

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΛΟΙΟΥ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΛΟΙΟΥ



ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΠΛΟΙΟΥ ΕΙΔΙΚΟΥ ΤΥΠΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΝΙΚΟΛΑΟΣ Κ. ΦΟΥΡΝΑΡΑΚΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ

ΑΠΟΣΤΟΛΟΣ Δ. ΠΑΠΑΝΙΚΟΛΑΟΥ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΑΘΗΝΑ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2015



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΛΟΙΟΥ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΛΟΙΟΥ

ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΠΛΟΙΟΥ ΕΙΔΙΚΟΥ ΤΥΠΟΥ

Διπλωματική Εργασία

του

ΝΙΚΟΛΑΟΥ Κ. ΦΟΥΡΝΑΡΑΚΗ

Επιβλέπων: ΑΠΟΣΤΟΛΟΣ Δ. ΠΑΠΑΝΙΚΟΛΑΟΥ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

Εγκρίθηκε από την Τριμελή Εξεταστική Επιτροπή την _____

Απόστολος Δ. Παπανικολάου
Καθηγητής ΕΜΠ

Γεώργιος Ζαραφωνίτης
Αναπ. Καθηγητής ΕΜΠ

Αλέξανδρος-Αλβέρτος Γκίνης
Επικ. Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2015

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν έγγραφο αποτελεί τη Διπλωματική Εργασία του κ. Νικολάου Κ. Φουρναράκη, στα πλαίσια ολοκλήρωσης των προπτυχιακών σπουδών του στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, για την απόκτηση του Διπλώματος Ναυπηγού Μηχανολόγου Μηχανικού. Ο τίτλος της Διπλωματικής Εργασίας είναι « Μελέτη και σχεδίαση πλοίου ειδικού τύπου». Η εργασία έγινε υπό την επίβλεψη του Καθηγητή κ. Απόστολου Παπανικολάου, Διευθυντή του Εργαστηρίου Μελέτης Πλοίου, της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία θα ήταν δύσκολο να ολοκληρωθεί δίχως την κατεύθυνση και την παροχή εξειδικευμένων γνώσεων από ειδικούς του χώρου.

Η στοχευμένη καθοδήγηση, η εμπιστοσύνη προς το τελικό αποτέλεσμα, η παροχή ευελιξίας και επιλογών στην προσέγγιση της παρούσας από τον επιβλέποντα Καθηγητή κ. Απόστολο Δ. Παπανικολάου, ήταν καταλυτικοί παράγοντες για την ολοκλήρωση του παρόντος έργου. Με απόλυτο σεβασμό στο επιστημονικό του κύρος, την επαγγελματική του κατάρτιση και την διδακτική του εμπειρία, τον ευχαριστώ θερμά για την ευκαιρία που μου παρείχε, προκειμένου να ασχοληθώ με ένα σύγχρονο και εξελισσόμενο ερευνητικό αντικείμενο, γεγονός που μου επέτρεψε να αναπτύξω περαιτέρω τις γνώσεις μου στον τομέα της ναυτικής αμυντικής βιομηχανίας.

Επιπρόσθετα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Ευάγγελο Μπουλουγούρη για τις κατευθύνσεις, τις παρατηρήσεις και τις στοχευμένες επισημάνσεις του σε κομβικά σημεία, κατά την εκπόνηση της παρούσας.

Με δεδομένο ότι η παρούσα αξιοποίησε σχεδιαστικές επιλογές από προγενέστερη Διπλωματική Εργασία του κ. Ευστάθιου Καλκούνη, θα ήθελα να τον ευχαριστήσω θερμά για το υλικό που μου διέθεσε.

Ευχαριστώ επίσης τους κ. Γεώργιο Παπατζανάκη και Δημήτρη Μουρκογιάννη για την πολύτιμη βοήθεια που μου παρείχαν σε θέματα σχετικά με το λογισμικό ναυπηγικής σχεδίασης που διαθέτει το Εργαστήριο Μελέτης Πλοίου.

Συναφώς, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στα στελέχη της Διεύθυνσης Εξοπλισμών του Πολεμικού Ναυτικού, τον Αρχιπλοίαρχο (Μ) κ. Καφέτση, τον Πλωτάρχη (Μ) κ. Πλέσσα και τον Υποπλοίαρχο (Μ) κ. Λάσκο, για την πολύτιμη συνεργασία και τις εξειδικευμένες τοποθετήσεις σχετικά με την επιχειρησιακή λειτουργία, τις δυνατότητες και τις διεθνείς τάσεις της ναυπηγικής βιομηχανίας για την συγκεκριμένη κατηγορία πλοίων.

Τελευταίους, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους πιο πολύτιμους συνεργάτες και συνοδοιπόρους μου, την οικογένεια μου, τη Λένα, τον Κωνσταντίνο και το Δημήτρη, για τον ποιοτικό χρόνο που τους στέρησα δίχως άλλο και για την κατανόησή τους στους στόχους που έθεσα.

Νίκος Φουρναράκης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το αντικείμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι η μελέτη και ο αρχικός σχεδιασμός ενός σύγχρονου πολεμικού πλοίου, τύπου φρεγάτας, εκτοπίσματος 4500t. Τα στάδια της μελέτης που υλοποιήθηκε βασίσθηκαν στις παραστάσεις και γνώσεις από το *Θέμα μελέτης και σχεδίασης πλοίου* του προγράμματος σπουδών της σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών. Όμως, η ιδιαιτερότητα του αντικειμένου, οι απαιτήσεις σχεδίασης και το κανονιστικό πλαίσιο που διέπει την ναυπηγική αμυντική βιομηχανία, οδήγησε σε ελεγχόμενες αποκλίσεις από την κλασσική μεθοδολογία σχεδίασης ενός εμπορικού πλοίου.

Στην παρούσα εργασία περιλαμβάνονται σε διακριτά εδάφια τα βασικά στάδια μιας αρχικής μελέτης σχεδίασης : η επιλογή των κύριων διαστάσεων, η προκαταρκτική ανάλυση βαρών, η σχεδίαση των ναυπηγικών γραμμών, η σχεδίαση της γενικής διάταξης, η υδροστατική ανάλυση, η υδατοστεγής διαμέριση και τα κατακλύσιμα μήκη, ο έλεγχος ευστάθειας του άθικτου πλοίου αλλά και μετά από βλάβη, η υδροδυναμική ανάλυση και ο υπολογισμός της αντίστασης ρυμούλκησης, η συμπεριφορά σε κυματισμούς, η επιλογή της προωστήριας εγκατάστασης και της έλικας, η σχεδίαση της μέσης τομής και ο έλεγχος επάρκειας αντοχής της στα καμπτικά κυματικά φορτία.

Για την υλοποίηση της παρούσας αξιοποιήθηκε το διαθέσιμο λογισμικό του Εργαστηρίου Μελέτης Πλοίου του ΕΜΠ. Ειδικότερα, η ναυπηγική σχεδίαση πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό AVEVA Marine και τα σχέδια αποτυπώθηκαν με το λογισμικό AutoCAD. Για την εκτίμηση της αντίστασης χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Ansys/Fluent ενώ για τον υπολογισμό της συμπεριφοράς σε κυματισμούς αξιοποιήθηκε το λογισμικό Ansys/AQWA.

Ιδιαίτερη έμφαση στα πλαίσια της παρούσας δόθηκε στον υπολογισμό της αντίστασης ρυμούλκησης, αλλά και στην μελέτη της συμπεριφοράς του πλοίου σε κυματισμούς, με χρήση μεθόδων της υπολογιστικής ρευστομηχανικής. Επίσης, μελετήθηκε η χρήση συνθέτων υλικών στην υπερκατασκευή και εξετάστηκε η επίδραση τους στην αντοχή της μέσης τομής του πλοίου. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων καταδεικνύουν την ευελιξία που παρέχει η χρήση υπολογιστικών τεχνικών κατά την σχεδίαση του πλοίου, οι οποίες δρουν συμπληρωματικά στις αναλυτικές - εμπειρικές μεθόδους, με απώτερο σκοπό την βελτιστοποίηση της σχεδίασής και την ταχύτερη λήψη στοχευμένων συμπερασμάτων σε κρίσιμα χαρακτηριστικά της.

Πίνακας Περιεχομένων

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	5
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	7
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	9
1. Ανάλυση Απαιτήσεων.....	18
1.1 Η φρεγάτα στο ελληνικό Πολεμικό Ναυτικό.....	18
1.2 Σύγχρονες τάσεις και όμοια πλοία.....	19
1.3 Επιχειρησιακές Απαιτήσεις.....	21
1.4 Επιχειρησιακά συστήματα και δυνατότητες.....	25
1.5 Επιχειρησιακά συστήματα και βάρη.....	40
1.6 Απαιτήσεις Σχεδίασης.....	41
2. Προκαταρκτική Μελέτη.....	42
2.1 Διαδικασία Σχεδίασης και Όμοια Πλοία.....	42
2.2 Επιλογή Κυρίων Διαστάσεων.....	43
2.3 Προκαταρκτική Προσέγγιση Ισχύος.....	48
2.4 Υπολογισμός προσθέτου βάρους DWT.....	49
2.4.1 Βάρος Καυσίμου και Λιπαντικών.....	50
2.4.2 Βάρος Ωφέλιμου Φορτίου.....	56
2.4.3 Βάρος Πληρώματος.....	56
2.4.4 Βάρος Εφοδίων Νερού.....	57
2.4.5 Βάρος Εφοδίων Τροφίμων.....	57
2.4.6 Βάρος Αναλωσίμων.....	58
2.4.7 Βάρος Αεροπορικού Καυσίμου JP-5.....	58
2.4.8 Βάρος Ανταλλακτικών.....	59
2.4.9 Σύνθεση Προσθέτου Βάρους DWT.....	59
2.5 Βάρος Αφορτου Πλοίου (Lightship).....	59
2.5.1 Βάρος LightShip Πατρικού Πλοίου.....	61
2.5.2 Βάρος LightShip Πλοίου υπό Σχεδίαση.....	70
2.6 Διαμήκης και Κατακόρυφη Θέση Κέντρου Βάρους.....	77
2.7 Προκαταρκτικός Έλεγχος Ευστάθειας.....	79
2.7.1 Load Case 0: Lightship Displacement.....	82
2.7.2 Load Case 2/2A: Combat Displacement.....	82
2.7.3 Load Case 5/5A: Special Combat Displacement.....	83
2.7.4 Load Case 6: Maximum Displacement.....	85
2.8 Προκαταρκτικός Έλεγχος Μετακεντρικού Ύψους.....	86
3. Προκαταρκτικό Σχέδιο Ναυπηγικών Γραμμών και Γενικής Διάταξης.....	88
3.1 Πρότυπο ναυπηγικών γραμμών.....	88
3.2 Ανάπτυξη ναυπηγικών γραμμών.....	89
3.3 Σχέδιο Γενικής Διάταξης και Κατανομή Χώρων.....	92
4. Υδροστατική Ανάλυση.....	93
4.1 Ανάπτυξη Υπολογιστικού Μοντέλου.....	93
4.2 Υδροστατικό Διάγραμμα.....	94
4.3 Cross Curves.....	97
4.4 Υδατοστεγής Υποδιάρση και Κατακλύσιμα Μήκη.....	106
4.4.1 Απαιτήσεις Κανονισμών για την Υδατοστεγή Υποδιάρση.....	106
4.4.2 Κατακλύσιμα Μήκη.....	110
4.5 Πλάνο Δεξαμεμών.....	112
4.6 Καταστάσεις Φόρτωσης.....	115
5. Ευστάθεια και Κανονισμοί.....	118
5.1 Κριτήρια Ευστάθειας Άθικτου Πλοίου.....	118
5.1.1 Μογλοβραχίονας Ευστάθειας.....	119
5.1.2 Ευστάθεια σε Ανέμους Πορείας.....	119
5.1.3 Ευστάθεια σε Στροφή με Υψηλή Ταχύτητα.....	121
5.1.4 Ευστάθεια σε Σώρευση Επιβατών στην μία Πλευρά.....	122
5.2 Κριτήρια Ευστάθειας μετά από Βλάβη.....	123
5.2.1 Έκταση Βλάβης.....	125
5.2.2 Ταχύτητα Ανέμου.....	126
5.2.3 Κριτήρια.....	127
5.3 Κριτήρια Ευστάθειας σε Πάγο.....	127
5.4 Επιφάνειες και Μογλοβραχίονες Ροπής Ανέμου.....	128
5.5 Περιπτώσεις Βλάβης.....	133
6. Υδροδυναμική Ανάλυση - Αντίσταση.....	135
6.1 Η μέθοδος Holtrop-Mennen.....	135
6.1.1 Αντίσταση Μορφής.....	137
6.1.2 Αντίσταση Προσαρτημάτων.....	138

6.1.3	Αντίσταση Κυματισμού.....	139
6.1.4	Συντελεστής Αντίστασης Συσχέτισης.....	140
6.1.5	Ολική Αντίσταση.....	140
6.2	Υπολογισμός Αντίστασης με χρήση του AVEVA.....	141
6.3	Υπολογισμός Συντελεστή Αεροδυναμικής Αντίστασης.....	144
6.4	Υπολογισμός Αντίστασης με χρήση Λογισμικού Υπολογιστικής Υδροδυναμικής ANSYS/Fluent.....	146
6.4.1	Αποτύπωση Προβλήματος.....	147
6.4.2	Αποτελέσματα Επίλυσης.....	153
6.5	Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων.....	161
7.	Υδροδυναμική Ανάλυση – Συμπεριφορά Πλοίου σε Κυματισμούς (Seakeeping).....	169
7.1	Συμπεριφορά Πλοίου σε Κυματισμούς (Seakeeping).....	169
7.2	Δυναμική Απόκριση Πλοίου.....	170
7.3	Υπολογιστικές Μέθοδοι.....	172
7.4	Υπολογισμός Ακτίων (Radius of Gyration) και Ιδιοπεριόδων.....	175
7.5	Αριθμητικοί Υπολογισμοί.....	183
7.6	Αποτελέσματα Ανάλυσης.....	184
7.7	Αξιολόγηση Επιχειρησιακής Αξίας.....	187
7.7.1	RMS roll.....	189
7.7.2	RMS pitch value.....	190
7.7.3	RMS vertical displacement.....	191
7.7.4	RMS vertical and lateral accelerations.....	192
7.7.5	Frequency of sonar dome emergence.....	193
7.7.6	Deck wetness frequency.....	194
7.7.7	RMS vertical velocity.....	195
8.	Διάταξη Πρόωσης.....	196
8.1	Υπολογισμός Συντελεστών Ομόρρου, Μείωσης Ωσης και Σχετικής Περιστροφής.....	196
8.1.1	Συντελεστής Ομόρρου w	196
8.1.2	Συντελεστής Μείωσης Ωσης t	196
8.1.3	Συντελεστές Απόδοσης.....	196
8.2	Διάμετρος Έλικας.....	197
8.3	Λόγος A_E/A_0	198
8.4	Ισοβηματικές και Ισοταχείς Καμπύλες Έλικας.....	199
8.5	Σηλαίωση.....	204
8.6	Αντοχή Πτερυγίων.....	205
8.7	Συνεργασία Έλικας - Μηχανής.....	207
8.8	Απαίτηση Ισχύος Προωστήριου Εγκατάστασης.....	210
8.9	Επιλογή Προωστήριου Εγκατάστασης.....	210
8.10	Επάρκεια Παρεχόμενης Ηλεκτρικής Ισχύος.....	219
8.11	Επάρκεια Παρεχόμενης Ηλεκτρικής Ισχύος.....	221
9.	Αντοχή Μέσης Τομής.....	229
9.1	Φορτία Σχεδίασης.....	230
9.2	Έλεγχος Αντοχής Πλοίου.....	237
9.3	Κατασκευαστικά Στοιχεία Μέσης Τομής.....	244
9.3.1	Υλικά Κατασκευής.....	245
9.3.2	Ελάσματα Γάστρας.....	248
9.3.3	Ελάσματα Υπερκατασκευής.....	261
9.4	Συνεργασία Γάστρας - Υπερκατασκευής.....	265
9.5	Μελέτη Αντοχής.....	270
	ΕΠΙΛΟΓΟΣ.....	277
	ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ.....	278
	ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	280

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1: Λυγηρότητα ως προς το εκτόπισμα $\Delta(t)$ ομοίων πλοίων.....	24
Εικόνα 2: Λόγος L/B ως προς το εκτόπισμα $\Delta(t)$ ομοίων πλοίων.....	24
Εικόνα 3: Λόγος B/T ως προς το εκτόπισμα $\Delta(t)$ ομοίων πλοίων.....	25
Εικόνα 4: Aegis Combat System Baseline (διαθέσιμο στο διαδίκτυο).....	25
Εικόνα 5: Combat System φρεγάτας κλάσης Oliver Perry (διαθέσιμο στο διαδίκτυο).....	26
Εικόνα 6: Eurotorp MU 90 Torpedo.....	28
Εικόνα 7: Shikorsky S-70B.....	29
Εικόνα 8: NHI NH-90 Helicopter.....	29
Εικόνα 9: Eurocopter AS-332 Super Puma Helicopter.....	30
Εικόνα 10: Boeing RGM-84 Harpoon.....	31
Εικόνα 11: MDBA MM-40 Exocet.....	32
Εικόνα 12: Diehl BGT/Saab RBS-15.....	32
Εικόνα 13: RIM-162 ESSM / VLS MK-41.....	33
Εικόνα 14: Aster 15/Sylver A-43.....	34
Εικόνα 15: Oerlikon Oto Melara 76mm Strales.....	35
Εικόνα 16: BAE Bofors 57mm.....	35
Εικόνα 17: Nexter Narwhal 20mm.....	36
Εικόνα 18: Typhoon MK-38 25mm.....	36
Εικόνα 19: RIM-116 RAM on MK-49 Launcher.....	37
Εικόνα 20: Thales Crotale NG VT1.....	37
Εικόνα 21: Mission Bay φρεγάτας Type 26 Global Combat Ship.....	39
Εικόνα 22: Οπλικά συστήματα και εκτίμηση μέσου οπλικού φορτίου.....	40
Εικόνα 23: Ship Design Spiral [1].....	42
Εικόνα 24: Συντελεστής αντίστασης λόγω κυματισμού C_w [4].....	45
Εικόνα 25: Η γάστρα DTMB-5415.....	88
Εικόνα 26: Ναυπηγικές γραμμές γάστρας DTMB-5415.....	89
Εικόνα 27: Ναυπηγικές γραμμές του υπό σχεδίαση πλοίου.....	89
Εικόνα 28: Μοντέλο εξωτερικής επιφάνειας πλοίου στο AVEVA.....	93
Εικόνα 29: Διαμερισματοποίηση του πλοίου στο AVEVA.....	93
Εικόνα 30 Υδροστατικό διάγραμμα.....	94
Εικόνα 31: Cross Curves.....	98
Εικόνα 32: Damage Control Deck.....	107
Εικόνα 33: Ονομαστικές διαχωρητότητες διαμερισμάτων.....	108
Εικόνα 34 : Καμπύλη Κατακλυσίμων Μηκών.....	111
Εικόνα 35: Πλάνο δεξαμενών και χώρων.....	113
Εικόνα 36: Καταστάσεις φόρτωσης συμφ. Germanischer Loyds [17].....	117
Εικόνα 37: Κριτήρια Μογλοβραχίονα Ευστάθειας.....	118
Εικόνα 38: Κριτήρια ευστάθειας σε ανέμους πορείας.....	119
Εικόνα 39: Κριτήρια ευστάθειας σε στροφή με υψηλή ταχύτητα.....	121
Εικόνα 40: Ευστάθεια σε σώρευση επιβατών, σε μια πλευρά.....	122
Εικόνα 41: Κριτήρια ευστάθειας μετά από βλάβη.....	125
Εικόνα 42: Εγκάρσια βλάβη και δυσμενέστερη περίπτωση.....	126
Εικόνα 43: Κριτήρια ευστάθειας σε πάγο.....	127
Εικόνα 44: Ζώνες Βλάβης.....	133
Εικόνα 45: Καμπύλη Αντίστασης – Ταχύτητας μεθόδου Holtrop-Mennen.....	141
Εικόνα 46: Καμπύλη Αντίστασης – Ταχύτητας μεθόδου Avenia Powering.....	143
Εικόνα 47: Τυπικές τιμές αεροδυναμικής αντίστασης [39].....	144
Εικόνα 48: Συντελεστής αεροδυναμικής αντίστασης vs γωνία αέρα [39].....	145
Εικόνα 49: Εξάρτηση του συντ. αεροδυναμικής αντίστασης από τη γεωμετρία της υπερκατασκευής [39].....	145
Εικόνα 50: Ο όγκος ελέγχου και το μοντέλο του πλοίου.....	148
Εικόνα 51: Τομή υπολογιστικού mesh στην περιοχή του πλοίου.....	149
Εικόνα 52: Βελτίωση στην ακρίβεια υπολογισμού λόγω mesh finesse και y^+ [18].....	149
Εικόνα 53: Adapted Mesh Grid.....	150
Εικόνα 54: Μοντελοποίηση όγκου πρύμνης.....	151
Εικόνα 55: Μοντελοποίηση όγκου πλώρης.....	152
Εικόνα 56: Ύψος κύματος γύρω από τη γάστρα στα 17, 21, 25 και 30 kts για φρεγάτα εκτοπίσματος 4500t.....	153
Εικόνα 57: Contour plots κύματος γύρω από τη γάστρα στα 17, 21, 25 και 30 kts για φρεγάτα εκτοπίσματος 4500t.....	154

Εικόνα 58 : Υδροδυναμικές πιέσεις στη γάστρα στα 17,21, 25 και 30 kts για φρεγάτα εκτοπίσματος 4500t	155
Εικόνα 59: Προφίλ κύματος πίσω από τη γάστρα στα 17, 21, 25 και 30 kts για φρεγάτα εκτοπίσματος 4500t	156
Εικόνα 60: Προφίλ κύματος γύρω από τη γάστρα στα 17, 21, 25 και 30 kt για φρεγάτα εκτοπίσματος 4500t	157
Εικόνα 61: Ταχύτητες ρευστών στο διάμηκες της γάστρας στα 17, 21, 25 και 30 kt για φρεγάτα εκτοπίσματος 4500t	158
Εικόνα 62: Γραμμές ροής με διάτμηση τοιχώματος στη γάστρα, στα 17,21,25 και 30 kts, για φρεγάτα εκτοπίσματος 4500t	159
Εικόνα 63: Συνιστώσες Ολικής Αντίστασης.....	160
Εικόνα 64: Συνιστώσες Ολικού Συντελεστή Αντίστασης.....	160
Εικόνα 65: Ολική Αντίσταση Πλοίου.....	161
Εικόνα 66: Συντελεστής Ολικής Αντίστασης C_T	161
Εικόνα 67: Συντελεστής Αντίστασης Τριβής C_F	162
Εικόνα 68: Συντελεστής Αντίστασης Πίεσης C_R	162
Εικόνα 69: Κατανομή συντελεστών αντίστασης στη μέθοδο Holtrop-Mennen/AVEVA ανά Froude Number.....	163
Εικόνα 70: Κατανομή συντελεστών αντίστασης στη μέθοδο Fluent k- ω SST ανά Froude Number	163
Εικόνα 71: Κατανομή συνιστωσών ολικής αντίστασης [4]	165
Εικόνα 72: Kelvin wave envelope [1].....	166
Εικόνα 73: Σύστημα κυματισμών κατά Kelvin σε $F_n=0.46$	167
Εικόνα 74: Σύστημα κυματισμών για ένα διπλά σφηνοειδές πρότυπο σκάφος κατά Wigley [4]	168
Εικόνα 75: Τυπικό κυματικό φάσμα.....	172
Εικόνα 76: Δισδιάστατη λωρίδα υποδιαίρεσης στη θεωρία λωρίδων	174
Εικόνα 77: Τιμές του αδιάστατου συντελεστή a_{44}	181
Εικόνα 78: Τυπικές περίοδοι διατοιχισμού για πλοία παλαιάς σχεδίασης [10]	182
Εικόνα 79: Τιμές του αδιάστατου συντελεστή a_{33}	183
Εικόνα 80: Όρια αντοχής ανθρωπίνου οργανισμού σε κραδασμό πλήρους σώματος [26]	186
Εικόνα 81: Κριτήρια επιχειρησιακής αξιολόγησης πλοίου.....	188
Εικόνα 82: RMS Roll.....	189
Εικόνα 83: RMS Pitch	190
Εικόνα 84: RMS Vertical Motion	191
Εικόνα 85: Heli Deck Vertical (ACCEL)/Lateral (LACC) Accelerations	192
Εικόνα 86: Sonar Dome Emergence	193
Εικόνα 87: Forward Perpendicular Immersion	194
Εικόνα 88: RMS Vertical Velocity	195
Εικόνα 89: Ανοχές έλικας και σκάφους για ανακρεμασμένο πηδάλιο.....	198
Εικόνα 90: Ισοβηματικές και ισοταχείς καμπύλες έλικας.....	203
Εικόνα 91: Χαρακτηριστική καμπύλη έλικας --πλοίου N – SHP (μία έλικα).....	209
Εικόνα 92: Δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ισχύος FREMM class [36]	211
Εικόνα 93: Διάταξη ηλεκτρικής πρόωσης: 1) Gen Sets, 2) Switchboards, 3) Transformers, 4) Frequency Converters, 5) Electric Propulsion Motors, 6) Gearboxes, 7) Propellers [35].....	213
Εικόνα 94: Τυπική διάταξη Combined Diesel Electric And Gas	214
Εικόνα 95: Διάταξη ισχύος CODLAG Daring Class	214
Εικόνα 96: Διάταξη πρόωσης CODLAG FREMM class	215
Εικόνα 97: Generator Set MTU 16V 1163	216
Εικόνα 98: Χαρακτηριστικά MTU 12V 1163.....	216
Εικόνα 99: Χαρακτηριστικά Gas Turbine LM 2500+G4.....	217
Εικόνα 100: GE Advanced Induction Motor 20MW	218
Εικόνα 101: Μετασχηματισμοί ισχύος στο σύστημα ηλεκτρικής πρόωσης [35].....	219
Εικόνα 102: Διακύμανση ειδικής κατανάλωση καυσίμου Diesel Generators.....	222
Εικόνα 103: Διακύμανση ειδικής κατανάλωσης καυσίμου Gas Turbine.....	222
Εικόνα 104 : Συσχετισμός στροφών έλικας και ταχύτητας πλεύσης	223
Εικόνα 105: Εμβέλεια Πλοίου (Καθαρή Γάστρα)	225
Εικόνα 106: Εμβέλεια Πλοίου (Ρυπαρή Γάστρα)	227
Εικόνα 107: Πρωτεύοντα και δευτερεύοντα στοιχεία μέσης τομής σε διάμηκες σύστημα ενίσχυσης [17].....	229
Εικόνα 108: Σύμβαση συμβόλων.....	231
Εικόνα 109: Φάκελος συντελεστή κατανομής ροπής C_M κατά μήκος του πλοίου.....	232
Εικόνα 110: Κατανομή εγκάρσιας ροπών κάμψης σε κύμα	232
Εικόνα 111: Φάκελος συντελεστή κατανομής εγκάρσιων διατμ. δυνάμεων C_Q κατά μήκος του πλοίου	233
Εικόνα 112: Κατανομή εγκάρσιων διατμητικών δυνάμεων σε κύμα.....	233
Εικόνα 113: Ολικές διατμητικές δυνάμεις.....	236

Εικόνα 114: Ολικές ροπές κάμψης	236
Εικόνα 115: Το πλοίο σε κατάσταση Hogging	238
Εικόνα 116: Το πλοίο σε κατάσταση Sagging	239
Εικόνα 117: Διαμήκης Αντοχή σε Ήρεμο Νερό	241
Εικόνα 118: Διαμήκης Αντοχή σε Hogging.....	242
Εικόνα 119: Διαμήκης Αντοχή σε Sagging	243
Εικόνα 120: Χάλυβες Υψηλής Αντοχής κατά DNV	245
Εικόνα 121: Τυπική αναπαράσταση συνθέτου υλικού τύπου Sandwich	246
Εικόνα 122: Ελάχιστα αποδεκτά πάχη ελασμάτων [17]	250
Εικόνα 123: Συμπεριφορά γάστρας-υπερκατασκευής, υπό την επίδραση κατακόρυφης στήριξης	265
Εικόνα 124: Κατανομή Ροπών Κάμψης μεταξύ γάστρας και υπερκατασκευής	267
Εικόνα 125: Υπολογισμός της αποτελεσματικότητας Ψ της υπερκατασκευής κατά Schade [37]	269
Εικόνα 126: Η επίδραση της κάθετης στήριξης στη συμπεριφορά γάστρας-υπερκατασκευής [37]	270

Περιεχόμενοι Πίνακες

Πίνακας 1: Επισκόπηση Στοιχείων Ομοίων Πλοίων	23
Πίνακας 2: Απαιτήσεις Σχεδίασης	41
Πίνακας 3: Expanded Weight Breakdown Structure	43
Πίνακας 4: Διακύμανση λόγων - συντελεστών ομοίων πλοίων	43
Πίνακας 5: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης Froude Number	45
Πίνακας 6: Δεδομένα Σχεδίασης	48
Πίνακας 7: Υπολογισμός Συνολικής Απαιτούμενης Ισχύος	52
Πίνακας 8: Υπολογισμός Απαιτούμενου Καυσίμου κατά NAVSEA DDS-200	52
Πίνακας 9: Σύνθεση Πληρώματος	57
Πίνακας 10 : Σύνθεση Προσθέτου Βάρους DWT	59
Πίνακας 11: Βάρη πατρικού πλοίου κατά SWBS	60
Πίνακας 12: Θέση στεγασμάτων πατρικού πλοίου κατά Muller-Koster	64
Πίνακας 13: Πυργωτά και Υπερκατασκευές πατρικού πλοίου κατά Watson	64
Πίνακας 14: Υπολογισμός βάρους ενδιαίτησης πατρικού πλοίου με τυπικούς συντελεστές	67
Πίνακας 15: Υπολογισμός βάρους ενδιαίτησης πλοίου με τυπικούς συντελεστές	74
Πίνακας 16: Θέση Κέντρου Βάρους Άφορτου Πατρικού Πλοίου	77
Πίνακας 17: Θέση Κέντρου Βάρους Άφορτου Πλοίου υπό Σχεδίαση	79
Πίνακας 18: Δεξαμενές Πατρικού Πλοίου	79
Πίνακας 19: Κατηγορίες βαρών	80
Πίνακας 20: Θέση Κέντρου Βάρους Weapons Payload σε Load Case 2/2A	80
Πίνακας 21: Κέντρο Βάρους Weapons Payload σε κατάσταση 5/5A	81
Πίνακας 22: Θέση Κέντρου Βάρους Πληρώματος	81
Πίνακας 23: Κέντρο Βάρους Load Case 0	82
Πίνακας 24: Κέντρο Βάρους Load Case 2	82
Πίνακας 25: Κέντρο Βάρους Load Case 2A	83
Πίνακας 26: Προβλέψεις NAVSEA DDS-079	84
Πίνακας 27: Κέντρο Βάρους Load Case 5	84
Πίνακας 28: Κέντρο Βάρους Load Case 5A	85
Πίνακας 29: Κέντρο Βάρους Load Case 6	85
Πίνακας 30: Χαρακτηριστικά γάστρας DTMB-5415	88
Πίνακας 31: Δεδομένα Σχεδίασης	91
Πίνακας 32: Τιμές Υδροστατικού Διαγράμματος	95
Πίνακας 33: Δεδομένα Cross Curves	98
Πίνακας 34: Περιοχές Βλάβης	109
Πίνακας 35: Θέσεις (m) Εγκαρσίων Υδατοστεγών Φρακτών από την πρυμναία κάθετο	110
Πίνακας 36: Αντιστοιχία Καταστάσεων Φόρτωσης	117
Πίνακας 37: Κριτήρια Μοχλοβραχίονα Ευστάθειας	119
Πίνακας 38: Κριτήρια ευστάθειας σε Ανέμους Πορείας	120
Πίνακας 39: Κριτήρια ευστάθειας σε στροφή με υψηλή ταχύτητα	121
Πίνακας 40: Κριτήρια ευστάθειας σε σώρευση επιβατών	123
Πίνακας 41: Κριτήρια ευστάθειας μετά από βλάβη	127
Πίνακας 42: Κριτήρια ευστάθειας σε πάγο	128
Πίνακας 43: Περιπτώσεις Βλαβών	133
Πίνακας 44: Αρχικά δεδομένα για την μέθοδο Holtrop - Mennen	136
Πίνακας 45: Ταχύτητες Μελέτης	137
Πίνακας 46: Αντίσταση Μορφής	138
Πίνακας 47: Συντελεστής Αντίστασης Προσαρτημάτων	138
Πίνακας 48: Αντίσταση Προσαρτημάτων	139
Πίνακας 49: Αντίσταση Κυματισμού	140
Πίνακας 50: Ολική Αντίσταση και Ισχύς Ρυμούλκησης	140
Πίνακας 51 : Αποτελέσματα αντίστασης κατά AVEVA	141
Πίνακας 52: Ισχύς Ρυμούλκησης κατά AVEVA (χωρίς sea margin)	142
Πίνακας 53: Ισχύς Ρυμούλκησης κατά AVEVA (με sea margin 15%)	142
Πίνακας 54: Αποκλίσεις αρχικού mesh grid	150
Πίνακας 55: Ιδιότητες Αριθμητικής Επίλυσης	152
Πίνακας 56: Αντίσταση και Ισχύς Ρυμούλκησης Ansys/Fluent	160
Πίνακας 57: Αποκλίσεις αποτελεσμάτων αντίστασης	164

Πίνακας 58: Απόκλιση αποτελεσμάτων συντελεστή ολικής αντίστασης	164
Πίνακας 59 : Ισοβηματικές Καμπύλες.....	200
Πίνακας 60: Ισοταχείς καμπύλες	201
Πίνακας 61: Απαιτήσεις Ισχύος ανά Ταχύτητα	208
Πίνακας 62: Υπολογισμός επάρκειας ηλεκτρικής ισχύος στα 17 kts.....	219
Πίνακας 63: Υπολογισμός επάρκειας ηλεκτρικής ισχύος στα 30 kts.....	220
Πίνακας 64: Εμβέλεια πλοίου (Καθαρή γάστρα).....	224
Πίνακας 65: Εμβέλεια πλοίου (Ρυπαρή γάστρα)	226
Πίνακας 67: Επιτρεπόμενες τιμές εγκαρσίων ροπών και διατ. δυνάμεων στο κύμα.....	234
Πίνακας 68: BM/SF τιμές στο ήρεμο νερό (AVEVA).....	234
Πίνακας 69: Ολικές Επιτρεπόμενες τιμές εγκαρσίων ροπών και διατ. δυνάμεων	235
Πίνακας 70: Ροπή Αντίστασης Γάστρας στη Μέση Τομή	272
Πίνακας 71: Ροπή Αντίστασης Υπερκατασκευής στη Μέση Τομή	275

1. Ανάλυση Απαιτήσεων

1.1 Η φρεγάτα στο ελληνικό Πολεμικό Ναυτικό

Ο όρος φρεγάτα [58] προήλθε από την περιοχή της Μεσογείου θαλάσσης περί τα τέλη του 15ου αιώνα και αναφερόταν σε ελαφρά πλοία τύπου galleaza με κουπιά, ιστία και ελαφρύ οπλισμό, με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά την ευελιξία και την ευκινησία. Ο όρος στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε για να περιγράψει μικρά, θωρακισμένα και γρήγορα ιστιοφόρα που έφεραν καταστρώματα πυροβόλων και είχαν ως αποστολή την παράκτια περιπολία. Η σύγχρονη χρήση του όρου αναφέρεται σε πλοία που χρησιμοποιούνται για την προστασία άλλων πλοίων, εμπορικών ή πολεμικών, από υποβρύχια ή αεροσκάφη, σε συνοδείες νηοπομπών, αμφίβιων επιχειρήσεων και άλλων εκστρατευτικών αποστολών. Το μέγεθος τους συνήθως είναι μεγαλύτερο από το μέγεθος κορβέτας και μικρότερο από το μέγεθος ενός καταδρομικού.

Το ελληνικό Πολεμικό Ναυτικό, από ιδρύσεως του χρησιμοποίησε την φρεγάτα ως συστατικό μέσο του στόλου. Σήμερα το Πολεμικό Ναυτικό της χώρας διαθέτει φρεγάτες δύο κλάσεων:

- Κλάση MEKO-200HN: πρόκειται για φρεγάτα εκτοπίσματος σχεδίασης περίπου 3200t, διαστάσεων $L_{bp}=109m$, $B=14.8m$, $D=9.15m$, $T=4.1m$, με βασικές επιχειρησιακές δυνατότητες στους τομείς Anti -Submarine Warfare (AsuW), Anti-Surface Warfare (ASW), Anti-Aircraft Warfare (AAW), υποστήριξης αμφίβιων επιχειρήσεων (Special Operations Forces).

- Κλάση Standard Kortenaer: πρόκειται για φρεγάτα εκτοπίσματος σχεδίασης περίπου 3500t, διαστάσεων $Loa=130m$, $B=14.5m$, $T=4.4m$, με βασικές επιχειρησιακές δυνατότητες στους τομείς Anti -Submarine Warfare (AsuW), Anti-Surface Warfare (ASW), Anti-Aircraft Warfare (AAW), υποστήριξης αμφίβιων επιχειρήσεων (Special Operations Forces).

Ο στόλος του Πολεμικού Ναυτικού αριθμεί συνολικά 4 σκάφη τύπου MEKO, σχεδίασης και κατασκευής 1992 και 9 σκάφη τύπου S σχεδίασης και κατασκευής 1975 (τα παλαιότερα σκάφη).

1.2 Σύγχρονες τάσεις και όμοια πλοία

Οι σύγχρονες εξελίξεις στο πεδίο της θαλάσσιας υπεροχής, υπό το πρίσμα των διεθνών γεωπολιτικών εξελίξεων αλλά και των σχεδιασμών συλλογικής δράσης του Ευρώ-Ατλαντικού Συμφώνου (NATO), έχουν οδηγήσει στην σχεδίαση και κατασκευή νέων τύπων σκαφών, με ιδιαίτερα προηγμένα χαρακτηριστικά τόσο σε θέματα ναυπηγικής σχεδίασης, όσο και στα θέματα πρόωσης και ολοκλήρωσης επιχειρησιακών συστημάτων. Η διεθνής αμυντική βιομηχανία επιδεικνύει τις δυνατότητες της με σχεδιάσεις που χρησιμοποιούν προηγμένα υλικά, εξελιγμένες τεχνικές και ολοκληρωμένα συστήματα, έχοντας ως βασική παράμετρο σχεδίασης την ικανοποίηση ευέλικτων επιχειρησιακών απαιτήσεων στην διάρκεια του κύκλου ζωής των οπλικών συστημάτων. Η σχεδίαση υιοθετεί τις τεχνικές της μηχανικής συστημάτων (systems engineering [59]), με βάση την οποία η σχεδίαση αποσκοπεί στην βέλτιστη ικανοποίηση των επιχειρησιακών απαιτήσεων με το ελάχιστο δυνατό κόστος κύκλου ζωής. Προς τούτο, χρησιμοποιούνται προηγμένα συστήματα λογισμικού με δυνατότητες αποτίμησης της επιχειρησιακής αποτελεσματικότητας των συστημάτων, εξετάζοντας πιθανά επιχειρησιακά σενάρια.

Για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας, ερευνήθηκαν και αξιολογήθηκαν ως σχεδιάσεις αναφοράς (όμοια πλοία), οι ακόλουθες σύγχρονες σχεδιάσεις φρεγατών (κατά έτος κατασκευής)::

- Amatola, Valour Class (South Africa) κατασκευής 2012.
- Neils Juel, Huitfeldt Class (Denmark), κατασκευής 2009.
- Thor Heyerdahl, Nansen Class (Norway), κατασκευής 2007.
- Aquitaine, Fremm Class (France), κατασκευής 2007.
- Freedom, LCS Class (USA), κατασκευής 2006.
- Supreme, Formidable Class (Singapore), κατασκευής 2005.
- Eversteen, Provincien Class (Netherlands), κατασκευής 2003.
- Perth, ANZAC Class (Australia), κατασκευής 2003.
- Hessen, Type 124 Class (Germany), κατασκευής 2002.
- Bertholf, Legend Class (USA), κατασκευής 2001.
- Al Dammam, F-3000S Class (Saudi Arabia), κατασκευής 2001.
- St Albans, Type 23 Class (UK), κατασκευής 1999.
- Guerpatte, La Fayette Class (France), κατασκευής 1998.

- Ottawa, Halifax Class (Canada), κατασκευής 1995.

Συγκεκριμένα, από τις παραπάνω υφιστάμενες σχεδιάσεις, λήφθηκαν υπόψη τα ακόλουθα βασικά σημεία σχεδίασης, σύμφωνα με τα καθοριζόμενα από την διεθνή βιβλιοθήκη Janes [1] αλλά και άλλες δευτερογενείς πηγές με τις οποίες έγινε διασταύρωση:

- α. Οι κύριες διαστάσεις της γάστρας.
- β. Η ισχύς και η διάταξη του συστήματος πρόωσης.
- γ. Τα επιχειρησιακά και οπλικά συστήματα που έχουν ολοκληρωθεί, τα οποία εμμέσως καταδεικνύουν τις επιχειρησιακές δυνατότητες της σχεδίασης.

Τα δεδομένα σχεδίασης των παραπάνω παραγράφων (α) και (β), με βάση τις δευτερογενείς πηγές που χρησιμοποιήθηκαν, παρουσιάζονται στον πίνακα 1. Επισημαίνεται ότι τα δημοσιευμένα δεδομένα σχεδίασης αποκλίνουν ελαφρά από τα αληθή, για λόγους διασφάλισης της εμπιστευτικότητας της σχεδίασης και της βιομηχανικής ιδιοκτησίας. Εκτιμάται όμως ότι οι εν λόγω αποκλίσεις είναι αμελητέες για το σκοπό της παρούσας μελέτης αρχικής σχεδίασης.

Σε ότι αφορά στα επιχειρησιακά και οπλικά συστήματα που φέρουν τα ανωτέρω σκάφη, αυτά ποικίλουν καθόσον εξαρτώνται από τις δυνατότητες της εγχώριας βιομηχανίας κάθε κράτους αλλά και από τους εκάστοτε γεωπολιτικούς συσχετισμούς. Η τυχόν παράθεση των διαφόρων τύπων οπλικών συστημάτων εκφεύγει από τα όρια της παρούσας μελέτης και θα περιορισθεί μεταγενέστερα μόνο στην ενδεικτική παράθεση περιορισμένων επιλογών, για λόγους ικανοποίησης των επιχειρησιακών απαιτήσεων αλλά και για τον υπολογισμό των επιδράσεων στην κατανομή βαρών του άφορτου σκάφους, με γνώμονα την ικανοποίηση των επιχειρησιακών απαιτήσεων. Οι βασικές επιχειρησιακές απαιτήσεις που ικανοποιούν τα παραπάνω σκάφη, σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό αναλόγως της έμφασης κατά τη σχεδίασή τους, είναι οι εξής:

- α. Διεξαγωγή ανθυποβρυχιακών επιχειρήσεων (Anti-Submarine Warfare-ASW).
- β. Διεξαγωγή επιχειρήσεων εναντίον στόχων επιφανείας (Anti-Surface Warfare, ASuW).

γ. Αντιαεροπορική προστασία περιοχής (Short/Mid Range Anti-Aircraft Warfare - AAW).

δ. Αντιπυραυλική προστασία στόχων υψηλής αξίας (High Value Asset Protection).

ε. Υποστήριξη εκστρατευτικών δυνάμεων (Expeditionary Forces).

στ. Δίκτυο-κεντρική Διοίκηση και Έλεγχος (Network Centric Command and Control).

1.3 Επιχειρησιακές Απαιτήσεις

Το νομικό πλαίσιο προμηθειών, όπως αυτό καθορίζεται από τον Νόμο 3978/2011 (ΦΕΚ Α 137, 2011) σε συνδυασμό με το κανονιστικό πλαίσιο προμηθειών του Υπουργείου Εθνικής Άμυνας της Χώρας, καθιστά δυσχερή την διατύπωση σαφών επιχειρησιακών απαιτήσεων για την πρόσκτηση ή ναυπήγηση φρεγατών από τις ελληνικές Ένοπλες Δυνάμεις, ειδικά στα πλαίσια μιας ακαδημαϊκής προσέγγισης για την αρχική σχεδίαση ενός ιδιαίτερα πολύπλοκου εγχειρήματος, όπως αυτό της σχεδίασης μιας φρεγάτας.

Μελετώντας τη γεωγραφία του ελλαδικού χώρου με την πληθώρα παράκτιων περιοχών και την μεγάλη ακτογραμμή, την οικονομική προσαρμογή με ότι αυτό συνεπάγεται στην στελέχωση των Μονάδων των Ενόπλων Δυνάμεων, τα σύγχρονα δεδομένα στη ναυπήγηση ομοιότυπων πλοίων αλλά και την υφιστάμενη εμπειρία του ελληνικού Πολεμικού Ναυτικού από την χρήση των κλάσεων τύπου MEKO και S, μπορούν να θεωρηθούν ως βάσιμες επιχειρησιακές απαιτήσεις οι ακόλουθες:

α. Εκτόπισμα στην περιοχή των 4500t.

β. Μήκος στην περιοχή 115 έως 125 m.

γ. Μέγιστη ταχύτητα περί τα 30 kts.

δ. Αυτονομία μεγαλύτερη από 4000 nm στην οικονομική ταχύτητα 16-18 kts.

ε. Δυνατότητα διεξαγωγής ανθυποβρυχιακών επιχειρήσεων (Anti-Submarine Warfare-ASW).

στ. Δυνατότητα διεξαγωγής επιχειρήσεων εναντίον στόχων επιφανείας (Anti-Surface Warfare, ASuW).

ζ. Δυνατότητα αντιαεροπορικής προστασίας περιοχής (Short/Mid Range Anti-Aircraft Warfare - AAW).

η. Δυνατότητα αντιπυραυλικής προστασίας στόχων υψηλής αξίας (High Value Target Protection).

θ. Δυνατότητα υποστήριξης εκστρατευτικών δυνάμεων (Expeditionary Forces).

ι. Δυνατότητα δικτυο-κεντρικής Διοίκησης και Ελέγχου (Network Centric Command and Control).

ια. Δυνατότητα προσνήωσης Ε/Π των Ενόπλων Δυνάμεων.

ιβ. Δυνατότητα ολοκλήρωσης Unmanned Underwater/Submarine Vehicle.

ιγ. Δυνατότητα ολοκλήρωσης Rigid-Inflatable Boat για την υποστήριξη Special Operations Forces.

ενώ οι βασικοί στόχοι της σχεδίασης θα πρέπει να είναι:

α. Ελάχιστο κόστος κύκλου ζωής.

β. Μέγιστη επιβιωσιμότητα.

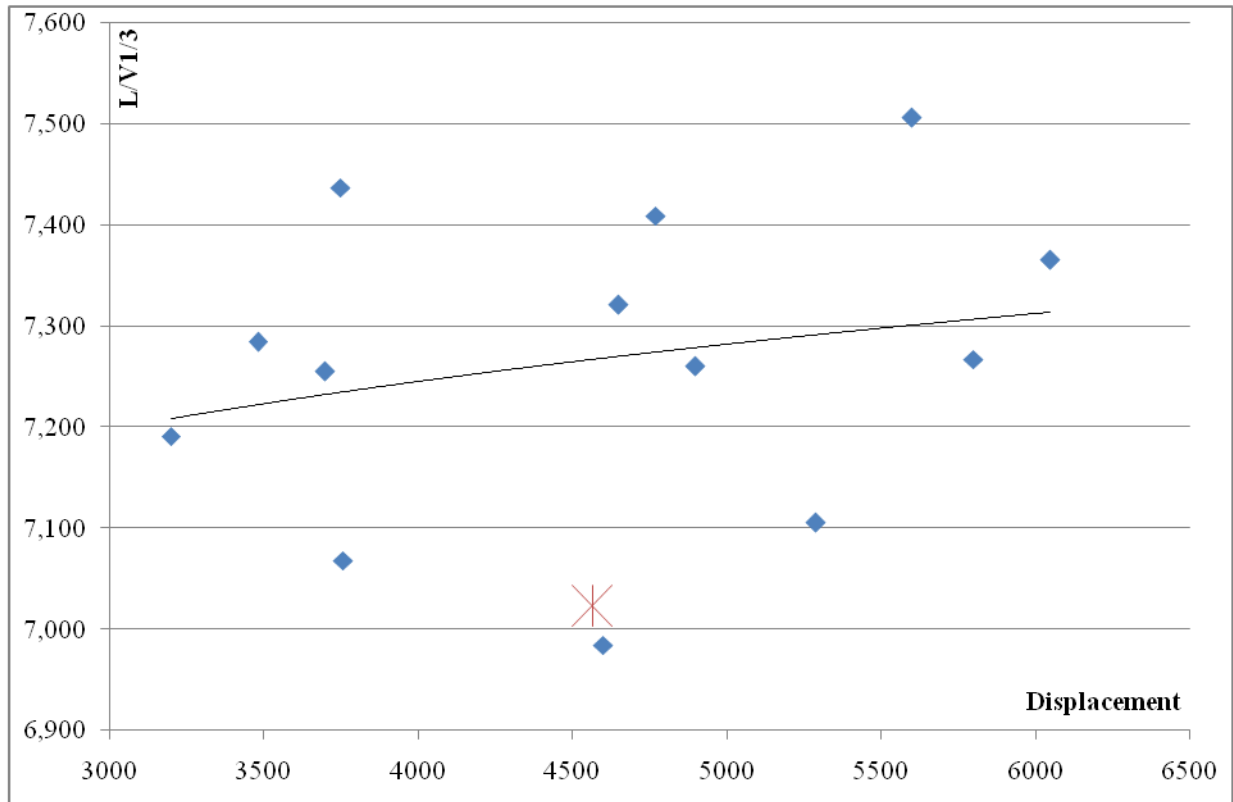
γ. Μέγιστη επιχειρησιακή ικανότητα σε κατάσταση θάλασσας 6 και επιβίωση σε κατάσταση θάλασσας 8.

δ. Βέλτιστη εργονομία.

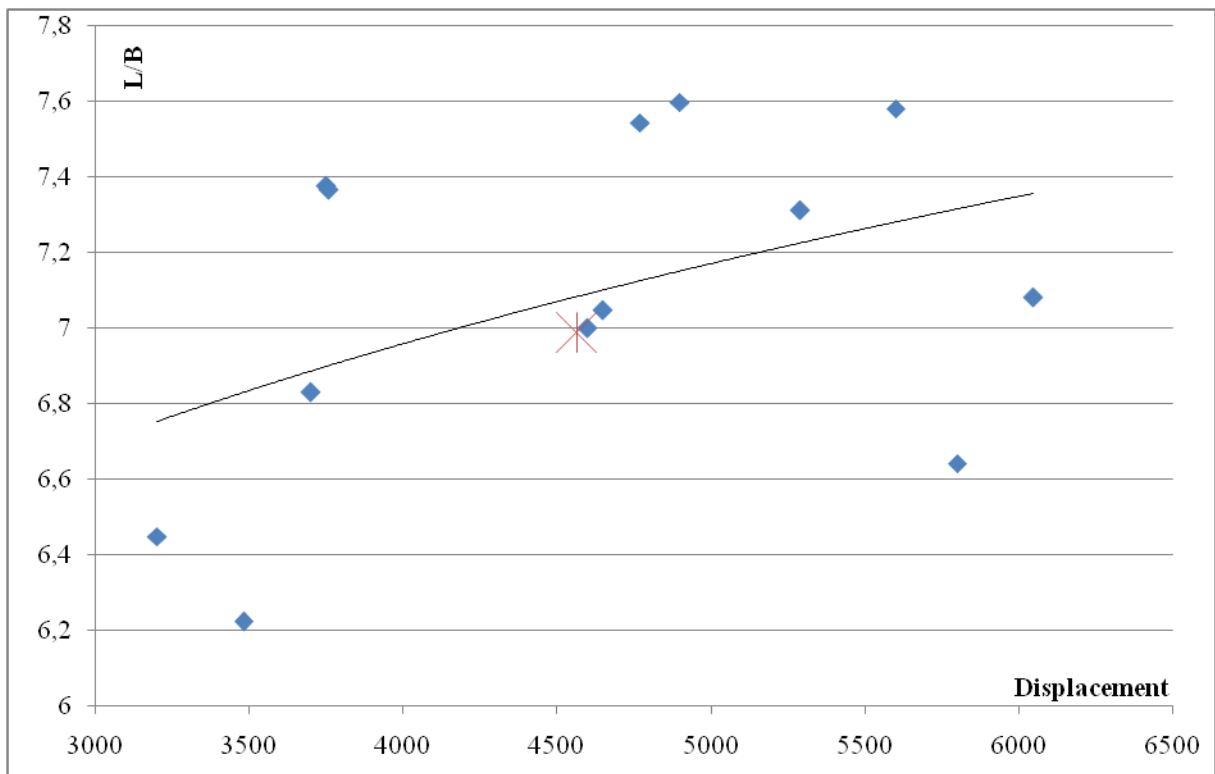
Πίνακας 1: Επισκόπηση Στοιχείων Ομοίων Πλοίων

Ship	AMATOLA	PERTH	OTTAWA	NIELS JUEL	GUEPRATTE	AQUITAINE	HESSEN	EVERSTEN	T HEYERDAHL	AL DAMMAM	SUPREME	ST ALBANS	BERTHOLF	FREEDOM
Country	SOUTH AFRICA	AUSTRALIA	CANADA	DENMARK	FRANCE	FRANCE	GERMANY	NETHERLANDS	NORWAY	SAU. ARABIA	SINGAPORE	UK	USA	USA
Class	VALOUR	ANZAC	HALLIFAX	HUITFELDT	LA FAYETTE	FREMM	TYPE 124	PROVINCIEIN	NANSEN	F-3000S	FORMIDABLE	TYPE 23	LEGEND	LCS
Keel Lay	2003	2003	1995	2009	1998	2007	2002	2003	2007	2001	2005	1999	2001	2006
Sonar/Screws	Yes	No	No	Yes, 6,45m	Yes,5,79m	No	Yes, 6,9m	No	Yes,7,6m	Yes	Yes	Yes, 7,3m	Yes,6,86m	No
MAIN PARTICULARS														
Loa (m)	121	118	134.7	138.7	124.18	142	143	144.24	133.2	133.6	114.8	133	127.4	118.1
Lbp (m)	111.3	109	123.7	126	114.6	129.5	132.2	133.1	122.8	121.2	105.1	122.3	115.21	109.5
B (m)	16.3	14.8	16.4	19.8	15.54	19.5	17.44	18.8	16.8	17.2	16.3	16.1	16.46	17.6
D (m)	9.2	9.15		11.22		9.8	9.5	9.6	11.2					
T (m from keel)	4.4	4.35	5	6	4.8	5.25	5.1	5.18	4.9	4.1	5	5.5	4.96	4.3
Δ (t)	3700	3759	4770	6645	3750	5800	5600	6048	5290	4650	3200	4900	4600	3482
Vservice (kts)	16	18	13	15	15	15	18	18	16	15	18	15	16	18
Vbattle-min (kts)	29	27	29	29.3	27	27	29	30	27	25	27	28	28	45
Propulsion type	CODAG/WARP	CODOG	CODOG	CODAD	CODAD	CODLOG	CODAG	CODOG	CODAG	CODAD	CODAD	CODLAG	CODAG	CODAG
PBmain (KW)	11840	13180	6480	16400	7200	5000	14800	20000	18000	11400	18200	2980	14800	12800
PBbattle (KW)	31840	22500	35430	32800	15400	42900	38300	39000	37200	22800	36400	26170	36800	84800
Complement	120	174	225**	99	153	145	255***	204****	121	181	72	185	113	83
Range (nm@kts)	7200@16	6000@18	9500@13	9300@18	7000@15	6000@15	4000@18	5000@18	4500@16	7000@15	4200@18	7500@15	12000@16	3500@18

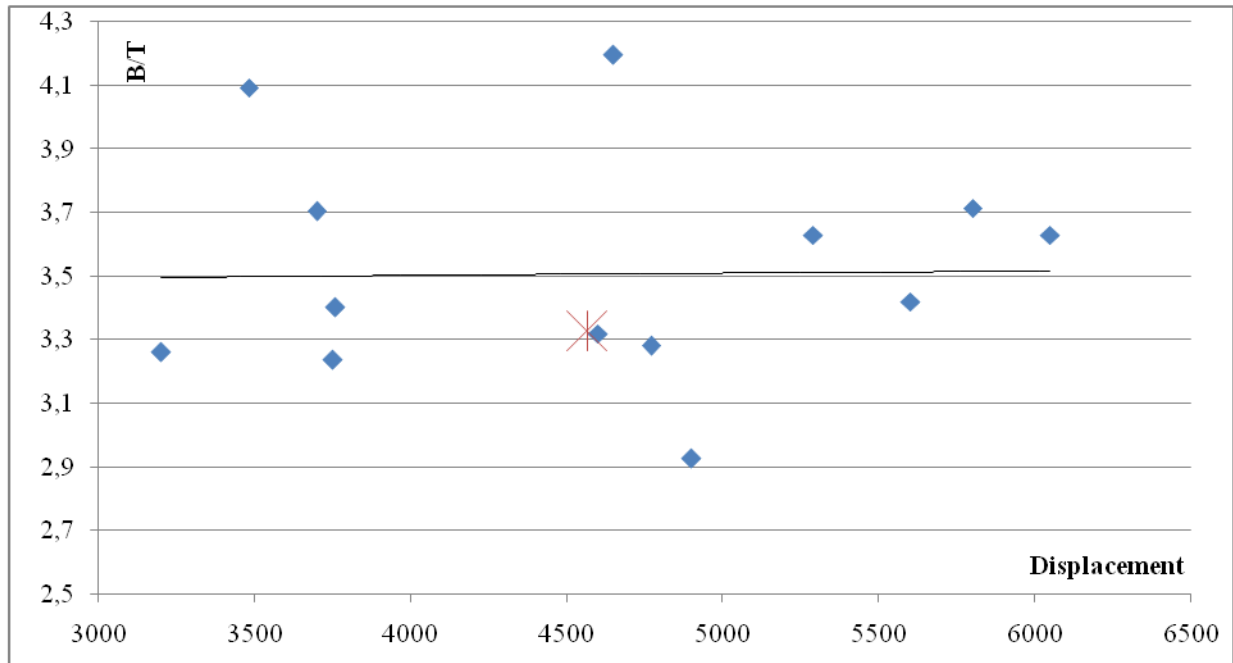
*Sonar/screw : όπου το Sonar ή οι έλικες του πλοίου είναι εκατέρωθεν του keel, διατυπώνεται (όπου είναι διαθέσιμο) το βύθισμα από το Sonar ή τις έλικες
** 200 άτομα πλήρωμα και 25 πλήρωμα Ε/Π
*** 230 άτομα πλήρωμα και 25 άτομα πλήρωμα Ε/Π
**** 30 αξιωματικοί και 174 υπαξιωματικοί/έφεδροι



Εικόνα 1: Λυγηρότητα ως προς το εκτόπισμα $\Delta(t)$ ομοίων πλοίων



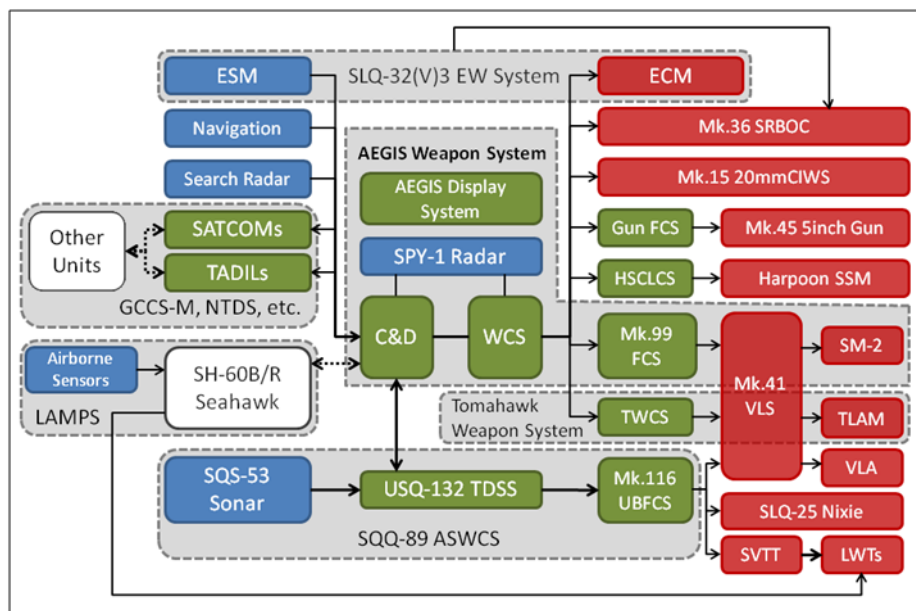
Εικόνα 2: Λόγος L/B ως προς το εκτόπισμα $\Delta(t)$ ομοίων πλοίων



Εικόνα 3: Λόγος B/T ως προς το εκτόπισμα Δ(t) ομοίων πλοίων

1.4 Επιχειρησιακά συστήματα και δυνατότητες

1.4.1 Σύστημα Μάχης (Combat System)

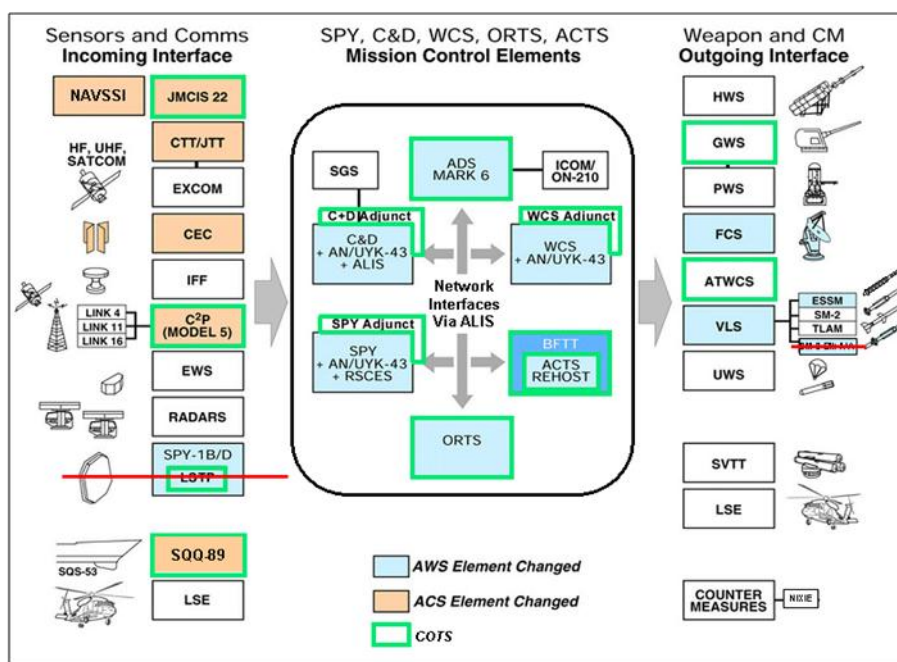


Εικόνα 4: Aegis Combat System Baseline (διαθέσιμο στο διαδίκτυο)

Πρόκειται για τον πυρήνα των επιχειρησιακών δυνατοτήτων μιας σύγχρονης φρεγάτας, οι απεικονίσεις του οποίου προβάλλονται στο Κέντρο Διοίκησης Πληροφοριών (Command

Information Center). Βασίζεται στην λογική System of Systems, σύμφωνα με την οποία οι δυνατότητες του συστήματος μάχης προκύπτουν από την ολοκλήρωση δυνατοτήτων και τις συνέργειες επιμέρους συστημάτων. Το σύστημα μάχης εξασφαλίζει την επικοινωνία, την συνεργασία και το data fusion μεταξύ των αισθητήρων ναυτιλίας του πλοίου, των συστημάτων επικοινωνιών και τακτικών δικτύων, των αισθητήρων μάχης και των οπλικών συστημάτων. Τα βασικά υποσυστήματα ενός σύγχρονου συστήματος, είναι τα εξής:

- α. Radars και σύστημα ελέγχου πυρός (Fire Control System).
- β. Υποσύστημα Δικτύων και Επικοινωνιών (Data Links, Satcoms, HaveQuick, Saturn, κλπ.).
- γ. Υποσύστημα ανθυποβρυχιακού πολέμου (Anti Submarine Warfare).
- δ. Υποσύστημα πολέμου εναντίον στόχων επιφανείας (Anti Surface Warfare).
- ε. Υποσύστημα αεράμυνας (Anti Aircraft Warfare).
- στ. Υποσύστημα έγκαιρης προειδοποίησης και Ηλεκτρονικού Πολέμου (Electronic Support / Counter Measures).



Εικόνα 5: Combat System φρεγάτας κλάσης Oliver Perry (διαθέσιμο στο διαδίκτυο)

1.4.2 Υποσύστημα διεξαγωγής ανθυποβρυχιακών επιχειρήσεων (Anti-Submarine Warfare-ASW)

Η διεξαγωγή ανθυποβρυχιακών επιχειρήσεων βασίζεται στην δυνατότητα εντοπισμού, παρακολούθησης και αντιμετώπισης υποβρυχίων με χρήση καταλλήλων διατάξεων διοίκησης και ελέγχου αλλά και οπλικών συστημάτων.

Οι γνωστότερες ηλεκτρονικές διατάξεις που προσδίδουν τις σχετικές δυνατότητες, είναι οι ακόλουθοι αισθητήρες:

- α. Ενεργητικά και παθητικά Sonars, σταθερά ή ρυμουλκούμενα.
- β. Sonobuoys και υδρόφωνα.
- γ. Ηλεκτρονικά και ακουστικά αντίμετρα.
- δ. Forward Looking Infrared (FLIR) Systems, κ.α.
- ε. Ελικόπτερο Ανθυποβρυχιακών Αποστολών και ο συναφής εξοπλισμός ελέγχου του.

ενώ ο ανθυποβρυχιακός εξοπλισμός περιλαμβάνει κυρίως τορπίλες και πυραύλους, στο σκάφος ή επί ελικοπτερού. Ενδεικτικά, αναφέρονται τα ακόλουθα οπλικά συστήματα:

1.4.2.1 Σωλήνες τορπιλών και τορπίλες

Στην διεθνή αγορά συναντώνται διάφοροι συνδυασμοί σωλήνων εκτόξευσης και τορπιλών, με συναφείς ιδιότητες. Χαρακτηριστικά, οι συνήθεις σωλήνες που απαντά κανείς στα πλοία του Αμερικανικού Ναυτικού είναι οι Alliant MK-32 SVT Tubes οι οποίο φέρουν τορπίλες Alliant MK-46. Το βάρος των σωλήνων ανέρχεται σε 2,1 t ενώ φέρει συνολικά 6 τορπίλες βάρους περί των 2t.

Αντίστοιχο σύγχρονο σύστημα είναι και Triple WASS B-515 βάρους περί των 2 t που φέρει 6 εξελιγμένου τύπου τορπίλες Eurotorp MU-90 συνολικού βάρους 1.8 t.



Εικόνα 6: Eurotorp MU 90 Torpedo

Η περαιτέρω παράθεση στοιχείων επί των ανωτέρω εκφεύγει της παρούσας, πλην όμως λαμβάνεται υπόψη ότι **το τυπικό βάρος μιας διάταξης (με πλήρες φορτίο 2x3 τορπιλών) ανέρχεται σε περίπου 2+2 = 4t.**

1.4.2.2 Ελικόπτερο Ανθυποβρυχιακών Αποστολών

Η πλειάδα των σύγχρονων φρεγατών φέρει deck κατάλληλα διαμορφωμένο για την υποστήριξη Α/Ν-Π/Ν ελικοπτέρων ειδικά διαμορφωμένων για την υποστήριξη ανθυποβρυχιακών επιχειρήσεων. Τα ελικόπτερα αυτά, πέρα από τον ειδικό ηλεκτρονικό εξοπλισμό για την αναζήτηση και τον εντοπισμό υποβρυχίων, φέρουν και οπλικό φορτίο (τορπίλες, βλήματα) ικανά να βάλουν εναντίον υποβρυχίων στόχων. Λαμβάνοντας υπόψη τις δυνατότητες των ελληνικών Ενόπλων Δυνάμεων, τα ελικόπτερα που λαμβάνονται υπόψη είναι τα εξής (εξετάζονται και όσα χρησιμοποιούνται σε αποστολές έρευνας - διάσωσης):



Εικόνα 7: Shikorsky S-70B

- Shikorsky S-70B Aegean Hawk: Πρόκειται για Ε/Π Αμερικανικής κατασκευής το οποίο φέρει πληθώρα αισθητήρων (Magnetic Anomaly Detector, Sonobuoys, κ.α.) και φέρει τορπίλες τύπου Alliant MK-46. Είναι το μοναδικό Ε/Π των ελληνικών ΕΔ ειδικά διαμορφωμένο για ανθυποβρυχιακή αποστολή. Έχει μήκος περίπου 20m, ύψος 5.2m, πλάτος (με αναδιπλωμένο στροφέιο) 3.22m και βάρος (μέγιστο βάρος απογείωσης) 9.9t.



Εικόνα 8: NHI NH-90 Helicopter

- NH Industries NH-90: Πρόκειται για Ε/Π πολλαπλών ρόλων. Φέρει αισθητήρες και διατάξεις για ανθυποβρυχιακή αποστολή στην έκδοση NFH, πλην όμως δεν την διαθέτουν οι ελληνικές ΕΔ οι οποίες διαθέτουν την έκδοση μεταφοράς προσωπικού. Έχει

μήκος 16.13m, ύψος 5.23m, πλάτος (με αναδιπλωμένο στροφείο) 4.5m και βάρος (μέγιστο βάρος απογείωσης) 10.6t.



Εικόνα 9: Eurocopter AS-332 Super Puma Helicopter

- Eurocopter AS-332 Super Puma: πρόκειται για Ε/Π υποστήριξης το οποίο στις ελληνικές ΕΔ συναντάται σε διαμόρφωση Έρευνας - Διάσωσης. Δεν φέρει αισθητήρες ή οπλισμό για ανθυποβρυχιακή αποστολή. Έχει μήκος 16.29m, ύψος 4.8m, πλάτος (με αναδιπλωμένο στροφείο) 3m και βάρος (μέγιστο βάρος απογείωσης) 8.6t.

Για τους σκοπούς της παρούσας μελέτης, θα ληφθούν υπόψη τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του Ε/Π S-70B (το μοναδικό με συναφείς ανθυποβρυχιακές δυνατότητες, το οποίο μπορεί να παραμείνει στο σκάφος, εντός του υπόστεγου). Με δεδομένο όμως ότι επί του Helo Deck θα απονηώνονται και θα προσηλώνονται Ε/Π και για λόγους έρευνας-διάσωσης, ως βάρος υπολογισμού θα ληφθεί υπόψη αυτό του Ε/Π NH-90.

1.4.3 Δυνατότητα διεξαγωγής επιχειρήσεων εναντίον στόχων επιφανείας (Anti-Surface Warfare-ASuW)

Η διεξαγωγή επιχειρήσεων εναντίον στόχων επιφανείας βασίζεται στην δυνατότητα εντοπισμού και αντιμετώπισης πλοίων επιφανείας με χρήση καταλλήλων διατάξεων διοίκησης και ελέγχου αλλά και οπλικών συστημάτων. Οι γνωστότερες ηλεκτρονικές διατάξεις που προσδίδουν τις σχετικές δυνατότητες, είναι οι ακόλουθοι αισθητήρες:

- α. Radar επιφανείας.
- β. Τακτικά δίκτυα (Data Links).
- γ. UAVs και UCAVs.
- δ. Πύραυλοι επιφανείας και τορπίλες.



Εικόνα 10: Boeing RGM-84 Harpoon

Οι ηλεκτρονικές διατάξεις που προσδίδουν τέτοιες δυνατότητες συνήθως αποτελούν "πακέτα" εξοπλισμού με μικρές δυνατότητες προσαρμογής, λόγω πιστοποίησης και κόστους ανάπτυξης. Σε ότι αφορά στον οπλισμό που προσδίδει τις δυνατότητες εναντίον στόχων επιφανείας, χαρακτηριστικά αναφέρονται τα ακόλουθα προϊόντα:

- Εκτοξευτήρες MK-16 με πυραύλους Boeing RGM-84 Harpoon: πρόκειται για ένα ιδιαίτερα διαδεδομένο σύστημα, ιδιαίτερα στα πλοία Αμερικανικής κατασκευής. Πρόκειται για πύραυλο παντός καιρού ικανός να πλήξει στόχους πέρα από τον ορίζοντα. Το βάρος του εκτοξευτήρα ανέρχεται σε 500Kg ενώ το πλήρες φορτίο οκτώ πυραύλων ανέρχεται σε 5.5t.



Εικόνα 11: MDBA MM-40 Exocet

- Εκτοξευτήρες και πύραυλοι MM-40 Exocet: πρόκειται για επίσης διαδεδομένο σύστημα, σε πλοία κυρίως Γαλλο-ολλανδικής κατασκευής. Η έκδοση του για πλοίο είναι ικανή να πλήξει στόχους επιφανείας σε απόσταση άνω των 100 nm. Το βάρος του εκτοξευτήρα ανέρχεται σε 500Kg ενώ το πλήρες φορτίο οκτώ πυραύλων ανέρχεται σε 5.3t.



Εικόνα 12: Diehl BGT/Saab RBS-15

- Εκτοξευτήρες RBS-15 και πύραυλοι BGT/Saab RBS 15: πρόκειται για σύστημα που χρησιμοποιείται σε πλοία που έχουν σχεδιασθεί από χώρες του ευρωπαϊκού βορρά. Το βάρος του εκτοξευτήρα ανέρχεται σε 500Kg ενώ το πλήρες φορτίο οκτώ πυραύλων ανέρχεται σε 6.4t.

Στα πλαίσια της παρούσας λαμβάνεται υπόψη ως βάρος εκτοξευτήρα τα 500kg και θεωρείται ότι ο εκτοξευτήρας φέρει οκτώ πυραύλους μέσου βάρους 5,7t.

1.4.4 Δυνατότητα διεξαγωγής αντιαεροπορικής άμυνας (Anti-Aircraft Warfare-AAW)

Η διεξαγωγή επιχειρήσεων αεράμυνας βασίζεται στην δυνατότητα εντοπισμού και αντιμετώπισης αεροσκαφών και ιπταμένων στόχων με χρήση καταλλήλων διατάξεων διοίκησης και ελέγχου αλλά και οπλικών συστημάτων. Οι γνωστότερες ηλεκτρονικές διατάξεις που προσδίδουν τις σχετικές δυνατότητες, είναι οι ακόλουθοι αισθητήρες:

- α. Radar αέρος.
- β. Τακτικά δίκτυα (Data Links).
- γ. Πύραυλοι αέρος.

Οι ηλεκτρονικές διατάξεις που προσδίδουν τέτοιες δυνατότητες συνήθως αποτελούν "πακέτα" εξοπλισμού με μικρές δυνατότητες προσαρμογής, λόγω πιστοποίησης και κόστους ανάπτυξης. Σε ότι αφορά στον οπλισμό που προσδίδει τις δυνατότητες εναντίον ιπταμένων στόχων, χαρακτηριστικά αναφέρονται τα ακόλουθα προϊόντα:



Εικόνα 13: RIM-162 ESSM / VLS MK-41

- Εκτοξευτήρες Lockheed Martin MK-41 VLS με πυραύλους Raytheon RIM-162 Enhanced Sea Sparrow: πρόκειται για ένα διαδομένο σύστημα αεροπορικής άμυνας που συναντάται σε πλοία Αμερικανικής κατασκευής. Ο εκτοξευτήρας κάθετης απογείωσης έχει βάρος περί τους 56t ενώ ένα φορτίο 32 πυραύλων αντιστοιχεί σε βάρος 9t.



Εικόνα 14: Aster 15/Sylver A-43

- Εκτοξευτήρες Sylver A-43 με πυραύλους MDBA Aster 15: πρόκειται για ένα αντίστοιχο σύστημα γαλλικής κατασκευής που συναντάται σε ευρωπαϊκής κατασκευής πλοία. Ο εκτοξευτήρας κάθετης απογείωσης έχει βάρος περί τους 30t ενώ ένα φορτίο 32 πυραύλων αντιστοιχεί σε βάρος 10t.

Στα πλαίσια της παρούσας λαμβάνεται υπόψη ως μέσο βάρος εκτοξευτήρα οι 44t και θεωρείται ότι ο εκτοξευτήρας φέρει 32 πυραύλους μέσου βάρους 9,5t.

1.4.5 Δυνατότητα διεξαγωγής άμυνας περιοχής (Close In Weapon System-CIWS)

Η διεξαγωγή επιχειρήσεων άμυνας περιοχής βασίζεται στην δυνατότητα εντοπισμού και αντιμετώπισης στόχων σε μικρή σχετικά απόσταση από το πλοίο, με χρήση καταλλήλων διατάξεων διοίκησης και ελέγχου αλλά και οπλικών συστημάτων. Οι γνωστότερες ηλεκτρονικές διατάξεις που προσδίδουν τις σχετικές δυνατότητες, είναι οι ακόλουθοι αισθητήρες:

- α. Radar περιοχής (π.χ. Phalanx).
- β. Πυροβόλα μέσης και μικρής διαμέτρου.
- γ. Εκτοξευτήρες και πύραυλοι αέρος χαμηλού βεληνεκούς.

Οι ηλεκτρονικές διατάξεις που προσδίδουν τέτοιες δυνατότητες συνήθως αποτελούν "πακέτα" εξοπλισμού με μικρές δυνατότητες προσαρμογής, λόγω πιστοποίησης και κόστους

ανάπτυξης. Σε ότι αφορά στον οπλισμό που προσδίδει τις δυνατότητες εναντίον στόχων, χαρακτηριστικά αναφέρονται τα ακόλουθα προϊόντα:



Εικόνα 15: Oerlikon Oto Melara 76mm Strales

- Πυροβόλο Oerlikon Oto Melara 76/62mm Strales: Πρόκειται για πυροβόλο μέσου διαμετρήματος, βάρους 8t που δύναται να φέρει 1000 rounds βάρους 6t.



Εικόνα 16: BAE Bofors 57mm

- Πυροβόλο BAE Bofors 57mm: Ομοίως πρόκειται για πυροβόλο μέσου διαμετρήματος, βάρους 7.5t δυνάμενο να φέρει 1000 rounds βάρους 6.5t.



Εικόνα 17: Nexter Narwhal 20mm

- Πυροβόλο Nexter Narwhal 20mm: πρόκειται για πυροβόλο μικρού διαμετρήματος βάρους 1t το οποίο χρησιμοποιείται για άμυνα περιοχής.



Εικόνα 18: Typhoon MK-38 25mm

- Πυροβόλο ΒΑΕ Typhoon MK-38 25mm: πρόκειται για πυροβόλο μικρού διαμετρήματος βάρους 1.5t το οποίο χρησιμοποιείται για άμυνα περιοχής.



Εικόνα 19: RIM-116 RAM on MK-49 Launcher

- Εκτοξευτήρας Raytheon MK-49 και πύραυλοι BGT RIM-116 RAMS: πρόκειται για βλήματα μικρού βεληνεκούς ικανά να αναχαιτίσουν ταχέως κινούμενους στόχους. Ο εκτοξευτήρας έχει βάρος 5.7 t και φέρει 21 RAMS συνολικού βάρους 1.5t.



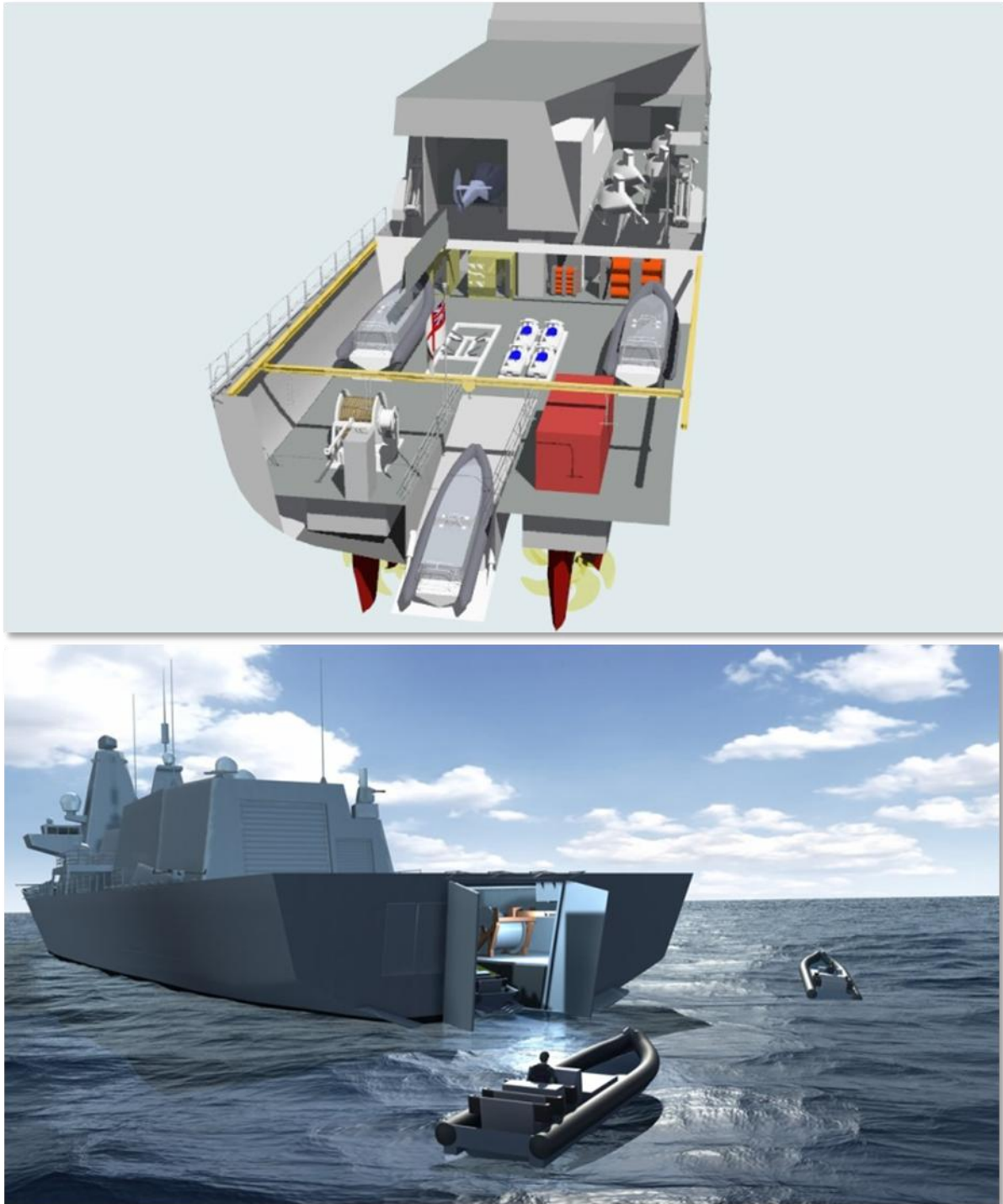
Εικόνα 20: Thales Crotale NG VT1

- Εκτοξευτήρας Thales Crotale MK3 και πύραυλοι Crotale NG VT1: Ομοίως πρόκειται για βλήματα μικρού βεληνεκούς ικανά να αναχαιτίσουν ταχέως κινούμενους στόχους. Ο εκτοξευτήρας έχει βάρος 5 t και φέρει 24 RAMS συνολικού βάρους 1.75t.

1.4.6 Δυνατότητα διεξαγωγής ειδικών επιχειρήσεων και υποστήριξης εκστρατευτικών δυνάμεων (Special Operations / Expeditionary Forces) – Δυνατότητα υποστήριξης Capability Module

Η διεξαγωγή ειδικών επιχειρήσεων βασίζεται στην δυνατότητα μετακίνησης δυνάμεων σε σημεία ενδιαφέροντος, με χρήση πλωτών μέσων (RHIBs) ή μέσω υποβρυχίων διατάξεων (UUV/USV/UAV). Σύγχρονες σχεδιάσεις ενσωματώνουν τις συναφείς δυνατότητες είτε σε διαμερίσματα της υπερκατασκευής, από όπου με κατάλληλες διατάξεις καθελκούνται στη θάλασσα, είτε στο οπίσθιο τμήμα του πλοίου σε κατάλληλα διαμορφωμένο mission bay. Επισημαίνεται ότι οι σχεδιάσεις με χρήση mission bay, πέρα από την ενσωμάτωση των πλωτών μέσων και τυχόν USV/UUV, ενσωματώνουν και τη δυνατότητα χρήσης Capability Modules, τα οποία είναι ηλεκτρονικά συστήματα τοποθετημένα σε φορητά 20ft Containers τα οποία τοποθετούνται στο Mission Bay, συνδέονται με το σύστημα CIC και Data Fusion του πλοίου και επεκτείνουν τον χάρτη των επιχειρησιακών του δυνατοτήτων.

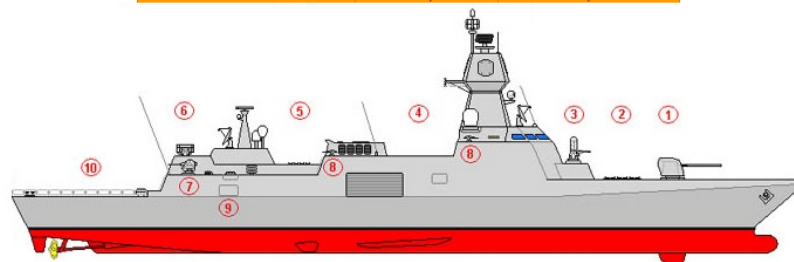
Μια τυπική διάταξη σε Mission Bay παρουσιάζεται στην εικόνα 21. Στα πλαίσια της παρούσας σχεδίασης έχει υιοθετηθεί η λύση του Mission Bay, καθόσον πέρα από την υποστήριξη των δυνατοτήτων επιχειρήσεων με εκστρατευτικές δυνάμεις, παρέχει σημαντική επιχειρησιακή ευελιξία και προσαρμοστικότητα (modularity) στις επιχειρησιακές απαιτήσεις, μέσω της χρήσης των 20ft Capability Modules. Βασικό στοιχείο της εν λόγω σχεδίασης είναι η ανάγκη χρήσης ράμπας η οποία θα επιτρέπει την φόρτωση των επιχειρησιακών συστημάτων πριν την αποστολή αλλά και την επιχειρησιακή τους χρήση εν πλω. Η θέση της ράμπας και συνακόλουθα η εσωτερική διάταξη των συστημάτων καθορίζεται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πλοίου (πλάτος) αλλά και την θέση των ελίκων - πηδαλίων του πλοίου, ώστε να είναι εφικτή η χρήση της εν πλω. Οι διαθέσιμες επιλογές είναι να τοποθετείται είτε στο κέντρο της πρύμνης (όπως π.χ. στην εικόνα) είτε στο ένα άκρο (για πλοία με μικρότερο πλάτος). Στα πλαίσια της παρούσας, με δεδομένο ότι δεν μελετάται η διάταξη των ελίκων και των πηδαλίων, θεωρείται ότι η ράμπα τοποθετείται στο ένα άκρο, γεγονός που χρήζει επαναξιολόγησης στα πλαίσια της αναλυτικής σχεδίασης, μετά τον καθορισμό της θέσης των ελίκων – πηδαλίων.



Εικόνα 21: Mission Bay φρεγάτας Type 26 Global Combat Ship

1.5 Επιχειρησιακά συστήματα και βάρη

Weapon Systems												
Station ID	Requirement	Function	System Vendor	System Type	System Weight (t)	System Weight (t mean)	Ammunition	Capacity	Weight (t each)	Weight (t full)	Weight (t mean)	
1.A	Rapid Gun Fire	Naval Support	Oerlikon	Oto Melara 76/62 mm Strales	7.9		Rounds	350	0	19.25		
1.B	Rapid Gun Fire	Naval Support	BAE Systems	Bofors 57mm Mk.3	7.5	7.9	Rounds	350	0	19.25	19.25	
2.B	AAW Missiles	Anti-Aircraft Warfare	Lockheed Martin	Mk-41 mod.10 VLS 4x8	56.88		Raytheon Rim-162 Enhanced Sea Sparrow Missile	4x8	0.280	8.96		
2.A	AAW Missiles	Anti-Aircraft Warfare	DCNS	Sylver A-43 VLS 4x8	30	56.88	MBDA Aster 15 Missile	4x8	0.310	9.92	9.44	
3.A	Support Gun Fire	Close In Weapon System	Oerlikon	Narwhal 20mm	0.78		Rounds	5000	0.0004	2.15		
3.B	Support Gun Fire	Close In Weapon System	General Dynamics	Typhoon MK38 Mod2 25mm	1.5	1.5	Rounds	5000	0.0004	2.15	2.15	
4.B	ASuW Missiles	Anti-Surface Warfare	Honeywell	MK-141 Launcher	5.9		Boeing RGM-84 Blk2 Harpoon SS Missile	2x4	0.75	6.00		
4.A	ASuW Missiles	Anti-Surface Warfare	MBDA	MM-40 Launcher	5.5		MBDA Exocet MM-40 SS Missile	2x4	0.75	6.00		
4.A	ASuW Missiles	Anti-Surface Warfare	Saab Defence	RBS15 MK3 Launcher	5	11.8	Diehl BGT/Saab RBS15 Mk3 SS Missile	2x4	0.8	6.40	6.13	
6.B	Point Defence	Close In Weapon System	Raytheon/Diehl BGT	MK-49 Cell Launcher	5.7		Diehl BGT RIM-116 Rolling Airframe Missile	21	0.073	1.53		
6.A	Point Defence	Close In Weapon System	Thales	Crotale MK3	5	5.7	Thales Crotale VT1 Missiles	24	0.073	1.75	1.6425	
7.A	Point Defence	Close In Weapon System	Nexter	Narwhal 20mm x2	0.78		Rounds	11000	0.0004	4.73		
7.B	Point Defence	Close In Weapon System	Rafael	Typhoon MK38 Mod2 25mm x2	1.5	3	Rounds	11000	0.0004	4.73	4.73	
8.B	ASW Torpedoes	Anti-Submarine Warfare	Alliant	Mk-32 SVT Tubes x2	2.02		Alliant MK-46 Torpedo	2x3	0.25	1.50		
8.A	ASW Torpedoes	Anti-Submarine Warfare	Eurotorp	Triple WASS B-515/3 launcher x2	2.02	2.02	Eurotorp MU-90/Impact Torpedo	2x3	0.3	1.80	1.65	
10.A/B	ASW Helicopter	Anti-Submarine Warfare	Shikorsky	S-70B	9.9							
10.A/B	ASW Helicopter	Anti-Submarine Warfare	NHI	NH-90	10.6	10.6	MBDA Exocet MM-39 Air to Surface Missile	3x4	1.055	12.66	12.66	
Stores	Point Defence						Chaff Magazines/Deck-Lockers			3	3	
Stores	ASW Torpedoes						Torpedoes Replenishments	2x9	0.275	4.95	4.95	
Stores	Point Defence						Small Arms & Explosives			2	2	
Stores	Exped. Forces						Weapons and Ammunition Margin (UCAVs/USVs)			2	2	
* For Systems the Value is the maximum value that can be installed					System (t)	Payload (t)						
* For Payload the Value is the mean value between systems					Total Value	99,4	69,61					



Εικόνα 22: Οπλικά συστήματα και εκτίμηση μέσου οπλικού φορτίου

1.6 Απαιτήσεις Σχεδίασης

Λαμβάνοντας υπόψη την παραπάνω ανάλυση επιχειρησιακών συστημάτων, οι απαιτήσεις σχεδίασης κατόπιν διαβούλευσης με ειδικούς της αγοράς, διατυπώνονται ακόλουθα:

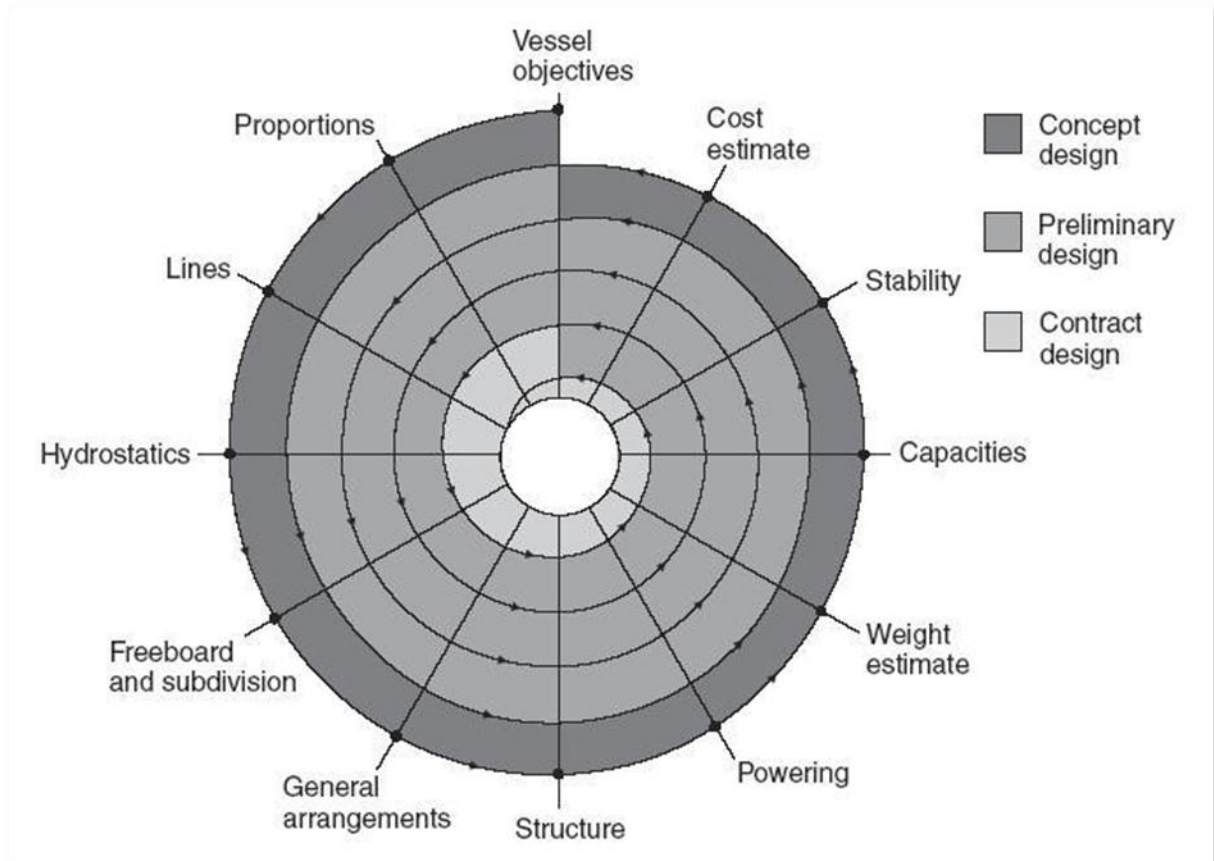
Πίνακας 2: Απαιτήσεις Σχεδίασης

Απαίτηση	Στόχος
Εκτόπισμα	~ 4500t
Οικονομική ταχύτητα	16 - 18 kts
Μέγιστη ταχύτητα	~ 30 kts
Αυτονομία	>4000nm
Διάταξη Πρόωσης	Σύγχρονα συστήματα και υλικά με απότερο σκοπό την ελαχιστοποίηση του κόστους κύκλου ζωής
Σχεδίαση Γάστρας	
Σχεδίαση Υπερκατασκευής	
Επιχειρησιακή Δυνατότητα AAW	Συστοιχία 4x8 πυραύλων σύγχρονης σχεδίασης με κάθετη εκτόξευση
Επιχειρησιακή Δυνατότητα ASuW	Συστοιχία πυραύλων αέρος - επιφανείας 1x8, σύγχρονης σχεδίασης
Επιχειρησιακή Δυνατότητα ASW	Sonar Dome, Variable Length Sonar, Torpedoes, Helicopter
Δυνατότητα Υποστήριξης Ειδικών Επιχειρήσεων	2x RHIBs, integrated UUV/USV στο multi-mission bay
Δυνατότητα Τοπικής Άμυνας και Προστασίας	Σύγχρονο Πυροβόλο 76mm, Σύγχρονο Σύστημα Close In Weapon Support
Δυνατότητα Ενσωμάτωσης Πρόσθετων Επιχειρησιακών Ικανοτήτων	Multi-mission bay με δυνατότητα φόρτωσης ενός 20ft capability module

2. Προκαταρκτική Μελέτη

2.1 Διαδικασία Σχεδίασης και Όμοια Πλοία

Η διαδικασία σχεδίασης βασίσθηκε στην σπείρα σχεδίασης του Evans [16].



Εικόνα 23: Ship Design Spiral [1]

Για την επιλογή των κυρίων διαστάσεων αναζητήθηκε και εντοπίσθηκε δείγμα πλοίων τα οποία πληρούν αντίστοιχες επιχειρησιακές απαιτήσεις, αποτελούν σχετικά σύγχρονες σχεδιάσεις και έχουν εκτόπισμα παραπλήσιο με το ζητούμενο από τις επιχειρησιακές απαιτήσεις, τα οποία και παρουσιάζονται στον πίνακα 1. Στη φάση της προκαταρκτικής μελέτης, η παρουσία και άλλων όμοιων πλοίων είναι εφικτή και αναγκαία για την εξαγωγή συντελεστών και σταθερών, τα οποία δημιουργούν το πλαίσιο παραμέτρων για την εξαγωγή των βασικών διαστάσεων. Ως εκ τούτου, στη συνέχεια παρουσιάζεται ο πίνακας 3 με το εύρος και τις μέσες τιμές των συντελεστών που υπολογίσθηκαν, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα του πίνακα 1.

Ως «πατρικό» πλοίο θα χρησιμοποιηθεί φρεγάτα σχεδίασης της δεκαετίας του 1980 (στο βαθμό που αυτό κρίνεται αναγκαίο με δεδομένο ότι πρόκειται για παλαιότερη σχεδίαση), η οποία αποτέλεσε πρόταση προμήθειας προς το Ελληνικό Πολεμικό Ναυτικό.

