



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΛΟΙΟΥ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΛΟΙΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΡΟΜΕΛΕΤΗΣ ΠΛΟΙΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΞΗΡΟΥ
ΦΟΡΤΙΟΥ»**



ΒΑΣΙΛΗΣ ΚΑΡΑΛΗΣ

08109045

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Γ. ΖΑΡΑΦΩΝΙΤΗΣ (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ)

Α. ΠΑΠΑΝΙΚΟΛΑΟΥ

Α. ΓΚΙΝΗΣ

ΑΘΗΝΑ, 2016

Περιεχόμενα

Διαγράμματα.....	5
Πίνακες.....	7
Σχήματα.....	7
Ευχαριστίες	8
Περίληψη	9
1. Εισαγωγή	10
1.1. Πλοία Μεταφοράς ξηρού φορτίου χύδην	10
1.1.1. Γενικά	10
1.1.2. Διάταξη και Υπόβαθρο κανονισμών	11
1.2. Βάση δεδομένων	12
1.3. Μελέτη Πλοίου	13
1.4. Στατιστική ανάλυση.....	14
1.4.1. Διάγραμμα Διασποράς (Scatter Diagram).....	14
1.4.2. Προσεγγιστικές Καμπύλες.....	15
1.4.3. Μέθοδος Ελαχίστων Τετραγώνων	16
1.4.4. Παλινδρόμηση (Regression).....	16
1.4.5. Θεωρία Συσχέτισης (Correlation Theory).....	17
2. Εκτίμηση στοιχείων Bulk Carriers	19
2.1. Κύριες Διαστάσεις	19
2.1.1. Μήκος μεταξύ καθέτων (L_{BP}).....	19
2.1.2. Ολικό Μήκος (L_{OA})	21
2.1.3. Πλάτος.....	22
2.1.4. Κοίλο (D).....	24
2.1.5. Βύθισμα Σχεδίασης (T_{design})	28
2.1.6. Βύθισμα αντοχής ($T_{scantling}$)	29
2.1.7. Λόγοι κύριων διαστάσεων	31
2.2. Χωρητικότητες – Βάρη.....	35
2.2.1. DWT Scantling	35
2.2.2. Εκτόπισμα Δ (Displacement)	36
2.2.3. Βάρος κενού σκάφους (Lightship).....	38
2.2.4. Ολική Χωρητικότητα (Gross Tonnage)	41
2.2.5. Καθαρή Χωρητικότητα (Net Tonnage)	44
2.2.6. Suez Canal Net Tonnage (SCNT)	49
2.3. Χωρητικότητα δεξαμενών	50
2.3.1. Χωρητικότητα όγκου κυτών Grain ($V_{Cargo Grain}$).....	50
2.3.2. Χωρητικότητα δεξαμενών φορτίου Bale ($V_{Cargo Bale}$)	54
2.3.3. Όγκος δεξαμενών έρματος (Ballast Water Capacity)	55
2.3.4. Χωρητικότητα δεξαμενών καυσίμων (Fuel Oil Capacity)	58
2.3.5. Όγκος δεξαμενών Diesel (Diesel Oil Capacity)	61

2.4.	Κέντρα βαρών (Centers of Gravity)	64
2.4.1.	Κέντρο βάρους Lightship	64
2.4.2.	Κέντρο βάρους σε κατάσταση Full Load Departure	66
2.4.3.	Κέντρο βάρους φορτίου σε κατάσταση Full Load Departure	68
2.5.	Εκτίμηση ισχύος πρόωσης (MCR).....	70
2.6.	Βασικά υδροστατικά στοιχεία	73
2.6.1.	Διάμηκες κέντρο άντωσης LCB (Longitudinal Center of Buoyancy)	74
2.6.2.	Μετάκεντρο ΚΜ	75
2.6.3.	Μετακεντρικό ύψος GM (Metacentric Height)	76
2.7.	Λοιπές παράμετροι σχεδίασης.....	77
2.7.1.	Συντελεστής γάστρας C_B (Hull Coefficient).....	77
2.7.2.	Πρισματικός συντελεστής C_P (Prismatic Coefficient)	78
2.7.3.	Συντελεστής μέσης τομής C_M (Midship Coefficient).....	79
2.7.4.	Συντελεστής ισάλου επιφανείας C_W (Waterplane coefficient)	80
2.7.5.	Ύψος εξάλλων σε κατάσταση αντοχής (Freeboard Scantling)	81
2.7.6.	Διάμετρος έλικας.....	83
2.7.7.	Επιφάνεια πηδαλίου	85
2.7.8.	Εκτίμηση Froude Number	87
2.7.9.	Εκτίμηση διαστάσεων υπερκατασκευών.....	89
2.7.10.	Θέση πρυμναίας φρακτής L_{AFT}	94
2.7.11.	Μήκος μηχανοστασίου L_{ER}	95
2.7.12.	Μήκος χώρου φορτίου.....	97
3.	<u>Ανάπτυξη προγράμματος</u>	99
3.1.	Γενικά.....	99
3.2.	Εισαγωγή Δεδομένων.....	99
3.3.	Υπολογισμός κύριων χαρακτηριστικών	100
3.4.	Υπολογισμός χωρητικότητας δεξαμενών	102
3.5.	Έλεγχος γραμμής φόρτωσης.....	104
3.6.	Καθορισμός διάταξης και οριοθέτηση φρακτών	104
3.7.	Όγκος δεξαμενών έρματος (Ballast Water)	106
3.8.	Υπολογισμός κέντρου βάρους και υδροστατικών.....	107
3.8.1.	Κέντρα βάρους	107
3.8.2.	Υδροστατικά μεγέθη	108
3.9.	Υπολογισμός αντίστασης και πρόωσης.....	108
3.9.1.	Υπολογισμός αντίστασης	109
3.9.2.	Αντίσταση Κυματισμού (Wave Resistance).....	110
3.9.3.	Αντίσταση Τριβής (Friction Resistance).....	110
3.9.4.	Αντίσταση παρελκομένων (Appendages Resistance)	111
3.9.5.	Αντίσταση λόγω βύθισης της πρύμνης (Transom Stern Resistance)	111
3.9.6.	Αντίσταση λόγω βολβοειδούς πλώρας (Bulbous Bow Resistance).....	111
3.9.7.	Αντίσταση λόγω συντελεστή συσχέτισης (Correlation Resistance)	112
3.9.8.	Συνολική αντίσταση (Total Resistance).....	112
3.9.9.	Απαιτούμενη ισχύς ρυμούλκησης.....	112
3.9.10.	Υπολογισμός ισχύος και στροφών έλικας.....	112
3.10.	Επιλογή μηχανολογικής εγκατάστασης.....	114
3.11.	Μέθοδος υπολογισμού Lightship.....	115

