

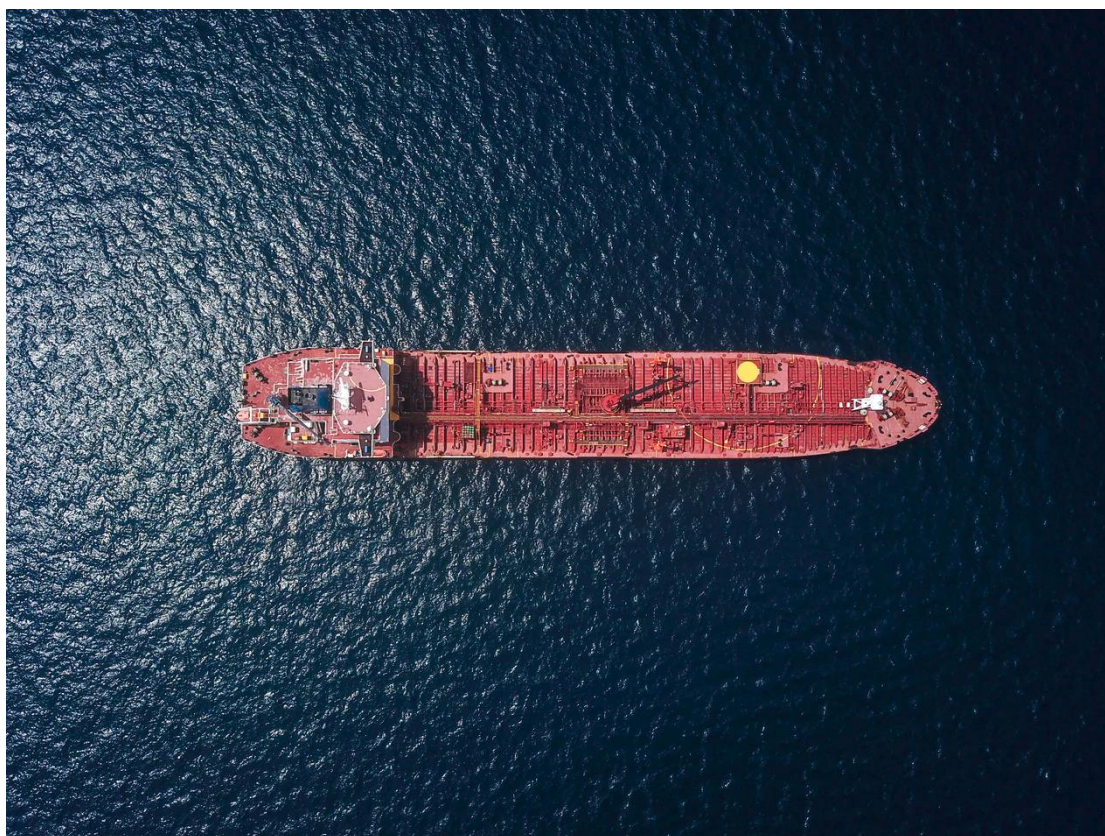


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΝΑΥΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

**ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΜΗΧΑΝΗΣ-ΕΛΙΚΑΣ-ΓΑΣΤΡΑΣ ΚΑΤΑ
ΤΗΝ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΒΡΑΔΥΝΣΗ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΛΕΟΝΤΙΟΥ ΔΗΜΟΣΘΕΝΗΣ



Επιβλέπων καθηγητής: **Ν. Π. Κυρτάτος**

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε με σκοπό την κατανόηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ μηχανής, έλικας και γάστρας και την σύγκριση του απαιτούμενου χρόνου για επιβράδυνση και επιτάχυνση ενός πλοίου σε διαφορετικές καταστάσεις θάλασσας, βαθμού ρύπανσης της γάστρας και βαθμού απόδοσης της έλικας.

Για την ανωτέρω μελέτη ήταν απαραίτητη η δημιουργία τριών μοντέλων, ένα για την γάστρα του πλοίου, ένα για την έλικα και ένα για την μηχανή. Η μοντελοποίηση της μηχανής έγινε στο πρόγραμμα MOtorTHERmodynamics εισάγοντας στοιχεία αναφορικά με την γεωμετρία και την λειτουργία της μηχανής και του υπερπληρωτή. Για την αντίσταση του πλοίου επιλέχθηκε η μέθοδος Holtrop-Mennen, η οποία με την χρήση βασικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών του πλοίου υπολογίζει την αντίσταση σε ήρεμο νερό συναρτήσει της ταχύτητας. Τέλος, για την έλικα χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο τεσσάρων τεταρτημορίων της σειράς Wagenigen B-Series.

Επίσης, για την ποσοτικοποίηση της πρόσθετης αντίστασης που δημιουργείται λόγω της κίνησης του πλοίου σε κυματισμούς έγινε χρήση μιας μεθόδου που αναπτύχθηκε από τους Απόστολο Παπανικολάου, Shukui Liu και Victor Bolbot.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την χρήση των ανωτέρω μοντέλων χωρίζονται σε δύο ενότητες. Τα πρώτα αφορούν την επιτάχυνση του πλοίου και εξήχθησαν από το πρόγραμμα προσομοίωσης MOtorTHERmodynamics, ενώ τα δεύτερα αφορούν την επιβράδυνση και για τον υπολογισμό τους αναπτύχθηκε νέο πρόγραμμα σε FORTRAN, στο οποίο η μηχανή λήφθηκε υπόψιν ως ένας καταναλωτής ενέργειας λόγω τριβών.

Τέλος, το υπό μελέτη πλοίο, για το οποίο αναπτύχθηκαν όλα τα μοντέλα και το οποίο αφορούν τα τελικά συμπεράσματα, είναι ένα bulk carrier των 76.015 τόνων DWT, εφοδιασμένο με μια μηχανή 6S60MC της MAN.

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Κυρτάτο που μου έδωσε την ευκαιρία να εκπονήσω τη διπλωματική μου εργασία στο Εργαστήριο Ναυτικής Μηχανολογίας και με βοήθησε με τις υποδείξεις και τις συμβουλές του για την επίτευξη της παρούσας εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω και όλους του καθηγητές, συμφοιτητές και ανθρώπους της ναυτιλίας για τις συμβουλές και την βοήθεια τους σε διάφορα σημεία της εργασίας που χρειάστηκε και ιδιαίτερα τη Δήμητρα Καραμολέγκου, με την οποία εκπονήσαμε μαζί τις διπλωματικές μας εργασίες και αλληλοβοηθηθήκαμε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησής τους.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ θα ήθελα να δώσω στο οικογενειακό και φιλικό μου περιβάλλον χωρίς την στήριξη του οποίου δεν θα τα κατάφερνα.

Λεοντίου Δημοσθένης

Περιεχόμενα

Περίληψη	2
Ευχαριστίες.....	3
Περιεχόμενα.....	4
1. Εισαγωγή.....	5
1.1. Περιγραφή προβλήματος	5
1.2. Υπό μελέτη πλοίο	6
2. Παράγοντες που επιδρούν στην επιτάχυνση και επιβράδυνση του πλοίου.....	7
2.1. Κατάσταση φόρτωσης.....	7
2.2. Κατάσταση θάλασσας	8
2.3. Ρύπανση γάστρας και έλικας	8
3. Μοντέλο πλοίου.....	10
3.1. Αντίσταση σε ήρεμο νερό	10
3.1.1. Αντίσταση συνεκτικότητας.....	10
3.1.2. Αντίσταση κυματισμού	11
3.1.3. Μέθοδος υπολογισμού αντίστασης σε ήρεμο νερό HOLTROP.....	12
3.2. Πρόσθετη αντίσταση λόγω κυματισμών θαλάσσης	12
4. Μοντέλο έλικας	16
4.1. Μοντέλο τεσσάρων τεταρτημόριων (Four-Quadrant propeller modeling).....	16
4.2. Ροπή αδράνειας έλικας	18
4.3. Συντελεστής μείωσης ώσης t	19
4.4. Ταχύτητα ομόρρου (wake)	19
5. Μοντελοποίηση κινητήρα	22
5.1. MOtor THERmodynamics	22
5.2. Ελεγκτής στροφών (Speed Governor)	23
5.3. Συνεργασία όλων των επιμέρους μοντέλων	24
5.3.1. Επιτάχυνση	24
5.3.2. Επιβράδυνση	25
6. Αποτελέσματα	29
6.1. Αποτελέσματα επιτάχυνσης	29
6.2. Αποτελέσματα επιβράδυνσης	35
6.3. Συμπεράσματα	41
6.4. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	42
7. Βιβλιογραφία	43
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ (ΚΩΔΙΚΕΣ)	44

1. Εισαγωγή

1.1. Περιγραφή προβλήματος

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται την επιτάχυνση και επιβράδυνση ενός πλοίου σε διάφορες καταστάσεις θάλασσας, βαθμούς ρύπανσης της γάστρας και βαθμούς απόδοσης της έλικας. Πιο συγκεκριμένα μελετάται η αλληλεπίδραση μηχανής, έλικας και γάστρας κατά τη διάρκεια του φαινομένου και γίνεται σύγκριση των χρόνων που χρειάζεται κάθε φορά για να πραγματοποιηθούν οι μεταβολές στην ταχύτητα του πλοίου, καθώς και το τελικό σημείο ισορροπίας στροφών και ταχύτητας ανάλογα με τις συνθήκες που ορίζονται.

Ένα πλοίο για να κινηθεί και να επιταχύνει χρειάζονται να υπερνικήσει τις αντιστάσεις που ασκούνται σε αυτό από το περιβάλλον ρευστό. Την απαιτούμενη αυτή ενέργεια την βρίσκει από την κύρια μηχανή του, η οποία στα μεγάλα εμπορικά πλοία είναι συνήθως ένας αργόστροφος κινητήρας diesel. Στον κινητήρα η παλινδρομική κίνηση των εμβόλων που γίνεται λόγω της καύσης του πετρελαίου ή άλλου καυσίμου, μετατρέπεται σε περιστροφική κίνηση του στροφαλοφόρου άξονα, ο οποίος συνδέεται εν τέλη με τον άξονα που στρέφει την έλικα. Η έλικα με την σειρά της καταναλώνοντας την ροπή που προσφέρει η μηχανή λόγω της περιστροφής της παράγει ώση η οποία ωθεί το πλοίο. Η παραγόμενη ώση που δύναται να προσφέρει η έλικα εξαρτάται από τη γεωμετρία της και την ροπή που μπορεί να προσφέρει η μηχανή.

Με την πάροδο του χρόνου η γάστρα του πλοίου ρυπαίνεται, δηλαδή μικροοργανισμοί συσσωρεύονται στην επιφάνεια των υφάλων με αποτέλεσμα να οδηγούν σε αύξηση της αντίστασης του πλοίου, το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα την απαίτηση μεγαλύτερης ισχύος για την επίτευξη της απαιτούμενης ταχύτητας. Το ίδιο συμβαίνει και σε έναν βαθμό στην έλικα, όπου η τραχύτητα της επιφάνειάς της αυξάνεται με τον χρόνο, με αποτέλεσμα τη μείωση του βαθμού απόδοσής της.

Επίσης, ένας ακόμα ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας στην κίνηση του πλοίου είναι η κατάσταση θάλασσας που επικρατεί. Όσο πιο δυσμενή είναι τα καιρικά φαινόμενα, όπως άνεμος, κύματα και ρεύματα, τόσο δυσκολότερο είναι να κινηθεί το πλοίο. Αυτός είναι και ο λόγος της ύπαρξης του περιθωρίου ισχύος. Δηλαδή, η ισχύς της μηχανής που τοποθετείται σε ένα πλοίο είναι μεγαλύτερη από ότι χρειάζεται για την κίνησή του σε κανονικές συνθήκες, ώστε να μπορέσει να ανταπεξέλθει στις πρόσθετες απαιτήσεις λόγω θαλασσοταραχής.

Κατά την επιβράδυνση του πλοίου, ωστόσο, τα πράγματα αλλάζουν λίγο. Στη μηχανή σταματάει να εγχύεται καύσιμο και επομένως δεν παράγεται ισχύς, αντιθέτως λειτουργεί σαν καταναλωτής ισχύος λόγω των απωλειών σε τριβές και θερμότητα κατά την συμπίεση. Η έλικα τείνει να συνεχίσει να περιστρέφεται και να παράγει ώση, αλλά χωρίς ροπή από την μηχανή δεν μπορεί να κρατήσει τις στροφές και αρχίζει να επιβραδύνει απότομα. Το πλοίο επιβραδύνει και αυτό λόγω της αδυναμίας της έλικας να προσφέρει πλέον επαρκή ώση, αλλά λόγω της μεγάλης αδράνειάς του η επιβράδυνση του είναι πολύ πιο αργή από αυτήν την έλικας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα μετά από μερικά δευτερόλεπτα ή λεπτά οι στροφές της έλικας σε σχέση με την ταχύτητα του πλοίου να είναι τέτοιες που η έλικα λειτουργεί πλέον σαν υδρόμυλος. Δηλαδή, η έλικα καθώς κινείται στον ομόρρου του πλοίου απάγει ενέργεια από αυτό και αρχίζει να ισορροπεί περίπου στις μισές από τις ονομαστικές στροφές λειτουργίας. Φυσικά, καθώς η ταχύτητα του πλοίου μειώνεται, μειώνεται και η ενέργεια που μπορεί να απορροφήσει και η έλικα με αποτέλεσμα σταδιακά να πέφτουν και οι στροφές της.

Στα επόμενα κεφάλαια της εργασίας θα γίνει εκτενέστερη ανάλυση των φαινομένων που αναφέρθηκαν παραπάνω και θα γίνει ποσοτικοποίησή τους για ένα υπό μελέτη πλοίο.

1.2. Υπό μελέτη πλοίο

Τα αποτελέσματα της εργασίας και η εφαρμογή όλων των μεθοδολογιών που θα γίνουν στην συνέχεια αφορούν ένα Bulk carrier με παρακάτω χαρακτηριστικά:

Πίνακας 1.1: Βασικές διαστάσεις πλοίου

PRINCIPAL PARTICULARS		
Length Overall (m)	L_{OA}	225
Length Between Perpendiculars(m)	L_{BP}	217
Breadth (m)	B	32.26
Depth (m)	D	19.3
Design Draft (m)	T_{Desing}	12.2
Scantling Draft (m)	T_{Scantling}	14.035
Deadweight (tn)	DWT	76015
Service speed (kn)	V_s	14.5

Το υπό μελέτη πλοίο είναι εφοδιασμένο με την μηχανή 6S60MC της MAN B&W με τα παρακάτω χαρακτηριστικά.

Πίνακας 1.2: Χαρακτηριστικά κύριας μηχανής

ENGINE PRINCIPAL PARTICULARS	
Number of Cylinders	6
Cylinder Bore	600 mm
Cylinder Stroke	2292 mm
MCO x RPM_{MCO}	8550kW (11620 PS) x 80 RPM
CSO x RPM_{CSO}	7695kW (10460 PS) x 77.2 RPM
FIRING ORDER	1-5-3-4-2-6
MEAN PISTON SPEED AT MCR	6.11 m/sec

2. Παράγοντες που επιδρούν στην επιτάχυνση και επιβράδυνση του πλοίου

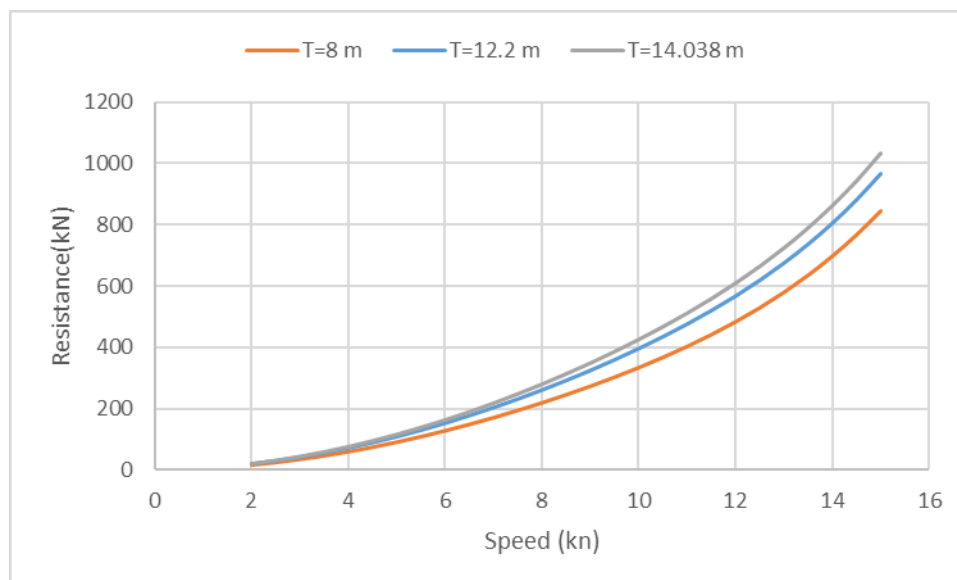
Όπως είναι φυσικό και αναμενόμενο τη μεγαλύτερη επίδραση στην επιτάχυνση και επιβράδυνση του πλοίου όσο αφορά το σχεδιαστικό κομμάτι την έχουν η μορφή της γάστρας, η έλικα και η μηχανή του πλοίου. Μια μεγάλη μηχανή όπως είναι φυσικό διευκολύνει την επιτάχυνση και μειώνει τον απαιτούμενο χρόνο, ωστόσο η επιλογή της κύριας μηχανής γίνεται πάντα και με άλλα κριτήρια όπως η κατανάλωση καυσίμου και το κόστος της. Επίσης, μια λεπτόγραμμη γάστρα οδηγεί σε μικρότερη αντίσταση και επομένως μεγαλύτερη ταχύτητα, μείωση του χρόνου επιτάχυνσης και αύξηση αυτού της επιβράδυνσης. Τέλος, η επίδραση της έλικας είναι αρκετά περίπλοκη, αφού οι πολλές παράμετροι της γεωμετρίας της (διάμετρος, λόγος εκτεταμένης επιφάνειας, κατανομή βήματος, αριθμός και πάχος πτερυγίων) επιδρούν ποικίλα στο τελικό αποτέλεσμα.

Ωστόσο, εκτός από τους ανωτέρω παράγοντες που αφορούν το σχεδιαστικό τμήμα, υπάρχουν και κάποιοι άλλοι δευτερεύοντες, που έχουν να κάνουν με την κατάσταση λειτουργίας του πλοίου. Οι παράγοντες αυτοί είναι οι παρακάτω:

- Κατάσταση φόρτωσης του πλοίου – Βύθισμα
- Κατάσταση θάλασσας
- Ρύπανση γάστρας και έλικας

2.1. Κατάσταση φόρτωσης

Κατά τη διάρκεια λειτουργίας του, το πλοίο εκτελεί ταξίδια με διαφορετικές καταστάσεις φόρτωσης. Η πιο χαρακτηριστική διαφορά είναι όταν ταξιδεύει πλήρως φορτωμένο ή σε κατάσταση ερματισμού. Όπως μπορεί κάποιος διαισθητικά να αντιληφθεί σε αυτές τις δύο καταστάσεις η αντίσταση του πλοίου δεν είναι ίδια. Στην πρώτη περίπτωση το βύθισμα είναι πολύ μεγαλύτερο με αποτέλεσμα και η αντίσταση του πλοίου να είναι μεγαλύτερη, επομένως οποιαδήποτε αύξηση της ταχύτητας να είναι πολύ πιο αργή και να απαιτεί μεγαλύτερη ισχύ.

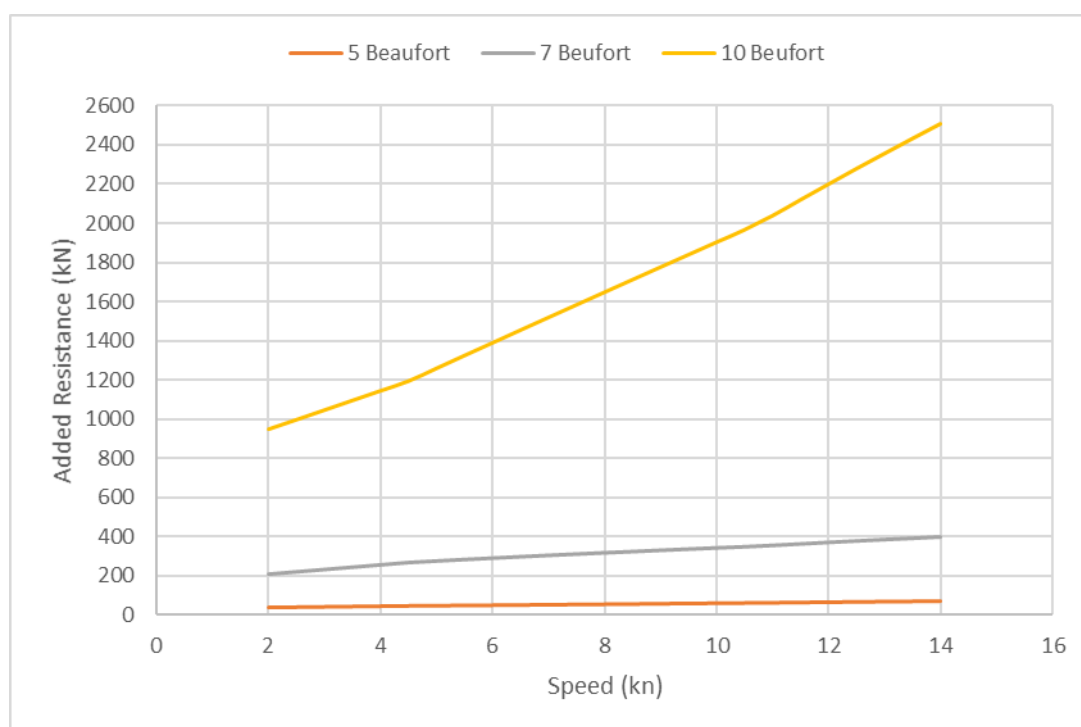


Εικόνα 2.1: Διάγραμμα αντίστασης ρυμούλκησης-ταχύτητας για διάφορα βυθίσματα

2.2. Κατάσταση θάλασσας

Η κατάσταση θάλασσας παίζει καταλυτικό ρόλο τόσο στην τελική ταχύτητα του πλοίου όσο και στον τρόπο επιτάχυνσης και επιβράδυνσης του. Κατά την λειτουργία του, ένα πλοίο, σπάνια θα συναντήσει ήρεμη θάλασσα. Συνήθως καλείται να ανταπεξέλθει σε έντονα καιρικά φαινόμενα, όπως άνεμος, κύματα και θαλάσσια ρεύματα. Τα χαρακτηριστικά των προηγούμενων φαινομένων μπορεί να έχουν εντελώς διαφορετική επίδραση στο πλοίο ανάλογα με τη φορά τους. Από την πλευρά του μελετητή, αυτά που έχουν την πιο σημαντική επίδραση είναι αυτά με φορά αντίθετη στην κίνηση του πλοίου. Τότε υπάρχει σημαντική προσαύξηση στην απαιτούμενη ισχύ ώστε να υπερνικηθούν οι πρόσθετες δυνάμεις και να διατηρηθεί σταθερή ταχύτητα. Η πρόσθετη αντίσταση οφείλεται, εν μέρει στην ανάκλαση των κυματισμών που προσπίπτουν στην γάστρα του πλοίου και εν μέρει στην έμμεση επίδραση των κατακόρυφων κινήσεων (heaving) και προνευτασμού (pitching) που προκαλούνται από τα κύματα (ακτινοβολία κυμάτων που προκαλούνται από την κίνηση του πλοίου). [1]

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η πρόσθετη αντίσταση που ασκείται στο υπό μελέτη πλοίο συναρτήσει της ταχύτητας για διαφορετικές εντάσεις ανέμου, οι οποίες προκαλούν κυματισμούς αντίθετης κατεύθυνσης με αυτήν της κίνησης του πλοίου.



Εικόνα 2.2: Διάγραμμα Ισχύος-ταχύτητα συναρτήσει καιρικών συνθηκών

2.3. Ρύπανση γάστρας και έλικας

Στο θαλάσσιο περιβάλλον στο οποίο βρίσκεται το πλοίο ευνοείται το φαινόμενο της ρύπανσης της γάστρας και της έλικας. Ως ρύπανση ορίζεται το φαινόμενο της ανάπτυξης μικροοργανισμών στα ύφαλα του πλοίου. Ο ρυθμός ανάπτυξης του φαινομένου της ρύπανσης είναι ιδιαίτερα περίπλοκος και εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως η τοποθεσία του πλοίου, η θερμοκρασία και η αλατότητα του νερού. Για την αντιμετώπιση του φαινομένου χρησιμοποιούνται βαφές στα ύφαλα του πλοίου, χωρίς όμως να εγγυούνται πλήρη αντιμετώπιση του φαινομένου.