Σε ότι αφορά στην κατανομή βαρών (weight classification), τα πολεμικά πλοία ακολουθούν διαφορετική δομή παρουσίασης της κατανομής αυτής σε σχέση με τα εμπορικά, ακολουθώντας το πρότυπο Expanded Ship Breakdown Structure (ESWBS) του Αμερικανικού Ναυτικού, η οποία διακριτοποιεί τα βάρη στις ακόλουθες κατηγορίες:

Πίνακας 3: Expanded Weight Breakdown Structure

Κατηγορία Βάρους	Περιγραφή
100	Γάστρα
200	Προωστήρια Εγκατάσταση
300	Ηλεκτρική Εγκατάσταση
400	Επικοινωνίες και Διοίκηση
500	Βοηθητικά Συστήματα
600	Εξοπλισμός
700	Συστήματα Οπλισμού
M	Περιθώρια (Margins)
F	Καύσιμα και Ωφέλιμο Φορτίο

2.2 Επιλογή Κυρίων Διαστάσεων

Από τα όμοια πλοία του πίνακα 1, υπολογίσθηκε το εύρος διακύμανσης των κυρίων συντελεστών μορφής – σχεδίασης, που παρουσιάζεται ακόλουθα:

Πίνακας 4: Διακύμανση λόγων - συντελεστών ομοίων πλοίων

Type	Min	Max	Average
L/B	6,222	7,596	7,028
B/T	2,927	4,195	3,494
L/D	10,964	13,916	12,457
Cn-cruise	69,086	326,729	117,125
Cn-battle	117,424	308,502	205,066
C_b*	0,363	0,529	0,454
C_{wp}*	0,585	0,716	0,657
C_m*	0,847	0,926	0,877
C_p*	0,392	0,624	0,519

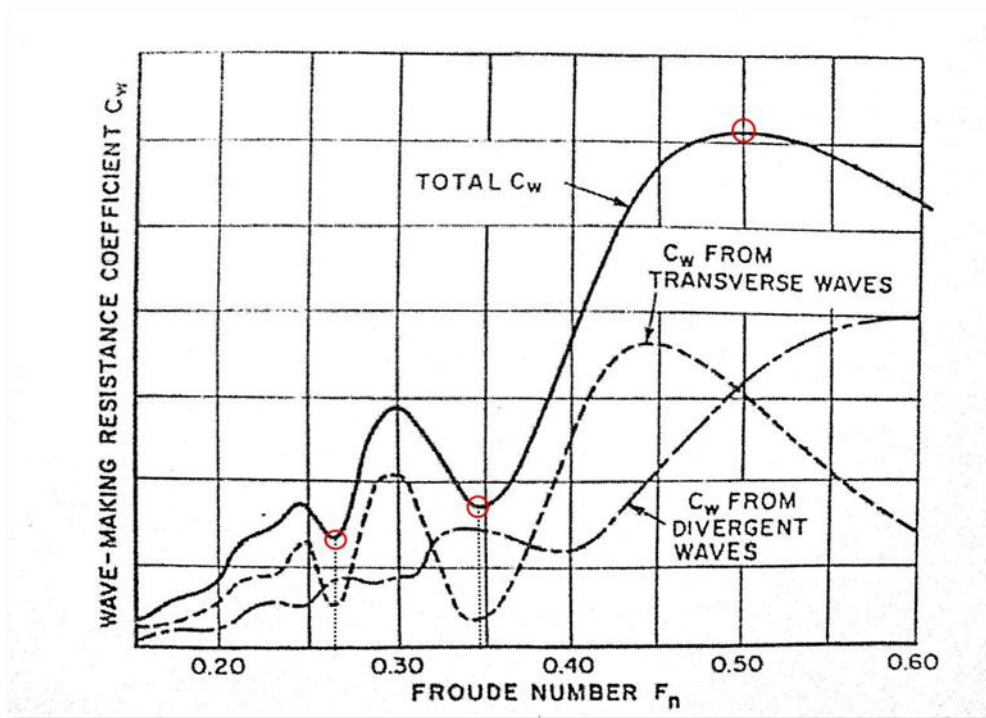
Δ	3200	6645	4728
Fn-service	0,192	0,288	0,243
L	105,100	133,100	119,679
B	14,800	19,800	17,074
D	9,150	11,220	9,953
T	4,100	6,000	4,917
Complement	72,000	255,000	152
*Υπολογιζόμενες τιμές από κύριες διαστάσεις			

Από τις παραπάνω τιμές και λαμβάνοντας υπόψη τις τεθείσες απαιτήσεις, καθορίζεται η πρώτη προσέγγιση των κυρίων διαστάσεων και των συντελεστών μορφής του πλοίου, η οποία αναθεωρείται με συνεχείς δοκιμές μέχρι το τελικά παραγόμενο σύνολο τιμών να ικανοποιεί, προκαταρκτικά, τις απαιτήσεις. Σε ότι αφορά στην μέση στελέχωση (complement) επισημαίνεται ότι, όπως διακρίνεται στον πίνακα 1 για πλοία που εμφανίζουν στελεχώσεις άνω των 200 ατόμων, αυτή καθορίζεται από τις μεθόδους επιχειρησιακής λειτουργίας (Concept of Operation) με τις οποίες λειτουργούν οι εκάστοτε ΕΔ και δεν συνιστά απαραίτητα την ελάχιστη δυνατή στελέχωση για τις συναφείς επιχειρησιακές δυνατότητες. Αποτέλεσμα τούτου είναι η εμφάνιση αυξημένου μέσου όρου στελέχωσης, ο οποίος, εάν αφαιρεθούν τα τρία πλοία με τις στελεχώσεις άνω των 200 ατόμων, διαμορφώνεται στα 131 άτομα.

Ιδιαίτερης σημασίας σημείο σχεδίασης για πλοία υψηλών ταχυτήτων (High Speed Crafts) αποτελεί η επιλογή της περιοχής του αριθμού Froude στην οποία θα κινείται το σκάφος στις περιοχές της οικονομικής και της μέγιστης ταχύτητας, προκειμένου αφενός να επιτυγχάνεται ικανοποιητική υδροδυναμική απόδοση και αφετέρου να αποφεύγονται οι δυσμενείς περιοχές του αριθμού Froude, στις οποίες εμφανίζονται φαινόμενο συντονισμού πρωαίων και πρυμναίων συστημάτων κυματισμού, καθώς και αυξημένη υδροδυναμική αντίσταση κυματισμού.

Για την βελτίωση της υδροδυναμικής απόδοσης του σκάφους, είναι επιθυμητό να λειτουργεί στις ταχύτητες σχεδίασης του εντός των ευνοϊκών περιοχών του αριθμού Froude. Οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από σχετικά μειωμένη αντίσταση κυματισμού, ως συνιστώσα της υπόλοιπης (residual) αντίστασης η οποία αυξάνεται έντονα με την αύξηση της ταχύτητας του πλοίου. Συνεπώς, για την λειτουργία σε ευνοϊκή περιοχή του αριθμού Froude, αρκεί να εξετασθεί ο τρόπος μείωσης της αντίστασης κυματισμού. Τούτο

επιτυγχάνεται επιδιώκοντας τον ελάχιστο εφικτό συντελεστή αντίστασης λόγω κυματισμού, ο οποίος για δεδομένη ταχύτητα εξασφαλίζει την επιθυμητή μείωση αντίστασης κυματισμού. Θεωρώντας ότι η ίσαλος μας είναι παραβολοειδής (στην πράξη η ίσαλος αποκλίνει από το παραβολοειδές σχήμα, πλην όμως η απόκλιση θεωρείται ότι δεν επηρεάζει το αποτέλεσμα), η κατανομή του συντελεστή αντίστασης λόγω κυματισμού δίδεται ακόλουθα [4]:



Εικόνα 24: Συντελεστής αντίστασης λόγω κυματισμού C_w [4]

Μελετώντας προσεκτικά τις τιμές του εν λόγω συντελεστή, διαπιστώνεται η ύπαρξη τοπικού ακρότατου στην περιοχή του $F_n=0.26$. Από την άλλη, οι δυσμενείς περιοχές του αριθμού Froude, για το φάσμα ταχυτήτων ενδιαφέροντος, είναι η περιοχή $F_n>0.46$ [4]. Γνωρίζοντας ότι ο αριθμός Froude δίδεται από σχέση της μορφής:

$$F_n = \frac{V}{\sqrt{gL}}$$

Πίνακας 5: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης Froude Number

Final Data	
Vs (kts)	17

V_{max} (kts)	30
F_n (Cruise)	0,26
F_n (Battle)	0,46
L_{bp}	115

Προκύπτει ότι για τις απαιτούμενες ταχύτητες, το ελάχιστο επιθυμητό μήκος πλοίου (L_{bp}) υπολογίζεται σε $L_{bp}=115m$. Με το μήκος αυτό, επιτυγχάνεται η βελτιστοποίηση του αριθμού Froude $F_n=0.26$ στην οικονομική ταχύτητα των $V_{cruise}= 17$ kts (ικανοποιεί τις απαιτήσεις), ενώ σε ταχύτητα μάχης $V_{battle}=30$ kts (ικανοποιεί τις απαιτήσεις), ο αριθμός Froude είναι οριακά στη δυσμενή περιοχή ($F_n=0.46$).

Έχοντας καθορίσει το ελάχιστο μήκος του πλοίου (μείωση του μήκους εξασφαλίζει την μείωση του κόστους κύκλου ζωής λόγω μικρότερου βάρους μεταλλικής κατασκευής σε συνδυασμό με ικανοποιητική υδροδυναμική συμπεριφορά, απαιτούμενη ισχύ πρόωσης και επακόλουθη κατανάλωση καυσίμων), ακολουθεί ο υπολογισμός των υπολοίπων γεωμετρικών διαστάσεων ο οποίος μετά από επανακυκλώσεις οδηγεί στις ακόλουθες τιμές:

- Με $L/B=6.98$ υπολογίζεται ότι **$B=16.46m$** .
- Με $B/T=3$ υπολογίζεται ότι **$T=4.95$ m**.
- Με $L/D=11.7$ υπολογίζεται **$D=9.83m$** .
- Το C_b λαμβάνεται ελαφρά μεγαλύτερο από τον υπολογιζόμενο (λόγω έλλειψης ακριβέστερων δεδομένων) μέσο όρο, ήτοι **$C_b=0.47$** .

Λαμβάνοντας υπόψη ότι $C_\gamma=1.029$ (λόγω μεγέθους του πλοίου), υπολογίζεται τελικά ότι το γεωμετρικό εκτόπισμα του πλοίου θα είναι:

$$\Delta\Gamma=C_\gamma C_b L B T = 1.029 \times 0.474 \times 115 \times 16.46 \times 4.95 = 4566 \text{ t.}$$

Για τον υπολογισμό του deadweight, λόγω έλλειψης των σχετικών στοιχείων από τα πλοία των πίνακα 1, υπολογίζεται αναλυτικά στην παρ. 2.4 και τελικά προκύπτει ότι **$DWT=725t$** . Από το πατρικό πλοίο προκύπτει ότι $w_{LS}=0.208$ kg/m³ το ειδικό βάρος της μεταλλικής κατασκευής (Lightship), οπότε μια προσέγγιση του εκτοπίσματος βαρών θα είναι:

$$\Delta B=w_{LS} L B D + DWT = 0.208 \times 115 \times 16.46 \times 9.83 + 725 = 4595.3 \text{ t.}$$

Οπότε

$$\Delta\Gamma-\Delta B/\Delta B=-0,6\%$$

Το οποίο στην παρούσα φάση της μελέτης δεν ικανοποιεί τις απαιτήσεις, πλην όμως το ΔB θα αναθεωρηθεί στη συνέχεια κατόπιν αναλυτικών υπολογισμών βάρους. Σε ότι αφορά στους συντελεστές μορφής, αυτοί υπολογίζονται με τις ακόλουθες μεθοδολογίες οι οποίες βασίζονται σε εμπειρικούς τύπους:

- Συντελεστής ισάλου επιφανείας C_{wl}

$$C_{WL} = \frac{1 + 2C_B}{3} = \frac{1 + 2 \cdot 0.474}{3} = 0.65$$

- Συντελεστής μέσης τομής C_m

$$V. \text{ Lammeren : } C_M = 0.9 + 0.1 C_B = 0.946$$

$$H. \text{ Kerlen: } C_M = 1.006 - 0.0056 C_B^{-3.56} = 0.918$$

$$HSVA: C_M = 1/(1 + (1 - C_B)^{3.5}) = 0.88$$

Επισημαίνεται ότι οι τιμές που υπολογίζονται με χρήση των εμπειρικών τύπων είναι υψηλές, εάν ληφθούν υπόψη και οι τιμές των πλοίων του πίνακα 2, καθόσον οι εμπειρικοί τύποι αναφέρονται κατά βάση σε εμπορικά πλοία. Εκτιμάται λοιπόν ότι ο εν λόγω συντελεστής θα πρέπει να ληφθεί ίσος με $C_m=0.88$, ο οποίος στη συνέχεια πιθανότατα θα αναθεωρηθεί, λαμβάνοντας υπόψη και τους υδροστατικούς υπολογισμούς.

- Πρισματικός Συντελεστής C_p

$$C_p = \frac{C_B}{C_M} = \frac{0.474}{0.836} = 0.567$$

Ανακεφαλαιώνοντας, οι κύριες διαστάσεις και οι συντελεστές μορφής του πλοίου μας στη φάση αυτή λαμβάνονται ίσοι με:

Πίνακας 6: Δεδομένα Σχεδίασης

Γενικά Δεδομένα	Όνομα Σκάφους		Chios
Κύριες Διαστάσεις	L _{OA}	M	121
	L _{BP}	M	115
	B	M	16.46
	D	M	9.83
	T	M	4.95
Βάρη	DWT	Ton	725
	Δ	Ton	4566
	LS	Ton	3841
Πρόωση	V _{service}	kts	17
	V _{battle}	kts	30
Λόγοι	L/B		6.9
	L/D		11.7
	B/T		3

2.3 Προκαταρκτική Προσέγγιση Ισχύος

Με δεδομένα ότι το εκτιμώμενο εκτόπισμα είναι $\Delta = 4566$ tons, η επιθυμητή μέγιστη ταχύτητα $V_{\text{battle}} = 30$ kts (για λόγους υπολογισμού μέγιστης ισχύος, λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό η μέγιστη επιθυμητή ταχύτητα και ο συντελεστής ναυαρχείου C_N σε αυτή την ταχύτητα, ο οποίος C_N , κατά Horn [4], βαίνει μειούμενος με την αύξηση του αριθμού Froude) και τον συντελεστή ναυαρχείου που προέκυψε από το μέσο όρο των ομοίων πλοίων $C_{AD} = 205$ υπολογίζεται ότι η απαιτούμενη ισχύ BHP της προωστήριου εγκατάστασης, θα πρέπει να είναι:

$$C_N = \frac{\Delta^{\frac{2}{3}} \cdot V_S^3}{P_B} \rightarrow P_{B-\text{cruise}} = \frac{\Delta^{\frac{2}{3}} \cdot V_S^3}{C_N} = \sim 5802 \text{ KW}$$

$$C_N = \frac{\Delta^{\frac{2}{3}} \cdot V_S^3}{P_B} \rightarrow P_{B-\text{battle}} = \frac{\Delta^{\frac{2}{3}} \cdot V_S^3}{C_N} = \sim 35888 \text{ KW}$$

Επισημαίνεται ότι η επιλογή της κυρίας μηχανής θα πραγματοποιηθεί σε μεταγενέστερο στάδιο.

2.4 Υπολογισμός προσθέτου βάρους DWT

Με δεδομένο ότι το πλοίο δεν έχει ως αποστολή την μεταφορά εμπορικού φορτίου, στις περιπτώσεις των πολεμικών πλοίων ως φορτίο λαμβάνεται υπόψη, πέραν των καυσίμων, λιπαντικών και τυχόν άλλων αναλωσίμων, το φορτίο των πυρομαχικών που χρησιμοποιούνται για την εκτέλεση της αποστολής του πλοίου.

Για τον υπολογισμό του βάρους των απαιτούμενων καυσίμων, οι μεθοδολογίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό του είναι οι ακόλουθες:

α. Υπολογισμός με χρήση κλασικών μεθόδων υπολογισμού που βρίσκουν εφαρμογή σε πολεμικά πλοία, όπως π.χ. αυτές που αναφέρονται στο [4] (σελ. 280-282) και προσεγγίζουν ικανοποιητικά την τελική ποσότητα.

β. Οδηγοί – Μέθοδοι του Αμερικανικού Πολεμικού Ναυτικού και συγκεκριμένα το Design Data Sheet 200 της USNAVY/NAVSEA [49], με το οποίο εξετάζονται τα διάφορα σενάρια επιχειρήσεων του πλοίου και καθορίζουν την επιθυμητή ποσότητα καυσίμου. Η μέθοδος περιγράφεται στη συνέχεια καθώς επίσης και τα αποτελέσματα των υπολογισμών.

Ως εκ τούτου, το ωφέλιμο φορτίο του πλοίου υπο μελέτη θα υπολογισθεί λαμβάνοντας υπόψη τα ακόλουθα βάρη:

$$DWT = WPAYLOAD + WFO + WLO + WFW + WPR + WCR$$

Όπου:

- WPAYLOAD: “ωφέλιμο φορτίο” (πυρομαχικά)
- WFO: βάρος καυσίμων για την πρόωση και τα βοηθητικά μηχανήματα
- WLO : βάρος ελαιο-λιπαντικών
- WFW: βάρος πόσιμου νερού
- WPR: βάρος εφοδίων- τροφίμων
- WCR: βάρος πληρώματος και αποσκευών

2.4.1 Βάρος Καυσίμου και Λιπαντικών

2.4.1.1 Βάρος Καυσίμου με την μέθοδο NAVSEA DDS-200

Για το σχεδιασμό ενός πολεμικού πλοίου σημαντική παράμετρο σχεδιασμού αποτελεί η ικανοποίηση της απαίτησης εμβέλειας - ακτίνας ενεργείας (endurance) που τίθεται από τις επιχειρησιακές απαιτήσεις. Η διαδικασία που ακολουθεί το Αμερικανικό Πολεμικό Ναυτικό για τον υπολογισμό του ωφέλιμου καυσίμου προς επίτευξη της επιθυμητής ακτίνας ενέργειας, περιγράφεται στο [49], με το οποίο υπολογίζεται αρχικά το απαιτούμενο βάρος καυσίμου του πλοίου μας.

Προσδιορισμός κύριων όρων του DDS-200:

- Ακτίνα Ενεργείας (Endurance): είναι η θεωρητική απόσταση την οποία μπορεί να διατρέξει ένα πλοίο χρησιμοποιώντας όλα του τα αποθέματα καυσίμου σε μία συγκεκριμένη ταχύτητα, περιβάλλον αέρα και συνθήκες θαλασσινού νερού, σε βαθύ νερό, σε συγκεκριμένο εκτόπισμα (load displacement).
- Σχεδιαστική ισχύς ακτίνας ενεργείας (Design Endurance Power): είναι η ιπποδύναμη άξονα στη συγκεκριμένη ταχύτητα ακτίνας ενεργείας (endurance speed), όπως ενδείκνυται από την καμπύλη ταχύτητας - ισχύος του πλοίου.
- Μέση ισχύ ακτίνας διαρκείας (Average endurance Power): είναι η σχεδιαστική ισχύς διάρκειας αυξημένη κατά 10%. Αυτή η αύξηση είναι ένα περιθώριο για δυσχερείς συνθήκες θάλασσας και επίστρωση πυθμένα για μια περίοδο πάνω από δύο χρόνια.
- Μέσος όρος 24ώρου ηλεκτρικού φορτίου (24hour average electric load): είναι ο μέσος όρος του προβλεπόμενου ηλεκτρικού φορτίου, χωρίς αύξηση σε μία 24ωρη περίοδο σε λειτουργία στη προδιαγεγραμμένη ταχύτητα ακτίνας ενεργείας (endurance speed), περιβάλλον αέρα και συνθήκες θαλασσινού νερού.
- Υπολογιζόμενη κατανάλωση καυσίμων (Calculated all-purpose fuel rate): είναι η ειδική κατανάλωση καυσίμου σε lbs/SHP-hr, βασιζόμενη στη κατανάλωση των μηχανών, γεννητριών και άλλων υπηρεσιών σε λειτουργία στην ταχύτητα ακτίνα ενεργείας (endurance speed), περιβάλλον αέρα και συνθήκες θαλασσινού νερού.
- Συνθήκες περιβάλλοντος (Ambient Conditions): οι τιμές που χρησιμοποιούνται στο καθορισμό της υπολογισμένης αξίας καυσίμου είναι 100 βαθμούς F και 40% σχετική εργασία αέρα στις υπηρεσίες κατανάλωσης καυσίμου.

- Ειδική κατανάλωση καυσίμου (Specified Fuel Rate): είναι η υπολογιζόμενη κατανάλωση καυσίμου αυξημένη με ένα διορθωτικό παράγοντα που αφήνει περιθώριο σφάλματος από το όργανα μέτρησης στις δοκιμές του πλοίου καθώς και μικρές αλλαγές μηχανοστασίου κατά την διάρκεια κατασκευής του πλοίου. Αυτός ο παράγοντας, χρησιμοποιούμενος ως πολλαπλασιαστής, είναι 1,04 όταν η μέση ισχύ διαρκείας είναι το ένα τρίτο ή λιγότερο της μέγιστης ισχύος της εγκατάστασης πρόωσης, 1,03 όταν είναι μεταξύ του ενός τρίτου και δύο τρίτων και 1,02 όταν είναι μεταξύ δύο τρίτων και μέγιστης ισχύος.
- Μέση τιμή κατανάλωσης καυσίμων ακτίνας ενέργειας (Average Endurance Fuel Rate): είναι η προκαθορισμένη αξία αυξημένη κατά 5%. Αυτή είναι μία πρόσθετη αύξηση που αφήνει ανοχές σε περίπτωση υποβάθμισης της εγκατάστασης σε μια περίοδο πάνω από δύο χρόνια.
- Καύσιμο ακτίνας ενεργείας (Endurance fuel): είναι το πραγματικό καύσιμο σε τόνους που απαιτείται ώστε να πετύχουμε την επιθυμητή ακτίνα ενεργείας.
- Ανοχή σωληνώσεων (Tailpipe allowance): είναι ένας παράγοντας που εφαρμόζεται στο καύσιμο ακτίνας ενεργείας, ώστε να υπολογίζεται και το μη διαθέσιμο καύσιμο που παραμένει στη δεξαμενή, κάτω από τις σωληνώσεις. Εάν στην πλειοψηφία τους οι δεξαμενές είναι φαρδιές και ρηχές ο παράγοντας είναι 0,95, εάν στενές και ρηχές τότε είναι 0,98.
- Φορτίο καυσίμου ακτίνας ενεργείας (Endurance Fuel Load): είναι το φορτίο καυσίμου σε τόνους που λαμβάνεται από την διαίρεση του καυσίμου ακτίνας ενεργείας με τον παράγοντα ανοχής σωληνώσεων. Είναι το μέγιστο φορτίο καυσίμου του πλοίου για το οποίο πρέπει να υπάρχει στις δεξαμενές, ώστε να επιτύχουμε τις απαιτήσεις ακτίνας ενεργείας. Δεν περικλείει ένα πρόσθετο 5% στον ισοδύναμο όγκο δεξαμενών, ο οποίος πρέπει να παρέχεται σε περίπτωση διαστολής των καυσίμων. Για ένα εξισορροπημένο σύστημα μπορεί να έχουμε ένα περιθώριο μικρότερο του 5% , εν τούτοις αυτό πρέπει να καθορίζεται στην κάθε περίπτωση.

Παρακάτω παρατίθενται οι αναλυτικοί πίνακες με τους υπολογισμούς και το βάρος καυσίμου $W_{FUELOIL}$ που απαιτείται για την επίτευξη της επιθυμητής ακτίνας ενεργείας. Επισημαίνεται ότι στους υπολογισμούς έχει ληφθεί υπόψη η απαιτούμενη κατανάλωση καυσίμου των γεννητριών του πλοίου, σύμφωνα με τις προβλέψεις της μεθοδολογίας. Οι υπολογισμοί βασίστηκαν στην λογική χρήσης συστήματος πρόωσης τύπου CODLAG (Combined Diesel Electric Or Gas) και λήφθηκαν υπόψη τα guidelines επιλογής απαιτούμενης ισχύος CODLAG της MAN [35].

Πίνακας 7: Υπολογισμός Συνολικής Απαιτούμενης Ισχύος

Diesel Generators Power Calculations			
1.1	Shaft propulsion power	5802	KW
	Electrical transmission efficiency	0.91	
1.2	Engine Brake Power	6375	KW
2.1	Avg.Electric power for Ship (eLoads) *	2000	KW
	Alternator efficiency	0.96	
2.2	Engine Brake Power (eLoads)	2083	KW
	Total Engine Brake Demand	8459	KW
3.1	Diesel Engine Selection	MTU 20V 4000 Generator Set	
3.2	Rated power (MCR using MDO)	6060	KW
3.3	Number of Diesel Engines	2	
3.4	Total Engine Brake Power Installed	12120	KW
4.1	Engine Loading	70%	
4.2	Check max allowed loading	90%	

Πίνακας 8: Υπολογισμός Απαιτούμενου Καυσίμου κατά NAVSEA DDS-200

A. 1	Service Requirements				
a.	Economical Transit Distance	4000	nm		
b.	Endurance Speed	17	kts		
c.	Surge to Theater	700	nm		
d.	Sustained Speed	30	kts		
e.	Operational Presence speed-time profile	Speed (kts)	%time		
		5	20%		
		10	30%		
		15	25%		
		20	15%		
		25	8%		
		30	2%		
f.	Operational Presence Time	168	hours	* 7 days presence	
A. 2	Design Details				
a.	Electrical Plant Analysis	* Not Required due to CODLAG			
b.	Propulsion CONOPS:	2xMTU 4000 Gen. Sets	Nominal	6060 KW	each

	CODLAG				
	Endurance speed with BOTH Gen.Pack	1xLM2500+G4 GT		Nominal 35.4 MW	
c.	Propulsion Speed-Power Curve	Speed (kts)	Port Shaft (KW)	Starboard Shaft (KW)	Propulsion Setting
		5	214	0	Single DG Pack
		10	1715	0	Single DG Pack
		15	2545	2545	Dual DG Pack
		17	3500	3500	Dual DG Pack
		18	4000	4000	Dual DG Pack
		20	6300	6300	Full Plant
		25	9600	9600	Full Plant
		30	17100	17100	Full Plant
d.	Reduction Gear Efficiency	0.975			
e.	1. MGT specific fuel consumption	Power (KW)	SFC (kg/kWh)		
		1500	0.6		
		3000	0.48		
		6000	0.34		
		9000	0.3		
		12000	0.27		
		15000	0.26		
		20000	0.25		
		25000	0.23		
		30000	0.214		
	2. DG specific fuel consumption (each)	Power (KW)	SFC (kg/kWh)		
		500	0.45		
		1000	0.35		
		2000	0.25		
		2500	0.19		
		3000	0.19		
f.	Plant deterioration allowance	1.05			
g.	Sea state and fouling factor	1.1			
h.	Tailpipe	0.95			

allowance				
-----------	--	--	--	--

A.3	Calculations		
a	Economical Transit Burnable Fuel		
a.1	Design Endurance Power (17 kts)	8426	kW
a.2	Sea State and Fouling Factor	1.1	
a.3	Average Endurance Power	9269	kW
a.4	Reduction Gear Efficiency*	1	
a.5	DG Power	9269	kW
a.6	DG Total Sp. Fuel Consumption	0.19	kgr/kWh
a.7	DG Fuel Rate	1761	kg/h
a.8	Economical Transit Burnable Fuel Load	435	metric tons
b	Surge to Theater Burnable Fuel		
b.1	Design sustained power (30 kts)	35888	kW
b.2	Sea State and Fouling Factor	1,1	
b.3	Average Endurance Power	39477	kW
b.4	Reduction Gear Efficiency	0,975	
b.5	CODLAG Power	47380	kW
b.6	CODLAG Specific Fuel Consumption	0,59*	kg/kWh
b.7	CODLAG Fuel Rate *	8163**	kg/h
b.8	Surge to Theater Burnable Fuel Load	200	metric tons
c	Operational Presence Burnable Fuel		
c.1	Propulsion Plant Fuel Rate	1691	kg/h
c.2	Operational Presence Time	168	hours
c.3	Operational Presence Burnable Fuel Load	298	metric tons
d	Endurance Fuel Load		
d.1	Design burnable fuel load	435	metric tons
d.2	Endurance Fuel Load	458.0	metric tons
*assumed mean CODLAG SFC=2*0.19+0.214=0.59 kg/kWh			
**=5920*2*0.19+(47380-2*5920)*0.214=8163 kg/h			

Συνεπώς, από την μεθοδολογία υπολογίζεται ότι το απαιτούμενο καύσιμο για την επιθυμητή ακτίνα ενέργειας είναι:

$$W_F = 458 \text{ t}$$

2.4.1.2 Βάρος Καυσίμου με την μέθοδο ισχύος/κατανάλωσης

Για τον υπολογισμό του βάρους καυσίμου, προσεγγίζουμε αρχικά την απαίτηση με χρήση των μεθοδολογιών που περιγράφονται στο σύγγραμμα [4] (σ.280-282). Για τον υπολογισμό του W_F θεωρείται:

- Μέση κατανάλωση καυσίμου $b=180 \text{ gr/KWh}$.
- Κατανάλωση βοηθητικών μηχανημάτων το 6% της κατανάλωσης καυσίμων της κύριας μηχανής.
- Βάρος λιπαντικών WF_2 αντιστοιχεί περίπου στα 4% του βάρους των καυσίμων WF_1 .
- Εφεδρεία για υπερκατανάλωση λόγω αλλαγής πορείας, απρόβλεπτης αναμονής, αρωγή σε περίπτωση ανάγκης και κατάλοιπα δεξαμενών 2 – 4 %

Από την υπολογισθείσα ισχύ για την οικονομική ταχύτητα $V_{\text{cruise}}=17\text{Kn}$ και με βάση τις προηγούμενες παραδοχές θα έχω :

$$W_F=P_B \cdot b \cdot t \cdot C \cdot 10$$

όπου :

- W_F : βάρος καυσίμων [t].
- P_B : εγκατεστημένη ισχύς K. M σε [kW]
- b : ειδική κατανάλωση K.M. [g/kWh]
- t : χρόνος ταξιδιού μετ' επιστροφής [hr] με βάση την υπηρεσιακή ταχύτητα και ακτίνα δράσης (10 ημέρες)
- C : 1,3 εφεδρεία για υπερκατανάλωση λόγω αλλαγής πορείας, απρόβλεπτης αναμονής, αρωγή σε περίπτωση ανάγκης και κατάλοιπα δεξαμενών

Ο χρόνος εν πλω του πλοίου υπολογίζεται ότι είναι :

$$t=R/V_{\text{cruise}}=4000/17=235\text{hr}=10 \text{ days}$$

λαμβάνοντας ως συνολική ισχύ πρόωσης (στο σύστημα CODLAG) ίση με $P_b=8426\text{KW}$ (όση υπολογίστηκε με χρήση της μεθόδου DDS-200, έχοντας λάβει υπόψη electrical efficiency 91%) προκύπτει ότι:

$$W_F=8426 \cdot 0.18 \cdot 1.3 \cdot 235 \cdot 10^{-3}=463.9 \text{ t}$$

Διαπιστώνουμε ότι οι δύο μέθοδοι συγκλίνουν στην απαιτούμενη ποσότητα καυσίμου προκειμένου να επιτευχθεί η ζητούμενη ακτίνα ενέργειας. Λαμβάνεται λοιπόν ως απαιτούμενη ποσότητα καυσίμου,

$$W_{FO}=463.9t$$

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η ποσότητα καυσίμου δεν πρέπει να καταλαμβάνει όγκο μεγαλύτερο του 95% των δεξαμενών καυσίμου, λόγω πρόβλεψης 5% για expansion και structural allowance, συμφώνως DDS-200. Ως εκ τούτου, θεωρώντας ως πυκνότητα καυσίμου Fuel Oil $d=0.83t/m^3$, προκύπτει ο περιορισμός ελαχίστου όγκου δεξαμενών

$$V_{FO}=588.3m^3$$

Σε ότι αφορά στην απαιτούμενη ποσότητα λιπαντικού ελαίου, αυτή λαμβάνεται ίση με το 4% του βάρους καυσίμου, δηλαδή:

$$W_{LO}=18.6 t$$

2.4.2 Βάρος Ωφέλιμου Φορτίου

Ως ωφέλιμο φορτίο του πλοίου λαμβάνεται το βάρος των πυρομαχικών του. Όπως αναλύθηκε στην ενότητα 1.4, το μέσο βάρος των πυρομαχικών σε κατάσταση πλήρους φόρτωσης, το οποίο ικανοποιεί τις επιχειρησιακές απαιτήσεις σχεδίασης, λαμβάνεται ίσο με

$$W_{PAYLOAD}=69.61t$$

Στο βάρος αυτό δεν περιλαμβάνονται επιχειρησιακά συστήματα τα οποία θεωρούνται μόνιμος εξοπλισμός του πλοίου, όπως π.χ. τα RHIBs, τα UUVs/USVs, κλπ..

2.4.3 Βάρος Πληρώματος

Αν και ο ακριβής προσδιορισμός του αριθμού μελών πληρώματος στην φάση της αρχικής σχεδίασης δεν είναι εφικτός, καθότι εξαρτάται άμεσα από τις απαιτήσεις επιχειρησιακής λειτουργίας και υποστήριξης των τελικά επιλεγμένων συστημάτων (πρόωση, mission systems, weapon systems, κ.α.) θεωρείται ως ικανοποιητική παραδοχή ότι το πλήρωμα αποτελείται από **120 μέλη**. Το μέγεθος αυτό συγκλίνει με το μέγεθος αντιστοίχων

πλοίων με παραπλήσιες επιχειρησιακές δυνατότητες (π.χ. κλάσεις ΜΕΚΟ Α-200 ΑΝ, Huitfeldt, Nansen, Legend).

Με βάση τον Γερμανικό κανονισμό BV 1030-1, το κέντρο βάρους του πληρώματος θεωρείται στο κέντρο μάχης (combat stations), ενώ το συνολικό βάρος πληρώματος προκύπτει ως εξής :

- Βάρος μέλους πληρώματος : 85kg/μέλος.
- Βάρος εξοπλισμού Petty Officer/Chief Petty Officer/Ratings : 80kg/μέλος.
- Βάρος εξοπλισμού Officer/Warrant Officer : 110kg/μέλος.

Ενώ λαμβάνεται υπόψη η ακόλουθη σύνθεση πληρώματος:

Πίνακας 9: Σύνθεση Πληρώματος

Personnel/Crew	
WO/Officers	25
CPOs	20
POs	35
Ratings	40
Total	120

Το τελικά υπολογιζόμενο βάρος πληρώματος, από τα παραπάνω, είναι:

$$W_{CREW}=20.55t$$

2.4.4 Βάρος Εφοδίων Νερού

Έχοντας καθορίσει το μέγεθος και τη σύνθεση του πληρώματος και λαμβάνοντας υπόψη ότι το κάθε ταξίδι στην ακτίνα ενέργειας διαρκεί 10 ημέρες, προκύπτει ότι

$$W_{FW}=51.6t$$

Έχοντας θεωρήσει ότι ως ημερήσια κατανάλωση νερού τα 43kg/μέλος πληρώματος.

2.4.5 Βάρος Εφοδίων Τροφίμων

Σύμφωνα με τον γερμανικό κανονισμό BV1030-1, το βάρος εφοδίων λαμβάνεται ίσο με:

- Νωπά τρόφιμα: 3,50 kg/μέλος
- Υγρά/ εμπορεύματα καντίνας: 4,00kg/μέλος

Επίσης λαμβάνεται πρόβλεψη προμηθειών για 5 ημέρες περισσότερες από τη διάρκεια ταξιδιού στην ακτίνα ενέργειας. Συνολικά το βάρος εφοδίων τροφίμων υπολογίζεται σε

$$W_{\text{PROVISIONS}}=7.5*120*15=13.5t$$

2.4.6 Βάρος Αναλωσίμων

Το βάρος αναλωσίμων $W_{\text{CONSUMABLES}}$, υπολογίζεται με βάση τον Γερμανικό κανονισμό BV 1030-1 και περιλαμβάνει το βάρος από τα λιπαντικά, γράσα, λάδια, μπογιές, απορρυπαντικά πλυσίματος και γραφική ύλη. Το βάρος των αναλωσίμων θεωρείται ότι βρίσκεται στο κέντρο ενός άδειου, επιχειρησιακά έτοιμου σκάφους και πρέπει να υπολογίζεται με βάση την παρακάτω σχέση, αλλά δεν πρέπει να λαμβάνεται μικρότερο από 0,1 t ούτε μεγαλύτερο από 40 t. Υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\text{Αναλώσιμα} = \Delta * \text{factor} [t]$$

όπου :

- Δ = Εκτόπισμα [t]
- Factor = 0,007 για ακτίνα ενεργείας ≥ 7 ημέρες

Συνεπώς υπολογίζεται ότι

$$W_{\text{CONSUMABLES}}=31.96t$$

2.4.7 Βάρος Αεροπορικού Καυσίμου JP-5

Με δεδομένο ότι το πλοίο υπό μελέτη διαθέτει ανθυποβρυχιακές δυνατότητες με χρήση ελικοπτέρου και δυνατότητες Helo Deck, απαιτείται να ληφθεί υπόψη η δυνατότητα αποθήκευσης και τροφοδοσίας με αεροπορικό καύσιμο για την ανεμπόδιστη εκτέλεση αποστολών ανίχνευσης/προσβολής αλλά και εγγείους υποστήριξης. Διαπιστώνεται ότι το πατρικό πλοίο φέρει συνολικά 30 t καυσίμου JP-5 το οποίο πρακτικά αντιστοιχεί σε 60 ώρες πτήσεως (λαμβάνεται ως μέση κατανάλωση 0,5t ανά ώρα πτήσεως, το οποίο αποτελεί τυπική κατανάλωση Ε/Π της κατηγορίας S-70 και AS-332, ενώ για το Ε/Π NH-90 όπου η

κατανάλωση είναι μεσοσταθμικά 0,6t αντιστοιχούν 50 ώρες πτήσεως). Θεωρείται ότι η παραπάνω χωρητικότητα καυσίμου επαρκεί για την εκτέλεση της επιχειρησιακής αποστολής του πλοίου και ως εκ τούτου λαμβάνεται:

$$W_{JP-5}=30t$$

2.4.8 Βάρος Ανταλλακτικών

Το βάρος των ανταλλακτικών λαμβάνεται ίσο με

$$W_{SPARES}=25t$$

κατά αντιστοιχία με το πατρικό πλοίο.

2.4.9 Σύνθεση Προσθέτου Βάρους DWT

Λαμβάνοντας υπόψη τους παραπάνω υπολογισμούς προκύπτει ότι το πρόσθετο βάρος συντίθεται ως εξής:

Πίνακας 10 : Σύνθεση Προσθέτου Βάρους DWT

Weights			
1.	Fuel Weight	$W_{FO} =$	463,9 t
2.	Helo Fuel JP-5	$W_{JP5} =$	30,00 t
3.	Lubricants Weight	$W_{LO} =$	18,56 t
4.	Payload Weight	$W_{PAYLOAD} =$	69,61 t
5.	Fresh Water	$W_{FRESHWATER} =$	51,60 t
6.	Provisions	$W_{PROVISIONS} =$	13,50 t
7.	Consumables	$W_{CONSUMABLES} =$	31,96 t
8.	Crew	$W_{CREW} =$	20,55 t
9.	Spares	$W_{SPARES} =$	25,00 t
10.	Ballast	$W_{BALLAST} =$	0,00 t
DWT =			725 t

2.5 Βάρος Άφορτου Πλοίου (Lightship)

Όπως αναλύθηκε, η κατανομή των βαρών του άφορτου πλοίου του πατρικού πλοίου δίδεται με βάση το σύστημα ESWBS, οπότε θα πρέπει να υπάρξει η κατάλληλη προσαρμογή

ώστε να είναι εφικτή η μέθοδος προμελέτης που περιγράφεται στο [4]. Για να υπάρξει αυτή η σύνδεση, χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες αντιστοιχίες βαρών του ESWBS με την κλασική προσέγγιση:

- WST→100
- WM→ 200 +300
- WOT→ 400 +500 + 600 + 700

Για το πατρικό πλοίο προκύπτουν οι εξής ομάδες πραγματικών βαρών :

Πίνακας 11: Βάρη πατρικού πλοίου κατά SWBS

ESWBS				
Type	Group	Description	Weight (t)	Group w. (t)
Wsteel	100	Structure	988,94	988,94
Wmachinery	200	Propulsion	362,14	465,05
Wmachinery	300	Electric Plant	102,91	
Woufiting	400	Communication/control	92,69	644,72
Woufiting	500	Auxilliary Systems	317,22	
Woufiting	600	Outfit/Furnishings	152,44	
Woufiting	700	Armament	82,37	

Με τον τρόπο αυτό προκύπτουν οι προσεγγίσεις των βαρών της κάθε ομάδας του σκάφους και συνεπώς επιτυγχάνεται η προσέγγιση των ομάδων βαρών με εφαρμοσμένες και αξιόπιστες μεθόδους, μειώνοντας το ποσοστό σφάλματος. Το συνολικό βάρος προκύπτει ως άθροισμα τριών επιμέρους βαρών, του βάρους μεταλλικής κατασκευής Wst, του βάρους ενδιαίτησης και εξοπλισμού WOT και του βάρους μηχανολογικής εγκατάστασης Wm. Για την εύρεση του βάρους του πλήρους εξοπλισμένου, αλλά άφορτου πλοίου, θα υπολογιστεί πρώτα το αντίστοιχο βάρος του πατρικού πλοίου προκειμένου να εξασφαλίσουμε μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματά μας. Η συγκεκριμένη διαδικασία θα μας οδηγήσει στην εύρεση κάποιων διορθωτικών συντελεστών με την βοήθεια των οποίων θα υπολογίσουμε το αντίστοιχο βάρος του υπό μελέτη πλοίου. Συγκεκριμένα, θα γίνει σύγκριση του υπολογισμένου LS του πατρικού με το πραγματικό βάρος του, που υπάρχει από τα σχέδια του, θα υπολογισθεί ο λόγος απόκλισης της πραγματικής από την υπολογισθείσα τιμή

και χρησιμοποιώντας τις ίδιες μεθόδους και το λόγο απόκλισης, θα καθορισθεί η τελική τιμή του LS του υπό μελέτη πλοίου.

2.5.1 Βάρος LightShip Πατρικού Πλοίου

2.5.1.1 Βάρος Μεταλλικής Κατασκευής W_{ST}

Μέθοδος Schneekluth

Για τον υπολογισμό του όγκου κάτω από το κύριο κατάστρωμα (δίχως υπερκατασκευές), χρησιμοποιείται η μέθοδος Schneekluth, η οποία είναι μια σύνθετη μέθοδος ικανοποιητικής ακρίβειας [4].

- Υπολογισμός ∇_D (όγκος έως το κοίλο)

$$C_{BD} = C_B + C_1 * \frac{D - T}{T} * (1 - C_B) = 0,687$$

Όπου $C_1=0.4$. Οπότε:

$$\nabla_D = L * B * D * C_{BD} = 99.8 \times 14 \times 7.924 \times 0.687 = 7606 \text{ m}^3$$

- Υπολογισμός ∇_s (αύξηση όγκου λόγω σιμότητας)

Έχουμε για έκταση σιμότητας $L_s = 43.16\text{m}$, με $S_A=2.26\text{m}$ και $S_F=0\text{m}$ και $C_2=0.12976$

προκύπτει ότι

$$\nabla_s = L_s * B * (S_F + S_A) * \frac{C_{BD}^{\frac{2}{3}}}{6} = 177,2 \text{ m}^3$$

- Υπολογισμός ∇_b (αύξηση όγκου λόγω κυρτότητας)

$$\nabla_b = 0 \text{ m}^3$$

- Υπολογισμός ∇_H (αύξηση όγκου λόγω στομίων κντών)

$$\nabla_H = 0$$

- Συνολικός όγκος

$$\nabla_U = \nabla_D + \nabla_S + \nabla_b + \nabla_H = 7783,16 \text{ m}^3$$

- Υπολογισμός W'_{ST}

Ο συντελεστής C_{ST} για τα επιβατηγά πλοία κυμαίνεται μεταξύ 0,113 και 0,121, οπότε λαμβάνεται η μέση τιμή αυτού δηλαδή $C_{ST}=0.117$ στους ακόλουθους υπολογισμούς:

$$\begin{aligned} W'_{ST} &= \nabla_U \cdot C'_{ST} \cdot \left[1 + 0,033 \left(\frac{L}{D} - 12 \right) \right] \cdot \left[1 + 0,06 \left(n - \frac{D}{D_0} \right) \right] \\ &\cdot \left[\left(1 + 0,05 \left(1,85 - \frac{B}{D} \right) \right) \cdot \left[1 + 0,2 \left(\frac{T}{D} - 0,85 \right) \right] \cdot [0,92 + (1 - C_{BD})^2] \right] \\ &\cdot [1 + 0,75 C_{BD} (C_M - 0,98)] \rightarrow W'_{ST} = 971.9 \text{ tons} \end{aligned}$$

Όπου: $L/D=12,5 > 9$, $D_0 = 4$, $n = 4$. Συνεπώς, το τελικό βάρος της μεταλλικής κατασκευής υπολογίζεται σε:

$$W'_{ST} = 971.9 \text{ tons}$$

Μέθοδος Muller - Koster

Για τον υπολογισμό του συνολικού βάρους της μεταλλικής κατασκευής, απαιτείται και ο υπολογισμός του βάρους των υπερκατασκευών, σύμφωνα με την μέθοδο Muller – Koster ([4], σελ. 235-239).

- *Υπερκατασκευές (Superstructures)*

Στις υπερκατασκευές περιλαμβάνεται το πρόστεγο και το επίστεγο, πλην όμως το πατρικό πλοίο δεν φέρει πρόστεγο ή επίστεγο.

- *Υπερστεγάσματα (Deck Houses)*

Στεγάσματα καταστρώματος που περιλαμβάνουν περισσότερα του ενός καταστρώματα δεν υπολογίζονται ως μία ενιαία κατασκευή, αλλά ως αποτελούμενα από επιμέρους τμήματα, τα οποία ταξινομούνται ως προς τη θέση τους υπεράνω του κυρίου καταστρώματος. Έτσι το μέρος του στεγάσματος, που βρίσκεται επί του κυρίου καταστρώματος χαρακτηρίζεται ως έχον τη θέση I, υπεράνω αυτού η θέση II κλπ. Στο ([4] σελ. 235) αναπτύσσεται η μεθοδολογία εφαρμογής της μεθόδου.

Το βάρος ενός τμήματος υπερστεγάσματος WDH προκύπτει από τον τύπο :

$$WDH = CDH \cdot A_m \cdot h \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3$$

Όπου :

- CDH: ογκομετρικός συντελεστής βάρους σύμφωνα με τον πίνακα 2.13 [4] (σελ. 238)
- A_m : μέσος όρος των επιφανειών AU και AO h : ύψος κάθε υπερστεγάσματος
- k_1 : διόρθωση για ύψος στεγάσματος διάφορο του 2,6 m
- $k_1 = 1 + 0,02 \cdot (h - 2,6)$
- k_2 : διόρθωση για μήκος εσωτερικών τοιχωμάτων.
- $k_2 = 1 + 0,05(4,5 - l_i / IDH)$, όπου :
 - l_i : ολικό μήκος εσωτερικών τοιχωμάτων
 - IDH: μήκος στεγάσματος
- k_3 : διόρθωση για μήκος πλοίου σημαντικά διάφορο του κανονικού $L_{bp} = 150$ m.

Από το σχέδιο γενικής διάταξης του πατρικού πλοίου, μετρώνται τα παρακάτω μεγέθη για κάθε κατάστρωμα ξεχωριστά.

Πίνακας 12: Θέση στεγασμάτων πατρικού πλοίου κατά Muller-Koster

	A0	AU	A0/AU	AM	CDH	H	LDH	LI	K1	K2	K3	WDH
POSITION I	436,39	683,90	0,64	560,14	0,06	2,96	55,88	100,00	1,01	1,14	0,95	102,68
POSITION II	262,74	436,39	0,60	349,57	0,06	2,47	42,00	78,00	1,00	1,13	0,95	50,94
POSITION III	109,51	262,74	0,42	186,13	0,05	2,47	26,68	60,00	1,00	1,11	0,95	25,20
POSITION IV	26,26	109,51	0,24	66,89	0,05	2,47	14,33	0,00	1,00	1,23	0,95	10,16
POSITION V	4,39	24,26	0,18	14,33	0,04	2,47	2,50	0,00	1,00	1,23	0,95	1,64
Total												190,64

Συνεπώς, το συνολικό βάρος υπερκατασκευών & υπερστεγασμάτων και υπόλοιπης μεταλλικής κατασκευής του πλοίου είναι 190,6 tons.

Το δε συνολικό βάρος σύμφωνα με την μέθοδο Schneekluth/Muller-Koster είναι:

$$W_{ST-SN/MK}=1162,5 \text{ tons}$$

Μέθοδος Watson

Προκειμένου να προσγγισθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια το βάρος της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου, χρησιμοποιείται ως δεύτερη μέθοδος υπολογισμού η μέθοδος Watson ([4], σελ.219) . Το βάρος της μεταλλικής κατασκευής υπολογίζεται με χρήση του δείκτη εξοπλισμού κατά Loyds Register:

$$E_N = L(B + T) + 0,8L(D - T) + 0,85 * \sum_{i=1}^4 h_{1i} l_{1i} + 0,75 \sum_{i=1}^2 h_{2i} l_{2i}$$

Σε ότι αφορά στα υπερστεγάσματα και στις υπερκατασκευές, προς χρήση στη παρούσα μέθοδο, υπολογίζονται από το πατρικό πλοίο τα ακόλουθα:

Πίνακας 13: Πυργωτά και Υπερκατασκευές πατρικού πλοίου κατά Watson

	Towers			Superstructures		
	Length l _{1i}	Height h _{1i}	h _{1i} l _{1i}	Length l _{2i}	Height h _{2i}	h _{2i} l _{2i}
Deck 0	20,50	2,96	60,68	35,38	2,96	104,72
Deck A	13,83	2,47	34,16	28,17	2,47	69,58
Deck B	9,88	2,47	24,40	16,80	2,47	41,50

Deck C	7,90	2,47	19,51	6,43	2,47	15,88
Void				2,50	2,47	6,18
Sums			138,76			237,86

Με αντικατάσταση των δεδομένων στον παραπάνω τύπο προκύπτει ότι:

$$EN=2404.03 \text{ m}^2$$

Από το διάγραμμα της μεθόδου ([4],σελ.220), υπολογίζεται το W_{ST}^* με βάση το υπολογισθέν EN ίσο με

$$(W_{ST})^* \cong 1010 \text{ tons}$$

Επειδή το $CB(0,8D) \neq 0,7$, απαιτείται η διόρθωση

$$C_{B1}^* = C_{B1} + \frac{(1 - C_{B1})(0,8D - T)}{3T} = 0,578$$

Οπότε προκύπτει ότι

$$W_{ST1} = W_{ST} + (1 + 0.5 * (C_{B1}^* - 0.7)) = 948.5t$$

Από τον τύπο της βελτιωμένης μεθόδου Watson προκύπτει:

$$W'_{ST} = 911.6 \text{ tons}$$

Το οποίο μετά από διόρθωση για $CB(0,8D) \neq 0,7$ δίδει:

$$W'_{ST} = 856.06 \text{ tons}$$

με $K=0,023$ σύμφωνα με τον πίνακα συντελεστών βαρών μεταλλικής κατασκευής κατά Watson ([4], σελ.221). Συνεπώς το υπολογιζόμενο βάρος σύμφωνα με την μέθοδο Watson, είναι:

$$W_{ST-WTS} = 948 \text{ tons}$$

Συνεπώς, από τον συνδυασμό των ανωτέρω μεθόδων Schneekluth/Muller-Koster και Watson προκύπτει ότι το βάρος της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου, ως ο μέσος όρος των δύο μεθόδων, εκτιμάται σε :

$$W_{ST} = (1162 + 948)/2 = 1055.55 \text{ t}$$

Λαμβάνοντας υπόψη όμως ότι η σχεδίαση αποσκοπεί στο ελάχιστο κόστος κύκλου ζωής και εξετάζοντας τις σύγχρονες πρακτικές στην ναυπήγηση τέτοιων σκαφών, η γάστρα θα σχεδιασθεί με χρήση χάλυβα υψηλής αντοχής (High Tensile Steel – HTS) οπότε σύμφωνα με ([4],σελ.245) συνιστάται μείωση του υπολογιζόμενου βάρους κατά 5% - 7%. Έτσι με μείωση της τάξης του 4,5% προκύπτει ότι το τελικά υπολογιζόμενο βάρος θα είναι:

$$W_{ST} = 1008 \text{ t}$$

Το πραγματικό βάρος μεταλλικής κατασκευής του πατρικού πλοίου είναι $W_{ST\text{ REAL}}=988,94 \text{ t}$. Παρατηρείται ότι ο συνδυασμός των παραπάνω μεθόδων προσεγγίζει ικανοποιητικά το απαιτούμενο αποτέλεσμα, άρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί στον υπολογισμό του βάρους μεταλλικής κατασκευής του υπό μελέτη πλοίου, αρκεί να καθορίσουμε ένα διορθωτικό συντελεστή f , τον οποίο θα χρησιμοποιήσουμε κατά τους εν συνεχεία υπολογισμούς, για τη διόρθωση του τελικού βάρους μεταλλικής κατασκευής του πλοίου υπό μελέτη, ώστε να μειωθεί το σφάλμα των μεθόδων. Έτσι έχουμε ότι:

$$f_{ST} = W_{ST\text{-REAL}} / W_{ST\text{-CALC}} = 0.98$$

το οποίο είναι εντός των αποδεκτών ορίων ($0.96 < f < 1.06$).

2.5.1.2 Βάρος Ενδιαίτησης και Εξοπλισμού W_{OT}

Το βάρος της ενδιαίτησης και εξοπλισμού WOT (Outfit Weight) περιλαμβάνει όλα τα επί του σκάφους εφαρμοσμένα εξαρτήματα του πλοίου, πλην της μηχανολογικής εγκατάστασης και υπολογίζεται με δύο τρόπους.

Μέθοδος Ομάδων βαρών

Με χρήση της μεθόδου ομάδων βαρών ([4],σελ.256) προκύπτει ότι το βάρος ενδιαίτησης είναι:

Πίνακας 14: Υπολογισμός βάρους ενδιαίτησης πατρικού πλοίου με τυπικούς συντελεστές

WOT		
	w (t/m ³)	W=wLBD
I	0,008	88,57
II1	0	0,00
II2	0,004	44,29
III	0,008	88,57
IV	0,006	66,43
V	0,01	110,71
VI	0,0005	5,54
VII	0,001	11,07
VIII1	0	0,00
VIII2	0,018	199,29
IX	0,003	33,21
Total WOT		647,68

Μέθοδος Προσεγγιστικών Τύπων

Και σε αυτήν την μέθοδο επειδή δεν υπάρχει κάποιος συντελεστής, που να αναφέρεται σε πολεμικά πλοία, θα επιχειρήσουμε να χρησιμοποιήσουμε τον συντελεστή βάρους εξοπλισμού και ενδιαίτησης που αναφέρεται στα επιβατηγά πλοία, δηλαδή επιλέγουμε $K_{OT}=0,058$ t/m³ και υπολογίζεται ότι:

$$W_{OT}=K_{OT} \cdot L \cdot B \cdot D = 642,14t$$

Το βάρος εξοπλισμού προκύπτει ως ο μέσος όρος των δύο μεθόδων που συγκλίνουν και είναι:

$$W_{OT-CALC}=642.14+647.6/2=644.9 t$$

Το πραγματικό βάρος εξοπλισμού προκύπτει αθροίζοντας τις εξής ομάδες πραγματικών βαρών, όπως αναφέραμε στην αρχή της παραγράφου. Έχουμε :

$$W_{OT-REAL} = 644,72 \text{ t}$$

Παρατηρούμε ότι η συγκεκριμένη μέθοδος προσεγγίζει ικανοποιητικά το απαιτούμενο αποτέλεσμα, άρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί στον υπολογισμό του βάρους του εξοπλισμού και ενδιαίτησης του υπό μελέτη πλοίου. Έτσι μπορούμε πλέον να υπολογίσουμε ένα διορθωτικό συντελεστή f , τον οποίο θα πολλαπλασιάσουμε με το W_{OT} του υπό μελέτη πλοίου, προκειμένου να ελαττώσουμε το σφάλμα των χρησιμοποιούμενων μεθόδων, ο οποίος υπολογίζεται σε:

$$f_{OT} = W_{OT-REAL} / W_{OT-CALC} = 0,99$$

το οποίο είναι εντός των αποδεκτών ορίων ($0.96 < f < 1.06$).

2.5.1.3 Βάρος Μηχανολογικής Εγκατάστασης W_M

Η ανάλυση του βάρους της μηχανολογικής εγκατάστασης κατά Strohbusch, υπολογίζεται ως εξής:

$$W_M = W_{MM} + W_{MS} + W_{MR}$$

Όπου :

- W_{MM} , το βάρος της κύριας μηχανής
- W_{MS} , το βάρος του ελικοφόρου άξονα και έλικας
- W_{MR} , το βάρος λοιπών μηχανολογικών εξαρτημάτων

Στο πατρικό πλοίο, στο βάρος W_{MM} θα συμπεριληφθεί και το βάρος των δύο αεροστροβίλων. Πιο συγκεκριμένα από το σχέδιο γενικής διάταξης προκύπτει ότι η προωστήρια εγκατάσταση αποτελείται από δύο κύριες μηχανές MTU και από δύο αεριοστρόβιλους LM 2500. Από τον κατάλογο του κατασκευαστή βρίσκουμε ότι το βάρος του κάθε αεροστροβίλου είναι 21,7 t, ενώ το βάρος της κάθε κύριας μηχανής είναι 43 t. Χρησιμοποιώντας την αναλυτική μέθοδο υπολογισμού του βάρους μηχανολογικής εγκατάστασης [4] (σ.269), προκύπτει:

	WMS	WMR	WMM
--	-----	-----	-----

wi (kp/hp)	5	24	11,1
Pb (Hp)	11626,7	11626,7	11626,7
Wi (kp)	58133,3	279039,8	129055,9
Wi (t)	58,1	279,0	129,5
Total	466,6		

Άρα υπολογίζεται ότι :

$$W_{M-CALC}=2 \cdot W_{M,E}+2 \cdot W_{G,T}+W_{ims}/1000+W_{imr}/1000=466,6 \text{ t}$$

Το πραγματικό βάρος μηχανολογικής εγκατάστασης προκύπτει αθροίζοντας τις εξής ομάδες πραγματικών βαρών και είναι::

$$W_{M-REAL}=465,05 \text{ t}$$

Παρατηρούμε ότι η συγκεκριμένη μέθοδος προσεγγίζει σχεδόν με μικρή απόκλιση το απαιτούμενο αποτέλεσμα, άρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί στον υπολογισμό του βάρους μηχανολογικής εγκατάστασης του υπό μελέτη πλοίου. Έτσι μπορούμε πλέον να υπολογίσουμε ένα διορθωτικό συντελεστή f , τον οποίο θα πολλαπλασιάσουμε με το W_M του υπό μελέτη πλοίου, προκειμένου να ελαττώσουμε το σφάλμα των χρησιμοποιούμενων μεθόδων, ο οποίος υπολογίζεται σε:

$$f_M=W_{M-REAL}/W_{M-CALC}=0,99$$

το οποίο είναι εντός των αποδεκτών ορίων ($0.96 < f < 1.06$).

Από τα παραπάνω υπολογίζεται τελικά ότι το βάρος άφορτου πλοίου LS για το πατρικό πλοίο μαζί με περιθώριο αύξησης (margin 10%) υπολογίζεται σε :

$$L_{SCALC}=W_{ST-CALC}+W_{OT-CALC}+W_{M-CALC}=2331,4\text{t}$$

ενώ το πραγματικό LS του πλοίου είναι $L_{SREAL}=2308.557$: Έτσι μπορούμε να υπολογίσουμε ένα διορθωτικό συντελεστή f , τον οποίο θα πολλαπλασιάσουμε με το LS του υπό μελέτη πλοίου, προκειμένου να ελαττώσουμε το σφάλμα των χρησιμοποιούμενων μεθόδων, ο οποίος υπολογίζεται σε:

$$f_{LS}=L_{SREAL}/L_{SCALC}=0,99$$

το οποίο είναι εντός των αποδεκτών ορίων ($0.96 < f < 1.06$).

2.5.2 Βάρος LightShip Πλοίου υπό Σχεδίαση

2.5.2.1 Βάρος Μεταλλικής Κατασκευής W_{ST}

Μέθοδος Schneekluth

Για τον υπολογισμό του όγκου κάτω από το κύριο κατάστρωμα (δίχως υπερκατασκευές), χρησιμοποιείται η μέθοδος Schneekluth, η οποία είναι μια σύνθετη μέθοδος ικανοποιητικής ακρίβειας.

- Υπολογισμός ∇_D (όγκος έως το κοίλο)

$$C_{BD} = C_B + C_1 * \frac{D - T}{T} * (1 - C_B) = 0,681$$

Όπου $C_1=0.4$. Οπότε:

$$\nabla_D = L * B * D * C_{BD} = 12672.95 \text{ m}^3$$

- Υπολογισμός ∇_s (αύξηση όγκου λόγω σιμότητας)

$$\nabla_s = 0 \text{ m}^3$$

- Υπολογισμός ∇_b (αύξηση όγκου λόγω κυρτότητας)

$$\nabla_b = 0 \text{ m}^3$$

- Υπολογισμός ∇_H (αύξηση όγκου λόγω στομίων κντών)

$$\nabla_H = 0$$

- Συνολικός όγκος

$$\nabla_U = \nabla_D + \nabla_S + \nabla_b + \nabla_H = 12672.95 \text{ m}^3$$

- Υπολογισμός W'_{ST}

Ο συντελεστής C_{ST} για τα επιβατηγά πλοία κυμαίνεται μεταξύ 0,113 και 0,121, οπότε λαμβάνεται η μέση τιμή αυτού δηλαδή $C_{ST}=0.117$ στους ακόλουθους υπολογισμούς:

$$\begin{aligned} W'_{ST} &= \nabla_U \cdot C'_{ST} \cdot \left[1 + 0,033 \left(\frac{L}{D} - 12 \right) \right] \cdot \left[1 + 0,06 \left(n - \frac{D}{D_0} \right) \right] \\ &\cdot \left[\left(1 + 0,05 \left(1,85 - \frac{B}{D} \right) \right) \cdot \left[1 + 0,2 \left(\frac{T}{D} - 0,85 \right) \right] \cdot [0,92 + (1 - C_{BD})^2] \right] \\ &\cdot [1 + 0,75 C_{BD} (C_M - 0,98)] \rightarrow W'_{ST} = 1586.5 \text{ tons} \end{aligned}$$

Όπου: $L/D=11,7 > 9$, $D_0 = 4$, $n = 4$. Συνεπώς, το τελικό βάρος της μεταλλικής κατασκευής υπολογίζεται σε:

$$W'_{ST} = 1586.5 \text{ tons}$$

Επειδή το υπό μελέτη πλοίο έχει Sonar Dome θα πρέπει να διορθωθεί το βάρος της μεταλλικής κατασκευής κατά 0,4% W'_{ST} οπότε το τελικό βάρος της μεταλλικής κατασκευής χωρίς υπερ- κατασκευές και υπερστεγάσματα προκύπτει :

$$W_{ST} = W'_{ST} + 0,004 \cdot W'_{ST} = 1650 \text{ t}$$

Μέθοδος Muller - Koster

Για τον υπολογισμό του συνολικού βάρους της μεταλλικής κατασκευής, απαιτείται και ο υπολογισμός του βάρους των υπερκατασκευών, σύμφωνα με την μέθοδο Muller – Koster ([4], σελ. 235-239).

- *Υπερκατασκευές (Superstructures)*

Στις υπερκατασκευές περιλαμβάνεται το πρόστεγο και το επίστεγο, πλην όμως το υπό σχεδίαση πλοίο δεν φέρει πρόστεγο ή επίστεγο.

- *Υπερστεγάσματα (Deck Houses)*

Στεγάσματα καταστρώματος που περιλαμβάνουν περισσότερα του ενός καταστρώματα δεν υπολογίζονται ως μία ενιαία κατασκευή, αλλά ως αποτελούμενα από επιμέρους τμήματα, τα οποία ταξινομούνται ως προς τη θέση τους υπεράνω του κυρίου καταστρώματος. Έτσι το μέρος του στεγάσματος, που βρίσκεται επί του κυρίου καταστρώματος χαρακτηρίζεται ως έχον τη θέση I, υπεράνω αυτού η θέση II κλπ.

Για τον υπολογισμό του βάρους των υπερστεγασμάτων, λόγω σημαντικής διαφοράς στην εξωτερική μορφή των πλοίων, απαιτείται διαφορετική προσέγγιση. Από τους υπολογισμούς για το W_{dh} του πατρικού πλοίου εξάγεται ο λόγος C_{dh} [t/m^3] και με εκτίμηση για τον όγκο των υπερστεγασμάτων, υπολογίζεται το βάρος των υπερστεγασμάτων.

	C_{DH}	W_{DH}	V
POSITION I	0,057	102,68	1801,45
POSITION II	0,055	50,94	926,24
POSITION III	0,052	25,20	484,65
POSITION IV	0,053	10,16	191,77
POSITION V	0,04	1,64	41,08
C_{DH}	0,055	190,64	3445,21

Συνεπώς υπολογίζεται ότι

$$C_{dh} = V/W_{dh} = 0.055 \text{ t/m}^3$$

Απο την ογκομέτρηση του σκαριφήματος προκύπτει ότι $V_{dh-estimated} = 7000 \text{ m}^3$. Συνεπώς το εκτιμώμενο βάρος των υπερκατασκευών υπολογίζεται σε:

$$W_{dh-estimated} = V_{dh-estimated} \cdot C_{dh} = 387.33 \text{ t}$$

Όμως η υπερκατασκευή του πατρικού πλοίου αποτελείται από ναυπηγικό χάλυβα, ενώ η αντίστοιχη υπερκατασκευή του υπό σχεδίαση πλοίου από σύνθετα υλικά, οπότε σύμφωνα με [4] είναι εφικτή η μείωση βάρους της υπερκατασκευής κατά 30%. Συνεπώς, λαμβάνοντας υπόψη ότι η υπερκατασκευή αποτελείται από σύνθετα υλικά, το βάρος της διαμορφώνεται σε:

$$W_{dh-estimated} = 271.13t$$

Συνεπώς από την χρησιμοποιούμενη μέθοδο προκύπτει ότι

$$W_{ST-SN}=1921.1 t$$

Μέθοδος Watson

Προκειμένου να προσεγγισθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια το βάρος της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου, χρησιμοποιείται ως δεύτερη μέθοδος υπολογισμού η μέθοδος Watson ([4], σελ.219). Το βάρος της μεταλλικής κατασκευής υπολογίζεται με χρήση του δείκτη εξοπλισμού κατά Loyds Register:

$$E_N = L(B + T) + 0,8L(D - T) + 0,85 * \sum_{i=1}^4 h_{1i} l_{1i} + 0,75 \sum_{i=1}^2 h_{2i} l_{2i}$$

από όπου προκύπτει ότι

$$E_N=3096.2$$

λαμβάνοντας υπόψη τις εκτιμήσεις διαστάσεων από το σκαρίφημα. Με χρήση του ίδιου διαγράμματος υπολογίζεται ότι

$$W_{ST1}=2030t$$

ενώ μετά από διόρθωση λόγω του ότι το $CB(0.8D) \neq 0.7$, προκύπτει για $CB=0.577$ ότι :

$$W_{ST1}=1905t$$

Συνεπώς το υπολογιζόμενο από τις μεθόδους βάρος, ως μέσος όρος είναι:

ενώ μετά την διόρθωση λόγω χρήσης προηγμένων υλικών (4.5% μείωση) προκύπτει:

$$W_{ST-calculated}=1827t$$

Με χρήση του συντελεστή διόρθωσης βάρους f_{ST} της μεθόδου, που υπολογίσθηκε για το πατρικό πλοίο, καθορίζεται τελικά ότι το βάρος της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου υπό σχεδίαση, θα είναι:

$$W_{ST-corrected}=1792.5t$$

2.5.2.2 Βάρος Ενδιαίτησης και Εξοπλισμού W_{OT}

Το βάρος της ενδιαίτησης και εξοπλισμού WOT (Outfit Weight) περιλαμβάνει όλα τα επί του σκάφους εφαρμοσμένα εξαρτήματα του πλοίου, πλην της μηχανολογικής εγκατάστασης και υπολογίζεται με δύο τρόπους.

Μέθοδος Ομάδων βαρών

Με χρήση της μεθόδου ομάδων βαρών ([4],σελ.256) προκύπτει ότι το βάρος ενδιαίτησης είναι:

Πίνακας 15: Υπολογισμός βάρους ενδιαίτησης πλοίου με τυπικούς συντελεστές

	w (t/m ³)	W=wLBD
I	0,008	148,84
II1	0	0,00
II2	0,004	74,42
III	0,008	148,84
IV	0,006	111,63
V	0,01	186,05
VI	0,0005	9,30
VII	0,001	18,61
VIII1	0	0,00
VIII2	0,018	334,90
IX	0,003	55,82
Total WOT		1088,42

Μέθοδος Προσεγγιστικών Τύπων

Και σε αυτήν την μέθοδο επειδή δεν υπάρχει κάποιος συντελεστής, που να αναφέρεται σε πολεμικά πλοία, θα επιχειρήσουμε να χρησιμοποιήσουμε τον συντελεστή βάρους εξοπλισμού και ενδιαίτησης που αναφέρεται στα επιβατηγά πλοία, δηλαδή επιλέγουμε $K_{OT}=0,059$ t/m^3 και υπολογίζεται ότι:

$$W_{OT}=K_{OT}\cdot L\cdot B\cdot D =1097.7t$$

Το βάρος εξοπλισμού προκύπτει ως ο μέσος όρος των δύο μεθόδων που συγκλίνουν και είναι:

$$W_{OT-CALC}=1093.07 t$$

ενώ μετά από διόρθωση με χρήση του συντελεστή διόρθωσης f_{OT} που υπολογίσθηκε νωρίτερα, προκύπτει ότι:

$$W_{OT-CORRECTED}=1093.4 t$$

Σημειώνεται όμως ότι η εν λόγω τιμή θα πρέπει να προσ αυξηθεί κατά ένα ποσοστό της τάξης του 1% καθότι το επίπεδο ενδιαίτησης και εξοπλισμού του υπό σχεδίαση πλοίου θα είναι σαφώς ανώτερου επιπέδου (ενδιαίτηση και χώροι πληρώματος, ηλεκτρονικός εξοπλισμός και συστήματα, αισθητήρες και radar, κλπ.) σε σχέση με το πατρικό πλοίο, πλην όμως στην παρούσα φάση δεν είναι δυνατή η περαιτέρω εκτίμηση-ανάλυση της αύξησης αυτής. Για το λόγο αυτό, λαμβάνεται:

$$W_{OT-CORRECTED}=1104.3 t$$

2.5.1.3 Βάρος Μηχανολογικής Εγκατάστασης W_M

Η ανάλυση του βάρους της μηχανολογικής εγκατάστασης κατά Strohbusch, υπολογίζεται ως εξής:

$$W_M = W_{MM} + W_{MS} + W_{MR}$$

Όπου :

- W_{MM} , το βάρος της κύριας μηχανής
- W_{MS} , το βάρος του ελικοφόρου άξονα και έλικας
- W_{MR} , το βάρος λοιπών μηχανολογικών εξαρτημάτων

ακολουθώντας την μεθοδολογία υπολογισμού του πατρικού πλοίου, με τη διαφορά ότι στο υπό σχεδίαση πλοίο θα χρησιμοποιηθεί μόνο ένας αεριοστρόβιλος, προκύπτουν τα ακόλουθα:

	WMS	WMR	WMM
wi (kp/hp)	5	24	
Pb (Hp)	16174,9	16174,9	16174,9
Wi (kp)	80874,5	388197,4	
Wi (t)	80,9	388,2	101,7
Total	570,8		

Στο CODLAG σύστημα χρησιμοποιούνται δύο Generator Sets βάρους περί των 40t έκαστο (Generator Pack που φέρει ηλεκτρογεννήτρια, προσθέτοντας και τα ηλεκτρικά μοτέρ πρόωσης). Το σύστημα διαθέτει μόνο ένα αεριοστρόβιλο πλην όμως λόγω της γεωμετρίας της διάταξης, τα βάρη W_{MS} , W_{MR} θεωρούνται αυξημένα κατά 3% και υπολογίζεται ότι :

$$W_{M-CALC} = 2 \cdot W_{ME} + W_{G.T} + W_{ims}/1000 + W_{imr}/1000 = 570.8 \text{ t}$$

Το πραγματικό βάρος μηχανολογικής εγκατάστασης προκύπτει με χρήση του συντελεστή διόρθωσης της μεθόδου f_M και τελικά υπολογίζεται ότι:

$$W_{M-CORRECTED} = 572.64 \text{ t}$$

Από τους παραπάνω υπολογισμούς, προκύπτει τελικά ότι το βάρος άφορτου πλοίου υπολογίζεται ίσο με

$$LS_{COR} = W_{ST-COR} + W_{OT-COR} + W_{M-COR} = 3469,4 \text{ t}$$

Στο παραπάνω βάρος κενού πλοίου πρέπει να προστεθεί και το περιθώριο αύξησης (margin) του βάρους για μελλοντικές αναβαθμίσεις, συγκέντρωση υγρών, αύξηση κενού βάρους, κλπ. το οποίο λαμβάνεται ίσο με 10%, με συνέπεια το βάρος κενού σκάφους να διαμορφώνεται τελικά σε:

Εξετάζοντας εκ νέου τους υπολογισμούς του εκτοπίσματος, προκύπτει ότι:

$$\Delta B = w_{LS} L B D + DWT = 4541t.$$

Οπότε: $\Delta\Gamma - \Delta B / \Delta B = 4566 - 4541 / 4541 = 0,5\%$

το οποίο κρίνεται ικανοποιητικό στην παρούσα φάση σχεδίασης. Το δε ειδικό βάρος της μεταλλικής κατασκευής υπολογίζεται σε $w_{LS} = 0.205 \text{ kg/m}^3$, μικρότερο του πατρικού πλοίου, κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο λόγω της χρήσης προηγμένων υλικών και τεχνολογιών.

2.6 Διαμήκης και Κατακόρυφη Θέση Κέντρου Βάρους

Για τον υπολογισμό της θέσης του κέντρου βάρους του άφορτου σκάφους, απαιτείται αρχικά η εξαγωγή των λόγων LCG/L, VCG/L από το πατρικό πλοίο. Από τα διαθέσιμα στοιχεία του πατρικού πλοίου, προκύπτουν τα ακόλουθα:

Πίνακας 16: Θέση Κέντρου Βάρους Άφορτου Πατρικού Πλοίου

Weight Type	Weight	%weight	VCG/D	LCG/L	VCG	LCG	MT	ML
WST	988,940		0,742	0,511	5,890	53,060	5824,857	52473,156
Propulsion	362,140	0,779	0,367	0,618	2,910	61,640	1053,827	22322,310
Electric Plant	102,910	0,221	0,710	0,524	5,630	52,290	579,383	5381,164
WM	465,050		0,443	0,597	3,512	59,571	1633,211	27703,474
Command & Surveillance	92,690	0,150	0,999	0,582	7,920	58,090	734,105	5384,362
Auxiliary Systems	317,220	0,514	0,805	0,524	6,380	52,270	2023,864	16581,089
Outfit & Furnishings	152,440	0,246	0,902	0,496	7,150	49,540	1089,946	7551,878
Armament	82,370	0,090	1,185	0,284	9,390	28,390	773,454	2338,484
WOT	644,720		0,905	0,495	7,168	49,410	4621,369	31855,813
LS	2098,710				5,756	53,382	12079,436	112032,443
Margin	209,871				0,576	0,000	120,794	0,000
LS(+M)	2308,581				6,331	53,382	14616,118	123235,688

Επισημαίνεται ότι στον υπολογισμό έχει ενσωματωθεί και το περιθώριο αύξησης (margin) του Lightship στην πορεία του χρόνου (10% LS) και η θέση του έχει ληφθεί επιδεινούμενη σε σχέση με την αρχική θέση του CG, ώστε να καταδειχθεί η αρνητική

επίδραση του χρόνου/μακροχρόνιας χρήσης στη θέση του CG του πλοίου. Η αύξηση αυτή απαιτείται από τους κανονισμούς [17] και εξετάζεται στις καταστάσεις φόρτωσης που ακολουθούν, καθότι περιλαμβάνει προβλέψεις για:

- αυξήσεις βάρους λόγω αβεβαιότητας κατά τη φάση της προκαταρκτικής σχεδίασης.
- κατασκευαστικό περιθώριο για ανοχές οι οποίες θα αντιμετωπισθούν μετά την τελική επιλογή υλικών.
- περιθώριο συντήρησης λόγω προστασίας έναντι διάβρωσης, πρόσθετες επιστρώσεις, κλπ.
- περιθώριο μελλοντικών αναβαθμίσεων συστημάτων και συνακόλουθου βάρους.

Επισημαίνεται ότι η ανωτέρω αύξηση του βάρους του LightShip και του VCG αντιστοιχεί σε 20 έτη επιχειρησιακής χρήσης του πλοίου, το οποίο εξάγεται από τις προβλέψεις των κανονισμών [46], σύμφωνα με τους οποίους η εν λόγω αύξηση θα πρέπει να λαμβάνεται ίση με 0,45% (Lightship/VCG) ανά έτος.

Από τους παραπάνω υπολογισμένους συντελεστές και γνωρίζοντας ότι:

- Πρόκειται για σύγχρονη κατασκευή με κλειστούς ελεύθερους χώρους αυξημένου ύψους, πλην όμως ελαφρότερης υπερκατασκευής (λόγω συνθέτων υλικών).
- Η διάταξη του χώρου μηχανών είναι διαφορετική από το πατρικό πλοίο. Η χρήση διάταξης CODLAG με δύο Generator Packs, σε σχέση με τις μεσόστροφες μηχανές του πατρικού πλοίου, έχει ως συνέπεια την μείωση της θέσης του VCG_{WM} (Electric Plant) σε σχέση με το πατρικό ώστε να είναι στην ίδια κατακόρυφη θέση με το λοιπό σύστημα πρόωσης. Η δε διαμήκης θέση των συστημάτων διορθώνεται στην πραγματική θέση της διάταξης σύμφωνα με το αρχικό σκαρίφημα.
- Η διάταξη ηλεκτρονικού εξοπλισμού και αισθητήρων (Command & Surveillance), βοηθητικών συστημάτων (Auxiliary Systems) αλλά και οι θέσεις του οπλισμού (Armament) του πατρικού πλοίου είναι διαφορετικές σε σχέση με το υπό σχεδίαση πλοίο. Λόγω μετατόπισης των κυρίων ηλεκτρονικών συστημάτων άνω της υπερκατασκευής (π.χ. ολοκληρωμένο σύστημα ηλεκτρονικών σε μορφή ιστού) λαμβάνεται υπόψη μετατόπιση του VCG_{TOT} προς τα άνω της τάξης του 20%.

Κατόπιν των ανωτέρω, για το υπό σχεδίαση πλοίο υπολογίζεται η ακόλουθη θέση του κέντρου βάρους άφορτου σκάφους.

Πίνακας 17: Θέση Κέντρου Βάρους Άφορτου Πλοίου υπό Σχεδίαση

Weight Type	Weight	%weight	VCG/D	LCG/L	VCG	LCG	MT	ML
WST	1792,4		0,742	0,511	7,29	58,74	13072	105291
Propulsion	445,9	0,779	0,367	0,400	3,61	46,00	1610	20512
Electric Plant	126,7	0,221	0,367	0,400	3,61	46,00	457	5829
WM	572,6				3,61	46,00	2067	26341
Command & Surveillance	165,6	0,150	1,199	0,582	11,79	66,94	1953	11088
Auxiliary Systems	567,6	0,514	0,805	0,524	7,91	60,23	4492	34188
Outfit & Furnishings	271,7	0,246	0,902	0,496	8,87	57,09	2409	15508
Armament	99,4	0,090	1,185	0,284	11,65	32,71	1158	3252
WOT	1104,3				9,07	57,99	10012	64036
LS	3469,4				7,25	56,40	25152	195668
Margin	346,9				10,94	56,40	3794	19567
LS(+M)	3816,3		0,772	0,490	7,58	56,40	28945	215236

2.7 Προκαταρκτικός Έλεγχος Ευστάθειας

Από τα δεδομένα του πατρικού πλοίου, προκύπτει η ακόλουθη κατανομή βαρών:

Πίνακας 18: Δεξαμενές Πατρικού Πλοίου

TANK	WEIGHT [t]	VCG	MOMENT	LCG	MOMENT
BALLAST	41,15	4,23	1,740,645	43,22	1,778,503
BALLAST	35,2	2,71	95,392	39,73	1,398,496
BALLAST	9,52	0,75	7,14	34,62	3,295,824
FUEL	13,12	0,76	99,712	28,42	3,728,704
FUEL	27,65	0,76	21,014	20,59	5,693,135
FUEL	61,27	2,64	1,617,528	20,41	12,505,207
FUEL	37,17	2,35	873,495	10,04	3,731,868
FUEL SERVICE	35,91	2,47	886,977	2,39	858,249
POTABLE WATER	27,15	4,2	114,03	-5,98	-162,357
FUEL SERVICE	10,3	2,47	25,441	-13,58	-139,874
FUEL	60,34	2,32	1,399,888	-18,93	-1,142,236
FUEL	52,28	2,44	1,275,632	-26,38	-1,379,146
FUEL	21,15	0,78	16,497	-26,24	-554,976
FUEL	28,14	2,2	61,908	-28,6	-804,804
BALLAST	64,73	2,07	1,339,911	-32,5	-2,103,725
FUEL	23,1	2,64	60,984	-32,44	-749,364
JP-5 SETTling	5,03	1,55	77,965	-36,43	-1,832,429
JP-5 SERVICE	8,02	2,6	20,852	-36,6	-293,532
JP-5 STORAGE	17,92	2,8	50,176	-38,6	-691,712

BALLAST	36,53	2,69	982,657	-40,89	-1,493,712
BALLAST	11,19	2,95	330,105	-40,52	-4,534,188

Από τα οποία προκύπτουν οι ακόλουθες κατηγορίες βαρών:

Πίνακας 19: Κατηγορίες βαρών

Category	Weight	VCG	LCG	MT	ML	VCG/D	LCG/L
Ballast	198,32	2,73	47,16	541,81	9351,98	0,345	0,473
Fuel	370,43	2,16	44,18	801,24	16365,6	0,273	0,443
Water	27,15	4,20	43,92	114,03	1192,43	0,530	0,44
JP-5	30,97	2,55	12,17	78,82	376,9	0,321	0,122
Provisions	30	6	20,9	180	627	0,757	0,209

Σημειώνεται ότι με τα υφιστάμενα δεδομένα και τις διαφοροποιήσεις που έχει υποστεί το σχέδιο γενικής διάταξης του πλοίου (π.χ. δεξαμενές στο double bottom), δεν είναι εφικτή η εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων σε ότι αφορά στη θέση του κέντρου βάρους των επιμέρους βαρών.

Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν εκτιμήσεις από το σκαρίφημα του υπό σχεδίαση πλοίου, έγινε εκτίμηση του όγκου των χώρων αποθήκευσης/φόρτωσης οπλισμού και υπολογίστηκε η "πυκνότητα" φόρτωσης όπλων, με την οποία έγιναν οι ακόλουθοι υπολογισμοί:

Πίνακας 20: Θέση Κέντρου Βάρους Weapons Payload σε Load Case 2/2A

Compartment Name	Density	Volume	Weight	LCG	VCG	ML	MT
	(t/m ³)	(m ³)	(t)	(m)	(m)	(t-m)	(t-m)
AMMO (CHAFFS/EXPLOSIVES) STORE P	0.0796	31.4	2.499	50.025	15.930	125.034	39.816
AMMO (CHAFFS/EXPLOSIVES) STORE S	0.0796	31.4	2.499	50.025	15.930	125.034	39.816
AMUNNITION FOR 20MM GUNS P	0.0472	75.23	3.551	24.580	5.845	87.280	20.755
AMUNNITION FOR 20MM GUNS S	0.0629	45.59	2.868	82.535	5.845	236.678	16.761
EXOCET M-39 STORAGE S	0.1308	96.77	12.658	38.527	11.012	487.656	139.385
76MM GUN AMMUNITION CARTRIDGE ROOM	0.1115	142.12	15.846	98.367	5.830	1558.761	92.384
76MM GUN AMMUNITION MAGAZINE ROOM	0.1115	48.46	5.403	99.909	3.188	539.837	17.226
TORPEDO STORAGE P	0.0596	41.56	2.477	44.275	11.013	109.668	27.279
TORPEDO STORAGE S	0.0596	41.56	2.477	44.275	11.013	109.668	27.279
VERTICAL LAUNCHER P	0.0596	79.24	4.723	89.700	8.315	423.627	39.269
VERTICAL LAUNCHER S	0.0596	79.24	4.723	89.700	8.315	423.627	39.269
ASUW MISSILES	0.114	53.82	6.135	44.275	15.930	271.648	97.738

TORPEDO LAUNCHER P	0.0219	37.73	0.826	44.276	13.408	36.585	11.079
TORPEDO LAUNCHER S	0.0219	37.73	0.826	44.276	13.408	36.585	11.079
CLOSE IN WEAPON MISSILES	0.0464	35.4	1.643	26.375	15.718	43.323	25.818
			69.155	66.11	8.95	4571.689	619.135

Πίνακας 21: Κέντρο Βάρους Weapons Payload σε κατάσταση 5/5A

Compartment Name	Density	Volume	Weight	LCG	VCG	ML	MT
	(t/m ³)	(m ³)	(t)	(m)	(m)	(t-m)	(t-m)
AMMO (CHAFFS/EXPLOSIVES) STORE P	0.0796	31.4	0.833	50.025	15.930	41.678	13.272
AMMO (CHAFFS/EXPLOSIVES) STORE S	0.0796	31.4	0.833	50.025	15.930	41.678	13.272
AMUNNITION FOR 20MM GUNS P	0.0472	75.23	1.184	24.580	5.845	29.093	6.918
AMUNNITION FOR 20MM GUNS S	0.0629	45.59	0.956	82.535	5.845	78.893	5.587
EXOCET M-39 STORAGE S	0.1308	96.77	12.658	38.527	11.012	487.656	139.385
76MM GUN AMMUNITION CARTRIDGE ROOM	0.1115	142.12	7.083	98.367	5.830	696.733	41.294
76MM GUN AMMUNITION MAGAZINE ROOM	0.1115	48.46	0.000	99.909	3.188	0.000	0.000
TORPEDO STORAGE P	0.0596	41.56	0.826	44.275	11.013	36.556	9.093
TORPEDO STORAGE S	0.0596	41.56	0.826	44.275	11.013	36.556	9.093
VERTICAL LAUNCHER P	0.0596	79.24	1.574	89.700	8.315	141.209	13.090
VERTICAL LAUNCHER S	0.0596	79.24	1.574	89.700	8.315	141.209	13.090
ASUW MISSILES	0.114	53.82	2.045	44.275	15.930	90.549	32.579
TORPEDO LAUNCHER P	0.0219	37.73	0.275	44.276	13.408	12.195	3.693
TORPEDO LAUNCHER S	0.0219	37.73	0.275	44.276	13.408	12.195	3.693
CLOSE IN WEAPON MISSILES	0.0464	35.4	0.548	26.375	15.718	14.441	8.606
			31.490	58.629	9.656	1846.201	304.059

Ομοίως, το προσωπικό κατανεμήθηκε στις θέσεις μάχης σύμφωνα με τις προβλέψεις των κανονισμών, υπολογίστηκε το μέσο βάρος ατόμου (διαφορετικών βαθμών), με βάση την εμπειρία του συντάκτη, και υπολογίστηκε η θέση του σχετικού κέντρου βάρους:

Πίνακας 22: Θέση Κέντρου Βάρους Πληρώματος

Personnel	People	Weight Each	Weight	LCG	VCG	ML	MT
Wheel House	10	171,25	1712,5	74,37	13,37	127358,63	22887,56
CIC	30	171,25	5137,5	79,82	15,90	410049,56	81660,56
Engine Room	20	171,25	3425	45,00	4,44	154125,00	15207,00
Deck Stations	20	171,25	3425	10,83	9,00	37092,75	30825,00
Battle Stations	40	171,25	6850	57,50	12,83	393875,00	87885,50
	120		20550	54,62	11,60	1122500,94	238465,63

Ως εκ τούτου και με βάση τις απαιτήσεις των κανονισμών θα πρέπει να εξετασθούν ως προς την ευστάθεια του πλοίου, οι ακόλουθες καταστάσεις:

2.7.1 Load Case 0: Lightship Displacement

Στην κατάσταση αυτή, το πλοίο βρίσκεται σε κατάσταση εκτοπίσματος, δίχως φορτίο ή αναλώσιμα. Το μόνο φορτίο που φέρει είναι το βάρος του πληρώματος μαζί με τις αποσκευές του, ενώ περιλαμβάνει και το περιθώριο σχεδίασης. Στην περίπτωση αυτή, υφίσταται η ακόλουθη κατανομή βάρους:

Πίνακας 23: Κέντρο Βάρους Load Case 0

Load Case 0					
Category	Weight	VCG	LCG	MT	ML
FO	0,00	0,92	56,40	0,00	0,00
JP-5	0,00	16,56	4,00	0,00	0,00
LO	0,00	0,70	54,00	0,00	0,00
FW	0,00	1,00	33,30	0,00	0,00
Provisions	0,00	6,82	20,02	0,00	0,00
Crew	20,55	11,60	54,62	238,38	1122,44
Consumables	0,00	4,92	57,50	0,00	0,00
Spares	0,00	7,73	111,85	0,00	0,00
Payload	0,00	8,95	66,11	0,00	0,00
Deadweight	20,55	11,60	54,62	238,38	1122,44
Payload	3469,39	7,25	56,40	25151,51	195668,35
Margin	346,94	10,94	56,40	3795,51	19567,35
ΔB	3836,88	7,61	56,39	29185,40	216358,14

2.7.2 Load Case 2/2A: Combat Displacement

Στην κατάσταση αυτή, το πλοίο βρίσκεται σε πλήρη φόρτωση. Η κατάσταση 2A περιλαμβάνει και το ageing margin.

Πίνακας 24: Κέντρο Βάρους Load Case 2

Load Case 2					
Category	Weight	VCG	LCG	MT	ML
FO	463,93	0,92	56,40	426,82	26165,67

JP-5	30,00	16,56	4,00	496,68	120,00
LO	18,56	0,70	54,00	12,99	1002,09
FW	51,60	1,00	33,30	51,60	1718,28
Provisions	13,50	6,82	20,02	92,08	270,23
Crew	20,55	11,60	54,62	238,38	1122,44
Consumables	31,96	4,92	57,50	157,10	1837,92
Spares	25,00	7,73	111,85	193,35	2796,13
Payload	69,61	8,95	66,11	623,18	4601,50
Margin	0,00	10,94	56,40	0,00	0,00
Deadweight	724,71	3,16	54,69	2292,18	39634,26
LightShip	3469,39	7,25	56,40	25151,51	195668,35
ΔB	4194,10	6,54	56,10	27443,69	235302,60

Πίνακας 25: Κέντρο Βάρους Load Case 2A

Load Case 2A					
Category	Weight	VCG	LCG	MT	ML
FO	463,93	0,92	56,40	426,82	26165,67
JP-5	30,00	16,56	4,00	496,68	120,00
LO	18,56	0,70	54,00	12,99	1002,09
FW	51,60	1,00	33,30	51,60	1718,28
Provisions	13,50	6,82	20,02	92,08	270,23
Crew	20,55	11,60	54,62	238,38	1122,44
Consumables	31,96	4,92	57,50	157,10	1837,92
Spares	25,00	7,73	111,85	193,35	2796,13
Payload	69,61	8,95	66,11	623,18	4601,50
Margin	346,94	10,94	56,40	3795,51	19567,35
Deadweight	1071,65	5,68	55,24	6087,69	59201,61
LightShip	3469,39	7,25	56,40	25151,51	195668,35
ΔB	4541,03	6,88	56,13	31239,20	254869,95

2.7.3 Load Case 5/A: Special Combat Displacement

Στην κατάσταση αυτή, το πλοίο βρίσκεται σε κατάσταση μερικής φόρτωσης. Η κατάσταση 5A περιλαμβάνει και το ageing margin. Οι επιμέρους ποσοστώσεις βαρών που

λαμβάνονται υπόψη στην κατάσταση αυτή, δεν καθορίζονται ρητά από τους κανονισμούς [17] αλλά εναπόκειται στην εθνική αρχή (νηογνώμονα). Στην παρούσα λαμβάνονται υπόψη οι προβλέψεις της κατάστασης Minimum Operation της NAVSEA DDS-079 [50] αλλά και οι αντίστοιχες της DefStan 02-900, Part 4-1 [46]. Σύμφωνα με τις προβλέψεις της [50], λαμβάνονται υπόψη τα βάρη που αναλύονται στον πίνακα 26, ενώ από τις προβλέψεις της [46], αρκεί οι δεξαμενές να είναι πληρωμένες σε ποσοστό μεγαλύτερο του 10%.

Πίνακας 26: Προβλέψεις NAVSEA DDS-079

ITEM	LOADS
Crew and effects	Same as Full Load
Provisions and personnel stores	One-third of Full Load
General Stores	One-third of Full Load
Ammunition	One-third of full-load ammunition with maximum quantities in ready-service stowages and remainder in magazines. For missiles and torpedo least favorable quantity and disposition is assumed.
Lube Oil	One-third full load
Reserve feed and Fresh water	Two-thirds full load
Diesel Oil (other than for propulsion)	One-half full load on ships below destroyer size; one-third full load on larger ships.
Aviation or vehicle fuel	One-third of full load. Compensating fuel sea water ballast (or ballast water in empty tanks) is taken as remainder the load.
Airplanes and aviation stores	Same as full load.
Cargo	No cargo for ships whose normal function requires that they unload all cargo. For ships such as tenders and replenishment types which do not normally unload completely, assume one-third of full load cargo.
Propulsion fuel	One-third full load with remaining tanks loaded in accordance with liquid loading instructions.
Anti-roll tanks	Operating level
Sewage Holding Tanks (CHT)	Full
Water ballast tanks	Empty*

* Ships fitted with separate saltwater ballast tanks may include in the minimum operating condition, water ballast which is in excess of the capacity required to compensate for fuel usage below the one-third fuel level.

Πίνακας 27: Κέντρο Βάρους Load Case 5

Load Case 5					
Category	Weight	VCG	LCG	MT	ML
FO	155,10	0,45	56,40	69,80	8747,64
JP-5	10,00	16,56	4,00	165,56	40,00
LO	5,60	0,22	54,00	1,23	302,40
FW	35,10	0,80	33,30	28,08	1168,83
Provisions	4,50	6,82	20,02	30,69	90,08
Crew	20,55	11,60	54,62	238,38	1122,44
Consumables	10,65	4,92	57,50	52,37	612,64
Spares	25,00	7,73	111,85	193,35	2796,13

Payload	31,49	9,66	58,63	304,07	1846,23
Water Ballast	121,00	2,25	64,11	272,25	7757,31
LightShip	3469,39	7,25	56,40	25151,51	195668,35
Deadweight	418,99	3,24	58,43	1355,78	24483,69
ΔB	4009,38	6,61	54,91	26507,29	220152,04

Πίνακας 28: Κέντρο Βάρους Load Case 5A

Load Case 5A					
Category	Weight	VCG	LCG	MT	ML
FO	155,10	0,45	56,40	69,80	8747,64
JP-5	10,00	16,56	4,00	165,56	40,00
LO	5,60	0,22	54,00	1,23	302,40
FW	35,10	0,80	33,30	28,08	1168,83
Provisions	4,50	6,82	20,02	30,69	90,08
Crew	20,55	11,60	54,62	238,38	1122,44
Consumables	10,65	4,92	57,50	52,37	612,64
Spares	25,00	7,73	111,85	193,35	2796,13
Payload	31,49	9,66	58,63	304,07	1846,23
Water Ballast	121,00	2,25	64,11	272,25	7757,31
Margin	346,94	10,94	56,40	3795,51	19567,35
LightShip	3469,39	7,25	56,40	25151,51	195668,35
Deadweight	765,93	6,73	57,51	5151,29	44051,04
ΔB	4235,32	7,15	56,60	30302,80	239719,38

2.7.4 Load Case 6: Maximum Displacement

Η κατάσταση αυτή είναι αντιστοιχη με την Load Case 2, πλην όμως λαμβάνεται υπόψη πρόσθετο εκτόπισμα που αντιστοιχεί στο 2% του εκτοπίσματος της.

Πίνακας 29: Κέντρο Βάρους Load Case 6

Load Case 6					
Category	Weight	VCG	LCG	MT	ML
FO	463,93	0,92	56,40	426,82	26165,67
JP-5	30,00	16,56	4,00	496,68	120,00

LO	18,56	0,70	54,00	12,99	1002,09
FW	51,60	1,00	33,30	51,60	1718,28
Provisions	13,50	6,82	20,02	92,08	270,23
Crew	20,55	11,60	54,62	238,38	1122,44
Consumables	31,96	4,92	57,50	157,10	1837,92
Spares	25,00	7,73	111,85	193,35	2796,13
Payload	69,61	8,95	66,11	623,18	4601,50
Margin	346,94	10,94	56,40	3795,51	19567,35
Deadweight	1071,65	5,68	55,24	6087,69	59201,61
LightShip	3469,39	7,25	56,40	25151,51	195668,35
ΔB increment	90,82	6,88	56,13	624,84	5097,73
ΔB	4631,85	6,88	56,13	31864,04	259967,68

2.8 Προκαταρκτικός Έλεγχος Μετακεντρικού Ύψους

Για τον προκαταρκτικό έλεγχο του μετακεντρικού ύψους στην κατάσταση πλήρους φόρτωσης με ageing margin (Load Case 2A), υπολογίζουμε αρχικά την μετακεντρική ακτίνα, ως εξής:

$$KM = KB + BM = B \left[C_1 C_2 \frac{B}{T} C_M^{\frac{2}{3}} + \frac{0,9 - 0,3C_M - 0,1C_B}{B/T} \right] \quad [4]$$

Όπου:

- $C_1=0,078$ για ίσαλο χωρίς παράλληλο τμήμα, η κατανομή της ισάλου στη διαμήκη κατεύθυνση καθώς και η οξύτητα στις παρειές του σκάφους.
- $C_2 = \left(\frac{C_{WP}}{C_{WP,NORMAL}} \right)^a$, όπου $C_{WP,NORMAL} = C_P^{2/3}$ και $a=1.5$ για $C_{WP} > C_{WP,NORMAL}$.