3.12. Μέθοδος υπολογισμού κόστους απόκτησης	119
3.12.1. Κόστος κατασκευής πλοίου	119
3.12.2. Λειτουργικά έξοδα του πλοίου	120
3.13. Ελάχιστος απαιτούμενος ναύλος	121
<u>4. Αποτελέσματα προγράμματος</u>	<u>123</u>
4.1. DWT Design	125
4.2. Lightship.....	127
4.3. GrT	129
4.4. Χωρητικότητα δεξαμενών φορτίου (Cargo Capacity Grain)	130
4.5. Χωρητικότητα συνόλου δεξαμενών καυσίμων και δεξαμενών νερού.....	131
4.6. Κέντρο βάρους πλοίου	133
4.6.1. Κατακόρυφο κέντρο βάρους (KG).....	133
4.6.2. Διάμηκες κέντρο βάρους (LCG).....	134
4.7. Οριοθέτηση φρακτών.....	136
4.8. Εκτίμηση ισχύος.....	137
4.9. Τεχνοοικονομική μελέτη	139
<u>5. Συμπεράσματα και προτάσεις.....</u>	<u>142</u>
<u>6. Βιβλιογραφία.....</u>	<u>144</u>
<u>7. Παράρτημα – Κώδικας Matlab</u>	<u>146</u>
7.1. Basic Program	146
7.2. Subroutine for Resistance and Propulsion Calculations	158
7.3. Function for open water efficiency η_0	161
7.4. Function with optimization's constraints	163

Διαγράμματα

Διάγραμμα 1: Ενδεικτικό διάγραμμα Διασποράς.....	15
Διάγραμμα 2: Ενδεικτική προσεγγιστική καμπύλη.....	16
Διάγραμμα 3: Ορισμός της απόκλισης (deviation)	17
Διάγραμμα 4: L_{BP} συναρτήσει DWT Design.....	19
Διάγραμμα 5: L_{BP} συναρτήσει DWT Scantling	20
Διάγραμμα 6: L_{OA} συναρτήσει L_{BP}	21
Διάγραμμα 7: B συναρτήσει L_{BP}	22
Διάγραμμα 8: B συναρτήσει DWT Design	23
Διάγραμμα 9: D συναρτήσει DWT Design.....	24
Διάγραμμα 10: D συναρτήσει L_{BP}	25
Διάγραμμα 11: D συναρτήσει B	26
Διάγραμμα 12: D συναρτήσει T Design.....	27
Διάγραμμα 13: T Design συναρτήσει DWT Design	28
Διάγραμμα 14: T Scantling συναρτήσει T Design.....	29
Διάγραμμα 15: T Scantling συναρτήσει DWT Scantling	30
Διάγραμμα 16: L_{BP}/B συναρτήσει DWT Scantling	31
Διάγραμμα 17: L_{BP}/D συναρτήσει DWT Scantling	31
Διάγραμμα 18: B/T Design συναρτήσει DWT Design.....	32
Διάγραμμα 19: B/T Design συναρτήσει B	32
Διάγραμμα 20: D/T Design συναρτήσει DWT Design.....	33
Διάγραμμα 21: D/T Design συναρτήσει D.....	33
Διάγραμμα 22: B/D συναρτήσει L_{BP}	34
Διάγραμμα 23: DWT Scantling συναρτήσει DWT Design.....	35
Διάγραμμα 24: Displacement Design (Δ) συναρτήσει DWT Design.....	36
Διάγραμμα 25: DWT/ Δ Design συναρτήσει DWT Design.....	37
Διάγραμμα 26: Lightship συναρτήσει L_{BP}	38
Διάγραμμα 27: Lightship συναρτήσει DWT Design.....	39
Διάγραμμα 28: Lightship συναρτήσει $L_{BP} * B * D$	40
Διάγραμμα 29: GrT συναρτήσει DWT Design	41
Διάγραμμα 30: GrT συναρτήσει DWT Scantling.....	42
Διάγραμμα 31: GrT συναρτήσει $L_{BP} * B * D$	43
Διάγραμμα 32: NrT συναρτήσει DWT Design	44
Διάγραμμα 33: NrT συναρτήσει DWT Scantling	45
Διάγραμμα 34: NrT συναρτήσει $L_{BP} * B * D$	46
Διάγραμμα 35: NrT συναρτήσει GrT	47
Διάγραμμα 36: NrT/GrT συναρτήσει GrT.....	48
Διάγραμμα 37: SCNT συναρτήσει GrT	49
Διάγραμμα 38: V Cargo Grain συναρτήσει DWT Scantling	50
Διάγραμμα 39: V Cargo Grain συναρτήσει $L_{BP} * B * D$	51
Διάγραμμα 40: V Cargo Grain συναρτήσει L_{BP}	52
Διάγραμμα 41: V Cargo Grain συναρτήσει NrT.....	53
Διάγραμμα 42: V Cargo Bale συναρτήσει V Cargo Grain	54
Διάγραμμα 43: Ballast Capacity συναρτήσει DWT Scantling	55
Διάγραμμα 44: Ballast Capacity συναρτήσει V Cargo Grain	56
Διάγραμμα 45: Ballast Capacity συναρτήσει $L_{BP} * B * D$	57
Διάγραμμα 46: V Fuel Oil συναρτήσει $L_{BP} * B * D$	58
Διάγραμμα 47: V Fuel Oil συναρτήσει MCR.....	59
Διάγραμμα 48: V Fuel Oil συναρτήσει MCR*Range/Vs.....	60
Διάγραμμα 49: V Diesel Oil συναρτήσει V Fuel Oil	61
Διάγραμμα 50: V Diesel Oil/V Fuel Oil συναρτήσει V Fuel Oil	62

Διάγραμμα 51: V Fuel + V Diesel Oil συναρτήσει MCR	63
Διάγραμμα 52: KG Lightship συναρτήσει D	64
Διάγραμμα 53: LCG Lightship συναρτήσει L_{BP}	65
Διάγραμμα 54: KG Departure συναρτήσει D	66
Διάγραμμα 55: LCG Departure συναρτήσει L_{BP}	67
Διάγραμμα 56: KG Cargo Departure συναρτήσει D	68
Διάγραμμα 57: LCG Cargo Departure συναρτήσει L_{BP}	69
Διάγραμμα 58: MCR συναρτήσει DWT Scantling	70
Διάγραμμα 59: MCR συναρτήσει $L_{BP} * B * D$	71
Διάγραμμα 60: $\Delta^{2/3} * V_s^3$ συναρτήσει MCR	72
Διάγραμμα 61: KB Departure συναρτήσει T Design	73
Διάγραμμα 62: LCB Departure συναρτήσει L_{BP}	74
Διάγραμμα 63: KM Departure συναρτήσει D	75
Διάγραμμα 64: GM Departure συναρτήσει DWT Scantling	76
Διάγραμμα 65: C_B συναρτήσει DWT Scantling	77
Διάγραμμα 66: C_P συναρτήσει C_B	78
Διάγραμμα 67: C_M συναρτήσει DWT Design	79
Διάγραμμα 68: C_W συναρτήσει C_B	80
Διάγραμμα 69: Freeboard Scantling συναρτήσει T Scantling	81
Διάγραμμα 70: Freeboard Scantling συναρτήσει L_{BP}	82
Διάγραμμα 71: Propeller Diameter συναρτήσει $L_{BP} * B * D$	83
Διάγραμμα 72: Propeller Diameter συναρτήσει T Design	84
Διάγραμμα 73: Rudder Surface συναρτήσει $L_{BP} * B * D$	85
Διάγραμμα 74: Rudder Surface συναρτήσει $L_{BP} * T_{scant}$	86
Διάγραμμα 75: Froude Number συναρτήσει DWT Scantling	87
Διάγραμμα 76: Froude Number συναρτήσει L_{BP}	88
Διάγραμμα 77: L Superstructure/ L_{BP} συναρτήσει L_{BP}	89
Διάγραμμα 78: B Superstructure/B συναρτήσει B.....	90
Διάγραμμα 79: H Superstructure/D συναρτήσει D	91
Διάγραμμα 80: Superstructure Transversal Area συναρτήσει GrT	92
Διάγραμμα 81: Superstructure Longitudinal Area συναρτήσει GrT.....	93
Διάγραμμα 82: L_{AFT} συναρτήσει L_{BP}	94
Διάγραμμα 83: $L_{EngineRoom}$ συναρτήσει L_{BP}	95
Διάγραμμα 84: $L_{EngineRoom}$ συναρτήσει MCR	96
Διάγραμμα 85: L Cargo συναρτήσει L_{BP}	97
Διάγραμμα 86: L Cargo συναρτήσει V Cargo Grain.....	98
Διάγραμμα 87: Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για DWT Design	126
Διάγραμμα 88: Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για Lightship	128
Διάγραμμα 89: Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για GrT.....	129
Διάγραμμα 90: Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για Cargo Capacity (Grain)	131
Διάγραμμα 91: Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για Χωρητικότητα Δεξαμενών Υγρού Φορτίου	132
Διάγραμμα 92: Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για KG Departure	134
Διάγραμμα 93: Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για LCG Departure	135
Διάγραμμα 94: Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για LAFT	136
Διάγραμμα 95: Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για LER.....	136
Διάγραμμα 96: Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για L_{CARGO}	137
Διάγραμμα 97: Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για MCR.....	138
Διάγραμμα 98: Υπολογισμένο RFR για όλα τα πλοία του δείγματος	141

