της κατανάλωσης στο ίδιο καύσιμο. Το καύσιμο που χρησιμοποιήθηκε στα shortest έχει θερμογόνο δύναμη 10031kcal/kg (δεδομένα από το έντυπο shortest). Το καύσιμο που χρησιμοποιεί το πλοίο είναι ένα βιοντίζελ (rapeseed methyl ester –RME 380) όπου οι ιδιότητές του αναγράφονται στον παρακάτω πίνακα. (13)

Table 12.7. Fuel properties of bio-diesel (RME) compared to diesel and dimethyl ether (DME) (van Thuijl et al., 2003)

Fuel properties	Bio-diesel (RME)	Diesel	DME
Chemical formula	Methyl ester	C ₁₂ H ₂₆	CH ₃ OCH ₃
Molecular weight (kg/kmol)	296	170–200	46
Cetane number	54	50	55–60
Density (kg/l) at 15 °C	0.88	0.84	0.67
Lower calorific value (MJ/kg) at 15 °C	37.3	42.7	28.4
Lower calorific value (MJ/l) at 15 °C	32.8	35.7	18.8
Stoichiometric air/fuel ratio (kg air/kg fuel)	12.3	14.53	9
Oxygen content (wt%)	9.2–11.0	0–0.6	
Kinematic viscosity (mm ² /s) at 20 °C	7.4	4	4,443
Flash point (°C)	91–135	77	

Πίνακας 5 Ιδιότητες καυσίμου

Οπότε η αναγωγή έγινε πολλαπλασιάζοντας το λόγο θερμογόνων δυνάμεων βιοντίζελ/ντίζελ επί τη θερμογόνο των shortest.

$$\text{Assumed calorific value} = (32.8/35.7) * 10031 = 9216.2 \text{ Kcal/Kg.}$$

Γνωρίζοντας πλέον το διορθωμένο καύσιμο από τα report, υπολογίστηκε η ποσοστιαία διαφορά του σε σχέση με το καύσιμο των shortest, ώστε να προσαυξηθεί η απαιτούμενη ειδική κατανάλωση με το ποσοστό αυτό για τη διόρθωση, ώστε η σύγκριση καταναλώσεων να γίνεται με αναφορά την ίδια θερμογόνο καυσίμου.

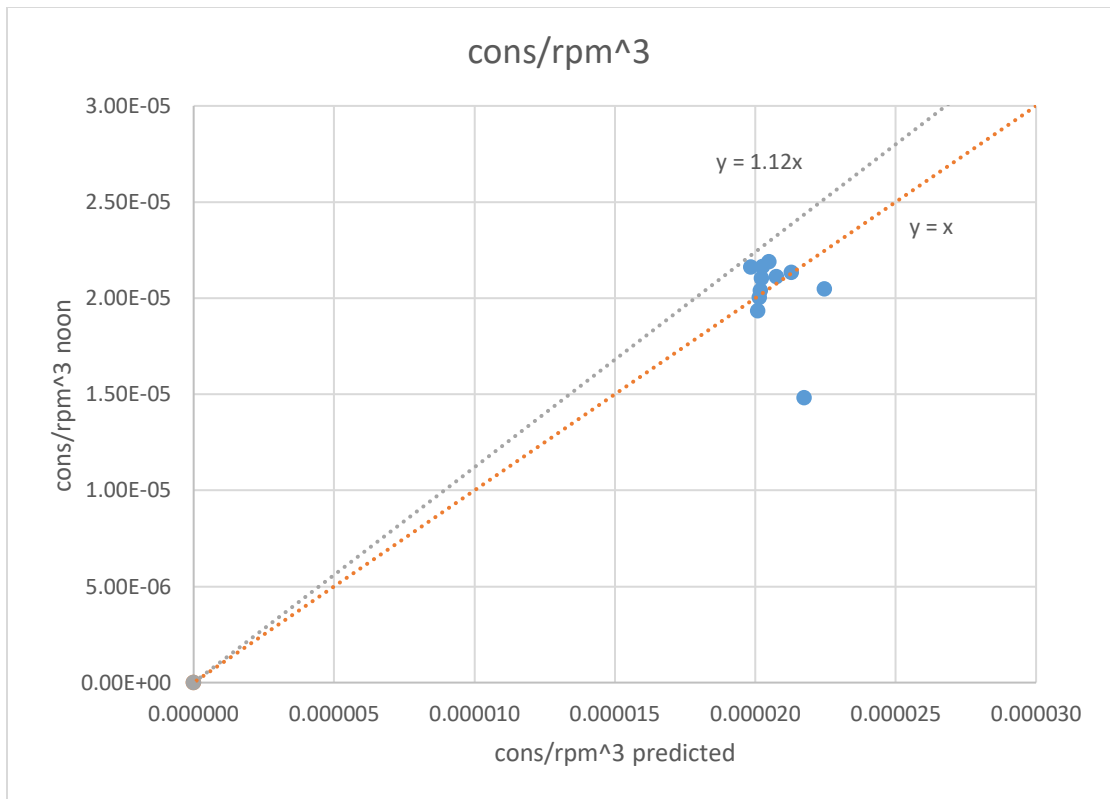
Με την ίδια λογική, έγινε η διαδικασία από τις στροφές που έδιναν τα report, μέσω γραμμικής παρεμβολής από τα διαγράμματα του κινητήρα υπολογίστηκε η ειδική κατανάλωση, έγινε η διόρθωση καυσίμου για να υπολογιστεί η πραγματική ειδική κατανάλωση. Ύστερα διαιρώντας την απόλυτη προς την ειδική κατανάλωση, υπολογίστηκε η ισχύς που αντιστοιχεί στα report, ώστε να συγκριθεί με την απαιτούμενη ισχύ από τις προβλέψεις

Η πραγματική πρόσθετη αντίσταση κυματισμού του πλοίου, εφόσον δεν δύναται να μετρηθεί στο πλοίο πάνω, υπολογίστηκε αφαιρώντας από την υπολογισμένη συνολική ισχύ των report τις υπολογισμένες αντιστάσεις ανέμου και ήρεμου νερού για την αντίστοιχη κατάσταση.