Για την μορφή της γάστρας και των νομέων της επιλέγεται $C_{WP} = 0.05 + C_{WP,NORMAL}$ και αντικαθιστώντας προκύπτει ότι:

- $C_{WP,NORMAL} = 0.6847$
- $C_{WP} = 0.7437$
- $C_2 = 1.1217$

Και τελικά προκύπτει ότι

$$\mathbf{KM=8.327\ m}$$

Και

$$\mathbf{GM= KM-KG=8.327-6.88= 1.527\ m}$$

Το οποίο κρίνεται ικανό στην φάση της προσεγγιστικής ανάλυσης. Οι ανωτέρω υπολογισμοί είναι προσεγγιστικοί, οι δε τελικές τους τιμές θα προκύψουν μετά την εξομάλυνση της γάστρας και την εκτέλεση των υδροστατικών υπολογισμών.

3. Προκαταρκτικό Σχέδιο Ναυπηγικών Γραμμών και Γενικής Διάταξης

3.1 Πρότυπο ναυπηγικών γραμμών

Για την ανάπτυξη των ναυπηγικών γραμμών του υπό σχεδίαση πλοίου, χρησιμοποιήθηκε ως πρότυπο το μοντέλο γραμμών της γάστρας US Navy Combatant DTMB-5415, η οποία αποτελεί σχεδίαση γάστρας πολεμικού πλοίου (φρεγάτας) του David Taylor Model Basin, του κέντρου σχεδίασης και ανάπτυξης ναυπηγικών πρωτοτύπων του Αμερικανικού Ναυτικού (Naval Surface Warfare Center) [55]. Η συγκεκριμένη γάστρα, η οποία παρατίθεται στην εικόνα 25, αποτελεί μια σχεδίαση αναφοράς η οποία φέρει γνωρίσματα της κλάσης DDG-51 του US Navy, με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:



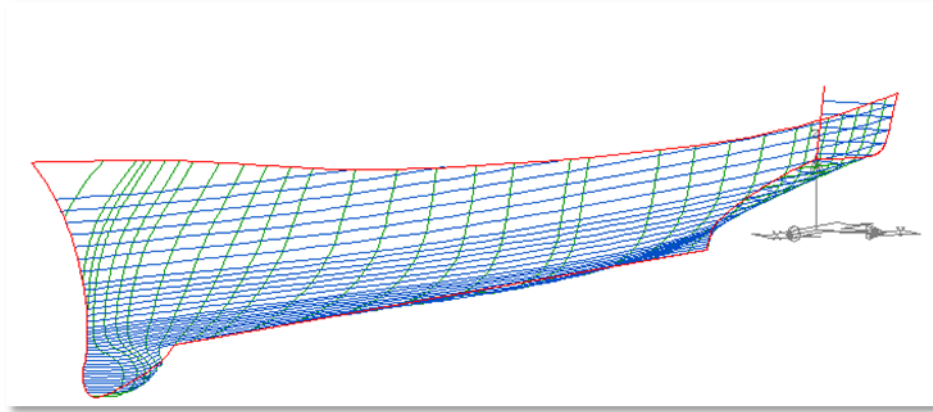
Εικόνα 25: Η γάστρα DTMB-5415

Πίνακας 30: Χαρακτηριστικά γάστρας DTMB-5415

Main particulars	
L_{bp} (m)	142.00
L_{wl} (m)	142.18
B_{wl} (m)	19.06
T (m)	6.15
Displacement (m^3)	8424.4
S w/o rudder (m^2)	2972.6
C_b	0.507
C_m	0.821

Η συγκεκριμένη γάστρα σχεδιάστηκε το 1980 και περιλαμβάνει sonar dome καθώς και πρύμνη τύπου transom. Η πρόωση παρέχεται μέσω δύο ελίκων ανοιχτής θαλάσσης που κινούνται με χρήση αξόνων, οι οποίοι στηρίζονται σε κατάλληλα struts. Αν και αποτέλεσε πρότυπο αναφοράς για αρκετές αναλύσεις, μέχρι σήμερα δεν έχει κατασκευαστεί πλοίο με χρήση των γραμμών αυτών.

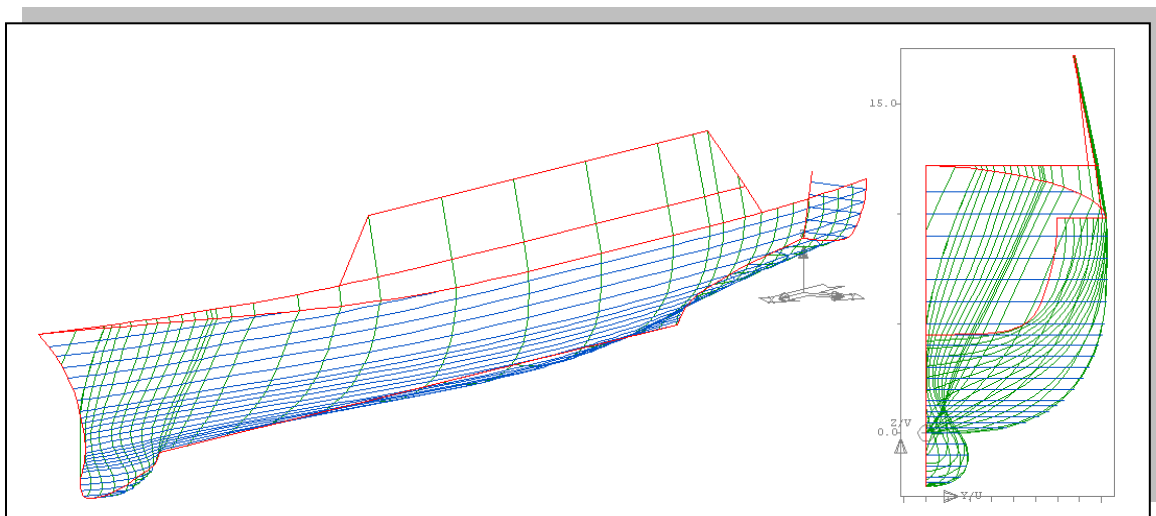
Βασιζόμενοι στο τρισδιάστατο γεωμετρικό μοντέλο της γάστρας, το οποίο διατίθεται ελεύθερα στο διαδίκτυο [15], αναπτύχθηκαν οι ναυπηγικές γραμμές της γάστρας με χρήση του λογισμικού AVEVA, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 26, οι οποίες εξομαλύνθηκαν.



Εικόνα 26: Ναυπηγικές γραμμές γάστρας DTMB-5415

3.2 Ανάπτυξη ναυπηγικών γραμμών

Λαμβάνοντας υπόψη το πλάνο ναυπηγικών γραμμών της γάστρας DTMB-5415, με χρήση των εργαλείων (toolbox) του AVEVA, έγινε προσαρμογή (Distortion/Lackenby) των ναυπηγικών γραμμών του πρωτοτύπου στις επιθυμητές διαστάσεις του υπό σχεδίαση πλοίου. Στη συνέχεια ακολούθησε εκτενής εξομάλυνση των γραμμών (sections, waterlines, buttocks), μέχρι την επίτευξη ικανοποιητικής συνέχειας και καμπυλότητας των νομέων.



Εικόνα 27: Ναυπηγικές γραμμές του υπό σχεδίαση πλοίου

Κατά τη σχεδίαση ενός πολεμικού πλοίου, συνιστάται όπως ληφθούν υπόψη στοιχεία τα οποία συμβάλλουν στον έλεγχο υπογραφής (signature control) του πλοίου, τα οποία στην φάση σχεδίασης των ναυπηγικών γραμμών είναι [17]:

- Η ορατότητα του πληρώματος, ειδικά σε παράκτιες περιοχές όπου η λειτουργία των αισθητήρων του πλοίου δεν είναι εφικτή. Για την βέλτιστη ορατότητα πρέπει να αποφεύγονται σχεδιάσεις με χαμηλές και επίπεδες υπερκατασκευές.

- Τα ανακλαστικό αποτύπωμα (Radar Cross Section - RCS). Για την επίτευξη χαμηλού αποτυπώματος RCS, απαιτείται η σχεδίαση επίπεδης σιλουέτας πλοίου, με επικλινή πλευρικά ελάσματα και μεγάλες επίπεδες επιφάνειες με ακμές, οι οποίες καλύπτουν τον απαιτούμενο εξοπλισμό μάχης. Οι κλίσεις των επικλινών πλευρικών επιφανειών οφείλουν να σχηματίζουν γωνία με την γάστρα στην περιοχή μεταξύ 10 έως 18 μοιρών, ώστε να ελαχιστοποιούν τα φαινόμενα ανάκλασης.

Λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω συστάσεις σχεδίασης, στο υπό σχεδίαση πλοίο αναπτύχθηκαν γραμμές μέχρι και το ανωτέρω κατάστρωμα των υπερκατασκευών, ακολουθώντας τη λογική σχεδίασης με χαμηλό ανακλαστικό αποτύπωμα. Επίσης, για λόγους μεγιστοποίησης του ωφέλιμου όγκου του πλοίου, έχει ληφθεί κλίση των επικλινών πλευρικών ελασμάτων ίση με 10 μοίρες, το οποίο μεν οδηγεί σε αυξημένο ύψος υπερκατασκευών, πλην όμως αυτό εξυπηρετεί στην ορατότητα του πληρώματος σε παράκτιες περιοχές. Λόγω δε της χρήσης υλικών σύγχρονης σχεδίασης (σύνθετα υλικά), θεωρείται ότι η μετατόπιση του κέντρου βάρους προς τα άνω, έχει μικρή επίδραση στην κατακόρυφη θέση του κέντρου βάρους.

Η τελική μορφή της γάστρας του υπό σχεδίαση πλοίου, εμφανίζει χαρακτηριστικά αντίστοιχα με αυτά της DTMB-5415, όπως για παράδειγμα:

- Πλατιές ισάλους
- Νομείς τύπου V στο εμπρόσθιο τμήμα και τύπου U στο μεσο-οπίσθιο τμήμα.
- Άνοιγμα νομέων (flare) πάνω από την ίσαλο γραμμή, στο εμπρόσθιο τμήμα

τα οποία προδιαθέτουν για σχεδίαση με βελτιωμένη υδροδυναμική συμπεριφορά και πλεύση σε υψηλούς αριθμούς Froude.

Επιπρόσθετα, η χρήση πρύμνης τύπου άβακα (transom stern) απαιτεί την εξέταση σχεδιαστικών παραμέτρων οι οποίες επηρεάζουν την βέλτιστη συμπεριφορά του πλοίου σε κυματισμό και αντίσταση. Συγκεκριμένα, για πλήρη βυθισμένη πρύμη και υψηλές ταχύτητες, η αποκόλληση της ροής στις ακμές του άβακα γίνεται χωρίς έντονη περιδίνηση. Για την επίτευξη όμως μείωσης του ανυψούμενου κύματος αλλά και την επίτευξη πρωραίας

ροπής εξισορρόπησης της πρυμναίας δυναμικής διαγωγής, συχνά απαιτείται η χρήση σφήνας, αναλόγως του βυθίσματος [4].

Στην περίπτωση του υπό σχεδίαση πλοίου και συγκεκριμένα στην περιοχή ταχυτήτων των 30 kts ($F_n=0.46$), συνίσταται άβακας με σφήνα πλάτους όσο το πλάτος του σκάφους και βύθιση κάτω ακμής $t>0.15T=0.74m$ [4]. Σημειώνεται ότι στο βύθισμα σχεδίασης το transom βυθίζεται κατά 0.55m ενώ η επιφάνεια του άβακα είναι περίπου στο 10% της επιφάνειας μέσης τομής, δεδομένα που προδιαθέτουν για αποκόλληση της ροής στις ακμές του άβακα στην ταχύτητα μάχης.

Η κλίση του πυθμένα του άβακα, επηρεάζει τα φαινόμενα σφυρόκρουσης και συμβάλει στην προστασία έναντι διαβροχής. Στο υπό σχεδίαση πλοίο επιτεύχθηκε κλίση του άβακα 15 μοιρών ως προς τον κατακόρυφο και 5 μοιρών ως προς τον εγκάρσιο άξονα, ώστε να επιτυγχάνεται μείωση των φαινομένων σφυρόκρουσης και διαβροχής του καταστρώματος.

Τέλος αναφέρεται ότι το μοντέλο DTMB-5415 φέρει στην περιοχή της πλώρης Sonar Dome με γεωμετρικές διαστάσεις που θεωρούνται βέλτιστες για το συγκεκριμένο πρότυπο. Λόγω όμως της προσαρμογής / παραμόρφωσης των ναυπηγικών γραμμών στο μέγεθος που απαιτεί η παρούσα σχεδίαση, απαιτείται να εξετασθεί κατά πόσο το μέγεθος του Sonar Dome, μετά την προσαρμογή (lackenby) στα δεδομένα του υπό σχεδίαση πλοίου, εξακολουθεί να είναι βέλτιστο.

Μετά από την διαμόρφωση των ναυπηγικών γραμμών και την ολοκλήρωση της εξομάλυνσης, είναι εφικτή η εσωτερική διαμόρφωση του πλοίου με τους απαιτούμενους χώρους και η εκπόνηση του σχεδίου γενικής διάταξης. Τα υδροστατικά στοιχεία της γάστρας μετά την εξομάλυνση είναι τα εξής:

Πίνακας 31: Δεδομένα Σχεδίασης

Κύριες Διαστάσεις	Γενικά Δεδομένα	Όνομα Σκάφους		Chios
		LOA	m	121
	LBP	M	115	
	B	M	16.46	

	D	M	9.83
	T	M	4.95
Βάρη	DWT	Ton	725
	Δ	Ton	4565
	LS	Ton	3840
Πρόωση	V _{service}	Kts	17
	V _{battle}	Kts	30
Συντελεστές	Cb		0.47
	Cp		0.56
	Cm		0.83

3.3 Σχέδιο Γενικής Διάταξης και Κατανομή Χώρων

Στο κεφάλαιο 1 της παρούσας αναλύθηκαν οι βασικές επιχειρησιακές απαιτήσεις για ένα σύγχρονο πλοίο τύπου φρεγάτας και παρουσιάσθηκαν διαθέσιμες επιλογές από την παγκόσμια αγορά οπλικών συστημάτων, τυπικές για πλοία σύγχρονης σχεδίασης. Συνεπώς δεν κρίνεται σκόπιμη η περαιτέρω ανάλυση των απαιτήσεων χώρων των οπλικών συστημάτων, η δε διάταξη τους παρατίθεται σκαριφηματικά στην εικόνα 22.

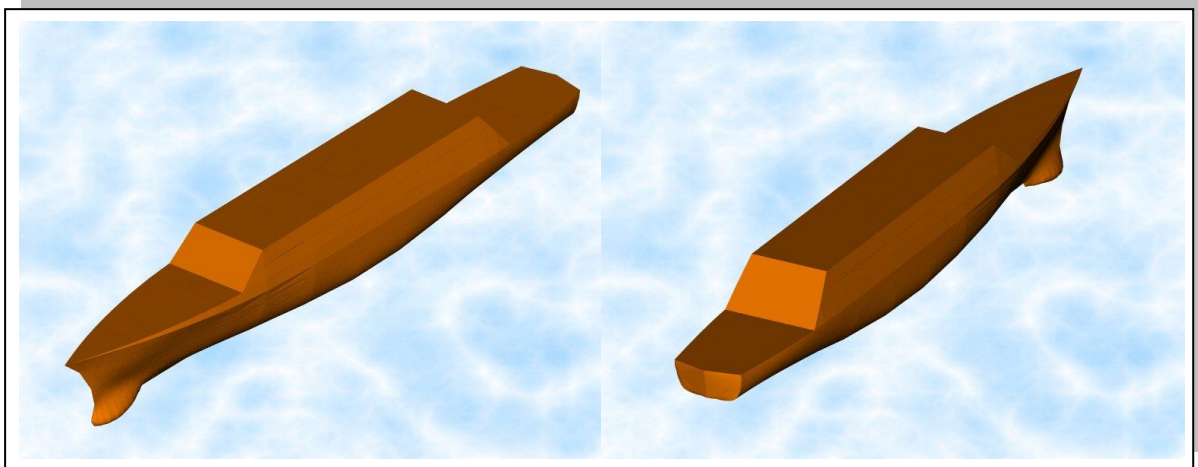
Απεναντίας, απαιτείται η παράθεση των δεδομένων – απαιτήσεων σε χώρους για την ικανοποίηση των λοιπών λειτουργικών αναγκών του πλοίου αλλά και των χώρων εξυπηρέτησης και επιχειρησιακής λειτουργίας του πληρώματος, κατά την πλεύση και την φάση επιχειρήσεων μάχης.

Για την εκπόνηση του σχεδίου γενικής διάταξης λήφθηκε υπόψη τόσο το σχέδιο γενικής διάταξης του πατρικού πλοίου, όσο και τα σχέδια γενικής διάταξης άλλων ομοιότυπων, παλαιότερων αλλά και σύγχρονων, πλοίων που τέθηκαν στη διάθεση του συγγραφέα. Στο προτεινόμενο σχέδιο γενικής διάταξης έχουν ενσωματωθεί σύγχρονες σχεδιαστικές τάσεις στη συγκεκριμένη κατηγορία πλοίου που αφορούν τόσο στη βελτιωμένη ευστάθεια του πλοίου, όσο και στην βελτίωση της επιβιωσιμότητας και επιχειρησιακής του λειτουργίας, σε σχέση με τις παλαιότερες σχεδιάσεις (π.χ. πυθμένας διπλού τοιχώματος, μεγαλύτεροι ωφέλιμοι χώροι και βελτιωμένη εργονομία, υπερκατασκευές από σύνθετα υλικά πλήρως καλυμμένες για μείωση του ίχνους, κλπ.).

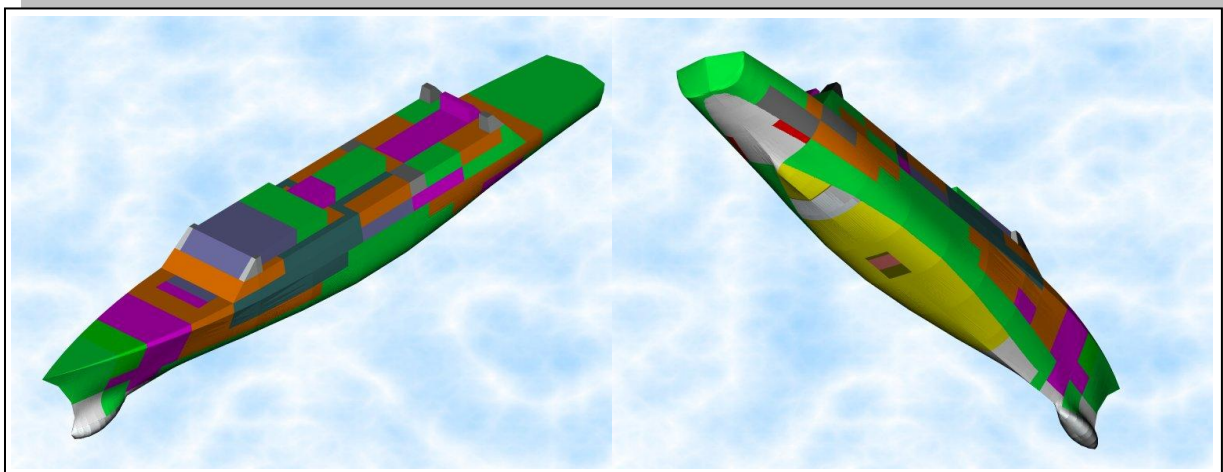
4. Υδροστατική Ανάλυση

4.1 Ανάπτυξη Υπολογιστικού Μοντέλου

Για την μελέτη της υδροστατικής συμπεριφοράς του υπό σχεδίαση πλοίου, αναπτύχθηκε κατάλληλο υπολογιστικό μοντέλο πλοίου, με χρήση των εξομαλυσμένων ναυπηγικών γραμμών του κεφαλαίου 3, στο λογισμικό AVEVA Marine. Στο μοντέλο που αναπτύχθηκε, λήφθηκε υπόψη η διαμερισματοποίηση του πλοίου η οποία αποτυπώθηκε στο σχέδιο γενικής διάταξης και αναπτύχθηκαν οι καθοριζόμενοι σε αυτό χώροι. Αποτύπωση του μοντέλου και των διαμερισμάτων του παρουσιάζεται στην εικόνα 30 και 31.



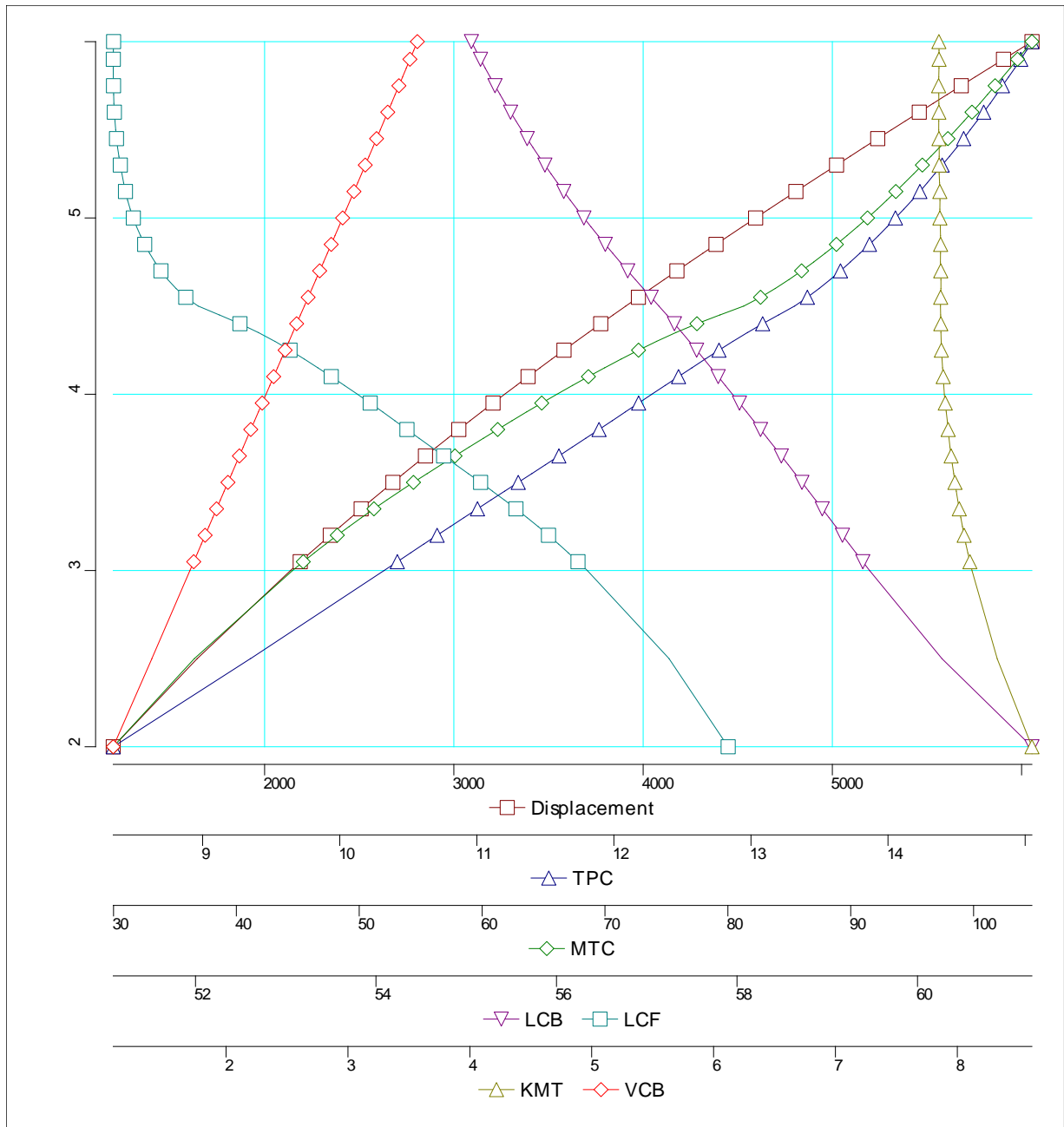
Εικόνα 28: Μοντέλο εξωτερικής επιφάνειας πλοίου στο AVEVA



Εικόνα 29: Διαμερισματοποίηση του πλοίου στο AVEVA

4.2 Υδροστατικό Διάγραμμα

Με χρήση του λογισμικού AVEVA υπολογίστηκε το υδροστατικό διάγραμμα και οι τιμές μεγεθών που ακολουθούν:



Εικόνα 30 Υδροστατικό διάγραμμα

Πίνακας 32: Τιμές Υδροστατικού Διαγράμματος

Draft (m)	Displt (t)	LCB (m)	VCB (m)	WPA (m ²)	LCF (m)	KML (m)	KMT (m)	WSA (m ²)	TPC (t/cm)
4.00	3268.31	57.949	2.328	1193.03	53.795	234.889	7.893	1623.26	12.28
4.25	3581.86	57.552	2.485	1240.66	53.047	235.995	7.869	1704.10	12.77
4.50	3908.31	57.135	2.642	1294.29	52.030	241.843	7.862	1792.41	13.32
4.75	4247.10	56.705	2.800	1333.72	51.551	238.324	7.861	1868.75	13.72
4.90	4454.78	56.460	2.894	1353.79	51.390	234.457	7.862	1911.71	13.93
4.91	4468.73	56.444	2.900	1355.04	51.381	234.179	7.862	1914.52	13.94
4.92	4482.69	56.429	2.906	1356.28	51.373	233.900	7.861	1917.33	13.96
4.93	4496.69	56.413	2.913	1357.51	51.364	233.621	7.861	1920.14	13.97
4.94	4510.68	56.397	2.919	1358.73	51.356	233.341	7.861	1922.94	13.98
4.95	4524.69	56.381	2.925	1359.94	51.348	233.058	7.860	1925.73	13.99
4.96	4538.69	56.366	2.931	1361.13	51.340	232.774	7.859	1928.52	14.01
4.97	4552.73	56.350	2.938	1362.32	51.333	232.488	7.859	1931.30	14.02
4.98	4566.76	56.335	2.944	1363.49	51.325	232.201	7.858	1934.08	14.03
4.99	4580.82	56.319	2.950	1364.66	51.318	231.912	7.857	1936.86	14.04
5.00	4594.88	56.304	2.956	1365.81	51.311	231.623	7.857	1939.62	14.05
5.25	4950.31	55.939	3.111	1393.60	51.185	224.071	7.850	2007.89	14.34
5.50	5312.52	55.612	3.265	1418.80	51.116	216.638	7.847	2074.90	14.60
5.75	5680.94	55.318	3.418	1441.64	51.092	209.390	7.846	2140.91	14.83
6.00	6054.77	55.057	3.569	1462.56	51.093	202.519	7.849	2206.24	15.05

Draft (m)	MTC (t-m/cm)	Draft (m)	Trim (m)	Displt (t)	LCB (m)	TCB (m)	VCB (m)	WPA (m ²)	LCF (m)
4.00	66.09	4.00	0.00	3268.31	57.949	0.000	2.328	1193.03	53.795
4.25	72.73	4.25	0.00	3581.86	57.552	0.000	2.485	1240.66	53.047
4.50	81.29	4.50	0.00	3908.31	57.135	0.000	2.642	1294.29	52.030
4.75	86.98	4.75	0.00	4247.10	56.705	0.000	2.800	1333.72	51.551
4.90	89.70	4.90	0.00	4454.78	56.460	0.000	2.894	1353.79	51.390
4.91	89.87	4.91	0.00	4468.73	56.444	0.000	2.900	1355.04	51.381
4.92	90.04	4.92	0.00	4482.69	56.429	0.000	2.906	1356.28	51.373
4.93	90.21	4.93	0.00	4496.69	56.413	0.000	2.913	1357.51	51.364
4.94	90.38	4.94	0.00	4510.68	56.397	0.000	2.919	1358.73	51.356
4.95	90.55	4.95	0.00	4524.69	56.381	0.000	2.925	1359.94	51.348
4.96	90.71	4.96	0.00	4538.69	56.366	0.000	2.931	1361.13	51.340
4.97	90.88	4.97	0.00	4552.73	56.350	0.000	2.938	1362.32	51.333
4.98	91.04	4.98	0.00	4566.76	56.335	0.000	2.944	1363.49	51.325
4.99	91.20	4.99	0.00	4580.82	56.319	0.000	2.950	1364.66	51.318
5.00	91.36	5.00	0.00	4594.88	56.304	0.000	2.956	1365.81	51.311
5.25	95.11	5.25	0.00	4950.31	55.939	0.000	3.111	1393.60	51.185

Draft (m)	MTC (t-m/cm)	Draft (m)	Trim (m)	Displt (t)	LCB (m)	TCB (m)	VCB (m)	WPA (m ²)	LCF (m)
5.50	98.57	5.50	0.00	5312.52	55.612	0.000	3.265	1418.80	51.116
5.75	101.75	5.75	0.00	5680.94	55.318	0.000	3.418	1441.64	51.092
6.00	104.75	6.00	0.00	6054.77	55.057	0.000	3.569	1462.56	51.093

Draft (m)	TCF (m)	BML (m)	BMT (m)	KML (m)	KMT (m)	WSA (m ²)	TPC (t/cm)	MTC (t-m/cm)	CB
4.00	0.000	232.561	5.565	234.889	7.893	1623.26	12.28	66.09	0.419
4.25	0.000	233.510	5.384	235.995	7.869	1704.10	12.77	72.73	0.432
4.50	0.000	239.201	5.220	241.843	7.862	1792.41	13.32	81.29	0.445
4.75	0.000	235.524	5.061	238.324	7.861	1868.75	13.72	86.98	0.458
4.90	0.000	231.563	4.968	234.457	7.862	1911.71	13.93	89.70	0.466
4.91	0.000	231.279	4.962	234.179	7.862	1914.52	13.94	89.87	0.466
4.92	0.000	230.994	4.955	233.900	7.861	1917.33	13.96	90.04	0.467
4.93	0.000	230.708	4.949	233.621	7.861	1920.14	13.97	90.21	0.467
4.94	0.000	230.422	4.942	233.341	7.861	1922.94	13.98	90.38	0.468
4.95	0.000	230.133	4.935	233.058	7.860	1925.73	13.99	90.55	0.468
4.96	0.000	229.843	4.928	232.774	7.859	1928.52	14.01	90.71	0.469
4.97	0.000	229.550	4.921	232.488	7.859	1931.30	14.02	90.88	0.469
4.98	0.000	229.257	4.914	232.201	7.858	1934.08	14.03	91.04	0.470
4.99	0.000	228.962	4.907	231.912	7.857	1936.86	14.04	91.20	0.470
5.00	0.000	228.667	4.900	231.623	7.857	1939.62	14.05	91.36	0.471
5.25	0.000	220.959	4.739	224.071	7.850	2007.89	14.34	95.11	0.483
5.50	0.000	213.373	4.581	216.638	7.847	2074.90	14.60	98.57	0.495
5.75	0.000	205.972	4.428	209.390	7.846	2140.91	14.83	101.75	0.506
6.00	0.000	198.950	4.280	202.519	7.849	2206.24	15.05	104.75	0.517

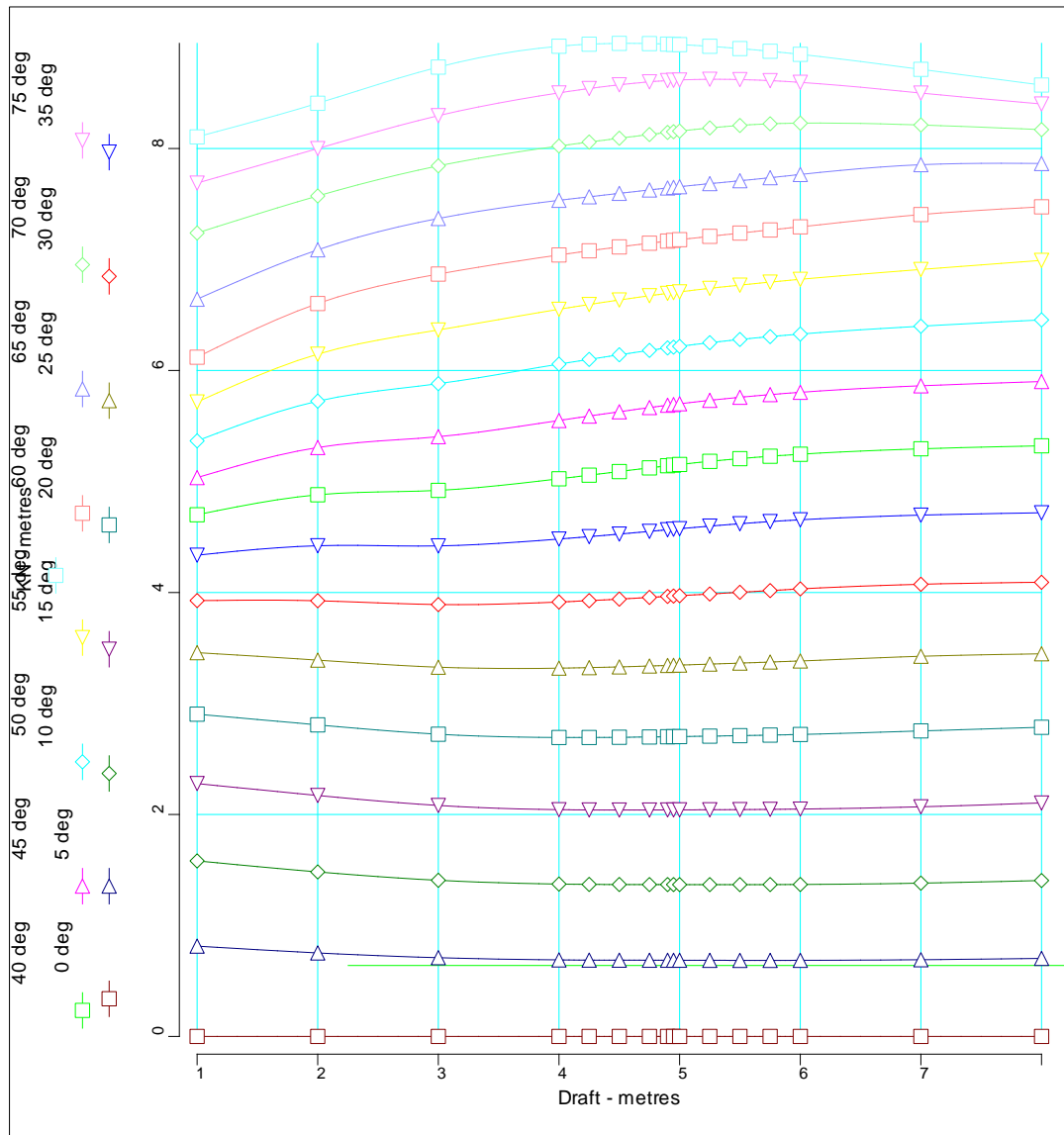
Draft (m)	CM	CP	CW	CB incl.shell	Vol.(mld) (m ³)
4.00	0.801	0.523	0.630	0.421	3159.97
4.25	0.811	0.532	0.655	0.434	3463.87
4.50	0.820	0.542	0.684	0.447	3780.24
4.75	0.829	0.553	0.705	0.460	4108.71
4.90	0.834	0.559	0.715	0.468	4310.12
4.91	0.834	0.559	0.716	0.468	4323.64
4.92	0.834	0.559	0.717	0.469	4337.18
4.93	0.835	0.560	0.717	0.469	4350.76
4.94	0.835	0.560	0.718	0.470	4364.33

Draft (m)	CM	CP	CW	CB incl.shell	Vol.(mld) (m ³)
4.95	0.835	0.561	0.718	0.470	4377.91
4.96	0.836	0.561	0.719	0.471	4391.49
4.97	0.836	0.561	0.720	0.471	4405.11
4.98	0.836	0.562	0.720	0.472	4418.71
4.99	0.837	0.562	0.721	0.472	4432.35
5.00	0.837	0.563	0.722	0.473	4445.98
5.25	0.844	0.572	0.736	0.485	4790.72
5.50	0.851	0.582	0.750	0.497	5142.05
5.75	0.857	0.591	0.762	0.508	5499.43
6.00	0.863	0.599	0.773	0.519	5862.07

Density (t/m ³)	1.025	1.027	1.029	1.031	1.033
Draft (m)					
4.00	3255.6	3262.0	3268.3	3274.7	3281.0
4.25	3567.9	3574.9	3581.9	3588.8	3595.8
4.50	3893.1	3900.7	3908.3	3915.9	3923.5
4.75	4230.6	4238.8	4247.1	4255.4	4263.6
4.90	4437.5	4446.1	4454.8	4463.4	4472.1
4.91	4451.4	4460.0	4468.7	4477.4	4486.1
4.92	4465.3	4474.0	4482.7	4491.4	4500.1
4.93	4479.2	4488.0	4496.7	4505.4	4514.2
4.94	4493.1	4501.9	4510.7	4519.4	4528.2
4.95	4507.1	4515.9	4524.7	4533.5	4542.3
4.96	4521.0	4529.9	4538.7	4547.5	4556.3
4.97	4535.0	4543.9	4552.7	4561.6	4570.4
4.98	4549.0	4557.9	4566.8	4575.6	4584.5
4.99	4563.0	4571.9	4580.8	4589.7	4598.6
5.00	4577.0	4585.9	4594.9	4603.8	4612.7
5.25	4931.1	4940.7	4950.3	4959.9	4969.6
5.50	5291.9	5302.2	5312.5	5322.8	5333.2
5.75	5658.9	5669.9	5680.9	5692.0	5703.0
6.00	6031.2	6043.0	6054.8	6066.5	6078.3

4.3 Cross Curves

Στη συνέχεια παρατίθενται τα αποτελέσματα υπολογισμού των Cross Curves, οι οποίες χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των μοχλοβραχιόνων ευστάθειας. Οι εν λόγω καμπύλες παρατίθενται και υπό μορφή σχεδίου στα παραρτήματα της παρούσας.



Εικόνα 31: Cross Curves

Πίνακας 33: Δεδομένα Cross Curves

WLRRadius (m)	Heel (deg)	Trim (m)	Displ (t)	KTS (m)	GM (m)	DS (m-rads)	Deck (m)
0.99	0.00	0.000	473.11	0.000	9.302	0.000	8.842
0.95	5.00	0.037	472.97	0.814	9.040	0.036	8.122
0.85	10.00	0.149	472.90	1.582	8.407	0.141	7.401
0.68	15.00	0.339	472.91	2.278	7.709	0.309	6.683
0.45	20.00	0.613	472.89	2.904	7.144	0.536	5.969
0.17	25.00	0.996	472.90	3.458	6.639	0.813	5.263
-0.18	30.00	1.526	472.92	3.927	6.281	1.136	4.575
-0.57	35.00	2.161	472.96	4.336	6.026	1.496	3.903
-1.01	40.00	2.821	473.06	4.700	5.414	1.890	3.249
-1.49	45.00	3.494	473.21	5.035	5.296	2.313	2.619

WLRadius (m)	Heel (deg)	Trim (m)	Displt (t)	KTS (m)	GM (m)	DS (m-rads)	Deck (m)
-2.00	50.00	4.180	473.22	5.366	5.350	2.766	2.014
-2.54	55.00	4.845	473.33	5.716	5.505	3.248	1.442
-3.12	60.00	5.436	472.90	6.120	5.909	3.763	0.913
-3.73	65.00	5.828	472.89	6.642	6.849	4.317	0.434
-4.37	70.00	5.855	472.91	7.239	6.504	4.921	0.005
-5.02	75.00	5.341	472.91	7.688	5.623	5.574	-0.378
-5.70	80.00	4.693	472.90	8.105	6.219	6.263	-0.692
1.99	0.00	0.000	1199.78	0.000	8.612	0.000	7.842
1.96	5.00	0.022	1199.52	0.753	8.484	0.033	7.117
1.87	10.00	0.089	1200.11	1.482	8.125	0.130	6.381
1.72	15.00	0.201	1199.47	2.171	7.607	0.291	5.641
1.52	20.00	0.360	1199.47	2.807	7.030	0.508	4.902
1.26	25.00	0.565	1199.47	3.390	6.501	0.779	4.169
0.95	30.00	0.816	1199.47	3.925	6.076	1.098	3.447
0.59	35.00	1.118	1199.48	4.421	5.787	1.463	2.739
0.19	40.00	1.498	1199.50	4.880	5.595	1.868	2.053
-0.27	45.00	1.975	1199.50	5.306	5.614	2.313	1.398
-0.76	50.00	2.513	1199.57	5.724	5.806	2.794	0.779
-1.31	55.00	3.020	1199.75	6.147	5.614	3.311	0.208
-1.91	60.00	3.437	1199.94	6.604	5.788	3.866	-0.304
-2.55	65.00	3.736	1199.98	7.087	5.738	4.462	-0.754
-3.23	70.00	3.868	1200.02	7.572	5.287	5.102	-1.137
-3.95	75.00	3.805	1200.12	7.999	4.474	5.781	-1.448
-4.72	80.00	3.622	1200.10	8.407	5.097	6.496	-1.679
2.99	0.00	0.000	2136.19	0.000	8.120	0.000	6.842
2.96	5.00	0.023	2135.83	0.710	8.055	0.031	6.116
2.88	10.00	0.092	2136.33	1.407	7.866	0.123	5.376
2.73	15.00	0.204	2135.80	2.081	7.567	0.276	4.630
2.54	20.00	0.358	2135.81	2.723	7.190	0.486	3.885
2.28	25.00	0.550	2135.81	3.327	6.775	0.750	3.147
1.97	30.00	0.775	2135.83	3.891	6.374	1.065	2.423
1.61	35.00	1.028	2135.80	4.420	6.046	1.428	1.720
1.20	40.00	1.304	2135.81	4.920	5.821	1.836	1.043
0.73	45.00	1.599	2135.82	5.404	5.734	2.286	0.400
0.22	50.00	1.927	2135.82	5.881	5.874	2.779	-0.202
-0.35	55.00	2.310	2135.84	6.365	6.137	3.313	-0.755
-0.96	60.00	2.705	2135.89	6.869	6.351	3.890	-1.256
-1.61	65.00	3.021	2135.94	7.370	5.774	4.510	-1.692
-2.31	70.00	3.241	2136.09	7.844	5.338	5.174	-2.058
-3.06	75.00	3.362	2136.10	8.296	5.075	5.877	-2.347
-3.85	80.00	3.355	2135.97	8.734	4.884	6.620	-2.549
3.99	0.00	0.000	3268.31	0.000	7.893	0.000	5.842

WLRadius (m)	Heel (deg)	Trim (m)	Displt (t)	KTS (m)	GM (m)	DS (m-rads)	Deck (m)
3.96	5.00	0.025	3267.85	0.690	7.863	0.030	5.116
3.88	10.00	0.101	3268.45	1.373	7.766	0.120	4.376
3.73	15.00	0.227	3267.85	2.043	7.612	0.270	3.631
3.53	20.00	0.397	3267.83	2.693	7.380	0.477	2.888
3.28	25.00	0.596	3267.81	3.318	7.089	0.739	2.154
2.96	30.00	0.816	3267.82	3.914	6.774	1.055	1.436
2.59	35.00	1.048	3267.82	4.482	6.478	1.421	0.743
2.16	40.00	1.283	3267.82	5.024	6.235	1.836	0.083
1.67	45.00	1.509	3267.82	5.550	6.029	2.298	-0.538
1.13	50.00	1.716	3267.83	6.057	5.810	2.804	-1.117
0.55	55.00	1.899	3267.83	6.552	5.670	3.355	-1.649
-0.08	60.00	2.113	3267.82	7.041	5.790	3.947	-2.133
-0.74	65.00	2.381	3267.84	7.533	5.902	4.583	-2.565
-1.44	70.00	2.644	3267.89	8.022	5.632	5.261	-2.930
-2.19	75.00	2.836	3267.87	8.501	5.385	5.982	-3.211
-2.98	80.00	2.990	3267.83	8.921	4.128	6.742	-3.415
4.24	0.00	0.000	3581.85	0.000	7.869	0.000	5.592
4.21	5.00	0.026	3581.39	0.688	7.847	0.030	4.866
4.12	10.00	0.108	3581.87	1.370	7.773	0.120	4.127
3.98	15.00	0.236	3581.36	2.041	7.623	0.269	3.383
3.78	20.00	0.399	3581.36	2.693	7.411	0.476	2.640
3.52	25.00	0.590	3581.36	3.323	7.150	0.739	1.907
3.21	30.00	0.800	3581.36	3.926	6.855	1.055	1.192
2.83	35.00	1.019	3581.37	4.503	6.571	1.423	0.502
2.39	40.00	1.238	3581.38	5.056	6.335	1.840	-0.154
1.90	45.00	1.445	3581.35	5.589	6.060	2.305	-0.770
1.36	50.00	1.629	3581.35	6.100	5.800	2.815	-1.345
0.77	55.00	1.783	3581.35	6.595	5.630	3.369	-1.873
0.14	60.00	1.952	3581.34	7.078	5.652	3.966	-2.353
-0.52	65.00	2.194	3581.35	7.565	5.820	4.604	-2.782
-1.22	70.00	2.460	3581.38	8.058	5.789	5.285	-3.147
-1.98	75.00	2.674	3581.37	8.540	5.304	6.009	-3.427
-2.76	80.00	2.850	3581.35	8.940	3.778	6.772	-3.637
4.49	0.00	0.000	3908.31	0.000	7.862	0.000	5.342
4.46	5.00	0.029	3907.82	0.687	7.844	0.030	4.616
4.37	10.00	0.108	3908.23	1.369	7.767	0.120	3.878
4.23	15.00	0.228	3907.79	2.040	7.633	0.269	3.134
4.03	20.00	0.382	3907.80	2.695	7.444	0.476	2.392
3.77	25.00	0.561	3907.79	3.330	7.206	0.739	1.660
3.45	30.00	0.758	3907.79	3.940	6.939	1.056	0.947
3.07	35.00	0.963	3907.80	4.526	6.664	1.426	0.260
2.63	40.00	1.165	3907.78	5.090	6.405	1.845	-0.392

WLRadius (m)	Heel (deg)	Trim (m)	Displt (t)	KTS (m)	GM (m)	DS (m-rads)	Deck (m)
2.14	45.00	1.353	3907.79	5.628	6.079	2.313	-1.004
1.59	50.00	1.513	3907.78	6.141	5.791	2.827	-1.574
1.00	55.00	1.641	3907.77	6.635	5.569	3.385	-2.098
0.36	60.00	1.772	3907.77	7.114	5.546	3.984	-2.575
-0.30	65.00	1.986	3907.77	7.596	5.745	4.626	-3.002
-1.01	70.00	2.247	3907.79	8.092	5.901	5.310	-3.364
-1.76	75.00	2.484	3907.78	8.574	5.156	6.037	-3.646
-2.53	80.00	2.672	3907.78	8.947	3.434	6.802	-3.863
4.74	0.00	0.000	4247.10	0.000	7.861	0.000	5.092
4.71	5.00	0.024	4246.56	0.687	7.839	0.030	4.366
4.62	10.00	0.094	4246.94	1.369	7.765	0.120	3.628
4.48	15.00	0.204	4247.78	2.041	7.645	0.268	2.884
4.28	20.00	0.344	4246.56	2.698	7.476	0.476	2.144
4.02	25.00	0.510	4246.54	3.338	7.260	0.739	1.413
3.70	30.00	0.692	4246.55	3.955	7.018	1.058	0.702
3.31	35.00	0.881	4246.54	4.550	6.763	1.429	0.018
2.87	40.00	1.066	4246.54	5.123	6.462	1.851	-0.630
2.37	45.00	1.231	4246.54	5.666	6.090	2.322	-1.239
1.82	50.00	1.365	4246.54	6.181	5.788	2.839	-1.806
1.22	55.00	1.471	4246.54	6.673	5.514	3.400	-2.327
0.59	60.00	1.573	4246.51	7.147	5.422	4.003	-2.801
-0.08	65.00	1.754	4246.53	7.627	5.694	4.648	-3.225
-0.79	70.00	2.005	4246.53	8.126	6.000	5.335	-3.584
-1.54	75.00	2.262	4246.54	8.600	4.921	6.065	-3.868
-2.30	80.00	2.456	4246.54	8.945	3.131	6.831	-4.095
4.89	0.00	0.000	4454.78	0.000	7.862	0.000	4.942
4.86	5.00	0.021	4454.22	0.687	7.836	0.030	4.216
4.77	10.00	0.086	4454.57	1.368	7.766	0.120	3.478
4.63	15.00	0.188	4455.41	2.041	7.653	0.268	2.734
4.43	20.00	0.320	4454.23	2.700	7.497	0.476	1.995
4.17	25.00	0.477	4454.22	3.342	7.293	0.740	1.265
3.84	30.00	0.649	4454.22	3.965	7.062	1.059	0.555
3.46	35.00	0.829	4454.22	4.565	6.819	1.431	-0.126
3.01	40.00	1.002	4454.22	5.141	6.480	1.855	-0.772
2.51	45.00	1.152	4454.21	5.687	6.099	2.328	-1.380
1.96	50.00	1.270	4454.21	6.203	5.783	2.847	-1.945
1.36	55.00	1.363	4454.21	6.695	5.490	3.409	-2.465
0.72	60.00	1.453	4454.21	7.166	5.345	4.014	-2.937
0.05	65.00	1.611	4454.21	7.644	5.681	4.660	-3.359
-0.66	70.00	1.854	4454.21	8.145	6.010	5.349	-3.716
-1.40	75.00	2.122	4454.21	8.612	4.730	6.080	-4.003
-2.16	80.00	2.317	4454.21	8.940	2.972	6.846	-4.236

WLRadius (m)	Heel (deg)	Trim (m)	Displt (t)	KTS (m)	GM (m)	DS (m-rads)	Deck (m)
4.94	0.00	0.000	4524.69	0.000	7.860	0.000	4.892
4.91	5.00	0.021	4524.14	0.687	7.836	0.030	4.166
4.82	10.00	0.083	4524.47	1.368	7.767	0.120	3.428
4.68	15.00	0.182	4525.30	2.041	7.657	0.268	2.685
4.48	20.00	0.312	4524.12	2.701	7.504	0.476	1.945
4.21	25.00	0.466	4524.12	3.344	7.305	0.740	1.216
3.89	30.00	0.635	4524.14	3.968	7.077	1.059	0.507
3.51	35.00	0.811	4524.12	4.570	6.834	1.432	-0.174
3.06	40.00	0.980	4524.12	5.148	6.486	1.856	-0.820
2.56	45.00	1.125	4524.11	5.693	6.101	2.329	-1.427
2.01	50.00	1.237	4524.12	6.211	5.782	2.849	-1.992
1.41	55.00	1.325	4524.11	6.702	5.482	3.412	-2.511
0.77	60.00	1.412	4524.11	7.172	5.336	4.018	-2.982
0.10	65.00	1.564	4524.11	7.650	5.679	4.664	-3.403
-0.61	70.00	1.804	4524.11	8.151	6.002	5.353	-3.760
-1.36	75.00	2.074	4524.11	8.615	4.667	6.085	-4.048
-2.11	80.00	2.269	4524.12	8.938	2.922	6.852	-4.283
4.99	0.00	0.000	4594.87	0.000	7.857	0.000	4.842
4.96	5.00	0.020	4594.32	0.686	7.836	0.030	4.116
4.87	10.00	0.080	4594.65	1.368	7.768	0.120	3.378
4.73	15.00	0.177	4595.45	2.041	7.660	0.268	2.635
4.53	20.00	0.304	4594.31	2.702	7.511	0.476	1.896
4.26	25.00	0.455	4594.30	3.346	7.317	0.740	1.167
3.94	30.00	0.621	4594.31	3.971	7.091	1.059	0.458
3.55	35.00	0.793	4594.31	4.575	6.848	1.432	-0.222
3.11	40.00	0.958	4594.30	5.153	6.492	1.857	-0.867
2.61	45.00	1.097	4594.31	5.700	6.103	2.331	-1.474
2.05	50.00	1.204	4594.30	6.218	5.781	2.851	-2.038
1.45	55.00	1.288	4594.30	6.708	5.475	3.415	-2.557
0.82	60.00	1.371	4594.29	7.178	5.328	4.021	-3.027
0.14	65.00	1.516	4594.29	7.656	5.677	4.668	-3.448
-0.57	70.00	1.753	4594.30	8.157	5.989	5.358	-3.804
-1.31	75.00	2.025	4594.30	8.617	4.607	6.090	-4.093
-2.07	80.00	2.221	4594.30	8.936	2.874	6.857	-4.331
5.24	0.00	0.000	4950.27	0.000	7.850	0.000	4.592
5.21	5.00	0.017	4949.74	0.686	7.832	0.030	3.866
5.12	10.00	0.068	4950.01	1.368	7.775	0.120	3.129
4.98	15.00	0.153	4950.78	2.042	7.677	0.268	2.386
4.77	20.00	0.266	4949.72	2.706	7.544	0.476	1.649
4.51	25.00	0.401	4949.74	3.355	7.373	0.741	0.922
4.18	30.00	0.550	4949.72	3.986	7.164	1.061	0.216
3.79	35.00	0.704	4949.72	4.598	6.905	1.436	-0.461

WLRadius (m)	Heel (deg)	Trim (m)	Displt (t)	KTS (m)	GM (m)	DS (m-rads)	Deck (m)
3.34	40.00	0.843	4949.72	5.181	6.510	1.863	-1.104
2.84	45.00	0.954	4949.72	5.731	6.120	2.339	-1.709
2.28	50.00	1.033	4949.72	6.250	5.771	2.862	-2.271
1.68	55.00	1.096	4949.72	6.740	5.451	3.429	-2.788
1.04	60.00	1.163	4949.71	7.208	5.304	4.038	-3.255
0.37	65.00	1.279	4949.71	7.683	5.690	4.687	-3.671
-0.35	70.00	1.500	4949.73	8.185	5.847	5.379	-4.024
-1.08	75.00	1.774	4949.71	8.623	4.342	6.114	-4.321
-1.83	80.00	1.974	4949.72	8.920	2.655	6.880	-4.568
5.49	0.00	0.000	5312.52	0.000	7.847	0.000	4.342
5.46	5.00	0.014	5311.92	0.686	7.831	0.030	3.617
5.37	10.00	0.058	5312.19	1.368	7.782	0.120	2.880
5.23	15.00	0.132	5312.91	2.044	7.698	0.268	2.139
5.02	20.00	0.230	5311.91	2.710	7.577	0.476	1.403
4.75	25.00	0.349	5311.90	3.364	7.426	0.741	0.678
4.42	30.00	0.481	5311.91	4.002	7.240	1.063	-0.025
4.03	35.00	0.613	5311.91	4.619	6.933	1.439	-0.699
3.58	40.00	0.724	5311.92	5.206	6.526	1.868	-1.340
3.07	45.00	0.803	5311.90	5.759	6.146	2.347	-1.944
2.52	50.00	0.854	5311.91	6.279	5.769	2.873	-2.504
1.92	55.00	0.897	5311.90	6.769	5.449	3.442	-3.019
1.27	60.00	0.950	5311.91	7.238	5.300	4.053	-3.484
0.59	65.00	1.044	5311.90	7.709	5.667	4.705	-3.893
-0.13	70.00	1.250	5310.40	8.208	5.572	5.400	-4.244
-0.85	75.00	1.513	5311.90	8.621	4.096	6.135	-4.551
-1.59	80.00	1.717	5311.90	8.900	2.478	6.900	-4.808
5.74	0.00	0.000	5680.94	0.000	7.846	0.000	4.092
5.71	5.00	0.012	5680.31	0.686	7.833	0.030	3.367
5.62	10.00	0.050	5680.57	1.368	7.793	0.120	2.631
5.47	15.00	0.112	5681.26	2.046	7.720	0.268	1.892
5.26	20.00	0.197	5680.30	2.715	7.616	0.477	1.158
4.99	25.00	0.299	5680.32	3.373	7.476	0.742	0.436
4.66	30.00	0.413	5680.31	4.017	7.294	1.065	-0.264
4.27	35.00	0.520	5680.31	4.639	6.944	1.443	-0.936
3.82	40.00	0.599	5680.31	5.227	6.543	1.874	-1.576
3.31	45.00	0.645	5680.31	5.783	6.169	2.354	-2.178
2.75	50.00	0.669	5680.31	6.305	5.780	2.882	-2.738
2.15	55.00	0.694	5680.31	6.796	5.464	3.454	-3.252
1.50	60.00	0.735	5680.30	7.266	5.318	4.068	-3.713
0.81	65.00	0.812	5681.88	7.737	5.619	4.722	-4.117
0.10	70.00	0.999	5680.34	8.222	5.207	5.419	-4.468
-0.62	75.00	1.245	5680.31	8.611	3.880	6.154	-4.782

WLRadius (m)	Heel (deg)	Trim (m)	Displt (t)	KTS (m)	GM (m)	DS (m-rads)	Deck (m)
-1.35	80.00	1.453	5680.30	8.876	2.337	6.918	-5.049
5.99	0.00	0.000	6054.77	0.000	7.849	0.000	3.842
5.96	5.00	0.010	6054.13	0.686	7.840	0.030	3.117
5.87	10.00	0.042	6054.36	1.370	7.805	0.120	2.383
5.72	15.00	0.095	6055.02	2.049	7.743	0.269	1.645
5.51	20.00	0.166	6054.13	2.721	7.652	0.477	0.914
5.24	25.00	0.253	6054.12	3.383	7.526	0.744	0.195
4.90	30.00	0.347	6054.13	4.032	7.315	1.067	-0.502
4.50	35.00	0.424	6054.13	4.655	6.949	1.447	-1.172
4.05	40.00	0.468	6054.13	5.245	6.564	1.879	-1.812
3.54	45.00	0.481	6054.12	5.803	6.192	2.361	-2.413
2.99	50.00	0.481	6054.13	6.328	5.803	2.891	-2.972
2.38	55.00	0.489	6054.12	6.821	5.495	3.465	-3.484
1.73	60.00	0.519	6054.12	7.294	5.350	4.081	-3.942
1.03	65.00	0.583	6054.14	7.766	5.549	4.738	-4.339
0.32	70.00	0.749	6054.15	8.228	4.887	5.436	-4.692
-0.39	75.00	0.974	6054.13	8.596	3.689	6.171	-5.015
-1.11	80.00	1.184	6054.11	8.848	2.229	6.933	-5.291
6.99	0.00	0.000	7599.04	0.000	7.912	0.000	2.842
6.96	5.00	0.004	7598.32	0.691	7.908	0.030	2.120
6.86	10.00	0.016	7598.50	1.381	7.886	0.121	1.391
6.70	15.00	0.035	7598.99	2.069	7.852	0.271	0.663
6.48	20.00	0.059	7599.44	2.753	7.797	0.481	-0.056
6.19	25.00	0.073	7598.90	3.425	7.569	0.751	-0.762
5.85	30.00	0.045	7599.93	4.074	7.278	1.079	-1.454
5.45	35.00	-0.022	7598.32	4.697	7.000	1.462	-2.122
5.00	40.00	-0.114	7598.32	5.294	6.689	1.898	-2.759
4.49	45.00	-0.208	7598.32	5.862	6.326	2.385	-3.359
3.93	50.00	-0.285	7598.32	6.399	5.988	2.921	-3.915
3.32	55.00	-0.333	7598.32	6.910	5.726	3.502	-4.419
2.65	60.00	-0.343	7598.34	7.405	5.610	4.126	-4.863
1.95	65.00	-0.320	7598.33	7.854	4.575	4.793	-5.256
1.25	70.00	-0.261	7598.34	8.212	3.712	5.494	-5.622
0.56	75.00	-0.112	7598.34	8.500	2.920	6.224	-5.964
-0.13	80.00	0.066	7597.07	8.713	1.993	6.976	-6.269
7.99	0.00	0.000	9206.84	0.000	8.050	0.000	1.842
7.95	5.00	-0.002	9206.07	0.703	8.046	0.031	1.122
7.85	10.00	-0.008	9206.23	1.405	8.024	0.123	0.401
7.68	15.00	-0.020	9205.53	2.104	7.937	0.276	-0.314
7.45	20.00	-0.086	9205.19	2.786	7.698	0.490	-1.026
7.16	25.00	-0.213	9205.42	3.447	7.507	0.762	-1.732
6.82	30.00	-0.380	9205.58	4.092	7.327	1.091	-2.421

WLRadius (m)	Heel (deg)	Trim (m)	Displt (t)	KTS (m)	GM (m)	DS (m-rads)	Deck (m)
6.42	35.00	-0.567	9204.87	4.718	7.095	1.476	-3.085
5.96	40.00	-0.749	9205.16	5.321	6.807	1.914	-3.720
5.45	45.00	-0.910	9206.10	5.900	6.516	2.404	-4.318
4.88	50.00	-1.039	9207.67	6.456	6.251	2.943	-4.868
4.26	55.00	-1.127	9206.09	6.992	6.009	3.530	-5.360
3.60	60.00	-1.195	9206.09	7.474	4.986	4.162	-5.807
2.92	65.00	-1.239	9206.09	7.865	3.963	4.832	-6.225
2.24	70.00	-1.255	9206.09	8.170	3.021	5.532	-6.608
1.55	75.00	-1.213	9206.10	8.401	2.327	6.255	-6.956
0.87	80.00	-1.073	9206.11	8.572	1.619	6.996	-7.269

KTS's in metres

Heel Draft	0.0	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0	45.0
1.000	0.000	0.814	1.582	2.278	2.904	3.458	3.927	4.336	4.700	5.035
2.000	0.000	0.753	1.482	2.171	2.807	3.390	3.925	4.421	4.880	5.306
3.000	0.000	0.710	1.407	2.081	2.723	3.327	3.891	4.420	4.920	5.404
4.000	0.000	0.690	1.373	2.043	2.693	3.318	3.914	4.482	5.024	5.550
4.250	0.000	0.688	1.370	2.041	2.693	3.323	3.926	4.503	5.056	5.589
4.500	0.000	0.687	1.369	2.040	2.695	3.330	3.940	4.526	5.090	5.628
4.750	0.000	0.687	1.369	2.041	2.698	3.338	3.955	4.550	5.123	5.666
4.900	0.000	0.687	1.368	2.041	2.700	3.342	3.965	4.565	5.141	5.687
4.950	0.000	0.687	1.368	2.041	2.701	3.344	3.968	4.570	5.148	5.693
5.000	0.000	0.686	1.368	2.041	2.702	3.346	3.971	4.575	5.153	5.700
5.250	0.000	0.686	1.368	2.042	2.706	3.355	3.986	4.598	5.181	5.731
5.500	0.000	0.686	1.368	2.044	2.710	3.364	4.002	4.619	5.206	5.759
5.750	0.000	0.686	1.368	2.046	2.715	3.373	4.017	4.639	5.227	5.783
6.000	0.000	0.686	1.370	2.049	2.721	3.383	4.032	4.655	5.245	5.803
7.000	0.000	0.691	1.381	2.069	2.753	3.425	4.074	4.697	5.294	5.862
8.000	0.000	0.703	1.405	2.104	2.786	3.447	4.092	4.718	5.321	5.900

Heel Draft	50.0	55.0	60.0	65.0	70.0	75.0	80.0
1.000	5.366	5.716	6.120	6.642	7.239	7.688	8.105
2.000	5.724	6.147	6.604	7.087	7.572	7.999	8.407
3.000	5.881	6.365	6.869	7.370	7.844	8.296	8.734

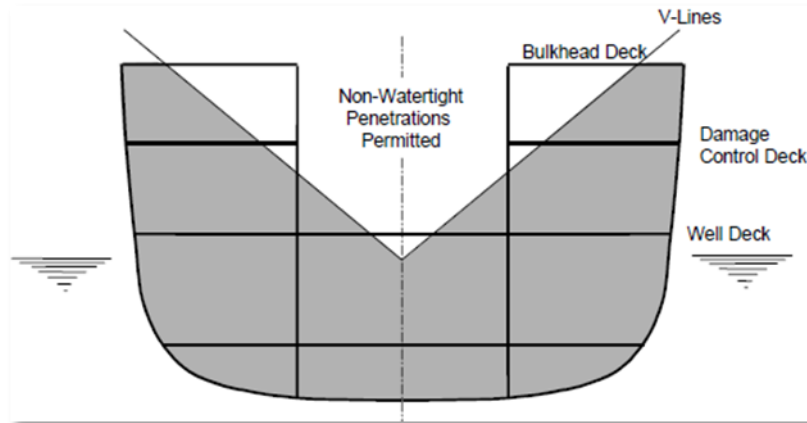
Heel Draft	50.0	55.0	60.0	65.0	70.0	75.0	80.0
4.000	6.057	6.552	7.041	7.533	8.022	8.501	8.921
4.250	6.100	6.595	7.078	7.565	8.058	8.540	8.940
4.500	6.141	6.635	7.114	7.596	8.092	8.574	8.947
4.750	6.181	6.673	7.147	7.627	8.126	8.600	8.945
4.900	6.203	6.695	7.166	7.644	8.145	8.612	8.940
4.950	6.211	6.702	7.172	7.650	8.151	8.615	8.938
5.000	6.218	6.708	7.178	7.656	8.157	8.617	8.936
5.250	6.250	6.740	7.208	7.683	8.185	8.623	8.920
5.500	6.279	6.769	7.238	7.709	8.208	8.621	8.900
5.750	6.305	6.796	7.266	7.737	8.222	8.611	8.876
6.000	6.328	6.821	7.294	7.766	8.228	8.596	8.848
7.000	6.399	6.910	7.405	7.854	8.212	8.500	8.713
8.000	6.456	6.992	7.474	7.865	8.170	8.401	8.572

4.4 Υδατοστεγής Υποδιαίρεση και Κατακλύσιμα Μήκη

4.4.1 Απαιτήσεις Κανονισμών για την Υδατοστεγή Υποδιαίρεση

Προκειμένου να σχεδιασθεί η υδατοστεγής υποδιαίρεση του πλοίου και να υπολογισθούν τα κατακλύσιμα μήκη με το λογισμικό AVEVA, απαιτείται αρχικά ο καθορισμός του αριθμού και των θέσεων των στεγανών φρακτών, λαμβάνοντας υπόψη τους σχετικούς με το σχεδιαζόμενο πλοίο κανονισμούς. Στα πλαίσια της παρούσας αξιοποιήθηκαν οι προβλέψεις των UK MOD Defense Standards 02-900 Part 4 [46], του US Navy DDS 079-1 [50] καθώς και του κανονισμού Rules for classification and construction III του Germanischer Loyds [47], συμπληρωματικά.

Σύμφωνα με τα πρότυπα [46]-[47], το πλοίο θα πρέπει να φέρει εγκάρσιες υδατοστεγείς φρακτές, στεγανές τουλάχιστον μέχρι το Damage Control Deck του πλοίου (συγκεκριμένα μέχρι τις Internal V-Lines [50]), οι οποίες θα πρέπει να εξασφαλίζουν επαρκή άντωση και ευστάθεια, έως το επίπεδο του Damage Control Deck, σε κατάσταση βλάβης. Κάτω από το Damage Control Deck δεν πρέπει να υπάρχουν οδοί πρόσβασης ή ανοίγματα (εξαερισμοί, κλπ.) στις υδατοστεγείς φρακτές, από τα οποία μπορεί να εισέλθει νερό. Πάνω από το Damage Control Deck και κάτω από τις εσωτερικές V-Lines, είναι επιτρεπτή η ύπαρξη τέτοιων οδεύσεων υπό την προϋπόθεση ότι θα πρέπει να έχουν υδατοστεγή ασφάλιση.



Εικόνα 32: Damage Control Deck

Σε ότι αφορά στην φρακτική σύγκρουσης, οφείλει να παραμένει υδατοστεγής μετά από σύγκρουση - παραμόρφωση και να λειτουργεί ως υποκατάστατο βολβού, σε ότι αφορά στην ανάληψη υδροδυναμικών φορτίων κατά την μετάβαση σε λιμένα, σε περιορισμένη ταχύτητα, μετά από βλάβη [46]. Η φρακτική σύγκρουσης θα πρέπει να τοποθετείται σε μήκος μεγαλύτερο από $5\%L$ [17], ήτοι 5,75m για τα πλοία της συγκεκριμένης κατηγορίας. Σύμφωνα και με το σχέδιο γενικής διάταξης, η φρακτική σύγκρουσης του υπό σχεδίαση πλοίου βρίσκεται σε απόσταση 6,325m από την προωαία κάθετο και συνεπώς πληρείται το ανώτερο κριτήριο σχεδίασης.

Οι εγκάρσιες υδατοστεγείς φρακτές του πλοίου θα πρέπει να εκτείνονται μέχρι το Bulkhead Deck [50]. Συχνά όμως η βέλτιστη οριζόντια απόσταση των εγκαρσίων φρακτών επηρεάζεται από την αναγκαιότητα επαρκούς επιβιωσιμότητας μετά από βλάβη στα ύφαλα του πλοίου. Προκειμένου οι υδατοστεγείς φρακτές να θεωρούνται επαρκής, θα πρέπει να έχουν ελάχιστη απόσταση μεταξύ τους, τουλάχιστον ίση με $10 \text{ feet} + 0.03LBP = 6,45\text{m}$ [50], για το υπό σχεδίαση πλοίο.

Type of Compartment	Full Load Condition	Minimum Operating Condition
Living spaces	0.95	0.95
Offices, radio rooms, I.C. rooms	0.95	0.95
Shops	0.90	0.90
Pump rooms	0.90	0.90
Steering gear	0.90	0.90
Auxiliary machinery	0.85	0.85
Stores and provisions	0.80 to 0.90	0.95
Refrigerator spaces	0.80	0.90
Empty tanks and voids	0.98	0.98
Magazines:		
Powder	0.60	0.95
Small arms ammunition	0.60	0.95
Small arms	0.80	0.95
Handling rooms	0.80	0.95
Torpedo stowage	0.70	0.95
Cargo	0.60 to 0.80	0.95
Rocket stowage	0.80	0.95
Chain locker	0.65	0.65
Gasoline in cans	0.40	0.95
Machinery plant:		
Gas turbine	0.85	0.85
Diesel	0.85	0.85
Conventional steam:		
Lower half engine room	0.70	0.70
Upper half engine room	0.90	0.90
Fire room	0.90	0.90

Εικόνα 33: Ονομαστικές διαχωρητότητες διαμερισμάτων

Το Damage Control Deck (DCD) [46] θα πρέπει να επιτρέπει την πρόσβαση σε όλο το μήκος του πλοίου, σε κατάσταση βλάβης (εκτός των άκρων του πλοίου). Τουλάχιστον μια οδευση κατά μήκος του DCD θα πρέπει να διασφαλίζεται μετά από τη βλάβη, είτε μέσω ενός κεντρικού, είτε μέσω πλευρικών οδεύσεων. Ως εκ τούτου, ο φάκελος υδατοστεγούς σχεδίασης του πλοίου (watertight envelope) εκτείνεται μέχρι το DCD και όχι μέχρι το Bulkhead deck. Στην παρούσα σχεδίαση, λαμβάνεται ως weather deck το main deck και ως watertight-DCD το 2° Deck [50]. Το γεγονός αυτό παρέχει την δυνατότητα, εφόσον

εξασφαλίζεται επαρκής ευστάθεια, ύπαρξης μη υδατοστεγών διαμερισμάτων πάνω από το DCD, εντός των ορίων των V-lines.

Σε ότι αφορά στην οριζόντια διαμέριση μεταξύ των φρακτών, όλα τα διαμερίσματα κάτω από το DCD περιορίζονται ως προς το μήκος τους από τις υδατοστεγείς φρακτές, γεγονός που σε συνδυασμό με την ελάχιστη και μέγιστη απόσταση μεταξύ των φρακτών, επηρεάζει την βέλτιστη διάταξη των χώρων στο εσωτερικό του πλοίου.

Σύμφωνα με τα πρότυπα [17]-[50], η ονομαστική διαχωρητότητα των χώρων του πλοίου, λαμβάνεται σύμφωνα με τα δεδομένα της εικόνας 33.

Σε ότι αφορά στο μήκος της βλάβης, το οποίο λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς κατάκλυσης και ευστάθειας μετά από βλάβη, διαπιστώνεται ότι τα πρότυπα παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις μεταξύ τους. Συγκεκριμένα, οι προβλέψεις των κανονισμών είναι:

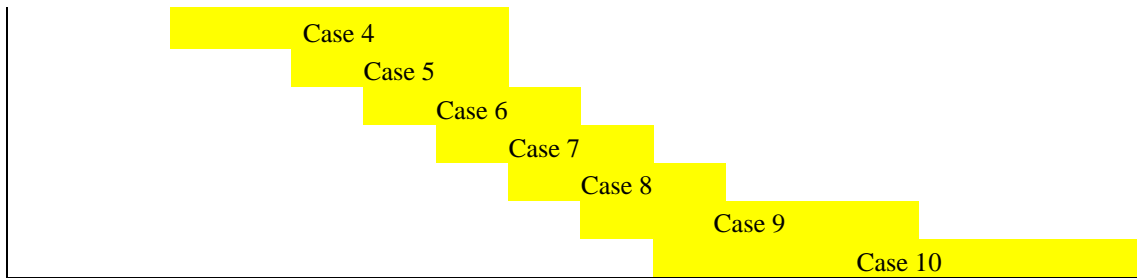
- 0,18L-3,6 ή 18m, όποιο είναι μικρότερο σύμφωνα με τους κανονισμούς [17].
- 0,15L, σύμφωνα με τους κανονισμούς [50].
- 0,15L ή 21m, σύμφωνα με τους κανονισμούς [46].

Ως εκ τούτου, στα πλαίσια της παρούσας λαμβάνεται υπόψη η πλέον δυσμενής (και άρα πλέον ασφαλής) περίπτωση, σύμφωνα με την οποία ως μήκος βλάβης λαμβάνεται αυτό των 21m [46].

Για τον καθορισμό των κατασκευαστικών νομέων- στεγανών φρακτών λήφθηκε υπόψη frame spacing ίσο με 1,15m (1%LBP - οι κανονισμοί δεν καθορίζουν ελάχιστο ή μέγιστο frame spacing) και ως εκ τούτου το πλοίο υποδιαιρέθηκε στις ακόλουθες ζώνες βλάβης (damage areas):

Πίνακας 34: Περιοχές Βλάβης

Damage Zones according to Def Stan 02-900 (frame numbers)														
0	6	11	17,5	26	35	45	55	65	75	82,5	90	94,5	100	
A		C			E		G		J		L		N	
	B		D		F		H		K		M			
Case 1														
Case 2														
Case 3														



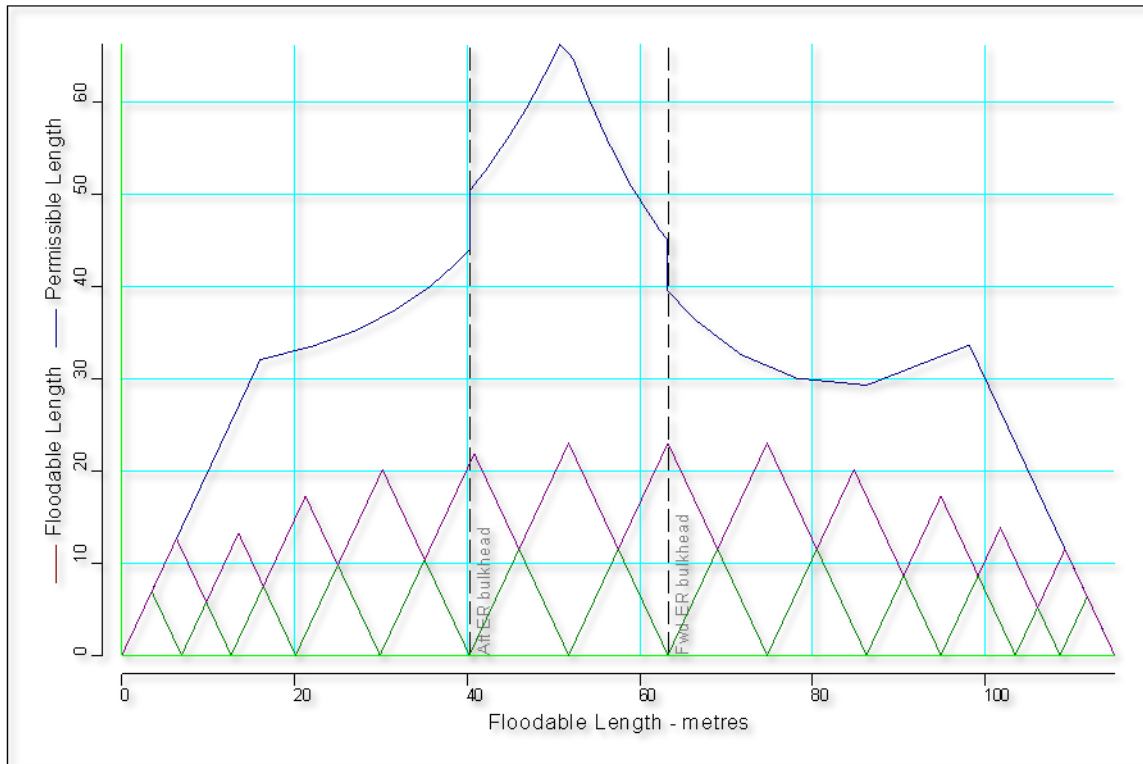
4.4.2 Κατακλύσιμα Μήκη

Οι θέσεις των εγκάρσιων υδατοστεγών φρακτών, από την πρυμναία κάθετο, δίδονται ακόλουθα:

Πίνακας 35: Θέσεις (m) Εγκαρσίων Υδατοστεγών Φρακτών από την πρυμναία κάθετο

Aft terminal	0.000
	0.000
	6.900
	12.650
	20.125
	29.900
Aft ER bulkhead	40.250
	51.750
Fwd ER bulkhead	63.250
	74.750
	86.250
	94.875
	103.500
	108.675
	115.000
Forward terminal	115.000

Με χρήση του λογισμικού AVEVA υπολογίζεται η ακόλουθη καμπύλη κατακλύσιμων μηκών (πρότυπο κατάκλυσης δύο διαμερισμάτων):



Εικόνα 34 : Καμπύλη Κατακλυσίμων Μηκών

Τα δεδομένα της οποίας παρατίθενται ακόλουθα:

Aft of Engine Room: Permeability = 95.000

Lost buoyancy cu.metres	LCB of FL from Origin metres	Floodable Length metres	Centre of FL from Origin metres	Mean draft metres	Trim by head metres
2365.59	17.217	32.047	16.024	5.953	-7.726
2730.08	23.459	33.536	22.127	6.251	-7.134
3122.63	28.521	35.275	27.277	6.570	-6.498
3558.05	32.847	37.472	31.718	6.910	-5.823
4016.63	36.571	39.897	35.598	7.267	-5.112
4524.08	39.804	42.702	38.960	7.640	-4.369
		43.946	40.250		

In way of Engine Room: Permeability = 85.000

Lost buoyancy cu.metres	LCB of FL from Origin metres	Floodable Length metres	Centre of FL from Origin metres	Mean draft metres	Trim by head metres
		50.338	40.250		
5174.38	43.184	52.739	42.267	8.110	-3.434

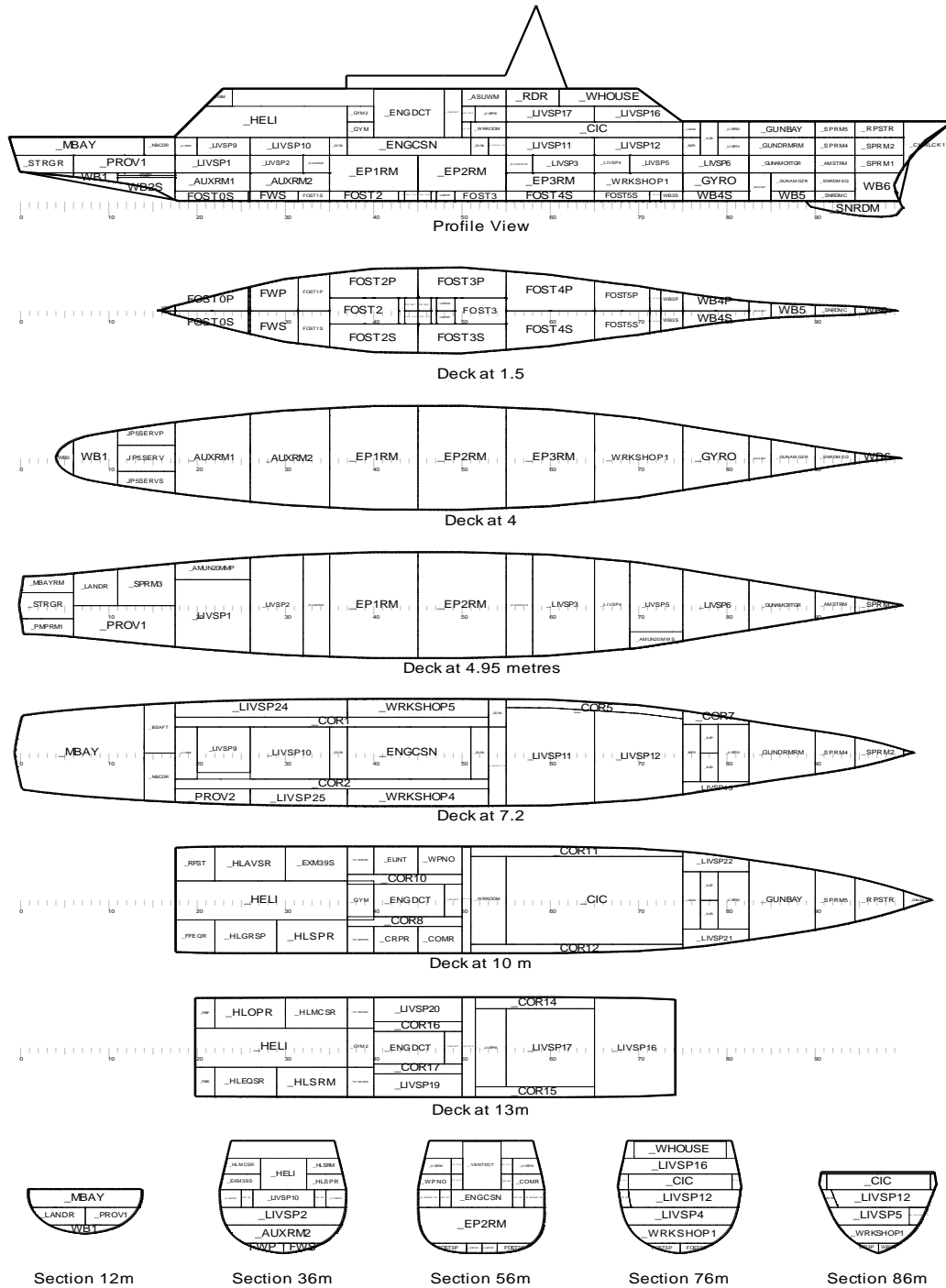
Lost buoyancy cu.metres	LCB of FL from Origin metres	Floodable Length metres	Centre of FL from Origin metres	Mean draft metres	Trim by head metres
5729.21	45.541	56.169	44.757	8.497	-2.661
6300.20	47.638	59.528	46.991	8.892	-1.873
6908.55	49.513	62.999	48.970	9.293	-1.073
7527.07	51.197	66.288	50.743	9.697	-0.266
7235.39	52.650	64.735	52.251	9.559	0.542
6502.96	54.296	60.535	54.009	9.156	1.347
5782.26	56.304	55.946	56.215	8.757	2.144
5069.85	58.768	50.995	58.924	8.364	2.927
4400.46	61.816	46.206	62.233	7.979	3.693
		45.019	63.250		

Fwd. of Engine Room: Permeability = 95.000

Lost buoyancy cu.metres	LCB of FL from Origin metres	Floodable Length metres	Centre of FL from Origin metres	Mean draft metres	Trim by head metres
		39.494	63.250		
3724.84	65.873	36.406	66.395	7.585	4.478
3103.47	70.918	32.620	71.697	7.214	5.216
2556.60	77.066	30.044	78.190	6.860	5.923
2071.57	84.548	29.291	86.275	6.523	6.593
1646.41	94.740	33.632	98.184	6.206	7.223

4.5 Πλάνο Δεξαμενών

Από το μοντέλο του πλοίου που αναπτύχθηκε στο AVEVA, με βάση τις απαιτήσεις σχεδίασης, καθορίστηκε το ακόλουθο πλάνο δεξαμενών αλλά και οι χώροι αποθήκευσης οπλισμού, εφοδίων, κλπ. που παρατίθενται ακόλουθα:



Εικόνα 35: Πλάνο δεξαμενών και χώρων

Category 1 - Water Ballast (SG = 1.025 tonnes/cu.m 100 % full)

Compartment	Frames	Volume (m ³)	Weight (t)	LCG (m)	TCG (m)	VCG (m)	FSM (m ⁴)
WB0 : WATER BALLAST 0	1-6	8.09	8.29	5.222	0.000	4.212	108
WB1 : WATER BALLAST 1	6-11	35.39	36.27	10.194	0.000	3.949	313
WB2P : WATER BALLAST 2P	11-18	28.09	28.79	17.160	-1.573	3.078	51
WB2S : WATER BALLAST 2S	11-18	28.09	28.79	17.160	1.573	3.078	51
WB3P : WATER BALLAST 3P	73-75	7.69	7.88	84.762	-1.098	1.027	6

Compartment	Frames	Volume (m ³)	Weight (t)	LCG (m)	TCG (m)	VCG (m)	FSM (m ⁴)
WB3S : WATER BALLAST 3S	73-75	7.69	7.88	84.762	1.098	1.027	6
WB4P : WATER BALLAST 4P	75-83	14.67	15.04	90.043	-0.757	1.052	7
WB4S : WATER BALLAST 4S	75-83	14.67	15.04	90.043	0.757	1.052	7
WB5 : WATER BALLAST 5	85-90	9.95	10.20	100.662	0.000	1.032	4
WB6 : WATER BALLAST 6	95-100	20.22	20.73	110.680	0.000	1.739	6
Total		174.55	178.91	48.996	0.000	2.514	

Category 2 - Fuel Oil (SG = 0.830 tonnes/cu.m 100 % full)

Compartment	Frames	Volume (m ³)	Weight (t)	LCG (m)	TCG (m)	VCG (m)	FSM (m ⁴)
FOST0P : FUEL STORAGE TANK 0P	18-26	15.75	13.07	26.182	-0.895	1.084	16
FOST0S : FUEL STORAGE TANK 0S	18-26	15.75	13.07	26.182	0.895	1.084	16
FOST1P : FUEL OIL SERVICE TANK 1P	31-35	22.60	18.76	38.262	-2.098	0.974	53
FOST1S : FUEL OIL SERVICE TANK 1S	31-35	22.60	18.76	38.262	2.098	0.974	53
FOST2 : FUEL OIL SERVICE TANK 2	35-43	53.10	44.07	44.769	0.000	0.821	45
FOST2P : FUEL OIL SERVICE TANK 2P	35-45	48.17	39.98	46.376	-3.688	1.004	76
FOST2S : FUEL OIL SERVICE TANK 2S	35-45	48.17	39.98	46.376	3.688	1.004	76
FOST3 : FUEL OIL STORAGE TANK 3	49-55	40.25	33.41	59.912	0.000	0.806	33
FOST3P : FUEL OIL STORAGE TANK 3P	45-55	53.12	44.09	57.335	-3.772	0.978	86
FOST3S : FUEL OIL STORAGE TANK 3S	45-55	53.12	44.09	57.335	3.772	0.978	86
FOST4P : FUEL OIL STORAGE TANK 4P	55-65	68.31	56.70	68.631	-2.168	0.940	159
FOST4S : FUEL OIL STORAGE TANK 4S	55-65	68.31	56.70	68.631	2.168	0.940	159
FOST5P : FUEL OIL STORAGE TANK 5P	65-71	28.82	23.92	78.147	-1.559	0.988	42
FOST5S : FUEL OIL STORAGE TANK 5S	65-71	28.82	23.92	78.147	1.559	0.988	42
FOST6P : FUEL OIL STORAGE TANK 6P	71-73	4.49	3.73	82.644	-1.254	1.013	4
FOST6S : FUEL OIL STORAGE TANK 6S	71-73	4.49	3.73	82.644	1.254	1.013	4
FOVL1 : FUEL OVERFL TK 1	44-45	5.19	4.31	50.888	-0.995	0.808	1
FOVL2 : FUEL OVERFL TK 2	45-47	5.20	4.31	52.613	-0.996	0.807	1
Total		586.27	486.60	56.397	-0.018	0.951	

Category 3 - Lubricant Oil (SG = 0.900 tonnes/cu.m 100 % full)

Compartment	Frames	Volume (m ³)	Weight (t)	LCG (m)	TCG (m)	VCG (m)	FSM (m ⁴)
LLUBSUMP1 : LUBOIL SUMP TK 1	43-44	4.84	4.35	49.623	0.000	0.809	4
LUBSUMP2 : LUBOIL SUMP TK 2	47-47	4.16	3.75	53.820	0.000	0.806	3
LUBTKP : LUBOIL TANK P	47-49	7.29	6.56	55.373	0.997	0.805	1
LUBTKS : LUBOIL TANK S	47-49	7.29	6.56	55.373	-0.997	0.805	1
Total		23.58	21.23	53.919	0.000	0.806	

Category 4 - Fresh Water (SG = 1.000 tonnes/cu.m 100 % full)

Compartment	Frames	Volume (m ³)	Weight (t)	LCG (m)	TCG (m)	VCG (m)	FSM (m ⁴)
FWP : FRESH WATER P	26-31	26.18	26.18	33.307	-1.695	1.009	49
FWS : FRESH WATER S	26-31	26.18	26.18	33.307	1.695	1.009	49
Total		52.36	52.36	33.307	0.000	1.009	

Category 5 - Miscellaneous (SG = 1.000 tonnes/cu.m 100 % full)

Compartment	Frames	Volume (m ³)	Weight (t)	LCG (m)	TCG (m)	VCG (m)	FSM (m ⁴)
-------------	--------	-----------------------------	---------------	------------	------------	------------	--------------------------

Compartment	Frames	Volume (m ³)	Weight (t)	LCG (m)	TCG (m)	VCG (m)	FSM (m ⁴)
SLDGTK1 : SLUDGE TANK 1	44-45	5.19	5.19	50.888	0.995	0.808	1
SLDGTK2 : SLUDGE TANK 2	45-47	5.20	5.20	52.613	0.996	0.807	1
SLUBDR : STERN LUB OIL DRAIN	26-26	1.41	1.41	29.785	0.000	1.047	7
_CHNLCK1 : CHAIN LOCKER 1	100-106	28.18	28.18	116.592	0.000	10.720	12
_RPSTR : ROPE STORE	95-100	82.23	82.23	111.482	0.000	11.089	139
Total		122.20	122.20	106.643	0.085	10.014	

Category 10 - Aviation Fuel (SG = 0.810 tonnes/cu.m 100 % full)

Compartment	Frames	Volume (m ³)	Weight (t)	LCG (m)	TCG (m)	VCG (m)	FSM (m ⁴)
JP5SERV : JP5 SERVICE TANK	11-18	11.36	9.20	16.387	0.000	4.200	37
JP5SERVP : JP5 SERVICE TANK P	11-18	14.40	11.66	16.660	-3.487	4.071	24
JP5SERVS : JP5 SERVICE TANK S	11-18	14.40	11.66	16.660	3.487	4.071	24
JP5SET : JP5 SETTling TANK	11-18	8.52	6.90	16.387	0.000	3.850	37
Total		48.68	39.43	16.549	0.000	4.062	

Ως πυκνότητες αναφοράς λαμβάνονται οι καθοριζόμενες στο [17].

4.6 Καταστάσεις Φόρτωσης

Οι καταστάσεις φόρτωσης στις οποίες οφείλει να μελετηθεί το υπό σχεδίαση πλοίο, εξαρτώνται από το κανονιστικό πλαίσιο που εφαρμόζεται και τις σχετικές με αυτό απαιτήσεις. Στα πλαίσια της παρούσας αξιοποιούνται οι κανονισμοί, μεταξύ των οποίων διαφοροποιούνται οι καταστάσεις φόρτωσης του πλοίου στα πλαίσια συμμόρφωσης με τις απαιτήσεις. Έτσι:

- Σύμφωνα με τις προβλέψεις της DDS-079 [50], η ευστάθεια του πλοίου θα πρέπει να εξετασθεί στις καταστάσεις Full Load και Minimum Operating Condition (MINOP), για πλοία χωρίς πλευρικά τοιχώματα. Οι απαιτήσεις φόρτωσης των δεξαμενών στην κατάσταση MINOP καθορίζονται στον Πίνακα 26, όπου παρουσιάζεται ότι το πλοίο μελετάται σε κατάσταση μερικής φόρτωσης.

- Σύμφωνα με τις προβλέψεις του κανονισμού [17], η ευστάθεια του πλοίου θα πρέπει να εξετασθεί τουλάχιστον στις ακόλουθες καταστάσεις :

- *Case 0: Light Ship Displacement*, στην οποία πέρα από το βάρος του άφορτου σκάφους λαμβάνονται υπόψη το construction/ageing margin καθώς και το βάρος του πληρώματος.

- *Case 1: Limit Displacement*, η οποία αποτελεί την δυσμενέστερη κατάσταση, βασίζεται στην Case 0, απαιτεί επαρκή ευστάθεια στα φορτία ανέμου και επιτρέπει την μερική πλήρωση των δεξαμενών έρματος.
- *Case 1A: Limit Displacement End of Life*, η οποία αποτελεί την ίδια κατάσταση με την Case 1 αλλά με την προσθήκη construction/ageing margin.
- *Case 2: Combat Displacement*, η οποία αντιστοιχεί στην κατάσταση πλήρους φόρτωσης, δίχως έρμα.
- *Case 2A: Combat Displacement End of Life*, η οποία είναι ίδια με την Case 2 με την προσθήκη ageing margin.
- *Case 5: Special Combat Displacement*, η οποία βασίζεται στην Case 2 & 4 με την δυνατότητα μη πλήρους πλήρωσης των δεξαμενών, αλλά σε ποσοστό μεγαλύτερο του 10% (λαμβάνει υπόψη τα ελάχιστα του Case 4/4A) και σε τέτοιο βαθμό ώστε να παρέχεται επαρκής ευστάθεια. Σημειώνεται ότι οι προβλέψεις αυτού του Loading Case ομοιάζουν με αυτές του MINOP Case της [50].
- *Case 5A: Special Combat Displacement End of Life*, η οποία βασίζεται στην Case 5 με προσθήκη ageing margin.
- *Case 6: Maximum Displacement*, η οποία βασίζεται στην Case 2 με πρόσθετη αύξηση του εκτοπίσματος κατά 2%.

Στην περίπτωση που απαιτείται μελέτη ευστάθειας σε συνθήκες πάγου, οι σχετικές καταστάσεις φόρτωσης θα πρέπει να εξετασθούν με πρόσθετο φορτίο από τον σχηματισμό πάγου στις ελεύθερες (οριζόντιες) επιφάνειες του πλοίου και σε ύψος εμφάνισης και σχηματισμού πάγου έως 20m, πάνω από την ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας [17]. Ο τρόπος με τον οποίο ο σχηματισμός πάγου λαμβάνεται ως πρόσθετο φορτίο, διαφοροποιείται μεταξύ των κανονισμών και :

- Σύμφωνα με το πλαίσιο του [17], ο σχηματισμός πάγου λαμβάνεται υπόψη ως πρόσθετη δύναμη που ποικίλει ανάλογα με την επιφάνεια που καλύπτεται, με φόρτιση από $0,1 \text{ kts/m}^2$ έως 1 kN/m^2 .
- Σύμφωνα με το πλαίσιο του [46], ο πάγος θεωρείται ότι καλύπτει τις οριζόντιες επιφάνειες (decks, platforms, roofs) με πάχος 150mm σε όλη την επιφάνεια, με πυκνότητα πάγου 950 kg/m^3 . Το κέντρο βάρους του πάγου θεωρείται στην εκάστοτε θέση της σχηματιζόμενης επιφάνειας και λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς του μοχλοβραχίονα ευστάθειας. Η επίδραση των ανέμων (wind heeling) στους υπολογισμούς

ευστάθειας, λαμβάνει υπόψη μόνο το βάρος του πάγου και όχι τις αυξήσεις των μετωπικών επιφανειών, λόγω του σχηματιζόμενου πάγου.

Load cases →	θ	θV	1/1A/1E/ 1AE	2/2A/2E/ 2AE	3	4/4A/ 4AE	5/5A/ 5AE	6/6E
	Light Ship Displ.	Warping Displace- ment	Limit Displace- ment	Combat Displace- ment	Medium Displace- ment	Special Limit Displ.	Special Combat Displ.	Maxi- mum Displ.
Loads ↓	All values are percentages of the specific max. possible load [%]							
Empty Ship with mach. systems filled	100	100	100	100	100	100	100	100
Crew with personal effects	100	100	100	100	100	100	100	100
Consumables/ provisions	-	-	50/33	100	50	50/33	100	100
Fresh water	-	-	10/50 ¹	100	50	10/50 ¹	100	100
Waste water	-	-	50	-	50	50	-	-
Ship fuel	-	²	10	100	50	≥ 10	100	100
Aircraft fuel	-	-	10	100	-	≥ 10	100	100
Lubrications	-	-	50	100	100	50	100	100
Fire exting. foams	-	-	100	100	100	100	100	100
Ammunition	-	-	33	100	-	33	100	100
Aircraft (stowed)	-	-	100	100	-	100	100	100
Special loads	-	-	-	-	-	100	100	100
Supplies/ transports	-	-	-	100	3	3	100	100
Ballast water	-	²	²	³	²	²	²	²
¹ 50 % of freshwater if 30 l/day/crew member can be produced ² as far as necessary for stability ³ supply goods and liquids according to the most unfavourable load condition								

Εικόνα 36: Καταστάσεις φόρτωσης συμφ. Germanischer Loyds [17]

Η έννοια του construction/ageing margin που αναφέρεται στους κανονισμούς, αναλύεται στην παρ. 2.6, ενώ οι σχετικές προβλέψεις παρατίθενται στα [17] και [46]. Στο πλαίσιο της παρούσας θα μελετηθούν οι καταστάσεις φόρτωσης του κανονισμού [17], λαμβάνοντας υπόψη τα κριτήρια ευστάθειας του κανονισμού [46] (πλέον αυστηρά). Σημειώνεται ότι ο κανονισμός [46] δεν περιλαμβάνει καταστάσεις φόρτωσης, πλην όμως παραπέμπει στον κανονισμό [48] για τις καταστάσεις φόρτωσης, η αντιστοιχία των οποίων είναι η ακόλουθη:

Πίνακας 36: Αντιστοιχία Καταστάσεων Φόρτωσης

Case 0	Light Ship Condition
Case 1	Light Harbor Condition
Case 2	Deep Condition
Case 5	Light Seagoing Condition
Case 6	-

5. Ευστάθεια και Κανονισμοί

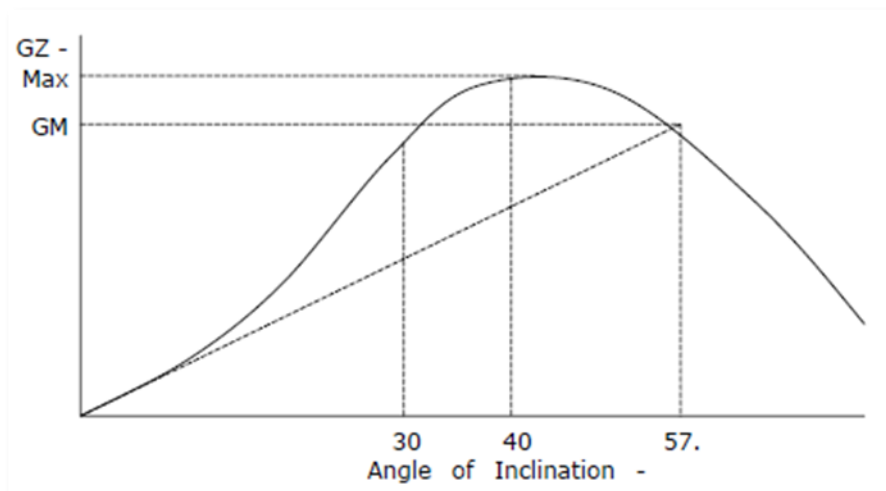
5.1 Κριτήρια Ευστάθειας Άθικτου Πλοίου

Για την ευστάθεια του άθικτου πλοίου, μελετήθηκαν και αξιολογήθηκαν οι ακόλουθοι κανονισμοί:

- UK MOD, Defense Standard 00-900 Part 4, Safety and Environmental Protection - Ship, May 15, 2014.
- US NAVY, Stability and Buoyancy of US Naval Surface Ships, Design Data Sheet 079-1, Apr 29, 2002.
- Germanischer Lloyds, Rules for classification and construction III, Part 1, 2012.