Πίνακες

Πίνακας 1: Κατηγοριοποίηση Bulk Carriers με το DWT	10
Πίνακας 2: Όρια των λόγων των κύριων διαστάσεων	34
Πίνακας 3: Input χρήστη 1ου μέρους προγράμματος	99
Πίνακας 4: Input χρήστη 2ου μέρους προγράμματος	100
Πίνακας 5: Υπολογισμός συντελεστή παρελκομένων (1+k2)	111
Πίνακας 6: Όρια μεταβλητών προβλήματος υπολογισμού έλικας	114
Πίνακας 7: Τυπικό Layout Diagram ενός κινητήρα	115
Πίνακας 8: Κατανομή του κόστους κάθε ομάδας βαρών σε εργατικά και υλικά	119
Πίνακας 9: Αρχείο Input του προγράμματος	123
Πίνακας 10: Οι σταθερές τιμές που χρησιμοποιήθηκαν στα παραδείγματα	124
Πίνακας 11: Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για DWT Design	125
Πίνακας 12: Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για Lightship	127
Πίνακας 13: Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για GrT	129
Πίνακας 14: Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για Cargo Capacity (Grain)	130
Πίνακας 15: Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για Χωρητικότητα Δεξαμενών Υγρού Φορτίου	132
Πίνακας 16: Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για KG Departure	133
Πίνακας 17: Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για LCG Departure	135
Πίνακας 18: Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για MCR	138
Πίνακας 19: Δεδομένα πραγματικού ταξιδιού Capsize πλοίου	139
Πίνακας 20: Αποτέλεσμα τεχνοοικονομικής μελέτης για πλοία του δείγματος	139
Πίνακας 21: Υπολογιζόμενο RFR για τα πλοία του δείγματος	141

Σχήματα

Σχήμα 1: Γενική διάταξη και κάτοψη - 23645 DWT ocean-going bulk carrier with ice category LU4 "Grumant" type	11
Σχήμα 2: Τυπική μέση τομή πλοίου Bulk Carrier	12
Σχήμα 3: Κατανομή πλοίων της βάσης δεδομένων με βάση το μέγεθος	13
Σχήμα 4: Ελικοειδής Καμπύλη Μελέτης πλοίου [J.H. Evans 1959]	14

Ευχαριστίες

Πολλοί άνθρωποι συντέλεσαν στην υλοποίηση της παρούσας διπλωματικής μου εργασίας, έχοντας ως επιβλέπων καθηγητή τον κ. Γ. Ζαραφωνίτη, Αναπληρωτή Καθηγητή του Τομέα Μελέτης Πλοίου και Θαλασσίων Κατασκευών, με την οποία ολοκληρώνεται η φοίτησή μου στη Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Γ. Ζαραφωνίτη για την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας, για την πολύτιμη βοήθεια και την καθοδήγηση του κατά την πορεία υλοποίησης της συγκεκριμένης διπλωματικής, την υπομονή του καθώς επίσης και για την άριστη συνεργασία μας σε όλα τα επίπεδα.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους κα. Α. Αλησαφάκη, κ. Γ. Παπατζανάκη και κα. Ε. Ηλιοπούλου, μέλη του εργαστηρίου Μελέτης Πλοίου, για τον χρόνο τους και την πολύ σημαντική βοήθεια που μου παρείχαν σε κάθε δυσκολία που παρουσιάστηκε κατά την εκπόνηση της διπλωματικής.

Εκτιμώ δεόντως τον σημαντικό ρόλο του κ. Γ. Τσικρικά για την πολύτιμη βοήθεια στην συγκέντρωση των δεδομένων που ήταν απαραίτητα για την υλοποίηση της εργασίας.

Φυσικά δεν θα μπορούσα να μην αναφερθώ στην βοήθεια των κ. Γ. Μάνταλου, Technical Manager στην Star Bulk Carriers, κ. Κ. Μητρόπουλου, Technical Director στην Neda Maritime, Γ. Σελεμενάκη Superintendent Engineer στην Neda Maritime και του πρώην συμφοιτητή μου και νυν συναδέλφου Λ. Νικολόπουλο Assistant Superintendent Engineer στην Star Bulk Carriers, για την πολύτιμη βοήθεια τους στην συγκέντρωση διαφόρων στοιχείων που ήταν απαραίτητα για την παρούσα διπλωματική.

Οποιαδήποτε αναφορά δεν έχει νόημα χωρίς να ευχαριστήσω τους γονείς μου Γεράσιμο και Φωτεινή, όπως και τον αδελφό μου Νικόλα, οι οποίοι με τη μακροχρόνια και άνευ όρων στήριξη τους σε κάθε πτυχή της ζωής μου αποτελούν τους στυλοβάτες της προσπάθειάς μου και τον καθοριστικότερο παράγοντα σε οποιαδήποτε επιτυχία. Σε αυτούς λοιπόν αφιερώνεται η εργασία αυτή με αμέριστη αγάπη και σεβασμό.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον συνάδελφο μου Β. Καραγεώργο για την βοήθεια που μου παρείχε και για την άψογη συνεργασία μας όλο αυτό το διάστημα.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία χωρίζεται σε δύο κύρια μέρη.

Το πρώτο μέρος περιλαμβάνει την δημιουργία μιας βάσης δεδομένων με πραγματικά τεχνικά στοιχεία πλοίων μεταφοράς ξηρού φορτίου (Bulk Carriers) που συλλέχτηκαν από σχέδια υπαρχόντων πλοίων για λόγους αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων. Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε στατιστική ανάλυση με σκοπό να βρεθεί πιθανή συσχέτιση των παραπάνω στοιχείων και να αναπτυχθούν προσεγγιστικοί τύποι που χρησιμοποιούνται στην εκτίμηση των βασικών χαρακτηριστικών μιας νέας κατασκευής στο στάδιο της προμελέτης. Η στατιστική ανάλυση έγινε χρησιμοποιώντας την μέθοδο της παλινδρομικής ανάλυσης (Regression Analysis) με την βοήθεια του Matlab R2014a.