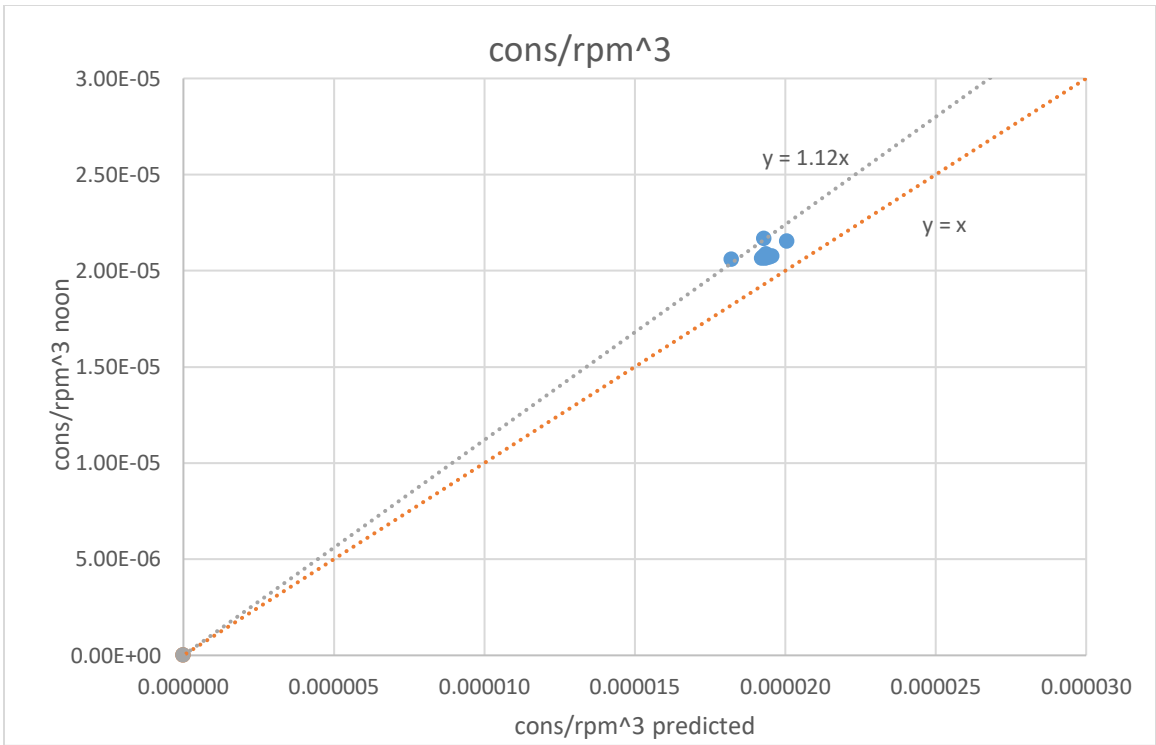
4 Αποτελέσματα

Στα επόμενα σχήματα παρουσιάζονται τα γραφήματα των αποτελεσμάτων από τα προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν, συγκριτικά με τις μετρήσεις από τα noon reports του πλοίου. Ειδικότερα παρουσιάζονται τα παρακάτω διαγράμματα:

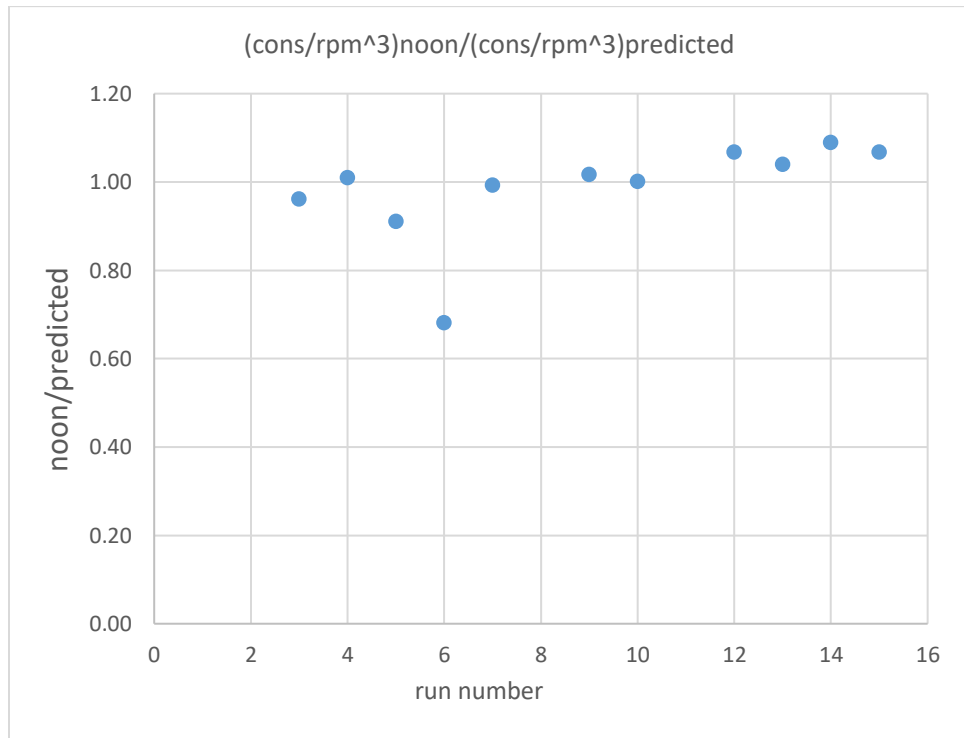
- Λόγος κατανάλωσης (απόλυτης σε t/day) προς τις στροφές κινητήρα στην 3^η δύναμη, τιμών report με αναφορά τιμές προβλεπόμενων από τα προγράμματα και για τις δύο καταστάσεις (ballast, full load)
- Λόγος κατανάλωσης (απόλυτης σε t/day) προς τις στροφές κινητήρα στην 3^η δύναμη τιμών των reports προς προβλεπόμενων από τα προγράμματα και για τις δύο καταστάσεις (ballast, full load)
- Λόγος πρόσθετης ισχύος αντίστασης κυματισμού προς σημαντικό ύψος κύματος στο τετράγωνο τιμών report με αναφορά υπολογισμένων από προγράμματα για την κατάσταση ballast εφόσον στην κατάσταση full load, στα reports δεν υπήρχε ένταση ανέμου αρκετά μεγάλη ώστε να προκύπτει κύμα
- Λόγος πρόσθετης ισχύος αντίστασης κυματισμού report προς την υπολογισμένη από τα προγράμματα με αύξοντα αριθμό report για την κατάσταση ballast
- Στροφές κινητήρα report με αναφορά τις υπολογισμένες και για τις δύο καταστάσεις
- Στροφές κινητήρα report προς υπολογισμένες, με αύξοντα αριθμό report για τις δύο καταστάσεις
- Συνολική ισχύς report με αναφορά την υπολογισμένη από τα προγράμματα για την κατάσταση full load
- Συνολική ισχύς report προς την υπολογισμένη από τα προγράμματα με αύξοντα αριθμό report