Όπως είναι ευνόητο η ρύπανση της γάστρας και της έλικας έχουν αρνητική επίδραση στην απόδοση του πλοίου. Όσο πιο έντονο είναι το φαινόμενο, τόσο πιο τραχιά η επιφάνεια της

γάστρας και άρα μεγαλύτερη η αντίσταση τριβής. Επίσης, η ρύπανση της έλικας μειώνει σημαντικά τον βαθμό απόδοσή της. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα αύξηση της απαιτούμενης ισχύος, μείωση της μέγιστης ταχύτητας του πλοίου και μεγαλύτερο απαιτούμενο χρόνο για την επίτευξη αυτής.[1]

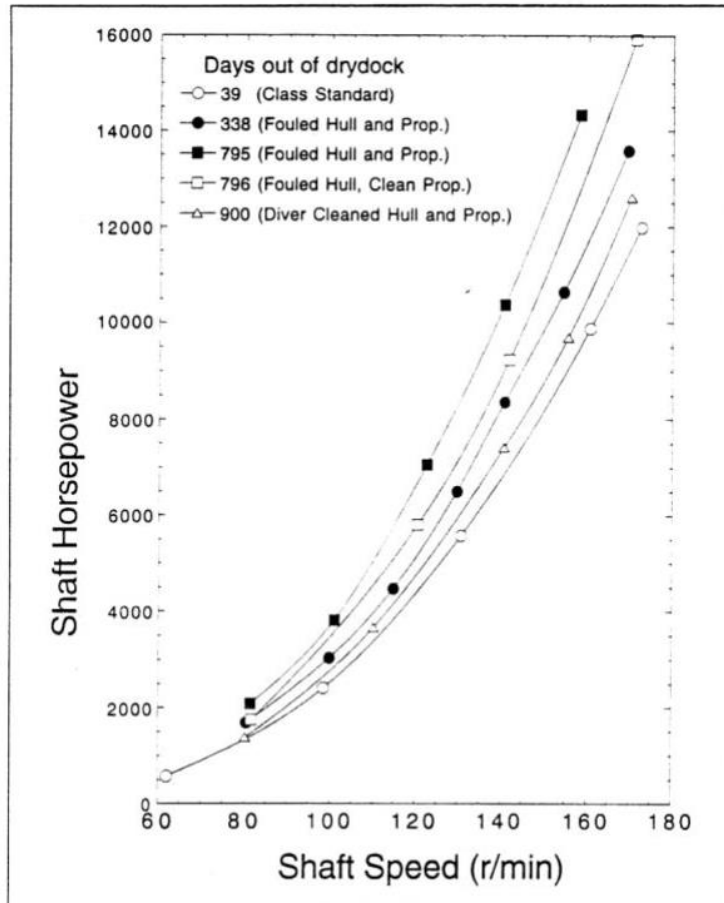


Figure 1. Comparison of USS Whipple (FF-1062) shaft speed versus shaft power for various hull and propeller conditions.

Εικόνα 2.3: Επίδραση της ρύπανσης στην απαιτούμενη ισχύ πρόωσης [1]

3. Μοντέλο πλοίου

Το μοντέλο του πλοίου δέχεται σαν είσοδο την ώση που παράγεται από την έλικα (το μοντέλο της έλικας και ο τρόπος υπολογισμού της παραγόμενης ώσης παρουσιάζονται σε παρακάτω κεφάλαιο της εργασίας) και δίνει σαν έξοδο την νέα ταχύτητα του πλοίου ανά χρονικό βήμα εκτέλεσης της προσομοίωσης. Η νέα ταχύτητα δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$V_s' = V_s + dV_s/dt \cdot \Delta t$$

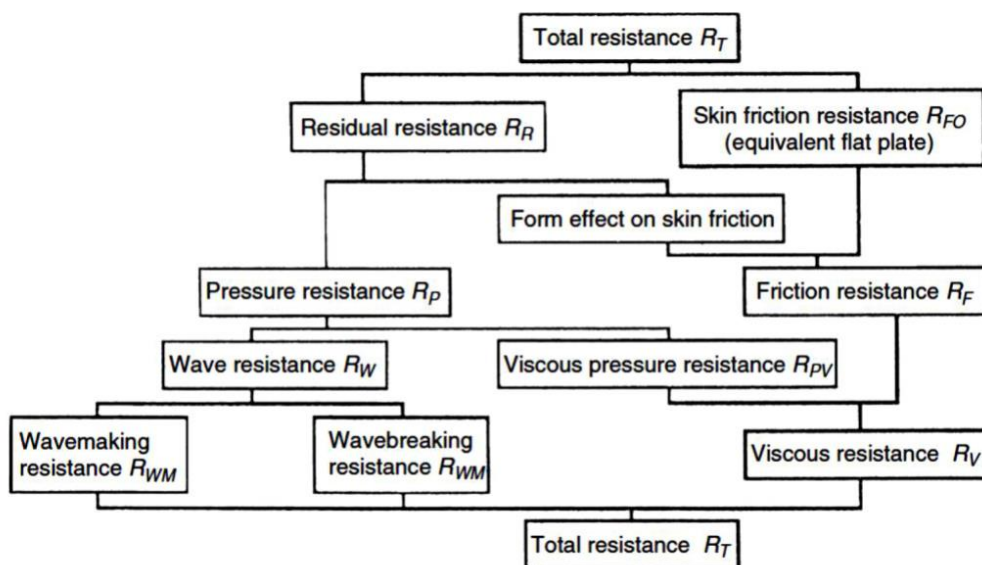
Η χρονική παράγωγος της ταχύτητας ή αλλιώς επιτάχυνση υπολογίζεται μέσω της διαφορικής εξίσωσης της διαμήκου κίνησης του πλοίου:

$$\frac{dV_s}{dt} = \frac{T_p(1 - t) - R}{M_s + M_{ADD}}$$

Όπου T_p η ώση της έλικας σε ελεύθερη ροή, t ο συντελεστής μείωσης ώσης, R η αντίσταση ρυμούλκησης του πλοίου, M_s το εκτόπισμα του πλοίου και M_{ADD} η πρόσθετη μάζα λόγω της κίνησης του περιρρέοντος ρευστού, η οποία είναι περίπου ίση με το 10% του εκτοπίσματος.

3.1. Αντίσταση σε ήρεμο νερό

Οι βασικές παράμετροι που ορίζουν την ολική αντίσταση R_T ενός πλοίου είναι η ταχύτητα, το εκτόπισμα και η γεωμετρία του. Σε ήρεμο νερό, η αντίσταση χωρίζεται σε δύο βασικές συνιστώσες, την αντίσταση συνεκτικότητας και την αντίσταση κυματισμού, οι οποίες στην συνέχεια χωρίζονται σε περαιτέρω συνιστώσες.



Εικόνα 3.1: Κύριες συνιστώσες αντίστασης [1]

3.1.1. Αντίσταση συνεκτικότητας

Κατά την κίνηση του πλοίου εντός ενός ρευστού ασκείται σε κάθε σημείο της γάστρας μία στοιχειώδης δύναμη, η οποία μπορεί να αναλυθεί δε δύο επιμέρους στοιχειώδεις δυνάμεις, μία κάθετη στην γάστρα και μία εφαπτόμενη σε αυτήν. Από τις δύο αυτές στοιχειώδεις δυνάμεις προκύπτουν οι παρακάτω βασικές συνιστώσες αντίστασης:

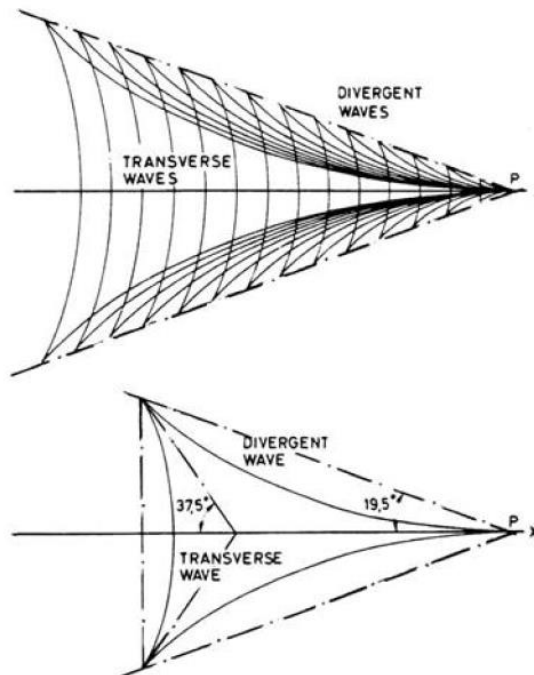
- **Αντίσταση τριβής:** είναι η συνιστώσα της αντίστασης που παράγεται με ολοκλήρωση στην επιφάνεια της γάστρας των επαπτόμενων τάσεων (τάσεις συνεκτικότητας) και προβολή κατά τη διεύθυνση κίνησης του πλοίου.
- **Αντίσταση πίεσης:** είναι η συνιστώσα της αντίστασης που παράγεται με ολοκλήρωση στην επιφάνεια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

Για πλοία χαμηλής ταχύτητας όπως Bulk Carriers ή Tankers, η αντίσταση τριβής είναι η κύρια συνιστώσα αντίστασης. [1]

3.1.2. Αντίσταση κυματισμού

Για ένα πλήρως βυθισμένο σώμα (π.χ. υποβρύχιο) η αντίσταση συνεκτικότητας που αναφέρθηκε παραπάνω είναι η συνολική αντίσταση που δέχεται. Ωστόσο, τα πλοία δεν είναι πλήρως βυθισμένα, οπότε η ύπαρξη ελεύθερης επιφάνειας προσθέτει μια ακόμα συνιστώσα, την αντίσταση κυματισμού. Ειδικότερα τα σημεία της γάστρας ως κινούμενα σημεία πίεσης κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια μετατοπίζουν την ελεύθερη επιφάνεια. Η ελεύθερη επιφάνεια αντιδρά στην μετατόπιση αυτή λόγω της βαρύτητας προσπαθώντας να ανακτήσει την αρχική της θέση. Έτσι παράγεται ένα τρισδιάστατο σύστημα κυματισμών πλοίου.

Το σύστημα κυματισμών που δημιουργεί το πλοίο ονομάζεται σύστημα κυματισμών Kelvin και έχει μια χαρακτηριστική μορφή που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



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

Εικόνα 3.2: Σύστημα κυματισμών Kelvin [1]

Όπως φαίνεται και από το σχήμα, αποτελείται από εγκάρσιους κυματισμούς που ακολουθούν το σημείο πίεσης (δηλαδή το πλοίο) και αποκλίνοντες κυματισμούς που απλώνονται πίσω από το σημείο πίεσης. Ο συνολικός σχηματισμός κυμάτων βρίσκεται εντός δύο ευθειών που ξεκινούν από το σημείο πίεσης και σχηματίζουν γωνίες περίπου 19.5 μοιρών ως προς την διεύθυνση κίνησης.

Η αντίσταση κυματισμού είναι μέρος της υπόλοιπης αντίστασης και κυρίαρχα αντίσταση πίεσης. Αφορά τόσο την αντίσταση σχηματισμού κυματισμών όσο και την αντίσταση θραύσης

κυματισμών ή αντίσταση αφρού στην πλώρη. Η αντίστασή θραύσης κυματισμών αφορά κυρίως μεγάλα αργόπλοια σκάφη, ενώ η αντίσταση αφρού εμφανίζεται περισσότερο σε ταχύπλοια σκάφη. Σε χαμηλές ταχύτητες η αντίσταση κυματισμού είναι πολύ μικρή σε σχέση με την αντίσταση συνεκτικότητας και εξαρτάται κυρίως από την γεωμετρία της ισάλου στην πλώρη, ενώ σε υψηλότερες ταχύτητες εξαρτάται από το τετράγωνο του εκτοπίσματος. [1]

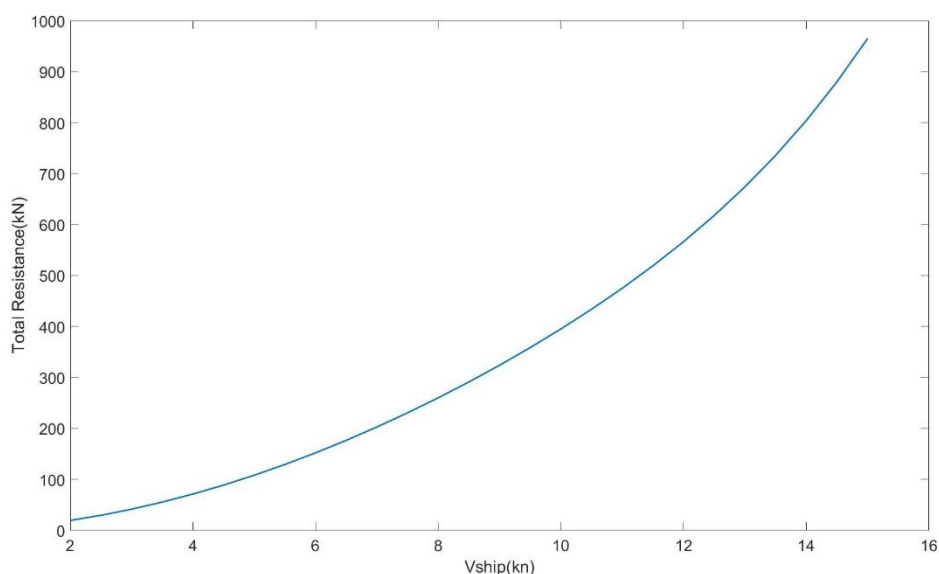
3.1.3. Μέθοδος υπολογισμού αντίστασης σε ήρεμο νερό HOLTROP

Για το υπό μελέτη πλοίο δεν υπήρχαν διαθέσιμα τα αποτελέσματα των πειραμάτων αντίστασης ώστε να χρησιμοποιηθούν στον υπολογισμό της αντίστασης σε ήρεμο νερό. Για το λόγο αυτό έγινε χρήση της προσεγγιστικής μεθόδου Holtrop, η οποία με βασικά χαρακτηριστικά της γεωμετρίας του πλοίου μπορεί να δώσει μια ικανοποιητική προσέγγιση της αντίστασης στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

Η αντίσταση του πλοίου σύμφωνα με την μέθοδο Holtrop δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$R_T = (1+k_1) \cdot R_F + R_{APP} + R_W + R_B + R_{TR} + R_A$$

Όπου R_F η αντίσταση τριβής, R_{APP} η αντίσταση των παρελκομένων του πλοίου, R_W η αντίσταση κυματισμού, R_B η αντίσταση λόγω ύπαρξης βολβού, R_{TR} η αντίσταση λόγω βυθισμένου καθρέφτη, R_A η αντίσταση συσχέτισης μεταξύ μοντέλου και πλοίου και k_1 ο συντελεστής μορφής της γάστρας. Οι επιμέρους συνιστώσες της αντίστασης υπολογίσθηκαν σύμφωνα με τη μεθοδολογία της μεθόδου. [11]



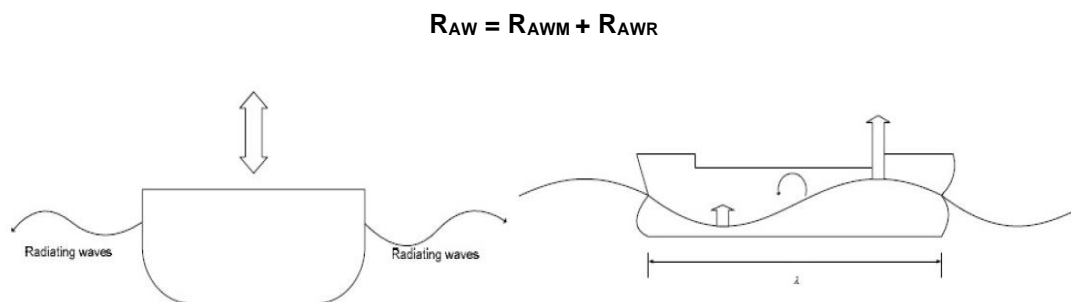
Εικόνα 3.3: Αντίσταση σε ήρεμο νερό για το υπό μελέτη πλοίο (μέθοδος Holtrop)

3.2. Πρόσθετη αντίσταση λόγω κυματισμών θαλάσσης

Όλα όσα αναφέρθηκαν για την αντίσταση του πλοίου στις προηγούμενες παραγράφους αφορούν την πλεύση του σε ήρεμο νερό, ωστόσο ένα πλοίο σπανίως πλέει σε τέτοια κατάσταση. Το πλοίο συνήθως καλείται να αντιμετωπίσει κυματισμούς κατά την πλεύση του που προέρχονται από τον άνεμο (ανεμογενείς κυματισμοί). Μερικές φορές μάλιστα τα κύματα προέρχονται από μακρινές καταιγίδες, έτσι ώστε η θάλασσα να έχει κύματα χωρίς να υπάρχει άνεμος (αποθάλασσα). Ιδιαίτερα σημαντικό είναι να μην υπάρχει σύγχυση της πρόσθετης

αντίστασης λόγω κυματισμών με την αντίσταση κυματισμού που περιεγράφηκε στην παράγραφο 3.1.2.

Η δυσμενέστερη κατάσταση που μπορεί να αντιμετωπίσει το πλοίο είναι πρωραίοι κυματισμοί, δηλαδή η φορά των κυμάτων να είναι αντίθετη από αυτήν του πλοίου. Η πρόσθετη αντίσταση τότε μπορεί να αναλυθεί σε δύο βασικά μέρη, το ένα αφορά την αντίσταση λόγω ανάκλασης των κυμάτων στην κινούμενη γάστρα (περίθλαση) και το άλλο την αντίσταση από την έμμεση επίδραση των κατακόρυφων κινήσεων (heaving) και του προνευτασμού (pitching) που προκαλούνται από τα κύματα (ακτινοβολία κυμάτων που δημιουργούνται από την κίνηση του πλοίου). [1]



Εικόνα 3.4: Πρόσθετη αντίσταση λόγω κυματισμών [19]

Η πρόσθετη αντίσταση λόγω κίνησης του πλοίου κυριαρχεί για μεγάλα μήκη κύματος τα οποία προκαλούν την κατακόρυφη κίνηση του πλοίου, ενώ η πρόσθετη αντίσταση λόγω περίθλασης κυματισμών είναι σημαντικότερη για μικρά μήκη κύματος, όπου όλο το κύμα ανακλάται από το πλοίο.

Για τον προσδιορισμό της πρόσθετης αντίστασης λόγω κυματισμών υπάρχουν τρεις δυνατότητες υπολογισμού, μέσω πειραμάτων, μέσω αριθμητικών υπολογισμών ή εμπειρικών μεθόδων. Τα πειράματα δίνουν την καλύτερη δυνατή προσέγγιση στην προσαύξηση της αντίστασης, ωστόσο είναι ακριβά και ιδιαίτερα χρονοβόρα. Οι υπολογιστικές προσεγγίσεις μπορούν να χωριστούν σε τρεις μεθόδους: θεωρία λωρίδων (γρήγορη μέθοδος, αλλά περιορισμένη ακρίβεια), 3D panel (σχετικά γρήγορη μέθοδος με αρκετά καλή ακρίβεια) και CFD μεθόδους (πάρα πολύ καλή ακρίβεια, αλλά πολύ χρονοβόρες). Τέλος, οι εμπειρικές μέθοδοι μπορούν να δώσουν μια πολύ γρήγορη και εύκολη εκτίμηση της αντίστασης, αλλά χωρίς υψηλή ακρίβεια. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε η πρόσθετη αντίσταση να υπολογισθεί με εμπειρική μέθοδο, διότι δεν ήταν δυνατόν να γίνουν πειραματικές μετρήσεις και επίσης η γεωμετρία της γάστρας του πλοίου δεν ήταν πλήρως γνωστή ώστε να χρησιμοποιηθεί κάποια από τις υπολογιστικές μεθόδους. [20]

Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία είναι από το άρθρο “An Improved Formula for Estimation the Added Resistance of Ships in Engineering Applications” των Απόστολου Παπανικολάου, Shukui Liu και Victor Bolbot.

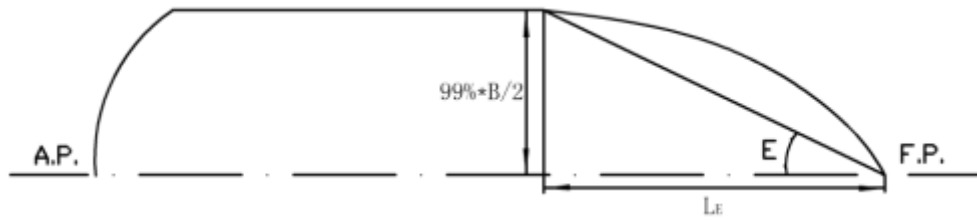
Σύμφωνα με την ανωτέρω μέθοδο η πρόσθετη αντίσταση για κάθε μήκος κύματος δίνεται ως:

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

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

$$R_{AWR} = 4 \rho g \zeta_a^2 \frac{B^2}{L_p} \bar{\omega}^{b1} \exp \left[\frac{b_1}{d_1} (1 - \bar{\omega}^{d1}) \right] a_1 a_2$$

Όπου $E = \arctan(B/2L_E)$ και ζ_a το πλάτος κύματος. Οι υπόλοιποι συντελεστές αναφέρονται λεπτομερώς στην μέθοδο. Ωστόσο, σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι το kg το οποίο είναι το radius of gyration λήφθηκε ίσο με $0.25 \cdot L_{pp}$ κατά προσέγγιση σύμφωνα με βιβλιογραφικά στοιχεία. [13]



Εικόνα 3.5 Ορισμός μήκους L_E και γωνίας E εισόδου της ισάλου [13]

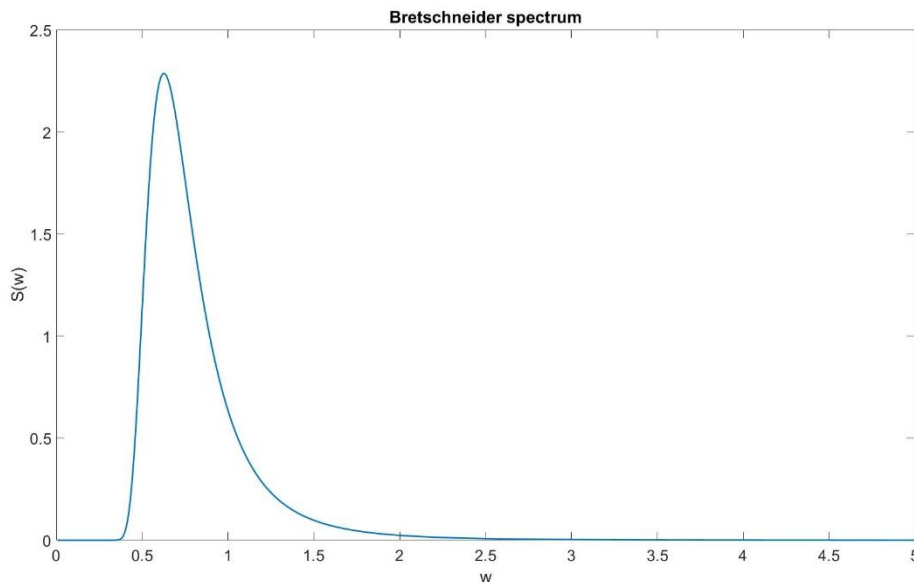
Τέλος, η μέση τιμή της πρόσθετης αντίστασης λόγω κυματισμών σε τυχαίους κυματισμούς υπολογίζεται σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$\overline{R_{AW}} = 2 \int_0^{\infty} S(\omega) \frac{R_{AW}(\omega)}{\zeta_a^2} d\omega$$

Όπου S είναι το κυματικό φάσμα και συγκεκριμένα στην παρούσα εργασία το φάσμα Bretschneider: [15]

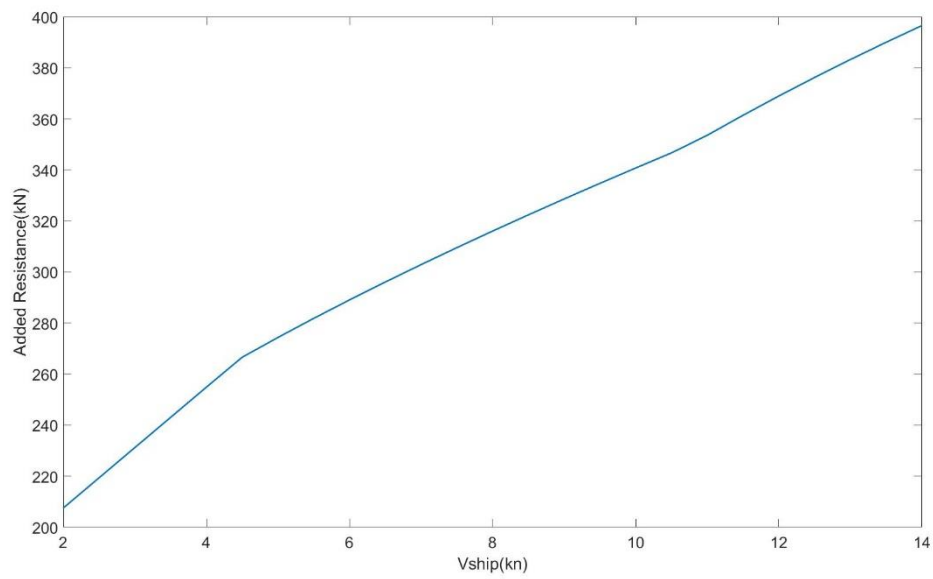
$$S(\omega) = \frac{1.25}{4} \frac{\omega_m^4}{\omega^5} H_s^2 \exp \left[-1.25 \left(\frac{\omega_m}{\omega} \right)^4 \right]$$

Με $\omega_m = 0.4 \sqrt{\frac{g}{H_s}}$ και H_s το ύψος κύματος.



Εικόνα 3.6: Απεικόνιση φάσματος Bretschneider για $H_s=4m$

Τέλος, η πρόσθετη αντίσταση λόγω κυματισμών συναρτήσει της ταχύτητας για 7 Beaufort (ύψος κύματος 4 m) που υπολογίστηκε από την προαναφερθείσα μέθοδο παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Εικόνα 3.7: Πρόσθετη αντίσταση λόγω κυματισμών 7 Beaufort

4. Μοντέλο έλικας

Το μοντέλο της έλικας χρειάζεται ώστε να υπολογιστεί η ροπή που εφαρμόζεται στον άξονα της μηχανής από την έλικα καθώς επίσης και η παραγόμενη ώση. Η ώση αποτελεί μεταβλητή εισόδου στο μοντέλο του πλοίου και η ροπή στο μοντέλο του κινητήρα. Αντίστοιχα το μοντέλο της έλικας δέχεται σαν είσοδο την ταχύτητα περιστροφής του άξονα που προκύπτει από το μοντέλο της μηχανής και την ταχύτητα του πλοίου από το αντίστοιχο μοντέλο.