Από τα παραπάνω πρότυπα επιλέχθηκε το πλέον πρόσφατο και αυστηρό πρότυπο, από απόψεως προβλέψεων, το οποίο είναι το UK Defense Standard 00-900 Part 4 και υπερκαλύπτει τις προβλέψεις των άλλων δύο προτύπων. Σκοπός των παραπάνω κριτηρίων είναι ο έλεγχος της ευστάθειας του πλοίου στο ήρεμο νερό, υπό την επίδραση περιβάλλοντος ανέμου (wind beams), ελιγκτικών κινήσεων (high speed turning) και σώρευσης επιβατών στην μία πλευρά του πλοίου (passenger crowding on one side). Επισημαίνεται ότι τα πρότυπα εξετάζουν και άλλα κριτήρια (π.χ. Heavy weight lift, bollard pull, κ.α.) τα οποία δεν είναι συναφή με τον συγκεκριμένο τύπο πολεμικού πλοίου και ως εκ τούτου αγνοούνται.

Σύμφωνα με το πρότυπο, τα κριτήρια ευστάθειας άθικτου πλοίου είναι τα εξής:



Εικόνα 37: Κριτήρια Μοχλοβραχίονα Ευστάθειας

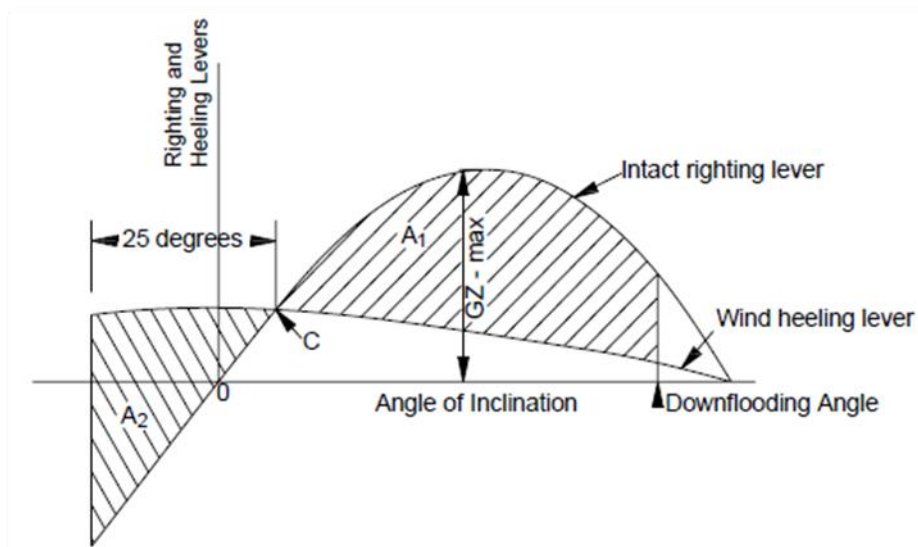
5.1.1 Μοχλοβραχίονας Ευστάθειας

Η καμπύλη του μοχλοβραχίονα ευστάθειας θα πρέπει να πληρεί τα ακόλουθα κριτήρια:

Πίνακας 37: Κριτήρια Μοχλοβραχίονα Ευστάθειας

Κριτήριο	Τιμή
Επιφάνεια κάτωθεν του GZ έως 30°	>0.08 mrad
Επιφάνεια κάτωθεν του GZ έως 40°	>0.133mrad
Επιφάνεια κάτωθεν του GZ μεταξύ 30° έως 40°	>0.048 mrad
Μέγιστο GZ	>0.3m
Γωνία στο μέγιστο GZ	>30°
GM Fluid	>0.3m
Γωνία απόλειας ευστάθειας	Μεγαλύτερη δυνατή, περιοριζόμενη από τη γωνία downflooding

Επισημαίνεται ότι σύμφωνα με το πρότυπο, απαιτείται η μελέτη ευστάθειας μέχρι την γωνία κλίσεως των 70°.



Εικόνα 38: Κριτήρια ευστάθειας σε ανέμους πορείας

5.1.2 Ευστάθεια σε Ανέμους Πορείας

Σύμφωνα με το πρότυπο, θα πρέπει στις καταστάσεις φόρτωσης να εξετασθεί η επίδραση των ανέμων πορείας στην εγκάρσια κλίση. Η μελέτη θα πρέπει να ληφθεί μέχρι την γωνία rollback των 25° (από το σημείο τομής του righting/heeling lever), η δε ταχύτητα ανέμου που λαμβάνεται υπόψη για πλοία που πλέον σε ανοικτή θάλασσα είναι 90 kts

(ένταση 12 σε κλίμακα beaufort). Τα κριτήρια ευστάθειας που θα πρέπει υπό την επίδραση του εν λόγω ανέμου να πληρούνται από το πλοίο, είναι:

Πίνακας 38: Κριτήρια ευστάθειας σε Ανέμους Πορείας

Κριτήριο	Τιμή
Γωνία κλίσης λόγω ανέμων	<30°
Μοχλοβραχίονας GZ στο σημείο C	<60% Max GZ
Επιφάνεια A1	>1.4 Επιφάνειας A2

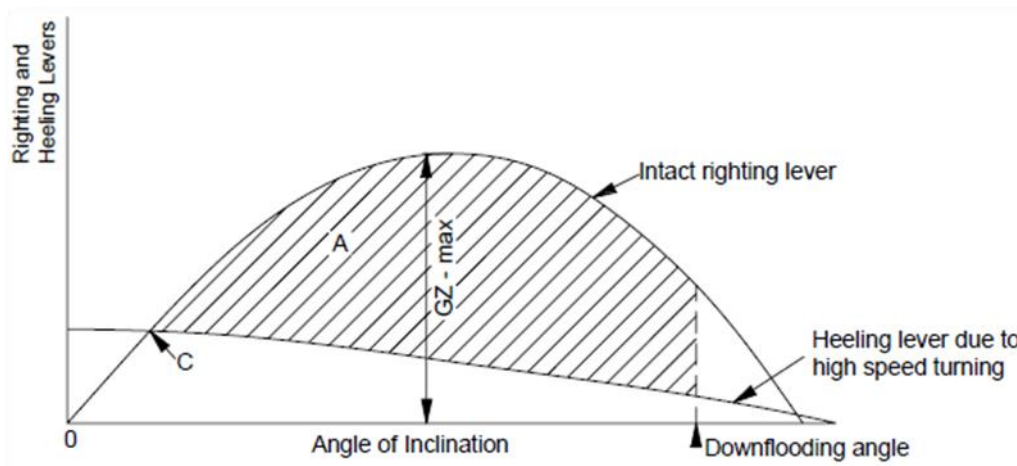
Επισημαίνεται ότι η αντίστοιχη μελέτη και υπολογισμός των wind heeling arms του προτύπου [50] πραγματοποιείται στη δυσμενέστερη ταχύτητα ανέμου των 100 Kts (κυκλώνας), η οποία και λαμβάνεται υπόψη στην παρούσα για λόγους δυσμενέστερης ανάλυσης.

Σύμφωνα με το πρότυπο [46] και [48], ο μοχλοβραχίονας κλίσης λόγω ανέμου, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$HA_{wind} = 0.004 \frac{V^2 AL \cos^2 \theta}{2240 \Delta}$$

Όπου:

- A η προβεβλημένη επιφάνεια του πλοίου στην κατεύθυνση του ανέμου.
- L μοχλοβραχίονας από το ήμισυ του βυθίσματος έως το κέντρο της επιφάνειας του πλοίου στον άνεμο.
- V η ονομαστική ταχύτητα του ανέμου.
- θ η γωνία κλίσης.
- Δ το εκτόπισμα του πλοίου.



Εικόνα 39: Κριτήρια ευστάθειας σε στροφή με υψηλή ταχύτητα

Η αναλυτική διαδικασία υπολογισμού της ροπής λόγω ανέμου περιγράφεται στο [48] και στην παρούσα, ως ύψος ονομαστικής ταχύτητας λήφθηκε αυτό των 10m, σύμφωνα με το πρότυπο.

5.1.3 Ευστάθεια σε Στροφή με Υψηλή Ταχύτητα

Σύμφωνα με το πρότυπο, θα πρέπει στις καταστάσεις φόρτωσης να εξετασθεί η επίδραση της στροφής με μεγάλη ταχύτητα στην εγκάρσια κλίση. Η εξέταση θα πρέπει να γίνει στο 65% της μέγιστης ταχύτητας μάχης (στην περίπτωση μας στα 20 Kts), λαμβάνοντας υπόψη ένα κύκλο στροφής ο οποίος σύμφωνα με το πρότυπο, για τον τύπο του υπό σχεδίαση πλοίου λαμβάνεται ίσος με $2.5L_{bp}=287.5m$.

Τα κριτήρια ευστάθειας που θα πρέπει κατά τη στροφή να πληρούνται από το πλοίο, είναι:

Πίνακας 39: Κριτήρια ευστάθειας σε στροφή με υψηλή ταχύτητα

Κριτήριο	Τιμή
Γωνία κλίσης λόγω στροφής	<20°
Μοχλοβραχίονας GZ στο σημείο C	<60% Max GZ
Επιφάνεια A	>40% Επιφάνειας κάτω από την καμπύλη GZ

Στην περίπτωση αυτή ο μοχλοβραχίονας κλίσης λόγω της στροφής υπολογίζεται με βάση τον τύπο:

$$HA_{turn} = \frac{V^2 h \cos\theta}{Rg}$$

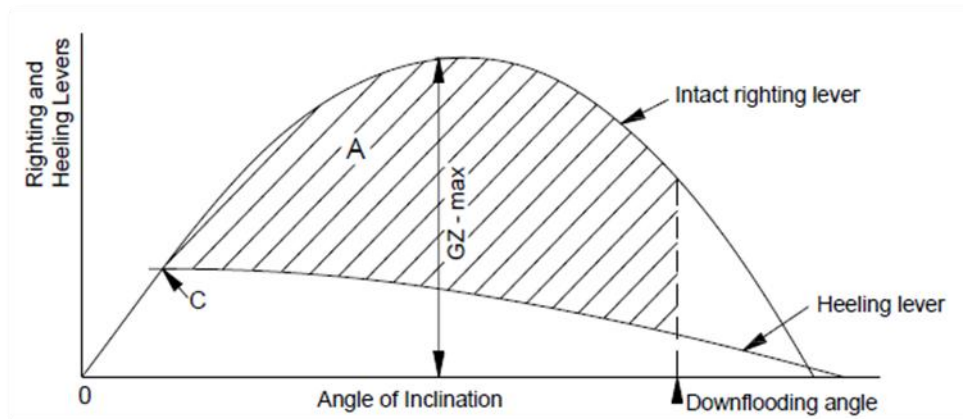
Όπου:

- h η κάθετη απόσταση του VCG από το ήμισυ του βυθίσματος (στην περίπτωση μας $6.8-4.95/2=4.325\text{m}$).

- V το 65% της ταχύτητας μάχης.

- θ η γωνία κλίσης.

- R η γωνία στροφής με το rudder σε ακραία θέση (hardover), στην περίπτωση μας 287.5m.



Εικόνα 40: Ευστάθεια σε σώρευση επιβατών, σε μια πλευρά

5.1.4 Ευστάθεια σε Σώρευση Επιβατών στην μία Πλευρά

Η σώρευση επιβατών στην μια πλευρά του πλοίου μπορεί να έχει αρνητικές επιδράσεις στην ευστάθεια του πλοίου στο ήρεμο νερό. Αν και εκ πρώτης όψεως τα κριτήρια δεν φαίνεται να αφορούν στη συγκεκριμένη κατηγορία πλοίου, εντούτοις αναλόγως των επιχειρησιακών καταστάσεων είναι δυνατή η σώρευση επιβατών σε μία πλευρά και ως εκ τούτου εξετάζεται στην παρούσα.

Τα κριτήρια ευστάθειας που θα πρέπει κατά τη στροφή να πληρούνται από το πλοίο, είναι:

Πίνακας 40: Κριτήρια ευστάθειας σε σώρευση επιβατών

Κριτήριο	Τιμή
Γωνία κλίσης	<10°
Μοχλοβραχίονας GZ στο σημείο C	<60% Max GZ
Επιφάνεια A	>40% Επιφάνειας κάτω από την καμπύλη GZ

Στην περίπτωση αυτή ο μοχλοβραχίονας κλίσης λόγω σώρευσης επιβατών υπολογίζεται με βάση τον τύπο:

$$HA_{turn} = \frac{wac\cos\theta}{\Delta}$$

Όπου:

- w το βάρος των επιβατών (80kg έκαστος).
- a η μέγιστη απόσταση από την centerline (λαμβάνεται ίση με B/2=8.23m).
- Δ το εκτόπισμα.
- θ η γωνία κλίσης.

Ο αριθμός επιβατών λαμβάνεται ίσος με τον αριθμό των μελών πληρώματος και ως εκ τούτου ίσος με 10t.

5.2 Κριτήρια Ευστάθειας μετά από Βλάβη

Η ευστάθεια μετά από βλάβη βασίζεται σε πρότυπα και κανονισμούς οι οποίοι έχουν προκύψει και θεσμοθετηθεί μετά από σειρά ατυχημάτων, ορισμένα από τα οποία είχαν δυσμενείς συνέπειες στην επιβιωσιμότητα των πλοίων. Μια βλάβη, αναλόγως της έκτασης και της θέσης της, μπορεί να οδηγήσει στην απώλεια πλευστότητας λόγω διαγωγής και άρα στη βύθιση του πλοίου, είτε στην κλίση του πλοίου και στην ανατροπή του.

Η σχεδίαση του πλοίου λαμβάνει υπόψη τέτοια ενδεχόμενα μέσω της διάταξης των decks αλλά και των υδατοστεγών εγκαρσίων φρακτών, με απώτερο σκοπό τον περιορισμό της βλάβης σε συγκεκριμένες περιοχές του πλοίου και την διαχείριση της απωλεσθείσας πλευστότητας και της επιβίωσης του πλοίου. Η ανάλυση ευστάθειας μετά από βλάβη, σε

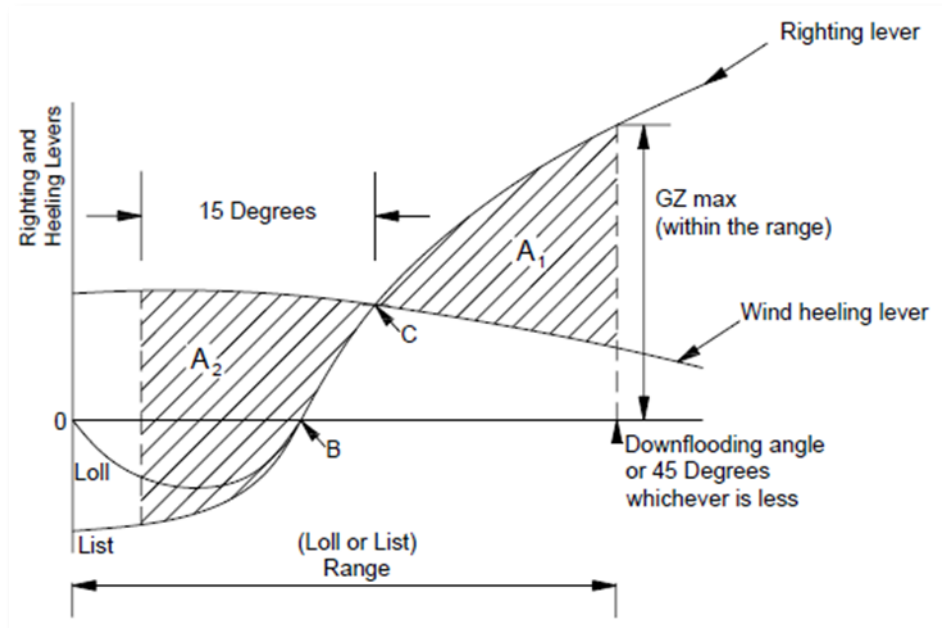
συνδυασμό με την καμπύλη κατακλύσιμων μηκών, αποσκοπεί στην εξέταση και επίδειξη της επιβιωσιμότητας του πλοίου μετά από βλάβη.

Ο υπολογισμός της ευστάθειας μετά από βλάβη βασίζεται στον καθορισμό ενός ανωτάτου επιπέδου βύθισης το οποίο καθορίζεται από την γραμμή ορίου βύθισης (margin line), η οποία ορίζεται από το κατάστρωμα στο οποίο καταλήγουν οι εγκάρσιες υδατοστεγείς φρακτές και το μέγιστο συνεχές κατάστρωμα εξάλων (freeboard). Η κάθε βλάβη οδηγεί σε απώλεια άντωσης ίση με την άντωση που παρέχει η κατακλισηθείσα επιφάνεια της γάστρας, καθόσον ο περικλειόμενος όγκος κατακλύζεται από νερό, μειώνοντας και το εκτόπισμα του πλοίου. Ως συνέπεια, λόγω της απολεσθείσας άντωσης, το πλοίο βυθίζεται και η ίσαλος γραμμής ανέρχεται προς τα ανώτερα καταστρώματα. Επαρκής σχεδίαση θεωρείται αυτή που, σε κάθε σενάριο βλάβης κατά μήκος της πλευρικής επιφάνειας της γάστρας, συγκεκριμένου μεγίστου μήκους που καθορίζεται από τους κανονισμούς, δεν οδηγεί στη βύθιση της γραμμής του ορίου βύθισης.

Στα πλαίσια της παρούσας εξετάστηκαν και αξιολογήθηκαν τα κριτήρια ευστάθειας μετά από βλάβη που παρέχονται από τους κανονισμούς:

- UK MOD, Defense Standard 00-900 Part 4, Safety and Environmental Protection - Ship, May 15, 2014.
- US NAVY, Stability and Buoyancy of US Naval Surface Ships, Design Data Sheet 079-1, Apr 29, 2002.
- Germanischer Lloyds, Rules for classification and construction III, Part 1, 2012.

Και υιοθετήθηκαν τα κριτήρια της UK Defense Standard 00-900 Part 4, ως τα πλέον πρόσφατα και αυστηρά.



Εικόνα 41: Κριτήρια ευστάθειας μετά από βλάβη

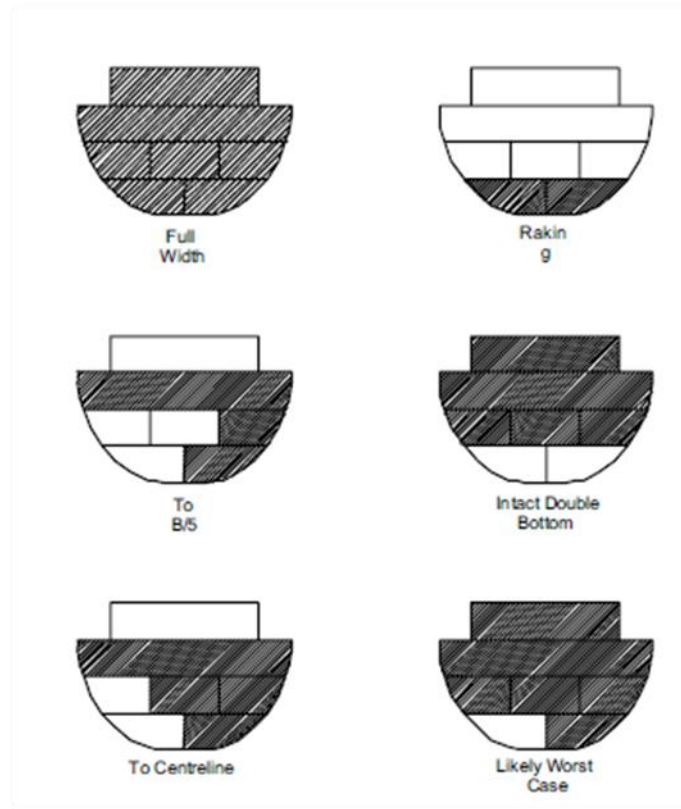
5.2.1 Έκταση Βλάβης

Ανάλογα με τους κανονισμούς που υιοθετούνται, διαφοροποιείται το μέγεθος της βλάβης που λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς, το οποίο εμμέσως πλην σαφώς καθορίζει και την οριζόντια απόσταση μεταξύ των εγκαρσίων φρακτών ώστε αφενός να εξασφαλίζεται η επιβιωσιμότητα και αφετέρου η εργονομία του πλοίου, αφού με κατάλληλη διάταξη ελαχιστοποιείται ο αριθμός των εγκαρσίων φρακτών (σε συνδυασμό με την εξασφάλιση της απαιτούμενης αντοχής).

Ο κανονισμός [46] καθορίζει ως οριζόντιο μήκος βλάβης, για την κατηγορία του υπό σχεδίαση πλοίου, τα 21m, ανεξάρτητα εάν χρησιμοποιείται πρότυπο βλάβης σε ένα ή δύο διαμερίσματα. Σημειώνεται ότι στα πλαίσια της παρούσας χρησιμοποιείται πρότυπο βλάβης δύο διαμερισμάτων (2 compartment standard). Σε ότι αφορά στο εγκάρσιο και στο κάθετο μέγεθος της βλάβης, σύμφωνα με τα πρότυπα [46] και [48], θα πρέπει να εξετάζονται ως εξής:

- Η βλάβη θεωρείται ότι εκτείνεται στον κάθετο (vertical) άξονα μέχρι το τελευταίο συνεχές deck του πλοίου (main deck).
- Σε ότι αφορά στην εγκάρσια βλάβη, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η χειρότερη περίπτωση, η οποία στις περισσότερες φορές είναι η έκταση της βλάβης σε

απόσταση B/5 από το πλευρικό τοίχωμα, εκτός και αν μικρότερο εγκάρσιο μήκος μπορεί να παράγει δυσμενέστερη εγκάρσια κλίση. Συχνά η δυσμενέστερη περίπτωση παράγεται στην περίπτωση εγκάρσιας έκτασης βλάβης μήκους B/5 σε συνδυασμό με άδειες δεξαμενές καυσίμου στον διπλό πυθμένα, στην ακριβώς απέναντι πλευρά.



Εικόνα 42: Εγκάρσια βλάβη και δυσμενέστερη περίπτωση

5.2.2 Ταχύτητα Ανέμου

Η ευστάθεια του πλοίου μετά από βλάβη εξετάζεται υπό την επίδραση ανέμου. Για νέες σχεδιάσεις στην περιοχή των 1000-5000t, η ταχύτητα του ανέμου υπολογίζεται με βάση τη σχέση:

$$V_{wind} = 5.06 \ln(\Delta) - 10$$

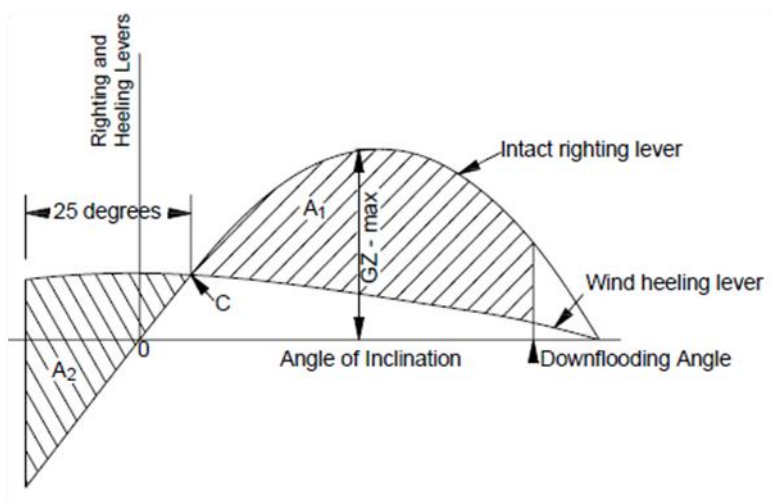
από όπου προκύπτει ότι η ευστάθεια θα πρέπει να εξετασθεί σε ταχύτητα ανέμου ίση με $V_{wind}=32.61Kts$.

5.2.3 Κριτήρια

Τα κριτήρια που καθορίζονται στον κανονισμό και οφείλει το πλοίο να πληρεί σε κατάσταση βλάβης, είναι:

Πίνακας 41: Κριτήρια ευστάθειας μετά από βλάβη

Κριτήριο	Τιμή
Γωνία κλίσης στο B	$<20^\circ$
Μοχλοβραχίονας GZ στο σημείο C	$<60\% \text{ Max GZ}$
Επιφάνεια A1	$\geq A_{min} = 2.74 \times 10^{-2} - 1.97 \times 10^{-6} \Delta = 0,01845$



Εικόνα 43: Κριτήρια ευστάθειας σε πάγο

5.3 Κριτήρια Ευστάθειας σε Πάγο

Συχνά τα πλοία της κατηγορίας του πλοίου υπό σχεδίαση καλούνται να λειτουργούν υπό συνθήκες πάγου. Σύμφωνα με τον κανονισμό [46], θα πρέπει το πλοίο να είναι ικανό να λειτουργήσει υπό συνθήκες πάγου, στις διάφορες καταστάσεις φόρτωσης. Στην περίπτωση αυτή, οι κανονισμοί θεωρούν ότι το πλοίο λειτουργεί υπό την ταυτόχρονη επίδραση πάγου και ανέμου. Για τον υπολογισμό της επίδρασης του πάγου, λαμβάνονται υπόψη τα καθοριζόμενα στην παρ. 4.6, στην οποία περιγράφονται οι σχετικές προβλέψεις. Η ονομαστική ταχύτητα ανέμου για τους υπολογισμούς ευστάθειας λαμβάνεται ίση με το 70% της ταχύτητας που λήφθηκε κατά την μελέτη ευστάθειας άθικτου πλοίου, δηλαδή 70 kts.

Τα κριτήρια που καθορίζονται από τους κανονισμούς, είναι:

Πίνακας 42: Κριτήρια ευστάθειας σε πάγο

Κριτήριο	Τιμή
Επιφάνεια κάτωθεν του GZ έως 30°	>0.051 mrad
Επιφάνεια κάτωθεν του GZ έως 40°	>0.085 mrad
Επιφάνεια κάτωθεν του GZ μεταξύ 30° έως 40°	>0.03 mrad
Μέγιστο GZ	>0.24m
Γωνία στο μέγιστο GZ	>30°
GMFluid	>0.15m
Γωνία κλίσης λόγω ανέμου	<30°
Μοχλοβραχίονας GZ στο σημείο C	<60% Max GZ
Επιφάνεια A1	>1.4 A2

Στην υπό μελέτη περίπτωση, μετρήθηκε η συνολική επιφάνεια την οποία καταλαμβάνει ο πάγος, η θέση και το βάρος του, που είναι:

- Στο Main Deck, συγκεντρώνεται πάγος συνολικού βάρους 193.5t, VCG=56.4m, LCG= 9.9m.
- Στο 2nd Floor, συγκεντρώνεται πάγος συνολικού βάρους 115t, VCG= 56.4m, LCG= 14.71m.

5.4 Επιφάνειες και Μοχλοβραχίονες Ροπής Ανέμου

Για την μελέτη ευστάθειας του πλοίου και για την εξέταση της ικανοποίησης των κριτηρίων που αφορούν στην επίδραση της ροπής του ανέμου, καθορίστηκε το προφίλ του πλοίου στο άνεμο, τα προστατευόμενα και μη προστατευόμενα ανοίγματα (για να υπολογισθούν τα όρια του down-flooding) και υπολογίσθηκαν οι σχετικοί μοχλοβραχίονες, για επιφάνειες από 4.5m έως το ύψος των υπερκατασκευών. Λαμβάνοντας υπόψη ότι πρόκειται για σχεδίαση με χαρακτηριστικά Stealth, ως προστατευόμενα ανοίγματα λήφθηκαν αυτά που ασφαλίζουν υδατοστεγώς (π.χ. η ράμπα του mission bay και οι θυρίδες των vertical missile launchers) και ως μη προστατευόμενα ανοίγματα όσα δεν διαθέτουν τέτοια δυνατότητα (π.χ. Torpedo Launchers, Fan Room, Mission Bay Openings). Ως προστατευόμενα ανοίγματα λήφθηκαν υπόψη τα:

Protected Openings

#	x	y	z	Compartment	X-ray
---	---	---	---	-------------	-------

	(m)	(m)	(m)	ID	
0	0.00	3.70	5.90	Mission Bay Ramp	Closed
1	78.00	2.20	9.83	Ver. Launcher P	Closed
2	78.00	-2.20	9.83	Ver. Launcher S	Closed
3	20.12	-3.00	9.83	Heli Hangar S	Closed
4	20.12	3.00	9.83	Heli Hangar P	Closed

Ενώ ως μη προστατευόμενα ανοίγματα, λήφθηκαν υπόψη τα

Unprotected Openings

#	x (m)	y (m)	z (m)	Compartment ID	X-ray
0	21.07	5.20	13.20	Fan Room P	Open
1	21.07	-5.20	13.20	Fan Room S	Open
2	66.17	4.25	15.87	Wheel House P	Open
3	58.00	-5.00	15.93	Radar EQ P	Open
4	58.00	5.00	15.93	Radar EQ S	Open
5	2.00	-4.00	9.80	Mission Bay Opening	Open
6	38.10	5.20	13.40	Torpedo Launcher P	Open
7	38.10	-5.20	13.40	Torpedo Launcher S	Open
8	66.17	-4.25	15.87	Wheel House S	Open

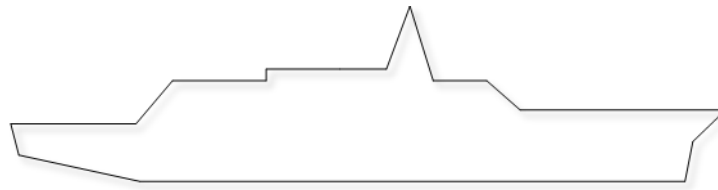
Τα δεδομένα του προφίλ της γάστρας, είναι:

Profile Points

#	x (m)	z (m)	#	x (m)	Z (m)	#	x (m)	z (m)	#	x (m)	z (m)
0	-1.40	9.83	5	121.60	12.23	10	63.25	19.23	15	20.13	9.83
1	0.00	4.50	6	86.25	12.23	11	55.20	19.23	16	0.00	9.83
2	20.80	0.00	7	80.50	17.23	12	42.55	19.23	17	-1.40	9.83
3	114.61	0.00	8	71.30	17.23	13	42.55	17.23			
4	115.96	6.82	9	67.28	30.00	14	26.44	17.23			

Και προκύπτει το ακόλουθο προφίλ επιφανείας στον άνεμο:

WindProfile



Οι μοχλοβραχίονες για τον υπολογισμό της ροπής του ανέμου, είναι:

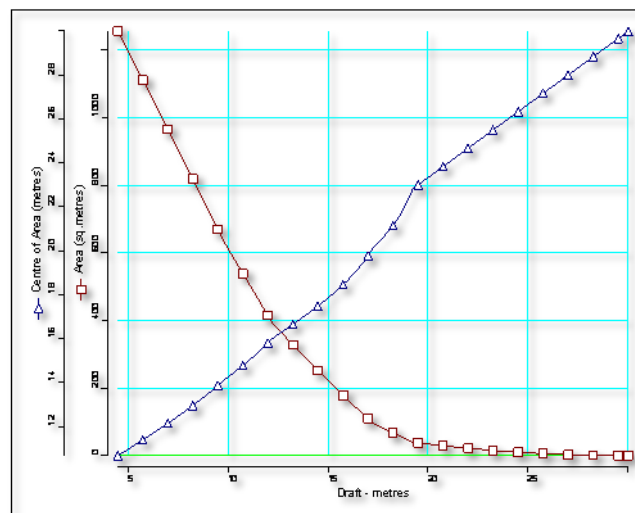
Windage Areas and Windage Arm Calculations

Draft (m)	Under Waterline Area (m ²)	Under Waterline KG1 (m)	Above Waterline Area (m ²)	Above Waterline KG2 (m)	Height KG2-KG1 (m)	Area Ratio
4.50	470.949	2.328	1256.221	10.668	8.340	2.667
4.75	499.839	2.461	1227.331	10.810	8.350	2.455
5.00	528.757	2.593	1198.413	10.953	8.361	2.266
5.25	557.704	2.724	1169.465	11.098	8.374	2.097
5.50	586.680	2.855	1140.489	11.243	8.388	1.944
5.75	615.685	2.985	1111.485	11.390	8.404	1.805
6.00	644.719	3.116	1082.451	11.538	8.422	1.679
6.25	673.781	3.245	1053.389	11.687	8.442	1.563
6.50	702.872	3.375	1024.298	11.838	8.463	1.457
6.75	731.992	3.504	995.178	11.990	8.486	1.360
7.00	761.154	3.633	966.016	12.145	8.511	1.269
7.25	790.396	3.763	936.774	12.301	8.539	1.185
7.50	819.720	3.892	907.450	12.461	8.569	1.107
7.75	849.125	4.021	878.045	12.623	8.602	1.034
8.00	878.611	4.150	848.559	12.788	8.637	0.966
8.25	908.179	4.280	818.990	12.956	8.676	0.902
8.50	937.829	4.409	789.341	13.128	8.719	0.842
8.75	967.560	4.539	759.609	13.304	8.765	0.785
9.00	997.373	4.668	729.797	13.485	8.817	0.732
9.25	1027.268	4.798	699.902	13.671	8.873	0.681
9.50	1057.244	4.928	669.926	13.864	8.936	0.634
9.75	1087.301	5.058	639.868	14.063	9.005	0.588
10.00	1113.764	5.172	613.406	14.244	9.072	0.551
10.25	1138.520	5.280	588.650	14.417	9.137	0.517
10.50	1163.288	5.388	563.882	14.594	9.206	0.485
10.75	1188.068	5.497	539.102	14.777	9.279	0.454
11.00	1212.859	5.607	514.310	14.965	9.357	0.424
11.25	1237.663	5.718	489.507	15.159	9.441	0.396
11.50	1262.478	5.829	464.692	15.362	9.532	0.368
11.75	1287.305	5.941	439.864	15.572	9.631	0.342
12.00	1312.144	6.053	415.025	15.794	9.740	0.316
12.25	1336.288	6.163	390.882	16.020	9.858	0.293
12.50	1352.234	6.236	374.936	16.176	9.939	0.277
12.75	1368.054	6.310	359.116	16.332	10.022	0.263

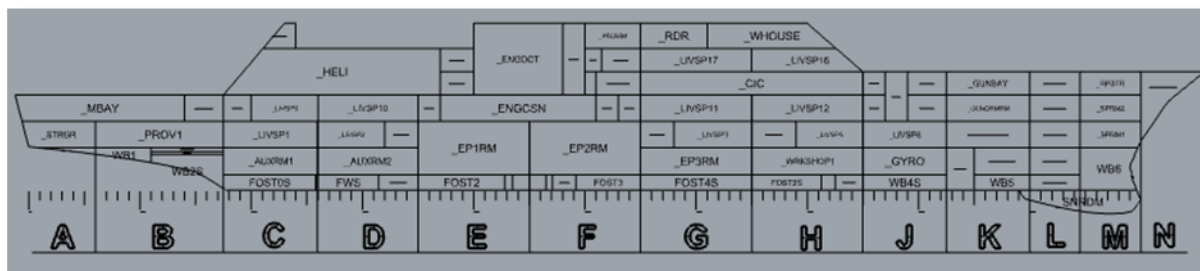
Draft (m)	Under Waterline Area (m ²)	Under Waterline KG1 (m)	Above Waterline Area (m ²)	Above Waterline KG2 (m)	Height KG2-KG1 (m)	Area Ratio
13.00	1383.750	6.385	343.420	16.490	10.105	0.248
13.25	1399.320	6.460	327.850	16.650	10.190	0.234
13.50	1414.765	6.535	312.405	16.812	10.277	0.221
13.75	1430.085	6.611	297.085	16.976	10.365	0.208
14.00	1445.280	6.687	281.890	17.143	10.456	0.195
14.25	1460.349	6.764	266.820	17.314	10.550	0.183
14.50	1475.294	6.841	251.876	17.488	10.647	0.171
14.75	1490.113	6.919	237.057	17.667	10.748	0.159
15.00	1504.807	6.996	222.363	17.852	10.855	0.148
15.25	1519.376	7.074	207.794	18.043	10.969	0.137
15.50	1533.820	7.152	193.350	18.242	11.090	0.126
15.75	1548.138	7.231	179.031	18.451	11.221	0.116
16.00	1562.332	7.309	164.838	18.673	11.364	0.106
16.25	1576.400	7.388	150.770	18.911	11.523	0.096
16.50	1590.343	7.467	136.827	19.169	11.703	0.086
16.75	1604.161	7.546	123.009	19.455	11.910	0.077
17.00	1617.854	7.625	109.316	19.779	12.154	0.068
17.25	1630.915	7.701	96.254	20.139	12.439	0.059
17.50	1638.092	7.743	89.078	20.362	12.619	0.054
17.75	1645.248	7.786	81.922	20.601	12.815	0.050
18.00	1652.385	7.830	74.785	20.861	13.032	0.045
18.25	1659.502	7.874	67.668	21.149	13.275	0.041
18.50	1666.599	7.918	60.571	21.474	13.556	0.036
18.75	1673.677	7.964	53.493	21.851	13.887	0.032
19.00	1680.735	8.010	46.435	22.303	14.294	0.028
19.25	1687.359	8.053	39.811	22.833	14.780	0.024
19.50	1689.189	8.065	37.980	23.000	14.935	0.022
19.75	1690.976	8.078	36.193	23.167	15.089	0.021
20.00	1692.720	8.090	34.449	23.333	15.244	0.020
20.25	1694.421	8.102	32.748	23.500	15.398	0.019
20.50	1696.079	8.114	31.091	23.667	15.553	0.018
20.75	1697.694	8.126	29.476	23.833	15.708	0.017
21.00	1699.266	8.138	27.904	24.000	15.862	0.016
21.25	1700.794	8.149	26.375	24.167	16.017	0.016
21.50	1702.280	8.161	24.890	24.333	16.173	0.015
21.75	1703.723	8.172	23.447	24.500	16.328	0.014
22.00	1705.122	8.183	22.048	24.667	16.483	0.013
22.25	1706.479	8.194	20.691	24.833	16.639	0.012
22.50	1707.792	8.205	19.378	25.000	16.795	0.011
22.75	1709.062	8.216	18.107	25.167	16.951	0.011
23.00	1710.290	8.227	16.880	25.333	17.107	0.010
23.25	1711.474	8.237	15.696	25.500	17.263	0.009
23.50	1712.615	8.247	14.555	25.667	17.420	0.008
23.75	1713.713	8.257	13.457	25.833	17.576	0.008
24.00	1714.768	8.266	12.402	26.000	17.734	0.007
24.25	1715.780	8.276	11.390	26.167	17.891	0.007
24.50	1716.749	8.285	10.421	26.333	18.048	0.006
24.75	1717.675	8.294	9.495	26.500	18.206	0.006
25.00	1718.557	8.302	8.612	26.667	18.364	0.005
25.25	1719.397	8.310	7.773	26.833	18.523	0.005

Draft (m)	Under Waterline Area (m ²)	Under Waterline KG1 (m)	Above Waterline Area (m ²)	Above Waterline KG2 (m)	Height KG2-KG1 (m)	Area Ratio
25.50	1720.194	8.318	6.976	27.000	18.682	0.004
25.75	1720.947	8.326	6.222	27.167	18.841	0.004
26.00	1721.658	8.333	5.512	27.333	19.000	0.003
26.25	1722.325	8.340	4.844	27.500	19.160	0.003
26.50	1722.950	8.347	4.220	27.667	19.320	0.002
26.75	1723.531	8.353	3.639	27.833	19.481	0.002
27.00	1724.069	8.359	3.100	28.000	19.641	0.002
27.25	1724.565	8.364	2.605	28.167	19.803	0.002
27.50	1725.017	8.369	2.153	28.333	19.964	0.001
27.75	1725.426	8.373	1.744	28.500	20.127	0.001
28.00	1725.792	8.378	1.378	28.667	20.289	0.001
28.25	1726.115	8.381	1.055	28.833	20.452	0.001
28.50	1726.395	8.385	0.775	29.000	20.615	0.000
28.75	1726.631	8.387	0.538	29.167	20.779	0.000
29.00	1726.825	8.390	0.344	29.333	20.944	0.000
29.25	1726.976	8.391	0.194	29.500	21.109	0.000
29.50	1727.084	8.393	0.086	29.667	21.274	0.000
29.75	1727.148	8.394	0.022	29.833	21.440	0.000
30.00	1727.170	8.394	0.000	30.000	21.606	0.000

Windage Area/Pressure Arm Curves



Για την μελέτη της ευστάθειας του άθικτου πλοίου, λήφθηκαν υπόψη οι προβλέψεις, τα κριτήρια και οι καταστάσεις φόρτωσης του πλοίου που ακολουθούν.



Εικόνα 44: Ζώνες Βλάβης

Πίνακας 43: Περιπτώσεις Βλαβών

Damage Cases						Damage Zones according to Def Stan 02-900											
						0	6	11	17,5	26	35	45	55	65	75	82,5	90
Minimum Damage Length {15%Lbp,21m}=21m						A	C		E	G	J	L		N			
Case	Damage Zone	Start	Finish	Length (Frames)	Length (meters)	B	D	F	H	K	M						
1	A B C D	0	26	26	29,9	Case 1											
2	B C D	6	26	20	23	Case 2											
3	C D E	11	35	24	27,6	Case 3											
4	D E F	17,5	45	27,5	31,625	Case 4											
5	E F	26	45	19	21,85	Case 5											
6	F G	35	55	20	23	Case 6											
7	G H J	45	65	20	23	Case 7											
8	H J	55	75	20	23	Case 8											
9	J K L	65	90	25	28,75	Case 9											
10	K L M N	75	100	25	28,75	Case 10											

5.5 Περιπτώσεις Βλάβης

Όπως αναλύθηκε προγενέστερα, τα πρότυπα απαιτούν την μελέτη της ευστάθειας μετά από βλάβη, θεωρώντας ως ελάχιστο μήκος βλάβης τα 21m. Λαμβάνοντας υπόψη την οριζόντια κατανομή των εγκαρσίων υδατοστεγών φρακτών, το πλοίο διαιρέθηκε στις ζώνες της εικόνας 44. Επισημαίνεται ότι εξετάστηκαν δύο κατηγορίες περιπτώσεων (damage case and sub-case):

- Η περίπτωση βλάβης, το εγκάρσιο μέγεθος της οποίας έχει δημιουργήσει διαμερή διάνοιξη της γάστρας, με συνέπεια η βλάβη να εκτείνεται μεταξύ των τοιχωμάτων του πλοίου (shell-to-shell) και συμβολίζεται με D(amage)X00, όπου X ο αριθμός του Case.

- Η υπο-περίπτωση της ανωτέρω περίπτωσης, όπου η εγκάρσια βλάβη εκτείνεται μέχρι τα όρια του πρώτου διαμερίσματος, στον εγκάρσιο άξονα και συμβολίζεται με $D(amage)X10$, όπου X ο αριθμός του Case.

6. Υδροδυναμική Ανάλυση - Αντίσταση

Κατά τη σχεδίαση του πλοίου ο ναυπηγός, λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις σχεδίασης, υλοποιεί σειρά υδροδυναμικών αναλύσεων, με εμπειρικές, αριθμητικές και πειραματικές μεθόδους, ώστε να μορφοποιήσει τη γάστρα και να βελτιώσει την υδροδυναμική συμπεριφορά του πλοίου. Στη φάση αυτή απαιτείται και η εκτίμηση της αντίστασης ρυμούλκησης του πλοίου, η οποία είναι απαραίτητη για τον καθορισμό της απαιτούμενης προωστήριας διάταξης, είναι όμως σαφές ότι η τελική τιμή της είναι δυνατό να προσδιορισθεί μόνο πειραματικά.

Στο κεφάλαιο αυτό επιχειρείται ο προσδιορισμός της υδροδυναμικής αντίστασης του πλοίου με χρήση τριών μεθόδων :

α. Την προσεγγιστική μέθοδο των Holtrop – Mennen [21]-[22]. Η μέθοδος αυτή εξελίχθηκε με βάση τη σταδιακή ανάλυση όλων των διαθέσιμων δεδομένων από πειράματα προτύπων αλλά και αποτελεσμάτων σε πραγματική κλίμακα που διέθετε έως το 1989 η Πειραματική Δεξαμενή της Ολλανδίας (Netherlands Ship Model Basin).

β. Την αριθμητική μέθοδο με χρήση της θεωρίας πεπερασμένων όγκων και τη χρήση του Ansys/Fluent.

Ως δεδομένα εισόδου λαμβάνονται οι τιμές των χαρακτηριστικών μεγεθών του πλοίου, που έχουν μοντελοποιηθεί με το λογισμικό AVEVA.

6.1 Η μέθοδος Holtrop-Mennen

Σύμφωνα με την μέθοδο Holtrop-Mennen, η ολική αντίσταση του πλοίου μπορεί να ληφθεί ίση με :

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

Όπου:

- R_F , η αντίσταση τριβής με βάση τον κατά ITTC- 1957 τύπο τριβής.

- $1 + k_1$, ο συντελεστής μορφής που λαμβάνει υπόψη την προσαύξηση της αντίστασης μορφής της γάστρας σε σχέση με την αντίσταση τριβής.
- R_{APP} , η αντίσταση των προσαρτημάτων
- R_W , η αντίσταση λόγω κυματισμού
- R_B , η πρόσθετη αντίσταση λόγω βολβοειδούς πλώρης
- R_{TR} , η αντίσταση λόγω βυθισμένου καθρέπτη πρύμνης
- R_A , η αντίσταση συσχέτισης μοντέλου - πλοίου

Για συντομία της παρούσας, οι αναλυτικοί υπολογισμοί που εκτελέστηκαν με χρήση υπολογιστικού φύλλου, με βάση την μεθοδολογία που παρουσιάζεται στην [3] με ιδιαίτερα αναλυτικό τρόπο, αναφέρονται συνοπτικά. Επισημαίνεται ότι η μέθοδος παρουσιάζει ικανοποιητικά αποτελέσματα για ένα φάσμα κυρίων χαρακτηριστικών και ταχυτήτων πλεύσης του πλοίου (π.χ. $F_n < 0.45$, $0.55 < C_p < 0.67$, $6 < L/B < 9.5$ και $3 < B/T < 4$ για πλοία τύπου Destroyers [21],[22]). Σε περιπτώσεις απόκλισης από τα ανωτέρω, η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί πλην όμως τα αποτελέσματά της χρήζουν επισκόπησης.

Τα αρχικά δεδομένα για τον υπολογισμό των συνιστωσών της αντίστασης, είναι:

Πίνακας 44: Αρχικά δεδομένα για την μέθοδο Holtrop - Mennen

Principal Dimensions			
Lpp	115	[m]	Length between parallels
Lf	115.01	[m]	Waterline Length
B	16.46	[m]	Beam
Tm	4.947	[m]	Draft amidships
Tf	4.911	[m]	Bow Draft
Ta	4.983	[m]	Stern Draft
Lcb	-1.284	[m]	Center of Bouyancy (from amidships)
Form Coefficients			
Cb	0.469		Block Coefficient
Cm	0.836		Midship Coefficient
Cp	0.561		Prismatic Coefficient
Cwl	0.719		Waterline Are Coefficient
Wet Surface			
Sm	1919	[m ²]	wetted area of the hull
Smap	125.52	[m ²]	wet area of the appendices

Ae	5	[m ²]	wet area of the transom
Bulb Bow			
Atb	0.1	[m ²]	Transverse Area
Hb	0	[m]	Bulb Height
Other Data			
Ie	10.117	[°]	Half Entrance Angle
Ks	120	[μm]	Hull Roughness
Form	u		
Water Properties			
Density	1029	[Kg/m ³]	
Kin. Viscosity	1.197E-06	[m ² /s]	
Calculated			
Am	68.07349	[m ²]	Area of the midship section
V (displacement)	4523	[tn]	Displacement of vessel

Ενώ οι ταχύτητες που μελετώνται και οι υπολογιζόμενοι συντελεστές τριβής κατά ΙΤΤC είναι:

Πίνακας 45: Ταχύτητες Μελέτης

V(kts)	V(m/s)	Fn	Rn
9	4,62996	0,13783989	444966742
11	5,65884	0,16847098	543848240
13	6,68772	0,19910207	642729738
15	7,7166	0,22973316	741611236
17	8,74548	0,26036425	840492734
19	9,77436	0,29099533	939374232
21	10,80324	0,32162642	1038255730
23	11,83212	0,35225751	1137137228
25	12,861	0,3828886	1236018726
27	13,88988	0,41351968	1334900225
29	14,91876	0,44415077	1433781723
30	15,4332	0,45946632	1483222472
32	16,46208	0,4900974	1582103970

Στην συνέχεια υπολογίζονται οι τιμές συντελεστών και αντιστάσεων του υπό σχεδίαση πλοίου, σύμφωνα με τα καθοριζόμενα στις [3],[21] και [22]. Σημειώνεται ότι οι αντιστάσεις λόγω βυθισμένου transom και ελλείπει βολβοειδούς πλώρης, είναι αμελητέες και αγνοούνται.

6.1.1 Αντίσταση Μορφής

Ο συντελεστής μορφής της γάστρας δίδεται από τη σχέση που αναφέρεται στην [22] και κατόπιν υπολογισμών προκύπτει ίσος με

1+K1	
Cstern	10
T/L	0.04301
Lr	46.4937
c14	1.11
1+k1 =	1.17377

Και συνεπώς, υπολογίζοντας και τον συντελεστή αντίστασης κατά ITTC [22] προκύπτει η ακόλουθη τιμή της αντίστασης, στις ταχύτητες που μελετώνται:

Πίνακας 46: Αντίσταση Μορφής

V(kn)	V(m/s)	Fn	Rn	Cf (ITTC-57)	Rf (KN)
9	4,62996	0,13783989	444966742	0,00169682	35,9129664
11	5,65884	0,16847098	543848240	0,0016532	52,268452
13	6,68772	0,19910207	642729738	0,00161815	71,4554016
15	7,7166	0,22973316	741611236	0,00158901	93,4195628
17	8,74548	0,26036425	840492734	0,00156416	118,115752
19	9,77436	0,29099533	939374232	0,00154256	145,505379
21	10,80324	0,32162642	1038255730	0,00152351	175,554849
23	11,83212	0,35225751	1137137228	0,00150649	208,234478
25	12,861	0,3828886	1236018726	0,00149115	243,517722
27	13,88988	0,41351968	1334900225	0,00147719	281,380603
29	14,91876	0,44415077	1433781723	0,00146441	321,801289
30	15,4332	0,45946632	1483222472	0,0014584	342,964488
32	16,46208	0,4900974	1582103970	0,00144707	387,184827

6.1.2 Αντίσταση Προσαρτημάτων

Ο συντελεστής αντίστασης των προσαρτημάτων δίδεται από τη σχέση που αναφέρεται στην [22] και κατόπιν υπολογισμών προκύπτει ίσος με:

Πίνακας 47: Συντελεστής Αντίστασης Προσαρτημάτων

1+K2	Value	Area (m²)	Sum (m²)
rudder behind skeg	1.75	17.82	31.2
rudder behind stern	1.4	0	0
twin screw balance rudder	2.8	0	0
shaft brackets	3	1.5	4.5
skegs	1.75	0	0
struts bossing	3	0	0
hull bossing	2	0	0
shaft	3	12.2	36.6
fin stabilizers	2.8	12	33.6
sonar dome	2.7	82	221
bilge keels	1.4	0	0

	2.607	125.52	327
--	--------------	--------	-----

Και συνεπώς η αντίσταση των προσαρτημάτων υπολογίζεται ως εξής:

Πίνακας 48: Αντίσταση Προσαρτημάτων

V [kn]	v [m/s]	Cf	Rapp (kN)
9	4,62996	0,00169682	6,124947992
11	5,65884	0,0016532	9,149613667
13	6,68772	0,00161815	12,77921248
15	7,7166	0,00158901	17,01374442
17	8,74548	0,00156416	21,8532095
19	9,77436	0,00154256	27,29760772
21	10,80324	0,00152351	33,34693907
23	11,83212	0,00150649	40,00120355
25	12,861	0,00149115	47,26040117
27	13,88988	0,00147719	55,12453193
29	14,91876	0,00146441	63,59359582
30	15,4332	0,0014584	68,05497769
32	16,46208	0,00144707	77,43144128

6.1.3 Αντίσταση Κυματισμού

Ακολουθώντας την διαδικασία που περιγράφεται στη [22], υπολογίζονται οι ακόλουθες σταθερές:

Parameter	Value
c ₇	0.14312
c ₁	0.91971
c ₂	0.98762
c ₃	4.3E-05
c ₅	0.94124
lambda	0.60159
m ₁	-2.01317
L ³ /delta	336.341
c ₁₆	1.4016
i _E	9.32486
d	-0.9
Rw-0.4	521.37
Rw-0.55	1578.65

Από όπου μετά από υπολογισμούς προκύπτει ότι:

V [kn]	v [m/s]	Fn	m4	Rw (Fn<0.4)	Rw (Fn>0.55)	Rw (0.4<Fn<0.55)	Rw (KN)
9,00	4,63	0,138	-6,5E-11	0,245			0,245
11,00	5,66	0,168	-4,5E-06	1,772			1,772
13,00	6,69	0,199	-7,0E-04	7,160			7,160
15,00	7,72	0,230	-9,2E-03	20,168			20,168

17,00	8,75	0,260	-3,9E-02	46,859			46,859
19,00	9,77	0,291	-9,4E-02	80,903			80,903
21,00	10,80	0,322	-1,6E-01	126,206			126,206
23,00	11,83	0,352	-2,4E-01	219,508			219,508
25,00	12,86	0,383	-3,0E-01	391,405			391,405
26,12	13,44	0,400	-3,4E-01	521,370			521,370
27,00	13,89	0,414	-3,6E-01	635,143	708,741	616,665	616,665
29,00	14,92	0,444	-4,1E-01	903,078	984,347	832,570	832,570
30,00	15,43	0,459	-4,4E-01	1029,400	1110,186	940,522	940,522
32,00	16,46	0,490	-4,7E-01	1247,732	1319,878	1156,427	1156,427

Πίνακας 49: Αντίσταση Κυματισμού

6.1.4 Συντελεστής Αντίσταση Συσχέτισης

Η αντίσταση λόγω της συσχέτισης μοντέλου-πλοίου, είναι:

T_{pr}/L_f	0.0427
c_4	0.04
C_a	0.00049

6.1.5 Ολική Αντίσταση

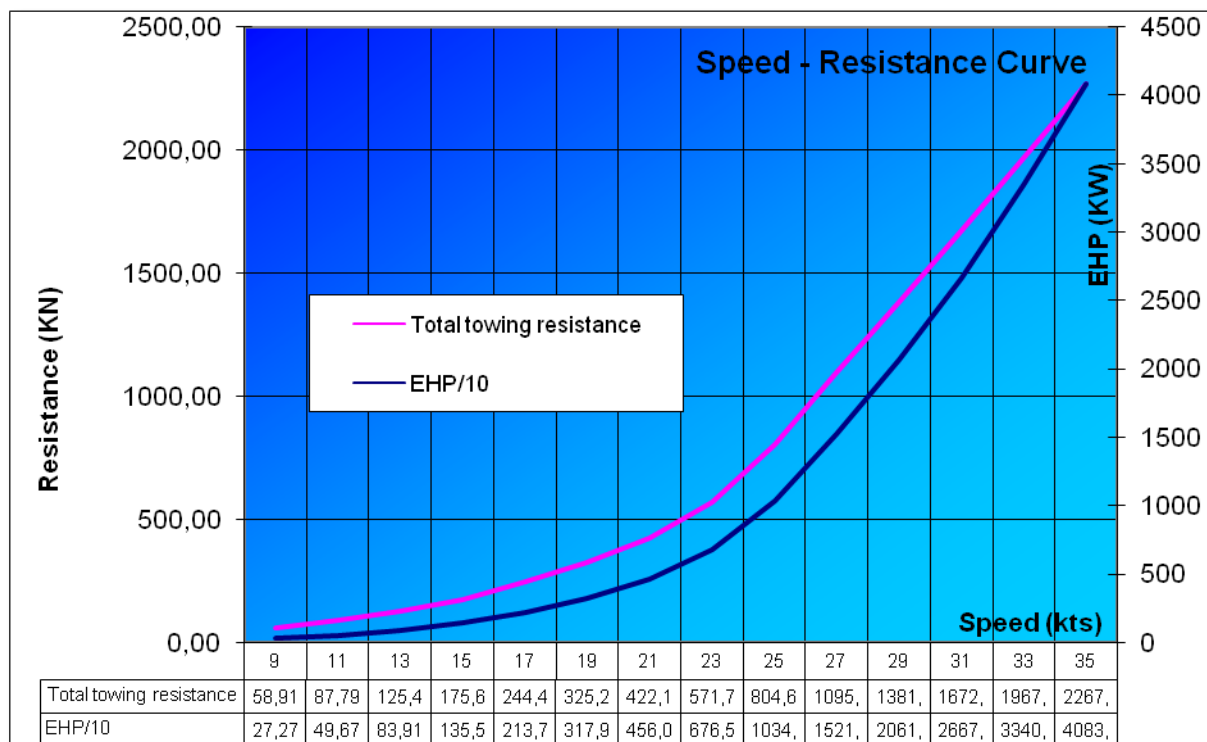
Από τα ανωτέρω συνάγεται ότι η ολική αντίσταση και η απαιτούμενη ισχύς ρυμούλκησης του πλοίου του υπό σχεδίαση πλοίου, είναι:

Πίνακας 50: Ολική Αντίσταση και Ισχύς Ρυμούλκησης

V [kn]	C_a	$1+k_1$	R_f	R_{app}	R_w	R_a	R_{total} [kN]	EHP (KW)
9	0,000491	1,173767	35,91297	6,124948	0,244773	10,38614	58,90932	272,7501
11	0,000491	1,173767	52,26845	9,149614	1,77184	15,51509	87,78754	496,7799
13	0,000491	1,173767	71,4554	12,77921	7,160392	21,66984	125,4814	839,192
15	0,000491	1,173767	93,41956	17,01374	20,16803	28,85038	175,685	1355,702
17	0,000491	1,173767	118,1158	21,85321	46,85863	37,05671	244,4089	2137,492
19	0,000491	1,173767	145,5054	27,29761	80,90341	46,28884	325,2793	3179,424
21	0,000491	1,173767	175,5548	33,34694	126,206	56,54675	422,1601	4560,737
23	0,000491	1,173767	208,2345	40,0012	219,5085	67,83045	571,7589	6765,178
25	0,000491	1,173767	243,5177	47,2604	391,4051	80,13995	804,6386	10348,55
27	0,000491	1,173767	281,3806	55,12453	616,6646	93,47524	1095,54	15217,05
29	0,000491	1,173767	321,8013	63,5936	832,5697	107,8363	1381,719	20613,72
30	0,000491	1,173767	342,9645	68,05498	940,5222	115,4015	1526,539	23559,59
32	0,000491	1,173767	387,1848	77,43144	1156,427	131,3013	1819,625	29955,07

Όπου

$$EHP(PS)=R_{total} V$$



Εικόνα 45: Καμπύλη Αντίστασης – Ταχύτητας μεθόδου Holtrop-Mennen

6.2 Υπολογισμός Αντίστασης με χρήση του AVEVA

Με χρήση του ήδη ανεπτυγμένου μοντέλου στο λογισμικό AVEVA και κατάλληλη παραμετροποίηση (έλικα με $D=4.5m$, $P/D\sim 1.4$, $A_e/A_0=1,05$, sea margin 15%), έγινε υπολογισμός της αντίστασης ρυμούλκησης του μοντέλου, με χρήση του Powering module. Τα δεδομένα που εισήχθησαν στο μοντέλο είναι όμοια με αυτά του πίνακα 44, που χρησιμοποιήθηκαν στην μέθοδο Holtrop-Mennen. Η ανάλυση με χρήση του AVEVA, η οποία πραγματοποιείται με χρήση της μεθόδου Holtrop-Mennen, δίνει τα ακόλουθα αποτελέσματα αντίστασης:

Πίνακας 51 : Αποτελέσματα αντίστασης κατά AVEVA

Speed kts	F_n	R_n /10 ⁹	C_f *10 ³	$C_f \times k$ *10 ³	C_r *10 ³	C_a *10 ³	C_t *10 ³	CircC
15.000	0.230	0.742	1.589	0.280	0.367	0.500	3.007	0.856
16.000	0.245	0.791	1.576	0.278	0.504	0.500	3.127	0.890
17.000	0.260	0.840	1.564	0.276	0.663	0.500	3.269	0.930
18.000	0.276	0.890	1.553	0.274	0.805	0.500	3.397	0.967
19.000	0.291	0.939	1.543	0.272	0.916	0.500	3.493	0.994
20.000	0.306	0.989	1.533	0.270	1.022	0.500	3.586	1.020
21.000	0.322	1.038	1.524	0.269	1.167	0.500	3.719	1.058
22.000	0.337	1.088	1.515	0.267	1.383	0.500	3.923	1.117

Speed kts	Fn	Rn /10 ⁹	Cf *10 ³	Cf x k *10 ³	Cr *10 ³	Ca *10 ³	Ct *10 ³	CircC
23.000	0.352	1.137	1.506	0.266	1.689	0.500	4.218	1.200
24.000	0.368	1.187	1.499	0.264	2.083	0.500	4.601	1.309
25.000	0.383	1.236	1.491	0.263	2.548	0.500	5.056	1.439
26.000	0.398	1.285	1.484	0.262	3.049	0.500	5.548	1.579
27.000	0.414	1.335	1.477	0.260	3.383	0.500	5.873	1.671
28.000	0.429	1.384	1.471	0.259	3.646	0.500	6.127	1.743
29.000	0.444	1.434	1.464	0.258	3.865	0.500	6.337	1.803
30.000	0.459	1.483	1.458	0.257	4.047	0.500	6.511	1.853
31.000	0.475	1.533	1.453	0.256	4.198	0.500	6.654	1.894
32.000	0.490	1.582	1.447	0.255	4.322	0.500	6.771	1.927

Ενώ τα αποτελέσματα ισχύος ρυμούλκησης είναι τα ακόλουθα:

Πίνακας 52: Ισχύς Ρυμούλκησης κατά AVEVA (χωρίς sea margin)

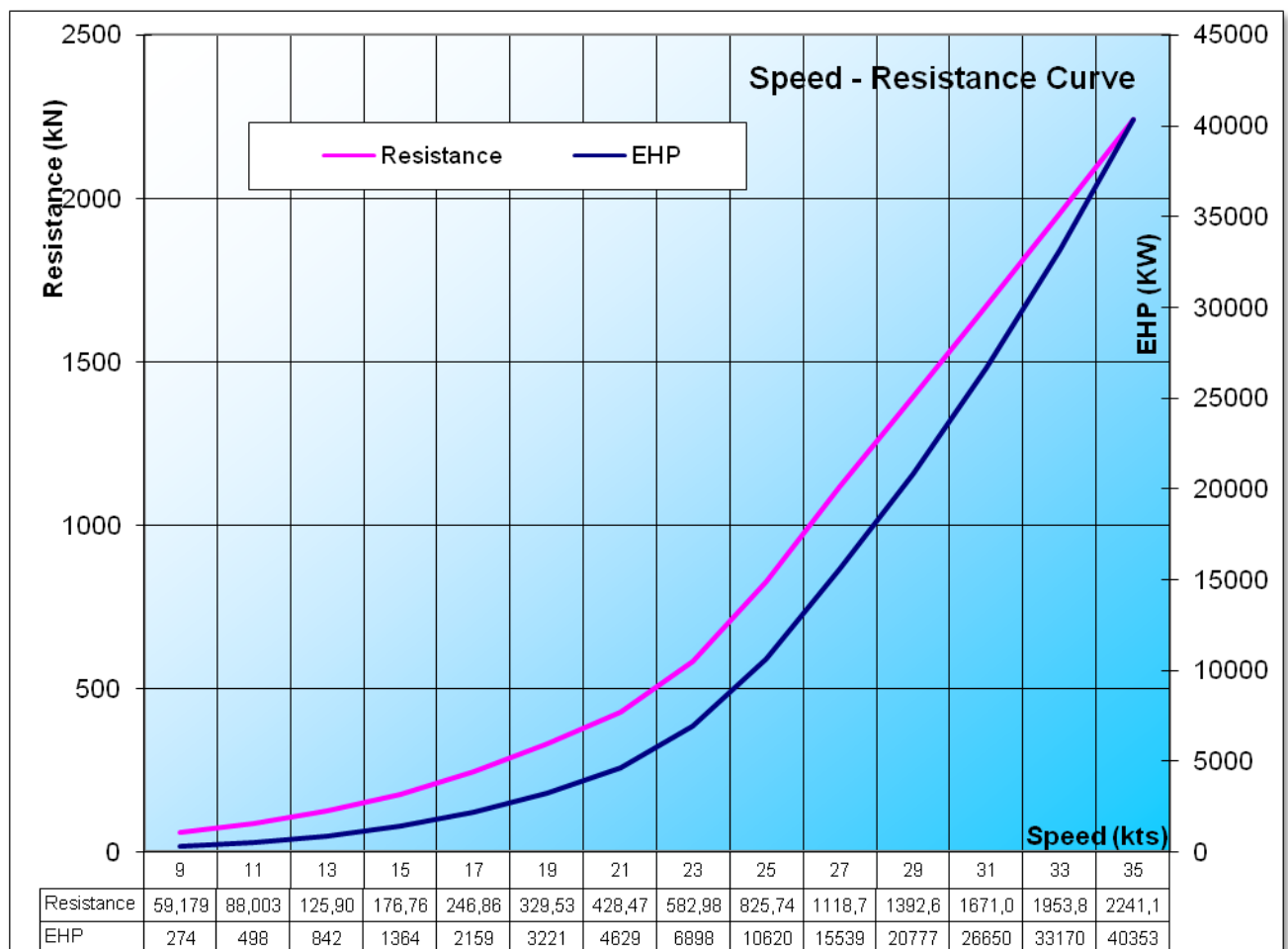
Speed kts	Pe (kW)	THDF	WFT	ETAR	ETA0	QPC	Ps (kW)	RPM
15.000	1364	0.156	0.036	0.976	0.729	0.622	2237	81.42
16.000	1721	0.156	0.036	0.976	0.729	0.622	2822	87.33
17.000	2159	0.156	0.036	0.976	0.729	0.622	3540	93.39
18.000	2663	0.156	0.036	0.976	0.729	0.622	4368	99.43
19.000	3221	0.156	0.036	0.976	0.728	0.622	5285	105.37
20.000	3856	0.156	0.036	0.976	0.728	0.621	6332	111.33
21.000	4629	0.156	0.036	0.976	0.727	0.621	7608	117.51
22.000	5616	0.156	0.036	0.976	0.726	0.620	9247	124.28
23.000	6898	0.156	0.036	0.976	0.723	0.618	11398	131.63
24.000	8550	0.156	0.036	0.976	0.719	0.614	14205	139.54
25.000	10620	0.156	0.036	0.976	0.714	0.610	17769	147.85
26.000	13109	0.156	0.036	0.976	0.709	0.605	22112	156.37
27.000	15539	0.156	0.036	0.976	0.704	0.601	26378	164.36
28.000	18080	0.156	0.036	0.976	0.701	0.598	30844	172.01
29.000	20777	0.156	0.036	0.976	0.698	0.596	35593	179.45
30.000	23633	0.156	0.036	0.976	0.695	0.594	40625	186.73
31.000	26650	0.156	0.036	0.976	0.693	0.592	45939	193.86
32.000	29828	0.156	0.036	0.976	0.692	0.591	51536	200.87

Πίνακας 53: Ισχύς Ρυμούλκησης κατά AVEVA (με sea margin 15%)

Speed kts	Pe (kW)	THDF	WFT	ETAR	ETA0	QPC	Ps (kW)	RPM
15.000	1568	0.156	0.036	0.976	0.729	0.623	2570	85.44
16.000	1980	0.156	0.036	0.976	0.729	0.622	3245	91.65
17.000	2483	0.156	0.036	0.976	0.729	0.622	4073	98.01
18.000	3062	0.156	0.036	0.976	0.728	0.621	5028	104.34
19.000	3704	0.156	0.036	0.976	0.727	0.621	6087	110.70
20.000	4435	0.156	0.036	0.976	0.726	0.620	7296	117.08
21.000	5324	0.156	0.036	0.976	0.725	0.619	8772	123.75
22.000	6458	0.156	0.036	0.976	0.723	0.618	10672	130.91
23.000	7933	0.156	0.036	0.976	0.720	0.615	13170	138.67

Speed kts	Pe (kW)	THDF	WFT	ETAR	ETA0	QPC	Ps (kW)	RPM
24.000	9833	0.156	0.036	0.976	0.715	0.611	16432	147.00
25.000	12213	0.156	0.036	0.976	0.709	0.606	20577	155.77
26.000	15075	0.156	0.036	0.976	0.702	0.599	25671	165.28
27.000	17870	0.156	0.036	0.976	0.697	0.595	30648	173.77
28.000	20792	0.156	0.036	0.976	0.693	0.592	35856	181.87
29.000	23894	0.156	0.036	0.976	0.690	0.589	41393	189.74
30.000	27178	0.156	0.036	0.976	0.687	0.587	47259	197.44
31.000	30647	0.156	0.036	0.976	0.685	0.585	53453	204.99
32.000	34303	0.156	0.036	0.976	0.684	0.584	59977	212.40

Οι διαφοροποιήσεις τιμών που διαπιστώνονται στην περίπτωση μελέτης χωρίς sea margin, σε σχέση με τον αναλυτικό υπολογισμό με την μέθοδο Holtrop-Mennen, είναι αμελητέες.



Εικόνα 46: Καμπύλη Αντίστασης – Ταχύτητας μεθόδου Avena Powering

6.3 Υπολογισμός Συντελεστή Αεροδυναμικής Αντίστασης

Βασική συνιστώσα στον υπολογισμό της αντίστασης, ιδιαίτερα σε ταχύτητες πλεύσης σε μεγάλους αριθμούς Froude, είναι αυτή της αεροδυναμικής αντίστασης των επιφανειών άνωθεν της ισάλου (γάστρα, υπερκατασκευές). Το μέγεθος της αεροδυναμικής αντίστασης εξαρτάται από την επιφάνεια και το σχήμα της υπερκατασκευής του πλοίου, την ταχύτητα πλεύσης αλλά και την γωνία πρόσπτωσης του αέρα [39]. Γενικά όμως, η αεροδυναμική αντίσταση αποτελεί μικρό μέρος της συνολικής αντίστασης του πλοίου. Τυπικές τιμές της αντίστασης παρατίθενται στην εικόνα 47.

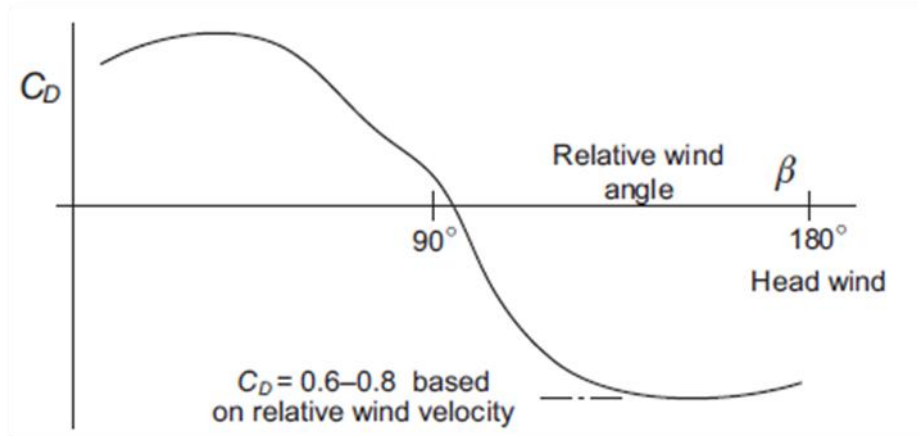
Η τιμή της αεροδυναμικής αντίστασης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$R_A = \frac{1}{2} C_D A_T V_A^2$$

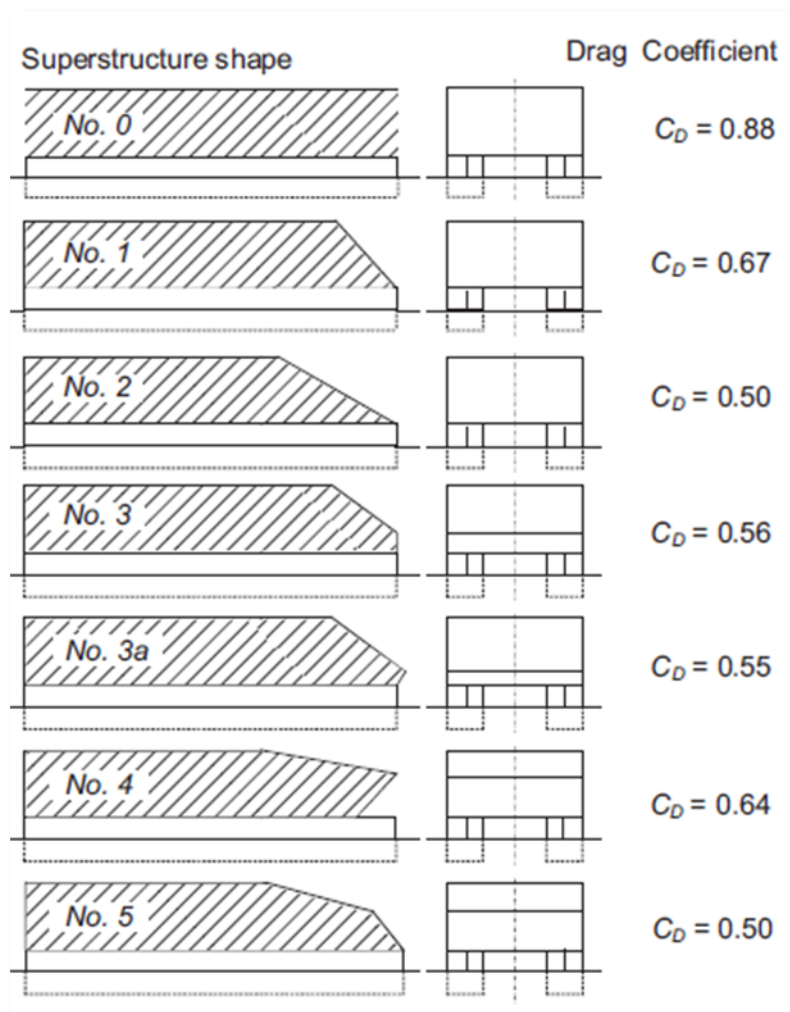
Type	L_{BP} (m)	C_B	D_w (tonnes)	Service speed (knots)	Service power (kW)	Fr	Air drag (%)
Tanker	330	0.84	250,000	15	24,000	0.136	2.0
Tanker	174	0.80	41,000	14.5	7300	0.181	3.0
Bulk carrier	290	0.83	170,000	15	15,800	0.145	2.5
Bulk carrier	180	0.80	45,000	14	7200	0.171	3.0
Container	334	0.64	100,000	26	62,000	0.234	4.5
Container	232	0.65	10,000 TEU 37,000	23.5	29,000	0.253	4.0
Catamaran ferry	80	0.47	650 pass 150 cars	36	23,500	0.661	4.0
Passenger ship	265	0.66	2000 pass GRT90,000	22	32,000	0.222	6.0

Εικόνα 47: Τυπικές τιμές αεροδυναμικής αντίστασης [39]

Όπου A_T η προβαλλόμενη στον άνεμο επιφάνεια του πλοίου. Στην εικόνα 48 παρατίθεται η εξάρτηση του συντελεστή από την γωνία πρόσπτωσης του αέρα, ενώ στην εικόνα 49 παρουσιάζεται η εξάρτηση του συντελεστή από τη γεωμετρία της υπερκατασκευής.



Εικόνα 48: Συντελεστής αεροδυναμικής αντίστασης vs γωνία αέρα [39]



Εικόνα 49: Εξάρτηση του συντ. αεροδυναμικής αντίστασης από τη γεωμετρία της υπερκατασκευής [39]

Για τον υπολογισμό της τιμής του συντελεστή αντίστασης, με χρήση της σχέσης του Isherwood [27], για μετωπικό άνεμο, για το υπό σχεδίαση πλοίο προκύπτει ότι:

$$C_x = A_0 + A_1 \left(\frac{2A_L}{L^2} \right) + A_2 \left(\frac{2A_T}{B^2} \right) + A_3 \left(\frac{L}{B} \right) + A_5 \left(\frac{C}{L} \right) = 0.54$$

$$F_x = \frac{1}{2} C_D A_T V_A^2$$

Όπου $A_L=2899 \text{ m}^2$ η διαμήκης προβαλλόμενη επιφάνεια και $A_T=452 \text{ m}^2$ η εγκάρσια, ενώ A_i είναι οι συντελεστές του Isherwood [27]. Τελικά η αεροδυναμική αντίσταση του πλοίου, λαμβάνοντας υπόψη τους συντελεστές A_i που καθορίζονται στο [27], προκύπτει ότι είναι:

V (kts)	Ra (N)
17	11423,76
21	17432,1
25	24705,36
29	33243,53
30	35575,71

6.4 Υπολογισμός Αντίστασης με χρήση Λογισμικού Υπολογιστικής Υδροδυναμικής ANSYS/Fluent

Ο υπολογισμός της κίνησης του πλοίου σε ροή με παρουσία τύρβης αποτελεί ένα πολύπλοκο πρόβλημα το οποίο σήμερα προσεγγίζεται κυρίως με πειραματικές και αριθμητικές μεθόδους. Οι εξελίξεις στην υπολογιστική ισχύ επιτρέπουν στους σύγχρονους ναυπηγούς μηχανικούς να αξιοποιούν σύγχρονα υπολογιστικά εργαλεία ρευστομηχανικής (Computational Fluid Dynamics – CFD) στα πλαίσια της διερεύνησης – βελτιστοποίησης μιας γάστρας. Η ακριβής μοντελοποίηση της τυρβώδους ροής στην περιοχή του οριακού στρώματος, στην περιοχή της γάστρας, έχει επιτρέψει την ανάπτυξη υδροδυναμικά σύγχρονων γαστρών.

Το φυσικό πρόβλημα που απαιτείται να επιλυθεί κατά την κίνηση του πλοίου, αρχικά στο ήρεμο νερό ως πρόβλημα μόνιμης ροής (steady state), είναι η προσέγγιση της ροής δύο ρευστών φάσεων, αέρα και νερού, γύρω από τη γάστρα. Σε ότι αφορά στην τυρβώδη ροή, τα υφιστάμενα υπολογιστικά μοντέλα πραγματεύονται κυρίως μονοφασικές ροές και απαιτείται η υιοθέτηση καταλλήλου μοντέλου τύρβης, προκειμένου να επιτευχθεί ακριβής προσέγγιση της ροής στην περιοχή πλησίον της γάστρας. Ως εκ τούτου, υιοθετήθηκε ένα από τα κλασσικά μοντέλα μελέτης της τύρβης: το Shear Stress Transform κ-ω model, με τυπική αντιμετώπιση των walls και των πεδίων πλησίον αυτών.

6.4.1 Αποτύπωση Προβλήματος

Η επίλυση ενός φυσικού-μαθηματικού προβλήματος με χρήση λογισμικού υπολογιστικής μηχανικής, ανάλυση του οποίου παρέχεται συνοπτικά στο κεφάλαιο 7 της παρούσας, υλοποιείται σε τρία διακριτά στάδια: την προ-επεξεργασία, την επίλυση και την μετ-επεξεργασία.

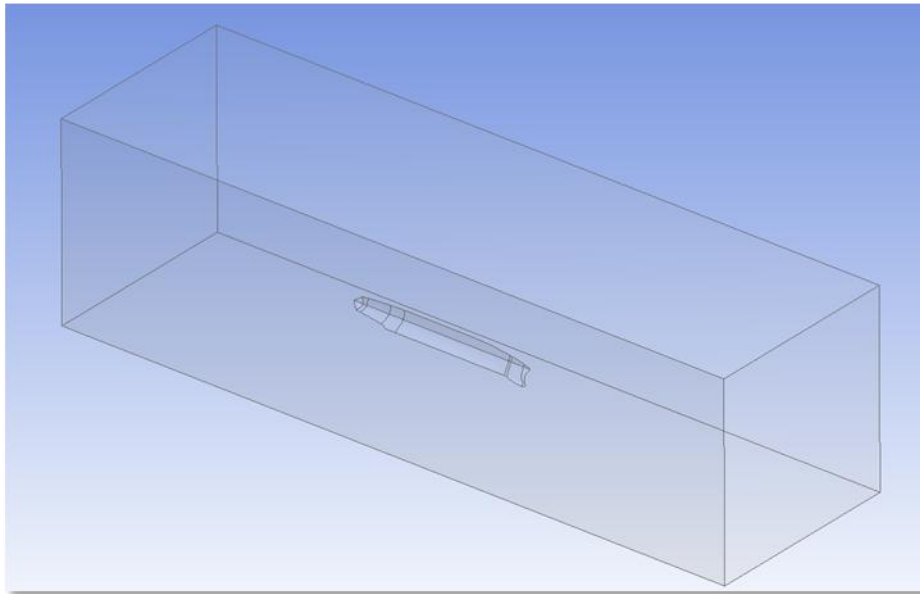
Στο πρώτο στάδιο υλοποιείται η κατασκευή και διακριτοποίηση του υπολογιστικού μοντέλου, το οποίο στην περίπτωση μας αποτελείται από μικρούς όγκους ελέγχου, τους λεγόμενους πεπερασμένους όγκους. Η διακριτοποίηση πραγματοποιείται με χρήση στοιχείων του Ansys/Fluent, τα οποία στην περίπτωση μας είναι εξαεδρικά (hexahedral), καθόσον έχει αποδειχθεί ότι εξασφαλίζουν ταχύτερη σύγκλιση, λόγω μικρότερου αριθμού κόμβων σε σχέση με τα τετραεδρικά, δίχως απώλεια ακρίβειας [29].

Το στάδιο της επίλυσης πραγματοποιείται από τον επιλύτη (solver) του Ansys/Fluent. Ο συγκεκριμένος επιλύτης αποτελεί τον πλέον διαδεδομένο στην παγκόσμια κοινότητα υπολογιστικής ρευστομηχανικής, λόγω της γενικότητας (μπορεί να αντιμετωπίσει πολλαπλές περιοχές φυσικών προβλημάτων) και της ακρίβειας των αποτελεσμάτων του, τόσο σε μόνιμες όσο και σε μεταβατικές, χρονικά εξαρτώμενες ροές. Για την επίλυση του προβλήματος ο επιλύτης, σε κάθε βήμα, επιλύει τις εξισώσεις Navier - Stokes, υπολογίζοντας τα δεδομένα μάζας και ορμής για τα υπό μελέτη ρευστά.

Τα αποτελέσματα της επίλυσης αποτελούνται από το σύνολο των ταχυτήτων - πιέσεων του ρευστού στα διάφορα σημεία του όγκου ελέγχου, τις γραμμές ροής και τις δυνάμεις που αναπτύσσονται στη γάστρα. Η προβολή τους πραγματοποιείται με χρήση κατάλληλου μετεπεξεργαστή.

Για την επίλυση του προβλήματος μέτρησης της αντίστασης για το υπό σχεδίαση πλοίο, χρησιμοποιήθηκε τρισδιάστατο μοντέλο ασυμπίεστης, διαφασικής (νερό και αέρας) μόνιμης ροής. Οι υπολογισμοί ελεύθερης επιφάνειας (wave profile) πραγματοποιήθηκαν με την τεχνική Volume of Fluid, η οποία αναλύεται στο [23], [56].

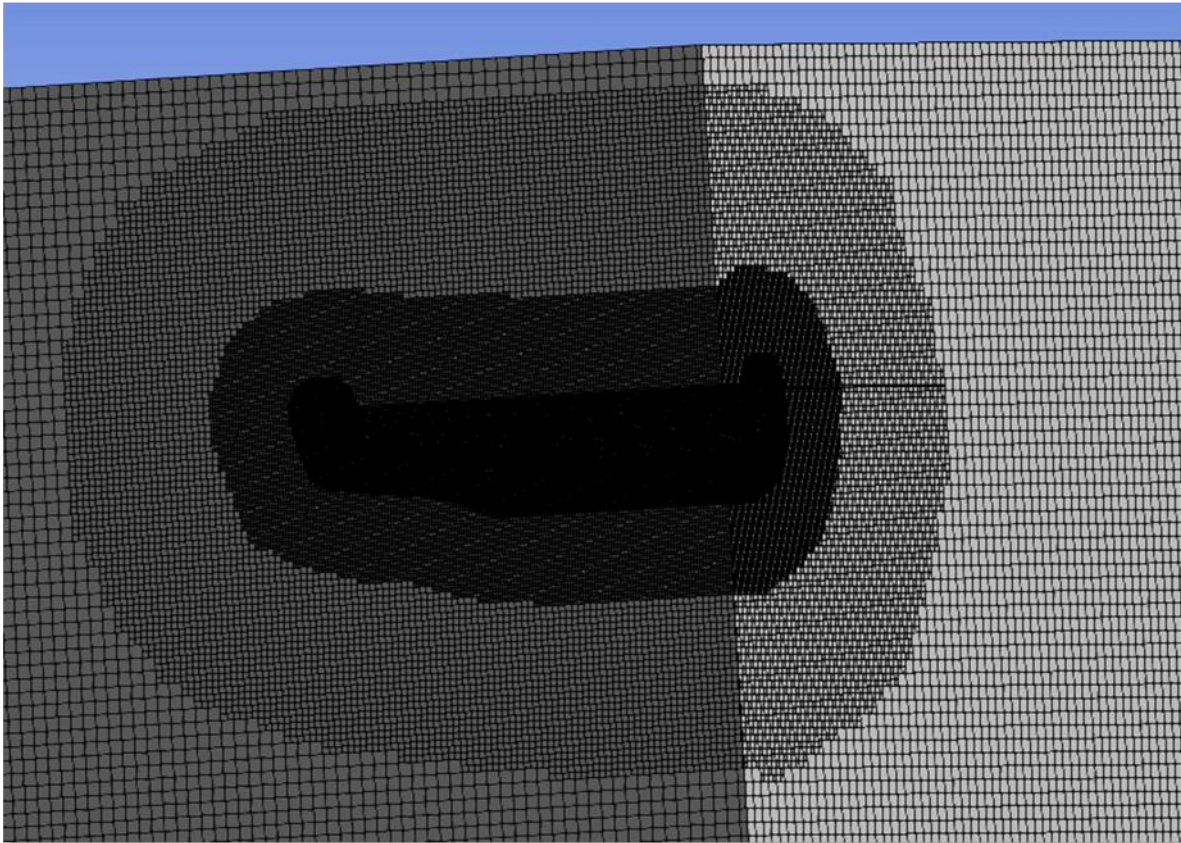
Για την επίλυση του προβλήματος αναπτύχθηκε υπολογιστικός κάναβος (mesh) ο οποίος περιλαμβάνει:



Εικόνα 50: Ο όγκος ελέγχου και το μοντέλο του πλοίου

- Τον όγκο ελέγχου της ροής. Οι διαστάσεις του όγκου, για λόγους έκτασης του υπολογιστικού μοντέλου, περιορίστηκαν ως εξής:
 - Πλάτος από τον διαμήκη άξονα του πλοίου, ίσο με ένα μήκος πλοίου
 - Βάθος από την τρόπιδα, ίσο με τα $3/4$ του μήκους πλοίου
 - Ύψος από την τρόπιδα, ίσο με το $1/4$ του μήκους πλοίου
 - Έμπροσθεν μήκος από την FP, ίσο με ένα μήκος πλοίου
 - Οπίσθιο μήκος από την AP, ίσο με δύο μήκη πλοίου
- Τον όγκο που καταλαμβάνει η γάστρα, εντός του όγκου ελέγχου, σε πραγματικές διαστάσεις πλοίου (full model scale). Επισημαίνεται ότι η γάστρα θεωρείται ακίνητη στον όγκο ελέγχου, σε θέση με μηδενικό heel και trim, ως προς το διάνυσμα ταχύτητας της ροής νερού-αέρα.

Λόγω συμμετρίας του προβλήματος, για υπολογιστικούς λόγους, αποτυπώθηκε το ήμισυ του προβλήματος και λήφθηκαν υπόψη κατάλληλες συνοριακές συνθήκες συμμετρίας (slip conditions) στα σύνορα του όγκου ελέγχου. Ο υπολογιστικός κানাβος που αναπτύχθηκε, με χρήση δομημένου πλέγματος εξαεδρικών στοιχείων, παρατίθεται ακόλουθα:



Εικόνα 51: Τομή υπολογιστικού mesh στην περιοχή του πλοίου

Η ποιότητα αλλά και η γεωμετρία του κανάβου αποτελεί βασικό στοιχείο για την επίτευξη της επιθυμητής ακρίβειας των αποτελεσμάτων. Αναφορές στο συγκεκριμένο θέμα καταδεικνύουν την επίδραση του finesse ενός κανάβου στην ακρίβεια των τελικών αποτελεσμάτων. Ενδεικτικά αναφέρεται [18] η επίδραση του finesse του κανάβου στην ακρίβεια υπολογισμού του συντελεστή ολικής αντίστασης:

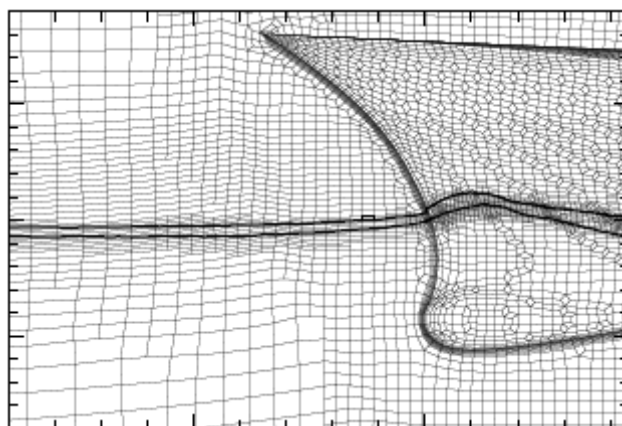
Case	C_T	C_F	C_P
Fine grid	$3.93 \cdot 10^{-3}$	$2.98 \cdot 10^{-3}$	$0.95 \cdot 10^{-3}$
Medium grid	$3.95 \cdot 10^{-3}$	$2.95 \cdot 10^{-3}$	$1.00 \cdot 10^{-3}$
Coarse grid	$7.40 \cdot 10^{-3}$	$3.35 \cdot 10^{-3}$	$4.05 \cdot 10^{-3}$

Εικόνα 52: Βελτίωση στην ακρίβεια υπολογισμού λόγω mesh finesse και y^+ [18]

Στη διεθνή αρθρογραφία για το θέμα ([18], [29], [31], [53], [56], [57]) διακρίνεται ότι για την επίτευξη ενός grid με ικανοποιητική ακρίβεια στα φαινόμενα οριακού στρώματος, απαιτείται η μείωση του αδιάστατου συντελεστή απόστασης τοιχώματος (Von Karman dimensionless wall distance) y^+ , που δίδεται από τη σχέση:

$$y^+ = \frac{u_* y}{\nu}$$

όπου u_* η ταχύτητα τριβής στο τοίχωμα, y η απόσταση από το τοίχωμα και ν το κινηματικό ιξώδες. Η συγκεκριμένη αδιάστατη παράμετρος αποτελεί μέτρο της ποιότητας του κανάβου στην περιοχή του οριακού στρώματος μεταξύ γάστρας και ελεύθερης ροής, καθώς τον απεικονίζει το μέγεθος των στοιχείων στην περιοχή του οριακού στρώματος (domain walls) και συνεπώς την δυνατότητα του grid να υπολογίζει τα φαινόμενα οριακού στρώματος με ακρίβεια.



Εικόνα 53: Adapted Mesh Grid

Στα πλαίσια της παρούσας, επιχειρήθηκε η επίλυση του προβλήματος με το αρχικό mesh grid των εικόνων 51, 54 και 55. Τα αποτελέσματα των αρχικών υπολογισμών, με χρήση των μοντέλων τύρβης Realizable $k-\epsilon$ και $k-\omega$ Shear Stress Transport, σε σχέση με τις υπολογιζόμενες από τη μέθοδο Holtrop τιμές του συντελεστή αντίστασης, παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 54: Αποκλίσεις αρχικού mesh grid

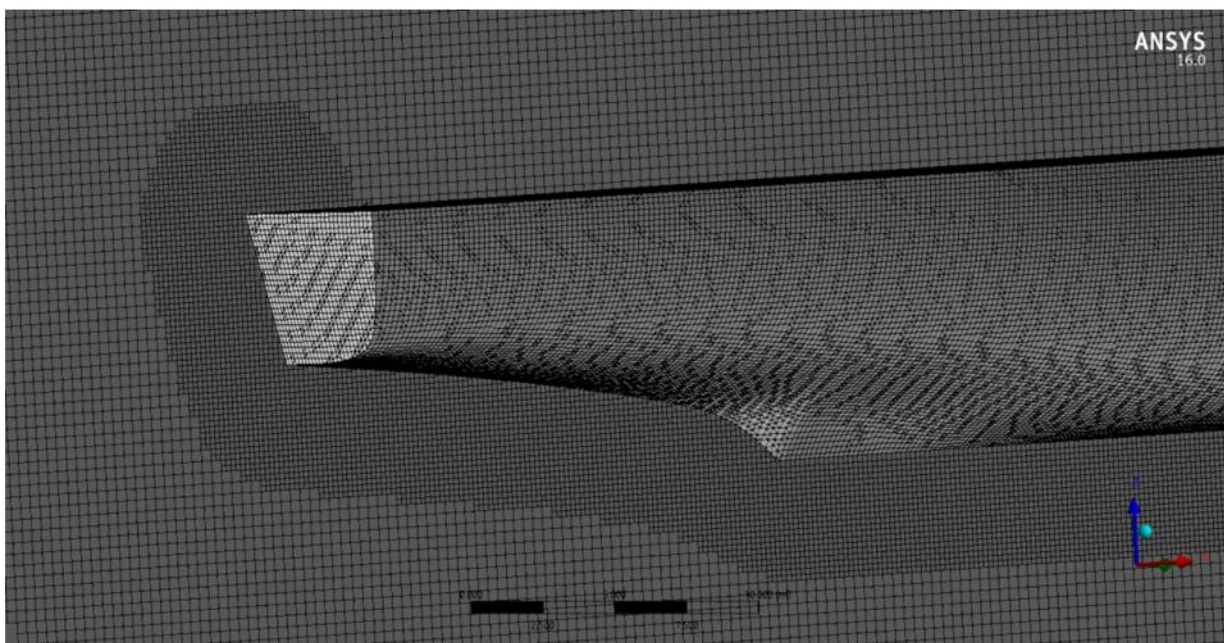
V [kn]	F_n	Holtrop - Mennen	Fluent $k-\epsilon$	Fluent $k-\omega$	Απόκλιση $k-\omega$
17	0.260	3.24	5.28	1.51	-53.42%
21	0.322	3.66	6.68	2.55	-30.49%
25	0.383	4.93	8.78	7.69	56.08%

όπου διαπιστώνεται η σημαντική απόκλιση από τα αποτελέσματα της μεθόδου Holtrop. Για να επιτευχθεί ακρίβεια υπολογισμών των φαινομένων στην ελεύθερη επιφάνεια του νερού, στην περιοχή του οριακού στρώματος, ακολουθώντας τις βέλτιστες πρακτικές για CFD

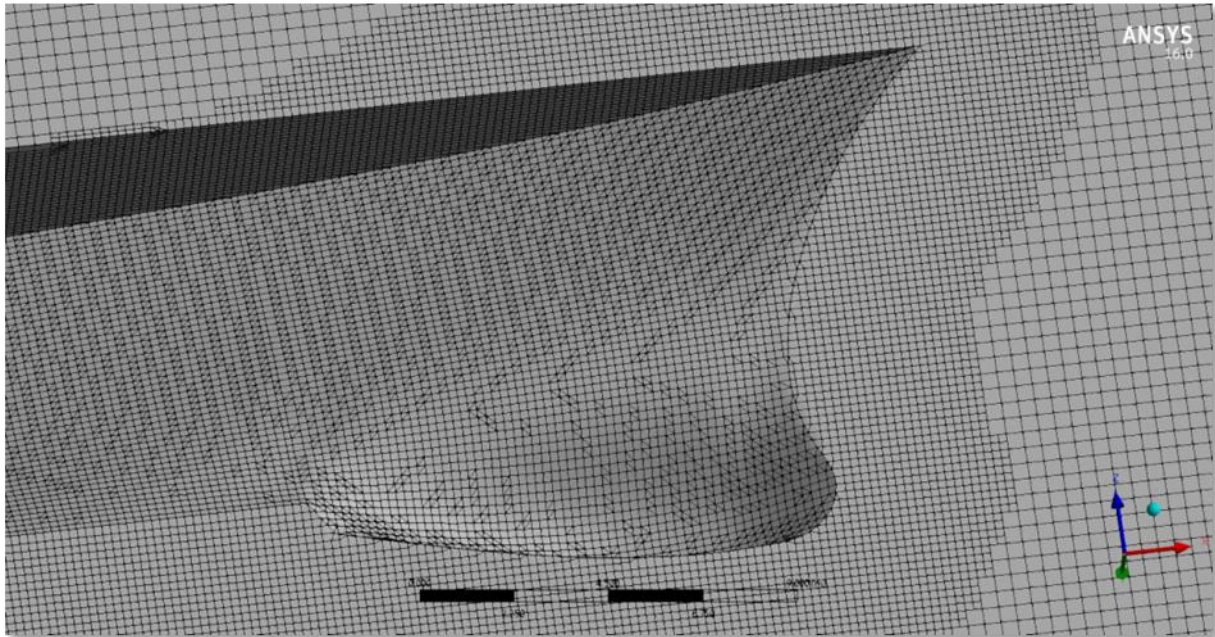
Modeling γάστρας (π.χ. [18]), προβλέφθηκε πύκνωση της διακριτοποίησης γύρω από τη γάστρα. Μετά την αρχική διακριτοποίηση και επίλυση του μοντέλου, πραγματοποιήθηκε:

- Πρώτη πρόσθετη διακριτοποίηση (region adaption με level of refinement 10), στην περιοχή της ελεύθερης επιφάνειας και για ύψος 0.5m εκατέρωθεν του βυθίσματος σχεδίασης, ώστε να βελτιωθεί η ακρίβεια των αποτελεσμάτων στην ελεύθερη επιφάνεια.
- Δεύτερη διακριτοποίηση (region adaption με level of refinement 10) στην περιοχή της πλώρης και της πρύμνης, μήκους 5 m εκατέρωθεν κάθε ακμής, ώστε να υπολογισθούν με ακρίβεια οι διακυμάνσεις της πίεσης της ροής στις περιοχές με μεγάλα gradients.