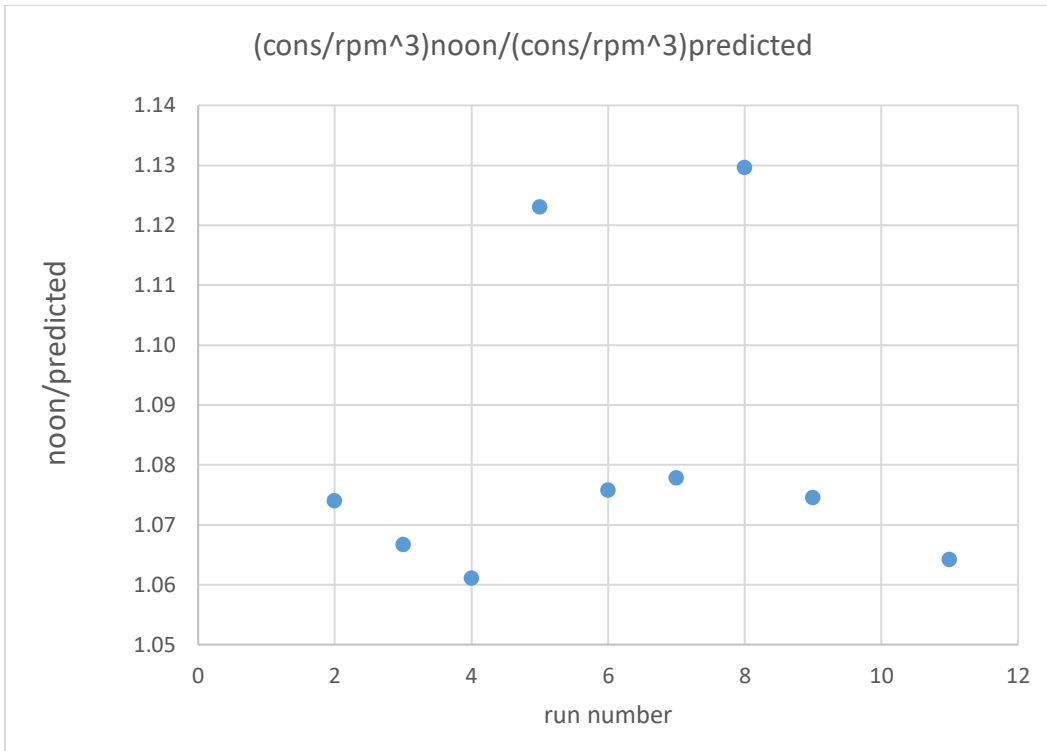
Διάγραμμα 8 consumption/rpm^3 ballast



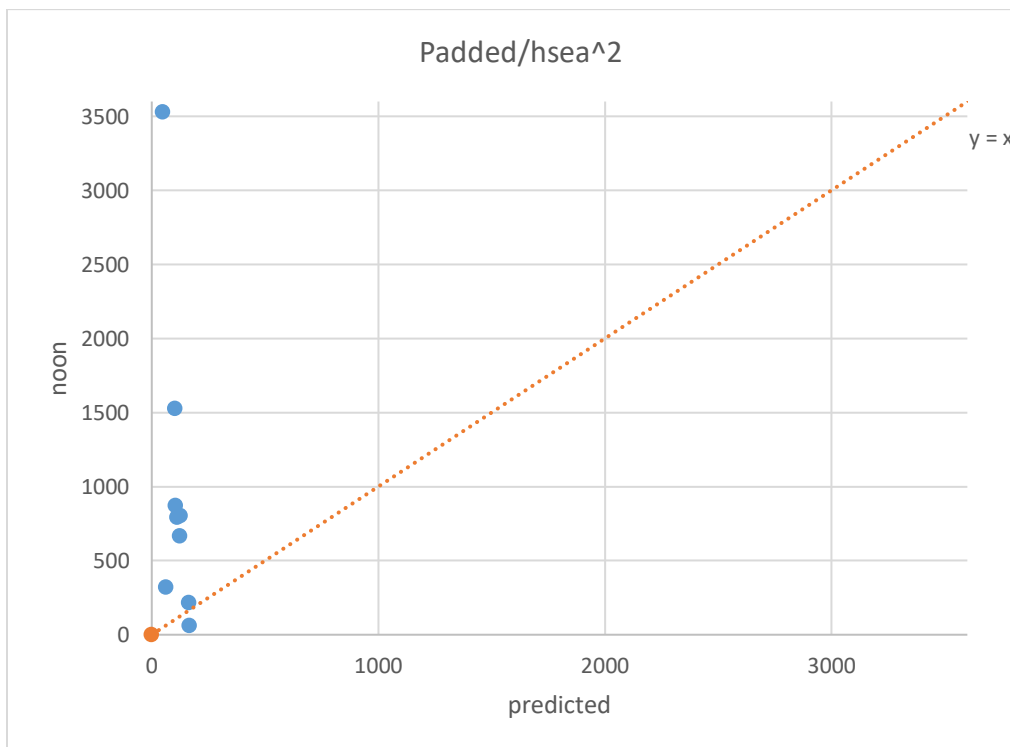
Διάγραμμα 9 consumption/rpm³ full load