Το υπό εξέταση πλοίο έχει έλικα σταθερού βήματος που έχει προκύψει από αναλυτική σχεδίαση και για την οποία δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα για τη μοντελοποίηση της. Για να ξεπεραστεί το πρόβλημα αυτό έγινε η υπόθεση ότι το πλοίο είναι εφοδιασμένο με έλικα B-series Wageningen με παρεμφερή χαρακτηριστικά με αυτήν του πλοίου. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκε η έλικα B4-55 P/D=1 για την οποία υπήρχαν τα χαρακτηριστικά της σε ελεύθερη ροή. Επίσης, εκτός από τα χαρακτηριστικά της έλικας σε ελεύθερη ροή είναι απαραίτητο να υπολογισθούν και οι συντελεστές αλληλεπίδρασης έλικας-πλοίου, για τους οποίους γίνεται εκτενής αναφορά σε παρακάτω παράγραφο.

4.1. Μοντέλο τεσσάρων τεταρτημόριων (Four-Quadrant propeller modeling)

Όπως προαναφέρθηκε για το υπό μελέτη πλοίο θεωρήθηκε ότι η έλικα του είναι B-series Wageningen B4-55 P/D=1 με τα παρακάτω βασικά χαρακτηριστικά.

Πίνακας 4.1: Βασικά χαρακτηριστικά έλικας

Τύπος έλικας	Έλικα σταθερού βήματος	
Διάμετρος	7.2	m
Αριθμός πτερυγίων	4	-
Λόγος βήματος	1	-
Λόγος εκτεταμένης επιφάνειας	0.55	-

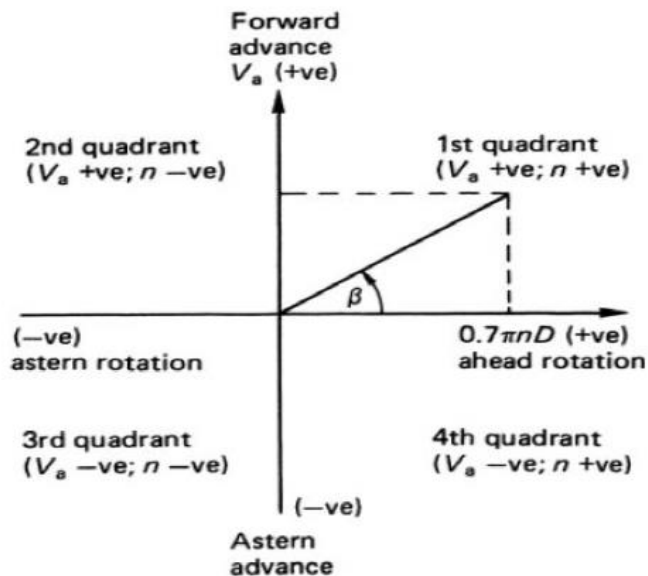
Το πλοίο γενικά μπορεί να λειτουργήσει σε τέσσερις διαφορετικούς συνδυασμούς πιθανής ταχύτητας προχώρησης του πλοίου και περιστροφικής ταχύτητας έλικας. Αυτοί οι συνδυασμοί ονομάζονται και τεταρτημόρια (Quadrant) και φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Στην περίπτωση της έλικας σταθερού βήματος, όπως είναι και η εξεταζόμενη, η λειτουργία στα τέσσερα τεταρτημόρια γίνεται σύμφωνα με την γωνία προχώρησης β , που δίνεται από τον τύπο:

$$\beta = \arctan\left(\frac{V_a}{0.7\pi N_P D_P}\right)$$

όπου V_a είναι η ταχύτητα προχώρησης για την οποία θα γίνει αναφορά σε παρακάτω κεφάλαιο, N_P η ταχύτητα περιστροφής της έλικας και D_P η διάμετρος της έλικας. [3]

Πίνακας 4.2: Ορισμός των τεσσάρων τεταρτημόριων

Quadrant	Rotation speed	Advance speed	Advance Angle
1 st	Ahead/Positive	Ahead/Positive	$0^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$
2 nd	Astern/Negative	Ahead/Positive	$90^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$
3 rd	Astern/Negative	Astern/Negative	$180^\circ \leq \beta \leq 270^\circ$
4 th	Ahead/Positive	Astern/Negative	$270^\circ \leq \beta \leq 360^\circ$



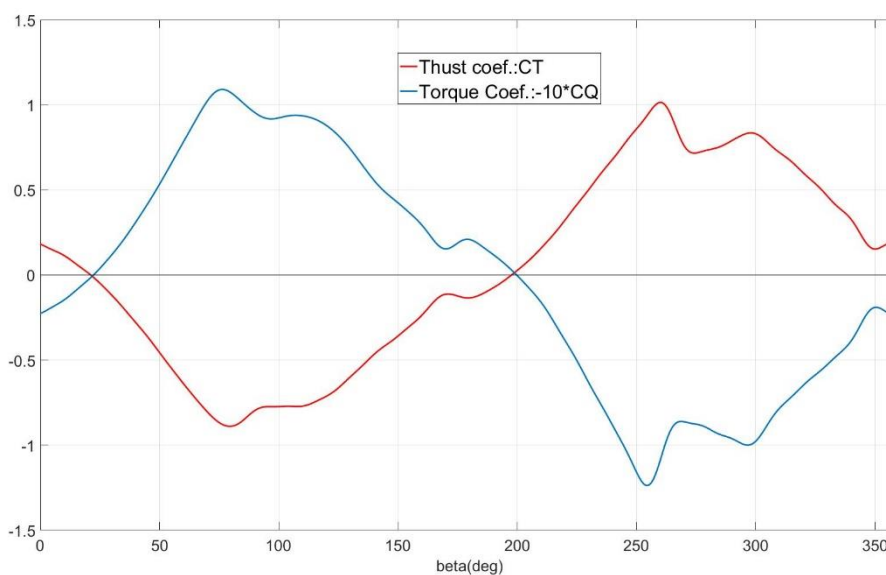
Εικόνα 4.1: Τα τέσσερα τεταρτημόρια λειτουργίας της έλικας [5]

Τα χαρακτηριστικά της έλικας σε ελεύθερη ροή από τη μοντελοποίηση των τεσσάρων τεταρτημόριων δίνουν τους συντελεστής ώσης και ροπής που είναι συνάρτηση της γωνίας προχώρησης β που αναφέρθηκε παραπάνω. Πιο συγκεκριμένα, οι τύποι υπολογισμού των συντελεστών ώσης και ροπής δίνονται από τους παρακάτω τύπους:

$$C_Q = -\frac{1}{1000} \sum_{k=0}^{30} (A_{kQ} \cos(k\beta) + B_{kQ} \sin(k\beta))$$

$$C_T = \frac{1}{100} \sum_{k=0}^{30} (A_{kT} \cos(k\beta) + B_{kT} \sin(k\beta))$$

Όπου οι συντελεστές A_{kQ} , A_{kT} , B_{kQ} , B_{kT} δίνονται από κατάλληλους πίνακες. [12]



Εικόνα 4.2: Συντελεστές ώσης και ροπής για την έλικα B4-55

Μετά τον υπολογισμό των ανωτέρω συντελεστών, γίνεται ο υπολογισμός της ώσης και της ροπής της έλικας από τους κάτωθι τύπους:

$$Q_P = \frac{1}{2} \cdot C_Q \cdot \rho_{sw} \cdot V_r^2 \cdot A_0 \cdot D_P$$

$$T_P = \frac{1}{2} \cdot C_T \cdot \rho_{sw} \cdot V_r^2 \cdot A_0 \cdot D_P$$

Όπου ρ_{sw} είναι η πυκνότητα του θαλασσινού νερού, A_0 η επιφάνεια του δίσκου της έλικας και V_r η σχετική ταχύτητα προχώρησης που δίνεται από την σχέση:

$$V_r = \sqrt{V_a^2 + (0.7 \cdot \pi \cdot N_p \cdot D_p)^2}$$

Μείωση βαθμού απόδοσης της έλικας

Η έλικα είναι αυτή που είναι υπεύθυνη για την πρόωση του πλοίου αφού μετατρέπει την περιστροφική κίνηση του άξονα της μηχανής σε ώση για την κίνηση του. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια λειτουργίας του πλοίου ο βαθμός απόδοσης της έλικας μειώνεται με βασικό αίτιο της μείωσης να είναι η ρύπανση της επιφάνειας της έλικας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αλλαγή των συντελεστών ώσης κτ και κq. Για τον ακριβή προσδιορισμό των νέων συντελεστών χρειάζεται να γίνουν αναλυτικοί υπολογισμοί π.χ. με lifting line-lifting surface. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής, όμως, ήταν αδύνατοι αυτοί οι υπολογισμοί και επίσης η εύρεση βιβλιογραφικών στοιχείων για αυτού του τύπου έλικα. Επομένως, για να εξεταστεί η επίδραση της μεταβολής του β.α. της έλικας στην επιτάχυνση και επιβράδυνση του πλοίου έγινε η υπόθεση ότι η παραγόμενη ώση παραμένει σταθερή και αυξάνεται η απαιτούμενη ροπή συναρτήσει του ποσοστού μείωσης του β.α. Η παραδοχή αυτή δεν είναι επιστημονικά βάσιμη, ωστόσο δίνει μια αρχική προσέγγιση.

4.2. Ροπή αδράνειας έλικας

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω από το μοντέλο της έλικας βγαίνει σαν έξοδος η ροπή που απαιτείται για την περιστροφή της έλικας που λειτουργεί σαν είσοδος στο μοντέλο της μηχανής. Εκτός από την ροπή στην έλικα όμως το μοντέλο της μηχανής χρειάζεται και την ροπή αδράνειας της έλικας διότι η επιτάχυνση ή επιβράδυνση της μηχανής δίνεται από τον τύπο:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{Q_{en} - Q_{Pr}}{I_{eng} + I_{Prop_total}}$$

Όπου Q_{eng} η ροπή που παράγει η μηχανή, Q_{prop} η ροπή που ζητάει η έλικα, I_{eng} η ροπή αδράνειας της μηχανής, και I_{prop_total} η συνολική ροπή αδράνειας της έλικας.

Η ροπή αδράνειας της μηχανής δεν ήταν γνωστή και δεν δίνεται σε κάποιο από τα manual της μηχανής. Για τον λόγο αυτό έγινε χρήση του προγράμματος GTD.exe το οποίο αφορά κινητήρες της WinGD. Από τον κατάλογο των κινητήρων της εν λόγω εταιρίας επιλέχθηκε ένας ο οποίος είναι γεωμετρικά όμοιος με αυτόν που μελετάται και μέσω του προγράμματος προέκυψε η τιμή της ροπής αδράνειας που χρησιμοποιήθηκε τελικά.

Η έλικα χαρακτηρίζεται από δυο ροπές αδράνειας την dry inertia και την water entrained inertia, των οποίων το άθροισμα μας δίνει την συνολική ροπή αδράνειας που αναφέρθηκε προηγουμένως. Η πρώτη αναφέρεται στην ροπή αδράνεια που έχει η έλικα σαν ένα σώμα κατά

την περιστροφή της, γύρω από τον άξονα της στον αέρα, ενώ η δεύτερη αναφέρεται στην προσαύξηση λόγω του περιρρέοντος ρευστού όταν αυτή περιστρέφεται μέσα στο νερό. Για τον υπολογισμό τους χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Prorcad, στο οποίο εισήχθη η γεωμετρία της έλικας και προέκυψαν τα ζητούμενα μεγέθη.

4.3. Συντελεστής μείωσης ώσης t

Η αντίσταση του αυτοπρωθούμενου πλοίου διαφέρει από αυτήν του ρυμουλκούμενου, δηλαδή την αντίσταση που υπολογίζεται από τις διάφορες εμπειρικές μεθόδους. Η διαφορά αυτή οφείλεται στην ύπαρξη και λειτουργία της έλικας, η οποία επιταχύνει την ροή στην περιοχή της πλήμνης με αποτέλεσμα τη μείωση των πιέσεων (κάθετες τάσεις) και τροποποίηση των επαπτομενικών τάσεων (διαφορετικό οριακό στρώμα). Η αντίσταση, όντας το ολοκλήρωμα των κάθετων και επαπτομενικών δυνάμεων που ασκεί το ρευστό στη γάστρα, αυξάνεται στην περίπτωση του αυτοπρωθούμενου πλοίου. Η αύξηση αυτή δεν είναι αμελητέα και λαμβάνεται υπόψιν στους υπολογισμούς της απαιτούμενης ισχύος. [1]

Επίσης, είναι κοινή πρακτική η ανωτέρω προσαύξηση της αντίστασης να θεωρείται ως μείωση της παραγόμενης ώσης στην έλικα, όπως και έγινε στην παρούσα εργασία.

Ο υπολογισμός του συντελεστή μείωσης ώσης δεν μπορεί να υπολογιστεί απευθείας. Είναι απαραίτητο να διεξαχθεί πείραμα αντίστασης με ρυμουλκούμενο αλλά και με αυτοπρωθούμενο μοντέλο για τον υπολογισμό της αντίστασης R και της ώσης T , αντίστοιχα. Γνωρίζοντας τα παραπάνω μεγέθη, προκύπτει ότι:

$$t = \frac{T-R}{T} \quad \text{ή} \quad R = (1 - t) \cdot T$$

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας δεν ήταν δυνατή η διεξαγωγή πειραμάτων για την ανωτέρω προσέγγιση, για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν εμπειρικοί τύποι για τον υπολογισμό του συντελεστή μείωσης ώσης.

Heckscher for cargo ships: $t = 0.5 \cdot C_P - 0.12$

Danckwardt for cargo ships: $t = 0.5 \cdot C_B - 0.15$

SSPA for cargo ships: $t = w (1.57 - 2.3 \cdot C_B / C_{WP} + 1.5 \cdot C_B)$

Holtrop-Mennen 1978: $t = 0.001979 \frac{L}{B(1-C_p)} + 1.0585 \frac{B}{L} - 0.00524 - 0.1418 \frac{D^2}{BT}$

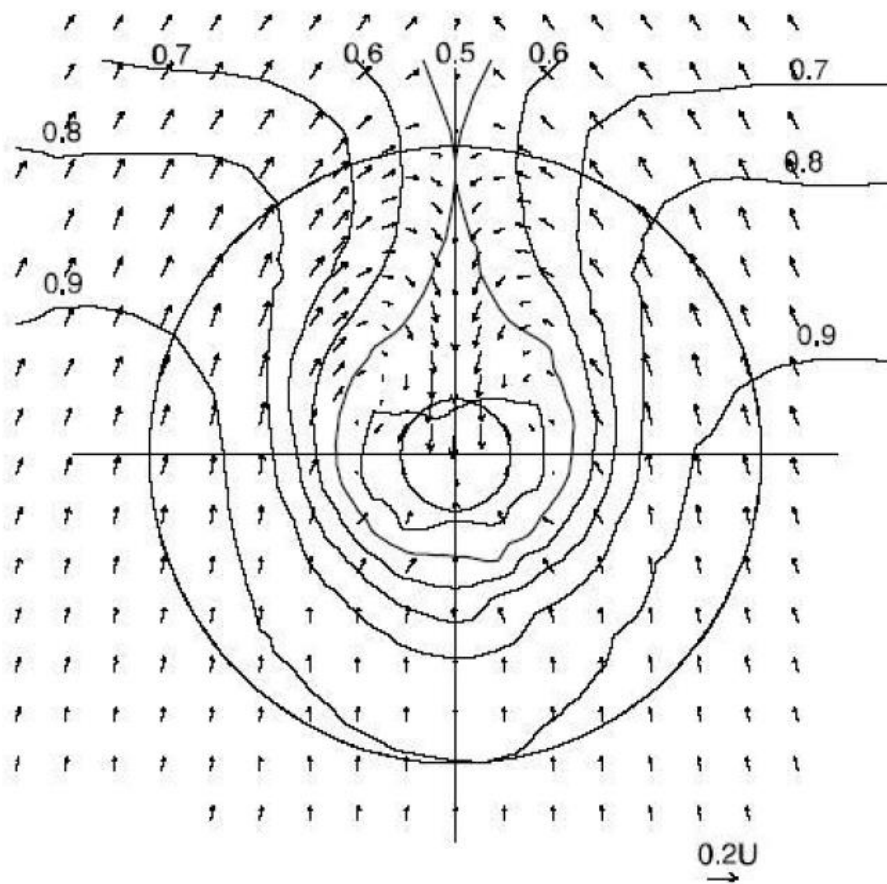
Ο τελικός συντελεστής μείωσης ώσης που χρησιμοποιήθηκε προέκυψε από τον μέσο όρο των μεθόδων αυτών.

Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι λόγω του τρόπου ορισμού του, ο συντελεστής μείωσης ώσης θα μεταβάλλεται ανάλογα με την ταχύτητα. Όταν η ώση που παράγει η έλικα είναι μηδέν τότε ο συντελεστής τείνει στο άπειρο. Ωστόσο, στο μεγαλύτερο μέρος της κανονικής λειτουργίας της έλικας η μεταβολή του t είναι σχετικά μικρή και δεν λαμβάνεται υπόψιν στους υπολογισμούς.

4.4. Ταχύτητα ομόρρου (wake)

Ο ομόρρος είναι η διαφορά μεταξύ της ταχύτητας του πλοίου και της ταχύτητας του ρευστού στο οποίο λειτουργεί η έλικα. Διαιρώντας με την ταχύτητα του πλοίου προκύπτει ο συντελεστής ομόρρου που καλείται Taylor wake fraction.

$$w = \frac{V - V_a}{V}$$



Σχήμα 19. Αξονική, γωνιακή και ακτινική πραγματική ταχύτητα ομόρρου του πλοίου. Η αξονική ταχύτητα δίνεται υπό μορφή ισοϋψών καμπυλών $V_o(r, \phi) / V$, όπου $V_o(r, \phi)$ η ταχύτητα κατά την αξονική διεύθυνση στοιχείου ρευστού με σύστημα αναφοράς σωματόδετο στο πλοίο (ονομάζεται και σχετική ταχύτητα).

Εικόνα 4.3: Κατανομή ταχύτητας ομόρρου [1]

Τον συντελεστή αυτόν μπορούμε να τον χωρίσουμε σε τρεις συνιστώσες:

$$\mathbf{W} = \mathbf{W}_p + \mathbf{W}_f + \mathbf{W}_w$$

όπου w_p , w_f και w_w είναι το potential, friction και wave wake fraction.

- Potential wake: Είναι ο ομόρρους που προκύπτει αν το πλοίο κινείται σε ιδανικό ρευστό χωρίς τριβή και παραγωγή κυμάτων. Δηλαδή είναι ο ομόρρους που μπορεί να υπολογισθεί μαθηματικά και είναι ανεξάρτητος από την διεύθυνση της κίνησης καθώς και από την ταχύτητα του πλοίου.
- Wave wake: Το τμήμα αυτό του ομόρρου προέρχεται από την κίνηση των μορίων του νερού σε κύματα.
- Friction wake: Είναι η διαφορά μεταξύ του πραγματικού ομόρρου και του αθροίσματος potential και wave wake.

Ωστόσο αντί για τον παραπάνω διαχωρισμός του w μπορεί εκτός από τρία να γίνει και σε τέσσερα μέρη ως εξής:

$$\mathbf{W} = \mathbf{W}_p + \mathbf{W}_f + \mathbf{W}_w + \mathbf{W}_{cor}$$

όπου w_{cor} δηλώνει την εμφανή αλλαγή του ομόρρου λόγω της περιστροφής της έλικας και την επακόλουθη αλλαγή στην ροή του ρευστού.

Όταν ο ομόρρος μετριέται σε ένα μοντέλο με την έλικα να έχει αφαιρεθεί από αυτό ονομάζεται ονομαστικό ποσοστό ομόρρου, ενώ σε μοντέλο εφοδιασμένο με την έλικα μετριέται το πραγματικό ποσοστό ομόρρου. [6]

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ταχύτητα και την κατανομή ομόρρου είναι:

- Συντελεστής γάστρας C_B
- Λόγος πλάτους προς μήκος
- Βύθισμα
- Μορφή νομέων
- Διάμετρος έλικας
- Αριθμός ελίκων
- Πηδάλιο
- Ταχύτητα
- Κατάσταση πλοίου
- Περιβάλλον (π.χ. ρηχό νερό)

Οι παράγοντες που έχουν να κάνουν με τη μορφή του πλοίου και την έλικα λαμβάνονται υπόψιν στην επιλογή των εμπειρικών τύπων. Δηλαδή με τον αριθμό των ελίκων, τη μορφή της γάστρας (λεπτόγραμμο ή παχύγραμμο πλοίο) επιλέγονται οι αντίστοιχοι τύποι για τον υπολογισμό του w .

Ωστόσο, ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει η εξέταση της επίδρασης της ταχύτητας και της κατάστασης του πλοίου στο w . Σύμφωνα με το "Resistance and propulsion of ships" του Harvard η ρύπανση της γάστρας οδηγεί σε αύξηση του wake fraction λόγω της διαταραχής της ροής, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση του w έως και 0.05. Σύμφωνα με την ίδια πηγή, η αλλαγή της ταχύτητας, τροποποιεί το κύμα της πρύμνης και επομένως και το w , καθώς επίσης είναι πιθανό να τροποποιήσει και το wake friction. Για την παρούσα εργασία, η αλλαγή του w σε σχέση με την ταχύτητα θεωρήθηκε ίση με τον μέσο όρο των διάφορων κατηγοριών που παρουσιάζονται στην ανωτέρω πηγή, με τιμή 0.002 για κάθε 0.1 m/s σε σχέση με την τιμή που θα υπολογιστεί παρακάτω για την ταχύτητα 14.5 kn όπου είναι η μέγιστη ταχύτητα υπηρεσίας του πλοίου, όπως υπολογίστηκε από τις προσομοιώσεις. [6]

Για τον υπολογισμό του ποσοστού ομόρρου χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω τύποι:

$$\text{Schneekluth 1988: } \mathbf{w = 0.5C_P \frac{1.6}{1+\frac{D}{T}} + \frac{16}{10+\frac{L}{B}}}$$

$$\text{Kruger 1976 for cargo ships: } \mathbf{w = 0.75C_B - 0.24}$$

$$\text{Heckscher for cargo ships: } \mathbf{w = 0.7C_P - 0.18}$$

$$\text{Troost for cargo ships: } \mathbf{w = 0.25+2.5(C_B-0.6)^2}$$

Το τελικό ποσοστό ομόρρου w που χρησιμοποιήθηκε αναφερόμενο στην μέγιστη ταχύτητα υπηρεσίας είναι ο μέσος όρος των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τους παραπάνω τύπους.

5. Μοντελοποίηση κινητήρα

5.1. MOtor THERmodynamics

Για την προσομοίωση της λειτουργίας του κινητήρα χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό MOtor THERmodynamics (MOTHER), το οποίο έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Ναυτικής Μηχανολογίας.

Το MOTHER ανήκει στην κατηγορία μοντέλων προσομοίωσης που ορίζονται ως μηδενικής διάστασης 'zero-dimension' ή όγκων ελέγχου 'control volume' θεωρώντας την μηχανή ως ένα σύνολο διασυνδεδεμένων όγκων ελέγχου, υποθέτοντας χωρική ομοιογένεια στις ιδιότητες των ρευστών και σταθερό ρυθμό αλλαγής των τιμών των παραμέτρων σε κάθε όγκο ελέγχου, σε κάθε σταθερό βήμα επίλυσης 'quasi-steady'.

Οι όγκοι ελέγχου συνδέονται μεταξύ τους με διάφορους περιορισμούς όπως βαλβίδες και ανοίγματα. Επίσης, εισάγονται και οι χάρτες λειτουργίας συμπιεστή και στροβίλου του υπερπληρωτή για πιο ακριβή μοντελοποίηση.

Σε αυτού του είδους τα μοντέλα θεωρείται ότι το έργο καθώς και η μεταφορά θερμότητας και μάζας γίνεται στα όρια των όγκων ελέγχου. Σε κάθε όγκο ελέγχου, εφαρμόζεται η εξίσωση διατήρησης της ενέργειας για τον υπολογισμό της μεταβολής της θερμότητας.

$$\dot{T} = f(\dot{U}, \dot{H}, \dot{\phi}, \dot{Q}, \dot{W})$$

Ο ρυθμός μεταβολής της εσωτερικής ενέργειας \dot{U} και της ενθαλπίας \dot{H} του εργαζόμενου μέσου προκύπτει από τις θερμοδυναμικές ιδιότητες του μείγματος αέρα/καυσίμου. Ο ρυθμός μεταβολής του λόγου ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου $\dot{\phi}$ λαμβάνεται μέσω άθροισης των συναλλαγών αέρα καυσίμου. Ο ρυθμός μεταβολής της θερμότητας \dot{Q} εξαρτάται από την απελευθέρωση θερμότητας λόγω της καύσης και από τις απώλειες κατά την διάρκεια της συμπίεσης. Τέλος, ο ρυθμός μεταβολής του έργου \dot{W} εξαρτάται από τον ρυθμό μεταβολής του όγκου ελέγχου σύμφωνα με την γεωμετρία της μηχανής, καθώς και από την στιγμιαία πίεση.