Με τον τρόπο αυτό επιτεύχθηκε μείωση του $y+$ σε τιμές $y+ < 1000$, ενώ μεγαλύτερη μείωση, αν και ήταν εφικτή, θα επέβαλε σημαντικό πρόσθετο υπολογιστικό κόστος. Το αρχικό mesh grid περιλαμβάνει περί τους 6M κόμβους υπό μορφή εξαεδρικών στοιχείων, η δε ποιότητα του grid είναι ικανοποιητική (mesh quality, skew elements). Το τελικό mesh grid, μετά τα δύο adaption του fluent, περιλάμβανε περί τους 6.5M κόμβους.



Εικόνα 54: Μοντελοποίηση όγκου πρύμνης



Εικόνα 55: Μοντελοποίηση όγκου πλώρης

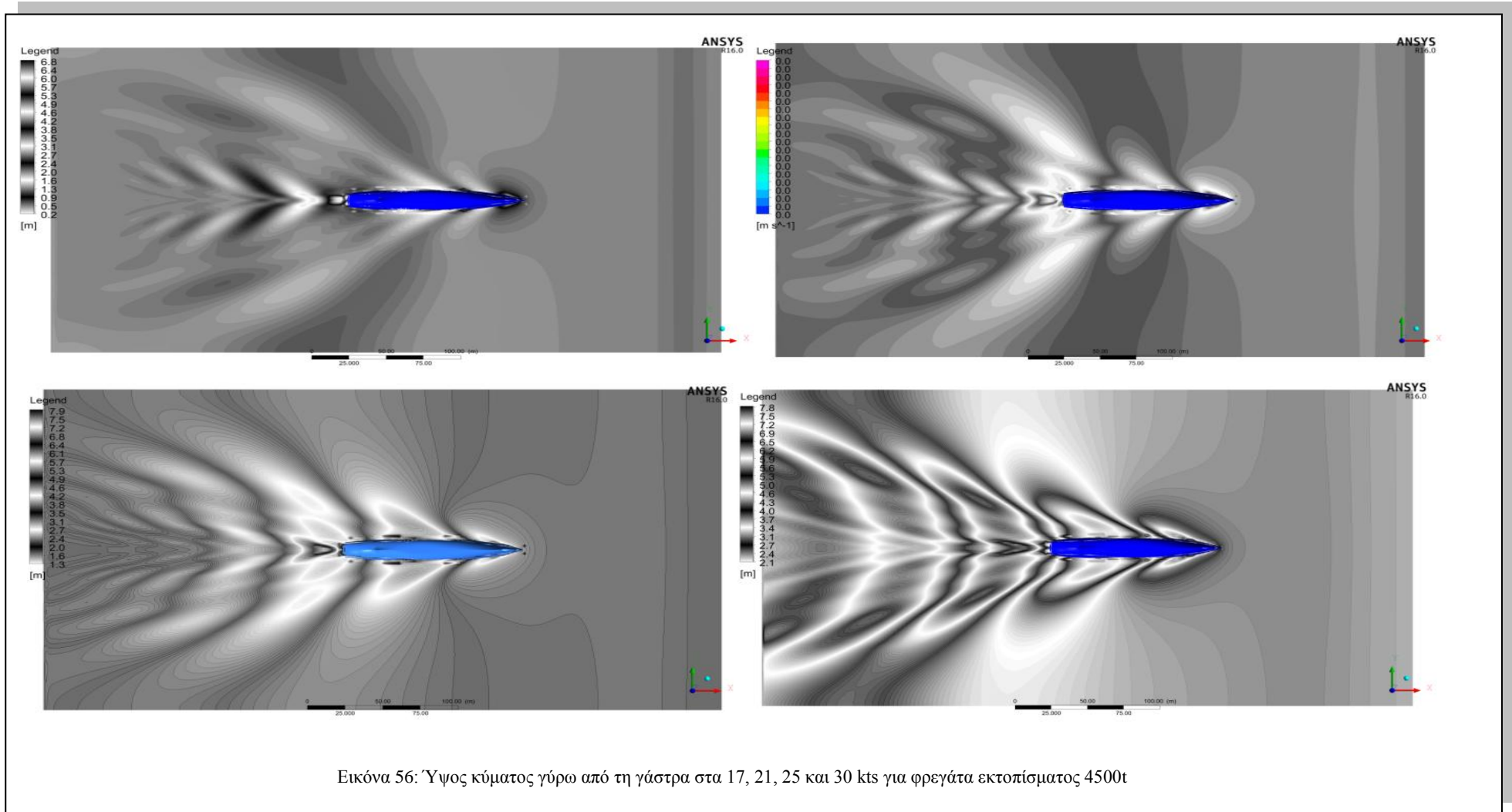
Σε ότι αφορά στις φυσικές ιδιότητες του νερού και του αέρα, λήφθηκαν αυτές που περιλαμβάνει η βιβλιοθήκη του Ansys/Fluent. Η επίλυση πραγματοποιήθηκε σε τέσσερις ταχύτητες ελέγχου των 17, 21, 25 και 30 kts, καθώς οι υπολογιστικοί χρόνοι επίλυσης ήταν ιδιαίτερα εκτενείς. Τέλος και σε ότι αφορά στην ένταση τύρβης στην ελεύθερη επιφάνεια (free stream turbulence intensity) λήφθηκε ίση με $5.265 \cdot 10^{-6}$ [18].

Πίνακας 55: Ιδιότητες Αριθμητικής Επίλυσης

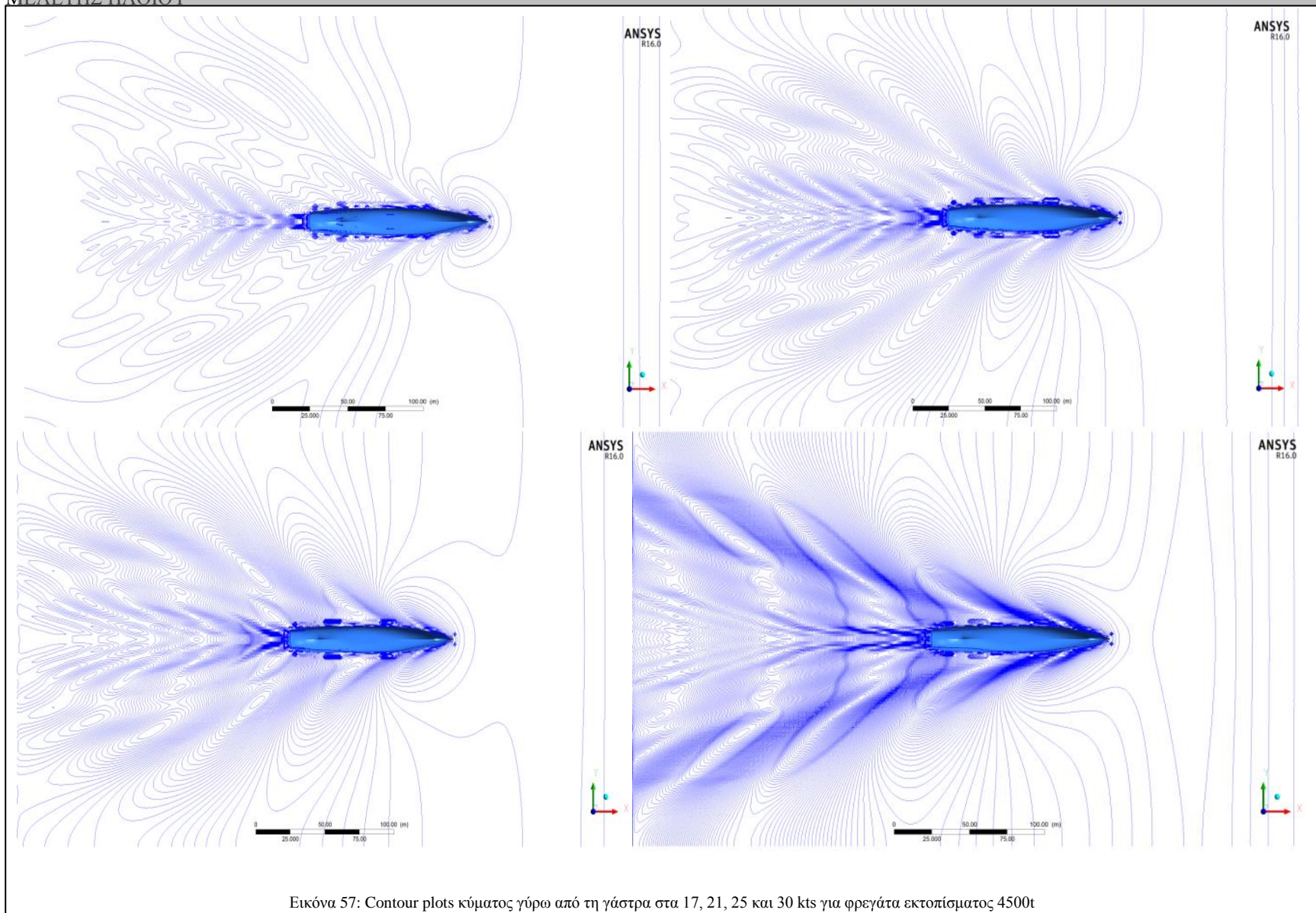
Ιδιότητες	
Mesh	Structured with re-processed free surface/fore-aft adapted grid
No of Nodes	~ 6.5M
y^+ hull	~ 0-1000 (full scale model)
Physics	Ομογενής διαφασική ροή αέρα/νερού, κ-ω Shear Stress Transport μοντέλο τύρβης, μοντέλο διαφοράς άντωσης-πυκνότητας, τυπικό μοντέλο ελεύθερης επιφάνειας
Συνοριακές συνθήκες	
Inlet	Είσοδος με δεδομένο volume fraction, ταχύτητα πλεύσης (17, 21, 25 και 30 Kts)
Outlet	Έξοδος με δεδομένο volume fraction
Bottom/Side wall	Free Slip condition
Hull Wall	No slip condition
Solver	
Convergence	Residuary type $RMS < 10^{-4}$
Pressure-Velocity Scheme	Coupled
Pressure Spatial Discretization	Body Force Weighted
VF Spatial Discretization	BGM
Turbulence Kinetic Energy	Second Order
Processing	
System	Intel 64 bit / Multi Parallel (8 core 8GB)

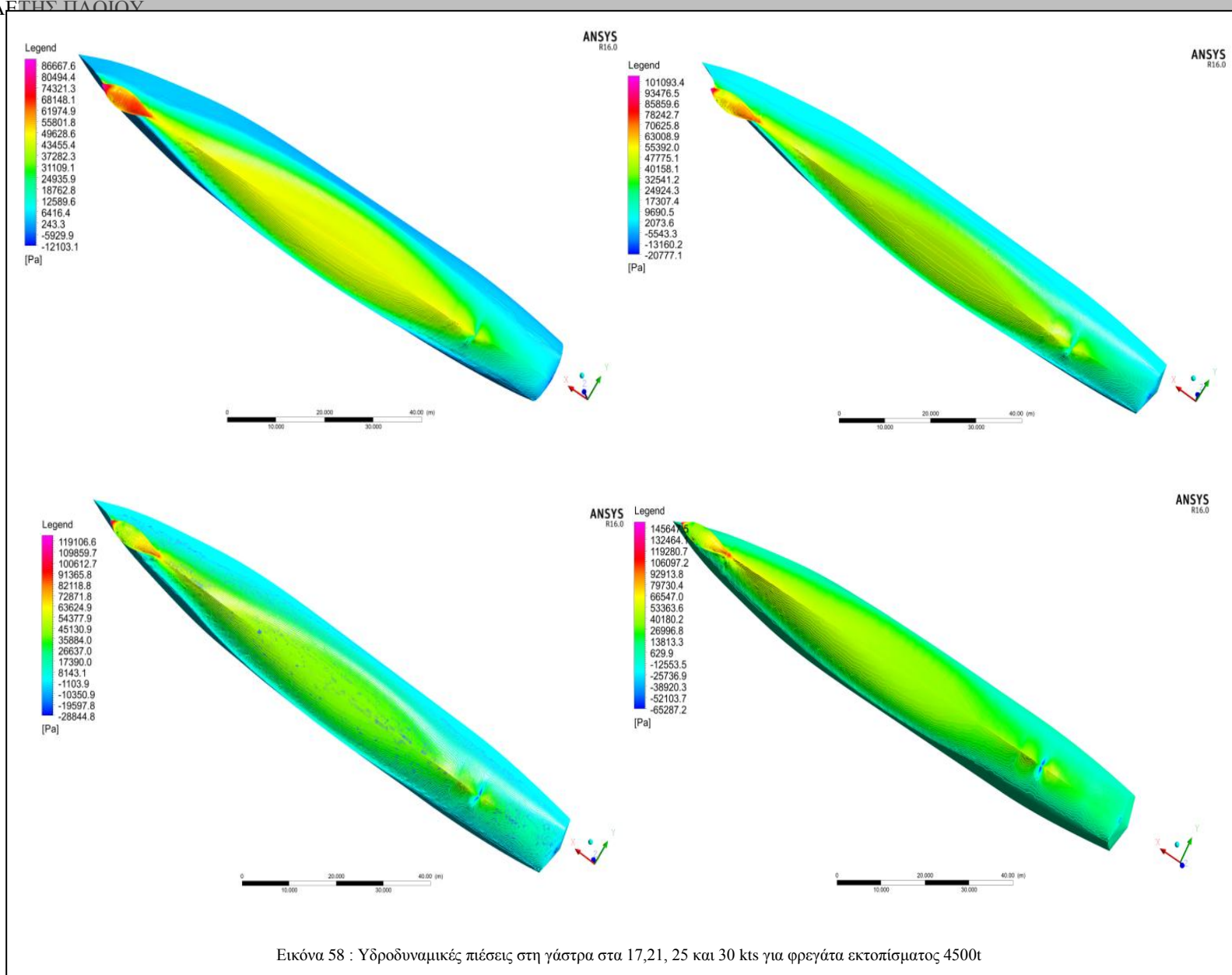
6.4.2 Αποτελέσματα Επίλυσης

Τα εποπτικά αποτελέσματα από την επίλυση του μοντέλου και η ροή στην ελεύθερη επιφάνεια του νερού, παρουσιάζονται ακόλουθα:

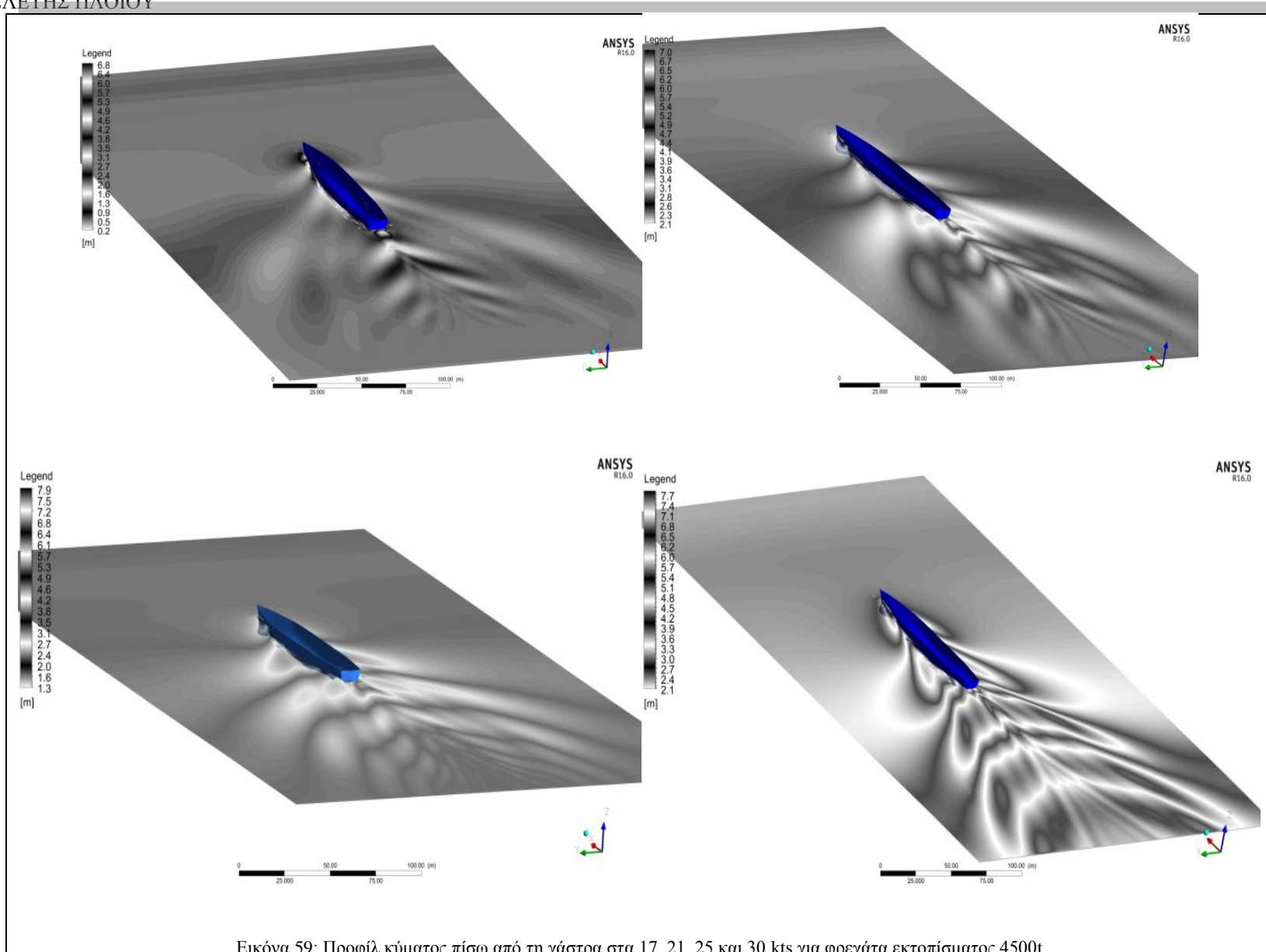


Εικόνα 56: Ύψος κύματος γύρω από τη γάστρα στα 17, 21, 25 και 30 kts για φρεγάτα εκτοπίσματος 4500t

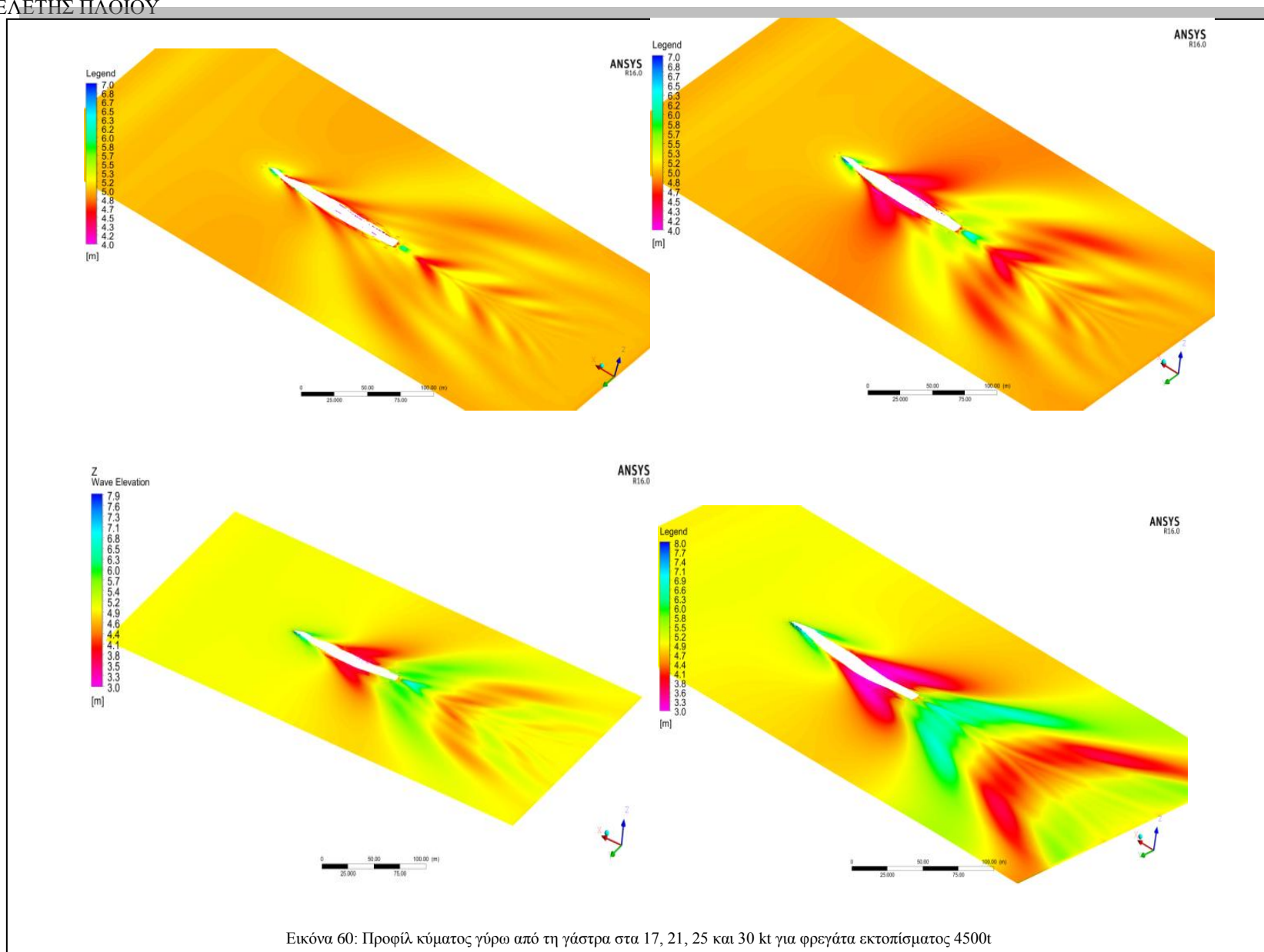




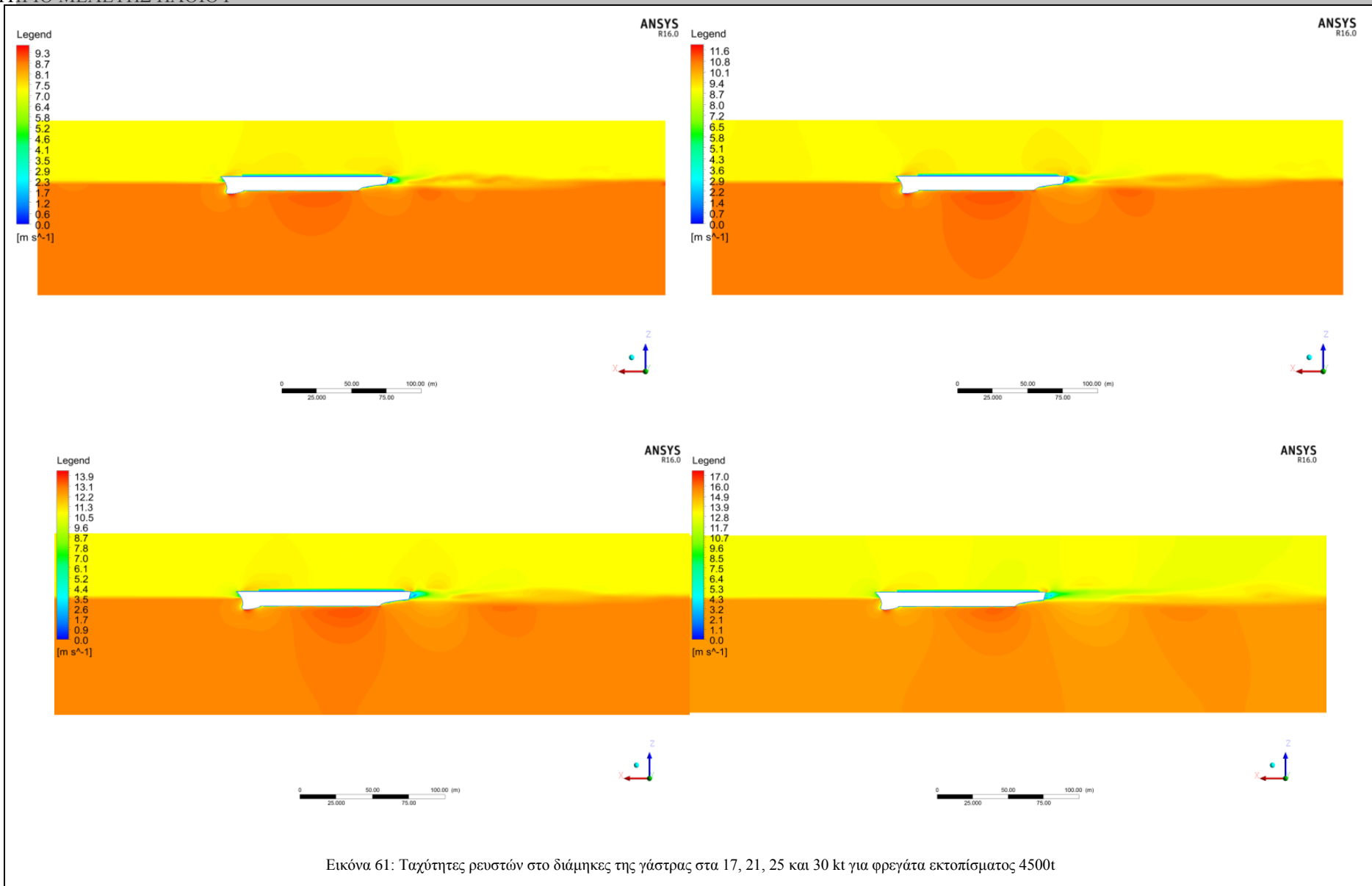
Εικόνα 58 : Υδροδυναμικές πιέσεις στη γάστρα στα 17,21, 25 και 30 kts για φρεγάτα εκτοπίσματος 4500t



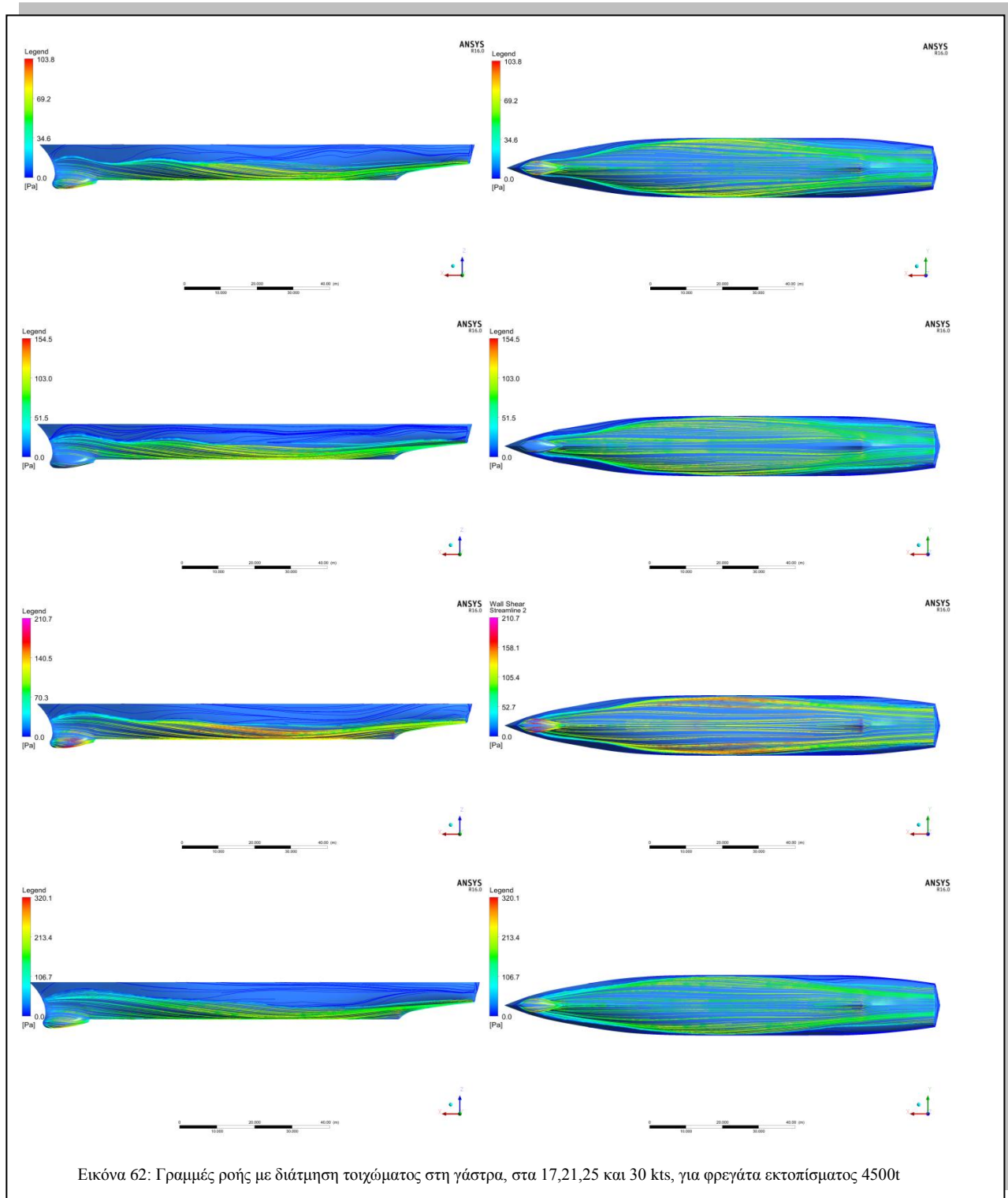
Εικόνα 59: Προφίλ κύματος πίσω από τη γάστρα στα 17, 21, 25 και 30 kts για φρεγάτα εκτοπίσματος 4500t



Εικόνα 60: Προφίλ κύματος γύρω από τη γάστρα στα 17, 21, 25 και 30 kt για φρεγάτα εκτοπίσματος 4500t



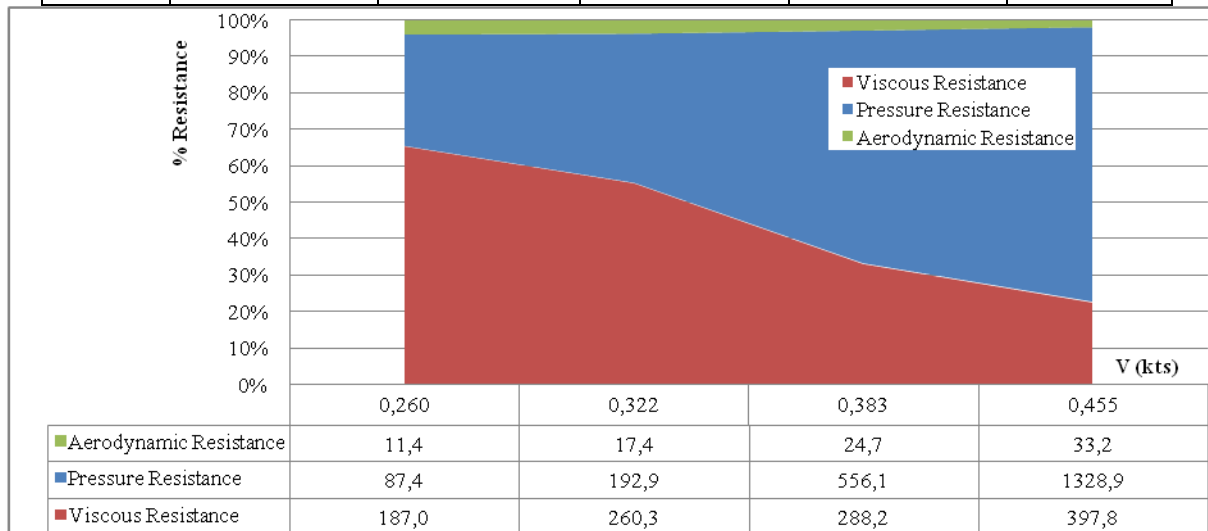
Εικόνα 61: Ταχύτητες ρευστών στο διάμηκες της γάστρας στα 17, 21, 25 και 30 kt για φρεγάτα εκτοπίσματος 4500t



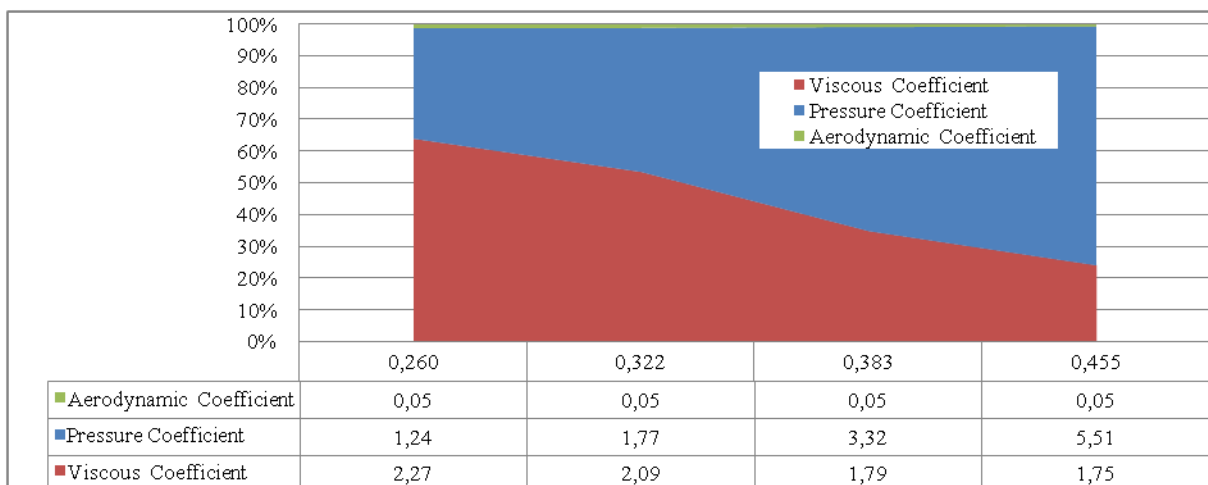
Σε ότι αφορά στην αντίσταση ρυμούλκησης, από τα αποτελέσματα του μοντέλου, με χρήση του μοντέλου τύρβης κ-ω Shear Stress Transport, προκύπτουν οι ακόλουθες τιμές αντίστασης του μοντέλου (drag). Σημειώνεται ότι, σύμφωνα με την ορολογία του Ansys/Fluent, η αντίσταση πίεσης (pressure) αντιστοιχεί στην υπόλοιπη αντίσταση (residual - αντίσταση κυματισμού, κλπ.), ενώ η αντίσταση τριβής περιλαμβάνει και την αντίσταση μορφής.

Πίνακας 56: Αντίσταση και Ισχύς Ρυμούλκησης Ansys/Fluent

Speed	Pressure Resistance	Viscous Resistance	Aerodynamic Resistance	Total Hydrodynamic Resistance	Propulsion Power
17	87.4	187.0	11.4	263.0	3127.41
21	192.9	260.3	17.4	435.8	6401.043
25	556.1	288.2	24.7	819.6	14331.45
30	1328.9	397.8	33.2	1693.4	35533.76



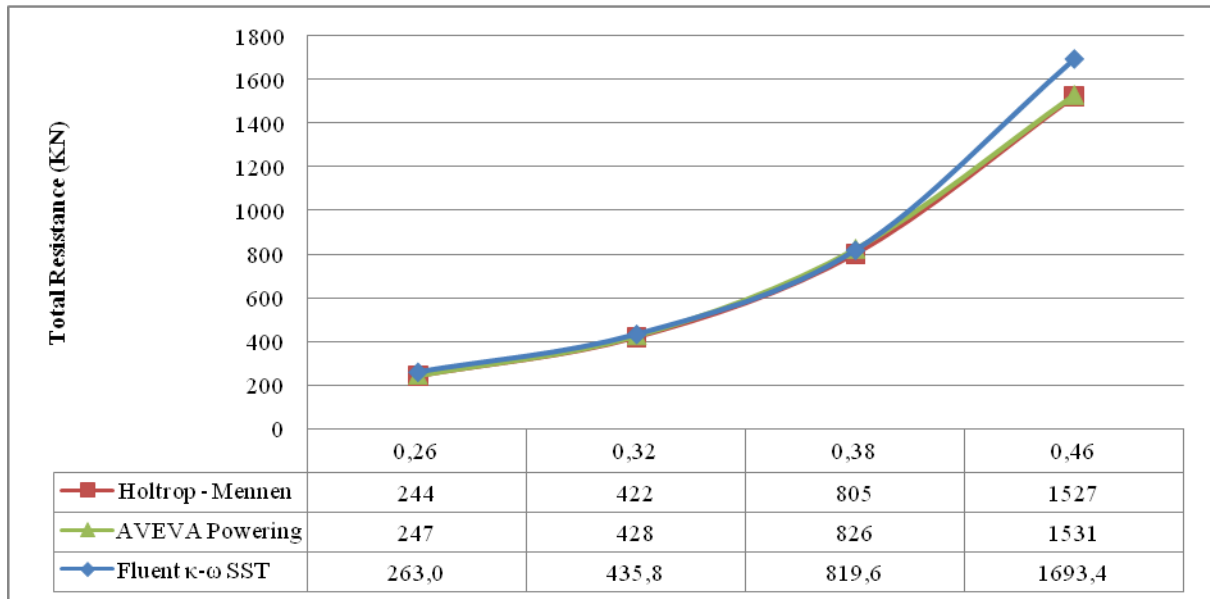
Εικόνα 63: Συνιστώσες Ολικής Αντίστασης



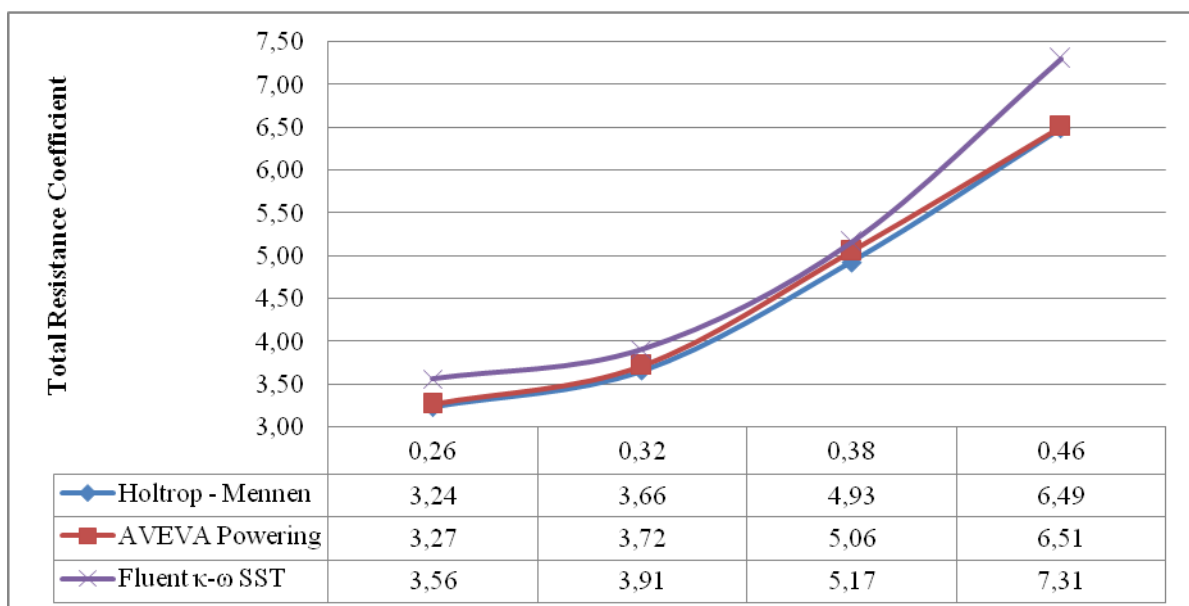
Εικόνα 64: Συνιστώσες Ολικού Συντελεστή Αντίστασης

6.5 Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων

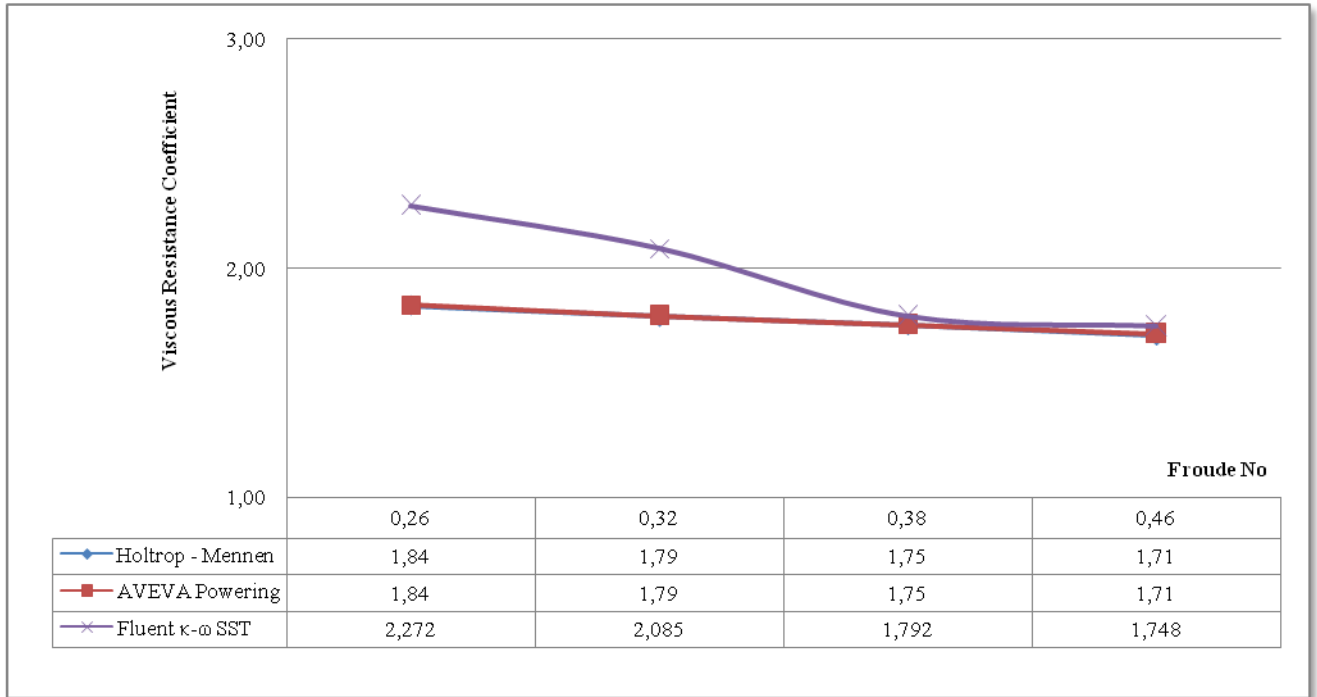
Από τους παραπάνω υπολογισμούς προκύπτουν οι ακόλουθες τιμές αντίστασης για το υπό σχεδίαση πλοίο. Σημειώνεται ότι για λόγους σύγκρισης των αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα της μεθόδου Holtrop-Mennen, έχει αφαιρεθεί η αεροδυναμική αντίσταση από τα αποτελέσματα του Ansys/Fluent και έχει προστεθεί στην συνολική αντίσταση η αντίσταση προσαρτημάτων της Holtrop, για λόγους σύγκρισης.



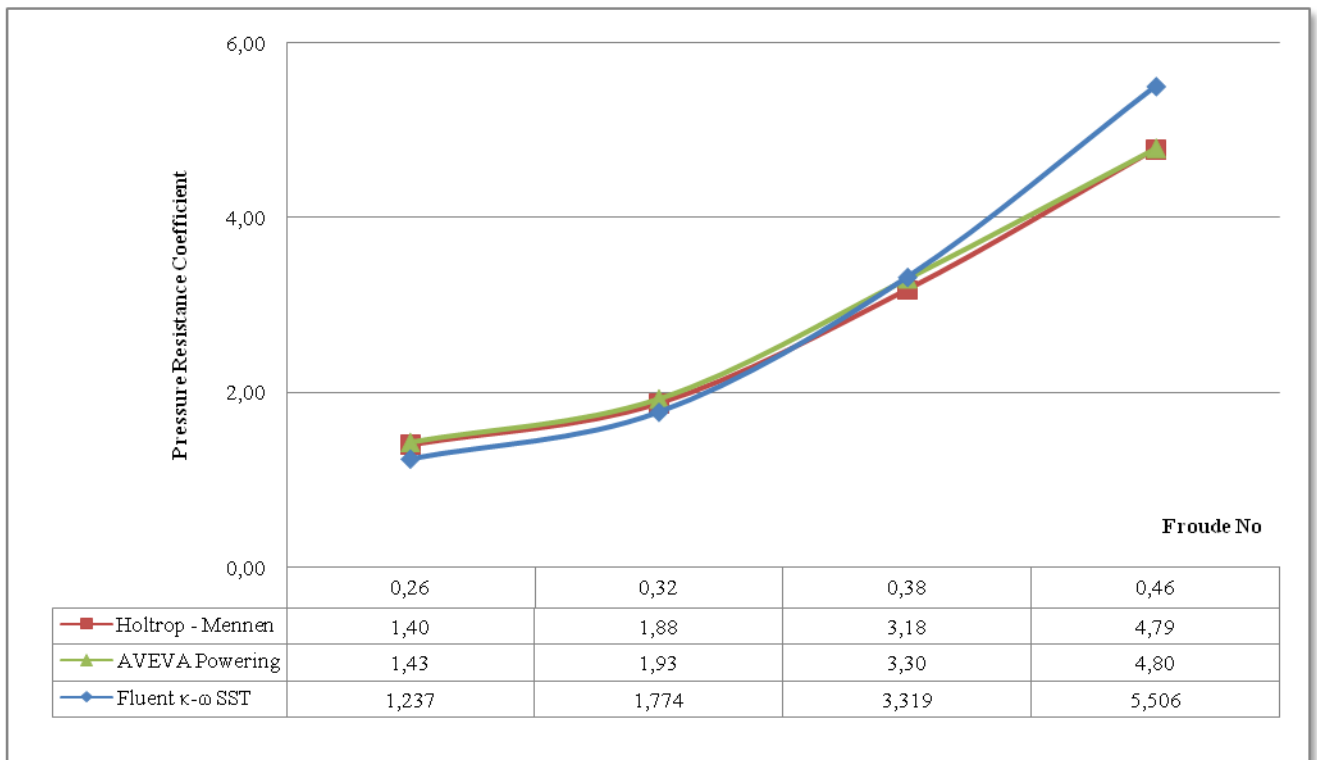
Εικόνα 65: Ολική Αντίσταση Πλοίου



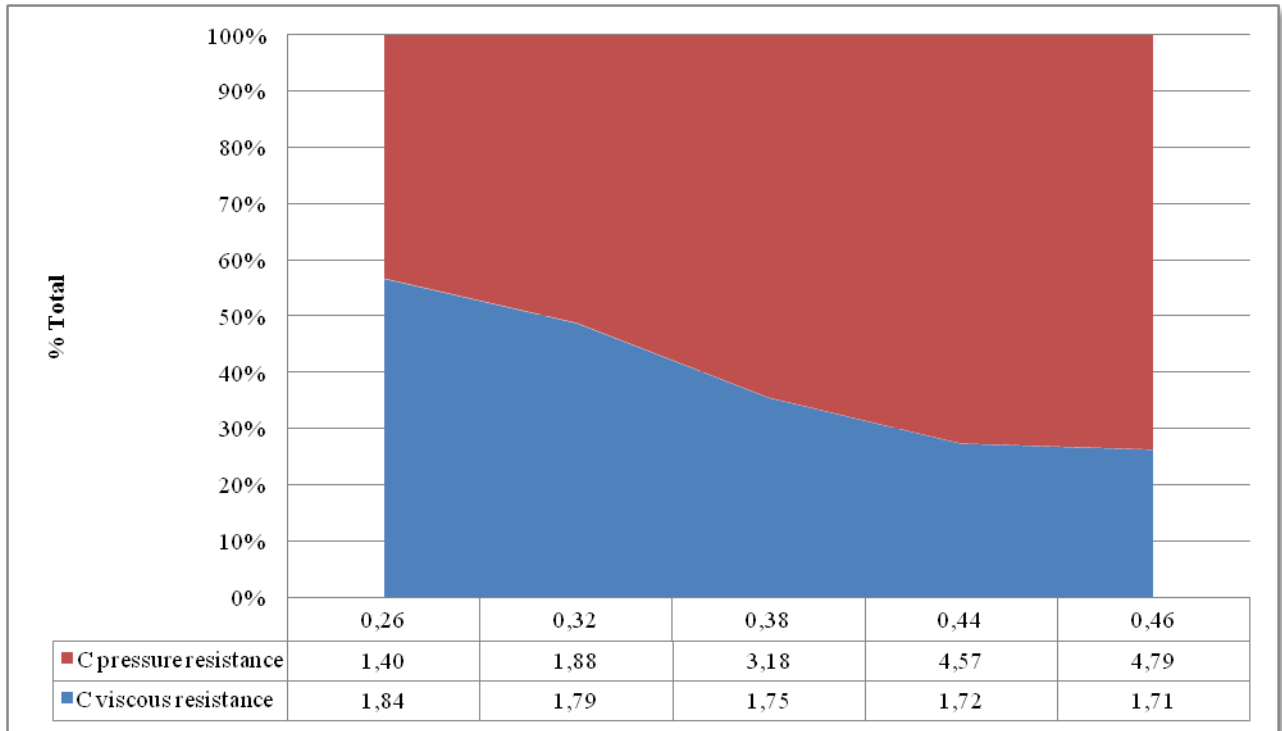
Εικόνα 66: Συντελεστής Ολικής Αντίστασης C_T



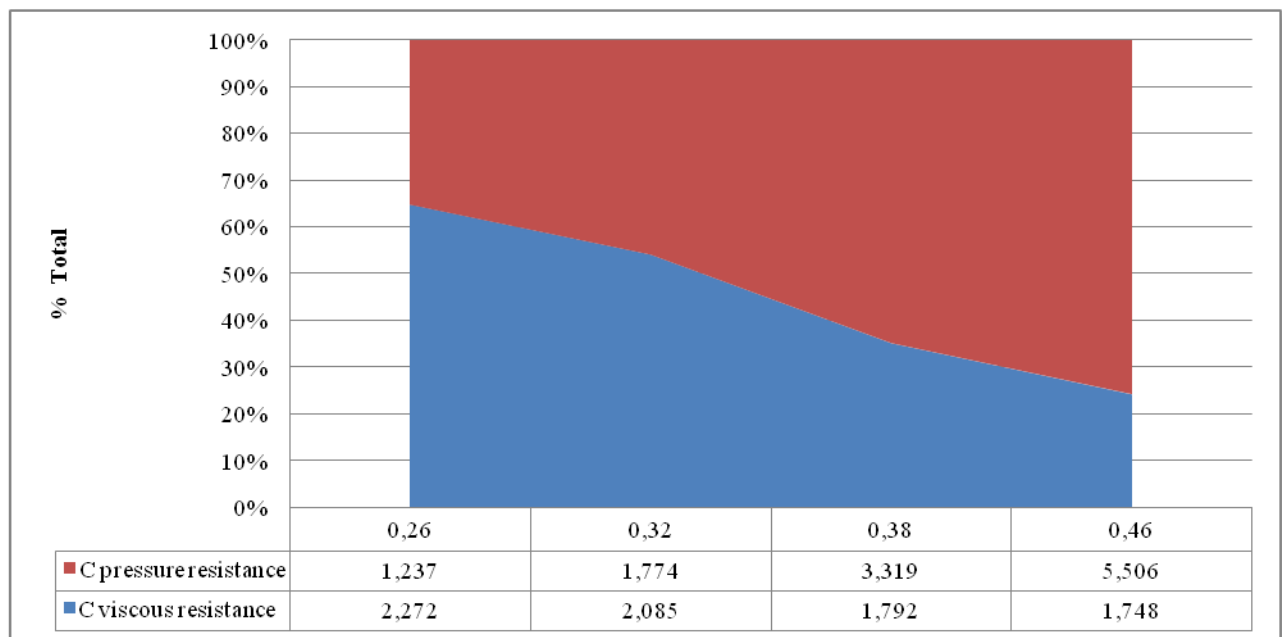
Εικόνα 67: Συντελεστής Αντίστασης Τριβής C_F



Εικόνα 68: Συντελεστής Αντίστασης Πίεσης C_R



Εικόνα 69: Κατανομή συντελεστών αντίστασης στη μέθοδο Holtrop-Mennen/AVEVA ανά Froude Number



Εικόνα 70: Κατανομή συντελεστών αντίστασης στη μέθοδο Fluent k- ω SST ανά Froude Number

Διαπιστώνεται μια σύγκλιση των τιμών της αντίστασης μεταξύ των δύο μεθόδων (Holtrop – CFD), τόσο στην οικονομική όσο και στην μέγιστη ταχύτητα. Οι αναλυτικές αποκλίσεις στις τιμές της αντίστασης, παρουσιάζονται ακόλουθα:

Πίνακας 57: Αποκλίσεις αποτελεσμάτων αντίστασης

V [kn]	F _n	Holtrop	κ-ω SST	CFD vs Holtrop
17	0.26	244	263	7.61%
21	0.32	422	435.8	3.23%
25	0.38	805	819.6	1.86%
30	0.46	1527	1693.4	10.93%

Ενώ οι αντίστοιχες αποκλίσεις τιμών στις τιμές του ολικού συντελεστή αντίστασης παρουσιάζονται ακόλουθα:

Πίνακας 58: Απόκλιση αποτελεσμάτων συντελεστή ολικής αντίστασης

F _n	Holtrop	κ-ω SST Total	κ-ω a SST Hydro	CFD vs Holtrop
0.26	3.24	3.56	3.51	8.42%
0.32	3.66	3.91	3.86	5.33%
0.38	4.93	5.17	5.11	3.74%
0.46	6.49	7.31	7.25	11.75%

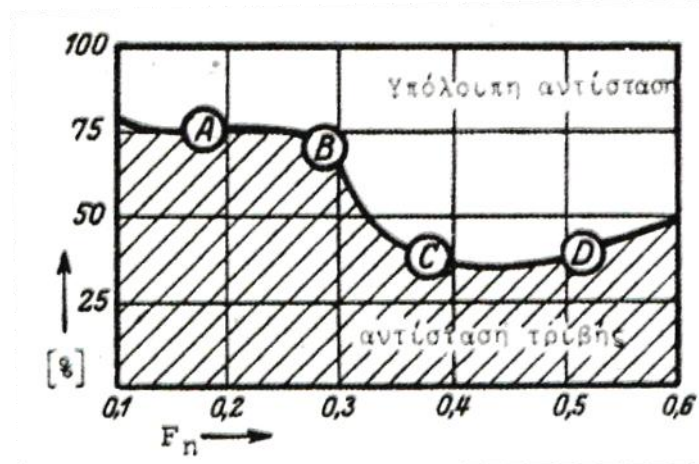
Σε ότι αφορά όμως στις επιμέρους συνιστώσες της αντίστασης, διακρίνεται μικρή διαφορά (έως 11.7%) μεταξύ των απολύτων τιμών των συνιστωσών, λαμβάνοντας υπόψη ότι μεταξύ των μεθόδων διαφοροποιείται:

- ο υπολογισμός της υπόλοιπης (pressure) αντίστασης η οποία στην περίπτωση του CFD υπολογίζεται αναλυτικά, σύμφωνα με την υπολογιζόμενη πίεση της ροής στην επιφάνεια της γάστρας, ως αποτέλεσμα της αναπτυσσόμενης ροής και τύρβης.
- η βρεχόμενη επιφάνεια, καθότι στη μέθοδο Holtrop λαμβάνεται σταθερή, ενώ στο CFD υπολογίζεται με βάση το ύψος του κυματισμού κατά μήκος του πλοίου, όπως αυτό μεταβάλλεται από τη ροή και προβάλλεται στην εικόνα 63.

Σε ότι αφορά στην αυξημένη τιμή του συντελεστή αντίστασης στην περιοχή ταχυτήτων F_n=0.46, και στην απόκλιση από την μέθοδο Holtrop κατά 11%, εκτιμάται ότι αυτή οφείλεται στους εξής πιθανούς λόγους:

- Στην ακρίβεια των τιμών της μεθόδου Holtrop σε ταχύτητες αναφοράς με F_n>0.45 όπου, σύμφωνα με τα αναφερόμενα στην παρ.6.1, τα αποτελέσματα σε αυτές τις περιοχές ταχυτήτων χρήζουν επισκόπησης.
- Στην υφιστάμενη διακριτοποίηση και στην ανάγκη περαιτέρω μείωσης του y+ ώστε να βελτιωθεί η ακρίβεια των αποτελεσμάτων και ο υπολογισμός φαινομένων στο οριακό στρώμα.

- Στην μείωση της βρεχόμενης επιφάνειας στο υπολογιστικό μοντέλο σε σχέση με τη σταθερή βρεχόμενη επιφάνεια της μεθόδου Holtrop, όπως φαίνεται στην εικόνα 63.
- Στην ληφθείσα τιμή της έντασης τύρβης ελεύθερης επιφανείας, συμφώνως του [18].



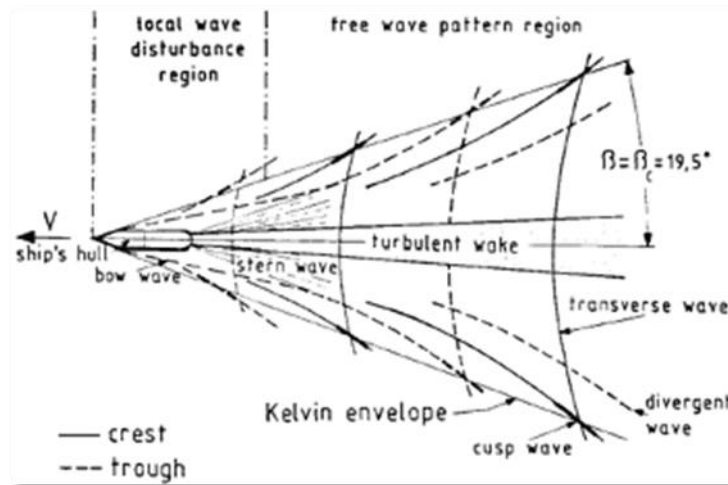
Εικόνα 71: Κατανομή συνιστωσών ολικής αντίστασης [4]

Ως εκ τούτου, η άμεση σύγκριση των τιμών είναι σχετική και εμπεριέχει σφάλμα μεθόδου (mesh grid, y+, κλπ.) το οποίο δύναται να αξιολογηθεί με την εκτέλεση συναφών πειραματικών μετρήσεων (πείραμα σε δεξαμενή). Η εξέταση της ποσοστιαίας κατανομής των συνιστωσών επί της συνολικής αντίστασης διαφαίνεται περισσότερο ρεαλιστική. Μια τυπική κατανομή των συνιστωσών της αντίστασης είναι η κατανομή του F.Horn (1930) [4], η οποία παρατίθεται στην εικόνα 71.

Από την εν λόγω κατανομή προκύπτει ότι στην περιοχή του $F_n=0.26$, για πλοία τύπου φρεγάτας, η αντίσταση τριβής αποτελεί την κυρίαρχη αντίσταση με ποσοστό άνω του 65-70%, η οποία μειώνεται στο 30-35% σε $F_n=0.45$ λόγω της σημαντικής αύξησης της αντίστασης κυματισμού (μέρος της υπόλοιπης αντίστασης). Από τα αποτελέσματα της παρούσας ανάλυσης προκύπτει ότι:

- Στην μέθοδο Holtrop η αντίσταση τριβής αντιστοιχεί στο 56% της ολικής αντίστασης στην οικονομική ταχύτητα, ενώ μειώνεται όσο αυξάνει ο αριθμός Froude έως την τιμή 26% της ολικής.
- Ομοίως από τους υπολογισμούς με το Ansys/Fluent, η αντίσταση τριβής στην οικονομική ταχύτητα αντιστοιχεί στο 65% της ολικής αντίστασης μειώνεται όμως στο 24% στην ταχύτητα μάχης, γεγονός που αποδίδεται στην επίδραση των φαινομένων της τύρβης στην αντίσταση κυματισμού.

Εντούτοις, μόνο με πειραματικούς τρόπους είναι εφικτή η επαλήθευση των αποτελεσμάτων του Ansys/Fluent, της αντίστασης κυματισμού και του λογισμού της έντασης τύρβης στα επίπεδα που καθορίζεται στο [18] ($5.265 \cdot 10^{-6}$).

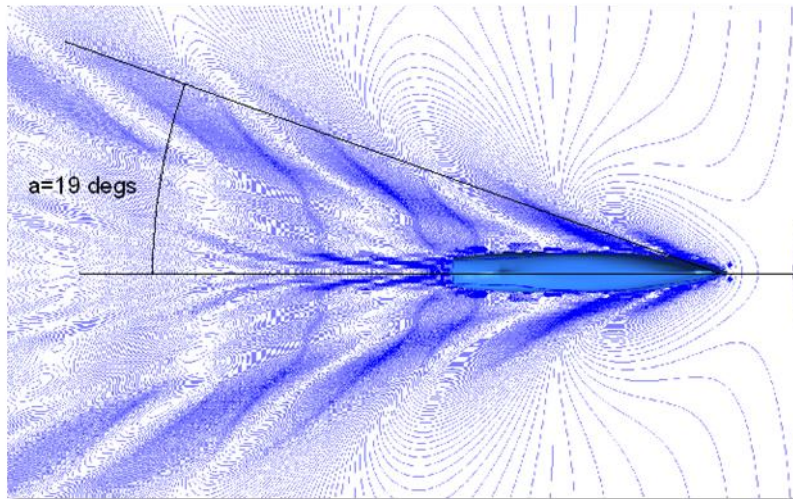


Εικόνα 72: Kelvin wave envelope [1]

Σε ότι αφορά στους αναπτυσσόμενους κυματισμούς γύρω και πίσω από το πλοίο διαπιστώνεται ότι, όπως προκύπτει από τις εικόνες 57 και 58, συγκλίνουν στο σύστημα κυματισμών κατά Kelvin (Kelvin wave envelope) το οποίο σχηματίζεται γύρω από ένα σημείο διαταραχής της πίεσης (γάστρα) ευθύγραμμα κινούμενο στην επιφάνεια του νερού και αποτελείται από την υπέρθεση δύο συστημάτων κυματισμών:

- Των εγκαρσίων κυματισμών, οι οποίοι ακολουθούν το ευθύγραμμα κινούμενο σύστημα σημείο διαταραχής της πίεσης (γάστρα).
- Των αποκλινόντων κυματισμών, που διαχέονται εκατέρωθεν της γάστρας.

Οι κυματισμοί συναντώνται, σχηματίζοντας τον φάκελο κυματισμών (wave envelope) ο οποίος περικλείεται σε λωρίδα που σχηματίζει με τον διαμήκη άξονα της γάστρας (εικόνα 73) γωνία 19° .



Εικόνα 73: Σύστημα κυματισμών κατά Kelvin σε $F_n=0.46$

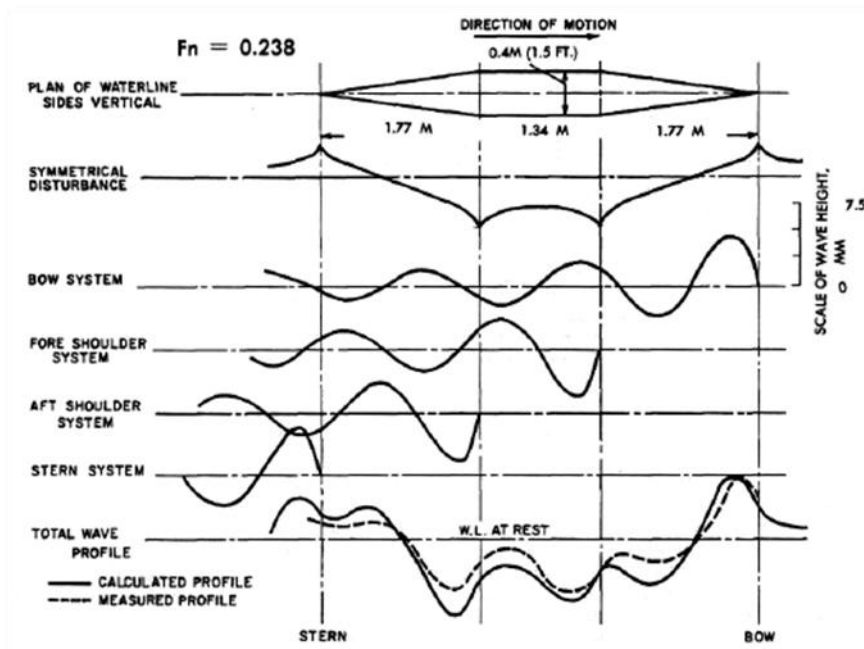
Πίσω από τη γάστρα εμφανίζεται turbulence wake (απόνερα σε τυρβώδη ροή), η ένταση και έκταση του οποίου διευκρινίζεται στην εικόνα 62. Συγκεκριμένα:

- Στην πρύμνη παρουσιάζεται αποκόλληση του οριακού στρώματος με φαινόμενα ανακυκλοφορίας (μηδενικές ταχύτητες ροής) τα οποία εντείνονται με την αύξηση της ταχύτητας.
- Το wake field αυξάνεται σε μήκος και συνολική επιφάνεια, με την αύξηση της ταχύτητας του πλοίου, από ένα μήκος πλοίου στα 17 kts, σε περισσότερα από δύο μήκη πλοίου στα 30 kts. Παράλληλα, αυξάνεται και η ανάμειξη φάσεων αέρα-νερού.
- Όσο αυξάνεται η ταχύτητα του πλοίου, τα σημεία μέγιστης ταχύτητας του νερού στη γάστρα μετατοπίζονται προς την πρύμνη, γεγονός που οδηγεί σε αυξημένες υδροστατικές πιέσεις της γάστρας στα οπίσθια σημεία σύμφωνα και με τα αποτελέσματα της εικόνας 59.

Αναλύοντας περαιτέρω την αντίσταση κυματισμού και μελετώντας τις γραμμές ροής του νερού γύρω από τη γάστρα, όπως παρουσιάζονται στην εικόνα 63, αλλά και την ένταση της τριβής τοιχώματος (wall shear), προκύπτουν οι ακόλουθες εκτιμήσεις:

- Σε χαμηλές ταχύτητες πλεύσης (17 kts) διακρίνονται το πρωραίο σύστημα κυματισμού, το σύστημα κυματισμού της πρωραίας παρειάς αλλά και το σύστημα της πρυμναίας παρειάς, σύμφωνα με τις προβλέψεις κατά Wigley [4] που παρουσιάζονται στην εικόνα 74.
- Όσο αυξάνεται η ταχύτητα πλεύσης, τα μήκη κύματος των παραγόμενων κυματισμών αυξάνονται και μεταβάλλονται οι κορυφές – κοιλάδες των επιμέρους συστημάτων, οι οποίες και μετατοπίζονται κατά μήκος του πλοίου.

- Όταν οι αλληλεπιδράσεις των επιμέρους συστημάτων οδηγήσουν στην εμφάνιση κυμάτων μεγάλου ύψους στην πλώρη, όπως στην ταχύτητα των 30 kts, η αντίσταση κυματισμού αυξάνει σημαντικά.
- Στην ταχύτητα που οι κυματισμοί συγκλίνουν σε κύμα με μεγάλο ύψος στην πλώρη, εμφανίζεται συγκέντρωση της ροής στην πρύμνη στην περιοχή του keel με συνέπεια την αποκόλληση της ροής στα άκρα του transom, γεγονός που ήταν αναμενόμενο λόγω του βυθίσματος της πρύμνης, όπως αναφέρθηκε στην παρ. 3.2.
- Τα σημεία στα οποία η αντίσταση εμφανίζει ακρότατα επί της γάστρας, για κάθε ταχύτητα, είναι τα σημεία της εικόνας 63, όπου η τιμή της τριβής τοιχώματος μεγιστοποιείται.



Εικόνα 74: Σύστημα κυματισμών για ένα διπλά σφηνοειδές πρότυπο σκάφος κατά Wigley [4]

7. Υδροδυναμική Ανάλυση – Συμπεριφορά Πλοίου σε Κυματισμούς (Seakeeping)

Τα πλοία σπάνια λειτουργούν σε περιβάλλον με ήρεμο νερό. Συνήθως επιχειρούν σε περιβάλλον που μεταβάλλεται διαρκώς, ως αποτέλεσμα του περιβάλλοντος καιρού, ανέμων και κυματισμών. Αποτέλεσμα αυτών των δυναμικών φορτίσεων από το περιβάλλον του πλοίου είναι η ανάπτυξη ταχυτήτων και επιταχύνσεων που πέρα από τις δομικές φορτίσεις στην κύρια δομή του, μεταφέρονται και στο προσωπικό αποστολής, καθιστώντας την επιχειρησιακή του λειτουργία δυσχερή.

Στην περίπτωση των πλοίων με επιχειρησιακό ρόλο αντίστοιχο του υπό σχεδίαση πλοίου, σύμφωνα και με τις απαιτήσεις σχεδίασης, το πλοίο πρέπει να είναι ικανό να ανταπεξέλθει σε δυσμενείς καιρικές συνθήκες, η δε συμπεριφορά του να επιτρέπει τόσο την επιβίωσή του όσο και την επιχειρησιακή του λειτουργία, γεγονός που μεταφράζεται στην ικανοποίηση συγκεκριμένων απαιτήσεων σχεδίασης. Συγκεκριμένα, θα πρέπει να έχει πλήρη επιχειρησιακή ικανότητα σε κατάσταση θάλασσας τουλάχιστον 6, γεγονός που επιβάλλει συγκεκριμένες απαιτήσεις σε ότι αφορά στις αποδεκτές επιταχύνσεις που δέχεται το πλήρωμα και τα οπλικά συστήματα, στις θέσεις επιχειρησιακής λειτουργίας, σε ανάλογες συνθήκες.

Για το λόγο αυτό, απαιτείται η μελέτη αξιοπλοΐας του σκάφους στο φυσικό του περιβάλλον, δηλαδή στην θάλασσα στην οποία θα πλέει και μάλιστα στις εκτιμώμενες καταστάσεις θάλασσας και κυματισμού. Ιδιαίτερα σε ένα πολεμικό σκάφος, το οποίο πρέπει να έχει και πλεονέκτημα έναντι του εχθρικού σκάφους, η θάλασσα πρέπει να αποτελεί ένα προβλέψιμο και μοντελοποιημένο παράγοντα.

7.1 Συμπεριφορά Πλοίου σε Κυματισμούς (Seakeeping)

Σημαντικός παράγοντας κατά την μελέτη και σχεδίαση ενός πλοίου είναι η απόκρισή του σε θαλασσίους κυματισμούς. Το πλοίο θεωρείται ως ένα συμπαγές επιπλέον σώμα, του οποίου οι κινήσεις μπορούν να μοντελοποιηθούν με την χρήση ενός αδρανειακού συστήματος, ακίνητου ως προς την γη, ενός κινούμενου συστήματος το οποίο κινείται με την μέση ταχύτητα του πλοίου και ενός σωματοπαγούς, το οποίο παρακολουθεί τις κινήσεις του πλοίου και είναι σταθερά συνδεδεμένο με αυτό. Η απόκριση του πλοίου σε θαλάσσιο περιβάλλον, μπορεί να μοντελοποιηθεί με τις κινήσεις σε έξι βαθμούς ελευθερίας, και τις

αντίστοιχές ταχύτητες και επιταχύνσεις που προκύπτουν από τις πρώτες και δεύτερες παράγωγους των κινήσεων.

Οι έξι βαθμοί ελευθερίας (6DOF) κίνησης του πλοίου, ως προς το αδρανειακό σύστημα, είναι:

- Διαμήκης οριζόντια ταλάντωση (surge)
- Εγκάρσια οριζόντια ταλάντωση (sway)
- Κατακόρυφη ταλάντωση (heave)
- Διατοιχισμός (roll)
- Πρόνευτασμός η πρόνευση (pitch)
- Στροφική οριζόντια ταλάντωση (yaw)

Αυτοί οι έξι βαθμοί ελευθερίας μπορούν να περιγράψουν πλήρως τις κινήσεις του πλοίου σε θαλάσσιο περιβάλλον και συνιστούν τις υδροδυναμικές αποκρίσεις σε ένα εξωτερικό διεγέρτη, ο οποίος είναι ο κυματισμός της θάλασσας. Οι ταχύτητες και οι επιταχύνσεις, ως παράγωγοι αυτών των βαθμών ελευθερίας, αποτελούν και αυτές υδροδυναμικές αποκρίσεις που μαζί με τις παραπάνω κινήσεις περιγράφουν πλήρως την απόκριση του πλοίου στην εξωτερική, κυματική διέγερση.

7.2 Δυναμική Απόκριση Πλοίου

Στο σύγχρονο πεδίο σχεδίασης πλοίου, για την μελέτη της δυναμικής απόκρισης του σε εξωτερικά, δυναμικά επιβαλλόμενα φορτία όπως οι κυματισμοί, χρησιμοποιούνται μια σειρά στατιστικών μεγεθών τα οποία είναι ικανά να προβλέψουν την αναμενόμενη απόκριση σε δεδομένη φασματική φόρτιση.

Συγκεκριμένα, σύμφωνα με τις προβλέψεις της δυναμικής συστημάτων, οι εξισώσεις κίνησης του πλοίου, υπό φασματική φόρτιση κύματος, σε μητρική μορφή είναι:

$$(M + A(\omega))\ddot{x} + B(\omega)\dot{x} + Cx = F(\omega)$$

Όπου:

- x οι βαθμοί ελευθερίας (6DOF)

- ω η συχνότητα ταλάντωσης
- M η μάζα του πλοίου
- A η πρόσθετη (αδρανειακή) μάζα του πλοίου
- B η γραμμική απόσβεση του πλοίου και
- C η υδροστατική απόκριση του πλοίου
- F η αρμονική φόρτιση κυματισμού

Επιλύοντας ως προς x και μετά από κατάλληλους μετασχηματισμούς, προκύπτει ότι:

$$RAO_i(\omega) = \frac{x_i}{\zeta_a} = \frac{F_{0,i}}{C - (M + A(\omega))\omega^2 + iB(\omega)\omega_n}$$

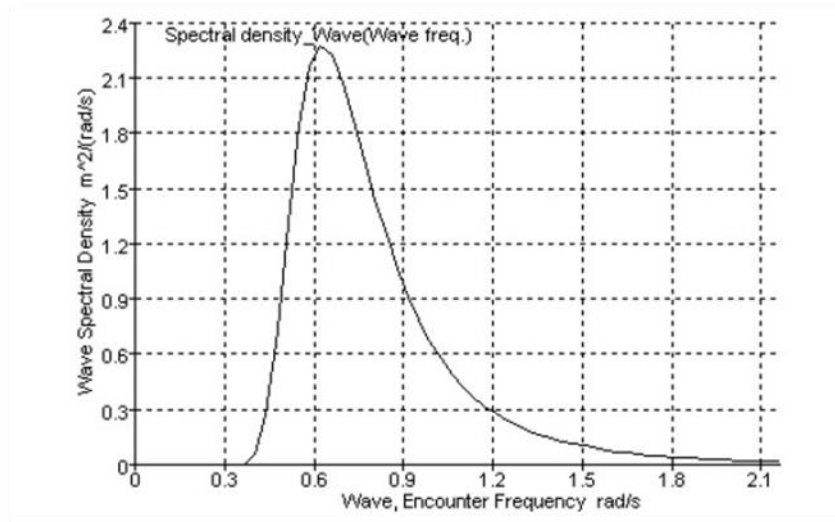
Οι συναρτήσεις μεταφοράς RAO (Response Amplitude Operators) αποτελούν στατιστικά μηχανικά μεγέθη τα οποία αποτυπώνουν την απόκριση του πλοίου στους βαθμούς ελευθερίας κίνησης (υπάρχουν δηλαδή οι RAO_{heave} , RAO_{sway} , RAO_{surge} , κ.α), για κάθε μελετώμενη συχνότητα κυματισμού. Συνεπώς, με τους RAO ο σύγχρονος ναυπηγός διαθέτει ένα ικανό εργαλείο αξιολόγησης της δυναμικής απόκρισης του πλοίου στις διάφορες καταστάσεις θαλάσσης, για την βελτιστοποίηση της σχεδίασής του π.χ. την αξιολόγηση της επιχειρησιακής δυνατότητας του προσωπικού στο κύριο κατάστρωμα. Συνεπώς, ανάλογα με την κατηγορία του υπό σχεδίαση πλοίου, η έμφαση μετατοπίζεται στα χαρακτηριστικά που επιδρούν στη βασική επιχειρησιακή του λειτουργία. Περαιτέρω ανάλυση της συναφούς με το θέμα θεωρίας, παρέχεται στο [1].

Σε ότι αφορά στην κυματική φόρτιση του πλοίου, διακρίνεται σε δύο βασικές κατηγορίες:

- Στα κανονικά (regular) κύματα, τα οποία αποτυπώνονται ως αρμονικά στο πεδίο των συχνοτήτων.

- Στα ακανόνιστα (irregular) κύματα, τα οποία αποτυπώνονται με κατάλληλα φάσματα που περιγράφουν τη διανομή ενέργειας κυματισμού σαν συνάρτηση της

συχνότητας κυματισμού. Η συνεχής απεικόνιση στο πεδίο συχνοτήτων, δείχνει την πυκνότητα της ενέργειας του κυματισμού ή το φάσμα ενέργειας κυματισμού.



Εικόνα 75: Τυπικό κυματικό φάσμα

Το πλήρες θεωρητικό υπόβαθρο στη θεωρία κυματισμών παρέχεται στο [2].

7.3 Υπολογιστικές Μέθοδοι

Για την μοντελοποίηση και τον υπολογισμό της δυναμικής απόκρισης ενός πλοίου, υπάρχουν διάφορες υπολογιστικές μέθοδοι, όπως :

- Η υπολογιστική ρευστομηχανική (Computational Fluid Dynamics), κλάδος της μηχανικής των ρευστών, που χρησιμοποιεί αριθμητικές μεθόδους προκειμένου να επιλύσει προβλήματα που αφορούν στην 2-D αλλά και 3-D ροή ρευστών. Η θεωρητική βάση της πλειονότητας των προβλημάτων CFD είναι οι εξισώσεις Navier – Stokes, οι οποίες περιγράφουν τη ροή ενός ρευστού και είναι:

- Οι εξισώσεις συνέχειας

$$\frac{\delta p}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0$$

- Οι εξισώσεις ορμής

$$\frac{\delta \rho U}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) = \nabla \cdot \left(-p + \mu((\nabla \theta) + (\nabla U)^T) \right) + S_M$$

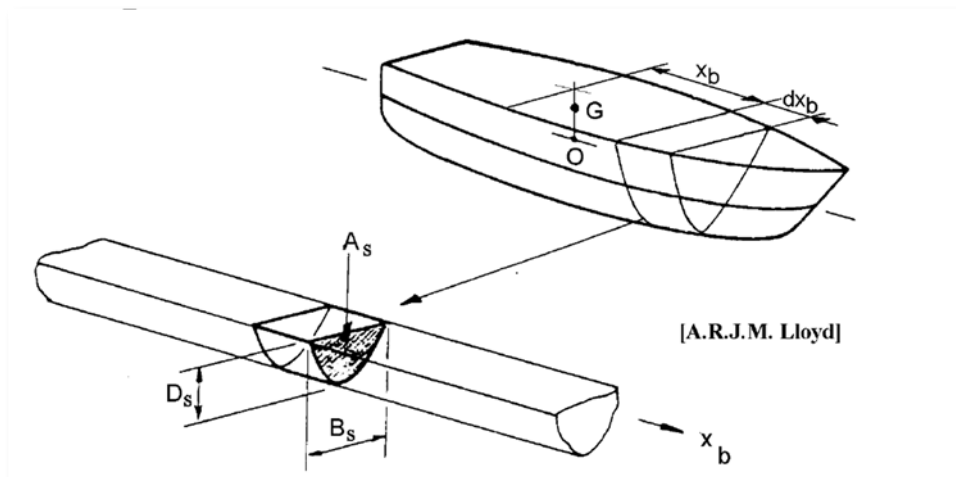
Όπου: ρ η πυκνότητα
 t ο χρόνος
 U η ταχύτητα
 p η πίεση
 μ το ιξώδες
 S_M η τυρβώδης διάτμηση

Η ροή γύρω από ένα σώμα μπορεί να περιγραφεί μαθηματικά ως συνάρτηση της πίεσης του ρευστού και των τριών συνιστωσών της ταχύτητας του. Έτσι αναπτύσσεται ένα σύνολο από εξισώσεις κίνησης, όπως οι εξισώσεις Range Average Navier – Stokes (RANS), παρουσία τύρβης (μη ιδανική ροή), που επιλύονται για δεδομένες οριακές και αρχικές συνθήκες. Λόγω όμως της πολυπλοκότητας των σχετικών μοντέλων, η μέθοδος έχει μεγάλο υπολογιστικό κόστος, πλην όμως έχει σημαντική υπολογιστική ακρίβεια καθόσον ενσωματώνει υπολογισμούς της τύρβης και του οριακού στρώματος γύρω από το σώμα, γεγονός που επιτρέπει στη μέθοδο να υποκαθιστά σταδιακά τις πειραματικές μεθόδους (πειράματα δεξαμενής) [11],[18],[31],[32],[38],[53].

Η ανωτέρω μέθοδος χρησιμοποιείται στα πλαίσια της παρούσας για τον προσδιορισμό του κυματικού πεδίου και του οριακού στρώματος γύρω από τη γάστρα του πλοίου, καθώς και για τον υπολογισμό της υδροδυναμικής (Resistance) αντίστασης των περιβαλλόντων ρευστών, στην πρόσω κίνηση του πλοίου στις ταχύτητες σχεδίασης (17 kts, 30 kts).

- Η θεωρία λωρίδων (strip theory)[1], , η οποία εισήχθηκε στην μελέτη δυναμικής συμπεριφοράς του πλοίου από τον Korvin-Kroukovsky και ως σήμερα χρησιμοποιείται με κάποιες πιο σύγχρονες παραλλαγές της, κυρίως για πλοία με λόγο $L/B > 3$ (slender body). Στην κλασική θεωρία λωρίδων, οι συνολικές αναπτυσσόμενες υδροδυναμικές δυνάμεις παράγονται με ολοκλήρωση κατά μήκος του πλοίου των συνολικών υδροδυναμικών δυνάμεων που αναπτύσσονται ανά εγκάρσια λωρίδα του πλοίου (και υπολογίζονται με χρήση της θεωρίας δυναμικού) παραλείποντας τις αλληλεπιδράσεις της ροής μεταξύ των διάφορων λωρίδων. Με άλλα λόγια, ολοκληρώνονται κατά μήκος του πλοίου υδροδυναμικά μεγέθη, που προκύπτουν από την λύση δισδιάστατων (2D) προβλημάτων, με σκοπό τον προσδιορισμό των δυναμικών ταχύτητας της ροής, των υδροδυναμικών συντελεστών κίνησης αλλά και των:

- Δυνάμεων Froude-Krylov, που προκύπτουν από την κατανομή των πιέσεων στον αδιατάρακτο όγκο της γάστρας του πλοίου.
- Δυνάμεων περίθλασης, που προκαλούνται από πιέσεις στην επιφάνεια της θάλασσας λόγω της παρουσίας του πλοίου.
- Δυνάμεων ακτινοβολίας, που περιγράφουν το ενεργειακό περιεχόμενο που μεταφέρεται κατά την κίνηση του πλοίου στο ρευστό.



Εικόνα 76: Δισδιάστατη λωρίδα υποδιαίρεσης στη θεωρία λωρίδων

Η μέθοδος εμφανίζει ικανοποιητικά αποτελέσματα με σχετικά μικρό υπολογιστικό κόστος, η βασική όμως κριτική της επικεντρώνεται στην ακρίβεια των παραγόμενων αποτελεσμάτων, τα οποία:

- αγνοούν τα φαινόμενα τύρβης
- εμφανίζουν αδικαιολόγητα peaks απόκρισης, ιδιαίτερα σε μικρές συχνότητες συνάντησης κυματισμού (πλησίον του μηδενός), σε ακολουθούντες ή πλάγιους ακολουθούντες κυματισμούς.

Η μέθοδος χρησιμοποιείται στα πλαίσια της παρούσας για τον υπολογισμό των αποκρίσεων του πλοίου σε κυματικές διεγέρσεις. Με το λογισμικό AVEVA Seakeeping, υπολογίζονται για μια σειρά από ταχύτητες και κυματισμούς οι δυναμικές αποκρίσεις του πλοίου. Επισημαίνεται ότι, οι αποκρίσεις που υπολογίζονται λαμβάνονται με το πλοίο σε κίνηση (17 kts, 30 kts) αλλά και ακίνητο (free floating). Οι διεγέρσεις του πλοίου σε κανονικό κυματισμό

υπολογίζονται με βάση τη θεώρηση του Score και όχι του Vugts [54], προκειμένου να εξομαλυνθούν τυχόν ανεπιθύμητα peaks σε μικρές συχνότητες συνάντησης, ενώ οι αποκρίσεις σε ακανόνιστους κυματισμούς υπολογίζονται με χρήση φασματικών κυμάτων τύπου Bretschneider και Jonswap. Σημειώνεται ότι το λογισμικό λαμβάνει υπόψη την ακριβή θέση του πλοίου σε trim/heel, στην Load Case 2A.

- Η μέθοδος των panels (Panel method), η οποία εισήχθηκε στην αεροδυναμική για την μελέτη ροής ιδανικού ρευστού, ασυμπίεστου, σε υποχηητικές ροές ($Mach\ No < 3$). Η μέθοδος αποτελεί μια σχετικά αποτελεσματική 3D μέθοδο για την μελέτη της ροής κατά την αρχική σχεδίαση, αλλά λόγω του γεγονότος ότι αγνοεί τα φαινόμενα τύρβης, περιστροφής και οριακού στρώματος μιας πραγματικής ροής, δεν συναντάται σε ακριβείς υπολογισμούς ροών. Η μέθοδος βασίζεται στη διακριτοποίηση της τρισδιάστατης επιφάνειας που περιρέεται από ρευστό, από μικρά συνοριακά στοιχεία, τα panels, κάθε ένα από τα οποία περιέχει ένα στοιχείο δίνης (vortex sheet/doublet) σταθερής έντασης. Το σύνολο αυτών των δινών (των panels της επιφάνειας) υποκαθιστά το οριακό στρώμα της ροής επί της επιφάνειας και τοποθετούνται στο όριο της γάστρας ακολουθώντας με τον τρόπο αυτό την πραγματική γεωμετρία της. Η επίλυση του προβλήματος της ροής συνίσταται στην υπέρθεση των δυναμικών ταχύτητας σε κάθε panel, ως συνάρτηση της έντασης των δινών, που οφείλει αθροιστικά να αποδίδει μηδενική κυκλοφορία επί της επιφάνειας (συνθήκη Kutta). Από την επίλυση της τελευταίας, είναι εφικτός ο προσδιορισμός της έντασης κάθε panel και άρα των τοπικών χαρακτηριστικών στοιχείων της ροής.

Η μέθοδος χρησιμοποιείται στην παρούσα για τον υπολογισμό της δυναμικής απόκρισης του πλοίου. Με το λογισμικό ANSYS AQWA, υπολογίζονται αριθμητικά οι αποκρίσεις του πλοίου σε κανονικά και ακανόνιστα (φασματικά) κύματα, με το πλοίο ακίνητο ή το πλοίο σε πρόσω κίνηση, στην ταχύτητα σχεδίασης των 17kts. Σημειώνεται ότι στο λογισμικό λαμβάνεται η ισοβύθιστη θέση του πλοίου (μηδενικό trim και heel) στην Load Case 2A.

7.4 Υπολογισμός Ακτίνων (Radius of Gyration) και Ιδιοπεριόδων

Για τον υπολογισμό της συμπεριφοράς του πλοίου σε κυματισμούς και προκειμένου να εκτελεσθούν στη συνέχεια οι απαιτούμενοι αριθμητικοί υπολογισμοί, απαιτείται ο αναλυτικός προσδιορισμός της ακτίνας διατοιχισμού (roll) και προνευτασμού (pitch) του πλοίου, οι οποίες ουσιαστικά εκφράζουν την έκταση κατανομής της μάζας του πλοίου περί το σύστημα αξόνων που διέρχεται από το κέντρο βάρους του και αποτελούν μέτρο της

ενέργειας που απαιτείται για την εκτέλεση των ελιγμών του πλοίου. Πέραν των ανωτέρω, οι εν λόγω ακτίνες αποτελούν σημαντική σχεδιαστική παράμετρο, καθότι συνεισφέρουν σημαντικά στον καθορισμό των ιδιοπεριόδων του πλοίου (Roll & Pitch Resonance Period), όπου πρακτικά προκύπτει συντονισμός στο σύστημα πλοίο - κύμα σε διατοιχισμό/πρόνευση και μεγιστοποιείται η απόκριση του πλοίου, σύμφωνα με τη σχέση [33]:

$$T_R = 2\pi \frac{K_{xx}}{\sqrt{g * GM_T}}$$

Και

$$T_P = 2\pi \frac{K_{yy}}{\sqrt{g * GM_L}}$$

Όπου GM_T και GM_L οι μετακεντρικές ακτίνες (εγκάρσια και διαμήκης) για την Load Case 2A και:

- K_{xx} η ακτίνα διατοιχισμού η οποία δίδεται από τη σχέση:

$$K_{xx} = \sqrt{\frac{I_{44} + A_{44}}{\Delta}}$$

Όπου I_{44} η ροπή αδράνειας μάζας και A_{44} η υδροδυναμική μάζα, περί τον διαμήκη άξονα (Ox) του πλοίου.

- K_{yy} η ακτίνα προνευτασμού η οποία δίδεται από τη σχέση:

$$K_{yy} = \sqrt{\frac{I_{55} + A_{55}}{\Delta}}$$

Όπου I_{55} η ροπή αδράνειας μάζας και A_{55} η υδροδυναμική μάζα, περί τον εγκάρσιο άξονα (Oy) του πλοίου.

Η ροπή αδράνειας μάζας του πλοίου, περί τον εκάστοτε άξονα του, δίδεται από την σχέση [44]:

$$I_z = \sum_i J_i + \sum_i m_i r_i^2$$

Όπου:

- J_z η ροπή αδράνειας ως προς σύστημα αξόνων που διέρχεται από το κέντρο βάρους του πλοίου.

- J_i η ροπή αδράνειας μάζας ως προς το σύστημα αξόνων που διέρχεται από το κέντρο βάρους της εκάστοτε κατανεμημένης μάζας. Σημειώνεται ότι στα πλαίσια της παρούσας δεν είναι εφικτός ο υπολογισμός του εν λόγω μεγέθους, πλην όμως η συμβολή του στο τελικό αποτέλεσμα θεωρείται αμελητέα καθόσον $J_i \ll m_i r_i^2$.

- $m_i r_i^2 = m_i (y_i^2 + z_i^2)$ ο παράγοντας που προκύπτει από το νόμο του Steiner για τον αναγωγή της τοπικής ροπής αδράνειας του στοιχείου στο καθολικό σύστημα αξόνων του πλοίου.

Για τον υπολογισμό της ροπής αδράνειας μάζας του πλοίου, στο εκτόπισμα που καθορίζεται από την Load Case 2A, λαμβάνονται υπόψη τόσο οι παράγοντες βάρους που συνιστούν το βάρος του κενού σκάφους (δηλαδή το W_{steel} , W_{outfit} , $W_{machinery}$) όσο και οι παράγοντες που συνιστούν το νεκρό βάρος (deadweight).