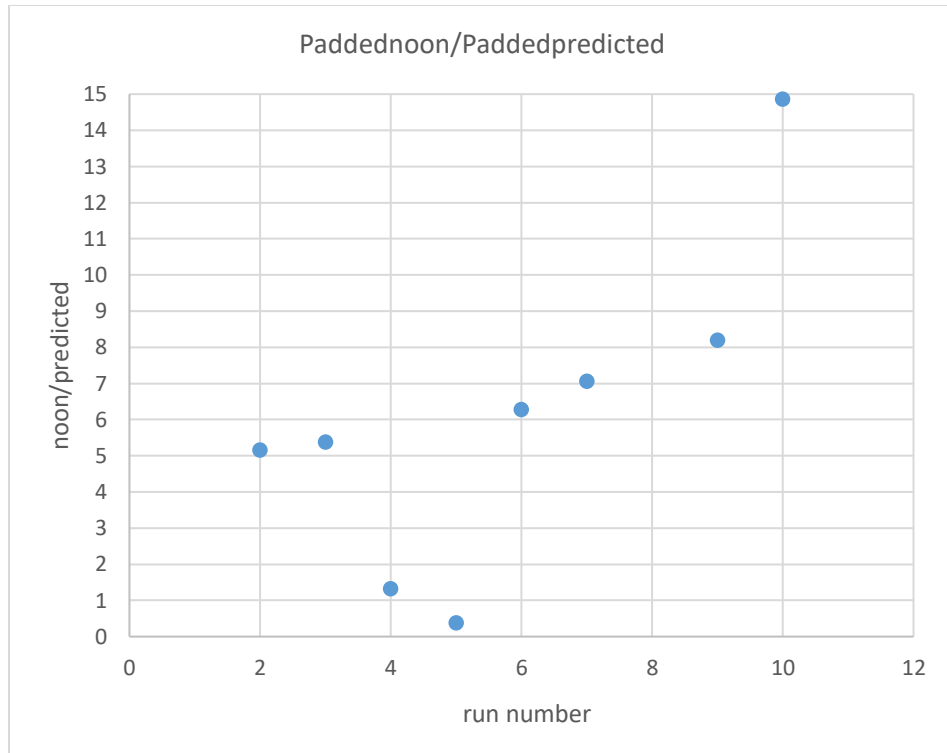
Διάγραμμα 10 consumption/rpm³ ballast



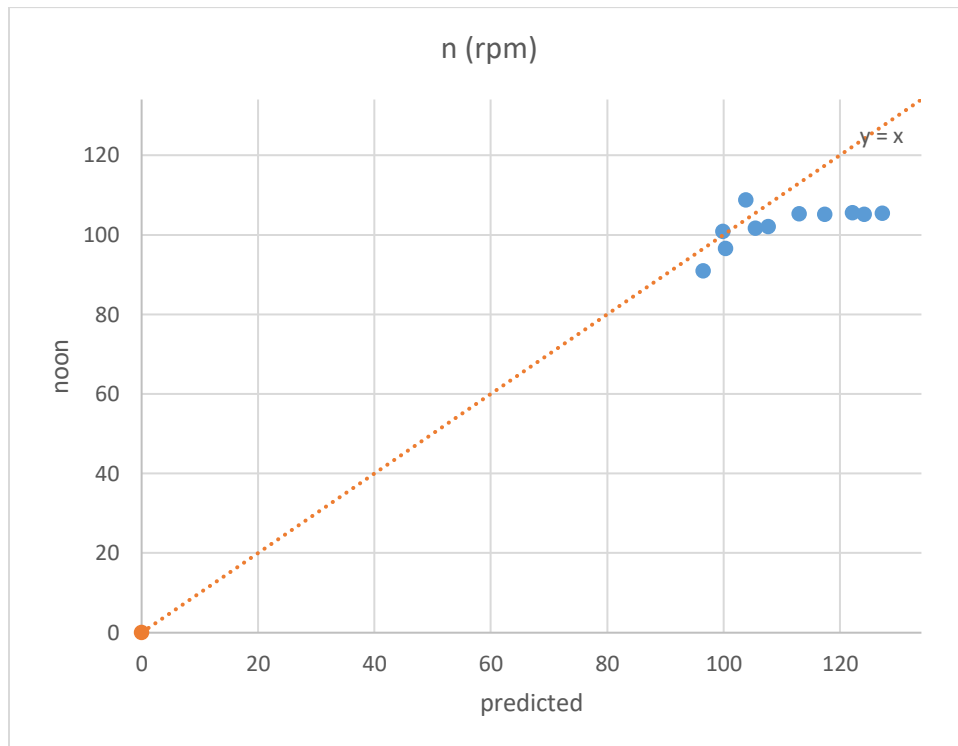
Διάγραμμα 11 consumption/rpm³ full load