Η παροχή μάζας μεταξύ των συνδεδεμένων όγκων ελέγχου εξαρτάται από την στιγμιαία πίεση, τη θερμοκρασία και τις ιδιότητες του μείγματος των αερίων που διενεργούν σε κάθε όγκο, όπως επίσης και από την γεωμετρία της διόδου A_{flow} της ροής και του συντελεστή C_d που εκφράζει τους περιορισμούς κίνησης της ροής μεταξύ των όγκων ελέγχου. Μη σταθερές παροχές μάζας μεταξύ όγκων, βαλβίδων και ανοιγμάτων μοντελοποιούνται σαν ημιστατικές ροές 'quasi-steady':

$$\dot{m} = f(P, T, g, R, A_{flow}, C_d)$$

Στο τέλος κάθε υπολογιστικού βήματος γίνεται μια άθροιση των συναλλασσόμενων μαζών σε κάθε όγκο ελέγχου.

$$\dot{m} = \sum \dot{m}_j$$

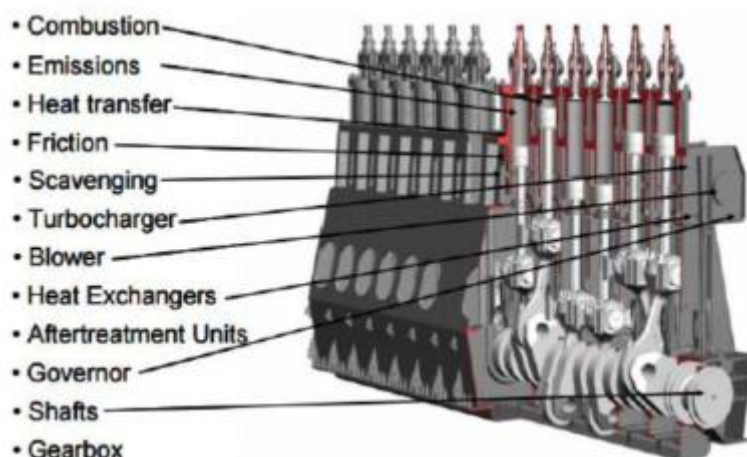
Τότε με την χρήση της καταστατικής εξίσωσης προσδιορίζεται η στιγμιαία πίεση, σύμφωνα με τον πραγματικό όγκο, μάζα, θερμοκρασία και τις ιδιότητες του ρευστού.

$$P = f(m, R, T, V)$$

Το σύνολο των διαφορικών εξισώσεων επιλύεται αριθμητικά για όλους τους όγκους ελέγχου με βήμα γωνίας στροφάλου μιας ή λιγότερο από μιας μοίρα (στην παρούσα εργασία το βήμα της γωνίας στροφάλου ορίστηκε 0.5 μοίρες).

Επίσης, γίνεται χρήση και επιμέρους υπό-μοντέλων για τις διάφορες φυσικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα μέσα στον κινητήρα, όπως η καύση, η εναλλαγή αερίων, η τριβή, καθώς επίσης και συστημάτων που επηρεάζουν την θερμοδυναμική του κινητήρα, όπως ο

υπερπληρωτής, που όπως προαναφέρθηκε μοντελοποιείται με την χρήση του χάρτη λειτουργίας του στρόβιλου και του συμπιεστή του.



Εικόνα 5.1: Στοιχεία και διαδικασίες του μοντελοποιούνται στο MOTHER[2]

Η φιλοσοφία πίσω από τον κώδικα του MOTHER είναι βασισμένη σε αυτήν των βασικών μηχανολογικών στοιχείων (BEEs). Τα στοιχεία αυτά χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες, τα θερμοδυναμικά στοιχεία, δηλαδή αυτά που αφορούν την θερμοδυναμική συμπεριφορά του κινητήρα, στα μηχανικά στοιχεία, δηλαδή σε εκείνα που καθορίζουν την μηχανολογική συμπεριφορά του κινητήρα και τέλος τα στοιχεία ελέγχου, αυτά που είναι υπεύθυνα για τον αυτόματο έλεγχο του κινητήρα. [2]

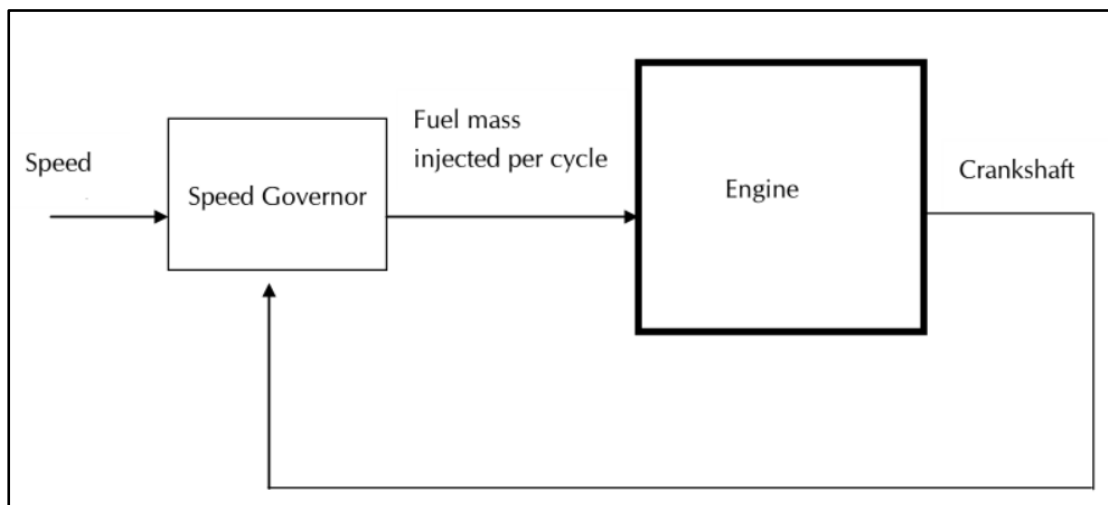
Πίνακας 5.1: Βασικά μηχανολογικά στοιχεία (BEEs) διαθέσιμα στο MOTHER [2]

Θερμοδυναμικά στοιχεία		Μηχανικά στοιχεία	Στοιχεία ελέγχου
Όγκοι ελέγχου	Στοιχεία ελέγχου της ροής		
Κύλινδροι	Βαλβίδες	Στροφαλοφόρος άξονας	Ελεγκτής στροφών
Συλλέκτης αέρα εισαγωγής	Θυρίδες εισαγωγής	Άξονες	Ελεγκτής ταχύτητας
Συλλέκτης αέρα εξαγωγής	Συμπιεστής	Συμπλέκτης	
	Στρόβιλος καυσαερίων	Μειωτήρας στροφών	

5.2. Ελεγκτής στροφών (Speed Governor)

Στην παρούσα εργασία, στην οποία γίνεται έλεγχος των μεταβατικών φαινομένων ένα ιδιαίτερα σημαντικό κομμάτι είναι το governor. Το governor είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο των στροφών και την επιτάχυνση και επιβράδυνση της μηχανής. Πιο συγκεκριμένα, ορίζεται μια επιθυμητή τιμή για τις στροφές της μηχανής και αυτό ρυθμίζει το καύσιμο που θα εκχυθεί στην μηχανή για την επίτευξη και εν συνεχεία την διατήρηση των στροφών αυτών. Επίσης, ιδιαίτερα σημαντικός ρόλος του governor είναι να αποτρέπει την μηχανή να δουλέψει εκτός των ορίων του διαγράμματος λειτουργίας της (limiters & overspeed protection).

Η βασική φιλοσοφία λειτουργίας του governor βασίζεται στην αρνητική ανάδραση (negative feedback), το οποίο στην παρούσα εργασία είναι οι στροφές του στροφαλοφόρου. Η αρνητική ανάδραση μπορεί να βελτιώσει τη λειτουργία του συστήματος και ιδιαίτερα την σταθερότητά του.[2]



Εικόνα 5.2: Conceptual block diagram of governor's operational principal [2]

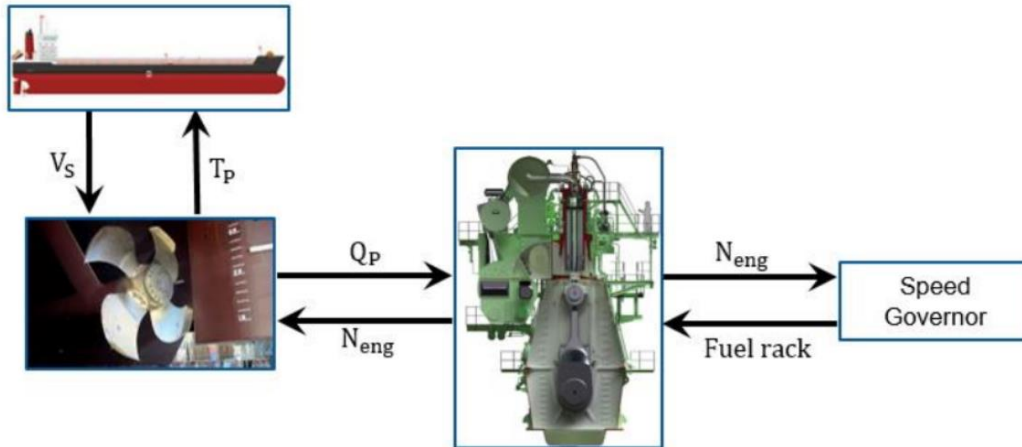
Στην προσομοίωση του MOTHER για τον έλεγχο των στροφών χρησιμοποιείται ένας ελεγκτής PID. Για τον προσδιορισμό του ελεγκτή PID χρειάζεται να οριστούν οι συντελεστές K_p , K_i και K_d . Ο προσδιορισμός των προαναφερθέντων συντελεστών έγινε με βάση προηγούμενες εργασίες για τον αρχικό προσδιορισμό των τιμών και στην συνέχεια με αρκετές δοκιμές ώστε να προκύψει η επιθυμητή απόκριση του κινητήρα.

5.3. Συνεργασία όλων των επιμέρους μοντέλων

Αφού έγινε η περιγραφή όλων των βασικών επιμέρους μοντέλων, γεννάται το ερώτημα της μεταξύ τους σύνδεσης. Εδώ είναι σημαντικό να διευκρινιστεί ότι για την επιτάχυνση και την επιβράδυνση χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικοί τρόποι διασύνδεσης των μοντέλων. Στην επιτάχυνση η σύνδεση τους έγινε μέσω του MOTHER και της συνάρτησης userdll, για το οποίο θα γίνει εκτενέστερη αναφορά παρακάτω, ενώ στην επιβράδυνση γράφηκε νέο πρόγραμμα σε γλώσσα Fortran σε περιβάλλον Visual Studio για την υλοποίηση της μοντελοποίησης.

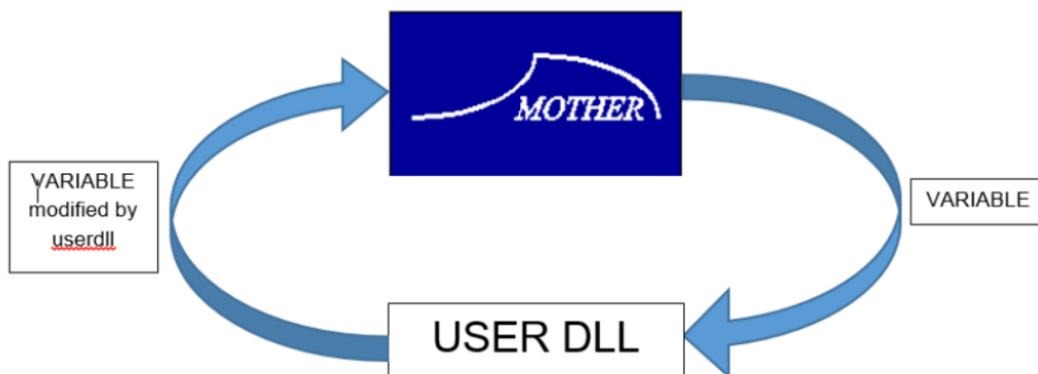
5.3.1. Επιτάχυνση

Στην παρακάτω εικόνα 5.3 φαίνεται πως αλληλοεπιδρούν τα μοντέλα μεταξύ τους. Αρχικά, ρυθμίζεται το σύστημα ώστε να ισορροπεί σε ένα αρχικό σημείο λειτουργίας (στροφές μηχανής/έλικας-ταχύτητα πλοίου) και εν συνεχεία δίνοντας εντολή στο governor αλλάζει το fuel rack και επακολούθως οι στροφές λειτουργίας της μηχανής και επιλύοντας τις επιμέρους διαφορικές εξισώσεις ανά το βήμα που έχει οριστεί, υπολογίζεται το νέο σημείο ισορροπίας του συστήματος.



Εικόνα 5.3: Αλληλεπίδραση των επιμέρους μοντέλων [3]

Το μοντέλο της μηχανής είναι ολόκληρο στο πρόγραμμα MOTHER και όλοι οι υπολογισμοί γίνονται μέσα σε αυτό. Για να πάρει όμως τα στοιχεία που χρειάζεται για το μοντέλο έλικας - πλοίου 'επικοινωνεί' με την συνάρτηση userdll στην οποία έχουν δημιουργηθεί τα προαναφερθέντα μοντέλα σε γλώσσα Fortran. Στο τέλος της προσομοίωσης δίνονται από το MOTHER τα αποτελέσματα για διάφορες μεταβλητές που έχουν ορισθεί από τον χρήστη.



Εικόνα 5.4: MOTHER-userdll επικοινωνία [3]

5.3.2. Επιβράδυνση

Στην παρούσα εργασία έγινε η υπόθεση ότι κατά τη διάρκεια της επιβράδυνσης που μελετάται ο κινητήρας δεν βρίσκεται σε λειτουργία, δηλαδή δεν εγχύεται καύσιμο σε αυτόν και απλώς παρασύρεται από την περιστροφή της έλικας. Η μόνη 'συνεισφορά' της μηχανής σε αυτήν την περίπτωση είναι σε απώλειες ενέργειας που οφείλονται σε τριβές εσωτερικά της μηχανής και σε απώλεια ενέργειας λόγω θερμότητας κατά την συμπίεση. Επειδή όμως ο ακριβής υπολογισμός των απωλειών αυτών είναι αρκετά δύσκολος και ξεφεύγει από τα πλαίσια της παρούσας εργασίας έγινε η παραδοχή ότι οι απώλειες αυτές είναι ίσες με τις απώλειες του αξονικού συστήματος που υπολογίσθηκαν όπως θα περιγραφεί παρακάτω.

Ο λόγος που δεν έγινε χρήση του MOTHER που έχει ήδη ενσωματωμένα διάφορα μοντέλα για τις απώλειες της μηχανής και του αξονικού συστήματος είναι διότι λόγω της απουσίας καυσίμου και καύσης το πρόγραμμα δεν μπορούσε να τρέξει, αφού μετά από μερικά δευτερόλεπτα

προσομοίωσης έβγαине σφάλμα λειτουργίας. Για τον λόγο αυτό η προσομοίωση έγινε από νέο, ξεχωριστό πρόγραμμα.

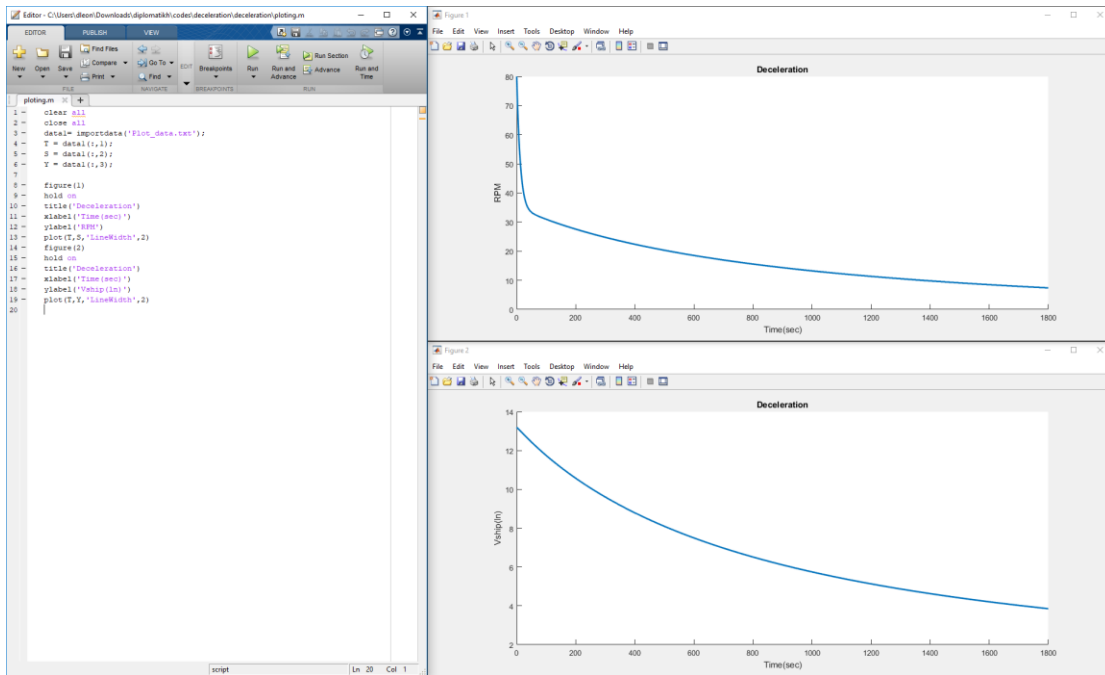
```

1 program deceleration
2
3 implicit none
4 REAL :: DT, CD, CT, Dia, Ab, SML_TEMP_CT, SML_TEMP_CQ, CO_TEMP, CT_TEMP, AQ, BQ, AT, BT
5 REAL :: BETA, BETA_BQ, A_TOTAL, LBP, BREADTH, DRAFT, DEPTH, CB, CBL, CBR, CR, CRH, M_SHIP, M_ADD, J, R_SHIP
6 REAL :: V_DOT_SHIP, V_SHIP, PI, DENS, J_engine, J_prop, J_TOTAL
7 INTEGER :: II, KK, JJ, JJ
8 REAL :: MELN2ADJ, M1, M2, M3, M4, running_time, Qshaft, rps_dot, R1, R2, friction, Qshaft1, Qshaft2
9 REAL, ALLOCATABLE, DIMENSION(:) :: a, QPROP, TPROP, speed, speed_kn, rpm, rps, vr, va, beta2, distance, a2
10
11
12
13 PI = 4.0D0 * AVM(1.0D0)
14 DT=0.05 !dt for running datas
15 running_time=3000 !sec
16 JJ=running_time/DT !number of cycles
17 allocate(speed(JJ),rpm(JJ),QPROP(JJ), TPROP(JJ), speed_kn(JJ),rps(JJ),vr(JJ),va(JJ),beta2(JJ), distance(JJ))
18
19 !initial values
20 J_engine = 150000 !kg/m^2
21 J_prop = 90000 !kg/m^2
22 J_TOTAL = J_engine + J_prop !kg/m^2
23 rpm(1) = 80 !Shaft Revolutions [rpm]
24 rps(1) = rpm(1) / 60 !Shaft revolutions per second
25 speed_kn(1) = 13.2 !ship's speed in [kn]
26 speed(1)=speed_kn(1)*.5144444 !ship's speed in [m/s]
27 distance(1) = 0 !Ship covered at previous time step [m]
28
29 DENS = 1025 !Sea Water Density [kg/m^3] (na to steel to author)
30 Dia = 7.2 !propeller diameter [m]
31 Ab = PI * ( Dia**2)/4 !propeller disk area [m^2]
32
33 !-----
34 LBP = 217 ! Ship length in meters
35 BREADTH = 32.26 ! Ship breadth in meters
36 DRAFT = 12.20 ! Ship draft in meters
37 DEPTH = 16.30 ! Ship depth in meters
38 CB = 0.8479 ! Block Coefficient
39 CBL = 0.9966 ! Waterplane Coefficient
40 CR = 0.9273 ! Midship Section Coefficient
41 CRH = 0.8588 ! Prismatic Coefficient
42 M_SHIP = 74327*1000 ! Ship mass in kg, full loaded
43 M_ADD = 0.7*M_SHIP ! Added Mass
44 M_TOTAL=M_SHIP+M_ADD !
45
46 !! for design draft
47 M1 = 0.75*CB*0.24 ! Wake Fraction - Kruger
48 M2 = 0.25*(CB-0.6)**2 ! Wake Fraction - Troost
49 M3 = 0.5*CR**2*(1+(1+DEPTH/DRAFT**3)*LBP/BREADTH) ! Wake Fraction - Schmitzloth 1989
50 M4 = 0.7*CR*0.18 ! Wake Fraction - Heckscher for trailers
51 M = (M1+M2+M3+M4)/4.0
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100

```

Εικόνα 5.5: Πρόγραμμα για την προσομοίωση της επιβράδυνσης

Όπως φαίνεται από την παραπάνω εικόνα το πρόγραμμα που αναπτύχθηκε δεν έχει γραφικό περιβάλλον αλλά είναι σε μορφή κώδικα στο Visual Studio και εκτυπώνει τα αποτελέσματα σε αρχεία txt που έχουν ορισθεί. Για την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων τα αρχεία txt εκτυπώνονται με κατάλληλο κώδικα στο MATLAB.



Εικόνα 5.6: Παράδειγμα εκτύπωση αποτελεσμάτων στο MATLAB

Υπολογισμός απωλειών αξονικού συστήματος

Για τον υπολογισμό των απωλειών του αξονικού συστήματος βασική προϋπόθεση ήταν η διαστασιολόγηση του, διότι για το υπό μελέτη πλοίο δεν υπήρχαν σχέδια ή δεδομένα οποιασδήποτε μορφής για τις διαστάσεις του αξονικού συστήματος. Αυτό έγινε με την βοήθεια του κανονισμού “DNV GL Part 4 Chapter 4 Section 1 Main shafting” [18] και σχεδίων από άλλο bulk carrier με ίδια ιπποδύναμη.

Η ελάχιστη διάμετρος για τον άξονα της έλικας (propeller shaft) και τον ενδιάμεσο άξονα (intermediate shaft) σύμφωνα με τον κανονισμό που ορίζεται στον παραπάνω κανονισμό και στον IACS UR M68.4 δίνεται από τον παρακάτω τύπο.

$$d_{min} = 100 \times k \times \sqrt[3]{\frac{P}{n_0} \times \frac{560}{\sigma_B + 160}}$$

Όπου:

- d_{min} : η ελάχιστη απαιτούμενη διάμετρος του άξονα σε mm
- k : συντελεστής όπου είναι ίσος με 1.22 για τον άξονα της προπέλας και 1 για τον ενδιάμεσο άξονα
- n_0 : οι ονομαστικές στροφές λειτουργίας του κινητήρα σε rpm
- σ_B : όριο αντοχής του υλικού κατασκευής του άξονα σε N/mm²
- P : ονομαστική ισχύ του κινητήρα σε kW

Στην συνέχεια το νούμερο που προέκυψε στρογγυλοποιήθηκε προς τα πάνω για ασφάλεια και ελέγχθηκε αν είναι λογικό σε σχέση με τις διαστάσεις των αξόνων του άλλου πλοίου. Επίσης, το μήκος των αξόνων λήφθηκε κατά προσέγγιση ίσο με το αντίστοιχο του δεύτερου πλοίου.

Ακόμα, θεωρήθηκε ότι υπάρχουν τρία έδρανα ολίσθησης τα δύο έδρανα χοάνης και ένα ενδιάμεσο. Το ενδιάμεσο έδρανο έχει λόγο L/D ίσο με 1, ενώ το πρυμναίο και πρωραίο έδρανο χοάνης έχουν λόγο L/D ίσο με 2 και 0.75 αντίστοιχα.

Αφού προσδιορίστηκαν οι βασικές διαστάσεις του αξονικού συστήματος έγινε χρήση της μεθόδου που περιγράφεται στο βιβλίο “Applied Tribology: Bearing Design and Lubrication” του M.M. Khonsari και E.R. Booser. Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή υπολογίζεται αρχικά ο αριθμός Sommerfeld σύμφωνα με την σχέση: [17]

$$S = \frac{\mu N_s D L}{W} \left(\frac{R}{C}\right)^2$$

Όπου

- μ το δυναμικό ιξώδες, το οποίο πάρθηκε κατά προσέγγιση ίσο με 0.3 Pascal/Sec
- N_s οι στροφές του άξονα ανά δευτερόλεπτο
- D η διάμετρος του άξονα σε m
- L το μήκος του εδράνου σε m
- R η διάμετρος του άξονα
- C ακτινικό διάκενο μεταξύ άξονα και εδράνου, όπου είναι περίπου $C=R/1000$
- W το βάρος από τον άξονα που δέχεται το έδρανο

Για τον υπολογισμό του βάρους που δέχεται το κάθε έδρανο υπολογίζεται αρχικά το συνολικό βάρος του αξονικού συστήματος μαζί με την έλικα και στην συνέχεια ισοκατανέμεται μεταξύ των τριών εδράνων, ώστε η πίεση να είναι σε όλα το ίδιο. Το εμβαδόν του κάθε εδράνου που δέχεται την πίεση από το βάρος του αξονικού συστήματος είναι $L \cdot D$.

Εν συνεχεία, γνωρίζοντας τον αριθμό Sommerfeld και τον λόγο L/D υπολογίζεται από πίνακες f (force friction), ο οποίος υπεισέρχεται στον τύπο $F=f \cdot W$ για τον υπολογισμό της δύναμης τριβής στο έδρανο. Τέλος, πολλαπλασιάζοντας την τιμή της δύναμης τριβής F με τον

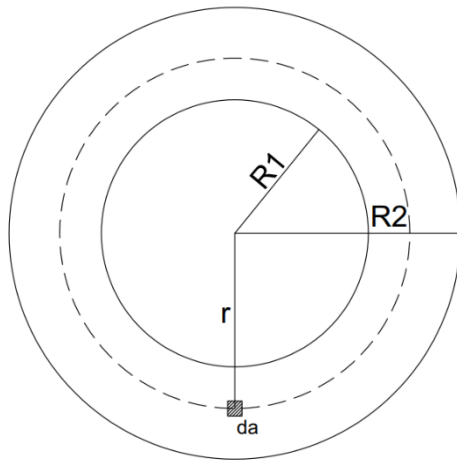
μοχλοβραχίονα R, την ακτίνα του άξονα δηλαδή, υπολογίζεται η ροπή στον άξονα λόγω τριβής με το έδρανο ολίσθησης.