Στο δεύτερο μέρος αναπτύχθηκε κώδικας στο Matlab R2014a ο οποίος πραγματοποιεί την προμελέτη (preliminary design) ενός πλοίου Bulk Carrier χρησιμοποιώντας κάποια δεδομένα που δίνονται από τον χρήστη καθώς και μέρος των εμπειρικών τύπων που βρέθηκαν στο πρώτο στάδιο της παρούσας εργασίας.

Αρχικά το πρόγραμμα υπολογίζει την μεταφορική ικανότητα του πλοίου με δεδομένες τις κύριες διαστάσεις του. Στην συνέχεια, γίνεται υπολογισμός των βασικών χαρακτηριστικών του πλοίου, εκτίμηση της χωρητικότητας όλων των δεξαμενών έρματος, φορτίου και αναλωσίμων, οριοθέτηση των φρακτών καθώς και εκτίμηση των κέντρων βαρών του πλοίου.

Επιπροσθέτως, γίνεται υπολογισμός των βασικών υδροστατικών μεγεθών καθώς και υπολογισμός της αντίστασης και επομένως της απαιτούμενης ισχύος πρόωσης του πλοίου. Στην συνέχεια μέσω βελτιστοποίησης προτείνονται τα κατάλληλα χαρακτηριστικά της βέλτιστης έλικας (βήμα, λόγος βήμα/διάμετρος, στροφές κ.α.) με κριτήριο την μεγιστοποίηση του βαθμού απόδοσης της σε ελεύθερη ροή και εν συνεχεία προτείνεται ένας κατάλληλος κινητήρας του εμπορίου ώστε να ικανοποιεί τις ανάγκες του πλοίου.

Τέλος γίνεται μια οικονομική μελέτη στην διάρκεια ζωής του πλοίου περιλαμβάνοντας ένα ρεαλιστικό οικονομικό σενάριο με σκοπό τον υπολογισμό του ελάχιστου απαιτούμενου ναύλου ώστε το πλοίο να είναι οικονομικά βιώσιμο.

1. Εισαγωγή

1.1. Πλοία Μεταφοράς ξηρού φορτίου χύδην

1.1.1. Γενικά

Σύμφωνα με τη Διεθνή Σύμβαση SOLAS 1999, τα πλοία μεταφοράς ξηρού φορτίου ορίζονται ως «πλοία με ένα κατάστρωμα, με δεξαμενές top side και hopper side στους χώρους του φορτίου, που προορίζονται κυρίως για τη μεταφορά ξηρού χύδην φορτίου». Το πρώτο εξειδικευμένο πλοίο τέτοιου είδους χτίστηκε το 1852, ωστόσο έχουν αυξηθεί σε μέγεθος και σε πολυπλοκότητα λόγω των αυξημένων απαιτήσεων του σύγχρονου κόσμου. Τα σημερινά πλοία μεταφοράς χύδην φορτίου σχεδιάζονται με σκοπό τη μεγιστοποίηση της μεταφορικής ικανότητας εξασφαλίζοντας παράλληλα την ασφάλεια της ζωής του πληρώματος, την ασφάλεια των εμπορευμάτων αλλά και την προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος. Επομένως, η μείωση εκπομπών αέριων ρύπων και η αυξημένη αντοχή των πλοίων αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες στην σχεδίαση τους. Τα πλοία μεταφοράς ξηρού φορτίου αποτελούν σήμερα το 40% του παγκόσμιου εμπορικού στόλου, με πρόσθετο βάρος που φτάνει μέχρι 400,000 metric tons.

Ανάλογα με την χωρητικότητα τους σε DWT χωρίζονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

Ship Type	DWT
Handy	– 40000
Handymax	40000 – 50000
Supramax	50000 – 60000
Panamax	60000 – 80000
Capesize	80000 – 200000
Very Large Bulk Carriers - Newcastlemax	200000 –

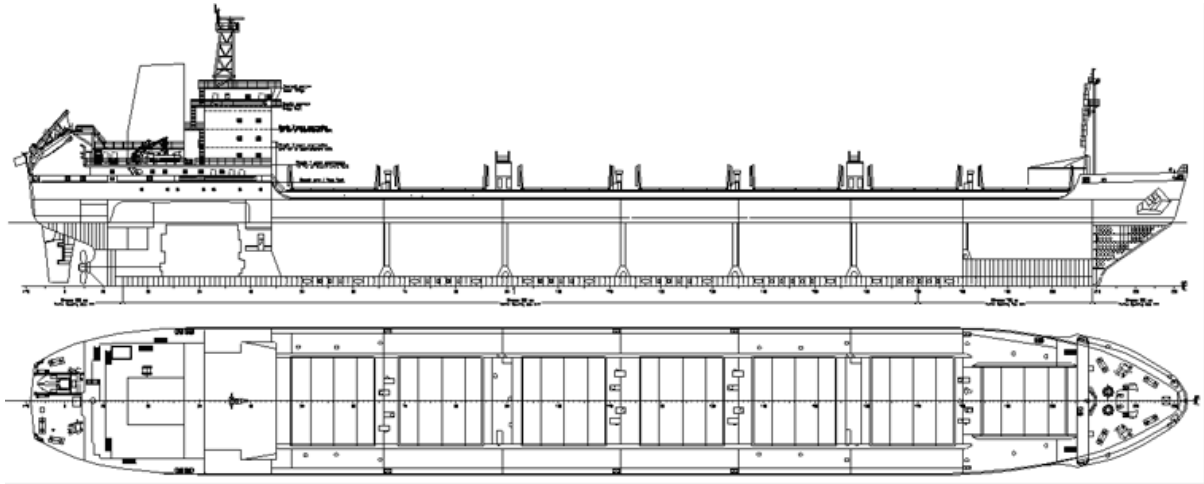
Πίνακας 1: Κατηγοριοποίηση Bulk Carriers με το DWT

Υπάρχουν bulk carriers με δικούς τους γεραμούς ώστε να μπορούν να ικανοποιούν αυτόνομα τις απαιτήσεις φορτοεκφόρτωσης (συνήθως τα μικρότερα σε μέγεθος πλοία), υπάρχουν ωστόσο και πλοία χωρίς αυτόνομους γεραμούς με αποτέλεσμα να συνεργάζονται μόνο με λιμάνια που διαθέτουν δικά τους φορτοεκφορτωτικά μέσα.

Το ξηρό φορτίο ταξινομείται είτε ως κύριο είτε ως δευτερεύον. Το κύριο αποτελεί τη συντριπτική πλειοψηφία κατά βάρος, και περιλαμβάνει, μεταξύ άλλων, σιδηρομέταλλευμα, άνθρακα (λιθάνθρακας, λιγνίτες, τύρφη) και σιτηρά (καλαμπόκι, κριθάρι, βρόμη, σίκαλη και το σόργο). Το δευτερεύον περιλαμβάνει προϊόντα όπως γεωργικά προϊόντα, ορυκτά (συμπεριλαμβανομένων των συμπυκνωμάτων μετάλλων), τσιμέντο, δασικά προϊόντα, προϊόντα σιδήρου και χάλυβα. Επίσης ένα bulk carrier μπορεί να μεταφέρει περισσότερα από ένα είδος φορτίου όπως για παράδειγμα την ταυτόχρονη μεταφορά μεταλλεύματος και χύδην φορτίου.