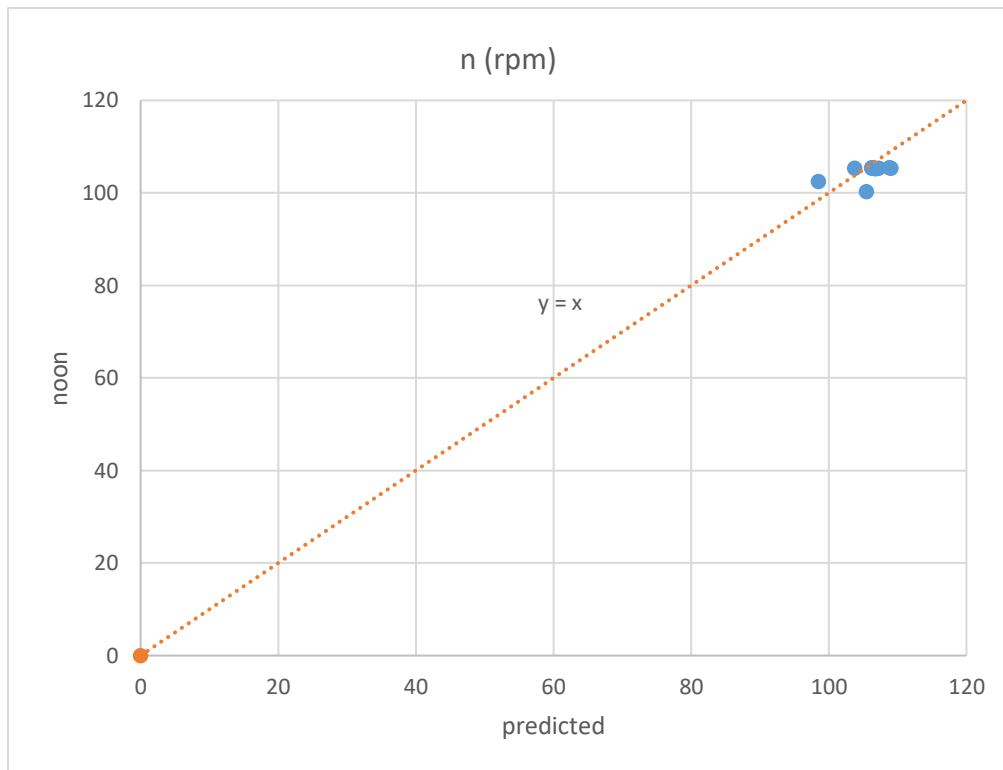
Διάγραμμα 12 Padded/hsea² ballast



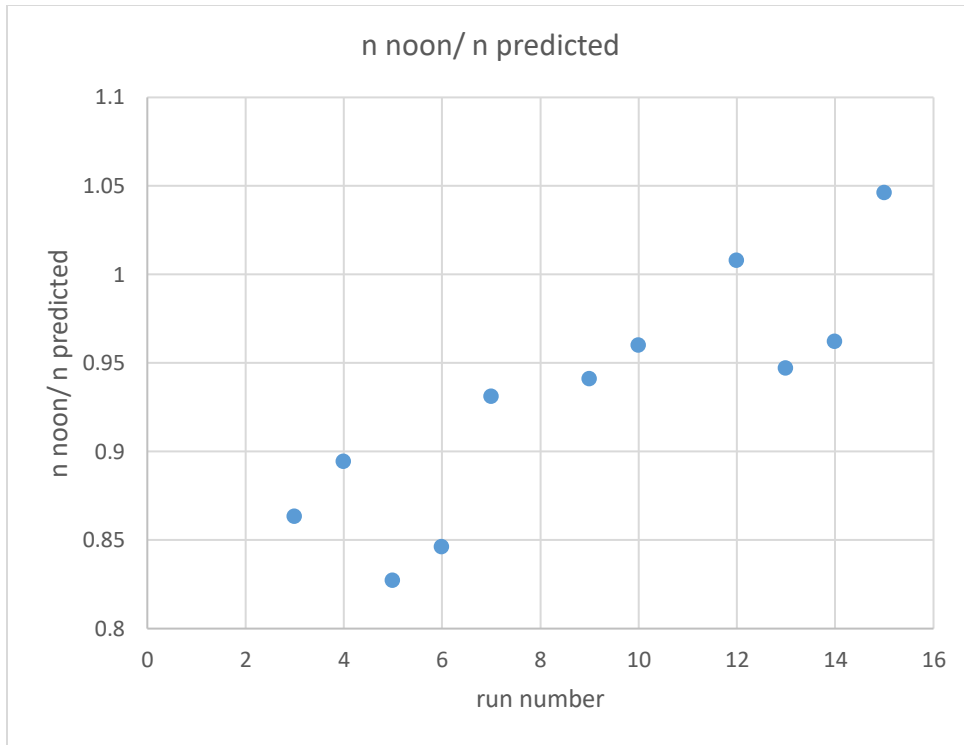
Διάγραμμα 13 Πρόσθετη ισχύς λόγω κυματισμού (ballast)