Για τον υπολογισμό της υδροδυναμικής μάζας χρησιμοποιήθηκε αριθμητική μέθοδος και συγκεκριμένα, οι υδροδυναμικοί συντελεστές A_{ij} υπολογίσθηκαν με χρήση του Seakeeping module του λογισμικού AVEVA (strip theory) αλλά και του αντίστοιχου Ansys AQWA module (3D Panel method). Από τα αποτελέσματα υπολογισμού των υδροδυναμικών συντελεστών A_{ij} που λήφθηκαν, για τις διάφορες περιόδους κυματισμού που μελετώνται στην παρούσα (0,05 - 1,5 Hz), υπολογίσθηκαν οι μέσοι όροι των τιμών τους, οι οποίοι και χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των ακτινών. Τα αναλυτικά αποτελέσματα των υπολογισμών παρουσιάζονται στον πίνακα 56 που ακολουθεί. Συνεπώς, η ακτίνα διατοιχισμού του πλοίου υπολογίζεται ότι είναι:

$$K_{xx} = 0.36B = 5.9 [m]$$

ενώ η ακτίνα προνευτασμού υπολογίζεται σε

$$K_{yy} = 0.28L = 31.7 [m]$$

Πίνακας 56: Υπολογισμός Ακτίνων Κίνησης

Weight Type	Weight	LCG	TCG	VCG	X	Y	Z	R ² xx	Ir(xx)	R/B	R ² yy	Ir(yy)	R ² zz	Ir(zz)
	(t)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m ²)	(ton-m ²)		(m ²)	(ton-m ²)	(m ²)	(ton-m ²)
<i>Fuel Oil</i>														
FUEL STORAGE TANK 0P	12,4	26,2	-0,9	1,1	-30,0	-0,9	-5,7	33,7	417,9	0,4	934,1	11583,4	902,0	11184,3
FUEL STORAGE TANK 0S	12,4	26,2	0,9	1,1	-30,0	0,9	-5,7	33,7	417,9	0,4	934,1	11583,4	902,0	11184,3
FUEL OIL SERVICE TANK 1P	17,8	38,3	-2,1	0,9	-18,0	-2,1	-5,9	38,6	687,5	0,4	356,9	6352,8	326,8	5817,9
FUEL OIL SERVICE TANK 1S	17,8	38,3	2,1	0,9	-18,0	2,1	-5,9	38,6	687,5	0,4	356,9	6352,8	326,8	5817,9
FUEL OIL SERVICE TANK 2	42,8	44,8	0,0	0,8	-11,5	0,0	-6,0	36,0	1540,8	0,4	167,1	7152,0	131,1	5611,2
FUEL OIL SERVICE TANK 2P	38,0	46,4	-3,7	1,0	-9,8	-3,7	-5,8	47,4	1800,6	0,4	130,6	4963,5	110,0	4180,9
FUEL OIL SERVICE TANK 2S	38,0	46,4	3,7	1,0	-9,8	3,7	-5,8	47,4	1800,6	0,4	130,6	4963,5	110,0	4180,9
FUEL OIL STORAGE TANK 3	32,4	59,9	0,0	0,8	3,7	0,0	-6,0	36,2	1174,2	0,4	49,9	1615,4	13,6	441,2
FUEL OIL STORAGE TANK 3P	41,9	57,3	-3,8	1,0	1,1	-3,8	-5,9	48,3	2023,1	0,4	35,5	1485,5	15,3	640,8
FUEL OIL STORAGE TANK 3S	41,9	57,3	3,8	1,0	1,1	3,8	-5,9	48,3	2023,1	0,4	35,5	1485,5	15,3	640,8
FUEL OIL STORAGE TANK 4P	53,9	68,6	-2,1	0,9	12,4	-2,1	-5,9	39,3	2116,7	0,4	188,5	10157,6	158,3	8534,5
FUEL OIL STORAGE TANK 4S	53,9	68,6	2,1	0,9	12,4	2,1	-5,9	39,3	2116,7	0,4	188,5	10157,6	158,3	8534,5
FUEL OIL STORAGE TANK 5P	22,7	78,1	-1,5	1,0	21,9	-1,5	-5,8	36,4	827,3	0,4	514,6	11681,2	482,8	10960,2
FUEL OIL STORAGE TANK 5S	22,7	78,1	1,5	1,0	21,9	1,5	-5,8	36,4	827,3	0,4	514,6	11681,2	482,8	10960,2
FUEL OIL STORAGE TANK 6P	3,5	82,6	-1,2	1,0	26,4	-1,2	-5,8	35,4	123,8	0,4	731,9	2561,6	699,5	2448,4
FUEL OIL STORAGE TANK 6S	3,5	82,6	1,2	1,0	26,4	1,2	-5,8	35,4	123,8	0,4	731,9	2561,6	699,5	2448,4
FUEL OVERFL TK 1	4,1	50,9	-1,0	0,8	-5,3	-1,0	-6,0	37,3	153,1	0,4	64,8	265,6	29,4	120,5
FUEL OVERFL TK 2	4,1	52,6	-1,0	0,8	-3,6	-1,0	-6,0	37,4	153,2	0,4	49,4	202,5	14,0	57,5
<i>Lubricant Oil</i>														
LUBOIL SUMP TK 1	3,5	49,6	0,0	0,7	-6,6	0,0	-6,1	37,7	131,9	0,4	81,3	284,4	43,6	152,5
LUBOIL SUMP TK 2	3,6	53,8	0,0	0,8	-2,4	0,0	-6,0	36,4	130,9	0,4	42,1	151,6	5,8	20,7
LUBOIL TANK P	6,2	55,4	1,0	0,8	-0,9	1,0	-6,0	37,4	231,6	0,4	37,1	229,9	1,7	10,7
LUBOIL TANK S	5,3	55,4	-1,0	0,7	-0,9	-1,0	-6,2	38,8	205,8	0,4	38,5	204,3	1,7	9,1
FRESH WATER P	25,9	33,3	-1,7	1,0	-22,9	-1,7	-5,8	36,5	945,2	0,4	558,5	14465,4	527,7	13668,1
FRESH WATER S	25,9	33,3	1,7	1,0	-22,9	1,7	-5,8	36,5	945,2	0,4	558,5	14465,4	527,7	13668,1
SLUDGE TANK 1	0,5	50,9	1,0	0,1	-5,3	1,0	-6,7	45,8	22,9	0,4	73,3	36,6	29,3	14,7

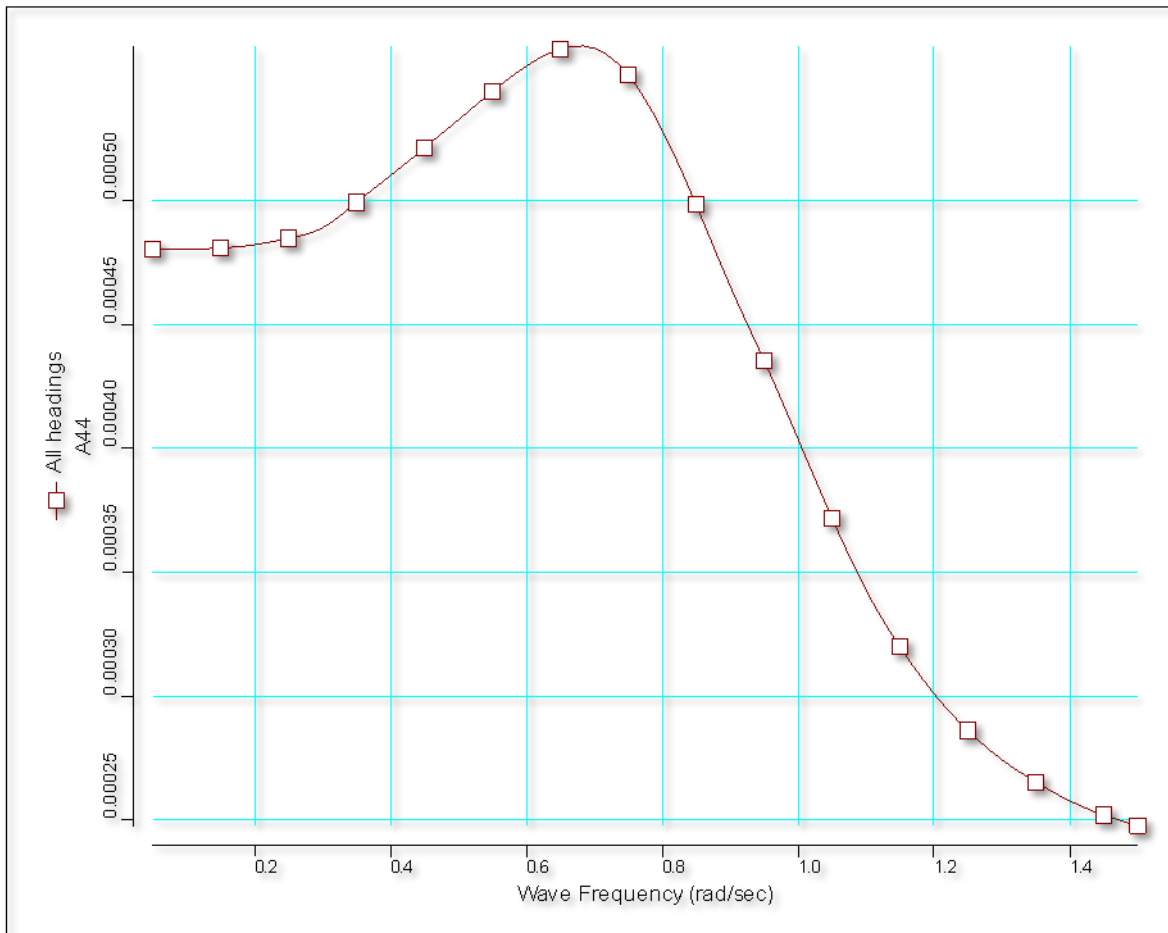
SLUDGE TANK 2	0,5	52,6	1,0	0,1	-3,6	1,0	-6,7	45,9	23,0	0,4	58,1	29,0	14,0	7,0
STERN LUB OIL DRAIN	0,0	29,8	0,0	0,1	-26,4	0,0	-6,7	44,9	0,0	0,4	743,4	0,0	698,5	0,0
CHAIN LOCKER 1	0,3	115,3	0,0	6,5	59,1	0,0	-0,3	0,1	0,0	0,0	3494,1	1048,2	3494,0	1048,2
ROPE STORE	0,8	111,4	0,0	9,8	55,2	0,0	3,0	9,2	7,4	0,2	3054,1	2443,3	3044,8	2435,9
JP5 SERVICE TANK	6,5	16,4	0,0	4,1	-39,8	0,0	-2,7	7,1	46,0	0,2	1593,5	10357,8	1586,4	10311,8
JP5 SERVICE TANK P	9,3	16,7	-3,4	4,0	-39,5	-3,4	-2,8	19,7	183,0	0,3	1571,3	14612,6	1575,2	14649,8
JP5 SERVICE TANK S	9,3	16,7	3,4	4,0	-39,5	3,4	-2,8	19,7	183,0	0,3	1571,3	14612,6	1575,2	14649,8
JP5 SETTLING TANK	4,9	16,4	0,0	3,8	-39,8	0,0	-3,0	8,9	43,8	0,2	1595,4	7817,3	1586,4	7773,5
Spares	25,0	111,9	0,0	7,7	55,6	0,0	0,9	0,9	21,6	0,1	3095,6	77389,0	3094,7	77367,4
Provisions	13,5	20,0	0,0	6,8	-36,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1310,4	17690,9	1310,4	17690,9
Consumables	32,0	57,5	0,0	4,9	1,3	0,0	-1,9	3,5	113,1	0,1	5,2	165,5	1,6	52,4
Ammunition Loaded	69,6	66,1	0,0	9,0	9,9	0,0	2,2	4,6	321,7	0,1	102,4	7129,4	97,8	6807,7
Margin	346,9	56,4	0,0	10,9	0,2	0,0	4,1	17,1	5945,7	0,3	17,2	5957,0	0,0	11,2
Crew & Effects	20,6	54,6	0,0	11,6	-1,6	0,0	4,8	23,0	474,6	0,3	25,6	527,4	2,6	52,7
Deadweight	1074,2								28992,1			296424,6		274166,4
Wsteel	1792,4	58,74	0,00	7,29	2,5	0,0	0,5	0,2	35500,0	0,0	6,6	3450000,0	6,4	1500000,0
Engines	103,84	51,75	0,00	3,2	-4,5	0,0	-3,6	13,0	1345,8	0,2	32,9	3420,6	20,0	2074,8
Shaft 1	40,4	40,25	4,00	1	-16,0	4,0	-5,8	49,6	2005,5	0,4	288,7	11662,7	271,0	10950,1
Shaft 2	40,4	51,75	-4,00	1	-4,5	-4,0	-5,8	49,6	2005,5	0,4	53,6	2166,3	36,0	1453,6
Machinery	388	44,46	0,00	4	-11,8	0,0	-2,5	6,4	2493,4	0,2	144,7	56143,7	138,3	53650,3
Wmachinery	572,6								7850,1			73393,3		68128,8
Command & Surveillance	165,65	66,94	0,00	11,79	10,7	0,0	5,0	24,9	4124,7	0,3	139,8	23160,9	114,9	19036,2
Auxilliary Systems	567,62	60,23	0,00	7,91	4,0	0,0	1,1	1,2	699,4	0,1	17,3	9826,8	16,1	9127,4
Outfit & Furnishings	271,66	57,09	0,00	8,87	0,9	0,0	2,1	4,3	1164,0	0,1	5,0	1369,7	0,8	205,6
Armament	99,4	32,71	0,00	11,65	-23,5	0,0	4,9	23,5	2338,1	0,3	576,2	57278,5	552,7	54940,4
Woutfit	1104,3								8326,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
LightShip	3469								80668			3688422		1719567
Structural Data	4544								134553			3984847		3987467

Hydrodynamic Data	24036	579009	334932
Total Data	158589	4563856	4322399
Mass Gyradius	5,44	29,61	29,62
Total Gyradius	5,908	31,693	
Hydrodynamic aij AVEVA	4,00E-04	9,78E-02	
Hydrodynamic Aij (aij x) AVEVA	24036	599054	
Hydrodynamic Aij AQWA	28230	558964	
Mean Hydrodynamic	26133	579009	334932
Mass Gyradius (%B or L)	0,33	0,26	0,26
Total Gyradius (%B or L)	0,36	0,28	

Ακολουθως, η ιδιοπερίοδος διατοιχισμού υπολογίζεται:

$$T_R = 2\pi \frac{K_{xx}}{\sqrt{g * GM_T}} = \frac{2 * 3,14 * 5,9}{\sqrt{9,81 * 1,1}} = 11.2 [sec]$$

$$\omega_R = \frac{2\pi}{T_R} = 0.55 \frac{rad}{sec} = 0.08 Hz$$



Εικόνα 77: Τιμές του αδιάστατου συντελεστή a_{44}

Από εμπειρικούς τύπους, υπολογίζονται αντίστοιχα οι ακόλουθες τιμές της ιδιοπερίοδος:

- Parsons $T_R = \frac{2.007 * K}{\sqrt{GM_T}} = 8.43 [sec]$
- Deltamarin $T_R = \frac{2.4B}{\sqrt{g GM_T}} = 13.3 [sec]$
- Warship Approximation [10] $T_R = \frac{0.42B}{\sqrt{GM_T}} = 7.4 [sec]$

Συνεπώς η τιμή της ιδιοπεριόδου που υπολογίσθηκε συγκλίνει με τα δεδομένα των πλοίων της κατηγορίας. Αντίστοιχα προέκυψε ότι η ιδιοπερίοδος σε Pitch είναι:

$$T_p = 2\pi \frac{K_{yy}}{\sqrt{g * GM_L}} = \frac{2 * 3,14 * 31.7}{\sqrt{9,81 * 229.9}} = 4.2 [sec]$$

$$\omega_p = \frac{2\pi}{T_p} = 1.498 \frac{rad}{sec} = 0.24 Hz$$

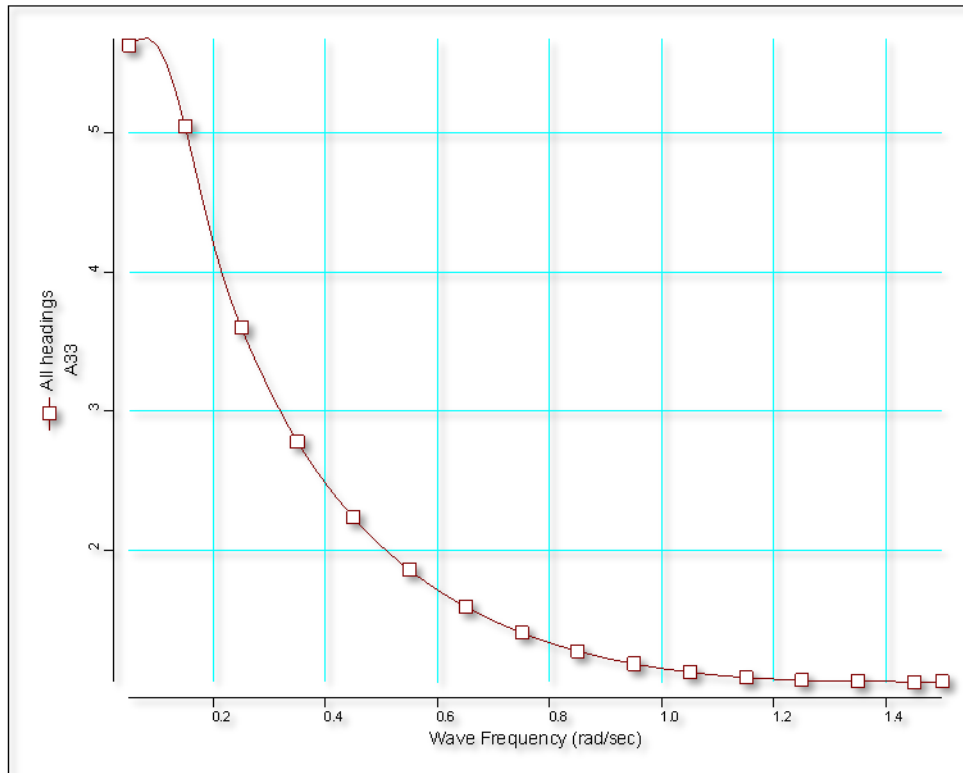
Και η ιδιοπερίοδος σε Heave με $A_{33}=25537t$ (AVEVA)

$$T_z = \sqrt{\frac{\rho \nabla + A_{33}}{pg A_w}} = 7,8 [sec]$$

$$\omega_z = \frac{2\pi}{T_z} = 0,8 \frac{rad}{sec} = 0,12 Hz$$

<i>Inflexible</i>	10½	High GM, 8ft
<i>Royal Sovereign</i>	16	} Moderate GM, 3½ft, high inertia due to armour
<i>Majestic</i>	16	
<i>Powerful</i>	14	} Protected cruisers with no side armour
<i>Arrogant</i>	12	
<i>Pelorus</i>	11	
Destroyers	4-8	

Εικόνα 78: Τυπικές περίοδοι διατοιχισμού για πλοία παλαιάς σχεδίασης [10]



Εικόνα 79: Τιμές του αδιάστατου συντελεστή a_{33}

7.5 Αριθμητικοί Υπολογισμοί

Για την μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς του πλοίου, στην κατάσταση πλήρους φόρτωσης 2A, εξετάστηκε η απόκριση του στις ακόλουθες διευθύνσεις κυματισμών :

- Μετωπικοί κυματισμοί ($\beta=180^\circ$).
- Πλάγιοι κυματισμοί ($\beta=90^\circ$).
- Πλάγιο-μετωπικοί ή πλάγιοι-οπίσθιοι κυματισμοί ($\beta=45^\circ, 135^\circ$).

και σε τιμές ταχυτήτων πλεύσης 0, 17 και 30 kts. Επίσης, λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις σχεδίασης, ως φάσματα μελέτης χρησιμοποιήθηκαν τα :

- Bretschneider
- Jonswap

με σημαντικό ύψος κύματος τα 5m (αντιστοιχεί σε κατάσταση θαλάσσης 6 σύμφωνα με τον World Meteorological Organization), $\gamma=3,3$ και $T_p = 4\sqrt{H_s} = 8,9 \text{ sec}$. (χρησιμοποιήθηκαν οι προβλέψεις του IMO SOLAS) [44].

Στα πλαίσια της παρούσας σχεδίασης, εξετάστηκαν:

- Οι τιμές των RAO σε surge, sway, heave, roll, pitch και yaw.
- Οι τιμές των καθέτων επιταχύνσεων και των δεικτών ανθρωπίνου παράγοντα (human factors – motion sickness) σε βασικές επιχειρησιακές περιοχές του πλοίου, στις οποίες απαιτείται να υπάρχουν «ελεγχόμενες» αποκρίσεις όπως π.χ.:
 - στο κύριο πυροβόλο για λόγους ευστάθειας της στοχοποίησης.
 - στο Command Information Center για λόγους ικανότητας λειτουργίας του πληρώματος σε επιχειρησιακή αποστολή με κατάσταση θαλάσσης 6 και αποφυγής του sea-sickness.
 - στο Mission Bay προκειμένου να είναι εφικτή η απονοίωση / προσνοίωση Ε/Π.
 - στο Wheel House για λόγους αποφυγής του sea-sickness.

Επισημαίνεται ότι ο υπολογισμός των αποκρίσεων σε συγκεκριμένες θέσεις του πλοίου πραγματοποιείται θεωρώντας το πλοίο ως άκαμπτο στερεό, οπότε οι όποιες επιδράσεις κινήσεων του συνυπολογίζονται στις αποκρίσεις των περιοχών υπό μελέτη.

7.6 Αποτελέσματα Ανάλυσης

Από τα αποτελέσματα της υπολογιστικής ανάλυσης διακρίνονται τα ακόλουθα:

- Οι αποκρίσεις του πλοίου σε Heave είναι ικανοποιητικές. Στην ταχύτητα των 17 kts εμφανίζονται αυξήσεις των αποκρίσεων στην περιοχή κυματισμών 0,6-1 rad/sec για πλάγιο μετωπικούς κυματισμούς. Η απόκριση σε Heave εντείνεται περαιτέρω στην ταχύτητα των 30 kts, σε πλάγιο μετωπικούς κυματισμούς, ενώ οι αποκρίσεις μετατοπίζονται προς μικρότερες συχνότητες κύματος.

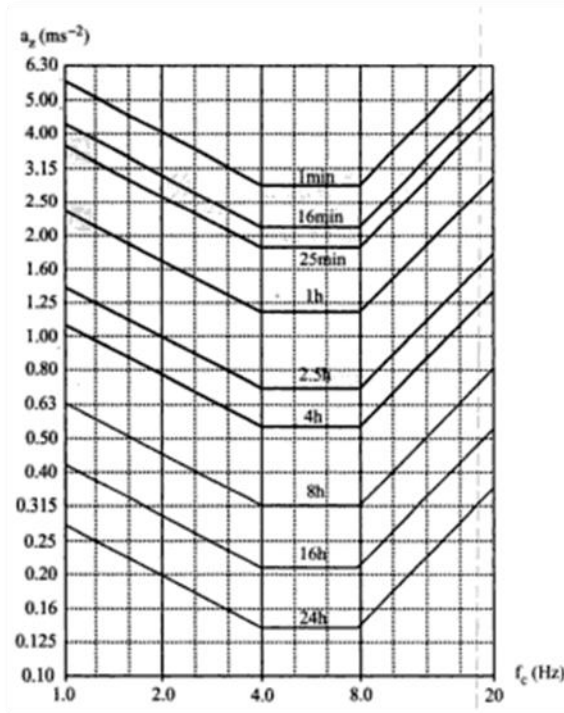
- Οι αποκρίσεις σε Roll μεγιστοποιούνται στην συχνότητα συντονισμού (Resonance), όπως ήταν αναμενόμενο. Συγκεκριμένα, σε κατάσταση επιπλέοντος πλοίου, εμφανίζεται υψηλή απόκριση σε $\omega=0,55$ rad/sec που αντιστοιχεί στην συχνότητα συντονισμού, για κάθε κατεύθυνση του κύματος. Με την αύξηση της ταχύτητας όμως, η συχνότητα συντονισμού μειώνεται και εξαρτάται από την γωνία του προσπίπτοντος κύματος.

- Οι αποκρίσεις στο Surge βαίνουν μειωμένες όσο αυξάνεται η συχνότητα του κυματισμού. Διαπιστώνεται επίσης σημειακή απόκλιση μεταξύ των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων στην περιοχή πολύ χαμηλών συχνοτήτων, το οποίο εκτιμάται ότι οφείλεται στις μεθόδους αυτές καθαυτές, αλλά και στην υπολογιστική τεχνική (ανεπαρκής διακριτοποίηση μεθόδου AVEVA ώστε να δώσει επαρκή αποτελέσματα σε μικρές συχνότητες συνάντησης). Στην λοιπή περιοχή συχνοτήτων διαπιστώνεται σύγκλιση των αποτελεσμάτων σε μορφή και μέτρο. Διαπιστώνεται επίσης ότι κατά την αύξηση της ταχύτητας δεν επέρχονται σημαντικές μεταβολές στην απόκριση σε Surge.

- Όμοια με το Surge, διαπιστώνεται απόκλιση των αποτελεσμάτων των μεθόδων στις χαμηλές συχνότητες κυματισμού, το οποίο αποδίδεται στους ανωτέρω λόγους. Από τα αποτελέσματα διαφαίνεται επίσης ότι η αύξηση της ταχύτητας επιφέρει φαινόμενα resonance σε υψηλές συχνότητες κυματισμού, σε οπίσθιους πλάγιους (30-50 deg) κυματισμούς.

- Η απόκριση σε Pitch εμφανίζεται διαφοροποιημένη μεταξύ των δύο υπολογιστικών μεθόδων, σε συχνότητες μικρότερες από τη συχνότητα των 0,6 rad/sec. Συγκεκριμένα, κάτω από την περιοχή των 0,6 rad/sec, στο οποίο και οι δύο μέθοδοι συγκλίνουν, εμφανίζεται σχεδόν σταθερή τιμή Pitch σε έκαστη γωνία κυματισμού για τα αποτελέσματα από το AVEVA, ενώ δεν ισχύει το ίδιο για τα αποτελέσματα από το AQWA.

- Τέλος, στα αποτελέσματα στο Yaw εμφανίζεται σύγκλιση των αποτελεσμάτων πλην την αρχική συχνότητα κυματισμού, το οποίο και πάλι αποδίδεται στην μέθοδο του AVEVA. Εμφανίζεται συντονισμός στην περιοχή των 0,58 rad/sec. και στις δύο μεθόδους με παραπλήσια απόκριση εκατέρωθεν του συντονισμού σε μέτρο και μορφή.



Εικόνα 80: Όρια αντοχής ανθρωπίνου οργανισμού σε κραδασμό πλήρους σώματος [26]

• Σε ότι αφορά στις επιταχύνσεις στα σημεία ενδιαφέροντος, λαμβάνοντας υπόψη και τις προβλέψεις του [26], διαπιστώνεται ότι αυτές είναι εντός των αναμενομένων ορίων, με μέγιστες τιμές στην ταχύτητα μάχης:

- 0,18 Gs στο πυροβόλο, σε γωνία κυματισμού 140°.
- 0,14 Gs στη γέφυρα, σε γωνία κυματισμού 130°.
- 0,13Gs στο Heli Deck, σε γωνία κυματισμού 130°.
- 0,12 Gs στο CIC, σε γωνία κυματισμού 130°.

Επισημαίνεται ότι σύμφωνα με το [26]:

- Οι επιταχύνσεις στην περιοχή της γέφυρας είναι ανεκτές για το πλήρωμα για διάρκεια 4 έως 8 ωρών, με στόχο την υγεία και ασφάλεια του πληρώματος, καθόσον τα εν λόγω όρια είναι διπλάσια των προβαλλομένων στην εικόνα 80. Ομοίως και για το CIC.

- Το προσωπικό στις ανωτέρω θέσεις εισέρχεται σε κατάσταση αδιαθεσίας (reduced comfort) μετά από 15 min, καθόσον σύμφωνα με το πρότυπο, τα όρια reduced comfort προκύπτουν πολλαπλασιάζοντας τα όρια της εικόνας 80 με 3.15.

7.7 Αξιολόγηση Επιχειρησιακής Αξίας

Η αξιολόγηση της συμπεριφοράς και της επιχειρησιακής αξίας ενός υπό σχεδίαση πλοίου, πριν την κατασκευή του, αποτελεί σημαντική πρόκληση για τον σχεδιαστή. Μια από τις διαστάσεις της αξιολόγησης περιλαμβάνει την μελέτη των αποκρίσεων του πλοίου σε σχέση με το περιβάλλον του. Συνεπώς, απαιτείται η ύπαρξη κατάλληλων εργαλείων και μεθόδων αξιολόγησης, με τα οποία ο σχεδιαστής δύναται να αξιολογήσει το σχεδιαζόμενο πλοίο και τις αποκρίσεις του.

Διάφορες διατυπώσεις και μεθοδολογικά μοντέλα έχουν διατυπωθεί για την αξιολόγηση των αποκρίσεων του πλοίου [33]. Στην παρούσα, ως μοντέλο αξιολόγησης προτείνεται ο δείκτης Seakeeping Performance Index [33], ο οποίος συνίσταται από μια σειρά κριτηρίων που θέτουν επιτρεπόμενα όρια στις αποκρίσεις του πλοίου. Το γενικό πλαίσιο κριτηρίων αξιολόγησης περιγράφεται στην εικόνα 81.

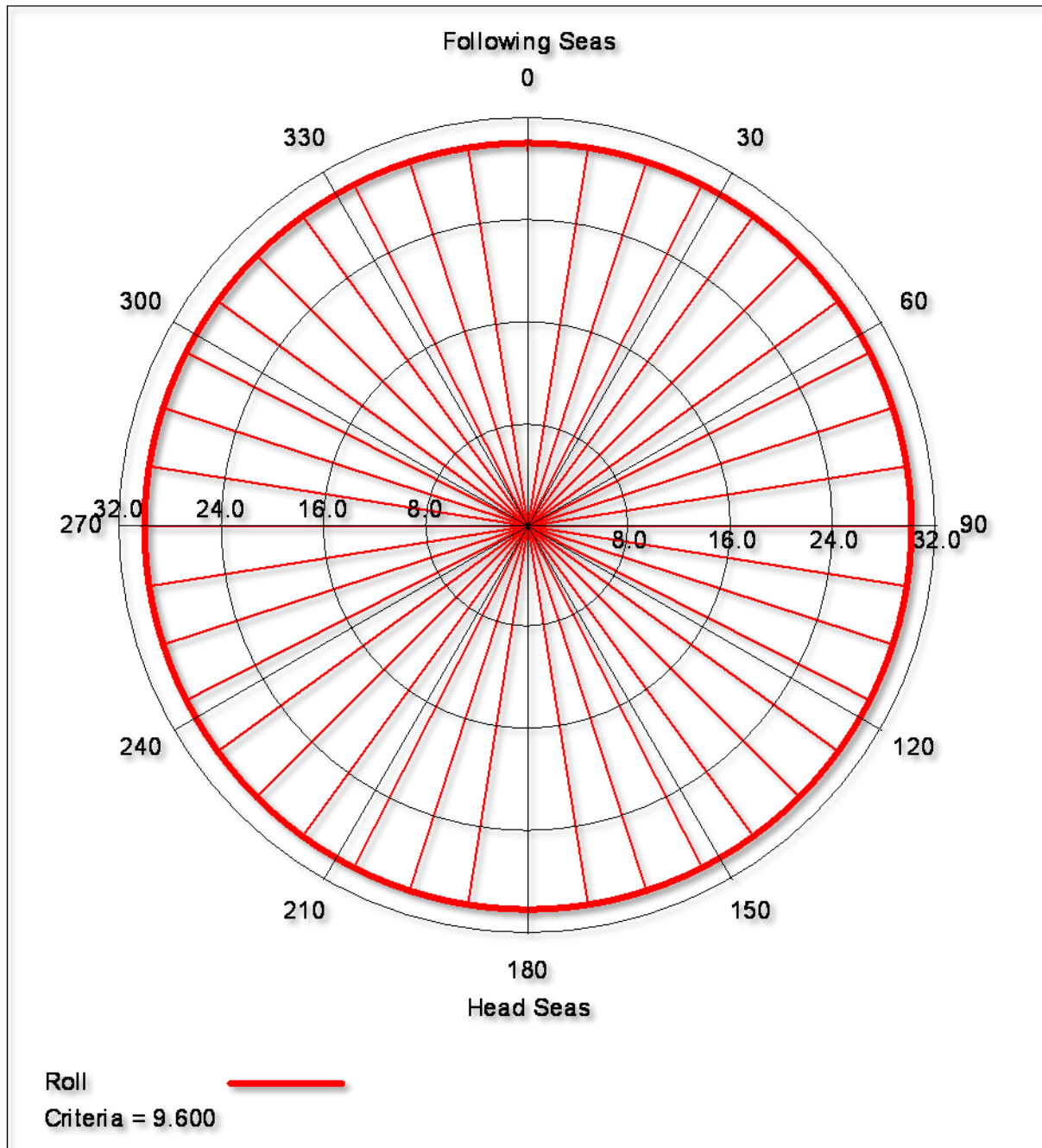
Με δεδομένο ότι οι περιβαλλοντικοί παράγοντες (αέρας, κύμα) υποβαθμίζουν την συμπεριφορά του πλοίου, οι οριακές τιμές των κριτηρίων αποσκοπούν στο να καθορίζουν τον φάκελο των αποδεκτών και μη αποδεκτών επιδόσεων, ή άλλως το όριο επιχειρησιακής χρήσης (limit of operability). Οι παρεχόμενες τιμές των κριτηρίων αποτελούν είτε στατιστικούς μέσους όρους, είτε τιμές ειδικών στο χώρο (ναυπηγοί, ιατροί εργασίας, κ.α.) και είναι ανεξάρτητες της κατάστασης κυματισμού, αέρα, κλπ. Τα κριτήρια που υιοθετούνται στην παρούσα αξιολόγηση και αφορούν σε πλοίο της συγκεκριμένης κατηγορίας, από το σύνολο των κριτηρίων που περιγράφονται στην [33], αναλύονται ακόλουθα.

No.	Seaway Performance Criteria	Affected Elements	Performance Degradations
(a) Absolute Motion Amplitudes			
1.	Roll angle } 2. Pitch angle }	People, Mission and Platform Systems	{ Personnel injury, reduced task proficiency, and mission and hull system degradation. Injury to personnel handling aircraft. Inability to safely launch or recover aircraft.
3.	Vertical displacement of points on flight deck	{ People Mission Systems	
(b) Absolute Velocities and Accelerations			
4.	Vertical acceleration } 5. Lateral acceleration }	People and Mission Systems	{ Personnel fatigue, reduced task proficiency and mission system degradation. Reduced task proficiency.
6.	Motion sickness incidence (MSI)	People	
7.	Slam acceleration (vibratory, vertical)	People, Mission and Platform Systems	{ Personnel fatigue, injury, reduced task proficiency and mission and hull system degradation. Preclusion of towed sonar operation.
(c) Motions Relative to Sea			
8.	Frequency of slamming. (Simultaneous bow reimmersion & exceedance of a threshold vertical velocity.)	{ Mission Systems Platform System	Hull Whipping stresses and damage to sensors on the masts Slamming damage to bottom forward hull structure.
9.	Frequency of emergence of a sonar dome	Mission Systems	Reduced efficiency of sonar.
10.	Frequency of deck wetness (submergence of the main deck forward.)	{ People Mission Systems	Injury or drowning of personnel. Damage to deck-mounted equipment.
11.	Probability of propeller emergence	Platform System	Damage to the main propulsion plant.
(d) Motions relative to aircraft			
12.	Vertical velocity of aircraft relative to the flight deck	Mission Systems	Damage to aircraft landing gear and/or loss of aircraft.

Εικόνα 81: Κριτήρια επιχειρησιακής αξιολόγησης πλοίου

7.7.1 RMS roll

Σύμφωνα με το κριτήριο του Olson [43], η μέγιστη αποδεκτή τιμή του roll για mono-hulls σε transit, προκειμένου να αποφευχθεί η ναυτία του προσωπικού (motion sickness), είναι $RMS\ Roll=9.6\ deg$. Οι τιμές του RMS Roll για τις διάφορες ταχύτητες πλεύσης αναλύονται στο Παράρτημα Δ, ενώ η κατανομή του παρέχεται ακόλουθα:

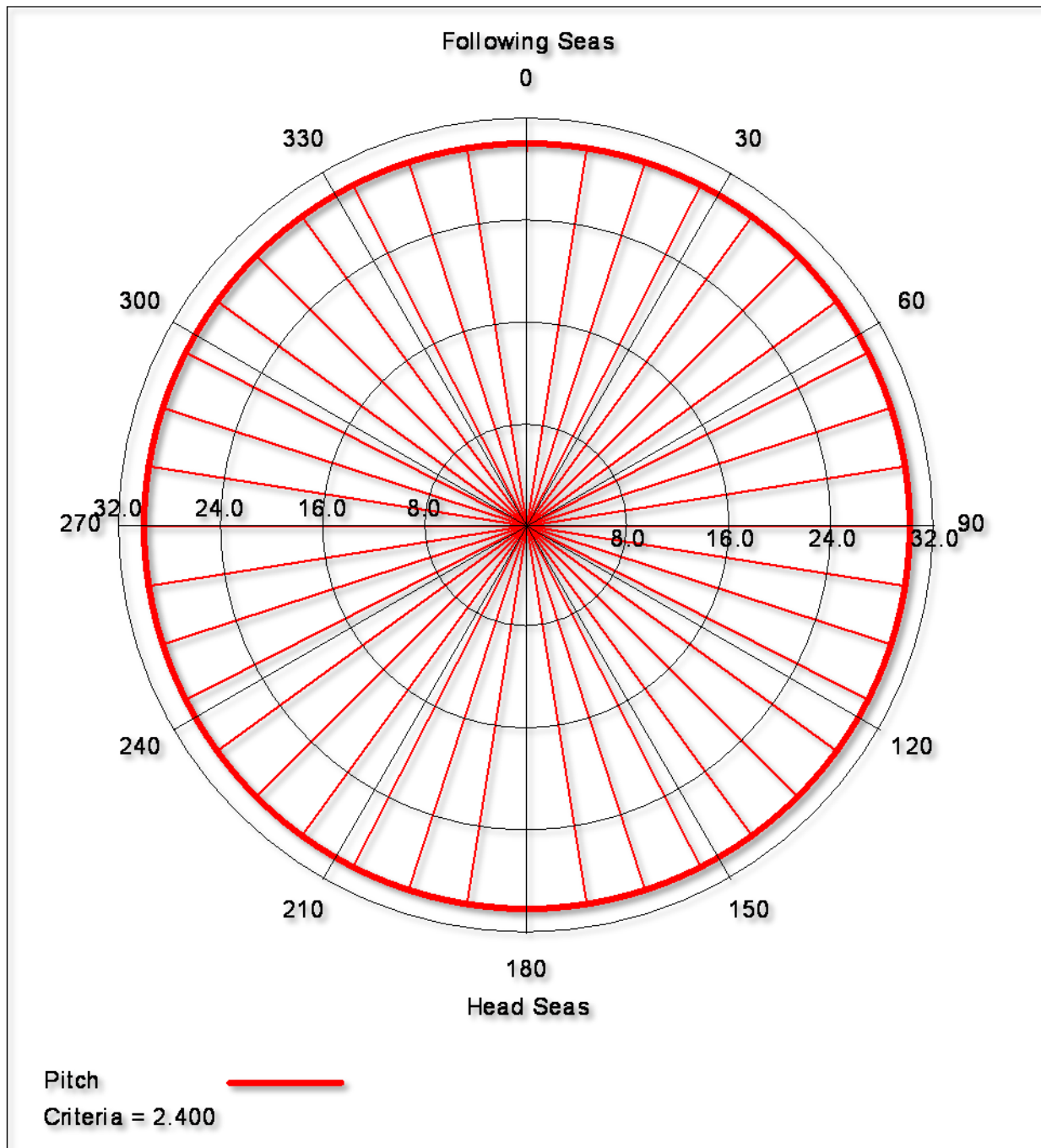


Εικόνα 82: RMS Roll

Από όπου προκύπτουν οι περιοχές πλεύσης που πληρούν το κριτήριο.

7.7.2 RMS pitch value

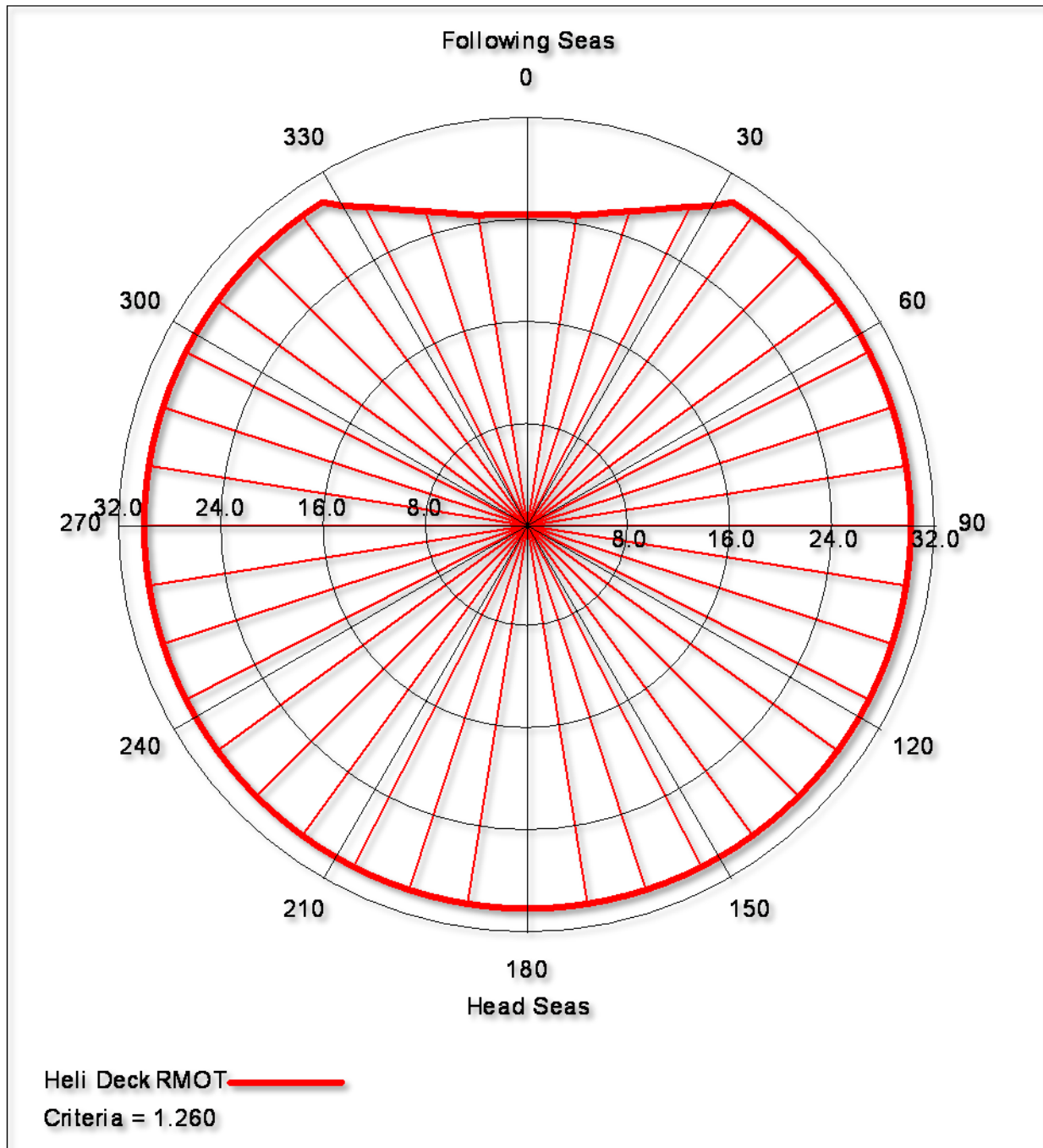
Σύμφωνα με τον Olson [43], δεν είναι εφικτός ο ακριβής προσδιορισμός ορίου, εντούτοις ως αποδεκτό επιχειρησιακό όριο σε pitch για τις διάφορες απαιτήσεις του πλοίου, όπως π.χ. πετρέλευση εν πλω, μπορεί να θεωρηθεί το όριο των 2.4 deg. Οι τιμές του RMS Pitch παρατίθενται στο Παράρτημα Δ, ενώ η κατανομή του παρουσιάζεται ακόλουθα, από όπου προκύπτει ο φάκελος συμμόρφωσης με το κριτήριο.



Εικόνα 83: RMS Pitch

7.7.3 RMS vertical displacement

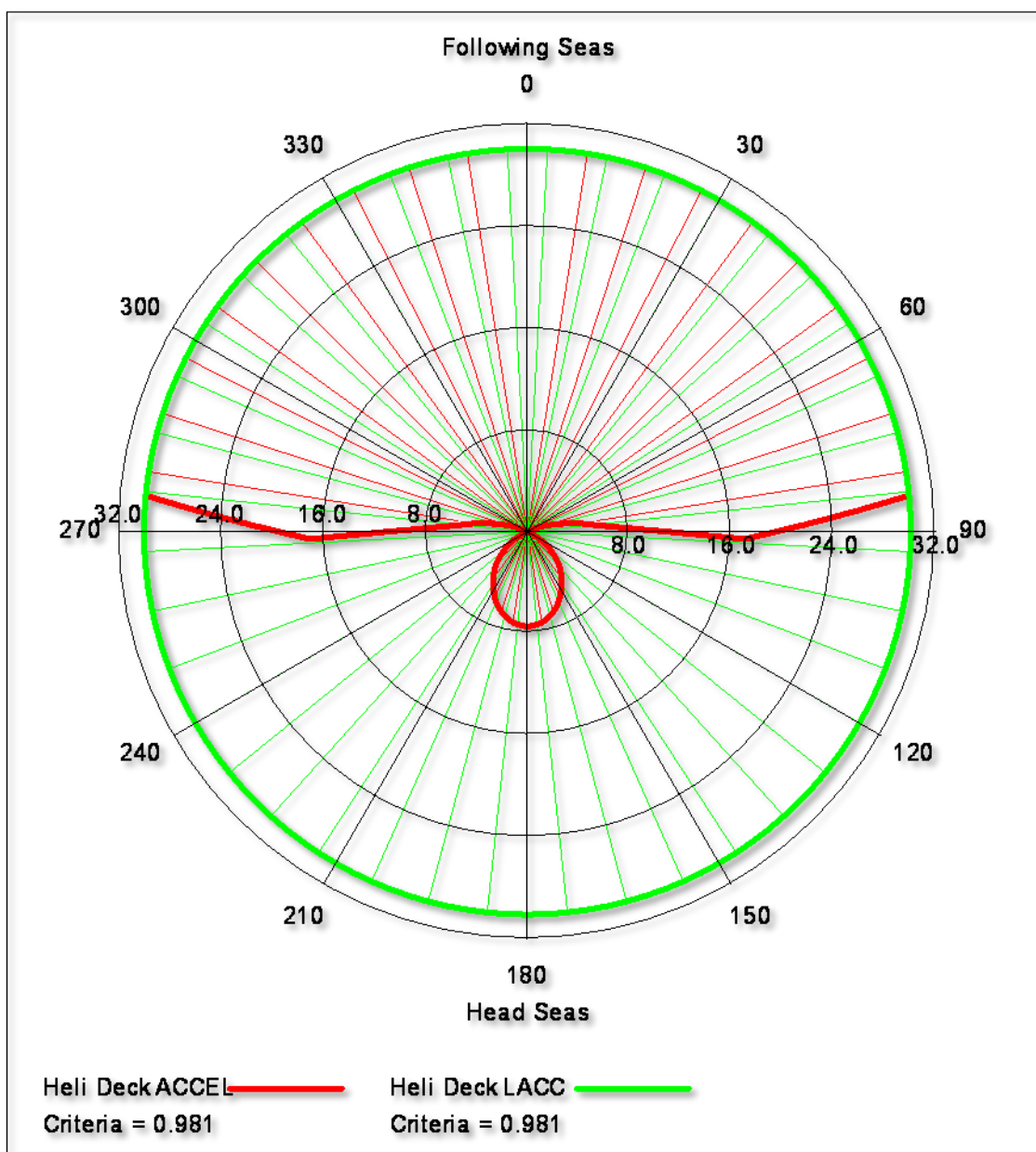
Το συγκεκριμένο κριτήριο σχετίζεται με την δυνατότητα του πληρώματος του flight deck να επιχειρεί και εργάζεται ασφαλώς στη φάση Α/Ν και Π/Ν του Ε/Π. Το αποδεκτό όριο ασφαλούς λειτουργίας είναι 1.26m, σύμφωνα με τον Olson [43], ενώ ο αποδεκτός φάκελος πλεύσης του υπό σχεδίαση πλοίου παρουσιάζεται ακόλουθα:



Εικόνα 84: RMS Vertical Motion

7.7.4 RMS vertical and lateral accelerations

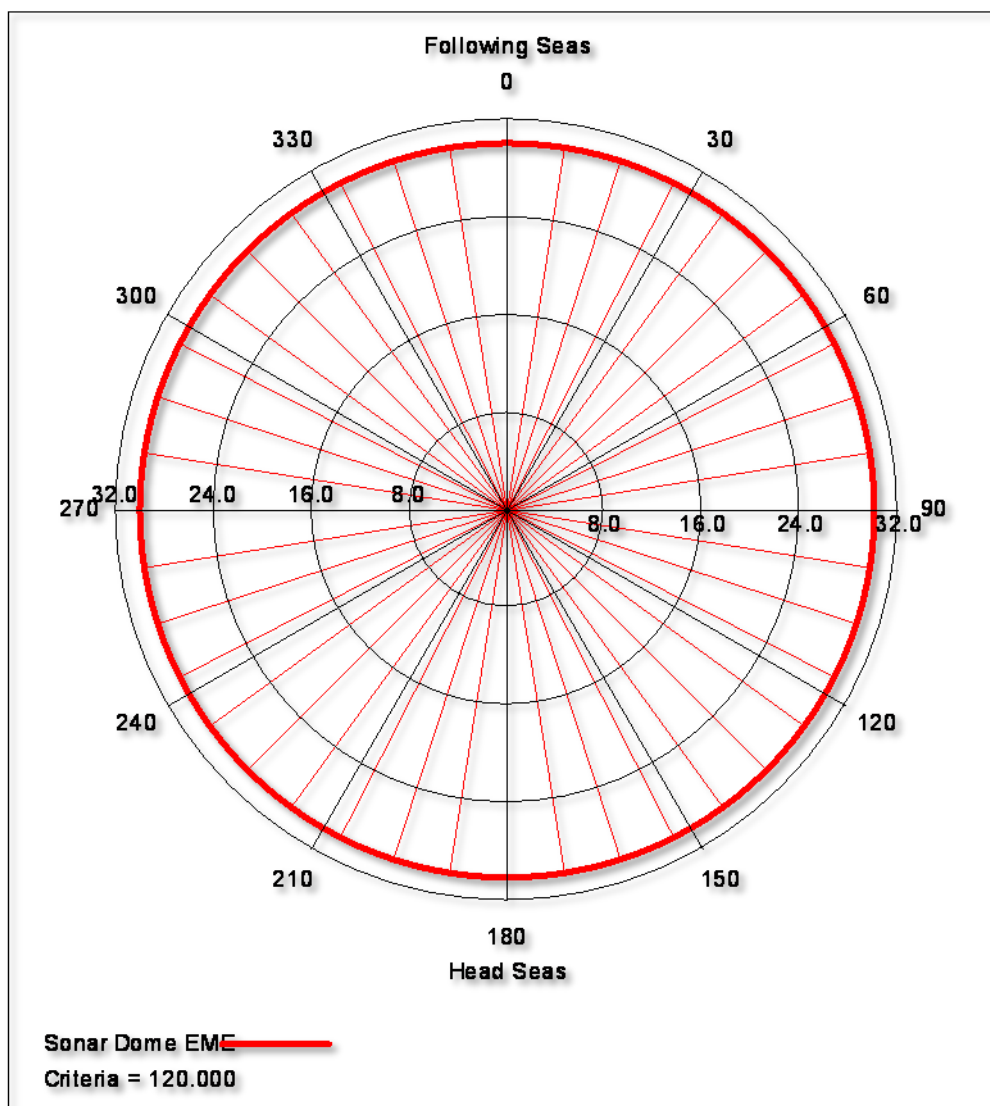
Η σύνδεση των καθέτων και εγκάρσιων επιταχύνσεων με την κόπωση του προσωπικού και την υποβάθμιση της απόδοσης του, έχει αναλυθεί εκτενώς από μελέτες που εμβαθύνουν στην εργονομία, την υγεία και ασφάλεια στην εργασία. Οι περιοχές τιμών σε συχνότητες άνω του 1Hz έχουν μελετηθεί και αναλυθεί από σύγχρονα πρότυπα (πχ. ISO [26]), αλλά και από ανάλογα πρότυπα σχετικά με Human Factors Engineering. Σύμφωνα με τα πρότυπα του Comstock [12], το αποδεκτό όριο διαμορφώνεται σε 0,981 m/s (0.1 Gs), ενώ οι περιοχές πλεύσης του πλοίου στις οποίες το ανωτέρω όριο πληρείται οριακά, παρουσιάζονται ακόλουθα:



Εικόνα 85: Heli Deck Vertical (ACCEL)/Lateral (LACC) Accelerations

7.7.5 Frequency of sonar dome emergence

Η λειτουργία του Sonar Dome βασίζεται στην αποστολή και λήψη βραχέων παλμών με μεγάλες περιόδους αναμονής απόκρισης (ring interval). Η διάρκεια του ring interval εξαρτάται από την εμβέλεια του sonar και την ταχύτητα του ήχου στο νερό. Συνεπώς, για την δυνατότητα ανίχνευσης υποβρυχίου στόχου σε απόσταση 10 μιλίων, σύμφωνα με τον Olson [43], απαιτείται ένα ring interval της τάξης των 30 seconds. Προκειμένου να ληφθεί απόκριση στο Sonar για ένα υποβρύχιο στην εμβέλεια των 10 μιλίων, απαιτείται το Sonar να παραμείνει βυθισμένο για ολόκληρο το ring interval. Για μεγαλύτερη εμβέλεια, απαιτείται μεγαλύτερος χρόνος βύθισης του Sonar. Το προτεινόμενο κριτήριο από τον Olson, ώστε το Sonar να δύναται να αποκαλύπτει στόχους σε εμβέλεια έως 10 μίλια είναι 120 εμφανίσεις ανά ώρα, το οποίο αντιστοιχεί σε ring interval των 30sec.

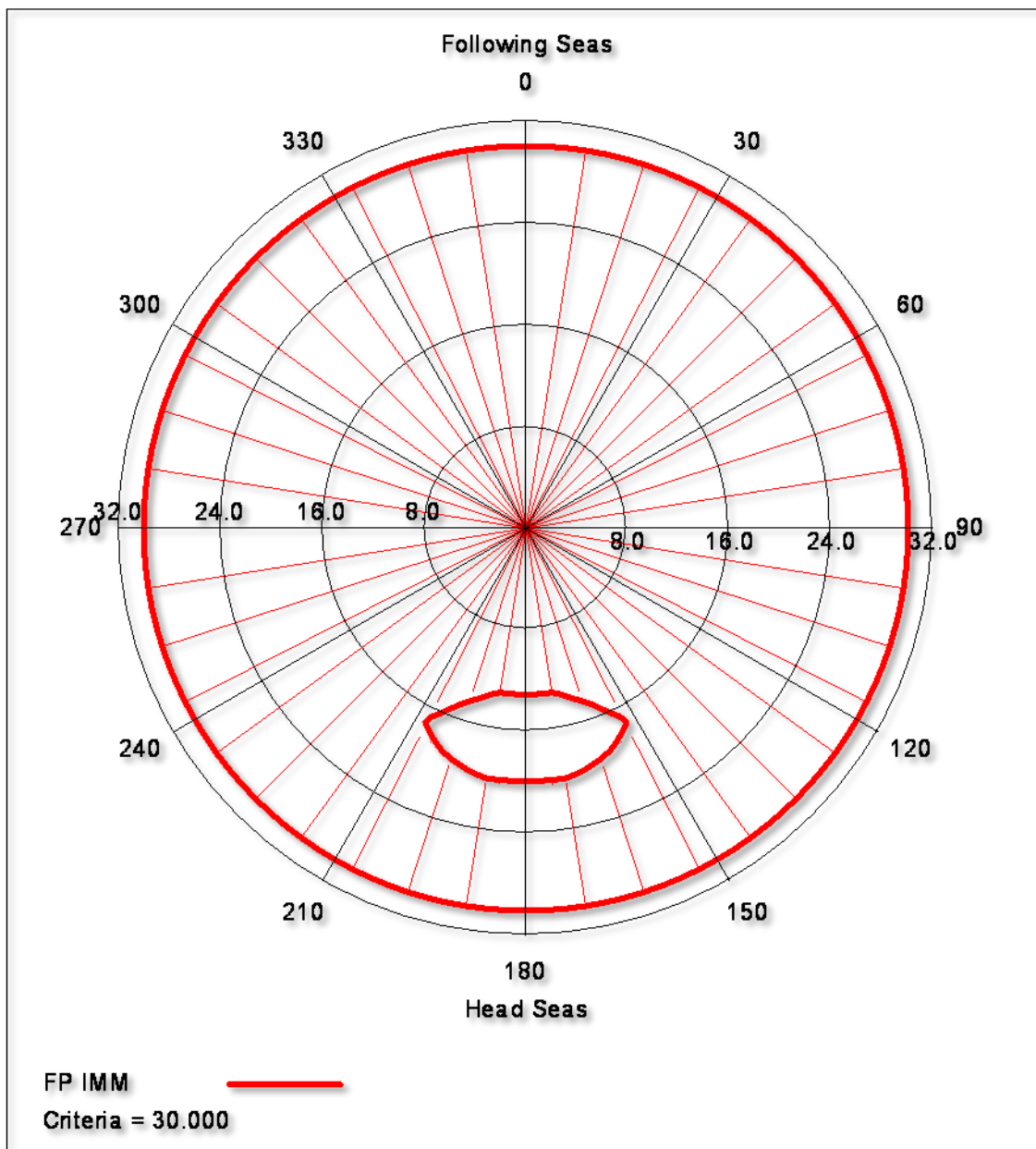


Εικόνα 86: Sonar Dome Emergence

Στην εικόνα παρουσιάζεται ο φάκελος αποδεκτής λειτουργίας του Sonar Dome.

7.7.6 Deck wetness frequency

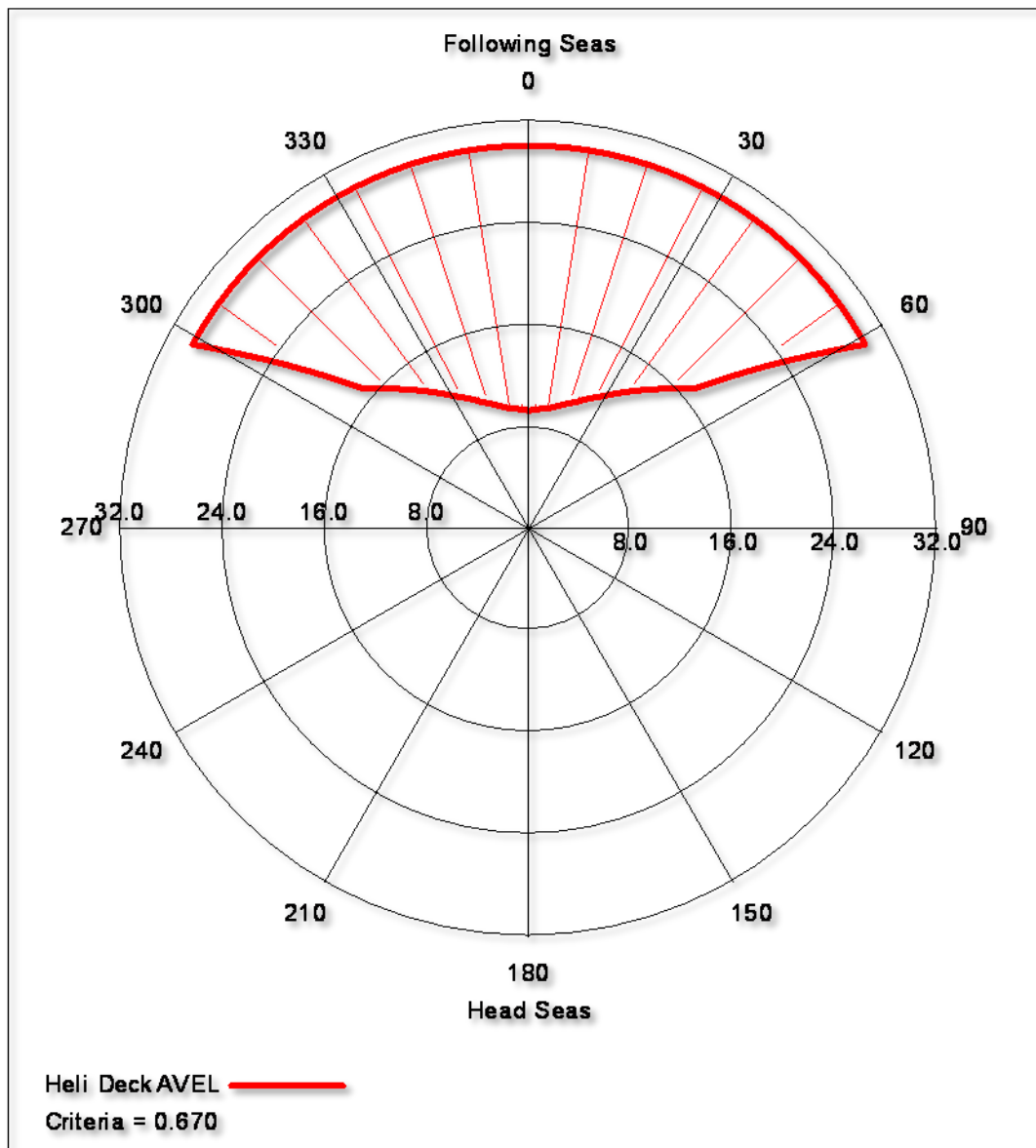
Για τα πολεμικά πλοία, λόγω της τοποθέτησης πυροβόλου και εκτοξευτών πρόραθεν, θα πρέπει να αποφεύγεται η διαβροχή του deck από θαλασσινό νερό για διάφορους λόγους (διάβρωση, επίδραση σε ηλεκτρονικές διατάξεις όπλων, κλπ.). Οι Andrew και Loyd [33] έθεσαν ως αποδεκτό όριο διαβροχής στην πλώρη τις 30 διαβροχές ανά λεπτό για πλοία τύπου φρεγάτας.



Εικόνα 87: Forward Perpendicular Immersion

7.7.7 RMS vertical velocity

Σκοπός του κριτηρίου είναι να αξιολογήσει τις μέγιστες φορτίσεις λόγω impact κατά την Π/Ν ελικοπτέρου στο Helo Deck. Σύμφωνα με τον Olson [43], η μέγιστη σχετική ταχύτητα μεταξύ Ε/Π και flight deck φρεγάτας δεν πρέπει να ξεπερνά τα 3.65m/s. Με δεδομένο ότι ο ρυθμός καθόδου του Ε/Π δεν ξεπερνά τα 1,52 m/s προκύπτει ότι η μέγιστη απόλυτη κάθετη επιτάχυνση του Helo Deck θα πρέπει να είναι κάτω από 2,13 m/s. Όμως, νεότερες μελέτες του US Navy/NAVSEA θεωρούν ως αποδεκτό όριο απόλυτης ταχύτητας του Helo Deck τα 0.67 m/s.



Εικόνα 88: RMS Vertical Velocity

8. Διάταξη Πρόωσης

8.1 Υπολογισμός Συντελεστών Ομόρρου, Μείωσης Ώσης και Σχετικής Περιστροφής

8.1.1 Συντελεστής Ομόρρου w

Ο υπολογισμός του συντελεστή ομόρρου θα γίνει με χρήση των τριών ακόλουθων μεθόδων [4]:

$$\text{Kruger : } w = 0.81 \times C_B - 0.34 = 0.039$$

$$\text{Hecksher: } w = 0.7 \times C_p - 0.3 = 0.0927$$

Holtrop[22]:

$$w = c_9 c_{20} C_v \frac{L}{T} \left(0.050776 + 0.93405 c_{11} \frac{C_V}{1 - C_{p1}} \right) + 0.27915 c_{20} \sqrt{\frac{B}{L(1 - C_{p1})}} + c_{19} c_{20} = 0.0357$$

Επιλέγεται, $w = 0,0357$

8.1.2 Συντελεστής Μείωσης Ώσης t

Ομοίως, ο υπολογισμός του συντελεστή μείωσης ώσης θα γίνει με χρήση τριών μεθόδων [4]:

$$\text{SSPA: } t = w \times \left(1.67 - C_B \cdot \frac{2.3 - 1.5 \times C_{WL}}{C_{WL}} \right) = 0.006$$

$$\text{Hecksher : } t = 0.5 \times C_p - 0.18 = 0.1$$

$$\text{Holtrop [22] : } t = \frac{0.25014 \left(\frac{B}{L}\right)^{0.28956} \left(\frac{\sqrt{BT}}{D}\right)^{0.2624}}{(1 - C_p + 0.0225 LCB)^{0.01762}} + 0.0015 C_{stern} = 0.156$$

Επιλέγεται, $t = 0,156$

8.1.3 Συντελεστές Απόδοσης

Ο υπολογισμός του συντελεστή σχετικής περιστροφής δίνεται από τη σχέση Holtrop,

$$n_R = 0.9922 - 0.05908 \times \frac{A_E}{A_0} + 0.07424 \times \left(C_p - 0.0225 \times \left(LCB - \frac{L}{2} \right) \right) = \mathbf{0.973}$$

Σημ. Ο λόγος εκτεταμένης επιφάνειας A_E/A_0 λαμβάνεται ίσος με 1,05 όπως υπολογίζεται παρακάτω.

Ο συντελεστής απόδοσης άξονα περιλαμβάνει τις απώλειες στα έδρανα των αξόνων και λαμβάνει την τιμή, $\eta_s = \mathbf{0.98}$. Έχοντας υπολογίσει τους συντελεστές ποσοστού μείωσης ώσης (t) και ομόρρου (w) μπορούμε να υπολογίσουμε τον συντελεστή απόδοσης γάστρας του πλοίου μας, ο οποίος είναι, $\eta_H = \frac{1-t}{1-w} = \mathbf{0,83}$.

8.2 Διάμετρος Έλικας

Για την εκλογή της διαμέτρου της κάθε έλικας του διπλέλικου πλοίου, μια αρχική εκτίμηση πραγματοποιείται λαμβάνοντας υπόψη τις ακόλουθες παραδοχές:

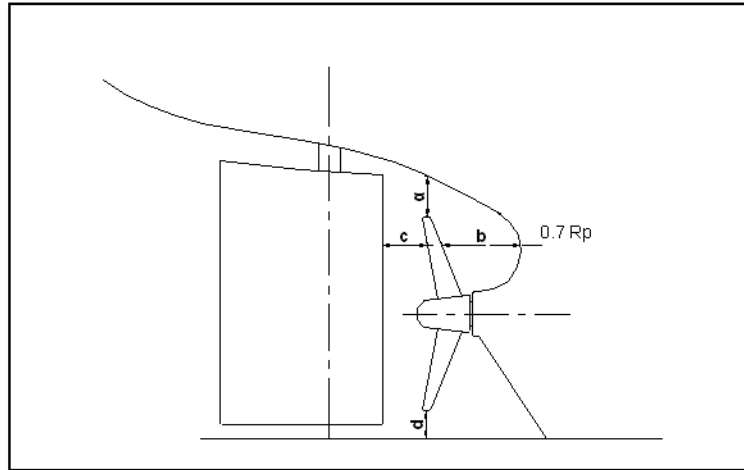
1. Τις ανοχές ακροπτερυγίου όπως περιγράφονται από τους οικείους κανονισμούς.
2. Την ικανοποίηση των διαστατικών απαιτήσεων (προσαρμογή και ανοχές), που ελέγχεται από το σχέδιο ναυπηγικών γραμμών και γενικής διάταξης του υπό μελέτη πλοίου.
3. Να είναι πλήρως βυθισμένη η έλικα, σύμφωνα με τις απαιτήσεις των κανονισμών.

Οι ανοχές πρέπει να έχουν τιμές που, για πρύμνη τύπου καθρέπτη, εκτιμώνται από τις ακόλουθες σχέσεις [4] (σελ.81, τεύχος 2):

$$a_{min} = 2 * \frac{A_E}{A_0} * \frac{D_{prop}}{z} = 1390 \text{ mm}$$

$$b_{min} = 0,15 * D_{prop} = 675 \text{ mm}$$

$$c_{min} = 0.25 * D_{prop} = 1125 \text{ mm}$$



Εικόνα 89: Ανοχές έλικας και σκάφους για ανακρεμασμένο ηηδάλιο

Οι οποίες πληρούνται, όπως προκύπτει και από το πλάνο γενικής διάταξης. Επισημαίνεται ότι, για λόγους βέλτιστης σχεδίασης και αυξημένης απόδοσης, η διάμετρος της έλικας λαμβάνεται ίση με $D_{prop}=4.5m$, η οποία είναι η μέγιστη διάμετρος έλικας που καλύπτει τις αναγκαίες ανοχές, πληρεί τα παραπάνω κριτήρια στις ελεγχθείσες καταστάσεις φόρτωσης και το βύθισμα της δεν υπερβαίνει το αντίστοιχο βύθισμα του Sonar Dome (2.25m) για λόγους παράκτιας λειτουργίας, όπως παρουσιάζεται και στο σχέδιο γενικής διάταξης. Οι υπολογισμοί που ακολουθούν χρησιμοποιούν αυτή την τιμή διαμέτρου.

8.3 Λόγος A_E/A_0

Ο λόγος εκτεταμένης επιφάνειας επιλέγεται με βάση το κριτήριο αποδεκτής σπηλαίωσης σε όλες τις καταστάσεις λειτουργίας της προωστήριας εγκατάστασης. Η αρχική εκτίμηση δίδεται από τον τύπο του Keller:

$$\frac{A_E}{A_0} = \frac{(1.3 + 0.3z)T}{(P_0 - P_v)D^2} + k$$

Από όπου με χρήση των δεδομένων για την ταχύτητα των 17 kts:

- $T = \frac{R_T}{1-t} = \frac{24922}{1-0.156} kp$, η ώση της έλικας.
- Ο άξονας απέχει από την ίσαλο πλεύσης $h = 4.95 m$.
- $p_0 = p_a + p_{sw}gh = 15729 \text{ Kp/m}^2$.

- Πεντάφυλλη έλικα.

Προκύπτει ότι ο λόγος εκτεταμένης επιφάνειας υπολογίζεται σε $A_E/A_0 = 0,35$, ενώ αντίστοιχα για την ταχύτητα των 30 kts προκύπτει $A_E/A_0 = 1,75$. Με δεδομένο ότι οι σχεδιαζόμενες έλικες είναι σταθερού βήματος και σκοπός της αρχικής μελέτης δεν είναι η βελτιστοποίηση αυτών σε δύο ταχύτητες, επιλέγεται έλικα με λόγο ίσο με την μέση τιμή των ανωτέρω, δηλαδή:

$$A_E/A_0 = 1,05$$

Ο λόγος εκτεταμένης επιφάνειας κατά Keller δίνει μια προτεινόμενη τιμή. Θα πρέπει ωστόσο να επιλεγεί μια τυποποίηση του λόγου αυτού. Επιλέγοντας από την σειρά πεντάφυλλων ελίκων Wageningen B η καταλληλότερη έλικα είναι η **B5-105**, όπου ο πρώτος αριθμός αφορά τον αριθμό των πτερυγίων της έλικας και ο δεύτερος το λόγο εκτεταμένης επιφάνειας.

8.4 Ισοβηματικές και Ισοταχείς Καμπύλες Έλικας

Η ταχύτητα προχώρησης του νερού καθώς αυτό φθάνει στην έλικα μπορεί να υπολογιστεί γνωρίζοντας το ποσοστό ομόρρου w και την οικονομική ταχύτητα του πλοίου.

$$V_s = 17 \text{ kn} = 8.745 \text{ m/s}$$

Η ταχύτητα προχώρησης δίνεται από τον τύπο:

$$V_A = V_s * (1 - w) = 8.745 * (1 - 0.0357) = 8.432 \text{ m/s}$$

Με χρήση του προγράμματος Grid/NTUA και τα δεδομένα της μεθόδου Holtrop - Mennen για τον υπολογισμό της αντίστασης, υπολογίσθηκαν οι ισοβηματικές και ισοταχείς καμπύλες της έλικας, για διάμετρο έλικας $D_{prop}=4,5\text{m}$. Τα αποτελέσματα αντίστασης που προκύπτουν από το GRID, συγκλίνουν ικανοποιητικά με τα αποτελέσματα της μεθόδου Holtrop.

Από τους υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν για πλοίο με καθαρή γάστρα προέκυψε ότι το βέλτιστο P/D της έλικας για τις υπό μελέτη ταχύτητες (βέλτιστη έλικα στα 17 kts και δυνάμενη να επιτύχει πρόωση σε 30 kts) είναι:

$$P/D=1.4$$

Πίνακας 59 : Ισοβηματικές Καμπύλες

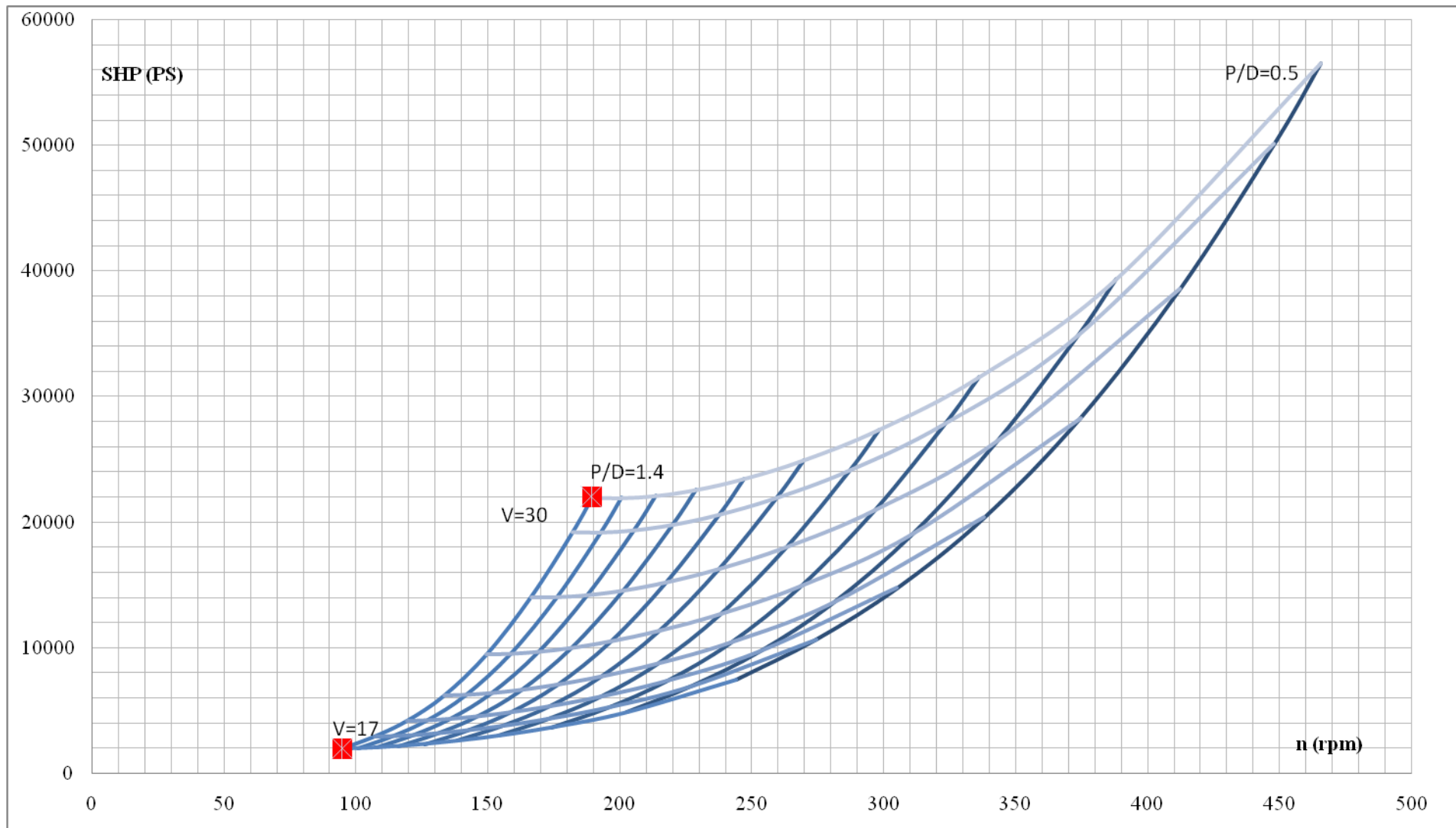
P/D	RPM	V (knots)	T (kp)	Q (Kpm)	DHP (PS)	SHP (PS)	P.C.
0,50	244,2	17.000	12476	23091,65	7315,808	7465,115	0,179
0,50	274,5	19.001	16604,08	29364,17	10455,1	10668,54	0,186
0,50	305,1	21.001	21549,53	36515,83	14449,73	14744,58	0,193
0,50	338,1	23.002	29185,96	45498,26	19953,92	20361,17	0,207
0,50	374,6	25.002	41073,51	57099,27	27742,21	28308,36	0,228
0,50	412,2	27.000	55922,95	70653,15	37778,67	38549,7	0,247
0,50	448	29.001	70531,31	84550,62	49136,21	50138,97	0,256
0,50	465,5	30.002	77923,79	91720,78	55385,52	56515,84	0,260
0,60	202,4	17.000	12476,09	18098,8	4750,428	4847,375	0,275
0,60	227,5	19.001	16604,17	23137,54	6828,558	6967,896	0,284
0,60	253	21.001	21549,53	28922,49	9491,357	9685,095	0,294
0,60	280,7	23.002	29185,96	36425,92	13262,34	13533,01	0,312
0,60	311,5	25.002	41073,59	46458,27	18769,51	19152,59	0,337
0,60	343,3	27.000	55922,95	58345,39	25981,38	26511,65	0,358
0,60	373,5	29.001	70531,39	70433,03	34119	34815,3	0,370
0,60	388,2	30.002	77923,79	76645,47	38591,62	39379,21	0,373
0,70	174,1	17.000	12476,09	15792,8	3567,354	3640,124	0,366
0,70	195,9	19.001	16604,25	20294,28	5156,822	5262,091	0,377
0,70	217,9	21.001	21549,61	25495,42	7207,007	7354,037	0,387
0,70	242	23.002	29186,05	32438,37	10183,02	10390,81	0,406
0,70	268,9	25.002	41073,68	41993,63	14648,81	14947,73	0,432
0,70	296,8	27.000	55923,03	53442,87	20575,56	20995,45	0,453
0,70	323,1	29.001	70531,39	65007,37	27247,82	27803,84	0,463
0,70	336	30.002	77923,96	70932,76	30911,89	31542,71	0,467
0,80	153,8	17.000	12476,17	14659,4	2923,733	2983,393	0,447
0,80	173	19.001	16604,25	18928,85	4248,813	4335,477	0,457
0,80	192,6	21.001	21549,7	23890,01	5967,963	6089,716	0,468
0,80	214,1	23.002	29186,13	30678,06	8518,192	8691,991	0,486
0,80	238,2	25.002	41073,68	40241,86	12432,99	12686,78	0,509
0,80	263,2	27.000	55923,11	51800,53	17685,11	18045,97	0,527
0,80	286,8	29.001	70531,47	63413,95	23587,21	24068,65	0,535
0,80	298,2	30.002	77923,96	69349,57	26826,2	27373,66	0,537
0,90	138,3	17.000	12476,17	14126,03	2533,823	2585,555	0,516
0,90	155,7	19.001	16604,25	18320,36	3699,941	3775,458	0,525
0,90	173,4	21.001	21549,7	23218,49	5220,878	5327,403	0,535
0,90	192,8	23.002	29186,13	30061,55	7519,751	7673,218	0,550
0,90	214,9	25.002	41073,76	39886,62	11116,23	11343,09	0,570
0,90	237,7	27.000	55923,2	51839,82	15983,62	16309,79	0,583
0,90	259,1	29.001	70531,47	63799,02	21445,81	21883,45	0,589
0,90	269,6	30.002	77924,04	69899,41	24441,68	24940,47	0,590
1,00	126,1	17.000	12476,17	13958,56	2282,937	2329,566	0,573
1,00	142	19.001	16604,25	18173,84	3348,104	3416,399	0,581
1,00	158,2	21.001	21549,7	23117	4743,677	4840,467	0,589
1,00	176,1	23.002	29186,13	30144,19	6887,119	7027,713	0,601
1,00	196,5	25.002	41073,76	40386,18	10293,31	10503,38	0,615
1,00	217,6	27.000	55923,2	52909,51	14935,96	15240,78	0,624
1,00	237,4	29.001	70531,56	65397,25	20140,12	20551,14	0,626
1,00	247	30.002	77924,04	71757,32	22993,28	23462,55	0,627
1,10	116,2	17.000	12476,09	14058,86	2118,794	2162,047	0,618
1,10	130,9	19.001	16604,25	18365,4	3119,041	3182,704	0,624
1,10	145,9	21.001	21549,61	23433,2	4434,701	4525,211	0,629
1,10	162,6	23.002	29186,13	30739,16	6482,687	6614,96	0,639
1,10	181,6	25.002	41073,76	41512,91	9778,588	9978,214	0,647
1,10	201,4	27.000	55923,11	54735,89	14296,66	14588,44	0,652
1,10	219,8	29.001	70531,56	67886,71	19356,77	19751,86	0,652

1,10	228,8	30.002	77924,04	74576,24	22130,01	22581,62	0,652
1,20	107,9	17.000	12476,09	14383,76	2013,996	2055,13	0,649
1,20	121,7	19.001	16604,17	18840,97	2974,13	3034,81	0,654
1,20	135,7	21.001	21549,61	24100,33	4241,12	4327,627	0,658
1,20	151,3	23.002	29186,05	31765,66	6234,627	6361,876	0,663
1,20	169,2	25.002	41073,68	43169,19	9475,657	9669,002	0,668
1,20	187,8	27.000	55923,11	57202,7	13938,15	14222,55	0,668
1,20	205,2	29.001	70531,47	71131,26	18932,79	19319,16	0,666
1,20	213,6	30.002	77924,04	78209,99	21669,45	22111,72	0,666
1,30	100,9	17.000	12476	14905,97	1951,51	1991,388	0,670
1,30	113,8	19.001	16604,08	19566,74	2889,35	2948,303	0,673
1,30	127	21.001	21549,53	25077,74	4129,964	4214,273	0,676
1,30	141,7	23.002	29185,96	33175,8	6098,979	6223,48	0,679
1,30	158,7	25.002	41073,68	45300,11	9325,172	9515,456	0,679
1,30	176,4	27.000	55923,11	60247,4	13782,56	14063,82	0,675
1,30	192,8	29.001	70531,56	75060,25	18769,11	19152,12	0,672
1,30	200,7	30.002	77924,04	82582,95	21500,76	21939,49	0,670
1,40	94,9	17.000	12476	15591,26	1918,226	1957,398	0,682
1,40	107	19.001	16604,08	20501,05	2846,096	2904,186	0,683
1,40	119,4	21.001	21549,44	26315,58	4076,191	4159,323	0,684
1,40	133,4	23.002	29185,88	34912,95	6041,831	6165,155	0,686
1,40	149,6	25.002	41073,59	47843,98	9282,468	9471,889	0,682
1,40	166,4	27.000	55923,03	63803,42	13771,49	14052,52	0,676
1,40	182	29.001	70531,39	79600,01	18791,33	19174,88	0,672
1,40	189,5	30.002	77923,96	87618,13	21540,87	21980,47	0,669

Πίνακας 60: Ισοταχείς καμπύλες

RPM	P/D	T (Kp)	Q(Kpm)	DHP(PS)	SHP(PS)	PC
244,2	0,5	12476	23091,65	7315,808	7465,115	0,179
202,4	0,6	12476,09	18098,8	4750,428	4847,375	0,275
174,1	0,7	12476,09	15792,8	3567,354	3640,124	0,366
153,8	0,8	12476,17	14659,4	2923,733	2983,393	0,447
138,3	0,9	12476,17	14126,03	2533,823	2585,555	0,516
126,1	1	12476,17	13958,56	2282,937	2329,566	0,573
116,2	1,1	12476,09	14058,86	2118,794	2162,047	0,618
107,9	1,2	12476,09	14383,76	2013,996	2055,13	0,649
100,9	1,3	12476	14905,97	1951,51	1991,388	0,670
94,9	1,4	12476	15591,26	1918,226	1957,398	0,682
274,5	0,5	16604,08	29364,17	10455,1	10668,54	0,186
227,5	0,6	16604,17	23137,54	6828,558	6967,896	0,284
195,9	0,7	16604,25	20294,28	5156,822	5262,091	0,377
173	0,8	16604,25	18928,85	4248,813	4335,477	0,457
155,7	0,9	16604,25	18320,36	3699,941	3775,458	0,525
142	1	16604,25	18173,84	3348,104	3416,399	0,581
130,9	1,1	16604,25	18365,4	3119,041	3182,704	0,624
121,7	1,2	16604,17	18840,97	2974,13	3034,81	0,654
113,8	1,3	16604,08	19566,74	2889,35	2948,303	0,673
107	1,4	16604,08	20501,05	2846,096	2904,186	0,683
305,1	0,5	21549,53	36515,83	14449,73	14744,58	0,193
253	0,6	21549,53	28922,49	9491,357	9685,095	0,294
217,9	0,7	21549,61	25495,42	7207,007	7354,037	0,387
192,6	0,8	21549,7	23890,01	5967,963	6089,716	0,468
173,4	0,9	21549,7	23218,49	5220,878	5327,403	0,535
158,2	1	21549,7	23117	4743,677	4840,467	0,589
145,9	1,1	21549,61	23433,2	4434,701	4525,211	0,629

135,7	1,2	21549,61	24100,33	4241,12	4327,627	0,658
127	1,3	21549,53	25077,74	4129,964	4214,273	0,676
119,4	1,4	21549,44	26315,58	4076,191	4159,323	0,684
338,1	0,5	29185,96	45498,26	19953,92	20361,17	0,207
280,7	0,6	29185,96	36425,92	13262,34	13533,01	0,312
242	0,7	29186,05	32438,37	10183,02	10390,81	0,406
214,1	0,8	29186,13	30678,06	8518,192	8691,991	0,486
192,8	0,9	29186,13	30061,55	7519,751	7673,218	0,550
176,1	1	29186,13	30144,19	6887,119	7027,713	0,601
162,6	1,1	29186,13	30739,16	6482,687	6614,96	0,639
151,3	1,2	29186,05	31765,66	6234,627	6361,876	0,663
141,7	1,3	29185,96	33175,8	6098,979	6223,48	0,679
133,4	1,4	29185,88	34912,95	6041,831	6165,155	0,686
374,6	0,5	41073,51	57099,27	27742,21	28308,36	0,228
311,5	0,6	41073,59	46458,27	18769,51	19152,59	0,337
268,9	0,7	41073,68	41993,63	14648,81	14947,73	0,432
238,2	0,8	41073,68	40241,86	12432,99	12686,78	0,509
214,9	0,9	41073,76	39886,62	11116,23	11343,09	0,570
196,5	1	41073,76	40386,18	10293,31	10503,38	0,615
181,6	1,1	41073,76	41512,91	9778,588	9978,214	0,647
169,2	1,2	41073,68	43169,19	9475,657	9669,002	0,668
158,7	1,3	41073,68	45300,11	9325,172	9515,456	0,679
149,6	1,4	41073,59	47843,98	9282,468	9471,889	0,682
412,2	0,5	55922,95	70653,15	37778,67	38549,7	0,247
343,3	0,6	55922,95	58345,39	25981,38	26511,65	0,358
296,8	0,7	55923,03	53442,87	20575,56	20995,45	0,453
263,2	0,8	55923,11	51800,53	17685,11	18045,97	0,527
237,7	0,9	55923,2	51839,82	15983,62	16309,79	0,583
217,6	1	55923,2	52909,51	14935,96	15240,78	0,624
201,4	1,1	55923,11	54735,89	14296,66	14588,44	0,652
187,8	1,2	55923,11	57202,7	13938,15	14222,55	0,668
176,4	1,3	55923,11	60247,4	13782,56	14063,82	0,675
166,4	1,4	55923,03	63803,42	13771,49	14052,52	0,676
448	0,5	70531,31	84550,62	49136,21	50138,97	0,256
373,5	0,6	70531,39	70433,03	34119	34815,3	0,370
323,1	0,7	70531,39	65007,37	27247,82	27803,84	0,463
286,8	0,8	70531,47	63413,95	23587,21	24068,65	0,535
259,1	0,9	70531,47	63799,02	21445,81	21883,45	0,589
237,4	1	70531,56	65397,25	20140,12	20551,14	0,626
219,8	1,1	70531,56	67886,71	19356,77	19751,86	0,652
205,2	1,2	70531,47	71131,26	18932,79	19319,16	0,666
192,8	1,3	70531,56	75060,25	18769,11	19152,12	0,672
182	1,4	70531,39	79600,01	18791,33	19174,88	0,672
465,5	0,5	77923,79	91720,78	55385,52	56515,84	0,260
388,2	0,6	77923,79	76645,47	38591,62	39379,21	0,373
336	0,7	77923,96	70932,76	30911,89	31542,71	0,467
298,2	0,8	77923,96	69349,57	26826,2	27373,66	0,537
269,6	0,9	77924,04	69899,41	24441,68	24940,47	0,590
247	1	77924,04	71757,32	22993,28	23462,55	0,627
228,8	1,1	77924,04	74576,24	22130,01	22581,62	0,652
213,6	1,2	77924,04	78209,99	21669,45	22111,72	0,666
200,7	1,3	77924,04	82582,95	21500,76	21939,49	0,670
189,5	1,4	77923,96	87618,13	21540,87	21980,47	0,669



Εικόνα 90: Ισοθηματικές και ισοταχείς καμπύλες έλικας

8.5 Σηλαίωση

Ο έλεγχος σηλαίωσης θα βασιστεί στο κριτήριο του Burrill, το οποίο υπολογίζει το ποσοστό σηλαίωσης πίσω όψης. Για τον υπολογισμό αυτό, απαιτείται αρχικά να υπολογιστούν τα $(\tau_c, \sigma_{0,7R})$ ώστε να εντοπίσουμε το απαιτούμενο σημείο στο διάγραμμα του Burrill, σύμφωνα με την οικεία μέθοδο. Ο υπολογισμός πραγματοποιείται σε τιμές στροφών έλικας $n_D=77,7\text{rpm}$ (καθαρή γάστρα), και προκύπτει:

$$\bullet \quad V_{0,7R}^2 = V_A^2 + (0.7 \times \pi \times N \times D_{prop})^2 \Rightarrow V_{0,7R} = 22.6 \left(\frac{m}{s}\right)^2$$

$$\bullet \quad q_{0,7R} = \frac{1}{2} \times \rho_{sw,15^\circ C} \times V_{0,7R}^2 = 26870.3 \text{kp/m}^2$$

$$\bullet \quad A_0 = \frac{\pi \times D_{prop}^2}{4} = 15,9 \text{m}^2$$

$$\bullet \quad A_E = \frac{A_E}{A_0} \times A_0 = 16,69 \text{m}^2$$

$$\bullet \quad A_D \approx A_0 = 15,9 \text{m}^2$$

$$\bullet \quad A_P \approx A_D \times \left(1.067 - 0.229 \frac{P}{D_{prop}}\right) = 11,87 \text{m}^2$$

Έτσι, τελικά προκύπτει:

$$\bullet \quad \sigma_{0,7R} = \frac{P_0 - P_{0,15^\circ C}}{q_{0,7R}} = 0.56$$

$$\bullet \quad \tau_c = \frac{T}{A_P} = 0.09$$

Τοποθετώντας το σημείο $\sigma_{0,7R}= 0.56$ και $\tau_c= 0,09$ στο διάγραμμα Burrill παρατηρούμε ότι βρίσκεται κάτω από το ελάχιστο όριο, εξασφαλίζοντας μηδενική σηλαίωση.

Με αντίστοιχο τρόπο προκύπτει ότι στην ταχύτητα των 30 kts, σε στροφές έλικας $n_D=189,5 \text{rpm}$ (καθαρή γάστρα), το σημείο $\sigma_{0,7R}= 0.16$ και $\tau_c= 0,16$ στο διάγραμμα Burrill βρίσκεται στην περιοχή του 50% οπίσθιας σηλαίωσης, γεγονός αναμενόμενο για την περιοχή ταχυτήτων πλεύσης.

Συνεπώς, η έλικα που επιλέχθηκε πληρεί το κριτήριο του Burrill στην οικονομική ταχύτητα και ταυτόχρονα ικανοποιεί τις απαιτήσεις σχεδίασης εξασφαλίζοντας χαμηλή ηχητική υπογραφή και υδροακουστική αντίχρεση. Σημειώνεται ότι η σπηλαίωση είναι η κυρίαρχη υδροδυναμική πηγή θορύβου του κινούμενου πλοίου και πρέπει να αποφεύγεται. Στην ταχύτητα μάχης όμως, παρουσιάζεται σημαντική οπίσθια σπηλαίωση στην έλικα, γεγονός που καταδεικνύει την ανάγκη επιλογής έλικας με ικανοποιητική συμπεριφορά στις εν λόγω ταχύτητες και σπηλαίωση (π.χ. Gawn-Burill, Newton-Rader).

Από την γενόμενη ανάλυση, καθορίστηκαν οι ακόλουθες τιμές βελτιστοποίησης της έλικας (**επίτευξη βέλτιστου συντελεστή πρόωσης**) στην ταχύτητα των 17 kts:

- Ισχύς στον άξονα $SHP_{cruise} = 1957.4PS$
- Συντελεστής Πρόωσης $PC_{cruise} = 0.68$

Ενώ στην ταχύτητα μάχης των 30 kts προκύπτει:

- Ισχύς στον άξονα $SHP_{battle} = 21980PS$
- Συντελεστής Πρόωσης $PC_{battle} = 0.66$

Συνεπώς, για το υπό σχεδίαση διπλέλικο πλοίο, επιλέγεται η έλικα **Wageningen B5-105**.

8.6 Αντοχή Πτερυγίων

Σύμφωνα με τους κανονισμούς, το ελάχιστο πάχος του πτερυγίου της έλικας, θα πρέπει να έχει κατ' ελάχιστον τιμή στο $0,25R$ αυτή που ορίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$t_{0.25R} = S \left(K_1 \sqrt{\frac{AH}{C_n CRN}} \pm \frac{C_s}{C_n} * \frac{BK}{4C} \right)$$

με τα μεγέθη A , B , C , S και C_s να δίνονται από τις σχέσεις:

$$A = 1 + \frac{6}{P_{0.7}} + 4.3P_{0.25}$$

$$B = \frac{4300W\alpha}{N} \left(\frac{R}{100}\right)^2 \left(\frac{D}{20}\right)^3$$

$$C = (1 + 1.5P_{0.25})(Wf - B)$$

$$C_s = \frac{a_s}{WT}$$

Με αποτύπωση της έλικας και χρήση του λογισμικού Hydrocomp, υπολογίζονται τα ακόλουθα:

- $K_1=289, S=1$
- $H = SHP = 19798 \text{ KW}$, η ισχύς στον άξονα σε κατάσταση ρυπαρής γάστρας.
- $R = 197.3 \text{ rpm}$, οι στροφές της έλικας στο MCR
- $N = 5$, ο αριθμός των πτερυγίων
- $P_{0.25} = P_{0.7} = 1.4$, το βήμα της έλικας στο $0,25R/0,7R$ διαιρεμένο με την διάμετρό της D.
- $D = 4.5 \text{ m}$, η διάμετρος της έλικας.
- $f = 2,62$, $\omega = 7,5$, σταθερές που εξαρτώνται από το υλικό της έλικας (*Ni-Al- Bronze*).
- $W = 1492.5 \text{ mm}$, το πλάτος του πτερυγίου στο $0,25R$.
- $\alpha = 1,05$, ο λόγος της εκτεταμένης επιφάνειας της έλικας.
- $\varphi = 10^\circ$, rake angle
- $K=396.74$

Συνεπώς από τις προηγούμενες σχέσεις, υπολογίζεται ότι:

$$A = 1 + \frac{6}{P_{0.7}} + 4.3P_{0.25} = 11.3$$

$$- B = \frac{4300\omega\alpha}{N} \left(\frac{R}{100}\right)^2 \left(\frac{D}{20}\right)^3 = 157.3$$

$$- C = (1 + 1.5P_{0.25})(Wf - B) = 5696.8$$

$$- C_s = \frac{a_s}{WT} = 2.57$$

Τελικά, το ελάχιστο πάχος του περυγίου είναι ,

$$t_{0.25R} = S \left(K_1 \sqrt{\frac{AH}{C_n CRN}} \pm \frac{C_s}{C_n} * \frac{BK}{4C} \right) = 132.7mm$$

όπου στη σχέση αυτή χρησιμοποιείται το πρόσημο (+) καθότι η έλικα έχει forward rake. Το πραγματικό πάχος του περυγίου της προτεινόμενης έλικας στο 0,25R είναι **t=186.6mm** και άρα υπερκαλύπτει τις απαιτήσεις των κανονισμών.

8.7 Συνεργασία Έλικας - Μηχανής

Με τη βοήθεια του λογισμικού Grid/NTUA, υπολογίζονται οι χαρακτηριστικές έλικας - πλοίου, για τις παρακάτω τρεις περιπτώσεις:

- Καθαρή γάστρα σε ήρεμο νερό.
- Ρυπασμένη γάστρα σε ήρεμο νερό (προσαύξηση αντίστασης κατά 20%).
- Ρυπασμένη γάστρα σε κυματισμούς (προσαύξηση αντίστασης κατά 40%).

Για τις διάφορες ταχύτητες μελέτης, προσαρμόζονται οι τιμές αντίστασης ρυμούλκησης της μεθόδου Holtrop-Mennen σύμφωνα με τον ακόλουθο πίνακα και εισάγονται στο λογισμικό GRID.

V (kts)	V (m/s)	RT (kp)	RT (+20%) (kp)	RT (+40%) (kp)
17	8.75	24922.78	29907.33	34891.89
19	9.77	33169.26	39803.11	46436.96
21	10.80	43048.35	51658.03	60267.70
23	11.83	58303.18	69963.82	81624.45
25	12.86	82050.30	98460.36	114870.42
27	13.89	111713.96	134056.75	156399.54
29	14.92	140896.16	169075.39	197254.63
30	15.43	155663.67	186796.40	217929.14

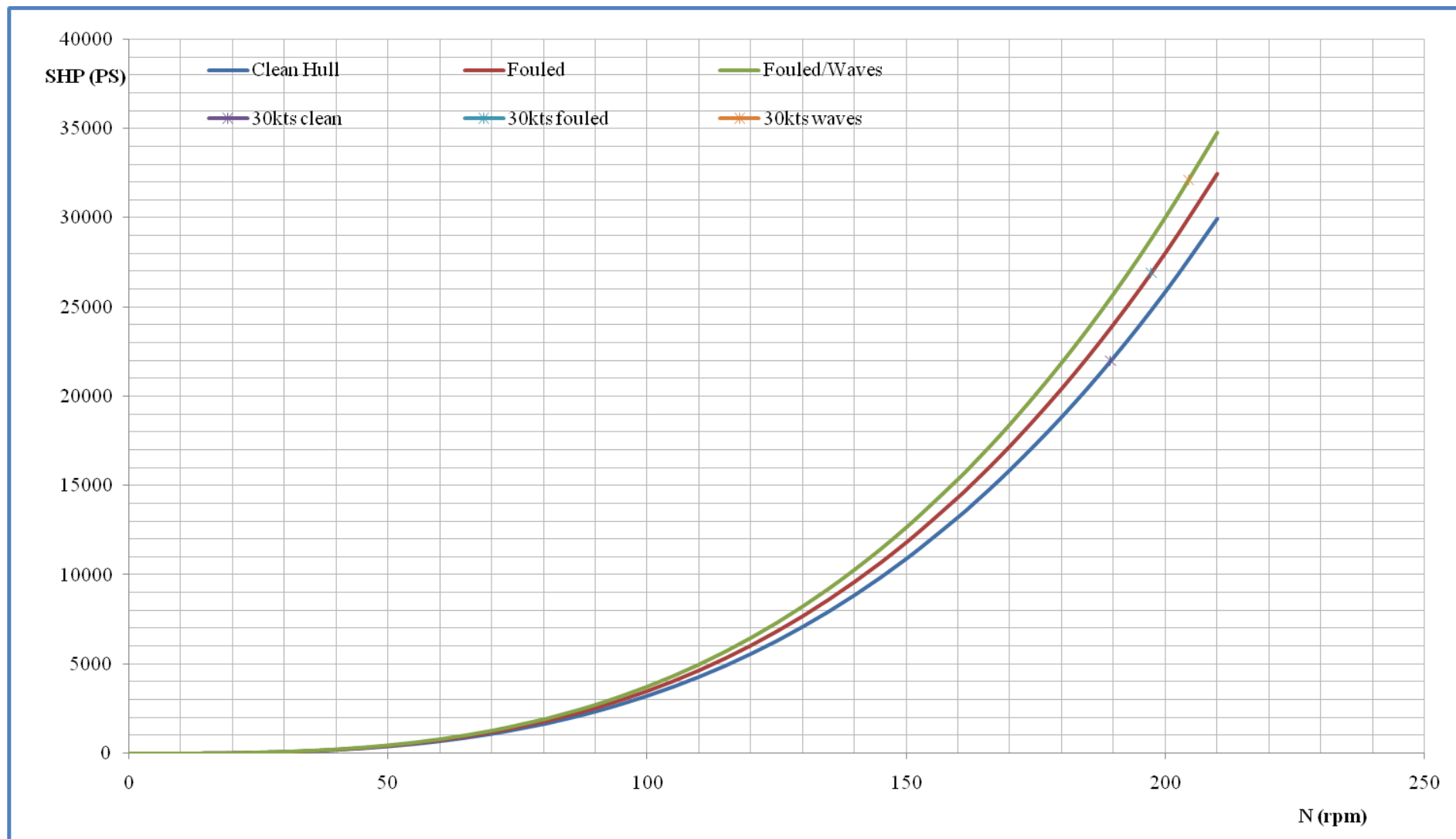
Από το λογισμικό εξάγονται οι ζητούμενες τιμές ισχύος σε σχέση με τις στροφές περιστροφής της κάθε έλικας (SHP-N) για τον επιλεγμένο λόγο P/D=1.4.

Πίνακας 61: Απαιτήσεις Ισχύος ανά Ταχύτητα

Vs (kn)	Clean Hull		Fouled		Fouled/Waves	
	N (rpm)	SHP (PS)	N (rpm)	SHP (PS)	N (rpm)	SHP (PS)
17	94,9	1957,4	97,6	2337,4	100,2	2731,0
19	107,0	2904,2	110,2	3476,8	113,2	4070,6
21	119,4	4159,3	123,1	4991,4	126,6	5855,0
23	133,4	6165,2	137,8	7432,9	141,9	8751,3
25	149,6	9471,9	154,9	11492,5	160,0	13600,1
27	166,4	14052,5	172,8	17141,6	178,9	20371,8
29	182,0	19174,9	189,3	23458,9	196,2	27945,5
30	189,5	21980,5	197,3	26919,1	204,5	32093,9

Στη συνέχεια παρατίθενται οι χαρακτηριστικές έλικας - πλοίου για τις ανωτέρω μελετώμενες καταστάσεις, όπου η παρουσιαζόμενη ισχύς αντιστοιχεί σε κάθε έλικα. Όπως παρουσιάζεται στις εικόνες, οι χαρακτηριστικές καμπύλες ακολουθούν τον νόμο της έλικας δηλαδή, σε κάθε κατάσταση, ισχύει $SHP = C N^3$, από όπου με κατάλληλους υπολογισμούς για τις τρεις καταστάσεις αντίστασης, οι συντελεστές C του νόμου της έλικας, ανά έλικα, υπολογίζονται:

- $C_{clean}=0.0032$
- $C_{fouled}=0.0035$
- $C_{fouled/waves}=0.0038$.