1.1.2. Διάταξη και Υπόβαθρο κανονισμών

Η γενική διάταξη ενός κοινού Bulk Carrier φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 1: Γενική διάταξη και κάτοψη - 23645 DWT ocean-going bulk carrier with ice category LU4 "Grumant" type

Τα κύρια τμήματα που χωρίζεται το πλοίο είναι τα εξής:

- Πρύμνηθεν της πρυμναίας φρακτής (L_{AFT}): ορίζεται η απόσταση από την πρυμναία κάθετο (A.P.) έως την πρυμναία φρακτή του μηχανοστασίου που συμπίπτει με την πρυμναία φρακτή σύγκρουσης.
- Χώρος μηχανοστασίου (L_{ER}): ορίζεται το τμήμα μεταξύ της πρυμναίας και πρωραίας φρακτής του μηχανοστασίου. Περιλαμβάνει την μηχανολογική εγκατάσταση του πλοίου συμπεριλαμβανομένης της κύριας μηχανής, των γεννητριών και των διάφορων βοηθητικών μηχανημάτων.
- Χώρος φορτίου (L_{CARGO}): ορίζεται ο χώρος μεταξύ της πρωραίας φρακτής μηχανοστασίου και της πρωραίας φρακτής σύγκρουσης του πλοίου. Στο χώρο αυτό βρίσκονται τα κύττη δηλαδή τα αμπάρια του πλοίου (Cargo Holds) που ορίζονται από εγκάρσιες φρακτές.
- Πρώραθεν της φρακτής σύγκρουσης (L_{FWD}): ορίζεται η απόσταση από την πρωραία φρακτή σύγκρουσης έως την πρωραία κάθετο (F.P.). Η θέση της πρωραίας φρακτής σύγκρουσης ορίζεται σύμφωνα με τον κανονισμό της SOLAS ως εξής:

$$\min \left\{ \begin{array}{l} 5\%L_{BP} \\ 10 \text{ m} \end{array} \right. \leq d \leq \max \left\{ \begin{array}{l} 8\%L_{BP} \\ 5\%L_{BP} + 3 \text{ m} \end{array} \right.$$

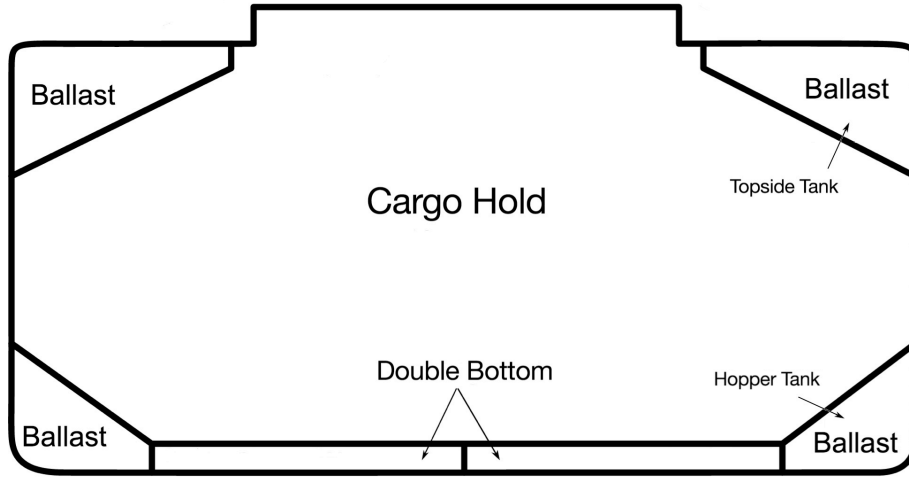
όπου d , σε πλοία χωρίς βολβό, είναι η απόσταση της φρακτής από την πρωραία κάθετο, ενώ σε πλοία με βολβό η απόσταση από το σημείο a που ορίζεται από τους κανονισμούς ως:

$$a = \min \left\{ \begin{array}{l} \text{Μέσο του βολβού} \left(\frac{L_{BULB}}{2} \right) \\ 1.5\%L_{BP} \text{ πρώραθεν της F.P.} \\ 3 \text{ m πρώραθεν της F.P.} \end{array} \right.$$

Από τους κανονισμούς των νηογνωμόνων ορίζεται ότι κάθε πλοίο πρέπει να έχει κατ' ελάχιστον μία πρωραία φράκτη σύγκρουσης (Collision Bulkhead), μια πρυμναία φρακτή σύγκρουσης (After Peak Bulkhead) και από μια φρακτή στο πρυμναίο και πρωραίο όριο του μηχανοστασίου (πρυμναία και

πρωραία φρακτή μηχανοστασίου). Στις περιπτώσεις που εξετάζουμε όπου το μηχανοστάσιο βρίσκεται πρύμνηθεν, η πρυμναία φρακτή σύγκρουσης συμπίπτει με την πρυμναία φρακτή του μηχανοστασίου.

Παρακάτω φαίνεται μια τυπική εγκάρσια τομή (Midship Section) στο χώρο φορτίου ενός Bulk Carrier:



Σχήμα 2: Τυπική μέση τομή πλοίου Bulk Carrier

Τον χώρο του διπύθμενου τον χρησιμοποιούσαν αρχικώς για την αποθήκευση έρματος (ballast water) ή καυσίμων. Ωστόσο, από το 2007 και έπειτα περιορίστηκε αποκλειστικά η χρησιμότητα του για θαλάσσιο έρμα. Σημειώνεται επίσης ότι ορισμένα bulk carriers διαθέτουν επιπροσθέτως διπλά τοιχώματα (double side). Τέλος πρέπει να σημειωθεί ότι η μελέτη κατασκευής και αντοχής των Bulk Carriers βασίζεται στους διεθνείς κανονισμούς CSR (Common Structural Rules).

Το ύψος διπύθμενου h_{DB} (Double Bottom) στην περίπτωση μας καθορίζεται από τον εκάστοτε νηογνώμονα για παράδειγμα:

$$H_{DB} \geq 32 * B + 190 * \sqrt{T} \text{ (ABS)}$$

$$H_{DB} \geq \min \{28 * B + 205 * \sqrt{T}, 650mm\} \text{ (LLOYDS)}$$

$$H_{DB} \geq \min \{250 + 20 * B + 50 * T, 650mm\} \text{ (DNV)}$$

Πιο λεπτομερή στοιχεία σχεδιασμού και υπολογισμού των κύριων στοιχείων των Bulk Carriers θα παρουσιαστούν στη συνέχεια της παρούσας εργασίας.