Η παραπάνω διαδικασία γίνεται και για τα τρία έδρανα ολίσθησης για διάφορες ταχύτητες περιστροφής του άξονα. Στο τέλος της διαδικασίας, παρεμβάλλονται τα αποτελέσματα με ένα πολυώνυμο 6^{ου} βαθμού ώστε να μπουν στο πρόγραμμα προσομοίωσης της επιβράδυνσης.

Intermediate bearing		Aft stern tube bearing		Fore stern tube bearing	
L/D=	1	L/D=	2	L/D=	0.75
Da=	0.45 m	Da=	0.55 m	Da=	0.55 m
L=	0.45 m	L=	1.1 m	L=	0.4125 m
μ=	0.3 Pascal/sec	μ=	0.3 Pascal/sec	μ=	0.3 Pascal/sec
Ns=	0.167 rps	Ns=	0.167 rps	Ns=	0.167 rps
C=	0.000225	C=	0.000275	C=	0.000275
W=	84242.3509 N	W=	251687.024 N	W=	94382.63389 N
S=	0.12018895	S=	0.12018895	S=	0.120188954
(R/C)f1=	2.8115	(R/C)f1=	5.5694	(R/C)f1=	3.8162
(R/C)f2=	2.5033	(R/C)f2=	4.464	(R/C)f2=	3.1906
(R/C)f=	2.7784	(R/C)f=	2.71026785	(R/C)f=	3.4599
f=	0.00277841	f=	0.00271027	f=	0.003459929
F=	234.059873 N	F=	682.139249 N	F=	326.5572043 N
E=	55.1490583 W	E=	196.442001 W	E=	94.04172379 W
Q=	52.6634714 N*m	Q=	187.588293 N*m	Q=	89.80323119 N*m

Εικόνα 5.7: Υπολογισμός απωλειών στα έδρανα

Τέλος, ένα ακόμα στοιχείο στο αξονικό σύστημα που είναι υπεύθυνο για απώλειες ενέργειας είναι το έδρανο ώσης. Για την προσέγγιση της ροπής λόγω τριβής στο έδρανο ώσης προέκυψε ο τύπος όπως φαίνεται παρακάτω:



Η δύναμη τριβής ισούται με $F_R = F_P \cdot \mu$ με $F_P = (1-t)T$, δηλαδή την ώση από την έλικα επί τον συντελεστή τριβής.

Για το στοιχειώδες εμβαδόν dA ισχύει ότι $dM = dF_R \cdot r = F_P \cdot (dA/A) \cdot r \cdot \mu = F_P \cdot \left(\frac{r dr d\theta}{\pi(R_2^2 - R_1^2)} \right) \cdot r \cdot \mu$

Ολοκληρώνοντας το dM για ακτίνα r από R_1 μέχρι R_2 και γωνία από 0 έως 2π προκύπτει ότι:

$$M = \int dM = \frac{F_P \mu}{\pi(R_2^2 - R_1^2)} \int_0^{2\pi} \int_{R_1}^{R_2} r^2 dr d\theta$$

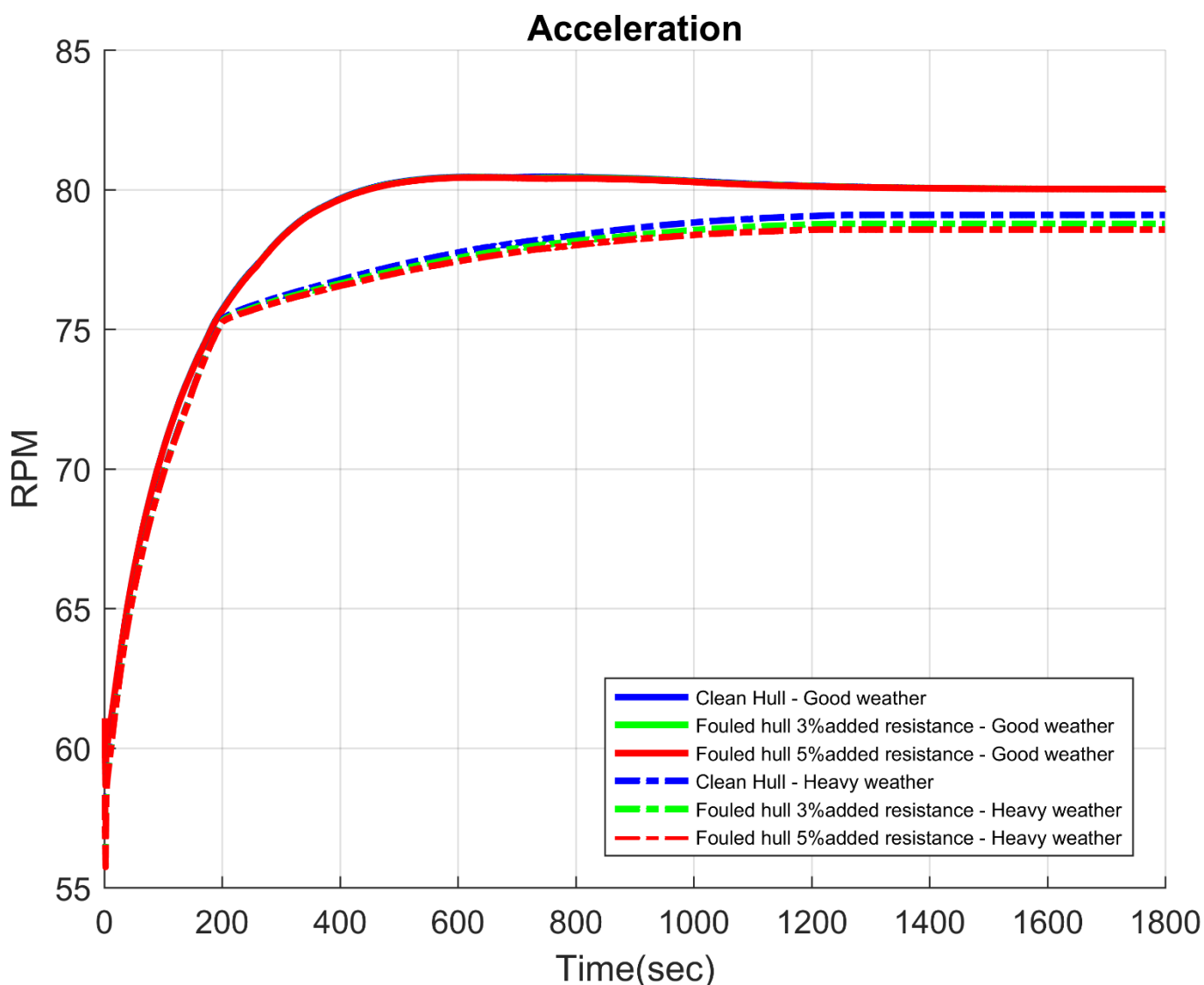
$$M = \frac{2}{3} (1 - t) T \mu \frac{R_2^3 - R_1^3}{R_2^2 - R_1^2}$$

Με τον συντελεστή τριβής μ να θεωρείται ίσος με 0.015 για το έδρανο ώσης. Όσον αφορά τις διαστάσεις του εδράνου ώσης, επειδή και για αυτό δεν υπήρχαν στοιχεία, θεωρήθηκε ότι το R_2 είναι περίπου το 40% της διαδρομής του εμβόλου, το οποίο σημαίνει ότι $R_2 = 1\text{m}$ και το R_1 είναι το 70% του R_2 , δηλαδή $R_1 = 0.7\text{m}$.

6. Αποτελέσματα

6.1. Αποτελέσματα επιτάχυνσης

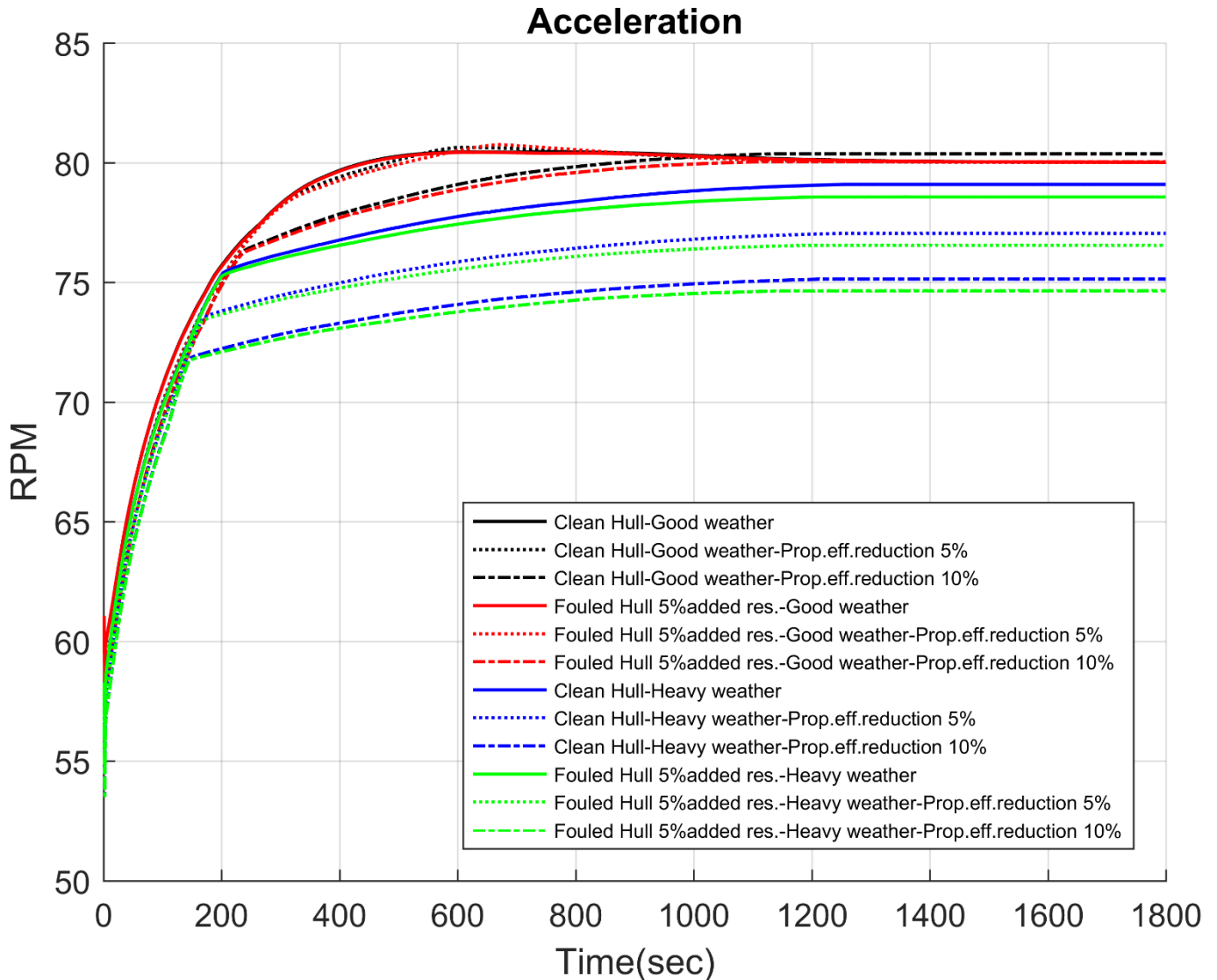
Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν τα διαγράμματα 'Χρόνου-Ταχύτητας περιστροφής έλικας', «Χρόνου-Ταχύτητας πλοίου» και 'Χρόνου-Απόστασης που διανύθηκε' για όλες τις καταστάσεις επιτάχυνσης για τις οποίες έγινε προσομοίωση, δηλαδή για καθαρή γάστρα, ρυπασμένη γάστρα με προσαύξηση 3% και 5% στην αντίσταση, καλό καιρό και κυματισμούς καθώς επίσης και για έλικα με μειωμένο βαθμό απόδοσης 5% και 10% με μεταξύ τους συνδυασμούς.



Εικόνα 6.1: Επιτάχυνση «Ταχύτητα περιστροφής έλικας- χρόνος»

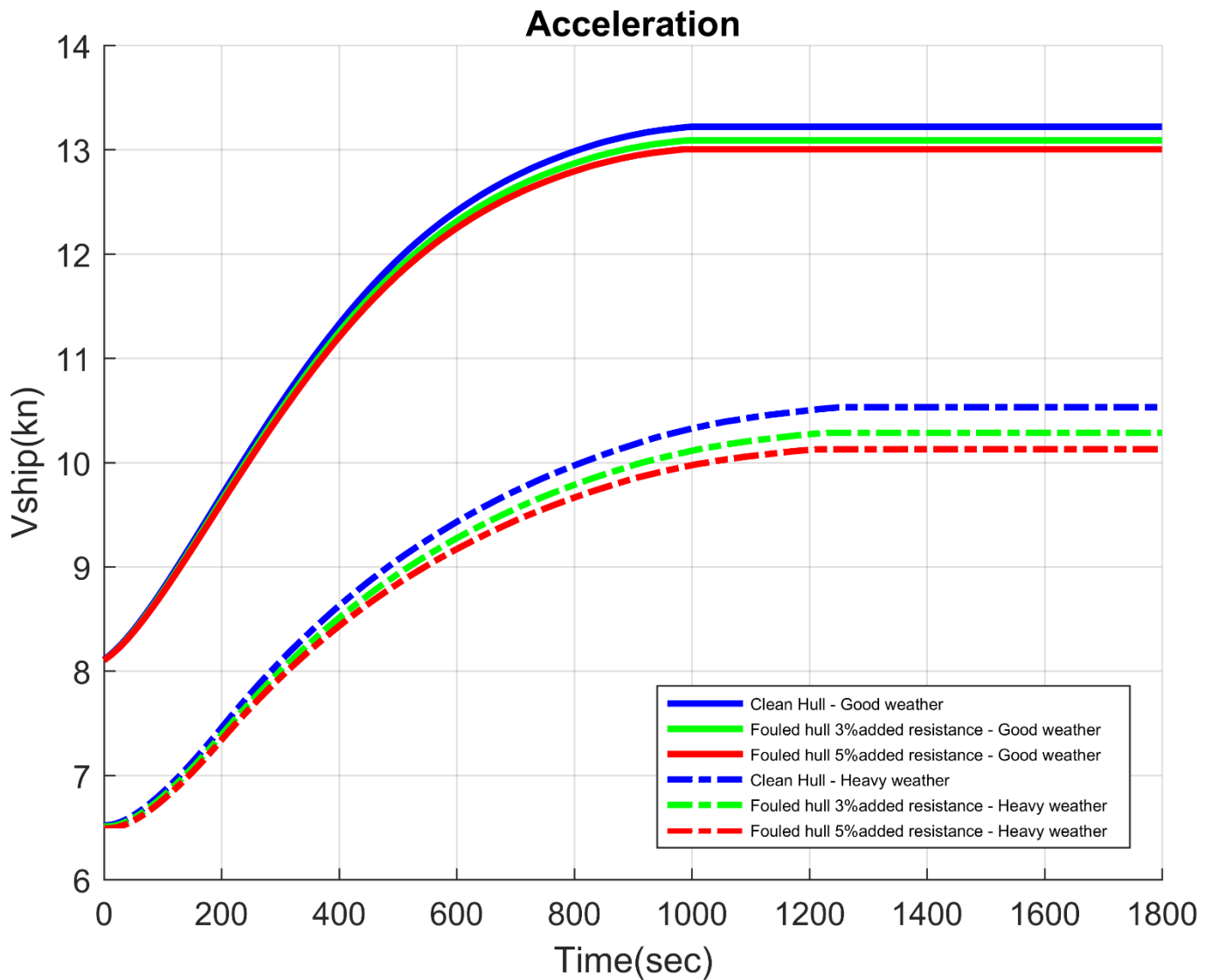
Από το παραπάνω γράφημα προκύπτει ότι η κατάσταση της γάστρας σε ήρεμη θάλασσα δεν επηρεάζει την επιτάχυνση των στροφών της έλικας, λόγω της ύπαρξης περιθωρίου ισχύος από τη μηχανή, ωστόσο σε κυματισμούς η ρυπασμένη γάστρα έχει μια μικρή επίδραση στις μέγιστες στροφές που μπορούν να αναπτυχθούν, της τάξης μισής με μία στροφή το λεπτό και αυτό γιατί πλέον η μηχανή ακόμα και με καθαρή γάστρα λειτουργεί στη μέγιστη ισχύ που μπορεί να προσφέρει. Η απότομη αλλαγή του ρυθμού αύξησης των στροφών για κακό καιρό, περίπου

στις 75.5 στροφές, οφείλεται στην παρέμβαση του περιοριστή ροπής, ο οποίος παρεμβαίνει για να αποτρέψει τη μηχανή από το να παραγάγει ροπή μεγαλύτερη από αυτήν που ορίζεται από τον κατασκευαστή για ασφαλή λειτουργία.



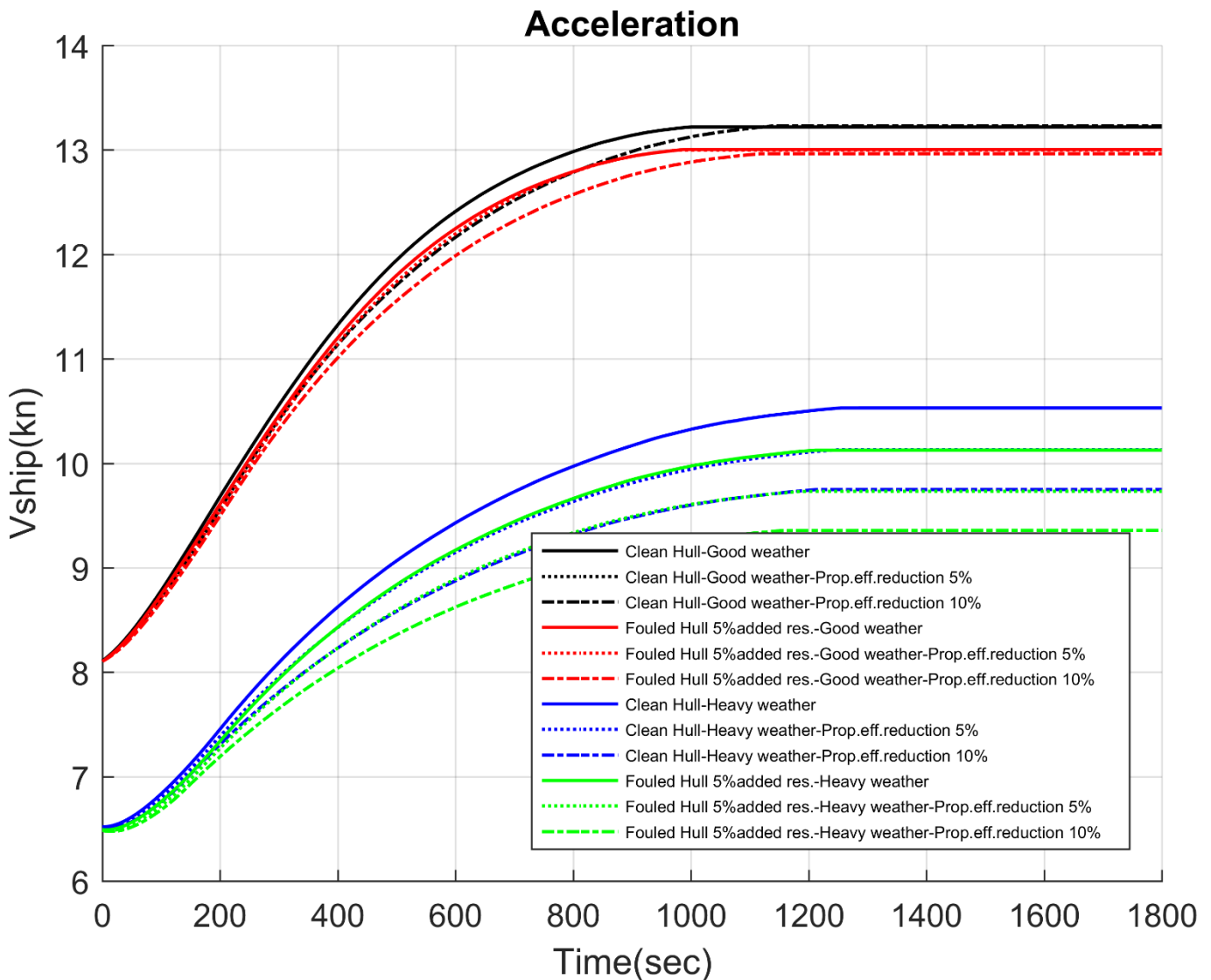
Εικόνα 6.2: Επιτάχυνση «Ταχύτητα περιστροφής έλικας- χρόνος» με μειωμένο β.α. έλικας

Όταν εκτός από την ρύπανση της γάστρας και την επακόλουθη αύξηση της αντίστασης του πλοίου υπεισέρχεται και μείωση του βαθμού απόδοσης της έλικας τα πράγματα γίνονται πιο περίπλοκα. Διαπιστώνεται ότι σε ήρεμο νερό η μείωση του βαθμού απόδοσης της έλικας κατά 5% είτε σε καθαρή, είτε σε ρυπασμένη γάστρα δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα. Μείωση, όμως του β.α. κατά 10% έχει σημαντική επίδραση στην επιτάχυνση και πιο συγκεκριμένα όχι στο τελικό αποτέλεσμα αλλά στον τρόπο του επιτυγχάνονται οι μέγιστες στροφές. (Το γεγονός ότι στην καμπύλη για καθαρή γάστρα–καλό καιρό–μειωμένο βαθμό απόδοσης 10% φαίνεται να φτάνει σε υψηλότερες στροφές είναι καθαρά θέμα απόκρισης του συστήματος, δηλαδή δεν έχει προλάβει το governor σταθεροποιήσει το σύστημα στις 80 στροφές). Ωστόσο, στην ύπαρξη κυματισμών αν και η ρύπανση της γάστρας δεν αλλάζει σημαντικά τις στροφές, η μείωση του β.α. της έλικας το κάνει. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί μείωση 10% του β.α. της έλικας οδηγεί σε πτώση περίπου 5 στροφών το λεπτό.



Εικόνα 6.3: Επιτάχυνση «Ταχύτητα πλοίου- χρόνος»

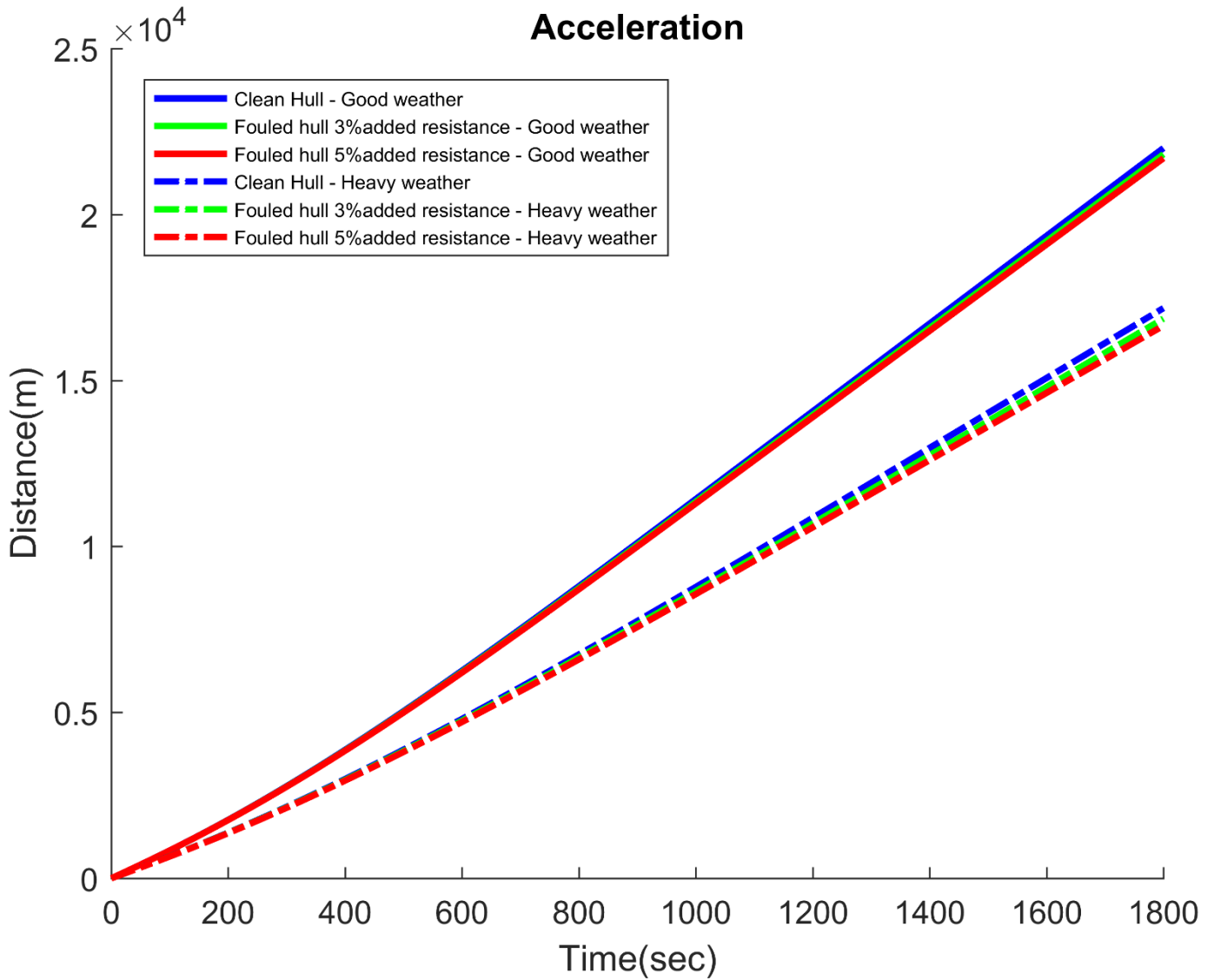
Όπως, και στην περίπτωση των στροφών παρατηρούμε ότι η σημαντικότερη επίδραση στην τελική ταχύτητα που μπορεί να επιτύχει το πλοίο εξαρτάται από την κατάσταση θάλασσας, οδηγώντας σε 2.5 περίπου κόμβους μικρότερη ταχύτητα για καθαρή γάστρα, αν και εδώ η ρύπανση της γάστρας φαίνεται να επηρεάζει το αποτέλεσμα ακόμα και σε ήρεμη θάλασσα με τάξη μεγέθους δέκατων του κόμβου. Αυτό συμβαίνει, διότι παρά το γεγονός ότι η μηχανή έχει αρκετή ροπή για να κρατήσει τις στροφές σταθερές, η ώση που παράγεται στην έλικα δεν επαρκεί για να υπερνικήσει την πρόσθετη αντίσταση. Και φυσικά, όπως είναι αναμενόμενο, η επίδραση της ρύπανση γίνεται πιο έντονα αισθητή σε θαλασσοταραχή, αφού η έλικα κινείται με χαμηλότερες στροφές όπως προέκυψε από το διάγραμμα 6.1 και καλείται να καλύψει μεγαλύτερη αντίσταση.