Εικόνα 91: Χαρακτηριστική καμπύλη έλικας --πλοίου N – SHP (μία έλικα)

8.8 Απαιτήση Ισχύος Προωστηρίου Εγκατάστασης

Για την μέγιστη ταχύτητα του πλοίου σε κατάσταση καθαρής γάστρας με ήρεμο καιρό απαιτείται συνολική ισχύς $P_{clean} = 43961 \text{ PS} = 32333 \text{ KW}$ στις $N = 189.5 \text{ RPM}$. Οι παραπάνω τιμές είναι συνολικές (για τις δύο έλικες), ονομαστικές και δεν λαμβάνουν υπόψη προσαύξηση λόγω μηχανικών απωλειών. Συνεπώς με βάση τα προηγούμενα αποτελέσματα, καθορίζονται οι ακόλουθες απαιτήσεις.

Η απαιτούμενη ισχύ και ο αριθμός στροφών, για καθαρή γάστρα είναι:

$$P_{clean} = 32333 \text{ [KW]}$$

$$N_{clean} = 189.5 \text{ [RPM]}$$

Η απαιτούμενη ισχύ και ο αριθμός στροφών, για ρυπασμένη γάστρα (αύξηση 20% της αντίστασης) είναι:

$$P_{fouled} = 39597 \text{ [KW]}$$

$$N_{fouled} = 197.3 \text{ [RPM]}$$

Για την επιλογή της προωστηρίου εγκατάστασης χρησιμοποιείται η απαιτούμενη ισχύς σε κατάσταση ρυπασμένης γάστρας, ενσωματώνοντας με τον τρόπο αυτό στις απαιτήσεις ισχύος, ικανό περιθώριο θάλασσας αλλά και περιθώριο μηχανικής απόδοσης του συστήματος.

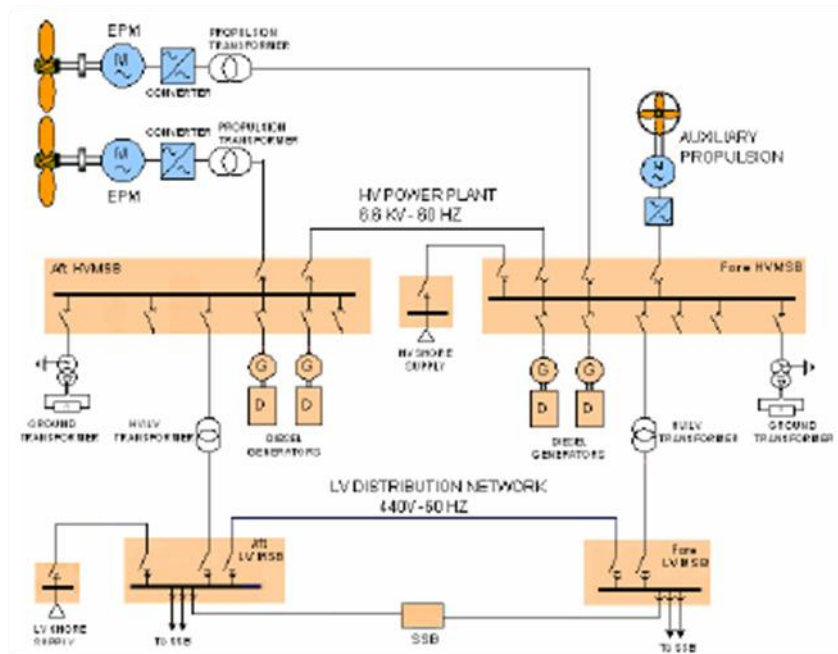
8.9 Επιλογή Προωστηρίου Εγκατάστασης

Οι σύγχρονες εξελίξεις στην σχεδίαση πολεμικών πλοίων, επιβάλλουν την επιλογή μιας διάταξης πρόωσης η οποία πέρα από την απαιτούμενη ισχύ, παρέχει επιχειρησιακή ευελιξία και επιλογές [51]. Όπως προκύπτει και από την μελέτη των ομοίων πλοίων του Κεφαλαίου 1, οι σύγχρονες σχεδιάσεις, λόγω της απαιτήσεως υψηλής ισχύος, υιοθετούν μια από τις ακόλουθες διατάξεις:

- Combined Diesel Or/And Gas
- Combined Diesel And Diesel
- Combined Diesel And Gas/Warp
- Combined Diesel Electric And Gas

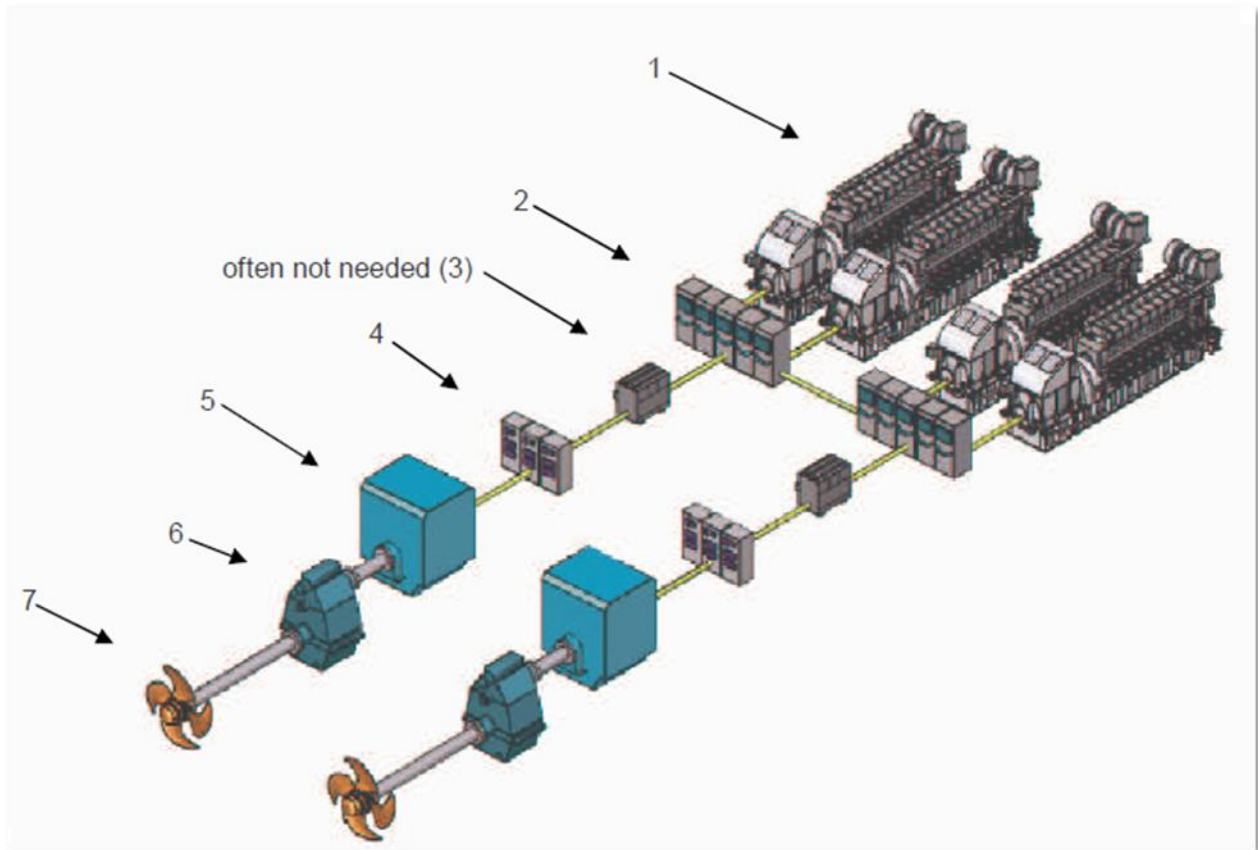
Λαμβάνοντας υπόψη ότι η επιχειρησιακή διάρκεια ζωής ενός πλοίου της κατηγορίας αυτής εκτιμάται σε 30 έως 40 έτη αλλά και :

- τις επιχειρησιακές απαιτήσεις που έχουν τεθεί στην παρούσα και συγκεκριμένα την επίτευξη μειωμένου κόστους κύκλου ζωής. Σημειώνεται ότι οι diesel προωστήριες διατάξεις χαρακτηρίζονται από μικρή κατανάλωση καυσίμου στο σημείο σχεδίασης (optimum point – low fuel consumption), το πλεονέκτημα όμως αυτό παύει να υφίσταται εκατέρωθεν του σημείου σχεδίασης. Συνεπώς για πολεμικά πλοία που δεν χρησιμοποιούν σταθερές ταχύτητες πρόωσης, αλλά λειτουργούν κατά 80% σε suboptimal ταχύτητες (σε αντίθεση με ένα εμπορικό πλοίο που εκτελεί πλόες στο optimal point), το πλεονέκτημα των diesel μηχανών τίθεται σε αυστηρή κριτική.



Εικόνα 92: Δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ισχύος FREMM class [36]

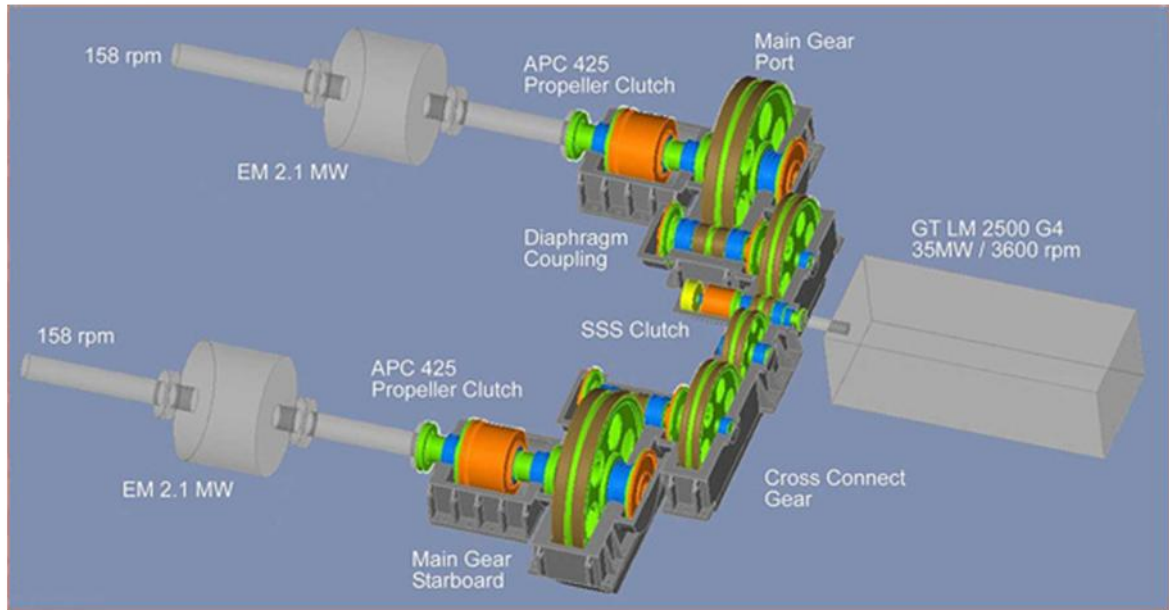
- το περιβάλλον λειτουργίας του πλοίου και συγκεκριμένα τις ελληνικές θάλασσες με τις μεγάλες ακτογραμμές, που επιφέρουν προβλήματα λειτουργίας στις διατάξεις hydrojet/warp, σε παράκτια λειτουργία.
- την προσθήκη αξίας μελλοντικών επιλογών και ειδικότερα την μελλοντική αξία (option value) της διαθέσιμης ηλεκτρικής ισχύος για την υποστήριξη αναβαθμίσεων συστημάτων (mid life upgrade, hotel loads) και όπλων (radars/sensors, direct energy weapons, rail guns), λόγω της ενοποιημένης ενεργειακής διαχείρισης έναντι της διακριτής ηλεκτρικής και προωστήριου ισχύος των συμβατικών διατάξεων.
- την δυνατότητα δυναμικής εκτροπής της ενέργειας του πλοίου από την πρόωση στα επιχειρησιακά συστήματα και αντίστροφα, ανάλογα με την εκάστοτε επιχειρησιακή κατάσταση.
- την υιοθέτηση απλούστερων μηχανικών διατάξεων με υψηλή συντηρησιμότητα (maintainability, μικρότερα downtimes και απλούστερες διαδικασίες συντήρησης π.χ. αφαίρεση άξονα έλικας, συντήρηση εν πλω, κλπ.), αξιοπιστία (reliability), προσαρμοστικότητα στις τεχνολογικές εξελίξεις (π.χ. μελλοντική αντικατάσταση gas turbine από fuel cells) και ευελιξία (απώλεια μιας συμβατικής diesel μηχανής οδηγεί σε απώλεια της ημίσειας ισχύος και της μιας έλικας του πλοίου, γεγονός που δεν υφίσταται στην πρόωση με diesel electric).
- την μειωμένη στάθμη παραγόμενου θορύβου και κραδασμών σε ταχύτητες ανθυποβρυχιακής λειτουργίας, αφού οι diesel κινητήρες δεν συνδέονται απευθείας στην έλικα και συνεπώς καθίσταται εφικτή η ηχητική τους απομόνωση (vibration isolation).
- την δυνατότητα διάταξης της προωστήριου εγκατάστασης σε θέσεις που παρέχουν υψηλή επιβιωσιμότητα μετά από υποβρύχια βλάβη αλλά και απλούστερη εσωτερική διαρρύθμιση στο χώρο μηχανών και στους below-deck ωφέλιμους χώρους για επιχειρησιακές χρήσεις (π.χ. οι vertical launchers στις φρεγάτες Spruance-class είναι οι μισοί σε σχέση με τους αντιστοίχους στη Burke-class, καθόσον η τοποθέτησή των cells στο οπίσθιο τμήμα δεν ήταν εφικτή λόγω του ύψους μηχανών).



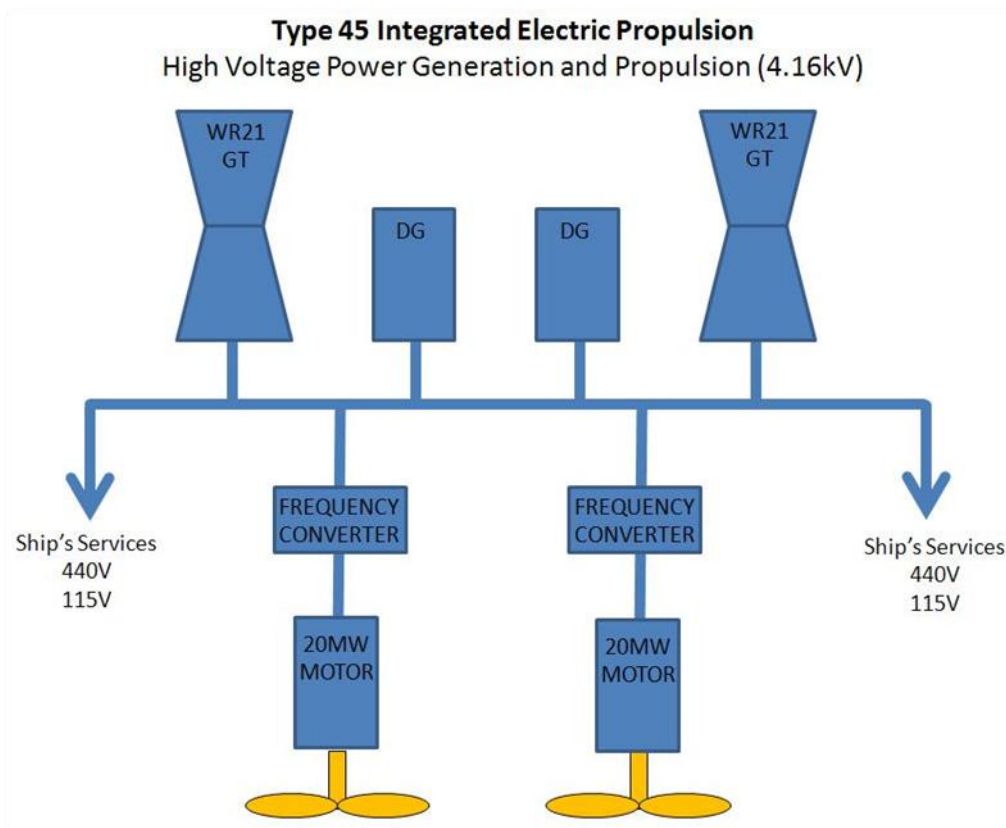
Εικόνα 93: Διάταξη ηλεκτρικής πρόωσης: 1) Gen Sets, 2) Switchboards, 3) Transformers, 4) Frequency Converters, 5) Electric Propulsion Motors, 6) Gearboxes, 7) Propellers [35]

- την δυνατότητα παροχής ισχύος σε προωστήριες έλικες που τοποθετούνται μακριά από την πρύμνη, για επιχειρησιακούς λόγους (π.χ. thrusters), δίχως πρόσθετη διάταξη ισχύος.
- Την βελτίωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος του πλοίου, λόγω μικρότερης εκπομπής ρύπων και καλύτερων ενεργειακών δεικτών (EEDI).

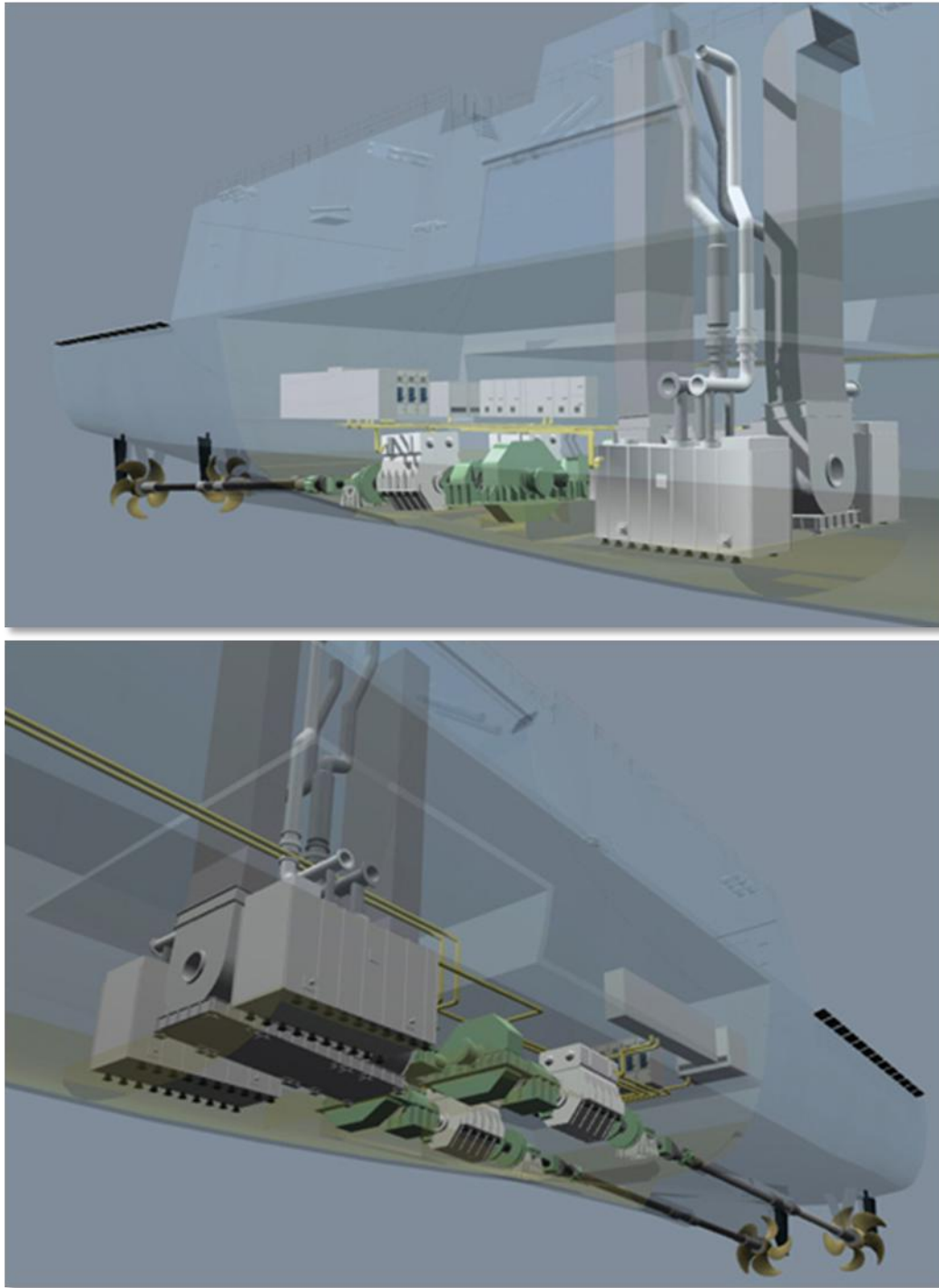
Στην παρούσα επιλέχθηκε η διάταξη Combined Diesel Electric And Gas, τυπική αποτύπωση της οποίας παρέχεται στην εικόνα 94,95 & 96.



Εικόνα 94: Τυπική διάταξη Combined Diesel Electric And Gas

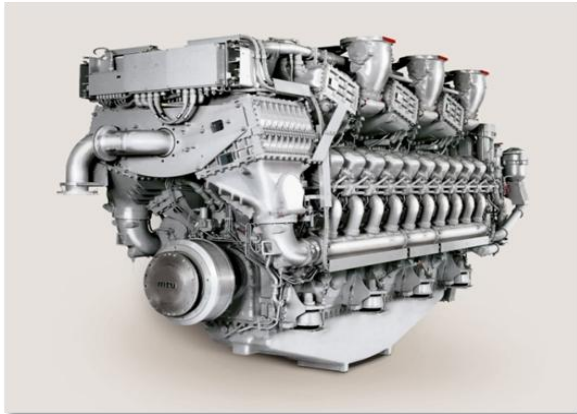


Εικόνα 95: Διάταξη ισχύος CODLAG Daring Class

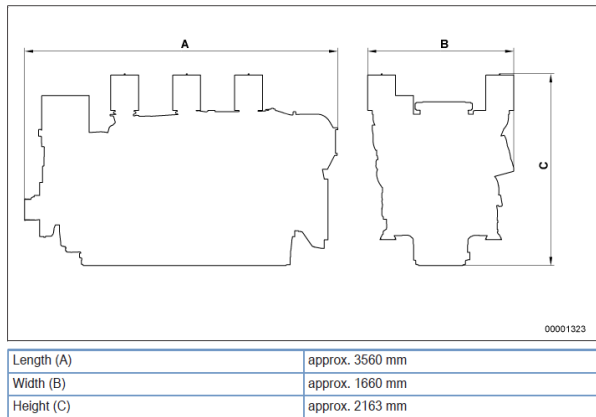


Εικόνα 96: Διάταξη πρόωσης CODLAG FREMM class

Για το υπό σχεδίαση πλοίο επιλέχθηκαν δύο Generator Sets MTU 4000 20V M53B ονομαστικής ισχύος $MCR=6030KW$ στις 1800rpm έκαστο.



Engine – Main dimensions

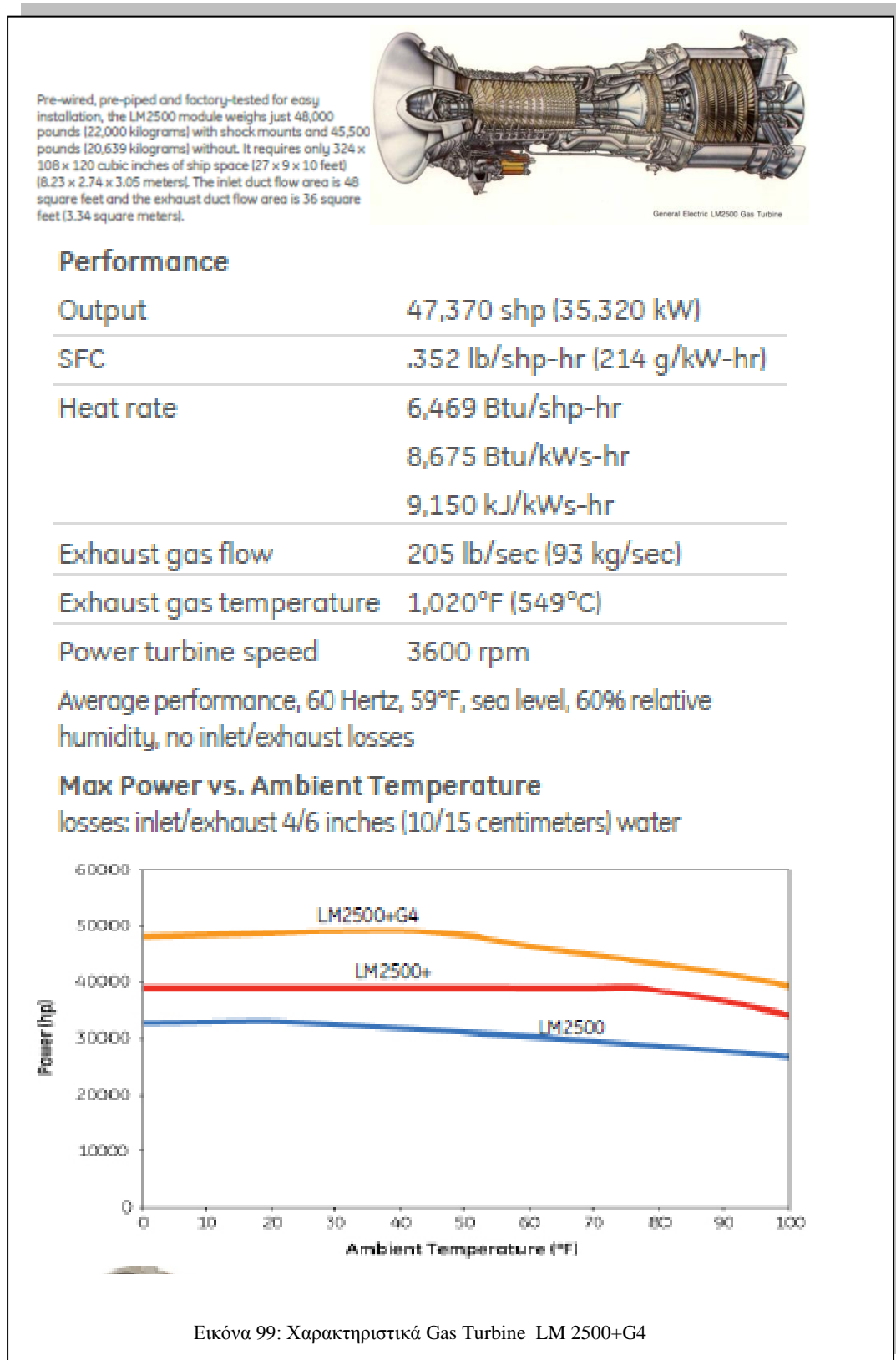


Εικόνα 97: Generator Set MTU 4000 20V 53B

Engine model	20V 4000 M53B	
Rated power to DIN ISO 3046		ICXN
Rated power max.	kW (bhp)	3015 (4043)
Speed max.	rpm	1800
Frequency	hz	60
Exhaust emission		18
Engine main data		
Bore/Stroke	mm (in)	170/190 (6.7/7.5)
Cylinder displacement	l	4.31
Displacement, total	l (cu in)	86.2 (5263)
Intake air temperature	°C	25
Sea water temperature	°C	25
Site altitude above sea level	m	100
Barometric pressure	mbar	1000
Power reduction at 45/32 °C	%	0
Fuel consumption	l/h (gal/h)	738.4 (195.0)
Fuel consumption		
at rated power	l/h (gal/h)	580.9 (153.4)

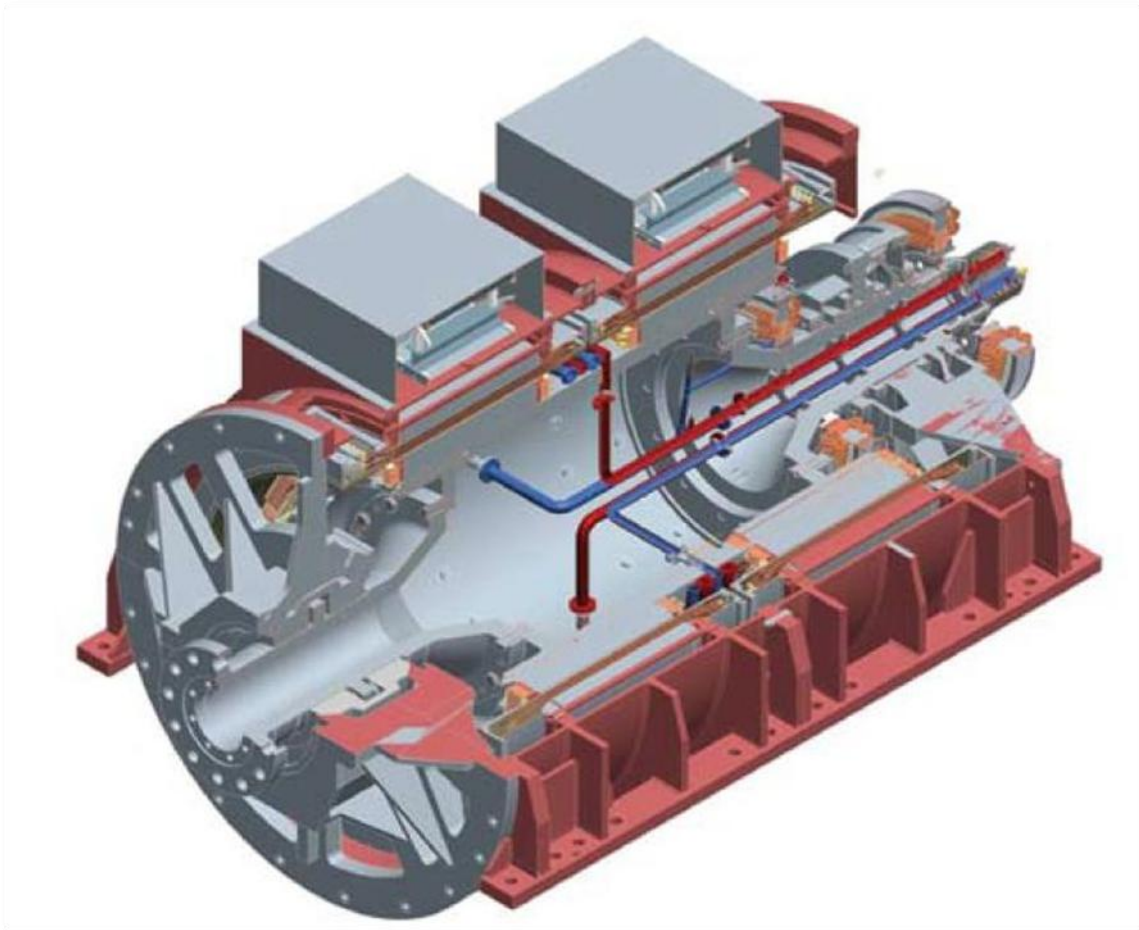
Εικόνα 98: Χαρακτηριστικά MTU 4000 20V 53B

καθώς και ένα Gas Turbine GE Avio LM2500+G4, ονομαστικής ισχύος 35MW, το οποίο επιλέγεται για λόγους υψηλής αξιοπιστίας αλλά και κοινοτυπίας με φρεγάτες τύπου ΜΕΚΟ.



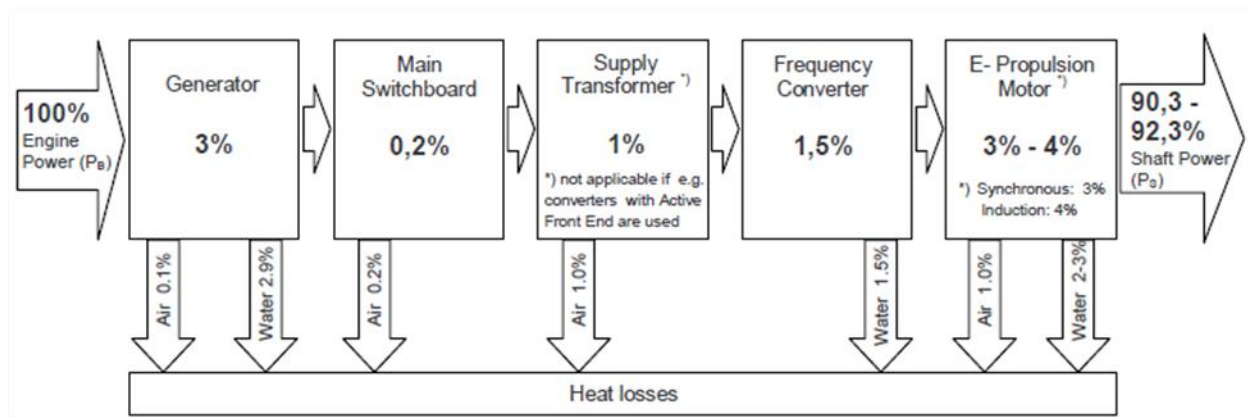
Αν και η προτεινόμενη διάταξη παροχής ηλεκτρικής ισχύος θα μπορούσε να υποστηρίξει τη χρήση συστημάτων Podded Drive Propulsion (Azipods) τα οποία εμφανίζουν

σημαντικά πλεονεκτήματα (ευελιξία, αντίσταση προσαρτημάτων, ηχητική υπογραφή, βέλτιστη διαρρύθμιση below-deck, κ.α.), εντούτοις η χρήση τους δεν συναντάται στα πλοία της κατηγορίας, ενώ δεν είναι γνωστή και η επίδραση τους στο κόστος κύκλου ζωής. Συνεπώς προτείνεται η «συμβατικότερη» επιλογή τοποθέτησης ηλεκτρικών κινητήρων πρόωσης, σύμφωνα με τις βέλτιστες πρακτικές αντιστοίχων σχεδιάσεων πλοίων της κατηγορίας. Ειδικότερα, επιλέγονται δυο GE Power Conversion Advanced Induction Motors.



Εικόνα 100: GE Advanced Induction Motor 20MW

8.10 Επάρκεια Παρεχόμενης Ηλεκτρικής Ισχύος



Εικόνα 101: Μετασηματισμοί ισχύος στο σύστημα ηλεκτρικής πρόωσης [35]

Ακολουθώντας την μεθοδολογία της MAN [35] για τον υπολογισμό της απαιτούμενης ηλεκτρικής ισχύος, για την πρόωση του πλοίου στην ταχύτητα των 17 kts και λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις ισχύος για καθαρή γάστρα (3438 KW), προκύπτει ότι η προτεινόμενη διάταξη υπερκαλύπτει τις συνολικές ενεργειακές απαιτήσεις στην οικονομική ταχύτητα των 17 kts (όπου ένα Generator Set καλύπτει τόσο την πρόωση, όσο και τις λοιπές ενεργειακές απαιτήσεις) και εξασφαλίζει ότι στην εν λόγω ταχύτητα το πλοίο δύναται να λειτουργεί πλήρως επιχειρησιακά, δίχως τη χρήση του Gas Turbine.

Πίνακας 62: Υπολογισμός επάρκειας ηλεκτρικής ισχύος στα 17 kts

Diesel Generators Power Calculations			
1.1	Shaft propulsion power	3438	KW
	Electrical transmission efficiency	0,91	
1.2	Engine Brake Power	3778	KW
2.1	Avg.Electric power for Ship (eLoads) *	2000	KW
	Alternator efficiency	0,96	
2.2	Engine Brake Power (eLoads)	2083	KW
	Total Engine Brake Demand	5861	KW
3.1	Diesel Engine Selection	MTU 16V 1163 TB93 Gen Set	
3.2	Rated power (MCR using MDO)	5920	KW
3.3	Number of Diesel Engines	1	
3.4	Total Engine Brake Power Installed	6030	KW
3.5	Engine Loading	98%	

Αντίστοιχα στα 30 kts, οι απαιτήσεις ηλεκτρικής ισχύος καλύπτονται από τη χρήση των δύο Generator Sets και την ταυτόχρονη λειτουργία του Gas Turbine, όπως προκύπτει ακόλουθα:

Πίνακας 63: Υπολογισμός επάρκειας ηλεκτρικής ισχύος στα 30 kts

Diesel Generators Power Calculations			
1.1	Shaft propulsion power	39597	KW
	Electrical transmission efficiency	0,91	
1.2	Engine Brake Power	43513	KW
2.1	Avg. Electric power for Ship (eLoads) *	2000	KW
	Alternator efficiency	0,96	
2.2	Engine Brake Power (eLoads)	2083	KW
	Total Engine Brake Demand	45597	KW
3.1	Engine Pack Selection	MTU 4000 20V M53B Gen Set + LM AVIO LM2500+G4	
3.2	Rated power (MCR using MDO)	47400	KW
3.3	Number of Packs	1	
3.4	Total Engine Brake Power Installed	47400	KW
3.5	Engine Loading	96%	

Σε ότι αφορά στην απαιτούμενη μέγιστη συνολική ηλεκτρική ισχύ (Average Electric Power – eLoads), αυτή δεν είναι δυνατό να προσδιορισθεί επακριβώς με χρήση εμπειρικών τύπων, καθόσον τα φορτία επιχειρησιακής λειτουργίας των αισθητήρων και συστημάτων του πλοίου, αποτελούν τις κύριες ηλεκτρικές απαιτήσεις του πλοίου και εξαρτώνται από τα επιλεγμένα συστήματα. Ως εκ τούτου, χρησιμοποιήθηκε συντηρητική εκτίμηση, βασισμένη σε δεδομένα ομοιότυπου (από πλευράς επιχειρησιακών συστημάτων) πλοίου της κατηγορίας.

Συνεπώς, η συνολική μηχανική ισχύς του επιλεγμένου συστήματος CODLAG διαμορφώνεται σε MCR=47,4 MW. Θεωρώντας συνολικό βαθμό απόδοσης ηλεκτρικού μετασχηματισμού 91% [35], προκύπτει ότι τελικά στους άξονες των ελίκων διανέμονται 43,5MW μηχανικής ισχύος, για πλοίο με καθαρή γάστρα και margin 20%, και παράλληλα ικανοποιούνται οι απαιτήσεις ηλεκτρικών φορτίων σε επιχειρησιακή λειτουργία (2.1 MW).

Επισημαίνεται ότι η περαιτέρω ανάλυση της ηλεκτρικής διάταξης ισχύος (δίκτυα υψηλής και χαμηλής τάσης, πίνακες, μετασχηματιστές συχνότητας, κλπ.) απαιτούν διακριτή μελέτη (Electric Load Analysis) στα πλαίσια της αναλυτικής σχεδίασης, και ως εκ τούτου δεν αναλύονται περαιτέρω στην παρούσα σχεδίαση.

8.11 Επάρκεια Παρεχόμενης Ηλεκτρικής Ισχύος

Μετά την τελική επιλογή του συστήματος πρόωσης, λαμβάνοντας υπόψη τις υπολογισθείσες τιμές αντίστασης ρυμούλκησης, διατυπώθηκε στην εικόνα 91 το διάγραμμα καμπύλης της κάθε έλικας. Συνεπώς, με δεδομένη την απαιτούμενη ισχύ με καθαρή γάστρα από την καμπυλη της έλικας, είναι εφικτή η προσέγγιση της κατανάλωσης καυσίμου, ανάλογα με την ταχύτητα του πλοίου αλλά και την συμβολή των επιμέρους προωστικών συστημάτων της προτεινόμενης διάταξης.

Από τα δεδομένα της παρούσας σχεδίασης, προσδιορίζονται οι καταναλώσεις της διάταξης, οι ονομαστικές τιμές της οποίας είναι:

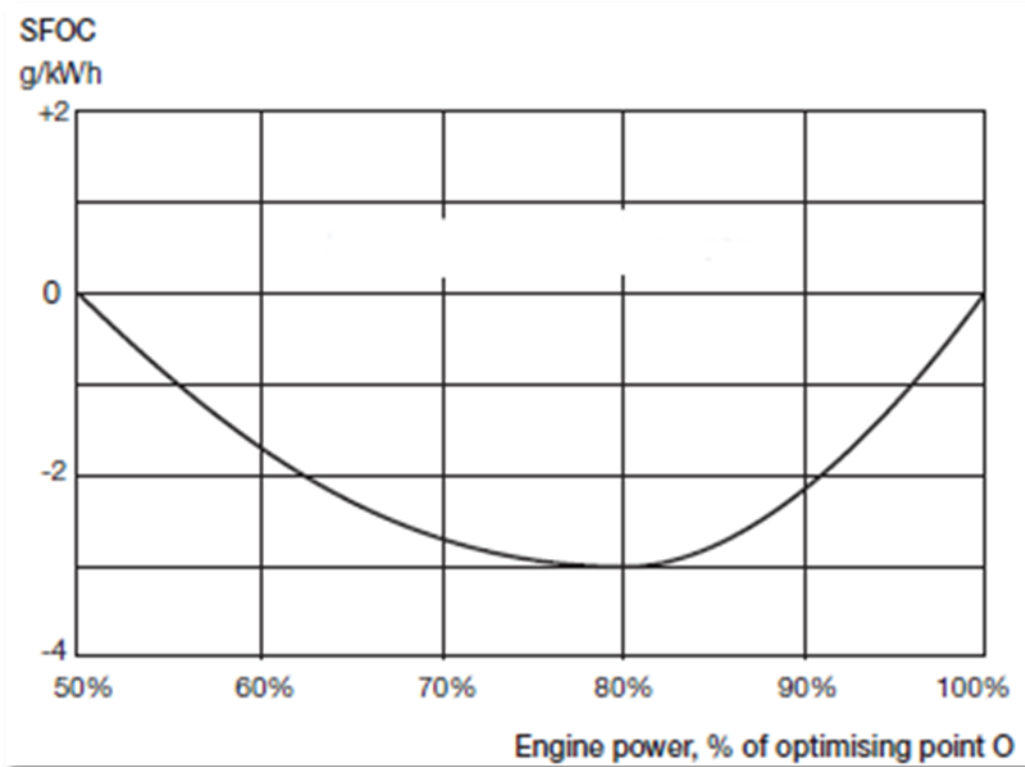
- $b_{e \text{ diesel pack}} = 182 \text{ gr/kWh}$
- $b_{e \text{ gas turbine}} = 214 \text{ gr/kWh}$

ενώ η συνολική διαθέσιμη ποσότητα καυσίμου, στην Load Case 2A είναι 464t καυσίμου.

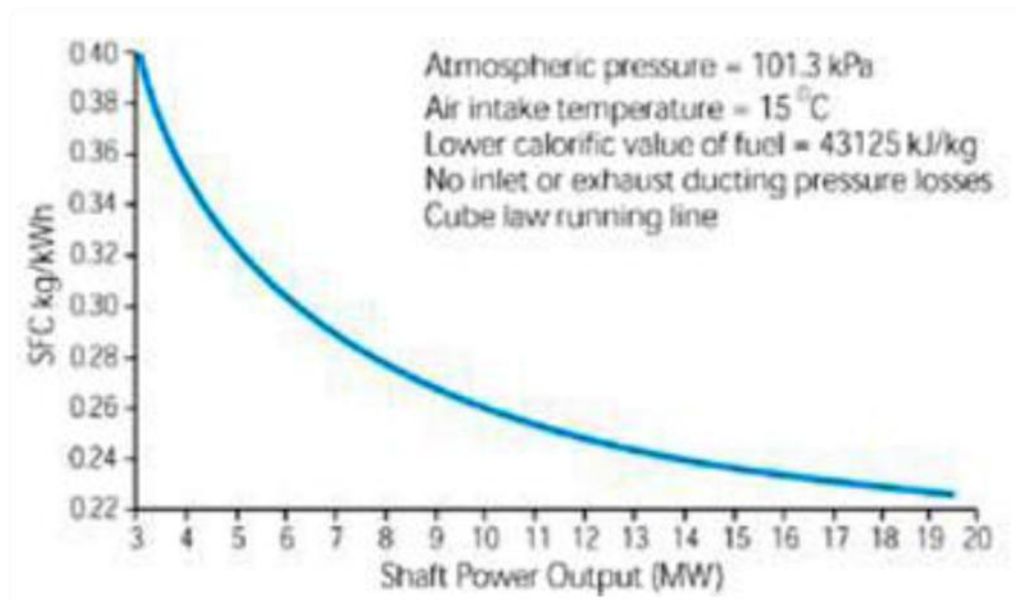
Ανάλογα με την ταχύτητα πρόωσης του πλοίου, και συνεπώς την αντιμετωπιζόμενη αντίσταση, ενεργοποιούνται σταδιακά τα συστήματα πρόωσης ως εξής:

- Ένα diesel pack που τροφοδοτεί τις δύο έλικες.
- Δύο diesel pack που τροφοδοτούν τις δύο έλικες.
- Δύο diesel pack και ο αεριοστρόβιλος τροφοδοτούν τις δύο έλικες.

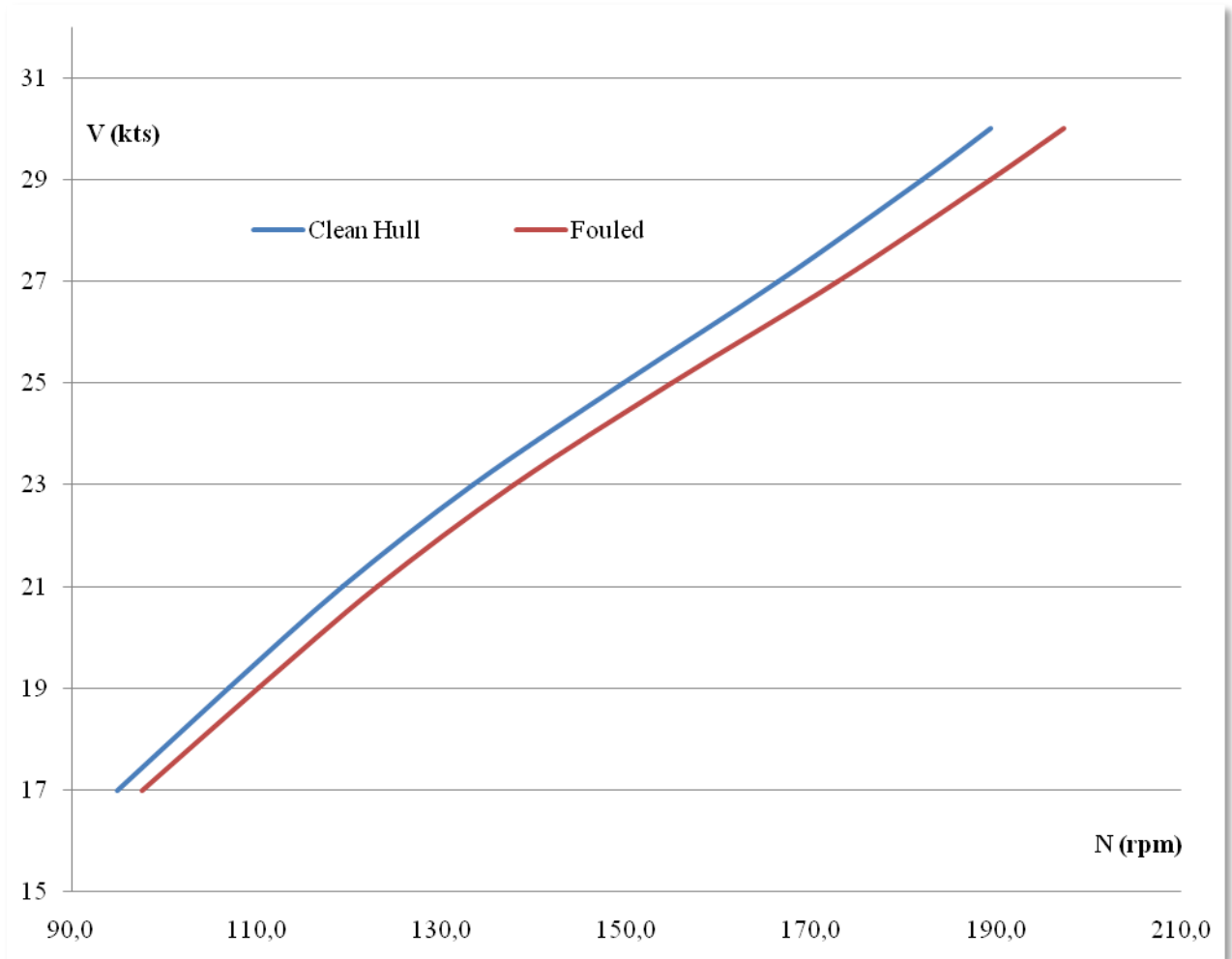
Θεωρώντας ότι η αναζήτηση της εμβέλειας στο εύρος ταχυτήτων, φορτίου μηχανών και αντίστασης οφείλει να εξετασθεί στην κατάσταση μέγιστης απορρόφησης ηλεκτρικής ισχύος από τα επιχειρησιακά συστήματα του πλοίου (εκτιμάται σε 1500KW), υπολογίσθηκαν οι ακόλουθες εκτιμήσεις κατανάλωσης, παρεχόμενης ισχύος στις έλικες και συναφούς εμβέλειας, για το υπό μελέτη φάσμα ταχυτήτων.



Εικόνα 102: Διακύμανση ειδικής κατανάλωση καυσίμου Diesel Generators



Εικόνα 103: Διακύμανση ειδικής κατανάλωσης καυσίμου Gas Turbine



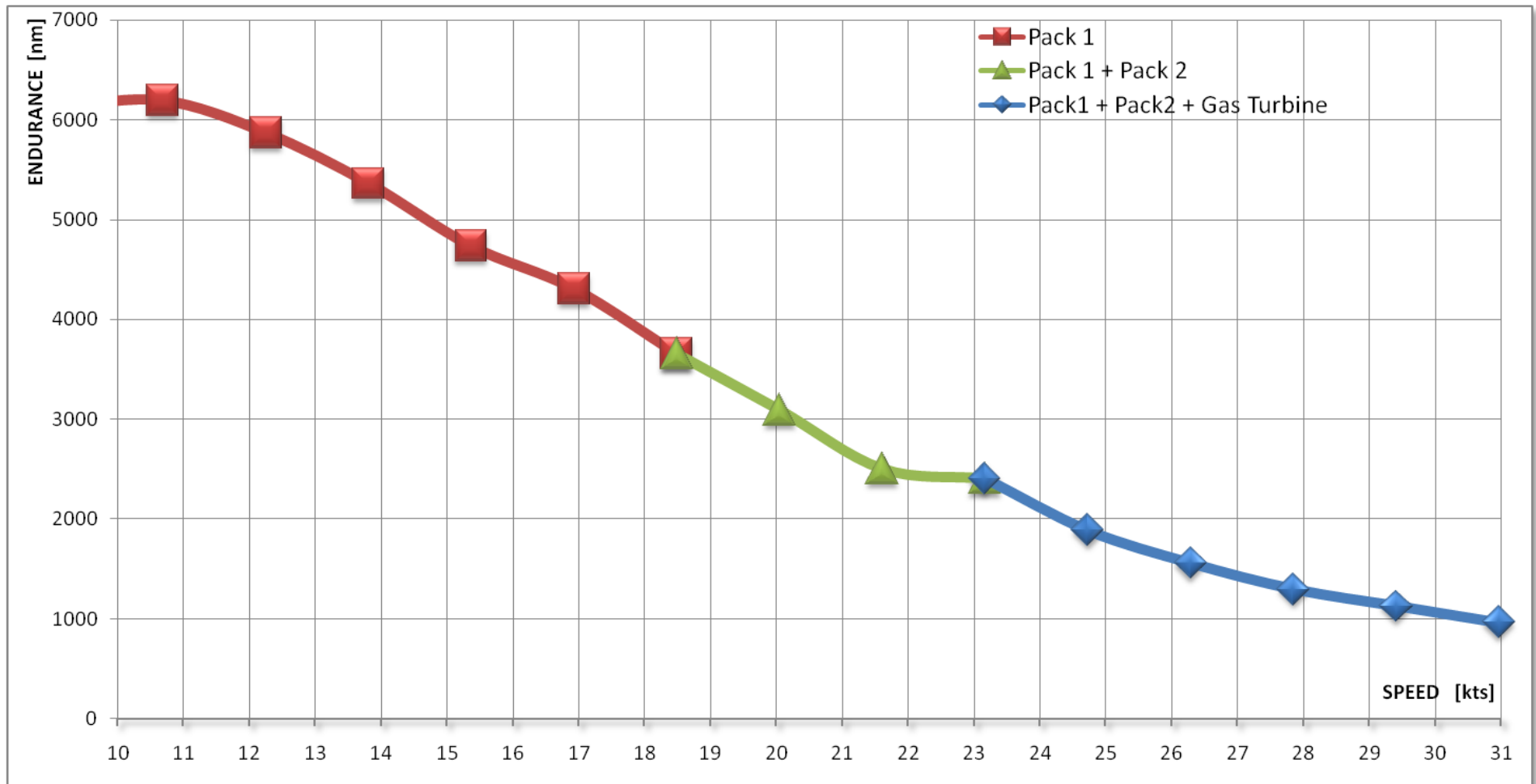
Εικόνα 104 : Συσχετισμός στροφών έλικας και ταχύτητας πλεύσης

Πίνακας 64: Εμβέλεια πλοίου (Καθαρή γάστρα)

V (kts)	SHP (KW)	DHP (KW)	Pack 1 (%MCR)	SFOC (gr/kWh)	Pack 1 DHP (KW)	Pack 1+2 (%MCR)	SFOC (gr/kWh)	Pack 2 DHP (KW)	GT (%N)	SFOC (gr/kWh)	GT DHP (KW)	Total DHP (KW)	Averaged SFOC (gr/kWh)	Fuel Burned (Kgr/h)	Endurance (nm)
11	552	607	35%	190	2107							2107	190,0	400,3	6195
12	952	1047	42%	190	2547							2547	190,0	483,9	5873
14	1527	1678	52%	188	3178							3178	188,0	597,5	5362
15	2316	2545	67%	186	4045							4045	186,0	752,4	4739
17	3143	3454	82%	184	4954							4954	184,0	911,5	4309
18	4426	4864	100%	184	6060	5%	190	304				6364	184,3	1172,8	3657
20	6021	6617	100%	184	6060	34%	190	2057				8117	185,5	1505,8	3089
22	8501	9342	100%	184	6060	79%	186	4782				10842	184,9	2004,4	2501
23	11048	12140	100%	184	6060	100%	184	6060	0%	240	20	12140	184,1	2234,9	2405
25	14100	15495	100%	184	6060	100%	184	6060	10%	240	3375	15495	196,2	3040,0	1887
26	17715	19467	100%	184	6060	100%	184	6060	21%	230	7347	19467	201,4	3919,8	1556
28	21950	24121	100%	184	6060	100%	184	6060	34%	230	12001	24121	206,9	4990,2	1295
29	26866	29523	100%	184	6060	100%	184	6060	49%	220	17403	29523	205,2	6058,8	1126
31	32526	35743	100%	184	6060	100%	184	6060	67%	220	23623	35743	207,8	7427,2	967

* Το φορτίο του Pack 1 λαμβάνει υπόψη του ισχύ 1500KW επ' ωφελεία των Mission Systems

Εικόνα 105: Εμβέλεια Πλοίου (Καθαρή Γάστρα)

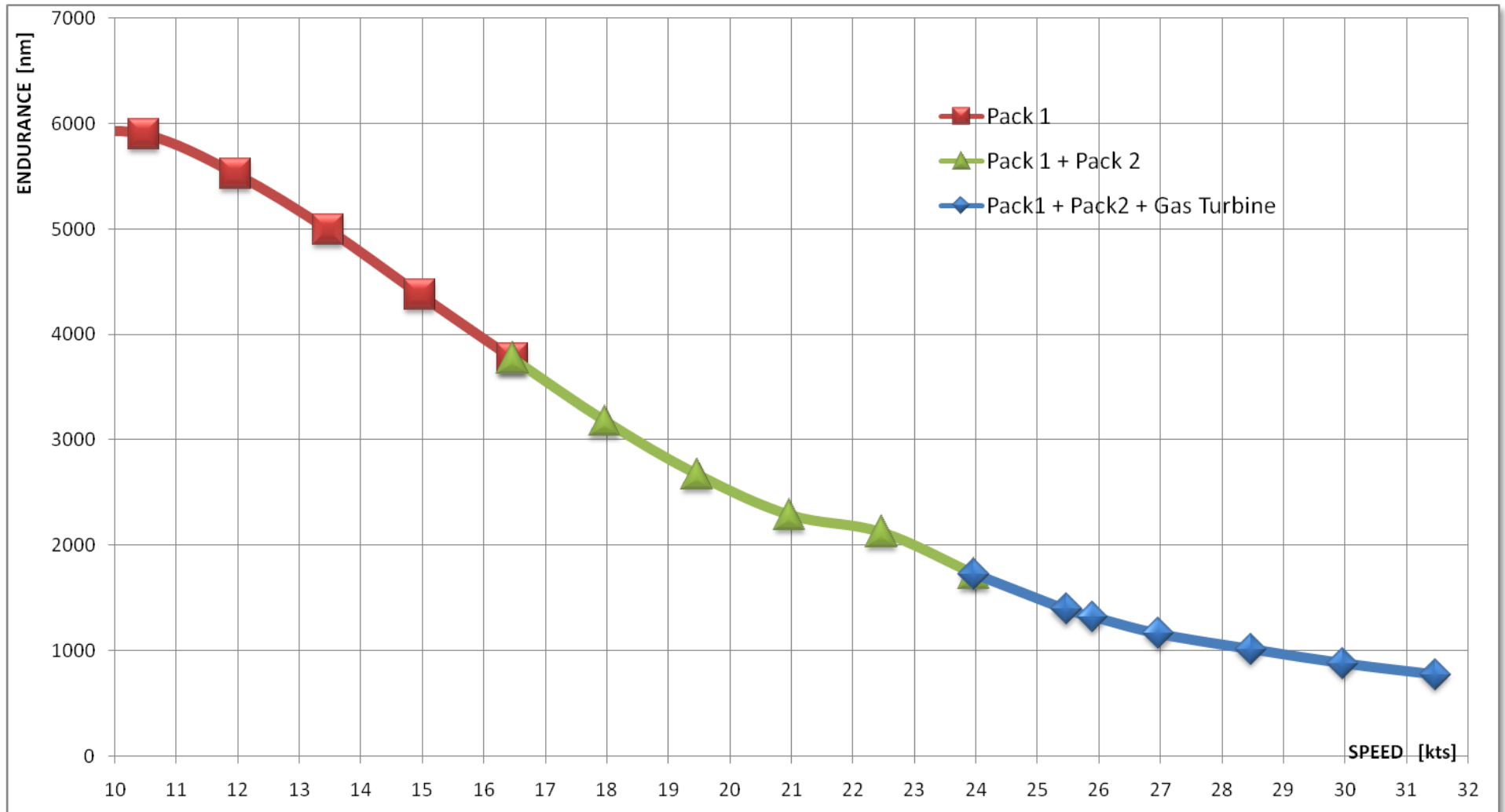


Πίνακας 65: Εμβέλεια πλοίου (Ρυπαρή γάστρα)

V (kts)	SHP (KW)	DHP (KW)	Pack 1 (%MCR)	SFOC (gr/kWh)	Pack 1 DHP (KW)	Pack 1+2 (%MCR)	SFOC (gr/kWh)	Pack 2 DHP (KW)	GT (%N)	SFOC (gr/kWh)	GT DHP (KW)	Total DHP (KW)	Averaged SFOC (gr/kWh)	Fuel Burned (Kgr/h)	Endurance (nm)
10	606	665	36%	190	2165							2165	190,0	411,4	5901
12	1040	1143	44%	190	2643							2643	190,0	502,2	5527
13	1663	1827	55%	188	3327							3327	188,0	625,5	4994
15	2514	2763	70%	186	4263							4263	186,0	792,9	4378
16	3640	4000	91%	184	5500	0%	190	0				5500	184,0	1012,0	3774
18	5086	5590	100%	184	6060	17%	190	1030				7090	184,9	1310,7	3180
19	6904	7587	100%	184	6060	50%	190	3027				9087	186,0	1690,1	2672
21	9144	10049	100%	184	6060	91%	184	5489	0%	260	0	11549	184,0	2125,0	2289
22	11862	13035	100%	184	6060	100%	184	6060	3%	240	915	13035	187,9	2449,8	2127
24	15114	16608	100%	184	6060	100%	184	6060	13%	220	4488	16608	193,7	3217,5	1728
25	18958	20833	100%	184	6060	100%	184	6060	25%	230	8713	20833	203,2	4234,0	1395
26	20192	22189	100%	184	6060	100%	184	6060	29%	230	10069	22189	204,9	4545,9	1322
27	23455	25775	100%	184	6060	100%	184	6060	39%	230	13655	25775	208,4	5370,6	1165
28	28668	31503	100%	184	6060	100%	184	6060	55%	220	19383	31503	206,1	6494,3	1017
29	34661	38089	100%	184	6060	100%	184	6060	74%	218	25969	38089	207,2	7891,3	881
30	41501	45605	100%	184	6060	100%	184	6060	95%	214	33485	45605	206,0	9395,9	777

* Το φορτίο του Pack 1 λαμβάνει υπόψη του ισχύ 1500KW επ' ωφελεία των Mission Systems

Εικόνα 106: Εμβέλεια Πλοίου (Ρυπαρή Γάστρα)

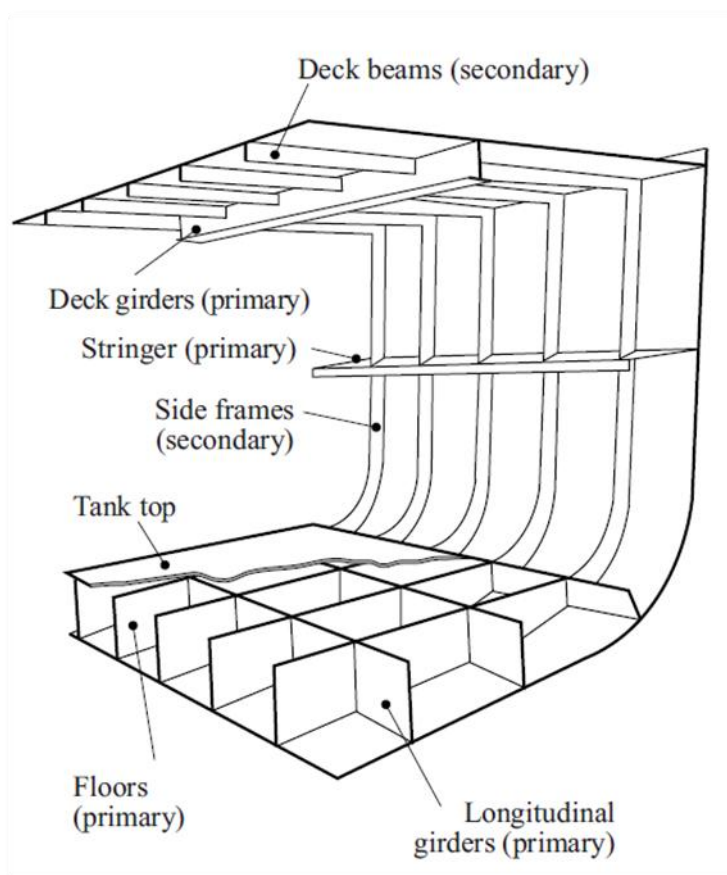


Από την γενόμενη ανάλυση προκύπτει ότι το υπό σχεδίαση πλοίο πληρεί τις απαιτήσεις εμβελείας στην κατάσταση Load Case 2A με καθαρή γάστρα, στην οικονομική ταχύτητα των 17 kts, επιτυγχάνοντας εμβέλεια που υπερβαίνει τα 4000 ναυτικά μίλια, χρησιμοποιώντας μόνο το ένα Generator Set. Ομοίως προκύπτει ότι στην ταχύτητα μάχης των 30 kts, χρησιμοποιώντας όλη την διαθέσιμη ισχύ, η εμβέλεια του πλοίου περιορίζεται περί τα 1000 ναυτικά μίλια.

9. Αντοχή Μέσης Τομής

Στην φάση της αρχικής σχεδίασης του πλοίου, απαιτείται και ο καθορισμός των δομικών στοιχείων που συγκροτούν την μέση τομή (πρωτεύοντα και δευτερεύοντα), ο καθορισμός των παχών των ελασμάτων του πλοίου και η εξέταση της αντοχής της μέσης τομής, σύμφωνα με τις ελάχιστες απαιτήσεις που θέτουν οι κανονισμοί [17].

Με δεδομένο ότι η παρούσα αφορά στην αρχική σχεδίαση του πλοίου, δεν εξετάζονται τα φαινόμενα επίδρασης των οριζόντιων ροπών κάμψης / διατμητικών δυνάμεων, ούτε φαινόμενα στρέψης, λυγισμού, κ.α., καθόσον αποτελούν αντικείμενο της αναλυτικής σχεδίασης. Ως εκ τούτου, οι αναλύσεις περιορίζονται μόνο στις επιδράσεις των εγκάρσιων ροπών κάμψης και διατμητικών δυνάμεων, η δε μελετώμενη αντοχή εξετάζεται μόνο υπό την επίδραση των φορτίων αυτών.



Εικόνα 107: Πρωτεύοντα και δευτερεύοντα στοιχεία μέσης τομής σε διάμηκες σύστημα ενίσχυσης [17]

9.1 Φορτία Σχεδίασης

Σύμφωνα με τους κανονισμούς, για τα πλοία της κατηγορίας του πλοίου σχεδίασης, θα πρέπει να ισχύει:

$$\frac{M_p}{\gamma_m} \geq |M_T|$$

Όπου:

- M_p : η καμπτική ροπή που δύναται να παραλάβουν τα πρωτεύοντα και δευτερεύοντα στοιχεία της μέσης τομής, σύμφωνα με τους κανονισμούς σχεδίασης.
- M_T : η καμπτική ροπή που ασκείται στην περιοχή της μέσης τομής, σε μία κατάσταση φόρτωσης, υπό την επίδραση του περιβάλλοντος.
- γ_m : ο συντελεστής ασφαλείας αντοχής.

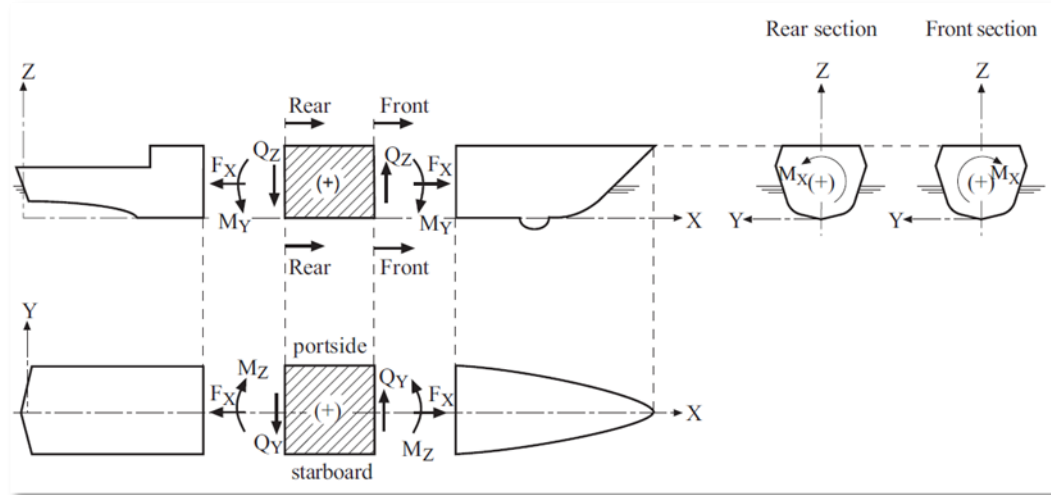
Σύμφωνα με τους κανονισμούς [17], ο συντελεστής ασφαλείας αντοχής λαμβάνεται ανάλογα με την κατάσταση βλάβης του πλοίου (άθικτο- Load Case A ή με βλάβη-Load Case B) αλλά και από τα επιθυμητά μηχανικά φαινόμενα που μελετώνται (π.χ. κάμψη, λυγισμός/ κόπωση – Load Case C/D, κλπ.). Στην περίπτωση μας, μελετάται η αντοχή του πλοίου σε εγκάρσια καμπτικά φορτία, σε άθικτη κατάσταση (Load Case A) και ως εκ τούτου ο συντελεστής ασφαλείας λαμβάνεται σύμφωνα με τους κανονισμούς ίσος με:

$$\gamma_m=1,1$$

Μελετώντας την διαμήκη αντοχή του πλοίου ως δοκό στην άθικτη κατάσταση ([17], section 6), η επιτρεπόμενη εγκάρσια καμπτική ροπή σε κατάσταση Sagging και Hogging υπολογίζεται ως εξής:

$$M_T = M_{sw}\gamma_{sw} + M_{wv}\gamma_{wv}$$

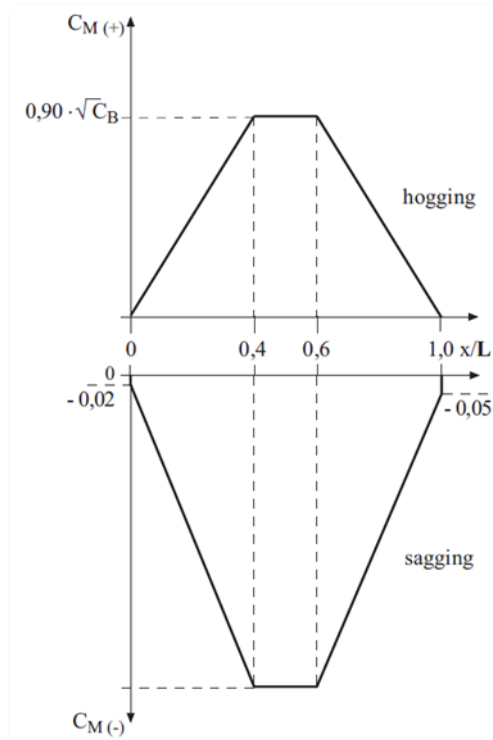
Όπου:



Εικόνα 108: Σύμβαση συμβόλων

- M_{sw} : η καμπτική ροπή σε ήρεμο νερό.
- M_{wv} : η καμπτική ροπή σε κυματισμό.
- γ_{fstat} : ο συντελεστής ασφαλείας για στατικά φορτία, ο οποίος για Load Case A ισούται με $\gamma_{fstat}=1,25$.
- γ_{dyn} : ο συντελεστής ασφαλείας για δυναμικά φορτία, ο οποίος για Load Case A ισούται με $\gamma_{dyn}=1,25$.

Για τον καθορισμό των επιτρεπόμενων τιμών της εγκάρσιας ροπής κάμψης (vertical moments envelope) σε κυματισμό, στην άθικτη κατάσταση, χρησιμοποιούνται οι προβλέψεις των κανονισμών ([17], section 6).

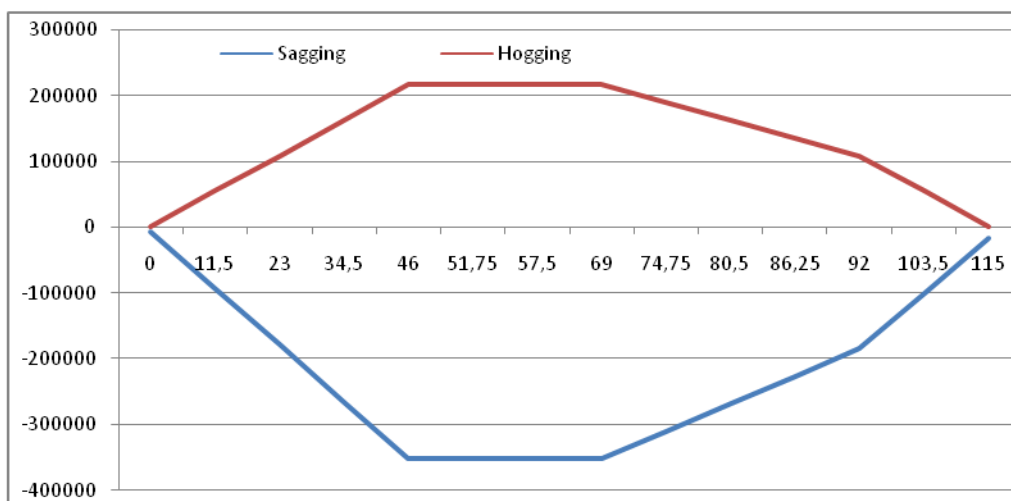


Εικόνα 109: Φάκελος συντελεστή κατανομής ροπής C_M κατά μήκος του πλοίου

Από τους κανονισμούς λαμβάνεται ότι η εγκάρσια ροπή κάμψης είναι:

$$M_{wv} = 0.24 * 10^{-3} * L^2 * B * \sqrt{C_B} * c_0 * c_v * c_M [MNm]$$

όπου ο συντελεστής C_M υπολογίζεται με βάση τον φάκελο της εικόνας 109. Για τα δεδομένα του πλοίου μας, η επιτρεπόμενη ροπή κάμψης λόγω κυματισμού, είναι:

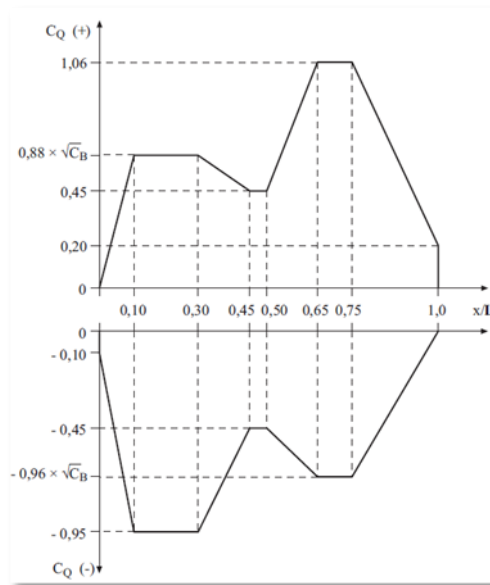


Εικόνα 110: Κατανομή εγκάρσιας ροπών κάμψης σε κύμα

Αντίστοιχα, σε κατάσταση κυματισμού για άθικτο πλοίο, οι επιτρεπόμενες εγκάρσιες διατμητικές δυνάμεις, είναι:

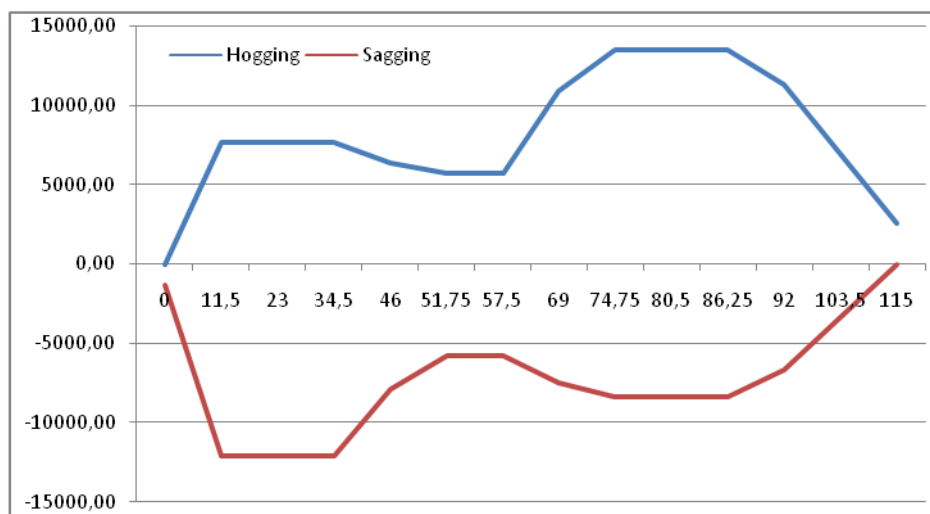
$$Q_{wy} = 10^{-3} * L * B * \sqrt{C_b} * c_0 * c_v * c_Q [MN]$$

όπου ο συντελεστής C_Q υπολογίζεται με βάση τον φάκελο της εικόνας 111.



Εικόνα 111: Φάκελος συντελεστή κατανομής εγκάρσιων διατμ. δυνάμεων C_Q κατά μήκος του πλοίου

Για τα δεδομένα του πλοίου μας, οι επιτρεπόμενες διατμητικές δυνάμεις λόγω κυματισμού, είναι:



Εικόνα 112: Κατανομή εγκάρσιων διατμητικών δυνάμεων σε κύμα

Οι σχετικοί υπολογισμοί για την εξαγωγή των ανωτέρω διαγραμμάτων, πραγματοποιήθηκαν για την ταχύτητα των 30 kts, οι δε αναλυτικές τιμές που προέκυψαν από τους υπολογισμούς, παρατίθενται ακόλουθα:

Πίνακας 66: Επιτρεπόμενες τιμές εγκάρσιων ροπών και διατ. δυνάμεων στο κύμα

X/L	X (m)	Sagging		Hogging		Hogging		Sagging	
		C _m	Ροπή (KNm)	C _m	Ροπή (KNm)	C _Q	Διάτμηση (KN)	C _Q	Διάτμηση (KN)
0	0	-0.02	-7033.28	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.10	-1274.14
0.1	11.5	-0.27	-93190.97	0.15	54187.22	0.60	7678.70	-0.95	-12104.38
0.2	23	-0.51	-179348.65	0.31	108374.44	0.60	7678.70	-0.95	-12104.38
0.3	34.5	-0.76	-265506.33	0.46	162561.66	0.60	7678.70	-0.95	-12104.38
0.4	46	-1.00	-351664.02	0.62	216748.88	0.50	6382.00	-0.62	-7857.23
0.45	51.75	-1.00	-351664.02	0.62	216748.88	0.45	5733.65	-0.45	-5733.65
0.5	57.5	-1.00	-351664.02	0.62	216748.88	0.45	5733.65	-0.45	-5733.65
0.6	69	-1.00	-351664.02	0.62	216748.88	0.86	10915.18	-0.59	-7495.73
0.65	74.75	-0.88	-309903.92	0.54	189655.27	1.06	13505.94	-0.66	-8376.77
0.7	80.5	-0.76	-268143.81	0.46	162561.66	1.06	13505.94	-0.66	-8376.77
0.75	86.25	-0.64	-226383.71	0.39	135468.05	1.06	13505.94	-0.66	-8376.77
0.8	92	-0.53	-184623.61	0.31	108374.44	0.89	11314.41	-0.53	-6701.41
0.9	103.5	-0.29	-101103.41	0.15	54187.22	0.54	6931.35	-0.26	-3350.71
1	115	-0.05	-17583.20	0.00	0.00	0.20	2548.29	0.00	0.00

Από τους κανονισμούς ([17], section 6.C1), δεν καθορίζεται ο τρόπος υπολογισμού των επιτρεπόμενων τιμών εγκάρσιας ροπής κάμψης και διατμητικών δυνάμεων στο ήρεμο νερό, ο υπολογισμός των οποίων επαφίεται στην Αρχή. Ως εκ τούτου, στα πλαίσια της παρούσας λαμβάνεται ως επιτρεπόμενο όριο τιμών, αυτό που εξάγεται από το λογισμικό AVEVA :

Πίνακας 67: BM/SF τιμές στο ήρεμο νερό (AVEVA)

Distance from Origin (m)	Shearing Force (kN)	Bending Moment (kNm)
0.00	-0.5	4.4
11.50	1225.6	5646.7
23.00	2932.8	30707.4
34.50	3252.9	67342.0
46.00	2362.6	100795.1
51.75	1515.6	112094.7
57.50	522.6	117960.2

Distance from Origin (m)	Shearing Force (kN)	Bending Moment (kNm)
69.00	-1448.5	112448.0
74.75	-2254.2	101691.3
80.50	-2807.4	87020.6
86.25	-3152.0	69864.1
92.00	-3164.7	51489.6
103.50	-2119.0	20052.3
115.00	-731.1	2655.7
<i>Maximum BM</i>		
60.51		118731.8
<i>Maximum SF</i>		
32.65	3273.2	

Κατόπιν των ανωτέρω, η ολική επιτρεπόμενη εγκάρσια ροπή κάμψης και η ολική διατμητική δύναμη, λαμβάνοντας υπόψη ότι:

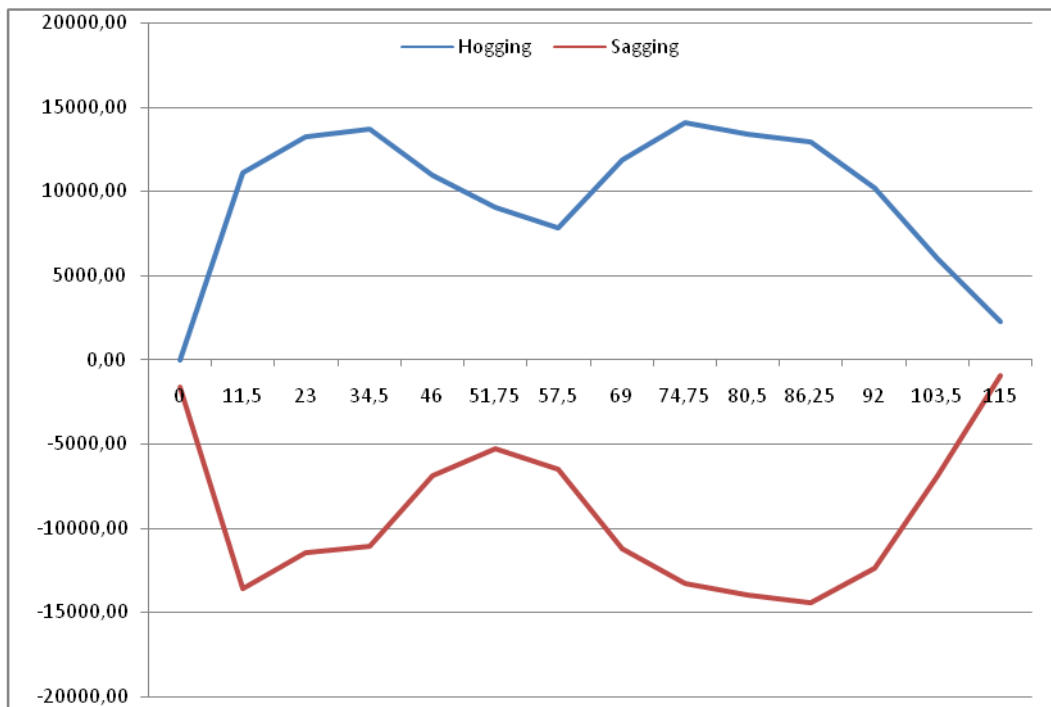
$$M_T = M_{sw}\gamma_{sw} + M_{wv}\gamma_{wv}$$

είναι:

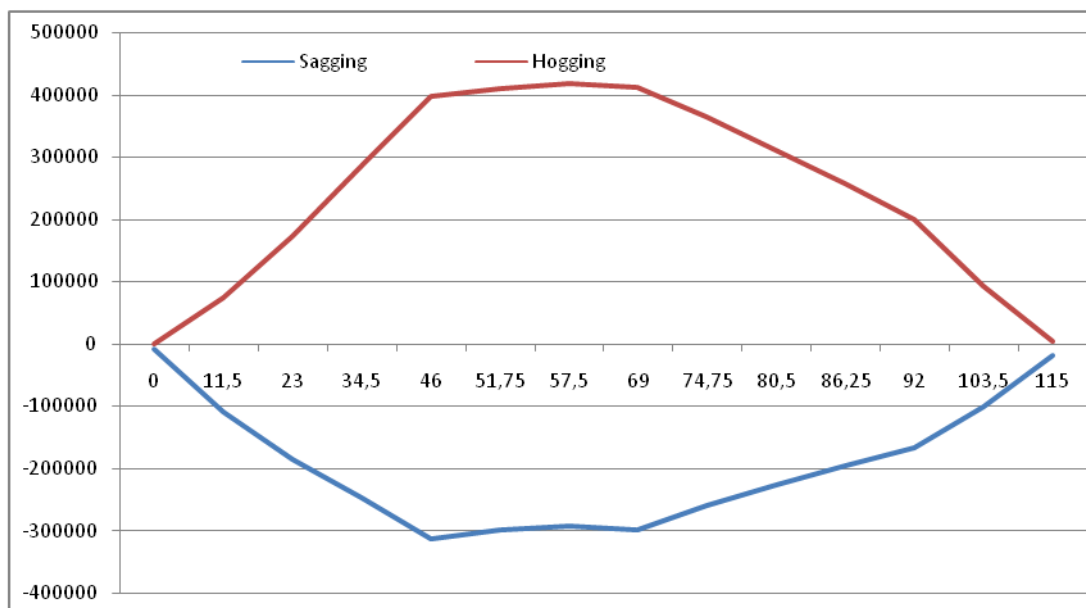
Πίνακας 68: Ολικές Επιτρεπόμενες τιμές εγκαρσίων ροπών και διατ. δυνάμεων

X(m)	Διατμητικές Δυνάμεις (KN)		Ροπή Κάμψης (KNm)	
	Hogging	Sagging	Sagging	Hogging
0	-0.63	-1593.31	-8786.100489	5.5
11.5	11130.38	-13598.47	-109430.3315	74792.40072
23	13264.38	-11464.47	-185801.5625	173852.3014
34.5	13664.51	-11064.35	-247705.4185	287379.5771
46	10930.75	-6868.28	-313586.1494	396929.9779
51.75	9061.57	-5272.57	-299461.6494	411054.4779
57.5	7820.32	-6513.82	-292129.7744	418386.3529
69	11833.34	-11180.29	-299020.0244	411496.1029
74.75	14064.67	-13288.71	-260265.7715	364183.215
80.5	13373.17	-13980.21	-226404.0186	311977.8271
86.25	12942.42	-14410.96	-195649.5157	256665.1893
92	10187.13	-12332.64	-166417.5128	199830.0514
103.5	6015.44	-6837.13	-101313.882	92799.40072
115	2271.49	-913.88	-18659.37622	3319.625

Οι μέγιστες τιμές παρουσιάζονται με χρωματισμένο υπόβαθρο και προκύπτει ότι η ροπή σχεδίασης αφορά στην κατάσταση Hogging και είναι $M_T=418386 \text{ KNm}$



Εικόνα 113: Ολικές διατμητικές δυνάμεις



Εικόνα 114: Ολικές ροπές κάμψης

9.2 Έλεγχος Αντοχής Πλοίου

Έχοντας υπολογίσει τις επιτρεπόμενες οριακές τιμές για την εγκάρσια ροπή κάμψης και τις αντίστοιχες διατμητικές δυνάμεις, εξετάζεται η συμπεριφορά του πλοίου σε κατάσταση κυματισμού. Για την μελέτη της αντοχής του, θεωρείται ημιτονοειδές κανονικό κύμα ύψους 5m και μελετούνται οι καταστάσεις Hogging (κορυφή κύματος στο μέσο του πλοίου) και Sagging (κοιλιάδα κύματος στο μέσο του πλοίου).

17.2.1 Συμπεριφορά σε ήρεμο νερό

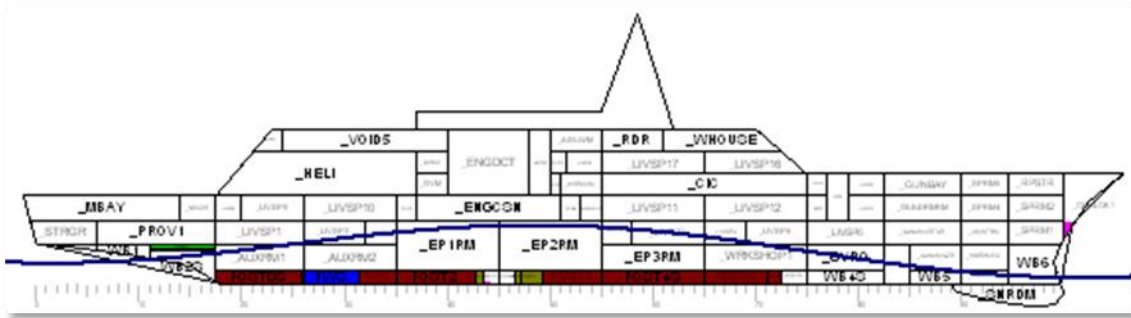
Στην εικόνα 117 που ακολουθεί φαίνεται η κατανομή ροπών και δυνάμεων στα bulkheads του υπό σχεδίαση πλοίου, σε ήρεμο νερό.

Shearing Force and Bending Moments

Distance from Origin (m)		Shearing Force (kN)	% of Max allowed	Bending Moment (kNm)	% of Max allowed
0.00	BHD	-1.3	0.1	28.3	514.3
11.50	BHD	1217.8	10.9	5780.0	7.7
23.00	BHD	2921.6	22.0	30796.3	17.7
34.50	BHD	3301.2	24.2	67804.4	23.6
46.00	BHD	2403.9	22.0	101692.2	25.6
51.75	BHD	1554.4	17.2	113152.1	27.5
57.50	BHD	557.9	7.1	119141.0	28.5
69.00	BHD	-1414.4	12.7	113811.9	27.7
74.75	BHD	-2223.3	16.7	103092.4	28.3
80.50	BHD	-2780.0	19.9	88419.6	28.3
86.25	BHD	-3128.1	21.7	71221.0	27.7
92.00	BHD	-3144.3	25.5	52764.4	26.4
103.50	BHD	-2105.5	30.8	21043.4	22.7
115.00	BHD	-724.8	79.3	3202.0	96.5
<i>Maximum BM</i>					
60.51				119969.1	28.8
<i>Maximum SF</i>					
32.31		3322.8	24.5		

Διαπιστώνεται ότι στην κατάσταση αυτή, η μέγιστη ροπή εμφανίζεται στα 60,51 m από το AP και αντιστοιχεί στο 28,8% της ροπής σχεδίασης ενώ οι μέγιστες διατμητικές δυνάμεις εμφανίζονται στα 32,31m από το AP και αντιστοιχούν στο 24,5% των αντιστοίχων επιτρεπόμενων δυνάμεων.

17.2.2 Συμπεριφορά σε Hogging



Εικόνα 115: Το πλοίο σε κατάσταση Hogging

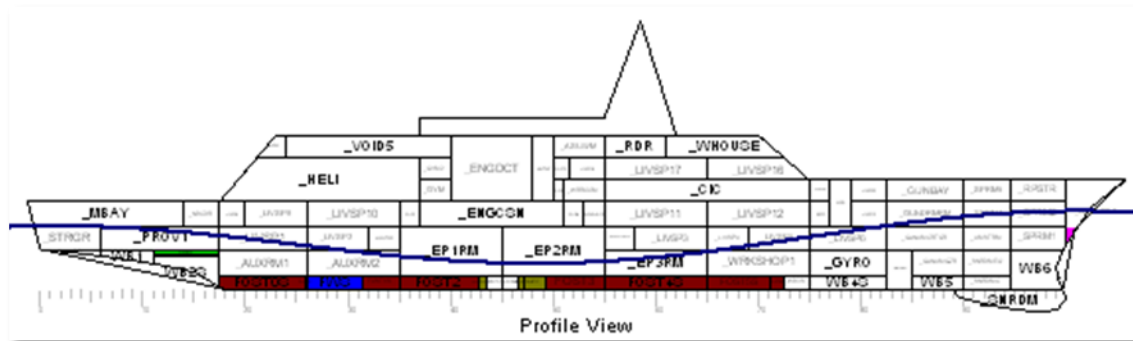
Στην εικόνα 118 που ακολουθεί φαίνεται η κατανομή ροπών και δυνάμεων στα bulkheads του υπό σχεδίαση πλοίου, σε Hogging.

Shearing Force and Bending Moments

Distance from Origin (m)		Shearing Force (kN)	% of Max allowed	Bending Moment (kNm)	% of Max allowed
0.00	BHD	-116.4	7.3	7251.5	
11.50	BHD	385.8	3.5	61992.0	82.9
23.00	BHD	1675.6	12.6	118360.3	68.1
34.50	BHD	1915.4	14.0	172567.0	60.0
46.00	BHD	1234.9	11.3	212767.1	53.6
51.75	BHD	604.2	6.7	224679.5	54.7
57.50	BHD	-69.3	1.1	229919.6	55.0
69.00	BHD	-1260.8	11.3	220922.7	53.7
74.75	BHD	-1686.6	12.7	207686.7	57.0
80.50	BHD	-1863.2	13.3	189966.6	60.9
86.25	BHD	-1922.4	13.3	168876.2	65.8
92.00	BHD	-1672.9	13.6	145371.9	72.7
103.50	BHD	-573.1	8.4	97630.0	105.2
115.00	BHD	154.2	6.8	49331.2	1486.0
<i>Maximum BM</i>					
59.07				230195.8	55.1
<i>Maximum SF</i>					
31.73		1952.4	14.4		

Διαπιστώνεται ότι στην κατάσταση αυτή, η μέγιστη ροπή εμφανίζεται στα 59,07m από το AP και αντιστοιχεί στο 55,1% της ροπής σχεδίασης ενώ οι μέγιστες διατμητικές δυνάμεις εμφανίζονται στα 31,73m από το AP και αντιστοιχούν στο 14,4% των αντιστοίχων επιτρεπόμενων δυνάμεων.

17.2.3 Συμπεριφορά σε Sagging



Εικόνα 116: Το πλοίο σε κατάσταση Sagging

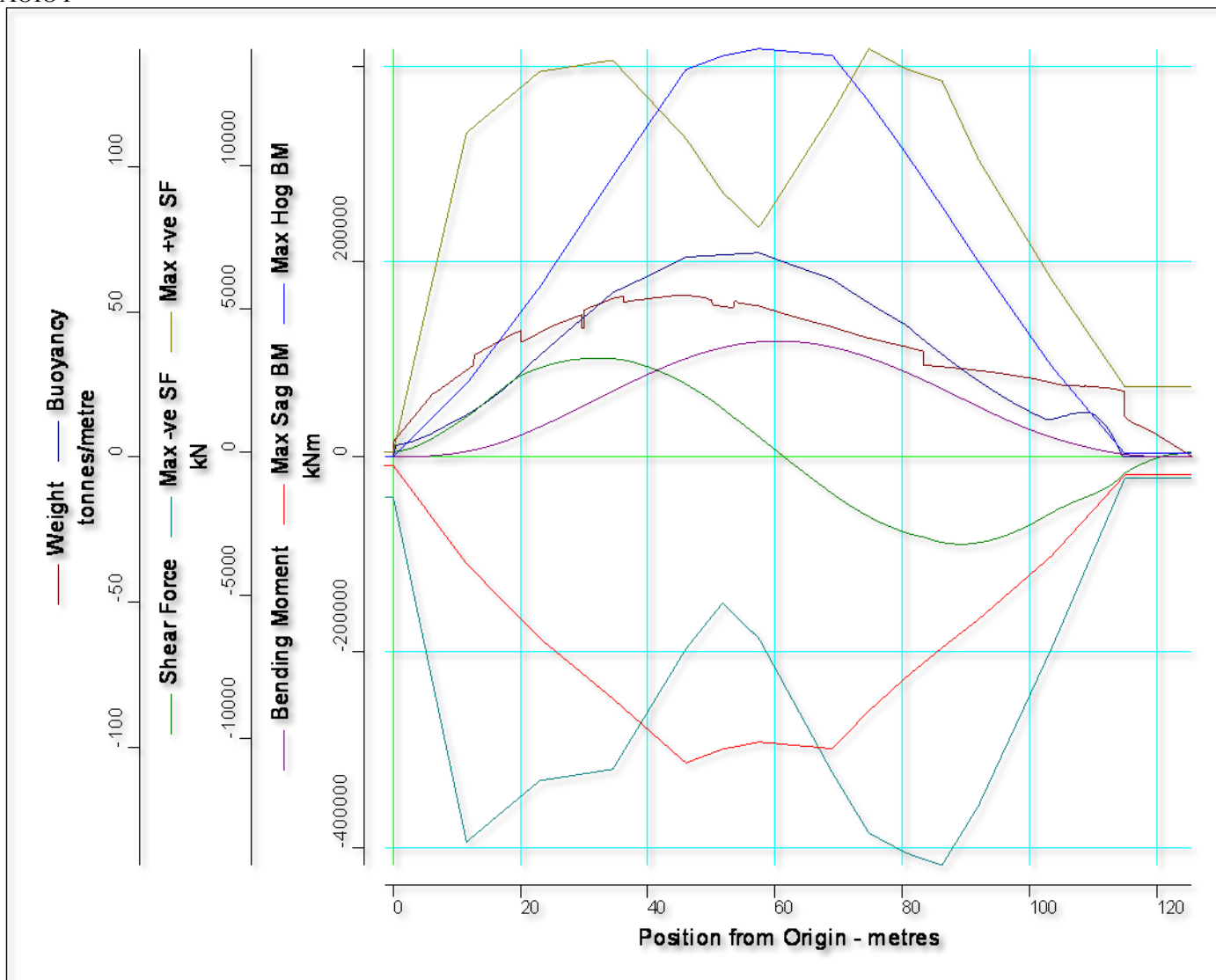
Στην εικόνα 119 που ακολουθεί φαίνεται η κατανομή ροπών και δυνάμεων στα bulkheads του υπό σχεδίαση πλοίου, σε Sagging.