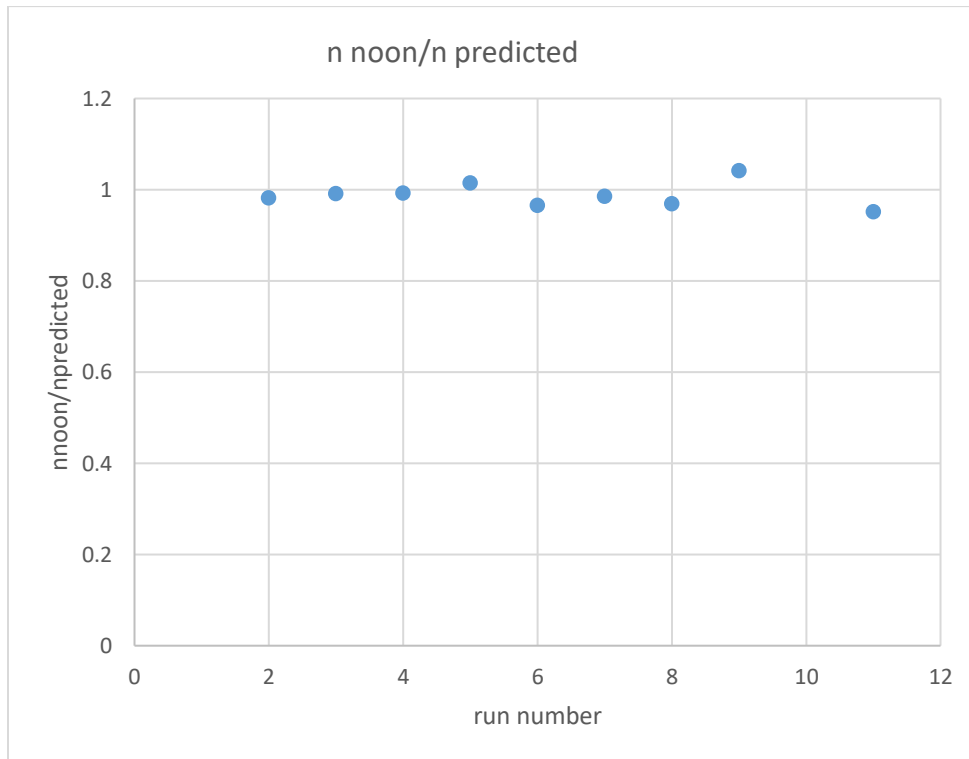
Διάγραμμα 14 n (rpm) ballast



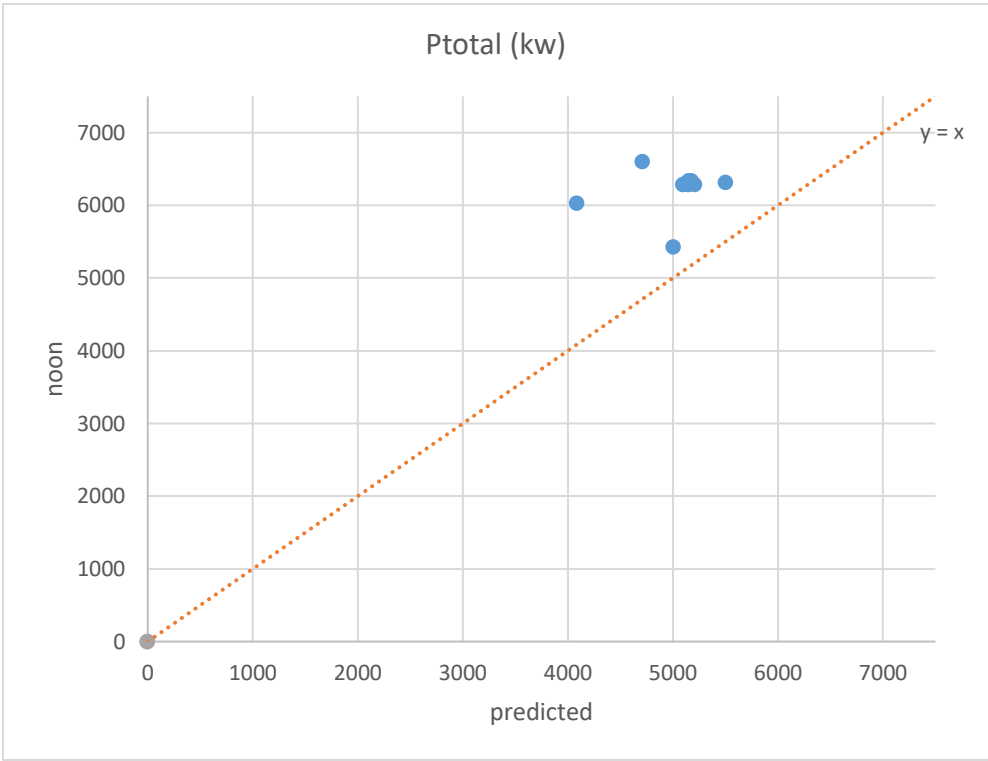
Διάγραμμα 15 n(rpm) full load



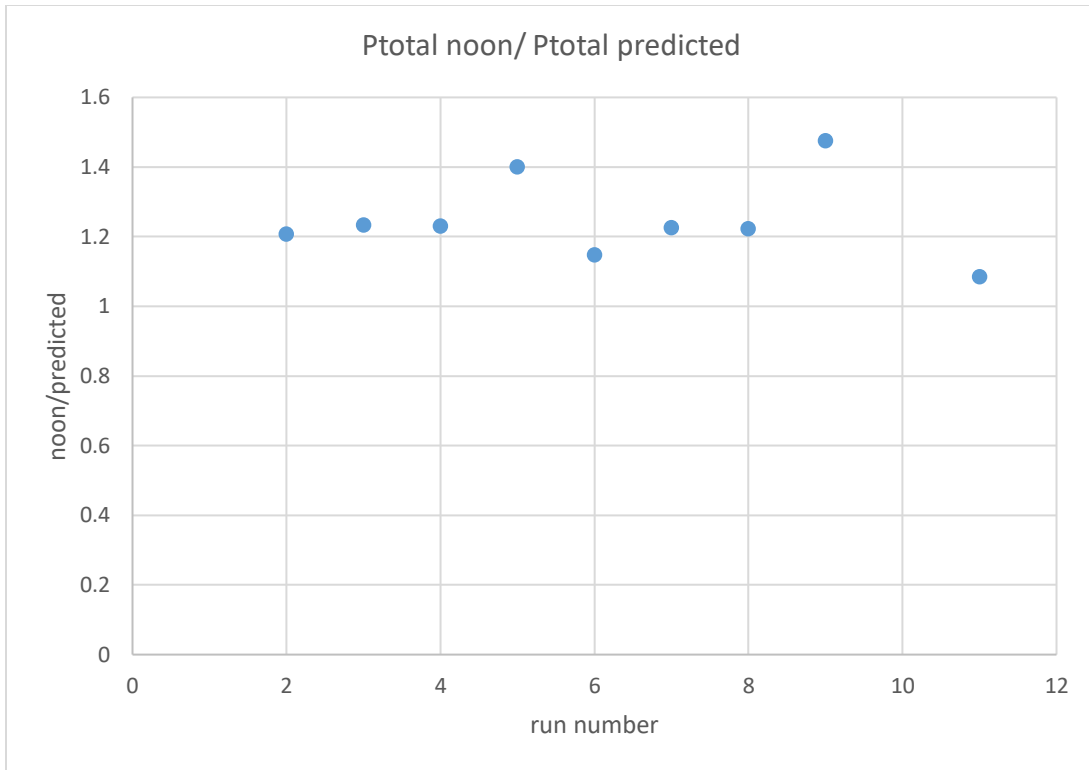
Διάγραμμα 16 $n(rpm)$ ballast



Διάγραμμα 17 $n(rpm)$ full load



Διάγραμμα 18 Ptotal full load



Διάγραμμα 19 Ptotal full load

Στα διαγράμματα 8 και 9 παρατηρείται ότι τα σημεία βρίσκονται ανάμεσα στις καμπύλες $Y=X$ και $Y=1.12X$, δηλαδή μέσα στα όρια ώστε να θεωρούνται καλές οι μετρηθείσες τιμές από τα noon reports σε σχέση με τις προβλεπόμενες. Το όριο $Y=1.12X$ πρακτικά είναι ένα όριο 12% πάνω που δίνουν οι ναυτιλιακές εταιρίες για να δικαιολογούν ανοχές. Συγκεκριμένα οι επί μέρους ανεκτές προσαυξήσεις είναι 5% για συνθήκες μη-ιδανικές όπως αυτές των δοκιμών, 2% για περιορισμένη ευθυγράμμιση άξονα και 5% για μηχανή που λειτουργεί σε πραγματικές συνθήκες και όχι σε ιδανικές συνθήκες δοκιμών στο εργοστάσιο κατασκευής της.

Στα επόμενα δύο διαγράμματα (10, 11) τα οποία είναι οι λόγοι των μεγεθών των προηγούμενων δύο διαγραμμάτων οι τιμές αυτές κυμαίνονται περί τη μονάδα, που ερμηνεύεται αντίστοιχα με πριν.

Στο διάγραμμα 12 παρατηρείται ότι οι τιμές βρίσκονται αρκετά πάνω από την γραμμή $Y=X$, πράγμα που σημαίνει ότι οι τιμές του διαγράμματος από το report, απέχουν πολύ από τις υπολογισμένες. Το ίδιο επιβεβαιώνεται και στο διάγραμμα 13 όπου παρουσιάζεται ο αντίστοιχος λόγος των μεγεθών, και όπως φαίνεται κυμαίνεται από 0.4 περίπου έως 15. Αυτό συμβαίνει διότι ο δείκτης αυτός ($Padded/hsea^2$), (όπου Padded η πρόσθετη ισχύς λόγω κυματισμού, και hsea το σημαντικό ύψος κύματος θάλασσας λόγω ανέμου) είναι πολύ ευαίσθητος δείκτης ως προς την τιμή του σημαντικού ύψους κύματος. Αυτό σημαίνει ότι μια λάθος εκτίμηση του hsea, μπορεί να επιφέρει σημαντικές