Εικόνα 6.4: Επιτάχυνση «Ταχύτητα πλοίου- χρόνος» με μειωμένο β.α. έλικας

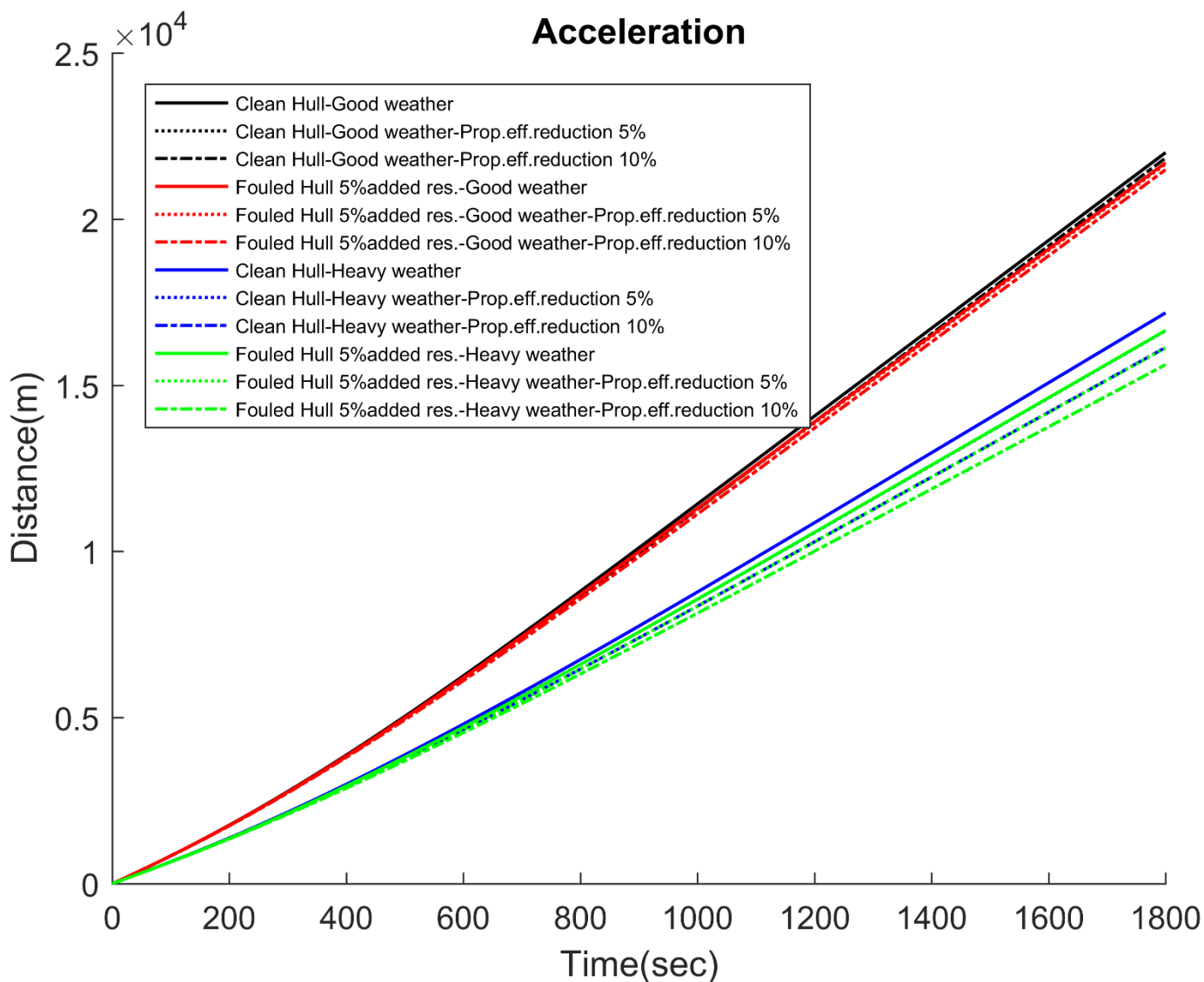
Σε ήρεμη θάλασσα με καθαρή ή ρυπασμένη γάστρα, παρατηρείται ότι μείωση του βαθμού απόδοσης της έλικας μέχρι 5% δεν έχει καμία επίδραση σε σχέση με τα προηγούμενα αποτελέσματα, ούτε σε σχέση με την τελική ταχύτητα, ούτε σε σχέση με τον τρόπο επίτευξης της. Μεγαλύτερη μείωση όμως, όπως 10%, παρά το γεγονός ότι δεν αλλάζει την τελική ταχύτητα αλλάζει τον χρόνο επίτευξής της. Αυτό συμβαίνει διότι με μειωμένο β.α. έλικας κατά 10% κατά την επιτάχυνση περίπου στις 76-77 στροφές παρεμβαίνει το torque limiter, δηλαδή ο περιοριστής ροπής και επομένως ο ρυθμός αύξησης των στροφών γίνεται πιο αργός. Στις δυσμενείς καιρικές συνθήκες τώρα, δεν παρατηρούμε κάποια διαφορά στον τρόπο επιτάχυνσης, αλλά μόνο στις τελικές τιμές, που όπως είναι αναμενόμενο όσο αυξάνεται η ρύπανση της γάστρας και μειώνεται ο β.α. της έλικας, τόσο μειώνεται η τελική ταχύτητα. Μάλιστα η πτώση ταχύτητας για ρυπασμένη γάστρα και μείωση β.α. έλικας 10% σε κακό καιρό σε σχέση με καθαρή γάστρα και έλικα, είναι σχεδόν ένας κόμβος.

Acceleration



Εικόνα 6.5: Επιτάχυνση «Απόσταση- χρόνος κατά την διάρκεια της επιβράδυνσης»

Στην απόσταση που διανύει το πλοίο κατά την επιτάχυνση φαίνεται ξεκάθαρα η διαφορά μεταξύ ήρεμης και μη θάλασσας, αφού στην πρώτη περίπτωση διανύει σχεδόν 50% μεγαλύτερη απόσταση από ότι στην πρώτη. Ωστόσο, η διάκριση μεταξύ ρυπασμένης και μη γάστρας είναι σχεδόν αδύνατη, ιδίως στην ήρεμη θάλασσα.

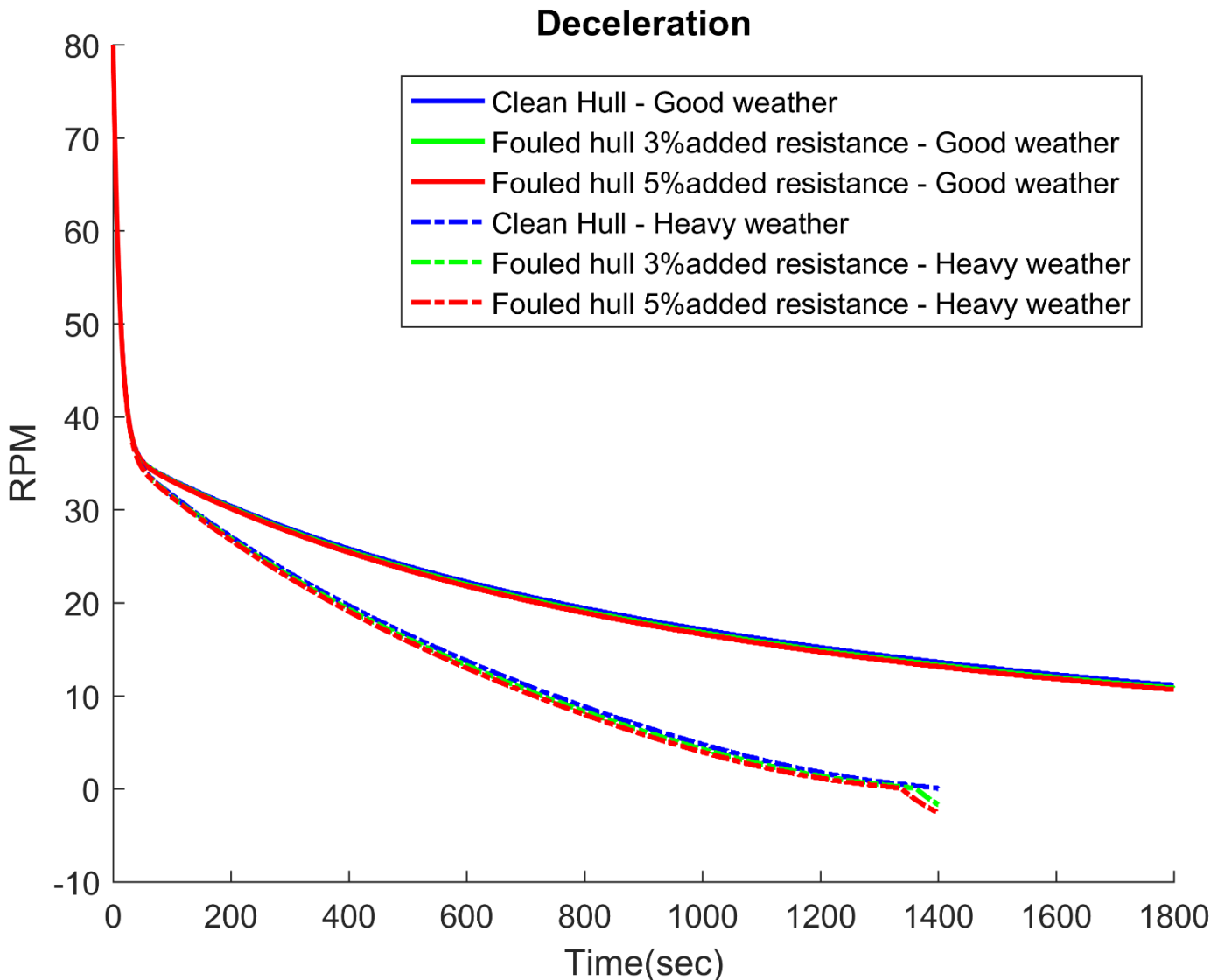


Εικόνα 6.6: Επιτάχυνση «Απόσταση- χρόνος κατά την διάρκεια της επιβράδυνσης» με μειωμένο β.α. έλικας

Τα συμπεράσματα που εξάγονται και από αυτό το διάγραμμα είναι σχεδόν ίδια με αυτά του 6.5, με μόνη διαφορά ότι όταν το πλοίο πλέει σε κυματισμούς με ρυπασμένη γάστρα και μειωμένο β.α. 5% ή 10% η διαφορά στην απόσταση αρχίζει να γίνεται αισθητή, αφού για παράδειγμα η διαφορά καθαρής γάστρας και έλικας και ρυπασμένης γάστρας και έλικας με μειωμένο βαθμό απόδοσης για κακό καιρό είναι σχεδόν 200 μέτρα μετά από μισή ώρα από την έναρξη της επιτάχυνσης.

6.2. Αποτελέσματα επιβράδυνσης

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν τα διαγράμματα 'Χρόνου-Ταχύτητας περιστροφής έλικας', «Χρόνου-Ταχύτητας πλοίου» και 'Χρόνου-Απόστασης που διανύθηκε' για όλες τις καταστάσεις επιβράδυνσης για τις οποίες έγινε προσομοίωση, δηλαδή για καθαρή γάστρα, ρυπασμένη γάστρα με προσαύξηση 3% και 5% στην αντίσταση, καλό καιρό και κυματισμούς καθώς επίσης και για έλικα με μειωμένο βαθμό απόδοσης 5% και 10% με μεταξύ τους συνδυασμούς.

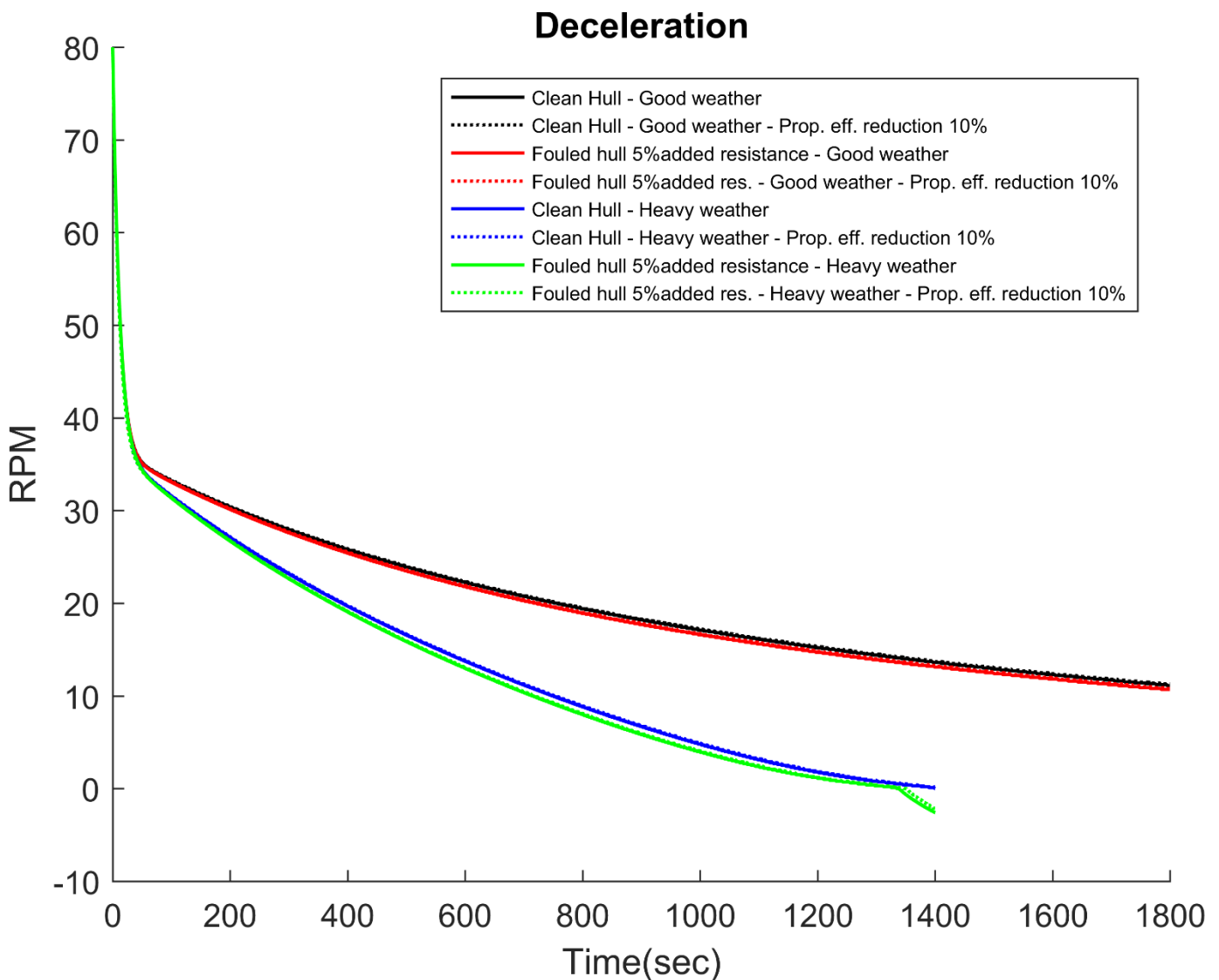


Εικόνα 6.7: Επιβράδυνση «Ταχύτητα περιστροφής έλικας- χρόνος»

Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ότι όταν ο κινητήρας παύει να είναι σε λειτουργία υπάρχει μια αρχική ταχύτατη πτώση στροφών περίπου στο μισό της αρχικής ταχύτητας περιστροφής της έλικας-μηχανής μέσα σε μερικά δευτερόλεπτα, ενώ στην συνέχεια οι στροφές αρχίζουν να μειώνονται με πολύ πιο αργό ρυθμό, ιδίως σε ήρεμη θάλασσα. Αυτή η αλλαγή στον ρυθμό μείωσης της περιστροφικής ταχύτητας της έλικας οφείλεται στην λειτουργία της έλικας σαν υδρόμυλος. Δηλαδή, η κίνηση του πλοίου έχει σαν αποτέλεσμα η έλικα να 'βλέπει'

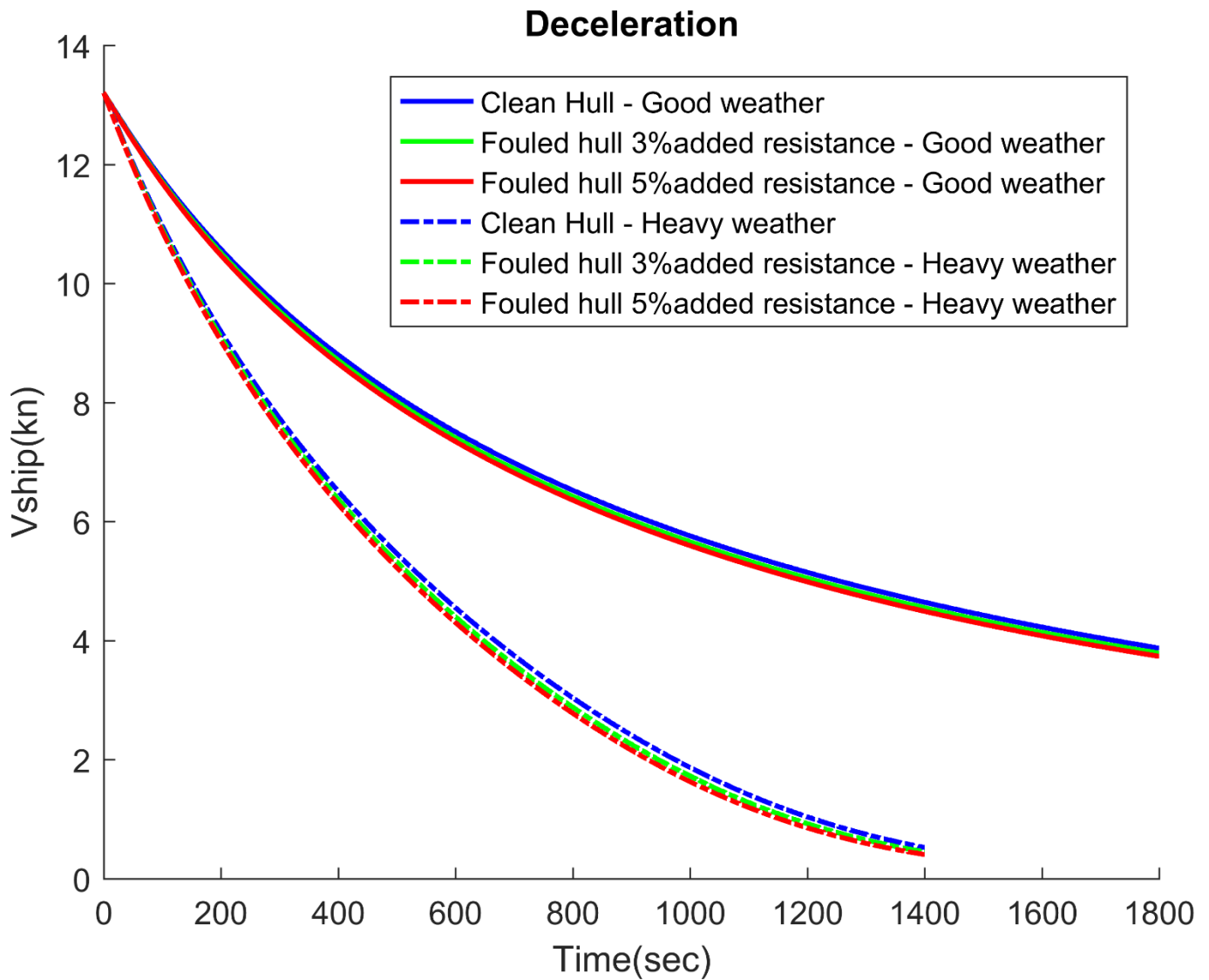
μια μάζα νερού να πέφτει πάνω της, προσδίδοντάς της ενέργεια να υπερνικήσει τις τριβές του αξονικού συστήματος και της μηχανής. Η αρχική απότομη πτώση στροφών δείχνει ότι η ενέργεια που μπορεί να απορροφήσει η έλικα από το ρευστό δεν είναι αρκετή για να διατηρήσει τις αρχικές της στροφές, ενώ όταν αυτές μειωθούν γύρω στις 35 στροφές το λεπτό το σύστημα αρχίζει να ισορροπεί. Ωστόσο, καθώς η ταχύτητα του πλοίου μειώνεται, όπως φαίνεται και στην εικόνα 6.9, η ενέργεια που μπορεί να απορροφήσει η έλικα μειώνεται και επομένως οι στροφές μειώνονται.

Το γεγονός ότι οι στροφές μειώνονται πιο έντονα σε θάλασσα με κυματισμούς οφείλεται κυρίως στην ταχύτερη μείωση της ταχύτητας του πλοίου. Τέλος, στις καμπύλες για ρυπασμένη γάστρα και κακό καιρό παρατηρείται μια αναστροφή της ταχύτητας της έλικας, το οποίο όμως δεν εκφράζει κάποια πραγματική κατάσταση, αλλά είναι απλώς αδυναμία της μοντελοποίησης να πιάσει τις οριακές συνθήκες, για αυτό και σταματάει η προσομοίωση.



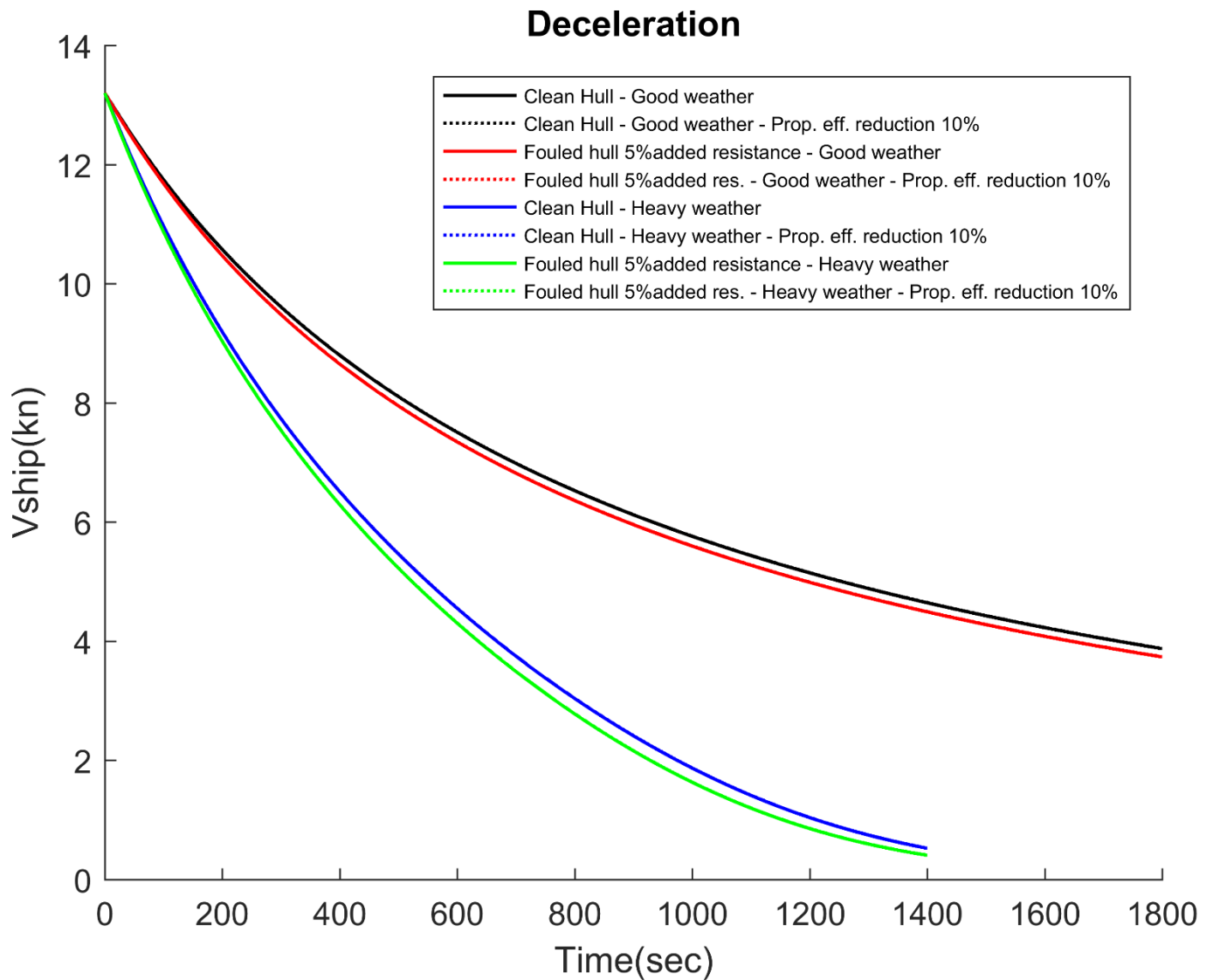
Εικόνα 6.8: Επιβράδυνση «Ταχύτητα περιστροφής έλικας- χρόνος» με μειωμένο β.α έλικας

Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα γίνεται φανερό ότι η μείωση του βαθμού απόδοσης της έλικας δεν έχει σχεδόν καμία επίδραση στην επιβράδυνση των στροφών της έλικας, με βασικό παράγοντα που επηρεάζει τον ρυθμό μείωσης τους να είναι η κατάσταση θάλασσας.