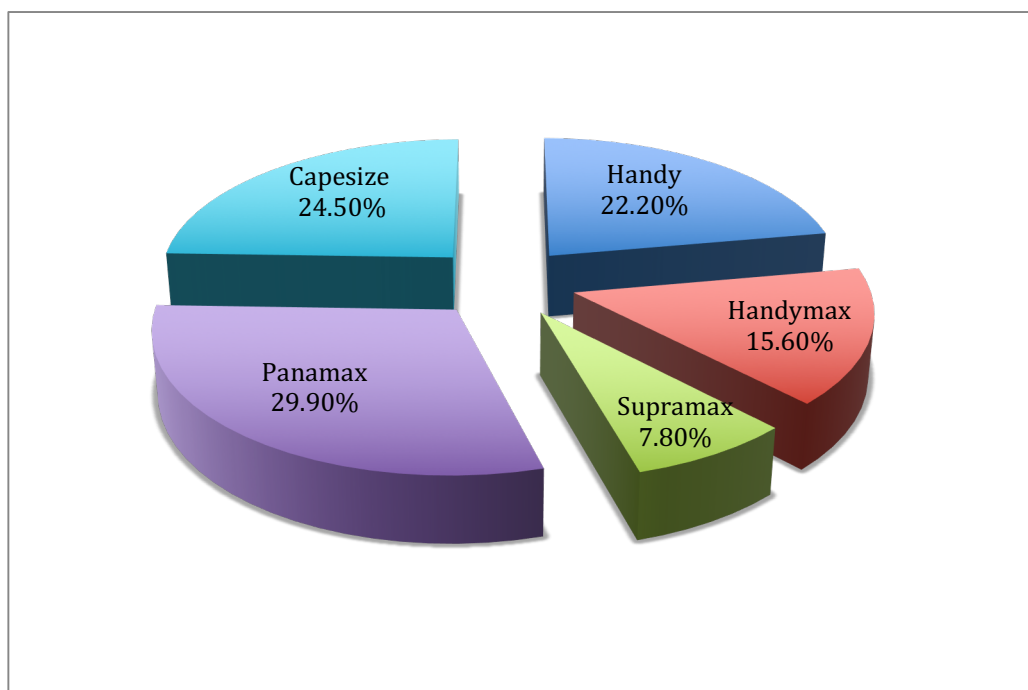
1.2. Βάση δεδομένων

Η δημιουργία της βάσης δεδομένων έγινε συγκεντρώνοντας στοιχεία πλοίων τόσο από τα διαθέσιμα σχέδια του εργαστηρίου Μελέτης Πλοίου ΕΜΠ όσο και από την συνεισφορά σχεδίων από ναυτιλιακές εταιρείες. Τα στοιχεία που συγκεντρώθηκαν μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

- Στοιχεία πλοίου (όνομα, αριθμός IMO, τύπος, νηογνώμονας, σημαία, αριθμό πληρώματος)
- Κύρια χαρακτηριστικά πλοίου (κύριες διαστάσεις, εκτόπισμα, DWT, Lightship, GT, NT, Suez Canal Net Tonnage, ύψος εξάλων, αριθμός αμπαριών, μήκος και πλάτος καλυμμάτων στομίων κυτών)

- Διάφορα χαρακτηριστικά σχεδίασης (Double Bottom, Double Hull, μήκος βολβού, κυρτότητα, σιμότητα, μήκος πρυμναίου τμήματος, μήκος μηχανοστασίου, μήκος χώρου φορτίου, μήκος πρωραίου τμήματος, frame spacing)
- Χωρητικότητα όλων των δεξαμενών (Cargo tanks, Ballast, FW, Fuel, Diesel, Lube Oil tanks)
- Όλα τα κέντρα βάρους και τα υδροστατικά μεγέθη στις καταστάσεις φόρτωσης Full Load Departure, Full Load Arrival, Light Ballast Arrival, Heavy Ballast Arrival, Full Load Departure Scantling
- Διαστάσεις υπερκατασκευών (Μήκος, Πλάτος και Ύψος υπερκατασκευών, Μήκος και Ύψος πρόστεγου)
- Στοιχεία πρόωσης (τύπος, ισχύς και στροφές κύριας μηχανής, ταχύτητα, διάμετρος έλικας, διαστάσεις πηδαλίου, μήκος ελικοφόρου άξονα)
- Βοηθητικά μηχανήματα (Γεννήτριες, αντλίες, thrusters, γερανοί)

Συνολικά συλλέξαμε δεδομένα για 90 πλοία από όλες τις κατηγορίες τα οποία κατανέμονται στο δείγμα μας ως εξής:



Σχήμα 3: Κατανομή πλοίων της βάσης δεδομένων με βάση το μέγεθος

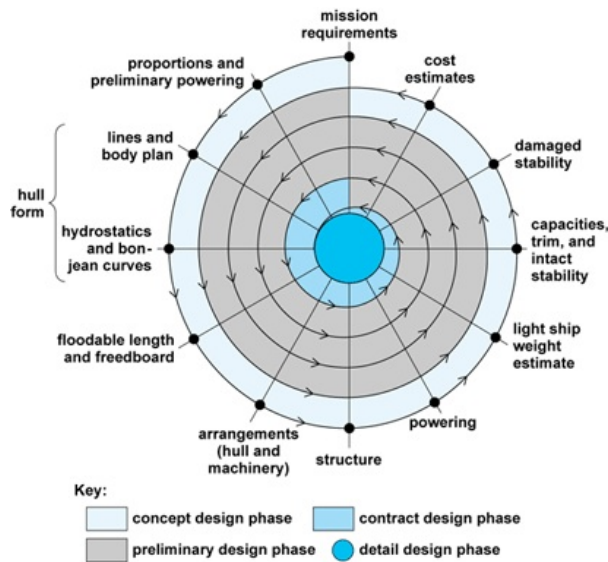
1.3. Μελέτη Πλοίου

Η μελέτη πλοίου μπορεί να διαχωριστεί σε 4 βασικές φάσεις ως ακολούθως:

1. Μελέτη εφικτότητας ή αρχικού σχεδιασμού (Concept Design – Feasibility Study)
2. Προμελέτη (Preliminary Design)
3. Συμβατική μελέτη ή μελέτη προδιαγραφών συμβολαίου (Contract Design)
4. Μελέτη λεπτομερούς σχεδιασμού (Detailed Design)

Η προμελέτη του πλοίου (στην οποία συχνά συγχωνεύονται οι φάσεις 1 και 2) είναι το στάδιο εκείνο κατά το οποίο, με βάση τις απαιτήσεις του ενδιαφερόμενου πλοιοκτήτη ή τις προδιαγραφές αποστολής του πλοίου, καθορίζονται κατά τον βέλτιστο δυνατό τρόπο τα κύρια τεχνικά και οικονομικά χαρακτηριστικά του πλοίου και ιδιαίτερα αυτά που επηρεάζουν σημαντικά το κόστος ναυπήγησης και οικονομικής εκμετάλλευσής του. Η προμελέτη περιλαμβάνει την εκλογή των κύριων

διαστάσεων του σκάφους, τον προσδιορισμό του σχήματος της γάστρας, του τύπου και της ισχύς της προωστήριου εγκατάστασης, της γενικής διάταξης και του μεγέθους των κύριων και βοηθητικών χώρων (χώροι κυτών, μηχανοστάσιο, ενδιάιτηση), των μέσων χειρισμού του φορτίου, των κύριων στοιχείων της μεταλλικής κατασκευής για την εγκάρσια και διαμήκη αντοχή, τον έλεγχο της ευστάθειας και της διαγωγής, του ύψους εξάλων καθώς και της Γραμμής φόρτωσης. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι η μελέτη του πλοίου είναι μια επαναληπτική διαδικασία προσδιορισμού των διαφόρων στοιχείων της κατασκευής με σκοπό την βαθμιαία προσέγγιση της τελικής φάσης της μελέτης του πλοίου.