Shearing Force and Bending Moments

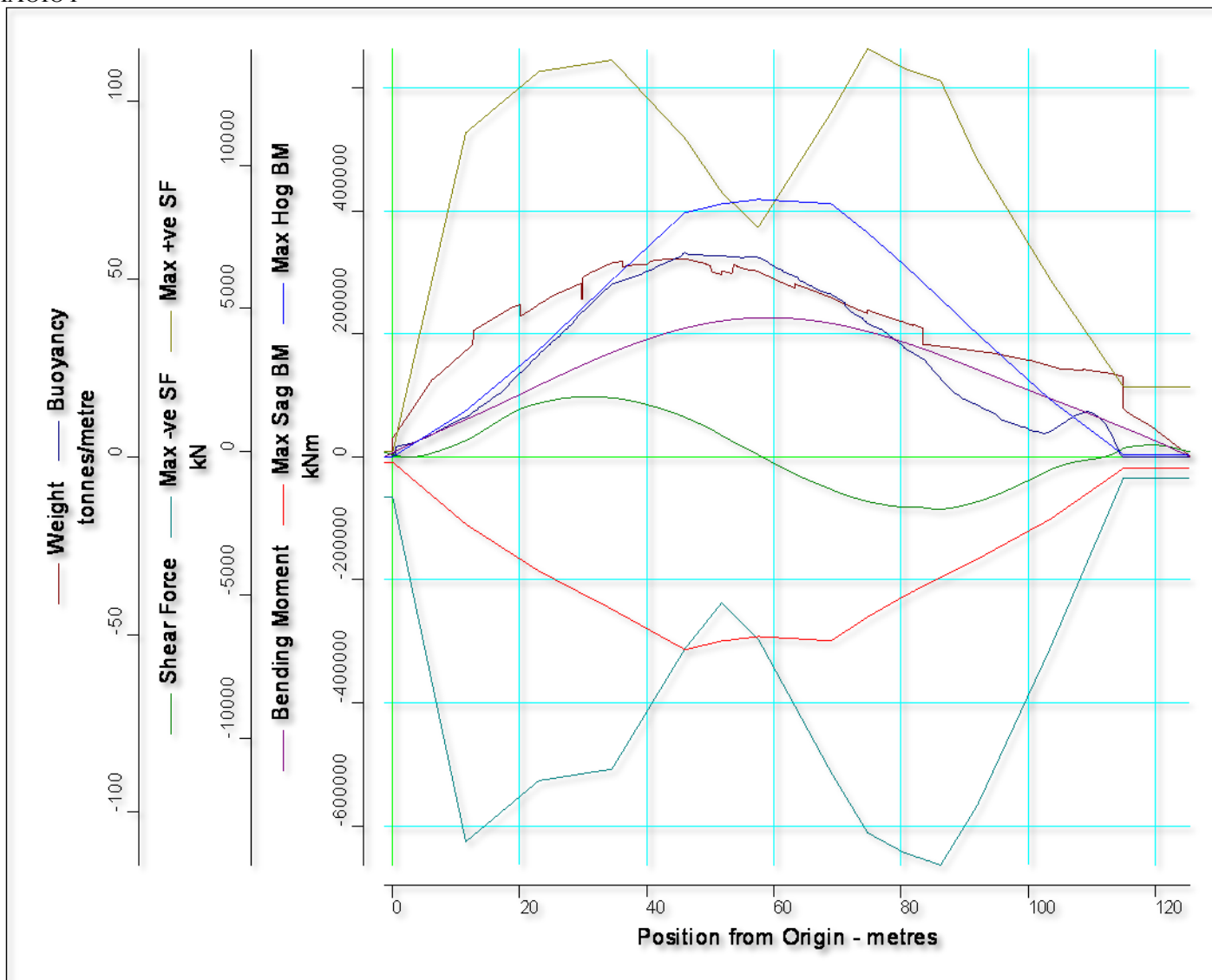
Distance from Origin (m)		Shearing Force (kN)	% of Max allowed	Bending Moment (kNm)	% of Max allowed
0.00	BHD	64.2		-5176.2	58.9
11.50	BHD	2101.2	18.9	-34148.7	31.2
23.00	BHD	4438.5	33.5	-29199.2	15.7
34.50	BHD	5179.4	37.9	-498.6	0.2
46.00	BHD	4450.2	40.7	34798.3	8.8
51.75	BHD	3569.1	39.4	49483.4	12.0
57.50	BHD	2434.8	31.1	59747.6	14.3
69.00	BHD	-8.3	0.1	64559.8	15.7
74.75	BHD	-1133.3	8.5	58782.0	16.1
80.50	BHD	-2058.9	14.7	48627.5	15.6
86.25	BHD	-2757.4	19.1	35419.7	13.8
92.00	BHD	-3145.5	25.5	20420.5	10.2
103.50	BHD	-2656.0	38.8	-5131.9	5.1
115.00	BHD	-1219.4	133.4	-13994.8	75.0
<i>Maximum BM</i>					

Distance from Origin (m)	Shearing Force (kN)	% of Max allowed	Bending Moment (kNm)	% of Max allowed
65.71			65480.0	15.8
<i>Maximum SF</i>				
36.17	5191.2	39.1		

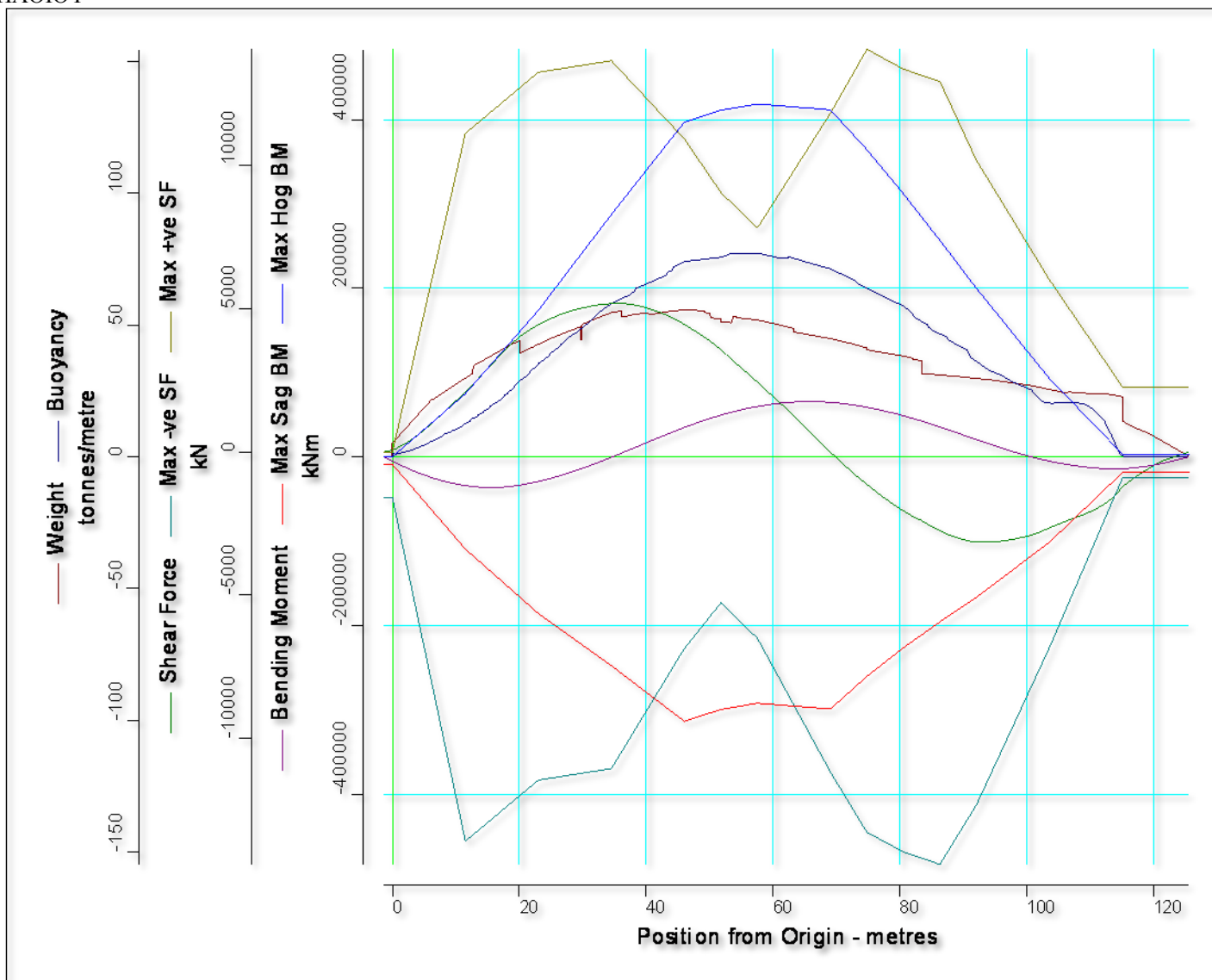
Διαπιστώνεται ότι στην κατάσταση αυτή, η μέγιστη ροπή εμφανίζεται στα 65,71m από το AP και αντιστοιχεί στο 15,8% της ροπής σχεδίασης ενώ οι μέγιστες διατμητικές δυνάμεις εμφανίζονται στα 36,17m από το AP και αντιστοιχούν στο 39,1% των αντιστοίχων επιτρεπόμενων δυνάμεων.



Εικόνα 117: Διαμήκης Αντοχή σε Ήρεμο Νερό



Εικόνα 118: Διαμήκης Αντοχή σε Hogging



Εικόνα 119: Διαμήκης Αντοχή σε Sagging

9.3 Κατασκευαστικά Στοιχεία Μέσης Τομής

Προκειμένου να διαπιστωθεί εάν το υπό σχεδίαση πλοίο είναι ικανό να ανταπεξέλθει αποτελεσματικά στις καμπτικές φορτίσεις που ασκούνται από το περιβάλλον του (στο πλαίσιο αρχικής σχεδίασης), εξετάζεται η διάταξη των κατασκευαστικών στοιχείων της μέσης τομής (ελάσματα, ενισχυτικά) και η δυνατότητά τους να αναλάβουν τα επιβαλλόμενα φορτία.

Για τον υπολογισμό των απαιτούμενων κατασκευαστικών στοιχείων, λαμβάνονται υπόψη οι προβλέψεις του κανονισμού [17]. Σημειώνεται ότι η σχεδίαση της μέσης τομής αποσκοπεί στην δυνατότητα ανάληψης των εγκαρσίων φορτίων του πλοίου-δοκού, ενώ τυχόν άλλες αναλύσεις (π.χ. οριζόντια κάμψη, στρέψη, λυγισμός) εκφεύγουν από τα όρια της αρχικής σχεδίασης και αγνοούνται.

Για τον υπολογισμό της ροπής αντίστασης στη μέση τομή του πλοίου, η οποία μελετάται στη συνέχεια, λαμβάνονται υπόψη τα εξής κατασκευαστικά στοιχεία:

- Ελάσματα όλων των καταστρωμάτων (κύριο και εκατέρωθεν καταστρώματα).
- Ελάσματα περιβλήματος, πυθμένα και εσωτερικού πυθμένα.
- Διαμήκη ενισχυτικά καταστρωμάτων, πλευρών, πυθμένα και εσωτερικών πλευρών πυθμένα.
- Κεντρικές και πλευρικές σταθμίδες πυθμένα.

Επισημαίνεται ότι στο υπολογισμό της αντοχής λαμβάνονται υπόψη και τα κατασκευαστικά στοιχεία της υπερκατασκευής, καθότι αυτή είναι συνεχής στις πλευρές του πλοίου, δίχως offset από τις πλευρές, και άρα συμμετέχει στη διαμήκη αντοχή του πλοίου-δοκού ([5],[6]).

Grade	Yield stress R_{eH} minimum (MPa)	Tensile strength R_m (MPa)	Elongation A_5 minimum (%)	Impact energy, average minimum (J) ¹⁾						
				Temperature (°C)	$t \leq 50$ (mm)		$50 < t \leq 70$ (mm)		$70 < t \leq 150$ (mm)	
					L	T	L	T	L	T
NV A27S NV D27S NV E27S NV F27S	265	400 to 530	22 ²⁾	0 -20 -40 -60	27	20	34	24	41	27
NV A32 NV D32 NV E32 NV F32	315	440 to 570	22 ²⁾	0 -20 -40 -60	31	22	38	26	46	31
NV A36 NV D36 NV E36 NV F36	355	490 to 630	21 ²⁾	0 -20 -40 -60	34	24	41	27	50	34
NV A40 NV D40 NV E40 NV F40	390	510 to 660	20 ²⁾	0 -20 -40 -60	39	26	46	31	55	37

Εικόνα 120: Χάλυβες Υψηλής Αντοχής κατά DNV

9.3.1 Υλικά Κατασκευής

Στο πλαίσιο των στόχων της παρούσας, θεωρείται ότι το υπό σχεδίαση πλοίο θα κατασκευασθεί από τα ακόλουθα υλικά:

- Γάστρα από χάλυβα υψηλής αντοχής (High Strength Steel) μέχρι το Main Deck, με ελαστικότητα $E=206\text{GPa}$, όριο διαρροής $R_{eH}=355\text{MPa}$ και αντοχή σε εφελκυσμό $R_m=490\text{MPa}$.

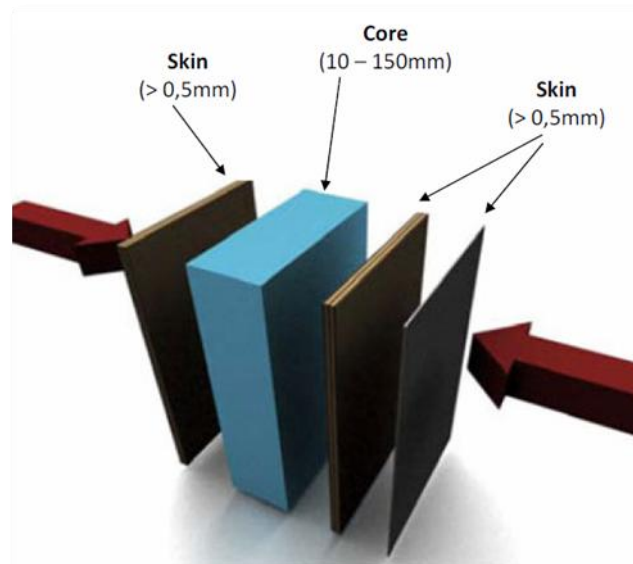
- Υπερκατασκευή από σύνθετα υλικά.

Οι πρόσφατοι κανονισμοί δεν περιγράφουν επακριβώς τυποποιημένες κατηγορίες συνθέτων υλικών με τις συναφείς τους ιδιότητες. Αντίθετα, καθορίζουν μια σειρά απαιτήσεων για τις πρώτες ύλες που συνιστούν τα εν λόγω προϊόντα καθώς και τους απαιτούμενους ελέγχους συμμόρφωσης των ιδιοτήτων τους με τις απαιτήσεις μιας σχεδίασης με σύνθετα υλικά. Συνεπώς οι κανονισμοί περιγράφουν μια σειρά απαιτήσεων και ελέγχων προκειμένου να πιστοποιηθεί η επαρκής συμπεριφορά των συνθέτων προϊόντων και ο ναυπηγός καλείται να επιλέξει τα κατάλληλα υλικά, λαμβάνοντας υπόψη:

- Τις περιβαλλοντικές απαιτήσεις λειτουργίας (θερμοκρασία, θαλασσινό νερό, υγρασία, κ.α.)
- Τις μηχανικές απαιτήσεις λειτουργίας (αντοχή σε εφελκυσμό, όριο θραύσης, κόπωση, λυγισμός, κρούση και διάτρηση από θραύσματα, συμπεριφορά σε φωτιά, κ.α.).
- Τις δυνατότητες παραγωγής και την εφοδιαστική αλυσίδα.

Ως εκ τούτου, η σχεδίαση και χρήση συνθέτων υλικών αποτελεί ένα πολύ-παραμετρικό πρόβλημα σχεδίασης, με βασικούς άξονες επιλογής το τελικό βάρος (design-to-weight) και κόστος (design-to-cost) της κατασκευής [52].

Σύγχρονες εφαρμογές των συνθέτων υλικών στην ναυπηγική, προβάλλουν τη χρήση πολυστρωματικών υλικών με πυρήνα (Sandwich) για την κατασκευή πρωτεύοντων και δευτερευόντων στοιχείων της κατασκευής ([13],[40]). Οι στρώσεις του συνθέτου υλικού είναι ενισχυμένες από ίνες γυαλιού ή άνθρακα. Συνδέονται με μήτρα από πολυμερές (πολυεστέρα, βινυλεστέρα ή εποξική ρητίνη), η οποία διαμορφώνει την επιθυμητή γεωμετρία και διασφαλίζει την δυνατότητα ανάληψης φορτίων από το σύνθετο υλικό. Μεταξύ των στρώσεων είναι δυνατό να υπάρχει ελαφρύ υλικό πυρήνα (Aramid, PVC Foam Core, Balsa Wooden Core, κ.α.), το οποίο προσδίδει πάχος και υποβοηθά στην ανάληψη των διατμητικών τάσεων.



Εικόνα 121: Τυπική αναπαράσταση συνθέτου υλικού τύπου Sandwich

Σύμφωνα με τους κανονισμούς ([14], Section 1.B), οι υπολογισμοί αντοχής για κατασκευές από σύνθετα υλικά, πραγματοποιούνται σε τρία διακριτά στάδια:

- Στο στάδιο των απλοποιημένων υπολογισμών, από το οποίο εξάγονται αρχικά αποτελέσματα σχεδίασης με χρήση τύπων και προσεγγίσεων.

- Στο στάδιο υπολογισμού της συμπεριφοράς των διαστρωμάτων, στο οποίο διερευνώνται τα κριτήρια αστοχίας, τυπικά με χρήση υπολογιστικών μεθόδων (πεπερασμένα στοιχεία), με σκοπό την διερεύνηση των κριτηρίων και μεθόδων αστοχίας.

- Στο επίπεδο αναλυτικού υπολογισμού μιας διαστρωμάτωσης, το οποίο εμβαθύνει σε περιοχές με τασικές ιδιομορφίες, με σκοπό την τοπική βελτίωση μιας σχεδίασης.

Στα πλαίσια της παρούσας και υπό το πρίσμα της αρχικής σχεδίασης της υπερκατασκευής με σύνθετα υλικά, κατά αναλογία με τα υλικά που επιλέχτηκαν για χρήση σε υπερκατασκευές κατά τη σχεδίαση πλοίων της αυτής κατηγορίας (π.χ. της σουηδικής κορβέτας Visby [52]), επιλέγονται:

- Ίνες άνθρακα (High tensile), ως κύριο δομικό στοιχείο του πολυστρωματικού υλικού, λόγω της υψηλής αντοχής τους σε εφελκυσμό και του υψηλού λόγου αντοχής/βάρους που τα διακρίνει.

- Εποξική μήτρα, λόγω της υψηλής ολκιμότητας αλλά και της θερμικής αντοχής που τη διακρίνει. Σημειώνεται ότι η μήτρα σε συνδυασμό με τις ίνες άνθρακα θεωρούνται υπο τη μορφή prepreg (π.χ. Epoxy UD Carbon [19]).

- Πυρήνας από Nomex (HRH10 Nomex-Aramid,[19]), για την κατασκευή του πυρήνα (Sandwich Composite), λόγω του χαμηλού του βάρους και των καλών μηχανικών του ιδιοτήτων σε υψηλές τροπές.

- Επικάλυψη αλουμινίου (facing material), η οποία προσδίδει την απαιτούμενη περιβαλλοντική προστασία στο σύνθετο υλικό (π.χ. Aluminum Alloy 6061 T6 [19]).

- Η συμπεριφορά του συνθέτου θεωρείται για λόγους απλότητας ψευδο-ισοτροπική (quasi-isotropy), και λαμβάνεται ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας $E=50 \text{ GPa}$ και όριο διαρροής $R_{eH}=208 \text{ MPa}$. Σημειώνεται ότι η έννοια της μηχανικής διαρροής δεν υφίσταται στα σύνθετα υλικά, στα οποία η αστοχία ξεκινά από την στιγμή που αστοχεί η πρώτη διαστρωμάτωση (first ply failure σε πολυστρωματικά υλικά ή/και σε υλικά sandwich).

- Τα ενισχυτικά των ελασμάτων θεωρούνται από ισοδύναμο υλικό, από μηχανικής απόψεως, και έχουν ενσωματωθεί κατά των πολυμερισμό των panels (co-cured).

Λόγω της ύπαρξης συνθέτων υλικών στην υπερκατασκευή, υιοθετούνται οι κλασικές μέθοδοι μελέτης της αντοχής του πλοίο-δοκού και για την υπερκατασκευή. Τα πάχη των «ελασμάτων» υπολογίζονται αρχικά με βάση τους κανονισμούς [14] και στην συνέχεια

προσαρμόζονται με βάση τις ιδιότητες των συνθέτων υλικών, με την μέθοδο της *ισοδύναμης διατομής* [6], σύμφωνα με την οποία:

$$t_{composite} = \frac{E_{steel}}{E_{composite}} t_{steel}$$

Όπου στα πάχη t_{steel} αγνοείται το περιθώριο διάβρωσης, καθόσον τα σύνθετα υλικά (και το αλουμίνιο επικάλυψης της σειράς 6000) δεν επηρεάζονται από διαβρωτικούς παράγοντες. Επισημαίνεται ότι η ανωτέρω προσέγγιση αγνοεί σημαντικές παραμέτρους της σχεδίασης με σύνθετα υλικά (π.χ. διάταξη στρώσεων, συμπεριφορά σε διάτμηση και λυγισμό, κ.α.) πλην όμως κρίνεται επαρκής για μια αρχική προσέγγιση των βασικών διαστάσεων και της μηχανικής συμπεριφοράς της υπερκατασκευής.

Τέλος, λαμβάνοντας υπόψη τους στόχους της σχεδίασης, την ανάγκη διαχείρισης του κόστους κύκλου ζωής αλλά και το γεγονός ότι η σχεδίαση και κατασκευή συνθέτων υλικών αποτελεί δαπανηρή διαδικασία, η διάταξη των κατασκευαστικών στοιχείων της υπερκατασκευής ακολούθησε την προσέγγιση design-to-cost, ώστε:

- Να ελαχιστοποιηθεί η χρήση συνθέτων υλικών από απόψεως βάρους και όγκου, καθόσον αυτό αυξάνει το κόστος κύκλου ζωής της υπερκατασκευής.
- Η επιλεγθείσα διάταξη να είναι επαρκώς ικανή να αναλάβει τα φορτία σχεδίασης στη μέση τομή, τα οποία αναλογούν στην υπερκατασκευή.

Αν και η ανωτέρω βελτιστοποίηση εμβαθύνει στην περιοχή της μέσης τομής του πλοίου, δεν δύναται να αξιολογηθεί με χρήση της παρούσας ανάλυσης κατά πόσο είναι επαρκής στα άκρα της υπερκατασκευής, όπου τα τοπικά τασικά φαινόμενα υπερισχύουν των γενικευμένων φορτίσεων της γάστρας.

9.3.2 Ελάσματα Γάστρας

Για όλα τα ελάσματα του πλοίου, οι κανονισμοί λαμβάνουν πρόνοια ώστε να διασφαλίσουν την μακροπρόθεσμη υποβάθμιση της αντοχής του πλοίου, λόγω διάβρωσης. Συνεπώς, για όλα τα μεταλλικά κατασκευαστικά ελάσματα του πλοίου, θα πρέπει να λαμβάνεται πάχος ίσο με

$$t = t' + t_k \text{ [mm]}$$

Όπου t' το απαιτούμενο (υπολογιζόμενο για αντοχή) πάχος και t_k η ελάχιστη προσαύξηση πάχους λόγω της αναμενόμενης διάβρωσης.

9.3.2.1 Ελάχιστο Πάχος Ελασμάτων

Το ελάχιστο πάχος των ελασμάτων του υπό σχεδίαση πλοίου, δίδεται από τη σχέση([17], section 4.3):

$$t' = 15.81 \alpha \sqrt{\frac{p * \gamma_m}{f_{PL} * \sigma_{perm}}} c_a c_r [mm]$$

Όπου για διαμήκη ενισχυμένα ελάσματα η επιτρεπόμενη τάση είναι ([17], section 4.4):

$$\sigma_{perm} = 1.125 \left[\sqrt{1 - 3\left(\frac{\tau_L}{R_{eH}}\right)^2 - 0.786\left(\frac{\sigma_L}{ReH}\right)^2} - 0.062 \frac{\sigma_L}{R_{eH}} \right] \left[\frac{N}{mm^2} \right]$$

με:

- $\alpha=0.5$, ο λόγος των πλευρών των ελασμάτων
- $\gamma_m=1.1$, ο συντελεστής ασφαλείας αντοχής
- $f_{PL}=Rm/1.5ReH=0.92$, για ιστροπικά ελάσματα χάλυβα υψηλής αντοχής.
- $c_a=0.75$, συντελεστής εξαρτώμενος από το λόγο πλευρών ελασμάτων.
- $c_r=1$, για επίπεδα ελάσματα
- p_{stat} η υδροστατική πίεση.
- p_o , το βασικό εξωτερικό δυναμικό φορτίο.
- p_{dyn} , η δυναμική πίεση.
- $p=\gamma_{fstat}p_{stat} + \gamma_{fdyn}p_{dyn}$, η ολική πίεση σχεδίασης στο έλασμα

- t_L και σ_L για τα ελάσματα του πυθμένα, συμφώνως ([17], section 6.4.1.4).

Elements of the hull structure		Minimum thickness t_{min} [mm]
Designation	Reference position	
Flat plate keel	Section 7	$14 \cdot \sqrt{\frac{L}{R_{eH}}}$
Shell plating: $z \leq T + \frac{c_0}{2}$		$10 \cdot \sqrt{\frac{L}{R_{eH}}}$
$z > T + \frac{c_0}{2}$		$7 \cdot \sqrt{\frac{L}{R_{eH}}}$
Chain locker	Section 18.E	5,0
All strength relevant structural platings	various Sections	3,0

Εικόνα 122: Ελάχιστα αποδεκτά πάχη ελασμάτων [17]

Τα ελάχιστα αποδεκτά πάχη ελασμάτων καθορίζονται από τους κανονισμούς ([17], Section 4.B.3) και είναι:

- Flat Plate Keel=7.97mm~8mm
- Shell Plating ($z < 9m$)=5.69mm~6mm
- Shell Plating ($z > 9m$)=3.98mm~4mm
- All strength relevant structural plates > 3mm

9.3.2.2 Έλασμα Πυθμένα (Bottom Plate)

Σύμφωνα με τον κανονισμό ([17], section 7.A.1), τα πάχος του ελάσματος πυθμένα υπολογίζεται από τις σχέσεις της παρ. 17.3.1.1 για $z=0$:

$$t' = 15.81 a \sqrt{\frac{p * \gamma_m}{f_{PL} * \sigma_{perm}}} c_a c_r = 6.05 [mm]$$

Όπου για διαμήκη ενισχυμένα ελάσματα η επιτρεπόμενη τάση είναι ([17], section 4.4):

$$\sigma_{perm} = 1.125 \left[\sqrt{1 - 3\left(\frac{\tau_L}{R_{eH}}\right)^2 - 0.786\left(\frac{\sigma_L}{ReH}\right)^2} - 0.062 \frac{\sigma_L}{R_{eH}} \right] = 375.9 \text{ N/mm}^2$$

με:

- $\alpha=0.5$, ο λόγος των πλευρών των ελασμάτων
- $\gamma_m=1.1$, ο συντελεστής ασφαλείας αντοχής
- $f_{PL}=R_m/1.5ReH=0.92$, για ισοτροπικά ελάσματα χάλυβα υψηλής αντοχής.
- $c_a=0.75$, συντελεστής εξαρτώμενος από το λόγο πλευρών ελασμάτων.
- $c_r=1$, για επίπεδα ελάσματα
- $p_{stat}=10(1.4T-z)=69.3 \text{ kN/m}^2$ η υδροστατική πίεση.
- $p_o=5*\sqrt{Cb}*c_o*c_v*f_q=33.96 \text{ kN/m}^2$, το βασικό εξωτερικό δυναμικό φορτίο.
- $p_{dyn} = p_o c_f \left[1 + \left(\frac{z}{T}\right)^{0.75} \right] = 33.96 \text{ kN/m}^2$, η δυναμική πίεση.
- $p = \gamma_{fstat} p_{stat} + \gamma_{fdyn} p_{dyn} = 129.08 \text{ kN/m}^2$, η ολική πίεση σχεδίασης στο έλασμα
- $t_L=0$ και $\sigma_L = 111.06 \text{ N/mm}^2$ συμφώνως ([17], section 6.4.1.4).

Λαμβάνοντας αύξηση πάχους για λόγους διάβρωσης ίση με $t_k=1 \text{ mm}$ συμφώνως ([17], section 4.3), προκύπτει ότι το ελάχιστο πάχος ελάσματος θα πρέπει να είναι:

$$t_{bottom} = 7.1 \text{ [mm]}$$

9.3.2.3 Έλασμα Τρόπιδας (Keel Plate)

Σύμφωνα με τον κανονισμό ([17], section 7.B.1), τα πάχος του ελάσματος τρόπιδας θα πρέπει να είναι:

$$t_{keel} = t_{bottom} + 1.5 = 8,6 \text{ [mm]}$$

Επισημαίνεται ότι σύμφωνα και τις προβλέψεις του ([17], section 4.B.3), το έλασμα της τρόπιδας θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο από:

$$t > 14 \sqrt{\frac{L}{R_{eH}}} = 7.96 [mm]$$

περιορισμός ο οποίος πληρείται.

9.3.2.4 Έλασμα Εσωτερικού Πυθμένα (Double Bottom Plate)

Σύμφωνα με τον κανονισμό ([17], section 7.A.1), τα πάχος του ελάσματος του εσωτερικού πυθμένα υπολογίζεται με όμοια διαδικασία με αυτή που υπολογίζεται το έλασμα του πυθμένα, λαμβάνοντας υπόψη ότι $z=1.6$ m (θέση double bottom). Συνεπώς θα έχουμε ότι:

$$t' = 15.81 \alpha \sqrt{\frac{p * \gamma_m}{f_{PL} * \sigma_{perm}}} c_a c_r = 6.05 [mm]$$

Όπου για διαμήκη ενισχυμένα ελάσματα η επιτρεπόμενη τάση είναι ([17], section 4.4):

$$\sigma_{perm} = 1.125 \left[\sqrt{1 - 3 \left(\frac{\tau_L}{R_{eH}} \right)^2 - 0.786 \left(\frac{\sigma_L}{ReH} \right)^2 - 0.062 \frac{\sigma_L}{R_{eH}}} \right] = 375.9 N/mm^2$$

με:

- $\alpha=0.5$, ο λόγος των πλευρών των ελασμάτων
- $\gamma_m=1.1$, ο συντελεστής ασφαλείας αντοχής
- $f_{PL}=Rm/1.5ReH=0.92$, για ιστροπικά ελάσματα χάλυβα υψηλής αντοχής.
- $c_a=0.75$, συντελεστής εξαρτώμενος από το λόγο πλευρών ελασμάτων.
- $c_r=1$, για επίπεδα ελάσματα
- $p_{stat}=10(1.4T-z)=53.3$ kN/m² η υδροστατική πίεση.

- $p_o = 5 \cdot \sqrt{Cb} \cdot c_o \cdot c_v \cdot f_q = 33.96 \text{ kN/m}^2$, το βασικό εξωτερικό δυναμικό φορτίο.
- $p_{dyn} = p_o \cdot c_f \left[1 + \left(\frac{z}{r} \right)^{0.75} \right] = 48.52 \text{ kN/m}^2$, η δυναμική πίεση.
- $p = \gamma_{fstat} p_{stat} + \gamma_{fdyn} p_{dyn} = 127.28 \text{ kN/m}^2$, η ολική πίεση σχεδίασης στο έλασμα
- $t_L = 0$ και $\sigma_L = 111.06 \text{ N/mm}^2$ συμφώνως ([17], section 6.4.1.4).

Λαμβάνοντας αύξηση πάχους για λόγους διάβρωσης ίση με $t_k = 0.7 \text{ mm}$ συμφώνως ([17], section 4.3), προκύπτει ότι το ελάχιστο πάχος ελάσματος θα πρέπει να είναι:

$$t = t' + t_k = 6,05 + 0,7 = 6,7 \text{ [mm]}$$

9.3.2.5 Έλασμα Δοκών Πυθμένα (Bottom/Side Girder)

Σύμφωνα με τον κανονισμό ([17], section 7.A.1), τα πάχος του ελάσματος των δοκών του εσωτερικού πυθμένα υπολογίζεται με όμοια διαδικασία με αυτή που υπολογίζεται το έλασμα του πυθμένα, λαμβάνοντας υπόψη ότι $z = 0.8 \text{ m}$. Συνεπώς θα έχουμε ότι:

$$t' = 15.81 \alpha \sqrt{\frac{p \cdot \gamma_m}{f_{PL} \cdot \sigma_{perm}}} \cdot c_a \cdot c_r = 6.1 \text{ [mm]}$$

Όπου για διαμήκη ενισχυμένα ελάσματα η επιτρεπόμενη τάση είναι ([17], section 4.4):

$$\sigma_{perm} = 1.125 \left[\sqrt{1 - 3 \left(\frac{\tau_L}{R_{eH}} \right)^2 - 0.786 \left(\frac{\sigma_L}{R_{eH}} \right)^2} - 0.062 \frac{\sigma_L}{R_{eH}} \right] = 375.9 \text{ N/mm}^2$$

με:

- $\alpha = 0.5$, ο λόγος των πλευρών των ελασμάτων
- $\gamma_m = 1.1$, ο συντελεστής ασφαλείας αντοχής
- $f_{PL} = R_m / 1.5 R_{eH} = 0.92$, για ισοτροπικά ελάσματα χάλυβα υψηλής αντοχής.

- $c_a=0.75$, συντελεστής εξαρτώμενος από το λόγο πλευρών ελασμάτων.
- $c_r=1$, για επίπεδα ελάσματα
- $p_{stat}=10(1.4T-z)=61,3\text{kN/m}^2$ η υδροστατική πίεση.
- $p_o=5*\text{sqrt}(Cb)*c_o*c_v*f_q=33.96\text{ kN/m}^2$, το βασικό εξωτερικό δυναμικό φορτίο.
- $p_{dyn} = p_o c_f \left[1 + \left(\frac{z}{T} \right)^{0.75} \right] = 42.6\text{kN/m}^2$, η δυναμική πίεση.
- $p = \gamma_{fstat} p_{stat} + \gamma_{fdyn} p_{dyn} = 129.9\text{kN/m}^2$, η ολική πίεση σχεδίασης στο έλασμα
- $t_L=0$ και $\sigma_L = 111.06\text{ N/mm}^2$ συμφώνως ([17], section 6.4.1.4).

Λαμβάνοντας αύξηση πάχους για λόγους διάβρωσης ίση με $t_k=0.5\text{mm}$ συμφώνως ([17], section 4.3), προκύπτει ότι το ελάχιστο πάχος ελάσματος θα πρέπει να είναι:

$$t = t' + t_k = 6,1 + 0,5 = 6,6 [\text{mm}]$$

9.3.2.6 Πλευρικά Ελάσματα (Shell Plates)

Σύμφωνα με τον κανονισμό ([17], section 4.B.4), τα πάχος των πλευρικών ελασμάτων υπολογίζεται με όμοια διαδικασία με αυτή που υπολογίζεται το έλασμα του πυθμένα. Σημειώνεται όμως ότι στους υπολογισμούς λαμβάνονται δύο ζώνες ελασμάτων: αυτά που είναι κάτωθεν του βυθίσματος σχεδίασης και αυτά που είναι άνωθεν. Συνεπώς τα πάχη υπολογίζονται ότι είναι:

a. $z < T$

Για $z < T$, όπου $z=2.475\text{m}$, τα πάχη υπολογίζονται ότι είναι:

$$t' = 15.81 a \sqrt{\frac{p * \gamma_m}{f_{PL} * \sigma_{perm}}} c_a c_r = 5.93 [\text{mm}]$$

Όπου για διαμήκη ενισχυμένα ελάσματα η επιτρεπόμενη τάση είναι ([17], section 4.4):

$$\sigma_{perm} = 1.125 \left[\sqrt{1 - 3 \left(\frac{\tau_L}{R_{eH}} \right)^2 - 0.786 \left(\frac{\sigma_L}{ReH} \right)^2} - 0.062 \frac{\sigma_L}{R_{eH}} \right] = 379.12 \text{ N/mm}^2$$

με:

- $\alpha=0.5$, ο λόγος των πλευρών των ελασμάτων
- $\gamma_m=1.1$, ο συντελεστής ασφαλείας αντοχής
- $f_{PL}=R_m/1.5ReH=0.92$, για ισοτροπικά ελάσματα χάλυβα υψηλής αντοχής.
- $c_a=0.75$, συντελεστής εξαρτώμενος από το λόγο πλευρών ελασμάτων.
- $c_r=1$, για επίπεδα ελάσματα
- $p_{stat}=10(1.4T-z)=44.55 \text{ kN/m}^2$ η υδροστατική πίεση.
- $p_o=5 \cdot \sqrt{Cb} \cdot c_o \cdot c_v \cdot f_q=33.96 \text{ kN/m}^2$, το βασικό εξωτερικό δυναμικό φορτίο.
- $p_{dyn} = p_o c_f \left[1 + \left(\frac{z}{T} \right)^{0.75} \right] = 54.16 \text{ kN/m}^2$, η δυναμική πίεση.
- $p = \gamma_{fstat} p_{stat} + \gamma_{fdyn} p_{dyn} = 123.38 \text{ kN/m}^2$, η ολική πίεση σχεδίασης στο έλασμα
- $t_L=49$ και $\sigma_L = 81.66 \text{ N/mm}^2$ συμφώνως ([17], section 6.4.1.4).

Λαμβάνοντας αύξηση πάχους για λόγους διάβρωσης ίση με $t_k=0.5 \text{ mm}$ συμφώνως ([17], section 4.3), προκύπτει ότι το ελάχιστο πάχος ελάσματος θα πρέπει να είναι:

$$t = t' + t_k = 5,9 + 0,5 = 6,4 \text{ [mm]}$$

β . $T < z < D$

Για $T < z < D$, όπου $z=7.39 \text{ m}$, τα πάχη υπολογίζονται ότι είναι:

$$t' = 15.81 \alpha \sqrt{\frac{p * \gamma_m}{f_{PL} * \sigma_{perm}}} c_a c_r = 4.4 [mm]$$

Όπου για διαμήκη ενισχυμένα ελάσματα η επιτρεπόμενη τάση είναι ([17], section 4.4):

$$\sigma_{perm} = 1.125 \left[\sqrt{1 - 3 \left(\frac{\tau_L}{R_{eH}} \right)^2 - 0.786 \left(\frac{\sigma_L}{ReH} \right)^2} - 0.062 \frac{\sigma_L}{R_{eH}} \right] = 379.12 N/mm^2$$

με:

- $\alpha=0.5$, ο λόγος των πλευρών των ελασμάτων
- $\gamma_m=1.1$, ο συντελεστής ασφαλείας αντοχής
- $f_{PL}=R_m/1.5ReH=0.92$, για ισοτροπικά ελάσματα χάλυβα υψηλής αντοχής.
- $c_a=0.75$, συντελεστής εξαρτώμενος από το λόγο πλευρών ελασμάτων.
- $c_r=1$, για επίπεδα ελάσματα
- $p_{stat}=0$, η υδροστατική πίεση.
- $p_o=5*\sqrt{Cb}*c_o*c_v*f_q=33.96 \text{ kN/m}^2$, το βασικό εξωτερικό δυναμικό φορτίο.
- $p_{dyn} = p_o c_f \left[0.25 + \frac{1.75}{1 + \frac{z-1}{c_o}} \right] = 54.34 \text{ kN/m}^2$, η δυναμική πίεση.
- $p = \gamma_{fstat} p_{stat} + \gamma_{fdyn} p_{dyn} = 67.92 \text{ kN/m}^2$, η ολική πίεση σχεδίασης στο έλασμα
- $t_L=49$ και $\sigma_L = 81.66 \text{ N/mm}^2$ συμφώνως ([17], section 6.4.1.4).

Λαμβάνοντας αύξηση πάχους για λόγους διάβρωσης ίση με $t_k=0.5 \text{ mm}$ συμφώνως ([17], section 4.3), προκύπτει ότι το ελάχιστο πάχος ελάσματος θα πρέπει να είναι:

$$t = t' + t_k = 4.49 + 0.5 = 4.9 [mm]$$

Το πάχος προκύπτει μικρότερο από το κατώτερο επιτρεπτό, συνεπώς λαμβάνεται ίσο με το ελάχιστο επιτρεπτό:

$$t = 6 \text{ [mm]}$$

9.3.2.7 Έλασμα Κυρίου Καταστρώματος (Strength Deck Plate)

Σύμφωνα με τον κανονισμό ([17], section 4.B.4), τα πάχος των πλευρικών ελασμάτων υπολογίζεται με όμοια διαδικασία με αυτή που υπολογίζεται το έλασμα του πυθμένα. Συνεπώς:

$$t' = 15.81 \alpha \sqrt{\frac{p * \gamma_m}{f_{PL} * \sigma_{perm}}} c_a c_r = 4.09 \text{ [mm]}$$

Όπου για διαμήκη ενισχυμένα ελάσματα η επιτρεπόμενη τάση είναι ([17], section 4.4):

$$\sigma_{perm} = 1.125 \left[\sqrt{1 - 3 \left(\frac{\tau_L}{R_{eH}} \right)^2 - 0.786 \left(\frac{\sigma_L}{R_{eH}} \right)^2} - 0.062 \frac{\sigma_L}{R_{eH}} \right] = 370.16 \text{ N/mm}^2$$

με:

- $\alpha=0.5$, ο λόγος των πλευρών των ελασμάτων
- $\gamma_m=1.1$, ο συντελεστής ασφαλείας αντοχής
- $f_{PL}=R_m/1.5R_{eH}=0.92$, για ιστροπικά ελάσματα χάλυβα υψηλής αντοχής.
- $c_a=0.75$, συντελεστής εξαρτώμενος από το λόγο πλευρών ελασμάτων.
- $c_r=1$, για επίπεδα ελάσματα
- $p_{stat}=0$, η υδροστατική πίεση.
- $p_o=5*\sqrt{Cb}*c_o*c_v*f_q=33.96 \text{ kN/m}^2$, το βασικό εξωτερικό δυναμικό φορτίο.

- $p_{dyn} = p_o c_f \left[0.25 + \frac{1.75}{1 + \frac{z-1}{c_o}} \right] = 45.81 \text{ kN/m}^2$, η δυναμική πίεση.
- $p = \gamma_{fstat} p_{stat} + \gamma_{fdyn} p_{dyn} = 57.26 \text{ kN/m}^2$, η ολική πίεση σχεδίασης στο έλασμα
- $t_L = 0$ και $\sigma_L = 150.26 \text{ N/mm}^2$ συμφώνως ([17], section 6.4.1.4).

Σύμφωνα όμως με τους κανονισμούς, το ελάχιστο πάχος ελάσματος που συμμετέχει στην αντοχή της μέσης τομής ([17], section 4.3), θα πρέπει να είναι $t_{min} = 3 \text{ mm}$. Λαμβάνοντας αύξηση πάχους για λόγους διάβρωσης ίση με $t_k = 0.5 \text{ mm}$ συμφώνως ([17], section 4.3), προκύπτει ότι το ελάχιστο πάχος ελάσματος θα πρέπει να είναι:

$$t = t' + t_k = 4,1 + 0,5 = 4,6 \text{ [mm]}$$

9.3.2.8 Έλασμα Ζωστήρα (Sheer Strake)

Το έλασμα ζωστήρα υπολογίζεται με βάση τα καθοριζόμενα στο ([17], section 7.B.2). έχει πλάτος που δίδεται από τη σχέση:

$$w = 800 + 5L = 1375 \text{ [mm]}$$

και πάχος που υπολογίζεται ότι είναι:

$$t = 0.5 * (t_D + t_S) \text{ [mm]}$$

Όπου $t_D = 4,6 \text{ mm}$ το πάχος του κυρίου καταστρώματος και

$t_S = 6 \text{ mm}$ το πάχος του πλευρικού ελάσματος

Προκύπτει λοιπόν ότι:

$$t = 5,3 \text{ mm}$$

9.3.2.9 Έλασμα Δευτέρου Καταστρώματος (2nd Deck Plate)

Σύμφωνα με τον κανονισμό ([17], section 4.B.4), τα πάχος των πλευρικών ελασμάτων υπολογίζεται με όμοια διαδικασία με αυτή που υπολογίζεται το έλασμα του πυθμένα. Συνεπώς:

$$t' = 15.81 a \sqrt{\frac{p * \gamma_m}{f_{PL} * \sigma_{perm}}} c_a c_r = 4.5 [mm]$$

Όπου για διαμήκη ενισχυμένα ελάσματα η επιτρεπόμενη τάση είναι ([17], section 4.4):

$$\sigma_{perm} = 1.125 \left[\sqrt{1 - 3 \left(\frac{\tau_L}{R_{eH}} \right)^2 - 0.786 \left(\frac{\sigma_L}{ReH} \right)^2 - 0.062 \frac{\sigma_L}{R_{eH}}} \right] = 370.16 N/mm^2$$

με:

- $z=7.1m$
- $\alpha=0.5$, ο λόγος των πλευρών των ελασμάτων
- $\gamma_m=1.1$, ο συντελεστής ασφαλείας αντοχής
- $f_{PL}=R_m/1.5ReH=0.92$, για ισοτροπικά ελάσματα χάλυβα υψηλής αντοχής.
- $c_a=0.75$, συντελεστής εξαρτώμενος από το λόγο πλευρών ελασμάτων.
- $c_r=1$, για επίπεδα ελάσματα
- $p_{stat}=0$, η υδροστατική πίεση.
- $p_o=5*\sqrt{Cb}*c_o*c_v*f_q=33.96 \text{ kN/m}^2$, το βασικό εξωτερικό δυναμικό φορτίο.
- $p_{dyn} = p_o c_f \left[0.25 + \frac{1.75}{1 + \frac{z-1}{c_o}} \right] = 55,62 \text{ kN/m}^2$, η δυναμική πίεση.
- $p = \gamma_{fstat} p_{stat} + \gamma_{fdyn} p_{dyn} = 69.53 \text{ kN/m}^2$, η ολική πίεση σχεδίασης στο έλασμα
- $t_L=0$ και $\sigma_L = 150.26 \text{ N/mm}^2$ συμφώνως ([17], section 6.4.1.4).

Λαμβάνοντας αύξηση πάχους για λόγους διάβρωσης ίση με $t_k=0.5mm$ συμφώνως ([17], section 4.3), προκύπτει ότι το ελάχιστο πάχος ελάσματος θα πρέπει να είναι:

$$t = t' + t_k = 4,508 + 0,5 = 5 \text{ [mm]}$$

Το οποίο είναι μικρότερο από το ελάχιστο αποδεκτό, συνεπώς λαμβάνεται ίσο με:

$$t = 6 \text{ [mm]}$$

9.3.2.10 Έλασμα Τρίτου Καταστρώματος (3rd Deck Plate)

Σύμφωνα με τον κανονισμό ([17], section 4.B.4), τα πάχος των πλευρικών ελασμάτων υπολογίζεται με όμοια διαδικασία με αυτή που υπολογίζεται το έλασμα του πυθμένα. Συνεπώς:

$$t' = 15.81 \alpha \sqrt{\frac{p * \gamma_m}{f_{PL} * \sigma_{perm}}} c_a c_r = 5.74 \text{ [mm]}$$

Όπου για διαμήκη ενισχυμένα ελάσματα η επιτρεπόμενη τάση είναι ([17], section 4.4):

$$\sigma_{perm} = 1.125 \left[\sqrt{1 - 3 \left(\frac{\tau_L}{R_{eH}} \right)^2 - 0.786 \left(\frac{\sigma_L}{ReH} \right)^2} - 0.062 \frac{\sigma_L}{R_{eH}} \right] = 370.16 \text{ N/mm}^2$$

με:

- $z=4.4\text{m}$
- $\alpha=0.5$, ο λόγος των πλευρών των ελασμάτων
- $\gamma_m=1.1$, ο συντελεστής ασφαλείας αντοχής
- $f_{PL}=R_m/1.5ReH=0.92$, για ιστροπικά ελάσματα χάλυβα υψηλής αντοχής.
- $c_a=0.75$, συντελεστής εξαρτώμενος από το λόγο πλευρών ελασμάτων.
- $c_r=1$, για επίπεδα ελάσματα
- $p_{stat}=10(1.4T-z)=-25.3 \text{ kN/m}^2$ η υδροστατική πίεση.

- $p_o = 5 \cdot \sqrt{Cb} \cdot c_o \cdot c_v \cdot f_q = 33.96 \text{ kN/m}^2$, το βασικό εξωτερικό δυναμικό φορτίο.
- $p_{dyn} = p_o \cdot c_f \left[1 + \left(\frac{z}{r} \right)^{0.75} \right] = 65,06 \text{ kN/m}^2$, η δυναμική πίεση.
- $p = \gamma_{fstat} p_{stat} + \gamma_{fdyn} p_{dyn} = 112.95 \text{ kN/m}^2$, η ολική πίεση σχεδίασης στο έλασμα
- $t_L = 0$ και $\sigma_L = 150.26 \text{ N/mm}^2$ συμφώνως ([17], section 6.4.1.4).

Λαμβάνοντας αύξηση πάχους για λόγους διάβρωσης ίση με $t_k = 0.5 \text{ mm}$ συμφώνως ([17], section 4.3), προκύπτει ότι το ελάχιστο πάχος ελάσματος θα πρέπει να είναι:

$$t = t' + t_k = 5,7 + 0,5 = 6,2 \text{ [mm]}$$

9.3.3 Ελάσματα Υπερκατασκευής

9.3.3.1 Έλασμα Πρώτου Ορόφου (1st Floor Plate)

Το συγκεκριμένο έλασμα αποτελείται από σύνθετο υλικό. Αρχικά όμως υπολογίζεται το απαιτούμενο πάχος ως έλασμα χάλυβα, το οποίο στη συνέχεια θα μετατραπεί σε «έλασμα» συνθέτου υλικού. Σύμφωνα με τον κανονισμό ([17], section 4.B.4), τα πάχος των πλευρικών ελασμάτων υπολογίζεται με όμοια διαδικασία με αυτή που υπολογίζεται το έλασμα του πυθμένα. Συνεπώς:

$$t' = 15.81 \alpha \sqrt{\frac{p \cdot \gamma_m}{f_{PL} \cdot \sigma_{perm}}} \cdot c_a \cdot c_r = 3.8 \text{ [mm]}$$

Όπου για διαμήκη ενισχυμένα ελάσματα η επιτρεπόμενη τάση είναι ([1], section 4.4):

$$\sigma_{perm} = 1.125 \left[\sqrt{1 - 3 \left(\frac{\tau_L}{R_{eH}} \right)^2 - 0.786 \left(\frac{\sigma_L}{ReH} \right)^2} - 0.062 \frac{\sigma_L}{R_{eH}} \right] = 379.13 \text{ N/mm}^2$$

με:

- $z = 12.23 \text{ m}$

- $\alpha=0.5$, ο λόγος των πλευρών των ελασμάτων
- $\gamma_m=1.1$, ο συντελεστής ασφαλείας αντοχής
- $f_{PL}=R_m/1.5ReH=0.92$, για ισοτροπικά ελάσματα χάλυβα υψηλής αντοχής.
- $c_a=0.75$, συντελεστής εξαρτώμενος από το λόγο πλευρών ελασμάτων.
- $c_r=1$, για επίπεδα ελάσματα
- $p_{stat}=0$, η υδροστατική πίεση.
- $p_o=5*\sqrt{Cb}*c_o*c_v*f_q=40.03\text{kN/m}^2$, το βασικό εξωτερικό δυναμικό φορτίο.
- $p_{dyn} = p_o c_f \left[1 + \left(\frac{z}{T} \right)^{0.75} \right] = 40.03\text{kN/m}^2$, η δυναμική πίεση.
- $p = \gamma_{fstat} p_{stat} + \gamma_{fdyn} p_{dyn} = 50.04\text{kN/m}^2$, η ολική πίεση σχεδίασης στο έλασμα
- $t_L=49$ και $\sigma_L = 81.66\text{N/mm}^2$ συμφώνως ([17], section 6.4.1.4).

Αγνοώντας την απαίτηση για περιθώριο διάβρωσης, το ελάχιστο πάχος συνθέτου υλικού θα πρέπει να είναι:

$$t_{composite} = \frac{206}{50} * 3,8 = 15,6 [mm]$$

9.3.3.2 Έλασμα Δευτέρου Ορόφου (2nd Floor Plate)

Το συγκεκριμένο έλασμα αποτελείται από σύνθετο υλικό. Αρχικά όμως υπολογίζεται το απαιτούμενο πάχος ως έλασμα χάλυβα, το οποίο στη συνέχεια θα μετατραπεί σε έλασμα συνθέτου υλικού. Σύμφωνα με τον κανονισμό ([17], section 4.B.4), τα πάχος των πλευρικών ελασμάτων υπολογίζεται με όμοια διαδικασία με αυτή που υπολογίζεται το έλασμα του πυθμένα. Συνεπώς:

$$t' = 15.81 \alpha \sqrt{\frac{p * \gamma_m}{f_{PL} * \sigma_{perm}}} c_a c_r = 3.57 [mm]$$

Όπου για διαμήκη ενισχυμένα ελάσματα η επιτρεπόμενη τάση είναι ([17], section 4.4):

$$\sigma_{perm} = 1.125 \left[\sqrt{1 - 3\left(\frac{\tau_L}{R_{eH}}\right)^2 - 0.786\left(\frac{\sigma_L}{ReH}\right)^2} - 0.062 \frac{\sigma_L}{R_{eH}} \right] = 379.13 \text{ N/mm}^2$$

με:

- $z=14.63\text{m}$
- $\alpha=0.5$, ο λόγος των πλευρών των ελασμάτων
- $\gamma_m=1.1$, ο συντελεστής ασφαλείας αντοχής
- $f_{PL}=R_m/1.5ReH=0.92$, για ιστροπικά ελάσματα χάλυβα υψηλής αντοχής.
- $c_a=0.75$, συντελεστής εξαρτώμενος από το λόγο πλευρών ελασμάτων.
- $c_t=1$, για επίπεδα ελάσματα
- $p_{stat}=0$, η υδροστατική πίεση.
- $p_o=5*\sqrt{Cb}*c_o*c_v*f_q=33.96 \text{ kN/m}^2$, το βασικό εξωτερικό δυναμικό φορτίο.
- $p_{dyn} = p_o c_f \left[1 + \left(\frac{z}{r}\right)^{0.75} \right] = 35.81 \text{ kN/m}^2$, η δυναμική πίεση.
- $p = \gamma_{fstat} p_{stat} + \gamma_{fdyn} p_{dyn} = 44.76 \text{ kN/m}^2$, η ολική πίεση σχεδίασης στο έλασμα
- $t_L=49$ και $\sigma_L = 81.66 \text{ N/mm}^2$ συμφώνως ([17], section 6.4.1.4).

Αγνοώντας την απαίτηση για περιθώριο διάβρωσης, το ελάχιστο πάχος συνθέτου υλικού θα πρέπει να είναι:

$$t_{composite} = \frac{206}{50} * 3,57 = 14,7 \text{ [mm]}$$

9.3.3.3 Πλευρικό Έλασμα (Shell Plate)

Το πάχος του πλευρικού ελάσματος υπολογίζεται με όμοια διαδικασία με αυτή που υπολογίζεται το έλασμα του πυθμένα. Για $z > D$ (έλασμα υπερκατασκευής), όπου $z=11.03\text{m}$, τα πάχη υπολογίζονται ότι είναι:

$$t' = 15.81 \alpha \sqrt{\frac{p * \gamma_m}{f_{PL} * \sigma_{perm}}} c_a c_r = 5.8 [\text{mm}]$$

Όπου για διαμήκη ενισχυμένα ελάσματα η επιτρεπόμενη τάση είναι ([17], section 4.4):

$$\sigma_{perm} = 1.125 \left[\sqrt{1 - 3 \left(\frac{\tau_L}{R_{eH}} \right)^2 - 0.786 \left(\frac{\sigma_L}{ReH} \right)^2} - 0.062 \frac{\sigma_L}{R_{eH}} \right] = 379.12 \text{ N/mm}^2$$

με:

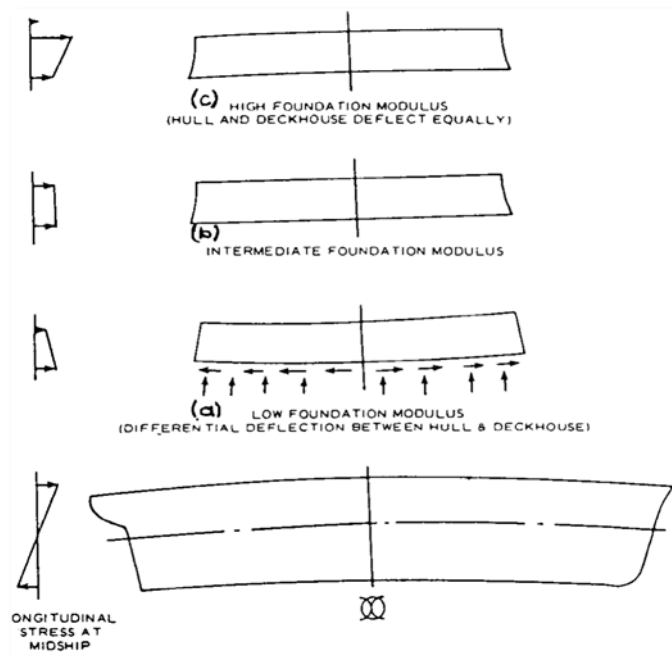
- $\alpha=0.5$, ο λόγος των πλευρών των ελασμάτων
- $\gamma_m=1.1$, ο συντελεστής ασφαλείας αντοχής
- $f_{PL}=R_m/1.5ReH=0.92$, για ιστροπικά ελάσματα.
- $c_a=0.75$, συντελεστής εξαρτώμενος από το λόγο πλευρών ελασμάτων.
- $c_r=1$, για επίπεδα ελάσματα
- $p_{stat}=0$, η υδροστατική πίεση.
- $p_o=5*\sqrt{Cb}*c_o*c_v*f_q=33.96 \text{ kN/m}^2$, το βασικό εξωτερικό δυναμικό φορτίο.
- $p_{dyn} = p_o c_f \left[0.25 + \frac{1.75}{1 + \frac{z-1}{c_o}} \right] = 95.91 \text{ kN/m}^2$, η δυναμική πίεση.
- $p = \gamma_{fstat} p_{stat} + \gamma_{fdyn} p_{dyn} = 119.88 \text{ kN/m}^2$, η ολική πίεση σχεδίασης στο έλασμα
- $t_L=49$ και $\sigma_L = 81.66 \text{ N/mm}^2$ συμφώνως ([17], section 6.4.1.4).

Αγνοώντας την απαίτηση για περιθώριο διάβρωσης, το ελάχιστο πάχος συνθέτου υλικού θα πρέπει να είναι:

$$t_{composite} = \frac{206}{50} * 5,8 = 23,9 [mm]$$

9.4 Συνεργασία Γάστρας - Υπερκατασκευής

Στα σύγχρονα πολεμικά πλοία, τα οποία φέρουν διαμήκεις κλειστές υπερκατασκευές, τα καταστρώματα των υπερκατασκευών στηρίζονται στα καταστρώματα που βρίσκονται χαμηλότερα αυτών, μέσω κατακόρυφων στύλων (pillars) ή/και διαμήκων φρακτών. Η σύνδεση αυτή επιτρέπει τις κατακόρυφες σχετικές μετατοπίσεις μεταξύ καταστρωμάτων, λόγω της πεπερασμένης ακαμψίας των κατακόρυφων δοκαριών και διαμήκων φρακτών, με αποτέλεσμα να μην ισχύει η απλή θεωρία της κάμψης σύμφωνα με την οποία οι επίπεδες διατομές παραμένουν επίπεδες. Η προσέγγιση της κατανομής των τάσεων, αν και λόγω της πολυπλοκότητας της γεωμετρίας απαιτεί χρήση αριθμητικών μεθόδων, μπορεί να προσεγγισθεί με αναλυτικές μεθόδους που στηρίζονται στην παραδοχή ότι το πλοίο αποτελείται από διαμήκη δοκάρια, το κάθε ένα από τα οποία ακολουθεί τις παραδοχές της απλής κάμψης, σύμφωνα με ([5],[37]).

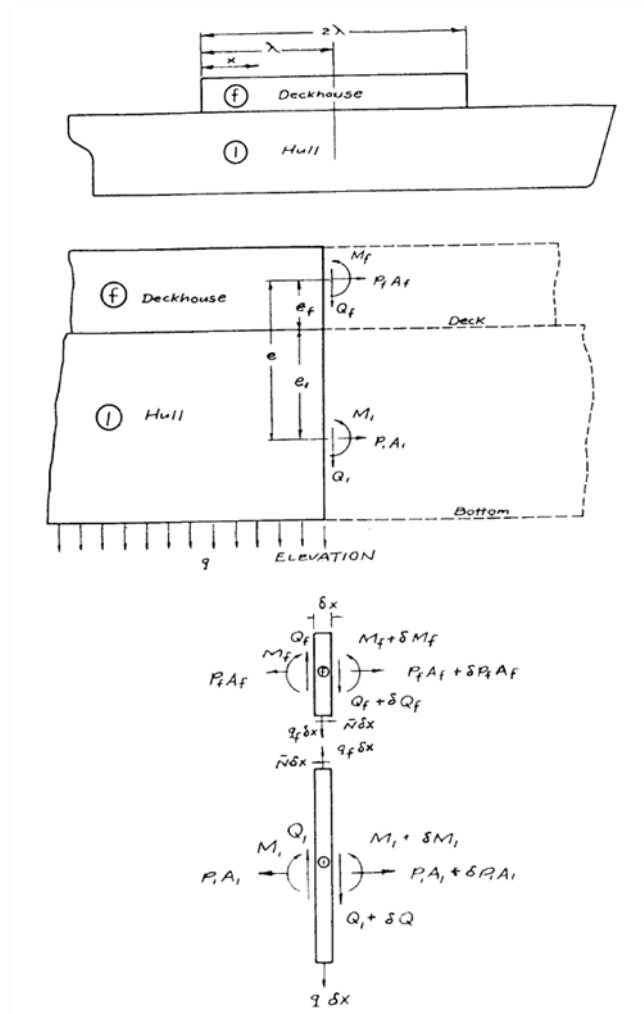


Εικόνα 123: Συμπεριφορά γάστρας-υπερκατασκευής, υπό την επίδραση κατακόρυφης στήριξης

Οι διαθέσιμοι κανονισμοί παρέχουν τις τιμές για την επιτρεπόμενη ροπή κάμψης για τη συνολική διατομή του πλοίου, πλην όμως δεν καθορίζουν πως αυτή επιμερίζεται στα επιμέρους μέρη της κατασκευής (γάστρα – υπερκατασκευή), ιδιαίτερα αν αυτά αποτελούνται από διαφορετικά υλικά (χάλυβας - σύνθετο υλικό), με διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες. Ως εκ τούτου θα πρέπει να αναζητηθεί μέθοδος προσδιορισμού της ροπής κάμψης σχεδίασης, ξεχωριστά για τη γάστρα και την υπερκατασκευή, ώστε να αξιολογηθεί η επάρκεια της αντοχής του κάθε τμήματος. Πράγματι, υπό τις προϋποθέσεις ότι:

- κάθε δοκός ξεχωριστά υπακούει στις παραδοχές της απλής θεωρίας της κάμψης.
- η φόρτιση της υπερκατασκευής οφείλεται αποκλειστικά στην ένωση της με τη γάστρα.
- η ένωση των δύο δοκαριών μεταφέρει χωρίς περιορισμό διατμητικές δυνάμεις.

είναι εφικτός ο αναλυτικός προσδιορισμός της ροπής κάμψης σχεδίασης για τη γάστρα και την υπερκατασκευή και συνεπώς η αξιολόγηση της επάρκειας της διατομής κάθε τμήματος, σύμφωνα με τα καθοριζόμενα στην θεωρία αλληλεπίδρασης υπερκατασκευής - γάστρας του Schade, όπως αυτή αναλύεται στο [37].



Εικόνα 124: Κατανομή Ροπών Κάμψης μεταξύ γάστρας και υπερκατασκευής

Σύμφωνα με τις προβλέψεις του [37], λαμβάνοντας υπόψη την καθορισμένη από τους κανονισμούς ολική ροπή σχεδίασης M_p αλλά και την διάταξη της μέσης τομής, από την ισορροπία δυνάμεων και ροπών προκύπτει ότι:

$$A_1 p_1 + A_f p_f = 0$$

$$M_1 + M_f - A_f e p_f = M_p$$

Η ροπή που διανέμεται στην υπερκατασκευή, υπολογίζεται σε:

$$M_f = \frac{r Z_f}{r Z_f - Z_1} \left\{ p_f \left[A_f e + Z_1 \left(\frac{r A_f + A_1}{r A_1} \right) \right] + M_p \right\}$$

Τα μεγέθη που χρησιμοποιούνται στις ανωτέρω σχέσεις παρουσιάζονται αναλυτικά στην εικόνα 125. Για την επίλυση των ανωτέρω σχέσεων και τον υπολογισμό των ροπών κάμψης που παραλαμβάνει κάθε διατομή (γάστρα, υπερκατασκευή), απαιτείται ο υπολογισμός των ακόλουθων ποσοτήτων:

$$\Omega = \frac{(A_1 + A_f)(I_1 + I_f) + A_1 A_f (e_1 + e_f)^2}{(A_1 + A_f)I_1 I_f + A_1 A_f (I_1 e_f^2 + I_f e_1^2)}, [in^{-4}]$$

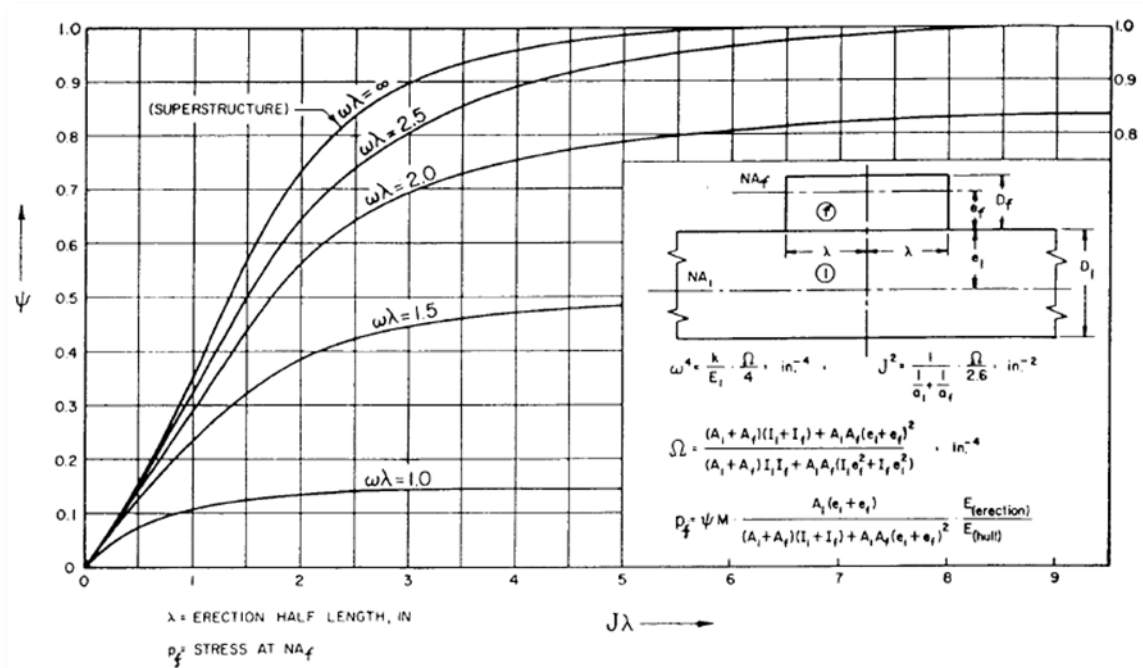
$$J^2 = \frac{\Omega}{2,6 \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_f} \right)}, [i\Box^{-2}]$$

$$\omega^4 = \frac{\kappa \Omega}{4E_1}, [in^{-4}]$$

$$p_f = \Psi M_p \frac{A_1 (e_1 + e_f)}{(A_1 + A_f)(I_1 + I_f) + A_1 A_f (e_1 + e_f)^2} + \frac{E_f}{E_1}$$

Από τα διαθέσιμα δεδομένα, δεν είναι εφικτός ο προσδιορισμός της σταθεράς ελατηρίου k , η οποία σχετίζεται με την δυνατότητα μεταφοράς φορτίων μέσω της διαμήκουσ φρακτής ή των πυλώνων, από τη γάστρα στην υπερκατασκευή και αντίστροφα. Για τον υπολογισμό της χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις που παρατίθενται στο [41] για το διαμήκουσ έλασμα της μέσης τομής, το οποίο θεωρείται σύνθετο υλικό, και υπολογίζεται σε:

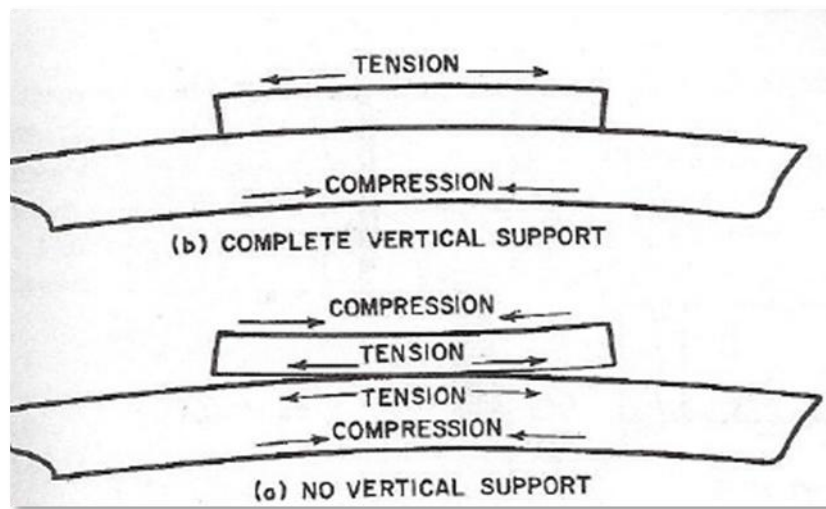
$$k = \frac{N t_{long} E_f}{H_{long}} = \frac{2 * 20 * 50}{2730} = 732 N/mm^2$$



Εικόνα 125: Υπολογισμός της αποτελεσματικότητας Ψ της υπερκατασκευής κατά Schade [37]

Από τα ανωτέρω και με χρήση του διαγράμματος της εικόνας 125, υπολογίζονται οι ακόλουθες τιμές:

PNA Method		
	Hull	Superstructure
E (N/in ²)	1,33E+08	3,23E+07
A (in ²)	577,3	132,3
e (in)	217,9	100,0
I (in ⁴)	2,69E+07	1,05E+07
Ω (in ⁻⁴)	1,33E-07	
α (in ²)	205,6	1190,0
J (in ⁻²)	2,99E-03	
k	732,60	
ω (in ⁻⁴)	0,00065	
λ (mm)	33062,5	
λ (in)	1301,7	
$J\lambda$	3,89	
$\omega\lambda$	0,85	
ψ	0,10	
r	0,000002	
p_{mean}/M	5,36E-06	
$M_{DesignTotal}$ (Nin)	418386,35	
p_{mean}	2,241	
p_f (N/in ²)	0,467	
p_h (N/in ²)	-0,107	
Z (in ³)	123625,7	117553,9
M_f (Nin)	-8447,91	
M_h (Nin)	19634,29	
M_{design} (Nmm)	498711,9	-214577,4



Εικόνα 126: Η επίδραση της κάθετης στήριξης στη συμπεριφορά γάστρας-υπερκατασκευής [37]

9.5 Μελέτη Αντοχής

Η συνολική καμπτική ροπή των πρωτευόντων στοιχείων της μέσης τομής, για την γάστρα και την υπερκατασκευή, υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση :

$$M_p = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^n A_{ei} R_{eHi} e_{pi}$$

Όπου:

- n είναι ο αριθμός των κατασκευαστικών στοιχείων
- A_{ei} είναι η επιφάνεια σε $[\text{mm}^2]$ του εκάστοτε κατασκευαστικού στοιχείου i
- e_{pi} είναι η απόσταση σε $[\text{mm}]$ του κέντρου της επιφάνειας A_{ei} από τον ουδέτερο άξονα

Στους παρακάτω πίνακες γίνεται ο υπολογισμός της καμπτικής ροπής και αναφέρονται τα χαρακτηριστικά των κατασκευαστικών στοιχείων, που συμβάλλουν στην διαμήκη αντοχή του πλοίου. Επίσης:

- b είναι το πλάτος και t το πάχος του κάθε κατασκευαστικού στοιχείου
- h είναι η απόσταση σε $[\text{mm}]$ του κέντρου της επιφάνειας A_{ei} από το κοίλο

Στους πίνακες που ακολουθούν, παρατίθενται τα αναλυτικά κατασκευαστικά στοιχεία της μέσης τομής, για την γάστρα αλλά και για την υπερκατασκευή από σύνθετα υλικά. Επισημαίνεται ότι σύμφωνα με τις προβλέψεις του [17], Section 4.3, τα ελάσματα δεν στρογγυλοποιήθηκαν στα αμέσως μεγαλύτερα εμπορικά πάχη (round off) αλλά χρησιμοποιήθηκαν οι ακριβείς διαστάσεις τους, τόσο στους υπολογισμούς της μέσης τομής, όσο και στο οικείο σχέδιο της μέσης τομής.

Προκύπτει λοιπόν, ότι :

- Η ροπή κάμψης σχεδίασης της γάστρας προκύπτει $M_{\text{thull}}=498712$ KNm ενώ αντίστοιχα η ροπή κάμψης σχεδίασης της υπερκατασκευής προκύπτει $M_{\text{superstructure}}=-214577$ KNm. Η αντίθετη φορά της ροπής στην υπερκατασκευή είναι αναμενόμενη, καθόσον αυτή υποστηρίζεται από διαμήκες έλασμα στον κάθετο άξονα που συνεργάζεται με τη γάστρα.
- Η αποτελεσματικότητα της υπερκατασκευής είναι μικρή ($\Psi=10\%$), το οποίο είναι αναμενόμενο αφενός λόγω της οριακής της σχεδίασης (για λόγους design to cost) και αφετέρου λόγω της μεγαλύτερης ακαμψίας (μικρότερο μέτρο ελαστικότητας) των συνθέτων υλικών.
- Τα κατασκευαστικά στοιχεία της μέσης τομής επαρκούν για την ανάληψη των αναμενόμενων φορτίων, καθόσον η διατομή της γάστρας εμφανίζει ικανοποιητικό περιθώριο ασφαλείας (safety margin=1.74), ενώ αντίστοιχα η υπερκατασκευή είναι οριακά επαρκής (safety margin=1.5).

Για λόγους εμπορικής συμβατότητας, τα ελάσματα χάλυβα υψηλής αντοχής που δύναται να επιλεγούν για το υπό σχεδίαση πλοίο, είναι τα εξής:

Έλασμα	Πάχος t (mm) (Εμπορική Διάσταση)
Έλασμα τρόπιδας	9
Έλασμα πυθμένα	8
Έλασμα εσωτερικού πυθμένα	7
Πλευρικό έλασμα z < T	7
Πλευρικό έλασμα T < z < D	6
Έλασμα δευτέρου καταστρώματος	6
Έλασμα ζωστήρα	6
Έλασμα κυρίου καταστρώματος	5
Έλασμα κεντρικής δοκού πυθμένα	7
Έλασμα πλευρικής δοκού πυθμένα	7

Πίνακας 69: Ροπή Αντίστασης Γάστρας στη Μέση Τομή

ΣΤΟΙΧΕΙΟ	No	b [mm]	t [mm]	Area [mm ²]	h [mm] distance from BL	A*h [mm ³]	A*h ² [mm ⁴]	I = b*t ³ /12, I = t*b ³ /12 [mm ⁴]
ΕΛΑΣΜΑΤΑ								
Έλασμα τρόπιδας	2	2000	8,6	34400	15	516000	7740000	212019
Έλασμα πυθμένα	2	4970	7,1	70574	815	57517810	46877015150	296470
Έλασμα εσωτερικού πυθμένα	2	6710	6,7	89914	1600	143862400	230179840000	336353
Πλευρικό έλασμα z < T	2	3640	6,4	46592	3000	139776000	419328000000	51443780267
Πλευρικό έλασμα T < z < D	2	2150	6	25800	5750	148350000	853012500000	9938375000
Έλασμα δευτερου καταστρωματος	2	8230	6	98760	7100	701196000	4978491600000	296280
Έλασμα ζωστήρα	2	2730	5,3	28938	8465	244960170	2073587839050	17972668350
Έλασμα κυρίου καταστρώματος	2	8230	4,6	75716	9830	744288280	7316353792400	133513
Έλασμα κεντρικής δοκού πυθμένα	1	1600	6,6	10560	800	8448000	6758400000	2252800000
Έλασμα πλευρικής δοκού πυθμένα	2	1570	6,6	20724	785	16268340	12770646900	4256882300
SUM				501978		2205183000	15937367373500	85865780551
			$\alpha_{vertical} =$	132614				
ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΑ								
ΣΤΟΙΧΕΙΟ	No	A (mm2)	A total (mm2)	h(mm)	A*h (mm3)	Ah ² (mm4)	I(mm4)	I total(mm4)
Ενισχυτικά Πυθμένα 180x10								
ενισχυτικό	1	2246	2246	7	15722	110054	7170000	7170000
ενισχυτικό	1	2246	2246	7	15722	110054	7170000	7170000
ενισχυτικό	1	2246	2246	11	24706	271766	7170000	7170000
ενισχυτικό	1	2246	2246	14	31444	440216	7170000	7170000
ενισχυτικό	1	2246	2246	21	47166	990486	7170000	7170000
ενισχυτικό	1	2246	2246	41	92086	3775526	7170000	7170000
ενισχυτικό	1	2246	2246	60	134760	8085600	7170000	7170000
ενισχυτικό	1	2246	2246	84	188664	15847776	7170000	7170000
ενισχυτικό	1	2246	2246	114	256044	29189016	7170000	7170000
ενισχυτικό	1	2246	2246	152	341392	51891584	7170000	7170000
ενισχυτικό	1	2246	2246	192	431232	82796544	7170000	7170000
ενισχυτικό	1	2246	2246	248	557008	138137984	7170000	7170000
ενισχυτικό	1	2246	2246	313	702998	220038374	7170000	7170000
ενισχυτικό	1	2246	2246	391	878186	343370726	7170000	7170000
ενισχυτικό	1	2246	2246	482	1082572	521799704	7170000	7170000
ενισχυτικό	1	2246	2246	592	1329632	787142144	7170000	7170000
ενισχυτικό	1	2246	2246	719	1614874	1161094406	7170000	7170000
ενισχυτικό	1	2246	2246	867	1947282	1688293494	7170000	7170000
ενισχυτικό	1	2246	2246	1039	2333594	2424604166	7170000	7170000
ενισχυτικό	1	2246	2246	1251	2809746	3514992246	7170000	7170000
Ενισχυτικά πλευρικού ελάσματος (κάτω) 180x10								

ενισχυτικό	1	2246	2246	1897	4260662	8082475814	7170000	7170000
ενισχυτικό	1	2246	2246	2198	4936708	10850884184	7170000	7170000
ενισχυτικό	1	2246	2246	2498	5610508	14015048984	7170000	7170000
ενισχυτικό	1	2246	2246	2799	6286554	17596064646	7170000	7170000
ενισχυτικό	1	2246	2246	3102	6967092	21611919384	7170000	7170000
ενισχυτικό	1	2246	2246	3400	7636400	25963760000	7170000	7170000
ενισχυτικό	1	2246	2246	3697	8303462	30697899014	7170000	7170000
ενισχυτικό	1	2246	2246	3999	8981754	35918034246	7170000	7170000
ενισχυτικό	1	2246	2246	4600	10331600	47525360000	7170000	7170000
ενισχυτικό	1	2246	2246	4900	11005400	53926460000	7170000	7170000
Ενισχυτικά πλευρικού ελάσματος (άνω) 160x8								
ενισχυτικό	1	1620	1620	5199	8422380	43787953620	4110000	4110000
ενισχυτικό	1	1620	1620	5500	8910000	49005000000	4110000	4110000
ενισχυτικό	1	1620	1620	5800	9396000	54496800000	4110000	4110000
ενισχυτικό	1	1620	1620	6100	9882000	60280200000	4110000	4110000
ενισχυτικό	1	1620	1620	6400	10368000	66355200000	4110000	4110000
ενισχυτικό	1	1620	1620	6700	10854000	72721800000	4110000	4110000
Ενισχυτικά δεύτερου καταστρώματος (140x9)								
ενισχυτικό	14	1520	21280	7100	151088000	1072724800000	2910000	40740000
Ενισχυτικά διπλού πυθμένα (180x10)								
ενισχυτικό	20	2246	44920	1600	71872000	114995200000	7170000	143400000
Ενισχυτικά Ζωστήρα (140x9)								
ενισχυτικό	1	1520	1520	7400	11248000	83235200000	2910000	2910000
ενισχυτικό	1	1520	1520	7700	11704000	90120800000	2910000	2910000
ενισχυτικό	1	1520	1520	8000	12160000	97280000000	2910000	2910000
ενισχυτικό	1	1520	1520	8300	12616000	104712800000	2910000	2910000
ενισχυτικό	1	1520	1520	8600	13072000	112419200000	2910000	2910000
ενισχυτικό	1	1520	1520	8900	13528000	120399200000	2910000	2910000
ενισχυτικό	1	1520	1520	9200	13984000	128652800000	2910000	2910000
ενισχυτικό	1	1520	1520	9500	14440000	137180000000	2910000	2910000
Ενισχυτικά κυρίου καταστρώματος (160x8)								
ενισχυτικό	19	1620	30780	9830	302567400	2974237542000	4110000	78090000
TOTAL			186240		775266750	5659785383758		525270000
TOTAL S&P			372480		1550533500	11319570767516		1050540000
							Σ(I) (cm4)	86916320551

Ολικό Εμβαδόν μέσης τομής	874458	mm ²
Πρώτη Ροπή Επιφανείας	3755716500	mm ³
Δεύτερη Ροπή Επιφανείας	27256938141016	mm ⁴
Ουδέτερος άξονας από πυθμένα	4295	mm
Ροπή Αδράνειας από πυθμένα	27343854461567	mm ⁴
Ροπή Αδράνειας από Ο.Α	11213398306586	mm ⁴
Ροπή Αντίστασης από keel	2610858902	mm ³
Ροπή Αντίστασης από main deck	2025873813	mm ³
Reh	355	N/mm ²
γm	1	
Mr	926855	kNm
Mr/γm	842595	kNm
Mτ	498712	kNm
Safety Margin	1,69	

Πίνακας 70: Ροπή Αντίστασης Υπερκατασκευής στη Μέση Τομή

ΣΤΟΙΧΕΙΟ	No	b [mm]	t [mm]	Area [mm ²]	h [mm]	distance from BL	A*h [mm ³]	A*h ² [mm ⁴]	I = b*t ³ /12, I = t*b ³ /12 [mm ⁴]
ΕΛΑΣΜΑΤΑ									
1st Floor	2	7796	15,6	243235,2		12230	2974766496	36381394246080	4932810
2nd Floor	2	7360	14,7	216384		14630	3165697920	46314160569600	3896535
Πλευρικό Έλασμα	4	4880	23,9	466528		12230	5705637440	69779945891200	925840366933
Πλευρικό Έλασμα	2	7530	20	301200		10865	3272538000	35556125370000	1423192590000
SUM				1227347,2			15118639856	188031626076880	2349041786278
			$\alpha_{vertical} =$	767728					
ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΑ									
ΣΤΟΙΧΕΙΟ	No	A (mm2)	A total (mm2)	h(mm)		A*h (mm3)	Ah ² (mm4)	I(mm4)	I totalL(mm4)
Ενισχυτικά 1st Floor (100x7)									
ενισχυτικό	17	874	14858	12230		181713340	2222354148200	853000	14501000
Ενισχυτικά 2nd Floor (100x8)									
ενισχυτικό	16	974	15584	14630		227993920	3335551049600	943000	15088000
Ενισχυτικά Side Panel (100x7)									
ενισχυτικό	1	874	874	10130		8853620	89687170600	853000	853000
ενισχυτικό	1	874	874	10430		9115820	95078002600	853000	853000
ενισχυτικό	1	874	874	10730		9378020	100626154600	853000	853000
ενισχυτικό	1	874	874	11030		9640220	106331626600	853000	853000
ενισχυτικό	1	874	874	11330		9902420	112194418600	853000	853000
ενισχυτικό	1	874	874	11630		10164620	118214530600	853000	853000
ενισχυτικό	1	874	874	11930		10426820	124391962600	853000	853000
ενισχυτικό	1	874	874	12530		10951220	137218786600	853000	853000
ενισχυτικό	1	874	874	12830		11213420	143868178600	853000	853000
ενισχυτικό	1	874	874	13130		11475620	150674890600	853000	853000
ενισχυτικό	1	874	874	13430		11737820	157638922600	853000	853000
ενισχυτικό	1	874	874	13730		12000020	164760274600	853000	853000
ενισχυτικό	1	874	874	14030		12262220	172038946600	853000	853000
ενισχυτικό	1	874	874	14330		12524420	179474938600	853000	853000
TOTAL			42678			559353540	7410104002200		41531000
TOTAL S&P			85356			1118707080	14820208004400		83062000
								Σ(I) (cm4)	2349124848278,1

Ολικό Εμβαδόν μέσης τομής	1312703	mm ²
Πρώτη Ροπή Επιφανείας	16237346936	mm ³
Δεύτερη Ροπή Επιφανείας	202851834081280	mm ⁴
Ουδέτερος άξονας από πυθμένα	12369	mm
Ροπή Αδράνειας από πυθμένα	205200958929558	mm ⁴
Ροπή Αδράνειας από Ο.Α	4354769539581	mm ⁴
Ροπή Αντίστασης από main deck	1714883358	mm ³
Ροπή Αντίστασης από 2nd floor	1926375136	mm ³
Reh	208	N/mm ²
γm	1,1	
Mp	356696	kNm
Mp/γm	324269	kNm
 Mτ 	214577	kNm
Safety Margin	1,5	

ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία πραγματοποιήθηκε η σχεδίαση ενός πλοίου τύπου φρεγάτας, με εκτόπισμα περί τους 4500t, λαμβάνοντας υπόψη τις εκτιμήσεις των απαιτήσεων του Πολεμικού Ναυτικού.

Συγκεκριμένα μελετήθηκε η φρεγάτα *Χίος* και υλοποιήθηκαν τα βασικά στάδια της αρχικής της σχεδίασης: η επιλογή των κύριων διαστάσεων, η προκαταρκτική ανάλυση βαρών, η σχεδίαση των ναυπηγικών γραμμών, η σχεδίαση της γενικής διάταξης, η υδροστατική ανάλυση, η υδατοστεγής διαμέριση και τα κατακλύσιμα μήκη, ο έλεγχος ευστάθειας του άθικτου πλοίου αλλά και μετά από βλάβη, η υδροδυναμική ανάλυση και ο υπολογισμός της αντίστασης ρυμούλκησης, η συμπεριφορά σε κυματισμούς, η επιλογή της προωστήριας εγκατάστασης και της έλικας, η σχεδίαση της μέσης τομής και ο έλεγχος επάρκειας αντοχής της στα καμπτικά κυματικά φορτία.

Η τελική σχεδίαση εκτιμάται ότι πληρεί τις τεθείσες απαιτήσεις και δύναται να αποτελέσει το υπόβαθρο για την λεπτομερή σχεδίαση μιας σύγχρονης φρεγάτας, ικανή να καλύψει στο εγγύς μέλλον τις ανάγκες της εθνικής μας αμυντικής στρατηγικής.

ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Οι σύγχρονες εξελίξεις στον τομέα της αμυντικής τεχνολογίας, υιοθετούν την ολιστική σχεδίαση συστημάτων ικανών να ανταπεξέλθουν σε πολλαπλές επιχειρησιακές αποστολές, με βέλτιστο επιχειρησιακό αποτέλεσμα. Ως εκ τούτου, στο πεδίο της μελέτης και σχεδίασης πολεμικών πλοίων, αναμένεται η χρήση μεθόδων αποτίμησης της επιχειρησιακής αποτελεσματικότητας του μέσου ως σύστημα, αποτελούμενο από συστήματα, με προκαθορισμένα επιχειρησιακά κριτήρια και μεθόδους αποτίμησης - συμμόρφωσης.

Από την άλλη, το μεταβαλλόμενο γεωπολιτικό – γεωστρατηγικό περιβάλλον στην ευρύτερη περιοχή της ανατολικής Μεσογείου, αναδεικνύει τη Χώρα μας ως πόλο σταθερότητας και ασφαλείας. Οι δοκιμαζόμενες περιοχές της Μέσης Ανατολής, η αναγκαιότητα διακήρυξης της Αποκλειστικής Οικονομικής Ζώνης, οι ενεργειακές εξελίξεις αλλά και πλήθος άλλοι εθνικοί λόγοι, επιβάλλουν την διαφύλαξη των θαλασσιών συνόρων και την προστασία του ζωτικού μας χώρου. Για το λόγο αυτό απαιτούνται δυνάμεις ικανές να εξασφαλίζουν την αποτροπή και να υπηρετήσουν το εθνικό αμυντικό δόγμα της Χώρας με ευελιξία, προσαρμοστικότητα και χαμηλό κόστος λειτουργίας.

Εκτιμάται ότι, η τεχνολογική εξέλιξη και η επαύξηση των δυνατοτήτων θαλάσσιας υπεροχής του Πολεμικού Ναυτικού, λαμβάνοντας υπόψη τις αμυντικές επενδύσεις των γειτονικών μας κρατών, αποτελεί σαφή επιδίωξη. Υπό το πρίσμα της οικονομικής προσαρμογής όμως, απαιτούνται στοχευμένες επιλογές οι οποίες θα εξασφαλίζουν την βέλτιστη επαύξηση της μαχητικής ισχύος του στόλου, και όχι των μονάδων, υπό καθεστώς περιορισμένων πόρων.

Αν και οι απαιτήσεις του Πολεμικού Ναυτικού καθορίζονται λαμβάνοντας υπόψη πλήθος επιλογών - παραμέτρων, η ανάλυση των οποίων εκφεύγει της παρούσας, εκτιμάται ότι η υλοποίηση σχεδιάσεων όπως η παρούσα μπορεί να παρέχει στους λήπτες των αποφάσεων τα απαιτούμενα δεδομένα ώστε, αφενός να επιδεικνύονται οι σχεδιαστικές δυνατότητες που υφίστανται στη Χώρα και αφετέρου να υποβοηθήσουν στην εκπόνηση ενός μεθοδολογικού πλαισίου για την ολιστική αποτύπωση των επιχειρησιακών απαιτήσεων και την αξιολόγηση συστημάτων ικανών να ανταπεξέλθουν στο μέλλον που έρχεται.

Ως εκ τούτου, μελέτες με συναφή αντικείμενα με την παρούσα θα πρέπει να αποτελέσουν επιδίωξη για το πνευματικό - ακαδημαϊκό δυναμικό της Χώρας καθότι, πέρα

από την υποστήριξη των Ενόπλων Δυνάμεων στη λήψη αποφάσεων επωφελών για την άμυνα και την ασφάλεια της Χώρας, συμβάλουν στην οικοδόμηση προϊόντων πνευματικού κεφαλαίου και έντασης γνώσης, που είναι πλέον απαραίτητα για την εξωστρεφή ανάπτυξη της εθνικής ναυπηγικής μας βιομηχανίας και την ανάπτυξη νέων προϊόντων.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Αθανασούλης Γ, Μπελιμπασάκης Κ, *Σημειώσεις Μαθήματος «Δυναμική Πλοίου»*, ΕΜΠ, 2012.
2. Αθανασούλης Γ, Μπελιμπασάκης Κ, *Σημειώσεις Μαθήματος «Θαλάσσιοι Κυματισμοί»*, ΕΜΠ, 2012.
3. Καλκούνης Ε, *Μελέτη και Σχεδίαση Πολεμικού Πλοίου Τύπου Κορβέτας*, Διπλωματική Εργασία στη Σχ. Ναυπ. Μηχ/γων Μηχ/κων, ΕΜΠ, 2013.
4. Παπανικολάου Α, *Μελέτη Πλοίου – Μεθοδολογίες Προμελέτης*, Τεύχη 1 & 2, Εκδόσεις Συμμεών, 2009.
5. Σαμουηλίδης Ε, *Σημειώσεις Μαθήματος «Αντοχή Υλικών»*, ΕΜΠ, 2010.
6. Τσούβαλης Ν, *Σημειώσεις Μαθήματος «Ανάλυση και Σχεδίαση Σκαφών από Σύνθετα Υλικά»*, ΕΜΠ, 1998.
7. ANSYS AQWA *Users Manual*.
8. ANSYS Fluent, *Users Manual*.
9. AVEVA Marine, *Users Manual*.
10. Brown D, *Warrior to Dreadnought: Warship Design and Development*, Seaforth Publishing, 1997.
11. Brushan S et al., *Model- and Full-Scale URANS Simulations of Athena Resistance, Powering, Seakeeping and 5415 Maneuvering*, J. of Ship Research, Vol.53, No4, pp.179-198, 2009.
12. Comstock EN et al, *Seakeeping in sea operations*, SNAME STAR Symposium, San Diego, 1980.
13. Chen NZ et al., *Reliability Analysis of a ship hull in composite materials*, Composite Structures 62, pp.59-66, 2003.
14. DNV, Hull Structural Design, *Fiber Composite and Sandwich Construction*, HSLC and NSC, Part 3, Chapter 4, 2013.
15. DTMB-5415, *Geometry and Conditions*, Force Technology, Office of Naval Research, US Navy, Available at <http://www.simman2014.dk/cms/site.aspx?p=13276>
16. Evans, JH, *Basic Design Concepts*, ASNE Journal, Vol.71, No.4, pp.672-678, 1959.
17. Germanischer Lloyd, *Rules for classification and construction III-Naval Ship Technology, Surface Ships*, Part 1-Hull Structures and Ship Equipment, 2012.

18. Hanninen S, Mikkola T, *Computation of ship hull flows at model- and full-scale Reynolds Number*, EU EFFORT Project report, 2006.
19. Hexcel Composites, *HexWeb Honeycomb Sandwich Technology*, 2000. Available at www.hexcel.com.
20. Hodge CG, Mattick DJ, *The electric warship: then, now and later*, presented at INEC 2008.
21. Holtrop J, Mennen GJ, *An Approximate Power Prediction Method*, Int. Shipbuilding Progress, 29, pp.166—170,1982.
22. Holtrop J, *A Statistical Reanalysis of Resistance and Propulsion Data*, Int. Shipbuilding Progress, 31, pp.272—276, 1984.
23. Hirt CW, Nichols BD, *Volume of Fluid (VOF) Method for Dynamics of Free Boundaries*, J. of Computational Physics, Vol.39, pp.201-205, 1981.
24. Hughes OF, Paik JK, *Ship Structural Analysis and Design*, pp.3-29, SNAME, 2010.
25. HydroComp Propeller Expert, *Users Manual*.
26. ISO 2631/1, *Mechanical Vibration and Shock – Evaluation of Human Exposure to Whole Body Vibration : General Requirements*,1997.
27. Isherwood RM, *Wind resistance of merchant ships*, Transactions of RINA, Vol.115, 1973, pp.327-228.
28. Jane's, *Fighting Ships*, 2009-2010 Edition.
29. Jones D, Clark B, *Fluent Code simulation around a naval hull: the DTMB-5415*, Maritime Platform Division, DSTO Australia.
30. Journee JMJ, *Quick Strip Theory Calculations in Ship Design*, PRADS 1992. Available at <http://www.shipmotions.nl>.
31. Lazauskas L, *Resistance and Squat of surface combatant DTMB Model 5415: Experiments and Predictions*, available at www.cyberiad.net.
32. Larsson L et al., *Benchmarking of Computational Fluid Dynamics for Ship Flows: The Gothenburg 2000 Workshop*, J. of Ship Research, Vol.47, No1, pp.33-81, 2003.
33. Lewis E, *Motions in Waves and Controllability*, Principles of Naval Architecture, SNAME, 1989..
34. Lindblom F, *Use of composites in the Visby class stealth corvette*, ACMC/SAMPE, Sep. 2003.
35. MAN, *Installation Guideline for Diesel Electric Propulsion Plants*. Available at

<http://marine.man.eu/docs/librariesprovider6/marine-broschures/diesel-electric-drives-guideline.pdf?sfvrsn=0>.

36. Mazzuca T, Torre M, *The FREMM Architecture: a first step towards innovation*, SPEEDAM 2008.
37. Mansour A, Liu D, *Strength of Ships and Ocean Structures*, Principles of Naval Architecture, SNAME, 2008, pp.80.
38. Menter FR, *Best practice: Scale-Resolving Simulations in ANSYS CFD*, Ver.1, ANSYS Germany, 2012.
39. Molland A et al, *Ship Resistance and Propulsion*, Cambridge University Press, London, 2011.
40. Mouritz AP et al., *Review of advanced composite structures for naval ships and submarines*, Composite Structures 53, pp.21-41, 2001.
41. Naar H et al, *A theory of coupled beams for strength assessment of passenger ships*, Marine Structures, 17, pp.590-611, 2004.
42. NATO, *ANEP-77 Naval Ship Code*, Ed. E, NSA, 2014.
43. Olson, *A seakeeping evaluation of four naval monohulls and a 3250 SWATH*, Center of Naval Analysis Memorandum, 77-0640, 1977.
44. Papanikolaou A, Boulougouris E, *On the specification of the roll radius of gyration for Ro-Ro passenger ships in view of the implementation of SOLAS95 Res.14 Equivalent Model Test Method*, Technical Report submitted to the Hellenic Register of Shipping, June 1996.
45. UK MOD, *Defense Standard 00-133*, Aviation Arrangements in Surface Ships, May 16, 2014.
46. UK MOD, *Defense Standard 00-900 Part 4*, Safety and Environmental Protection, Ship, May 2014.
47. UK MOD, *Defense Standard 00-25*, Human Factors for Designers of Systems, 2008.
48. UK MOD, *Maritime Acquisition Publication 01-024*, Part 1, Stability of Surface Ships, Issue 4, 2010.
49. US Navy, *Calculation of Surface Ship Endurance Fuel Requirements*, Design Data Sheet 200-1, Revision 1, NAVSEA, 2011.
50. US Navy, *Stability and Buoyancy of US Naval Surface Ships*, Design Data Sheet 079-1, NAVSEA 2002.

51. US Navy, *Alternative propulsion methods for surface combatants and amphibious warfare ships*, NAVSEA, 2007.
52. Vallbo, *Material Selection Considerations for Polymer Composite Structures in Naval Ship Applications*, J. of Sandwich Structures and Materials, Vol.7,pp.413, 2005.
53. Visonneau M, *A step towards the numerical simulation of viscous flows around ships at full scale – Recent achievements within the EU project EFFORT*, presented at Marine CFD Conference , 2005.
54. Vugts, JH, *The Hydrodynamic Forces and Ship Motions in Waves*, Delft University of Technology, 1970.
55. Wikipedia, *David Taylor Model Basin*, Available at https://en.wikipedia.org/wiki/David_Taylor_Model_Basin.
56. Wood MP, Gonzalez LM, *RANSE with free surface computations around fixed DTMB 5415 model*, 9th Int. Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, Michigan, 2007.
57. Wackers J et al., *Adaptive grid refinement for unsteady ship flow and ship motion simulation*, presented at Marine CFD Conference , 2005.
58. Wikipedia, <https://el.wikipedia.org/φρεγάτα>, accessed at Sep 21 2015.
59. Wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/systems_engineering, accessed at Sep 21 2015.