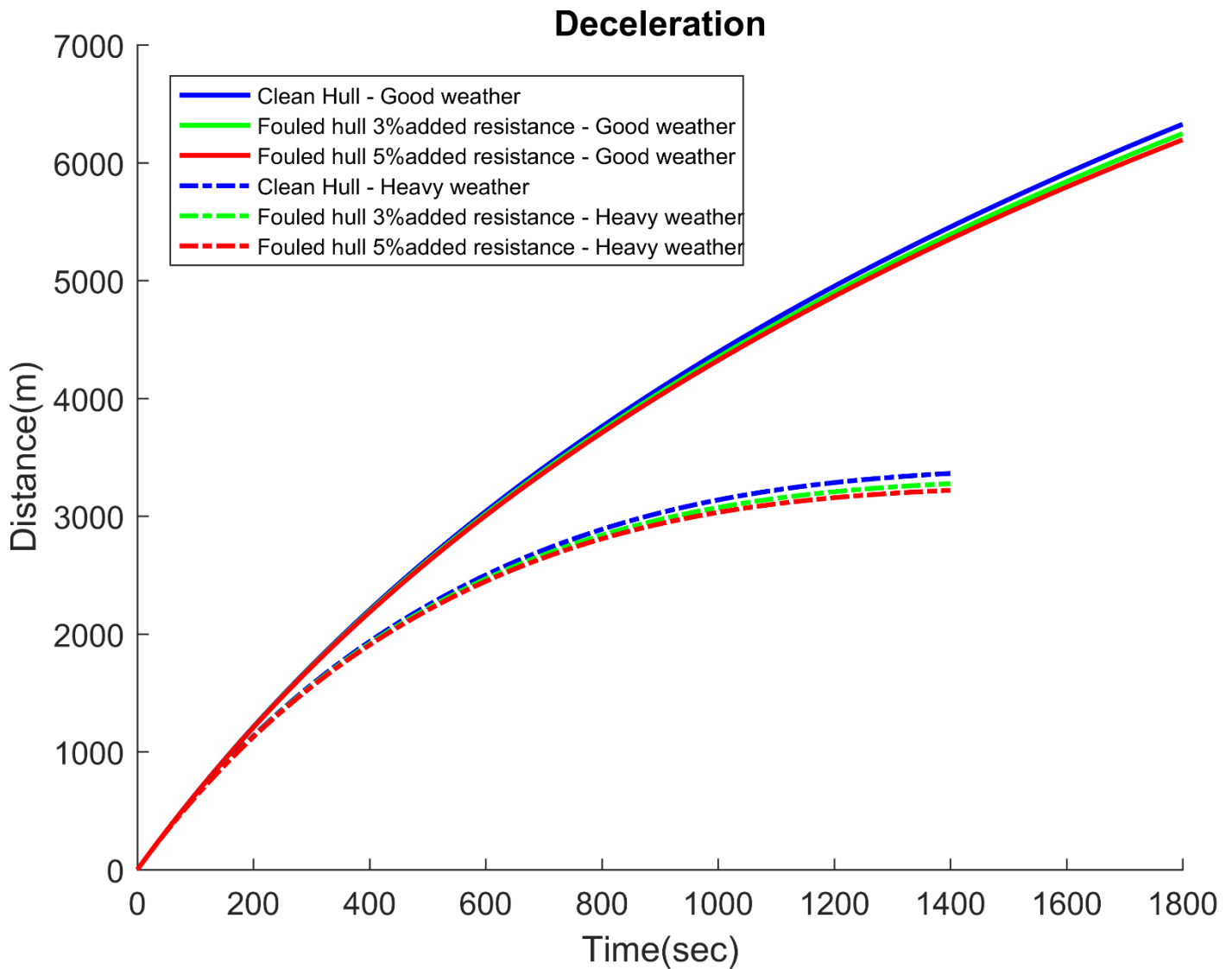
Εικόνα 6.9: Επιβράδυνση «Ταχύτητα πλοίου- χρόνος»

Όπως και με τις στροφές της έλικας, έτσι και με την ταχύτητα του πλοίου φαίνεται ότι η ρύπανση της γάστρας έχει πολύ μικρή επίδραση στον ρυθμό μείωσης της ταχύτητας με σημαντικότερο παράγοντα να είναι η κατάσταση θάλασσας.



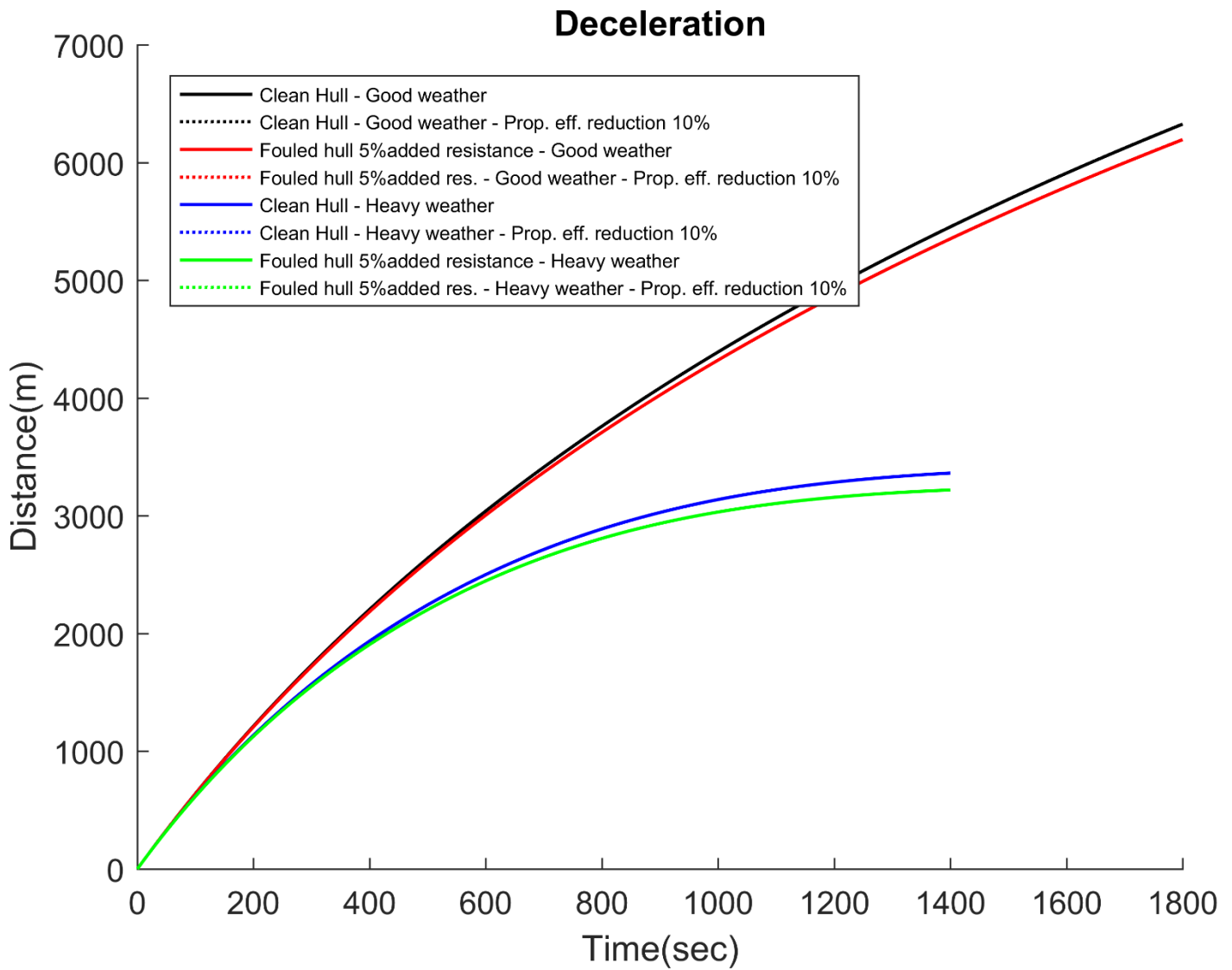
Εικόνα 6.10: Επιβράδυνση «Ταχύτητα πλοίου- χρόνος» με μειωμένο β.α. έλικας

Όσον αφορά την επίδραση του βαθμού απόδοσης της έλικας για τον ρυθμό μείωσης της ταχύτητας κατά την επιβράδυνση του πλοίου παρατηρείται ότι είναι μη μετρήσιμη. Οι καμπύλες για καθαρή έλικα και έλικα με β.α. μειωμένο κατά 10% είναι ίδιες. Αυτή η μη επίδραση του β.α. της έλικας στην ταχύτητα του πλοίου οφείλεται στο γεγονός ότι η ώση που παράγει (και πιο συγκεκριμένα αντίσταση αφού είναι αντίθετη της κίνησης του πλοίου) είναι πολύ μικρή σε σχέση με την αντίσταση του πλοίου, οπότε η μεταβολή του β.α. με την συνεπακόλουθη μικρή μεταβολή της αντίστασης (διότι η παραγόμενη ώση και ροπή κατά τον ανεμισμό της έλικας είναι πολύ μικρή σε σχέση με τις μέγιστες δυνατότητες της, άρα η μεταβολή του β.α. δεν θα επηρεάσει σημαντικά τα μεγέθη αυτά) δεν είναι ικανή να επηρεάσει τον ρυθμό μεταβολής της ταχύτητας.



Εικόνα 6.11: Επιβράδυνση «Απόσταση- χρόνος κατά την διάρκεια της επιβράδυνσης»

Από τη στιγμή που και οι ταχύτητες κατά την επιβράδυνση για ρυπασμένη και καθαρή γάστρα δεν διέφεραν σημαντικά ήταν αναμενόμενο ότι και η απόσταση που διανύθηκε κατά τις επιβραδύνσεις δεν θα διέφερε, το οποίο επιβεβαιώνεται και από το διάγραμμα 6.11. Φαίνεται ότι η διαφορά στην απόσταση για καθαρή και ρυπασμένη και καθαρή γάστρα δεν ξεπερνά τα 100 μέτρα για τα 1800 και 1400 sec προσομοίωσης σε ήρεμη και μη ήρεμη θάλασσα. Φυσικά, η διαφορά μεταξύ ήρεμης και μη θάλασσας είναι εμφανής με την πρώτη περίπτωση το πλοίο να έχει διανύσει σχεδόν δύο χιλιόμετρα παραπάνω στα 1400 sec έχοντας ακόμα ταχύτητα περίπου πέντε κόμβων, ενώ στην δεύτερη περίπτωση έχει σχεδόν ακινητοποιηθεί.



Εικόνα 6.12: Επιβράδυνση «Απόσταση- χρόνος κατά την διάρκεια της επιβράδυνσης» με μειωμένο β.α. έλικας

Τέλος, η μη επίδραση του β.α. της έλικας στην επιβράδυνση φαίνεται και στο διάγραμμα της απόστασης 6.12, το οποίο ήταν αναμενόμενο και από το διάγραμμα της ταχύτητας 6.10.

6.3. Συμπεράσματα

Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή της εργασίας, στόχος ήταν να ποσοτικοποιηθεί η επίδραση της ρύπανσης της γάστρας και των καιρικών φαινομένων στην επιτάχυνση και επιβράδυνση ενός πλοίου.

Τα διαγράμματα που παρουσιάζονται στην προηγούμενη παράγραφο έχουν εξαχθεί για ένα συγκεκριμένο πλοίο, ωστόσο δύνανται να δώσουν μια γενικότερη εικόνα για όλα τα πλοία, διότι η σημαντικότητα της επίδρασης των εξεταζόμενων παραγόντων θα είναι παρόμοιας τάξης για όλα τα πλοία παρόμοιων χαρακτηριστικών, δηλαδή αργόπλων πλοίων εκτοπίσματος όπως τα bulk carriers και τα tankers.

Γίνεται αντιληπτό ότι η μεγαλύτερη επίδραση στα εξεταζόμενα μεγέθη κατά την επιτάχυνση και επιβράδυνση είναι η κατάσταση θάλασσας, αφού επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την τελική ταχύτητα που μπορεί να αναπτύξει το πλοίο, σχεδόν 20% μικρότερη για κυματισμούς από άνεμο 7 Beaufort, αλλά και τον χρόνο για να την επιτύχει, αφού για καθαρή γάστρα θέλει 20% περισσότερο χρόνο σε κυματισμένη από ότι ήρεμη θάλασσα. Η επίδραση αυτή όμως δεν γίνεται έντονα αντιληπτή μόνο στην επιτάχυνση, αλλά και στην επιβράδυνση παρά την 'απουσία' του κινητήρα, ο οποίος, θα μπορούσε να ειπωθεί, ότι δημιουργεί αυτήν την διαφορά στην επιτάχυνση λόγω της αδυναμίας να καλύψει πλήρως την απαιτούμενη πρόσθετη ισχύ που χρειάζεται κατά την πλεύση σε κυματισμούς. Πιο συγκεκριμένα, για καθαρή γάστρα και θάλασσα με κύματα ύψους τεσσάρων μέτρων και κατεύθυνση αντίθετη από αυτήν της κίνησης του πλοίου, παρατηρείται ότι μετά από ένα τέταρτο της ώρας η ταχύτητα του πλοίου είναι περίπου 55% μικρότερη από ότι σε ήρεμη θάλασσα, ενώ μετά από περίπου 25 λεπτά από την έναρξη της επιβράδυνσης το πλοίο έχει σχεδόν σταματήσει, σε αντίθεση με την ήρεμη θάλασσα όπου συνεχίζει να κινείται με σχεδόν το ένα τρίτο της αρχικής ταχύτητας.

Στον αντίποδα της επίδρασης της κατάστασης θάλασσας βρίσκεται η επίδραση της ρυπασμένης γάστρας. Η επίδραση της ναίμεν φαίνεται, ιδίως στην τελική ταχύτητα που μπορεί να αναπτύξει το πλοίο (για 3% και 5% αυξημένη αντίσταση λόγω ρύπανσης της γάστρας η ταχύτητα μειώνεται 1% και 1.6% σε ήρεμη θάλασσα και 2.3% και 3.9% σε κυματισμένη αντίστοιχα), αλλά σε πραγματικές συνθήκες δεν θα μπορούσε να μετρηθεί. Δηλαδή, σε εργαστηριακό περιβάλλον και σε περιβάλλον προσομοιώσεων όπου όλες οι παράμετροι είναι δεδομένες είναι δυνατόν να γίνει αντιληπτή η ρύπανση της γάστρας και μάλιστα αν υπάρχουν αρκετά δεδομένα, να προσεγγιστεί και ο βαθμός ρύπανσής της. Ωστόσο, σε πραγματικές συνθήκες, όπου θα ήταν ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο η αξιολόγηση της κατάστασης της γάστρας από την απόκριση του πλοίου στην επιτάχυνση και την επιβράδυνση, αυτό είναι σχεδόν αδύνατον. Η μη πλήρης γνώση όλων των εξωτερικών παραγόντων ή η αδυναμία προσδιορισμού της ακριβούς τους επίδρασης, όπως το βάθος του νερού όπου πλέει το πλοίο (αύξηση της αντίστασης κατά την πλεύση σε ρηχό νερό), η ύπαρξη θαλάσσιων ρευμάτων και ακριβής ταχύτητά τους, ο ακριβής προσδιορισμός της κατάστασης θάλασσας (ακόμα και μικρή απόκλιση στην κατάσταση θάλασσα θα οδηγήσει σε διαφορετικά συμπεράσματα λόγω της έντονης επίδρασής της) καθιστούν οποιαδήποτε εκτίμηση για την κατάσταση της γάστρας επισφαλή.

Όσον αφορά την επίδραση της μείωσης του βαθμού απόδοσης της έλικας έχει διαφορετική σημαντικότητα στην επιτάχυνση και την επιβράδυνση. Κατά την επιτάχυνση, αν και σε καλές συνθήκες θάλασσας η επίδραση είναι σχετικά μικρή, κατά κύριο λόγο επηρεάζεται ο απαιτούμενος χρόνος για επιτάχυνση (υπάρχει αύξηση περίπου 10% του απαιτούμενου χρόνου για μείωση του β.α. κατά 10%, ενώ για μείωση 5% του β.α. ο απαιτούμενος χρόνος δεν μεταβάλλεται) και όχι η τελική ταχύτητα. Σε κυματισμούς αυτό αλλάζει και η επίδραση γίνεται εντόνως σημαντική επηρεάζοντας όχι τόσο τον απαιτούμενο χρόνο επιτάχυνσης αλλά την τελική ταχύτητα του πλοίου (μείωση 5% και 10% του βαθμού απόδοσης της έλικας οδηγεί σε μείωση της ταχύτητας κατά 3.9% και 7.5% αντίστοιχα για καθαρή αλλά και ρυπασμένη γάστρα). Στην επιβράδυνση ωστόσο φαίνεται πως ο βαθμός απόδοσης της έλικας έχει σχεδόν μηδενική επίδραση, αφού δεν επηρεάζει ούτε τον ρυθμό μείωσης των στροφών, ούτε τον ρυθμό μείωσης της ταχύτητας. Το γεγονός αυτό πιθανότατα οφείλεται στο ότι κατά την επιβράδυνση, όπου η

έλικα βρίσκεται σε κατάσταση ανεμισμού και η ώση που παράγει (και πιο συγκεκριμένα αντίσταση αφού είναι αντίθετη της κίνησης του πλοίου) και η ροπή που παράγεται σε αυτήν και δίνεται προς κατανάλωση στο αξονικό σύστημα είναι ένα πολύ μικρό ποσοστό σε σχέση με τις μέγιστες δυνατότητες της, αλλά και την ολική αντίσταση του πλοίου. Αξίζει να σημειωθεί ότι για την επιβράδυνση για να είναι πιο ασφαλή τα συμπεράσματα σε σχέση με την μη επίδραση του βαθμού απόδοσης της έλικας, δεν χρησιμοποιήθηκε μόνο η υπόθεση σταθερής ώσης-αυξημένης ροπής για την μείωση του β.α. , αλλά έγιναν και προσομοιώσεις με μείωση ώσης-σταθερή ροπή και άλλους ενδιάμεσους συνδυασμούς, οι οποίοι οδήγησαν στο ίδιο συμπέρασμα.

6.4. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Στην παρούσα εργασία έγινε μια αρχική προσέγγιση της συνεργασίας μηχανής-έλικας γάστρας κατά την επιτάχυνση και επιβράδυνση του πλοίου και πως επηρεάζεται από την κατάσταση θάλασσας και την ρύπανση της γάστρας. Για την εργασία χρησιμοποιήθηκαν επιμέρους μοντέλα των οποίων η ακρίβεια δεν είναι η καλύτερη δυνατή, όπως ο υπολογισμός της αντίστασης του πλοίου, οι απώλειες του αξονικού συστήματος. Επίσης, έγιναν και κάποιες παραδοχές όπως για τις απώλειες στον κινητήρα κατά την επιβράδυνση, οι οποίες χρειάζονται περαιτέρω έρευνα και βελτίωση.

Επομένως, οι προτάσεις για μελλοντικές εργασίες που θα στοχεύσουν στην βελτίωση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων, ώστε να υπάρξει ακόμα μεγαλύτερη σιγουριά για την αξιοπιστία των ανωτέρω συμπερασμάτων, είναι οι εξής:

- Προσδιορισμός της αντίστασης του πλοίου μέσω πειραματικών μεθόδων ή μεθόδων CFD με τον πλήρη προσδιορισμό της γεωμετρίας της γάστρας.
- Υπολογισμός της πρόσθετης αντίστασης λόγω κυματισμών μέσω πειραματικών δεδομένων ή αριθμητικών μεθόδων, όπως CFD.
- Διόρθωση του βαθμού ώσης και ροπής της έλικας λόγω λειτουργίας κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια, αν είναι γνωστή η απόκριση του πλοίου σε κυματισμούς.
- Δημιουργία ένα τριβολογικού μοντέλου για τον ακριβή προσδιορισμό των απωλειών του κινητήρα όταν αυτός δεν λειτουργεί αλλά παρασύρεται από την κίνηση της έλικας.
- Τέλος, η μεταβολή του βαθμού ομόρρου συναρτήσει της ταχύτητας λήφθηκε βιβλιογραφικά, ο οποίος είχε προκύψει από στατιστικά αποτελέσματα. Ο πειραματικός προσδιορισμός της μεταβολής της κατανομής του ομόρρου πίσω από το υπό μελέτη πλοίο θα βοηθούσε σίγουρα σε ακόμα καλύτερη προσέγγιση των πραγματικών αποτελεσμάτων.