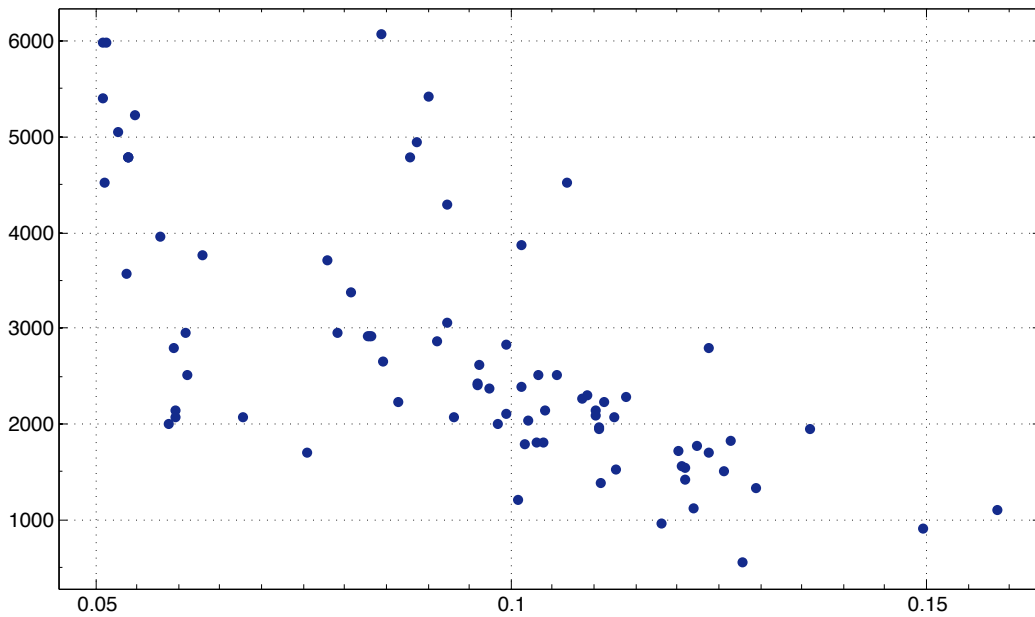
Σχήμα 4: Ελικοειδής Καμπύλη Μελέτης πλοίου [J.H. Evans 1959]

1.4. Στατιστική ανάλυση

Στα στάδια της προμελέτης του πλοίου, η χρήση εμπειρικών τύπων είναι πολύ συχνή προκειμένου να μπορέσει να γίνει η πρώτη εκτίμηση των διαφόρων βασικών μεγεθών. Αυτοί οι εμπειρικοί τύποι είναι προϊόν στατιστικής ανάλυσης μεγάλου πλήθους δεδομένων και προκύπτουν από την προσπάθεια συσχέτισης αυτών με καλή προσέγγιση.

1.4.1. Διάγραμμα Διασποράς (Scatter Diagram)

Έχοντας συλλέξει τα επιθυμητά δεδομένα μπορούμε να κατασκευάσουμε το γράφημα με τα σημεία στο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων δηλαδή το σύνολο των σημείων (x_i, y_i) , $i=1, \dots, n$. Αυτό το διάγραμμα που περιέχει μόνο διακριτά σημεία ονομάζεται διάγραμμα διασποράς.



Διάγραμμα 1: Ευδεικτικό διάγραμμα Διασποράς

1.4.2. Προσεγγιστικές Καμπύλες

Έχοντας κατασκευάσει το διάγραμμα διασποράς είναι συχνά δυνατό να βρεθεί μια ομαλή καμπύλη που να προσεγγίζει σε καλό βαθμό τα δεδομένα. Αυτή η καμπύλη ονομάζεται προσεγγιστική καμπύλη (Approximating Curve) και η διαδικασία αυτή ονομάζεται Curve Fitting. Για τον υπολογισμό αυτών των καμπυλών χρησιμοποιήθηκε το Matlab R2014a και πιο συγκεκριμένα το εργαλείο Curve Fitting Tool το οποίο περιέχει τυποποιημένες εξισώσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως συναρτήσεις μιας μεταβλητής. Οι μαθηματικοί τύποι των εξισώσεων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία είναι οι ακόλουθοι:

Linear model Poly1: $f(x) = p1*x + p2$

Linear model Poly2: $f(x) = p1*x^2 + p2*x + p3$

Linear model Poly3: $f(x) = p1*x^3 + p2*x^2 + p3*x + p4$

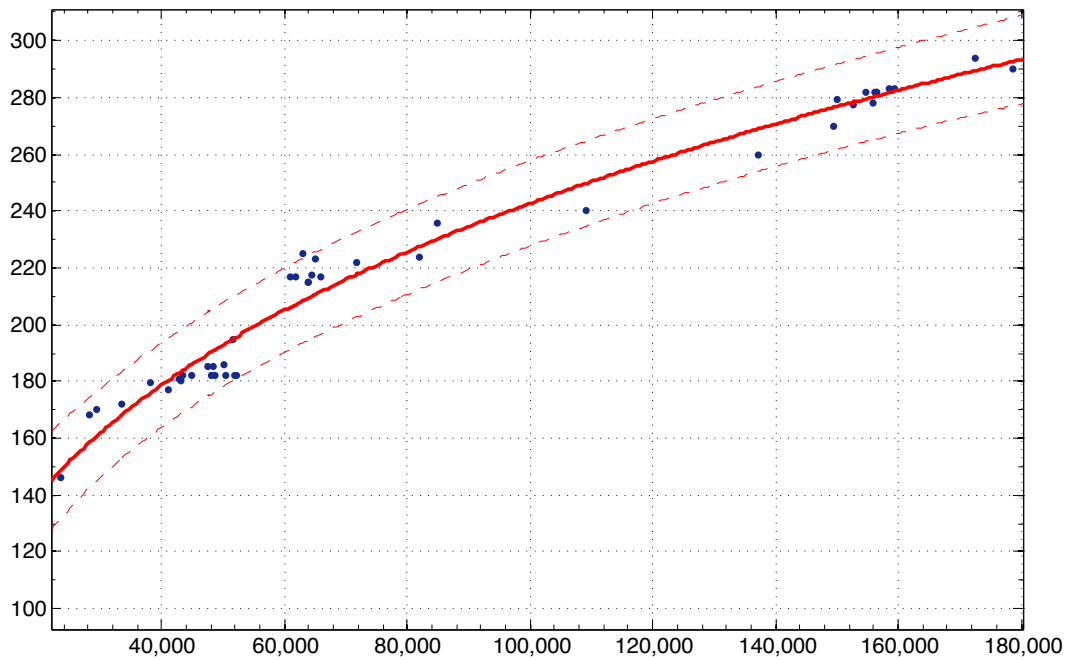
General model Power1: $f(x) = a*x^b$

General model Power2: $f(x) = a*x^b+c$

General model Log1: $f(x) = a*\ln(x)+b$

General model Exp1: $f(x) = a*\exp(b*x)$

Σημειώνεται ότι το Matlab διαθέτει περισσότερες και πιο περίπλοκες συναρτήσεις καθώς επίσης δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να επιλέξει κάποια νέα εξίσωση (Custom Equation). Στα πλαίσια όμως της προμελέτης του πλοίου, αναζητούμε καμπύλες που να προσεγγίζουν με καλή ακρίβεια τα σημεία αλλά ταυτόχρονα να μην έχουν μεγάλο βαθμό περιπλοκότητας.