αλλαγές στον δείκτη. Στην παρούσα διπλωματική, το σημαντικό ύψος κύματος θεωρήθηκε με βάση το διάγραμμα πλήρως ανεπτυγμένης θάλασσας από την ένταση ανέμου, οπότε δεν μπορεί να θεωρηθεί ακριβής αυτή η εκτίμηση, καθώς δεν γνωρίζουμε τις ακριβείς συνθήκες την ώρα καταγραφής του report.

Στα διαγράμματα 14 και 15 παρατηρείται ότι τα σημεία βρίσκονται κοντά στην ευθεία $Y=X$ που σημαίνει ότι οι στροφές κινητήρα από τα report είναι πολύ κοντά στις υπολογισμένες στροφές. Αυτό επιβεβαιώνεται και στα διαγράμματα 16 και 17 που παρουσιάζονται οι λόγοι τους, και φαίνεται να βρίσκονται γύρω από τη μονάδα.

Στο διάγραμμα 18 παρατηρείται ότι η συνολική ισχύς στην κατάσταση full load βρίσκεται πάνω από τη γραμμή $Y=X$. Δηλαδή οι τιμές από τα report είναι λίγο ανεβασμένες σε σχέση με τις προβλεπόμενες. Αυτό επιβεβαιώνεται στο διάγραμμα 19 όπου ο λόγος τους κυμαίνεται γύρω στο 1.2. Αυτό οφείλεται πιθανόν στο γεγονός ότι από την ένταση ανέμου δεν προκύπτει κύμα, οπότε δεν υπάρχει αντίσταση κυματισμού στους υπολογισμούς. Ίσως στην πραγματικότητα η κατάσταση θάλασσας τις στιγμές των ποση reports να ήταν διαφορετική, οπότε να υπήρχε περισσότερη αντίσταση, άρα και μεγαλύτερη συνολική ισχύς σε σχέση με την υπολογισμένη. Εξ άλλου στα ποση reports αναφέρονται τιμές 24ώρου και όχι στιγμιαίες.

5 Συμπεράσματα

Από την παρουσίαση των διαγραμμάτων της παρούσας διπλωματικής, προκύπτουν ενδιαφέροντα συμπεράσματα για την ίδια τη μελέτη, καθώς και για μελλοντικές μελέτες αντίστοιχου είδους.