7. Βιβλιογραφία

- [1] Πολίτης Γεράσιμος, «Αντίσταση και πρόωση πλοίου», 3η έκδοση 2016
- [2] Κυρτάτος Νικόλαος, «Motor THERModynamics User Manual», Έκδοση 2.1 2013
- [3] Φωτεινός Μιχάλης, «Propeller and ship hull submodels used in conjunction with MOTHER engine simulation software», 2η έκδοση 2020
- [4] MAN B&W, « MAN B&W S60MC-C8.2-TII Project Guide», Έκδοση 0.5 2014
- [5] Carton J.S., «Marine Propellers and Propulsion», 2η έκδοση 2007
- [6] Harvard, «Resistance and propulsion of ships», 1983
- [7] Campora U & FigariM, «Numerical simulation of ship propulsion transient and full-scale validation”, 2003
- [8] Harvard, «Factors Affecting the STOPPING ABILITY OF SHIPS»,1975
- [9] Robinson, «STOPPING, BACKING AND TURNING SHIPS», 1916
- [10] M.W.C. Oosterveld and P. VAN Oossanen, «FURTHER COMPUTER-ANALYZED DATA OF THE WAGENINGEN B-SCREW SERIES», 1975
- [11] J. Holtron & G.G.J. Mennen, «AN APPROXIMATE POWER PREDICTION METHOD», 1982
- [12] Robert F. Roddy, David E. Hess, Will Faller, «NEURAL NETWORK PREDICTION OF THE 4-QUADRANT WAGENINGEN PROPELLER SERIES», 2006
- [13] Shukui Liu, Apostolos Papanikolaou, Victor Bolbot, «An Improved Formula for Estimating the Added Resistance of Ships in Engineering Applications»,2016
- [14] ITTC-Recommended Procedures and Guidelines, «Preparation, Conduct and Analysis of Speed/Power Trials», 2017
- [15] MIT Ocean Engineering, «2.019 Design of Ocean Systems Lecture 9 Ocean Wave Environment», 2011
- [16] Alexandra H. Techet, MIT Ocean Engineering, «13.42 Lecture: Ocean Waves»,2005
- [17] Bossler, «Journal Bearings», 2008
- [18] DNV GL, «RULES FOR CLASSIFICATION, Part 4 Systems and components, Chapter 4 Rotating machinery- power transmission» 2017
- [19] Martin Alexandersson, «A STUDY OF METHODS TO PREDICT ADDED RESISTANCE IN WAVES»,2009
- [20] Dong-MinPark, Jae-Hoon Lee, Yoo-Won Jung, Jaehoon Lee, Yonghwan Kim, Frederik Gerhardt, « Experimental and numerical studies on added resistance of ship in oblique sea conditions»,2019

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ (ΚΩΔΙΚΕΣ)

Κύριος κώδικας επιτάχυνσης που συνεργάζεται με το MOTHER

```
SUBROUTINE USERDLL ( FIRST, STATE, VARIABLE, NVAR, &  
                    NCYL, NPLEN, NVALVE, NCOMP, NTURB, &  
                    NCSHAFT, NSHAFT, NLOAD, NGEAR, NCLUTCH, &  
                    NHEXC, NSPDGOV, NPID )
```

```
!DEC$ATTRIBUTES DLLEXPORT :: USERDLL  
!DEC$ATTRIBUTES C, ALIAS: 'USERDLL' :: USERDLL  
!DEC$ATTRIBUTES VALUE :: FIRST  
!DEC$ATTRIBUTES REFERENCE :: STATE  
!DEC$ATTRIBUTES REFERENCE :: VARIABLE  
!DEC$ATTRIBUTES VALUE :: NVAR  
!DEC$ATTRIBUTES VALUE :: NCYL  
!DEC$ATTRIBUTES VALUE :: NPLEN  
!DEC$ATTRIBUTES VALUE :: NVALVE  
!DEC$ATTRIBUTES VALUE :: NCOMP  
!DEC$ATTRIBUTES VALUE :: NTURB  
!DEC$ATTRIBUTES VALUE :: NCSHAFT  
!DEC$ATTRIBUTES VALUE :: NLOAD  
!DEC$ATTRIBUTES VALUE :: NGEAR  
!DEC$ATTRIBUTES VALUE :: NCLUTCH  
!DEC$ATTRIBUTES VALUE :: NHEXC  
!DEC$ATTRIBUTES VALUE :: NSPDGOV  
!DEC$ATTRIBUTES VALUE :: NPID
```

```
!FIRST      = .TRUE. the first time this SUB is called.  
!  
!STATE      = 'STEADY' during steady-state simulation.  
!  
!           = 'TRANS1' during the initial transient simulation.  
!  
!           = 'TRANS2' during the transient simulation.  
!VARIABLE   = The array containing the variables to be exchanged with  
!  
!           the main code.  
!NVAR       = The number of variables to be exchanged with the main code.  
!NCYL       = Number of cylinders  
!NPLEN      = Number of plenums  
!NVALVE     = Number of valves  
!NCOMP      = Number of compressors  
!NTURB      = Number of turbines  
!NCSHAFT    = Number of crankshafts  
!NSHAFT     = Number of shafts other than crankshafts  
!NLOAD      = Number of shaft loads  
!NGEAR      = Number of gears  
!NCLUTCH    = Number of clutches  
!NHEXC      = Number of heat exchangers  
!NSPDGOV    = Number of speed governors  
!NPID       = Number of PID controllers
```

```
CHARACTER*6 STATE  
LOGICAL FIRST  
DIMENSION VARIABLE (NVAR)
```

```
!----- PLACE USER CODE HERE -----
```



```

t1 = W*(1.57-2.3*(CB/CWL)+1.5*CB)      ! SSPA
t2 = 0.5*CB-0.15                       ! Danckwardt
t3 = 0.001979*(LBP/(BREADTH-BREADTH*CPR))+1.0585*(BREADTH/LBP)-0.00524-
0.1418*(Dia**2)/(BREADTH*DRAFT) ! Holtrop-Mennen
t4 = 0.5*CPR-0.12                       ! Heckscher
t = (t1+t2+t3+t4)/4.0                   ! Thrust Deduction factor
J= VA/(RPS*Dia)

! Propeller Thrust and Torque Calculation
! open file containing coefficients AK and BK
OPEN (UNIT=1, FILE='Harmonic_Coefficients.txt', STATUS='OLD', POSITION='REWIND')

10 FORMAT ( F11.7, 1X, F11.7, 1X, F11.7, 1X, F11.7, 1X )

SUM_TEMP_CT = 0
SUM_TEMP_CQ = 0
KK = 0
DO II = 1, 31
! read file containing coefficients AK and BK
READ(1,10,END=99)AQ, BQ, AT, BT

CT_TEMP = ( ( AT * COS((KK)*BETA) + BT * SIN((KK)*BETA) ) ) + SUM_TEMP_CT
SUM_TEMP_CT = CT_TEMP

CQ_TEMP = ( ( AQ * COS((KK)*BETA) + BQ * SIN((KK)*BETA) ) ) + SUM_TEMP_CQ
SUM_TEMP_CQ = CQ_TEMP

KK = KK + 1
ENDDO

99 CLOSE(1)

CT = SUM_TEMP_CT * 0.01                 ! propeller thrust coefficient [-]
CQ = SUM_TEMP_CQ * (-0.001)            ! propeller torque coefficient [-]
TPROP = CT * 0.5 * DENS * (VR**2) * A0  ! propeller thrust [N]
QPROP = CQ * 0.5 * DENS * (VR**2) * A0 * Dia ! propeller torque [n*m]
if (VARIABLE(10) < 0.92) then
  QPROP=0
endif
VARIABLE(2) = QPROP
VARIABLE(6) = BETA_DEG
VARIABLE(7) = CQ

!-----
! Ship Surge Model

! Resistance using the Holtrop-Mennen Method [CALM WATER RESISTANCE]

allocate(a(6))
a=(/3.79627728,2.51630569,0.402705669,-
0.0480123162,0.00176311750,0.00000653056486/)
R_SHIP=0
DO II=1,6
  R_SHIP=R_SHIP+a(II)*V_SHIP_PR_2**(II)
ENDDO

allocate(a2(6))

! Added resistance due to waves

! a2=(/168.667435,-47.2418060,7.39771271,-0.624684811,2.69088447E-02,-4.61831223E-
04/)

```

```

! DO II=1,6
  ! R_SHIP=R_SHIP+a2(II)*V_SHIP_PR_2**(II)
! ENDDO

R_SHIP=R_SHIP*1000      !Convert ship resistance in N

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

IF( FIRST ) THEN
  OPEN (UNIT=2, FILE='DLL_RESULTS.TXT',SHARE='DENYNONE')
  WRITE(2,*) ' RPM', ' TORQUE', ' CQ', ' BETA', ' Va', '
V_SHIP', ' FUEL_INDEX', ' Running time', ' Crankshaft power', '
Crankshaft torque', ' Compressure delivery pressure', ' Compressor instant torque',
' Distance', ' Crank angle'
  RETURN
ENDIF

V_DOT_SHIP = ( ( (1-t) * TPROP ) - R_SHIP ) / ( M_TOTAL ) ! ship acceleration
[m/sec^2]

V_SHIP = V_SHIP_PR + DT * V_DOT_SHIP ! ship speed [m/sec]
DISTANCE = DISTANCE_PREVIOUS + DT*V_SHIP ! travelled distance [m]

VARIABLE(4) = V_SHIP / 0.5144444 ! ship speed [knots]
VARIABLE(5) = DISTANCE ! travelled distance [m]

1000 FORMAT ( F8.3, 1X, F18.2, 1X, F13.6, 1X, F8.5, 1X, F8.5, 1X, F8.5, 1X, F8.5,
1X, F8.4, 1X, F15.2, 1X, F10.2, 1X, F10.2, 1X, F30.4, 1X, F10.1, 1X, F10.2, 1X,
F10.5, 1X)
WRITE(2,1000) VARIABLE(1), QPROP, CQ, BETA_DEG, VA, V_SHIP, VARIABLE(9),
VARIABLE(10), VARIABLE(20), VARIABLE(19), VARIABLE(17), VARIABLE(14), DISTANCE,
VARIABLE(21), DT

!----- END OF USER CODE -----
RETURN
END

```

Κύριος κώδικας επιβράδυνσης

```
program deceleration

implicit none
REAL:: DT, CQ, CT, Dia, A0, SUM_TEMP_CT, SUM_TEMP_CQ, CQ_TEMP, CT_TEMP, AQ, BQ, AT,
BT
REAL:: BETA , BETA_DEG,M_TOTAL, LBP, BREADTH, DRAFT, DEPTH, CB,CWL, CPR, CM,
M_SHIP, M_ADD, J, R_SHIP
REAL:: V_DOT_SHIP,V_SHIP, PI, DENS , Jengine, Jprop, J_TOTAL
INTEGER:: II, KK , ll, jj
REAL:: W1,W2,W3,W4,W,t,t1,t2,t3,t4 ,running_time, Qshaft, rps_dot, R1,R2,mfriction,
Qshaft1, Qshaft2
REAL,ALLOCATABLE,DIMENSION(:)::a, QPROP,TPROP,speed,speed_kn, rpm,rps, vr,va,
beta2, distance,a2,ww, a3

PI = 4.D0 * ATAN(1.D0)
DT=0.05 !dt for running datas
running_time=1400 ! sec
jj=running_time/DT !number of cycles
allocate(speed(jj),rpm(jj),QPROP(jj), TPROP(jj),
speed_kn(jj),rps(jj),vr(jj),va(jj),beta2(jj), distance(jj))

!iniatial values
Jengine = 150000 !kg/m^2
Jprop = 90000 !kg/m^2
J_TOTAL = Jengine + Jprop !kg/m^2
rpm(1) = 80 !Shaft Revolutions [rpm]
rps(1) = rpm(1) / 60 !Shaft revolutions per second
speed_kn(1) = 13.2 !ship's speed in [kn]
speed(1)=speed_kn(1)*.5144444 !ship's speed in [m/s]
distance(1) = 0 !Ship covered at previous time step [m]

DENS = 1025 !Sea Water Density [kg/m^3] !na to stelnei to
mother
Dia = 7.2 !propeller diameter [m]
A0 = PI * ( (Dia**2)/4 ) !propeller disk area [m^2]

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

LBP = 217 ! Ship Length in meters
BREADTH = 32.26 ! Ship Breadth in meters
DRAFT = 12.20 ! Ship Draft in meters
DEPTH = 19.30 ! Ship Depth in meters
CB = 0.8479 ! Block Coefficient
CWL = 0.9966 ! Waterplane Coefficient
CM = 0.9971 ! Miship Section Coefficient
CPR = 0.8508 ! Prismatic Coefficient
M_SHIP = 74327*1000 ! Ship mass in kg. full loaded
M_ADD = 0.1*M_SHIP ! Added Mass
M_TOTAL=M_SHIP+M_ADD

!!! For design draft
W1 = 0.75*CB-0.24 ! Wake Fraction- Kruger
W2 = 0.25+2.5*(CB-0.6)**2 ! Wake Fraction - Troost
W3 = 0.5*CPR*1.6*16/(1+DEPTH/DRAFT*10+LBP/BREADTH) ! Wake Fraction -
Schneekluth 1988
W4 = 0.7*CPR-0.18 ! Wake Fraction - Heckscher for trawlers
w= (W1+W2+W3+W4)/4.0

!calculate wake fracton factor
```



```

t1 = w*(1.57-2.3*(CB/CWL)+1.5*CB)      ! SSPA
t2 = 0.5*CB-0.15                       ! Danckwardt
t3 = 0.001979*(LBP/(BREADTH-BREADTH*CPR))+1.0585*(BREADTH/LBP)-0.00524-
0.1418*(Dia**2)/(BREADTH*DRAFT) ! Holtrop-Mennen
t4 = 0.5*CPR-0.12                       ! Heckscher
t = (t1+t2+t3+t4)/4.0                   ! Thrust Deduction factor

!Resistance in normal weather
allocate(a(6),a2(6),a3(6))
a=(/3.79627728,2.51630569,0.402705669,-
0.0480123162,0.00176311750,0.00000653056486/)

! Shaft resistance
a2=(/42.2704849,-0.542535782,-4.45666611E-02,2.59063393E-03,-4.42854216E-
05,2.47657852E-07/)

!Resistance due to bad weather
a3=(/168.667435,-47.2418060,7.39771271,-0.624684811,0.0269088447,-0.000461831223/)

allocate(ww(jj-1))

do ll=1,jj-1

if (speed(ll)>0) then
ww(ll)= w - (14.5 * 0.5144444 - speed(ll))/0.1*0.002      ! Change of wake
fraction W according to vessel's speed
else
ww(ll)=ww(ll-1)
endif

va(ll) = speed(ll) *(1-ww(ll))
vr(ll) = sqrt((va(ll)**2)+(0.7*PI*Dia*rps(ll)**2))
beta2(ll) = atan(va(ll)/(0.7*PI*Dia*rps(ll)))

! Propeller Thrust and Torque Calculation
! open file containing coefficients AK and BK
OPEN (UNIT=1, FILE='Harmonic_Coefficients.txt', STATUS='OLD', POSITION='REWIND')

10 FORMAT ( F11.7, 1X, F11.7, 1X, F11.7, 1X, F11.7, 1X )

BETA=beta2(ll)
SUM_TEMP_CT = 0
SUM_TEMP_CQ = 0
KK = 0
DO II = 1, 31
! read file containing coefficients AK and BK
READ(1,10,END=99)AQ, BQ, AT, BT

CT_TEMP = ( ( AT * COS((KK)*BETA) + BT * SIN((KK)*BETA) ) ) + SUM_TEMP_CT
SUM_TEMP_CT = CT_TEMP

CQ_TEMP = ( ( AQ * COS((KK)*BETA) + BQ * SIN((KK)*BETA) ) ) + SUM_TEMP_CQ
SUM_TEMP_CQ = CQ_TEMP

KK = KK + 1
ENDDO

99 CLOSE(1)

CT = SUM_TEMP_CT * 0.01      ! propeller thrust
coefficient [-]
CQ = SUM_TEMP_CQ * (-0.001) ! propeller torque
coefficient [-]

```

```

    TPROP(11) = CT * 0.5 * DENS * (vr(11)**2) * A0                                ! propeller
thrust [N]
    QPROP(11) = CQ * 0.5 * DENS * (vr(11)**2) * A0 * Dia                        ! propeller
torque [n*m]

!-----
! Ship Surge Model

! Resistance using the Holtrop-Mennen Method [CALM WATER RESISTANCE]

R_SHIP=0
DO ii=1,6
    R_SHIP=R_SHIP+a(ii)*speed_kn(11)**(ii)
ENDDO

! wave added resitance
DO ii=1,6
    R_SHIP=R_SHIP+a3(ii)*speed_kn(11)**(ii)
ENDDO

R_SHIP=R_SHIP*1000                    !Convert ship resisntance in N
!R_SHIP =R_SHIP*1.05                  !Fouled Hull

Qshaft1=0
DO ii=1,6
    Qshaft1 = Qshaft1+a2(ii)*rpm(11)**(ii)
ENDDO

mfriction= 0.015
R1=0.7
!dimensions for the thrust bearing
R2=1
Qshaft2 = (1-t)*abs(TPROP(ii))*mfriction**2/3*((R2**3-R1**3)/(R2**2-R1**2))
!torque losses due to thrust bearing
!calculate the toprque that it is needed to turn the shaft
Qshaft = Qshaft1*2 +Qshaft2                                !assumprion
that the frictions lossen in the engine are equal to losees in the 3 bearings(the
intemidiante and the 2 stern tube bearings)

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

IF( 11==1 ) THEN
    OPEN (UNIT=2, FILE='RESULTS.TXT',SHARE='DENYNONE')
    WRITE(2,*)'      AA', ' Run/Time', ' rpm', ' speed[kn]', ' traveled
distance (m) '
ENDIF

V_DOT_SHIP = ( ( (1-t) * TPROP(11) ) - R_SHIP ) / ( M_TOTAL ) ! ship acceleration
[m/sec^2]
speed(11+1) = speed(11) + DT * V_DOT_SHIP ! ship speed [m/sec]
speed_kn(11+1) = speed(11+1) / 0.5144444

rps_dot =(-QPROP(11) - Qshaft)/( J_TOTAL) / (2*pi) ! Qengine = - Qshaft because the
engine is off and ask torque to overcome the friction
rps(11+1) = rps (11) + DT*rps_dot
rpm(11+1) = rps(11+1)*60

distance(11+1) = distance(11) + DT*(speed(11)+speed(11+1))/2 ! total traveled
distance at the end of every cycle)

```

```
1000 FORMAT ( I8 , 1X, F9.2, 1X, F5.1, 1X , F7.2 , 1X, F12.2 , 1X )  
WRITE(2,1000) ll , DT*ll, rpm(ll) , speed_kn(ll) , distance(ll)  
  
enddo  
  
OPEN (UNIT=15,FILE= 'Plot_data.txt', STATUS = 'REPLACE')  
  
2000 format (F9.2 , 1X, F5.1, 1X, F7.2, 1X, F7.2, 1X)  
do ii=1,jj-1  
    write(15,2000) DT*ii , rpm(ii) , speed_kn(ii) , distance(ii)  
enddo  
  
end program deceleration
```

Holtrop-Mennen Resistance Calculation

```
clear all
close all
clc

Temp= 15 ; %Temperature of water in celcius
v =((0.659*10^(-3))*(Temp-1)-0.05076)*(Temp-1)+1.7688)*10^(-6) ; %kinimatic viscosity
dens = 1025; %density of water
g = 9.8066; %accelaration of gravity
Lbp = 217; % Lenght between perpediculars
L = Lbp*1.02; % Estimated lenght on waterline
LCB = -6.16; % longitudinal center of buoyance forward of midship in meter
LCB = LCB/Lbp; %center of boyuonce lerated to 1/2L as percent of L
B = 32.26; %Breath moulded
T = 12.20; %mean draft at midship
trim=0;
Ta = T +trim/2; %draft aft
Tf = T -trim/2 ; %draft forward
Disp = 74327; % mt displacment in tons
Vol=Disp/1.025;
Cb = 0.8479; % Block coefficient
Cm = 0.9966; % Midship coefficient
Cwp = 0.9330; % Water-plan area coefficient
Cpr = 0.8508; % Prismatic coefficient
At = 16; %prosegistika
Abt = 20; %prosegistika
hb = 4; %prosegistika
Cstern=10; %coefficient Cstern
Sapp= 50; %rudder surface= 46.314, bazoume 50 gia na sumperilaboume kai ton ajona kai
oti allo yparxei
value=1.5; %1+k2 value from table in Holtrop method

jj=0;
for ii=2:0.5:15
jj=jj+1;
Vship_knot = ii; %Ship speed in knots
Vship= Vship_knot*0.5144444; %Ship speed in m/s

%friction resistance
Fn = Vship/sqrt(g*L); %Froude number
Rn = Vship*L/v; %Reynolds number
Cf=0.075/(log10(Rn)-2)^2; % friction resistance coefficient
LR = L*(1-Cpr+0.06*Cpr*LCB/(4*Cpr-1));
c14 = 1+0.011*Cstern;
k1 = 1+0.93+0.487118*c14*(B/L)^1.06806*(T/L)^0.46106*(L/LR)^0.121563*(L^3/Vol)^0.36486*(1-Cpr)^(-0.604247);
Stot = L*(2*T+B)*sqrt(Cm)*(0.453+0.4425*Cb-0.2862*Cm-0.003467*B/T+0.3696*Cwp)+2.38*Abt/Cb;
Rf = 0.5*dens*Vship^2*Cf*Stot;

%appendage resistance
k2 = -1 + value;
Rapp = 0.5*dens*Vship^2*Sapp*(1+k2)*Cf;

%wave resistance
if L/B<12
lamda = 1.446*Cpr-0.03*L/B;
```

```

else
    lamda = 1.446*Cpr-0.36;
end
ie = 1+ 89*exp(-(L/B)^0.80856*(1-Cwp)^0.30484*(1-Cpr-
0.0225*LCB)^0.6367*(LR/B)^0.34574*(100*Vol/L^3)^0.16302);
if B/L<0.11
    c7 = 0.229577*(B/L)^0.33333;
elseif B/L>0.25
    c7 = 0.5-0.0625*L/B;
else
    c7=B/L;
end
c1 = 2223105*c7^3.78613*(T/B)^1.07961*(90-ie)^(-1.37565);
c3 = 0.56*Abt^1.5/(B*T*(0.31*sqrt(Abt)+Tf-hb));
c2 = exp(-1.38*sqrt(c3));
c5 = 1-0.8*At/(B*T*Cm);
if Cpr<0.80
    c16 = 8.07981*Cpr-13.8673*Cpr^2+6.984388*Cpr^3;
else
    c16 = 1.73014-0.7067*Cpr;
end
m1 = 0.0140407*L/T-1.75254*Vol^(1/3)/L-4.79323*B/L-c16;
if L^3/Vol<512
    c15 = -1.69385;
elseif L^3/Vol>1726.91
    c15 = 0;
else
    c15 = -1.69385+(L/Vol^(1/3)-8)/2.36;
end
m2 = c15*Cpr^2*exp(-0.1*Fn^(-2));
d=-0.9;
m4 = c15*0.4*exp(-0.034*Fn^(-3.29));
Rw= c1*c2*c5*Vol*g*dens*exp(m1*Fn^d+m4*cos(lamda*Fn^(-2)));

%bulb resistance
Fni = Vship/sqrt(g*(Tf-hb-0.25*sqrt(Abt))+0.15*Vship^2);
pb = 0.56*sqrt(Abt)/(Tf-1.5*hb);
Rb = 0.11*exp(-3*pb^(-2))*Fni^3*Abt^1.5*dens*g/(1+Fni^2);

%resistance due to immersed transom
Fnt = Vship/sqrt(2*g*At/(B+B*Cwp));
if Fnt<5
    c6 = 0.2*(1-0.2*Fnt);
else
    c6 = 0;
end
Rtr = 0.5*dens*Vship^2*At*c6;

%model ship correlation resistance
if Tf/L>0.04
    c4=0.04;
else
    c4=Tf/L;
end
Ca = 0.006*(L+100)^(-0.16)-0.00205+0.003*sqrt(L/7.5)*Cb^4*c2*(0.04-c4);
Ra = 0.5*dens*Vship^2*Stot*Ca;

Rtot=Rf*(1+k1)+Rapp+Rw+Rb+Rtr+Ra;
Rtot2(jj)=Rtot/1000;
Vship2(jj)=Vship/0.5144444;
Power(jj)=Rtot*Vship/1000;

```

```

% disp('total resistance = ')
% disp(Rtot(ii))
end

figure(1)
hold on
xlabel('Vship (kn)', 'FontSize', 20)
ylabel('Total Resistance (kN)', 'FontSize', 20)
plot(Vship2, Rtot2, 'Linewidth', 2)
set(gca, 'FontSize', 20)
box on

figure(2)
hold on
xlabel('Vship (kn)')
ylabel('Total Resistance (kW)')
plot(Vship2, Power)

%                               file                               =
fopen('C:\Users\dleon\Downloads\diplomatih\codes\calc_water_resistance.txt', 'w');
% fprintf(file, '%4d %12s\n', jj, '! number of data points');
% fprintf(file, '%6s %12s\n', 'Vship (kn)', 'Rtotal (kN)');
% for ii=1:jj
% fprintf(file, '%4.1f %18.8f %3.2f\n', Vship2(ii), Rtot2(ii), 1.);
% end
% fclose(file);

disp('End of program')

```

Added Resistance due to waves

```
clear all
close all
clc

Lpp = 217 ;
B = 32.26 ;
Cb = 0.8479 ;
g = 9.81 ;
dens = 1025 ;
Le = 40 ; %estimation of other similar ship
E = atan(B/(2*Le)) ;
kyy = 0.25*Lpp ;
Hs = 4 %sagnificant wave height
za = Hs/2 ;
wm=0.4*sqrt(g/Hs);% bretschnieder spectrum for fully developed sea

kk=1;
for jj=0:0.5:14

    Vship_kn(kk) = jj;
    Vship = Vship_kn(kk) * 0.514444;
    Fn = Vship/sqrt(g*Lpp);
    a1 = 60.3*Cb^1.34*(0.87/Cb)^(1+Fn);
    if Fn<0.12
        a2 = 0.0072+0.1676*Fn;
    else
        a2 = Fn^1.5*exp(-3.5*Fn);
    end

    kl=1;
    dw=0.01;
    for ij=0.35:dw:2.75
        w(kl)=ij;
        lamda=g*2*pi/w(kl)^2;
        lamda2(kl)=lamda ;
        %max ship speed is 13.3 kn which is Fr=0.147, but we will use the formula of this
        method for Fr<=0.12 since the difference isn't significant
        if Fn<0.05
            ww = sqrt(Lpp/g)*(kyy/Lpp)^(1/3)*0.05^0.143*w(kl)/1.17;
        else
            ww = sqrt(Lpp/g)*(kyy/Lpp)^(1/3)*Fn^0.143*w(kl)/1.17;
        end

        Rawr
        2.25/2*dens*g*B*za^2*(sin(E))^2*(1+5*sqrt(Lpp/lamda)*Fn)*(0.87/Cb)^(1+4*sqrt(Fn));

        if Cb<0.75
            if ww<1
                b1 = 11;
                d1 = 14;
            else
                b1 = -8.5;
                d1 = -566*(Lpp/B)^(-2.66)*6;
            end
        else
            if ww<1
                b1 = 11;
            end
        end
    end
end
```

```

        d1 = 566*(Lpp/B)^(-2.66);
    else
        b1 = -8.5;
        d1 = -566*(Lpp/B)^(-2.66)*6;
    end
end

Rawm = 4*dens*g*za^2*B^2/Lpp*ww^b1*exp(b1/d1*(1-ww^d1))*a1*a2;
Rtemp(kl)= Rawr + Rawm;
% S(kl)=8.1/10^3*g^2/w(kl)^5*exp(-0.032*(g/Hs/w(kl)^2)^2);    %pierson-moskowitz
spectrum
S(kl) = 1.25/4*wm^4/w(kl)^5*Hs^2*exp(-1.25*(wm/w(kl))^4);
kl=kl+1;
end

temp=0;
kl=kl-1;
for jl=1:kl
    temp = temp + S(jl)*Rtemp(jl)*dw;
    test(kk,jl)= Rtemp(jl) ;
end

Raw(kk) = 2* temp/za^2 /1000 ; % se kN

kk = kk+1;

end

figure
hold on
xlabel('Vship(kn)', 'fontsize', 20)
ylabel('Added Resistance(kN)', 'fontsize', 20)
plot(Vship_kn,Raw, 'linewidth', 2)
set(gca, 'fontsize', 20)
box on
legend('londitudinal mass radius of gyration(pitch)=0.25*Lpp')

file
fopen('C:\Users\dleon\Downloads\diplomatih\codes\added_wave_resistance.txt', 'w');
fprintf(file, '%4d %12s\n', kk-1, '! number of data points');
fprintf(file, '%6s %12s\n', 'Vship (kn)', 'Radded (kN)');
for ii=1:kk-1
    fprintf(file, '%4.1f %18.8f %3.2f\n', Vship_kn(ii), Raw(ii), 1.);
end
fclose(file);

disp('End of program')

```