Εξετάζοντας τα διαγράμματα που αφορούν την κατανάλωση, παρατηρείται ότι οι τιμές των δεικτών αυτών είναι αρκετά ικανοποιητικές, και βρίσκονται ως επί το πλείστον μέσα στα επιτρεπτά όρια. Στην κατάσταση full load (διάγραμμα 11) ο λόγος είναι περίπου στο 1.07 (7% πάνω από την άριστη τιμή), πράγμα που δικαιολογείται στο γεγονός ότι από την ένταση ανέμου των report δεν προκύπτει κύμα, οπότε δεν υπολογίζεται η αντίστοιχη αντίσταση, έτσι η προβλεπόμενη κατανάλωση βγαίνει ελαφρώς μικρότερη από την πραγματική. Το πλοίο την ώρα του report σίγουρα θα αντιμετώπιζε κάποιον κυματισμό που δεν θα επέφερε μηδενική αντίσταση.

Τα διαγράμματα πρόσθετης αντίστασης στην κατάσταση ballast όπως προαναφέραμε δεν είναι ικανοποιητικά λόγω ευαισθησίας του δείκτη στην ακρίβεια του σημαντικού ύψους κύματος το οποίο είναι απλώς μια εκτίμηση.

Στα διαγράμματα με τις στροφές κινητήρα (14 έως 17) η συμφωνία πρόβλεψης και noon report είναι αρκετά ικανοποιητική.

Τέλος τα διαγράμματα της συνολικής αντίστασης της κατάστασης full load, έχουν μια απόκλιση γύρω στο 20% (μεγαλύτερες τιμές των report) διότι δεν έχει προβλεφθεί καθόλου κύμα, που πιθανόν να υπήρχε τις ημέρες των report, με αποτέλεσμα περισσότερη αντίσταση και ισχύ.

Ύστερα από όλη αυτή την μελέτη καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα:

- Η μέθοδος που ακολουθήθηκε στην παρούσα διπλωματική, σε όλα τα επιμέρους στάδια της είναι αρκετά ικανοποιητική, και αποτελεί μια καλή μέθοδο αρχικής εκτίμησης της κατάστασης.
- Η μέθοδος βασίζεται σε σταθερή βάση που αποτελούν τα πειράματα με πρότυπο του πλοίου σε πειραματική δεξαμενή και δοκιμές παραλαβής του πλοίου, ενώ συμπληρώνεται από υπολογισμούς για το συγκεκριμένο πλοίο και καταστάσεις φόρτωσης.
- Είναι πολύ σημαντική η ακρίβεια των μετρήσεων των report, καθώς αποτελούν τα στοιχεία εισόδου των προγραμμάτων και των υπολογισμών, ώστε να εξαχθούν τα τελικά αποτελέσματα και συμπεράσματα. Μικρές ανακρίβειες αυτών, επιφέρουν σημαντικές αποκλίσεις από την πραγματικότητα, σε μια ευαίσθητη στα δεδομένα μέθοδο.
- Υπάρχει γενικά ανακρίβεια στην αναφορά των καταστάσεων θάλασσας που επιβαρύνει τα αποτελέσματα σε κυματισμούς.
- Αν διατίθενται επαρκή αποτελέσματα σε ήρεμο νερό για μεγάλο χρονικό διάστημα όπου δεν υπάρχει πρόσθετη αντίσταση, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση ή αύξηση της κατανάλωσης λόγω ρύπανσης της γάστρας ή της έλικας.

Σε μια μελλοντική μελέτη αντίστοιχου είδους, θα ήταν σημαντικό να τονισθεί η ακρίβεια των μετρήσεων καθώς και το πλήθος των περιπτώσεων (αριθμός των reports) ώστε πιθανά λάθη μετρήσεων να έχουν μικρότερη βαρύτητα στα αποτελέσματα. Επίσης είναι σημαντικό να παρέχονται πιο πολλές παράμετροι της κατάστασης του πλοίου που εδώ κάποιες παραλείφθηκαν λόγω μη επαρκών δεδομένων. Τέτοιες παράμετροι είναι η ταχύτητα πλοίου, το ύψος κύματος και η κατεύθυνση για τους ανεμογενείς κυματισμούς αλλά και για την αποθαλασσιά (swell), ένταση και κατεύθυνση ανέμου, ο χρόνος από τον τελευταίο καθαρισμό της γάστρας και της έλικας, καθώς και οι μέθοδοι μέτρησης των μεγεθών. Συνιστάται η αυτόματη καταγραφή των στοιχείων με αισθητήρες χωρίς την παρεμβολή του πληρώματος του πλοίου.

Βιβλιογραφία

- 1) "Energy Efficiency Measures", International Maritime Organization (IMO)
- 2) "Prevention of Air Pollution from Ships", International Maritime Organization (IMO)
- 3) "Marine Environment Protection Committee (MEPC)", International Maritime Organization (IMO)
- 4) "Introduction to IMO", International Maritime Organization (IMO)
- 5) MARPOL ANEX VI
- 6) "2016 GUIDELINES FOR THE DEVELOPMENT OF A SHIP ENERGY EFFICIENCY MANAGEMENT PLAN (SEEMP)", RESOLUTION MEPC.282(70)
- 7) Werner Blendermann, Dec 1996, "Wind Loading of Ships – Collected Data from Wind Tunnel Tests in Uniform Flow
- 8) Γεράσιμος Κ. Πολίτης, 2016, "Αντίσταση και Πρόωση Πλοίου"
- 9) Marine Insight, "What is Ship Energy Efficiency Management Plan"
- 10) Γ.Ι. Γρηγορόπουλος, Γ.Α. Αθανασούλης, Οκτ 1998, "ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΠΛΟΙΩΝ ΣΕ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥΣ"
- 11) Α. Παπανικολάου, Ιούλιος 2009, "Μελέτη και Εξοπλισμός Πλοίου
- 12) K. Van Dokkum, 2003, "Ship Knowledge. A modern encyclopedia"

- 13) Mohamed A. et al, 2010, " Clean Fuels"
- 14) J.S. Carlton FREng, 2019, " Marine Propellers and Propulsion (Fourth Edition)"
- 15) Wärtsilä Encyclopedia of Marine Technology
- 16) Γεράσιμος Πολίτης, Γεώργιος Τζαμπίρας, Ιούνιος 2016, " Πρόωση Πλοίου"