Διάγραμμα 2: Ενδεικτική προσεγγιστική καμπύλη

Επίσης εκτός από τις προσεγγιστικές καμπύλες υπάρχει η δυνατότητα να εισάγουμε δύο επιπλέον καμπύλες σαν όρια που ορίζουν το επίπεδο βεβαιότητας (Boundary Curves). Οι καμπύλες αυτές δείχνουν τις περιοχές στο διάγραμμα στις οποίες μπορεί μια νέα παρατήρηση να εμφανιστεί με πιθανότητα 95%.

1.4.3. Μέθοδος Ελαχίστων Τετραγώνων

Έχοντας ένα διάγραμμα διασποράς μπορούμε να σχεδιάσουμε πολλές προσεγγιστικές καμπύλες οι οποίες μπορούν να διαφέρουν μεταξύ τους ως προς την ποιότητα προσέγγισης. Η διαδικασία με την οποία το Matlab επιλέγει την βέλτιστη καμπύλη (Best – Fitting Curve) είναι η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων (Nonlinear Least Squares).

Έχοντας το διάγραμμα διασποράς με τα σημεία (X_1, Y_1) , $(X_2, Y_2), \dots, (X_n, Y_n)$, για μια δεδομένη τιμή X_i θα υπάρχει μια διαφορά μεταξύ της τιμής Y_i και της τιμής που δίνεται από την καμπύλη $f(X_i)$. Αυτή η διαφορά ονομάζεται απόκλιση ή σφάλμα ή υπόλοιπο (Deviation, Error, Residual) και ορίζεται ως $d_i = y_i - f(x_i)$.

Το άθροισμα των τετραγώνων των d_i ονομάζεται SSE (Sum of Squares due to Error).

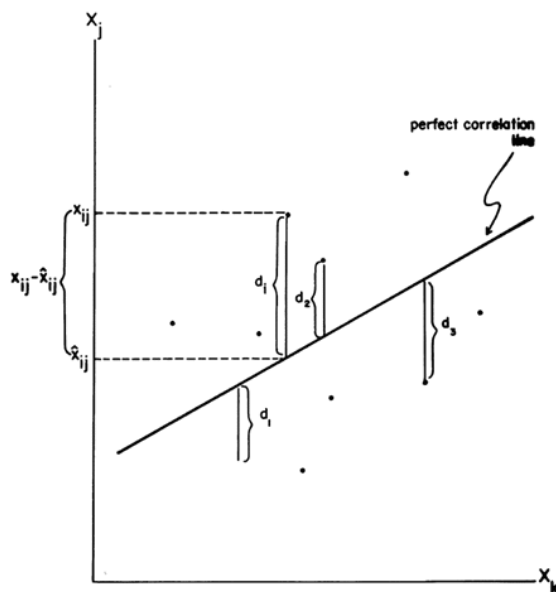
$$SSE = d_1^2 + d_2^2 + \dots + d_n^2 = \sum_{i=1}^n d_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2$$

Απ' όλες τις προσεγγιστικές καμπύλες, η βέλτιστη είναι αυτή με την μικρότερη τιμή του εν λόγω αθροίσματος SSE και ονομάζεται least squares curve.

1.4.4. Παλινδρόμηση (Regression)

Η μέθοδος με την οποία γίνεται εκτίμηση μιας μεταβλητής Y που αντιστοιχεί σε μια δεδομένη τιμή X ονομάζεται παλινδρόμηση και γίνεται μέσω της καμπύλης ελαχίστων τετραγώνων (Regression)

Curve). Αξίζει να σημειωθεί πως γενικά, η καμπύλη τάσης του x επί του y είναι διαφορετική από την καμπύλη τάσης του y επί του x .



Διάγραμμα 3: Ορισμός της απόκλισης (deviation)

1.4.5. Θεωρία Συσχέτισης (Correlation Theory)

Ο βαθμός της σχέσης μεταξύ των μεταβλητών μέσω της προσεγγιστικής εξίσωσης ονομάζεται συσχέτιση. Η συσχέτιση μπορεί να αναφέρεται σε δύο μόνο μεταβλητές (απλή συσχέτιση) ή σε περισσότερες (πολλαπλή συσχέτιση). Δύο μεταβλητές είναι τέλεια συσχετισμένες μεταξύ τους εάν όλες οι τιμές τους ικανοποιούν με ακρίβεια την εξίσωση παλινδρόμησης.

Η συσχέτιση αποτελεί βασικό μέγεθος αξιολόγησης σε όλη την ανάλυση που πραγματοποιείται στην παρούσα εργασία.

Συντελεστής Συσχέτισης

Το άθροισμα των τετραγώνων των αποκλίσεων των τιμών του y από το μέσο όρο \bar{y} αναφέρεται σαν SST (Total Sum of Squares) και είναι:

$$SST = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$$

Το άθροισμα των τετραγώνων των αποκλίσεων των τιμών της παλινδρόμησης $f(x_i)$ από το μέσο όρο \bar{y} αναφέρεται ως SSR (Sum of Squares due to Regression) και είναι:

$$SSR = \sum_{i=1}^n (f(x_i) - \bar{y})^2$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω θα ισχύει:

$$SST = SSE + SSR \rightarrow \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2 + \sum_{i=1}^n (f(x_i) - \bar{y})^2$$

Ο συντελεστής προσδιορισμού (Determination Coefficient) R^2 (R-square) χρησιμοποιείται για να δείξει ποιο ποσοστό της συνολικής διακύμανσης στα δεδομένα γύρω από το μέσο όρο «εξηγεί» η προσέγγιση.

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} \rightarrow R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

Η τιμή του R^2 μεταβάλλεται μεταξύ 0 και 1. Όσο πιο κοντά στο 1 βρίσκεται το R^2 τόσο καλύτερη είναι η προσέγγιση. Π.χ. $R^2=0.935$ σημαίνει ότι η προσέγγιση «εξηγεί» το 93.5% της συνολικής διακύμανσης στα δεδομένα γύρω από το μέσο όρο.

Η ποσότητα R ονομάζεται συντελεστής συσχέτισης (Correlation Coefficient) που υπολογίζεται από:

$$R = \sqrt{\frac{SSR}{SST}} = \sqrt{1 - \frac{SSE}{SST}} \rightarrow R = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

Πρέπει να τονιστεί ότι ο συντελεστής συσχέτισης R μετράει το βαθμό της συσχέτισης αναφορικά με τον τύπο της εξίσωσης της αρχικής υπόθεσης/θεώρησης, μετράει δηλαδή το πόσο καλά προσεγγίζει η υποτιθέμενη εξίσωση τα δεδομένα. Επίσης, πρέπει να επισημανθεί ότι μεγάλη τιμή συντελεστή συσχέτισης δεν συνεπάγεται αναγκαστικά ότι οι μεταβλητές έχουν κάποια εξάρτηση.

Τυπικό Σφάλμα (Standard Error)

Το τυπικό σφάλμα εκτίμησης μετράει τη διασπορά των τιμών που παρατηρήθηκαν γύρω από τη γραμμή παλινδρόμησης. Αναφέρεται σαν RMSE (Root Mean Squared Error) και δίνεται από τον τύπο:

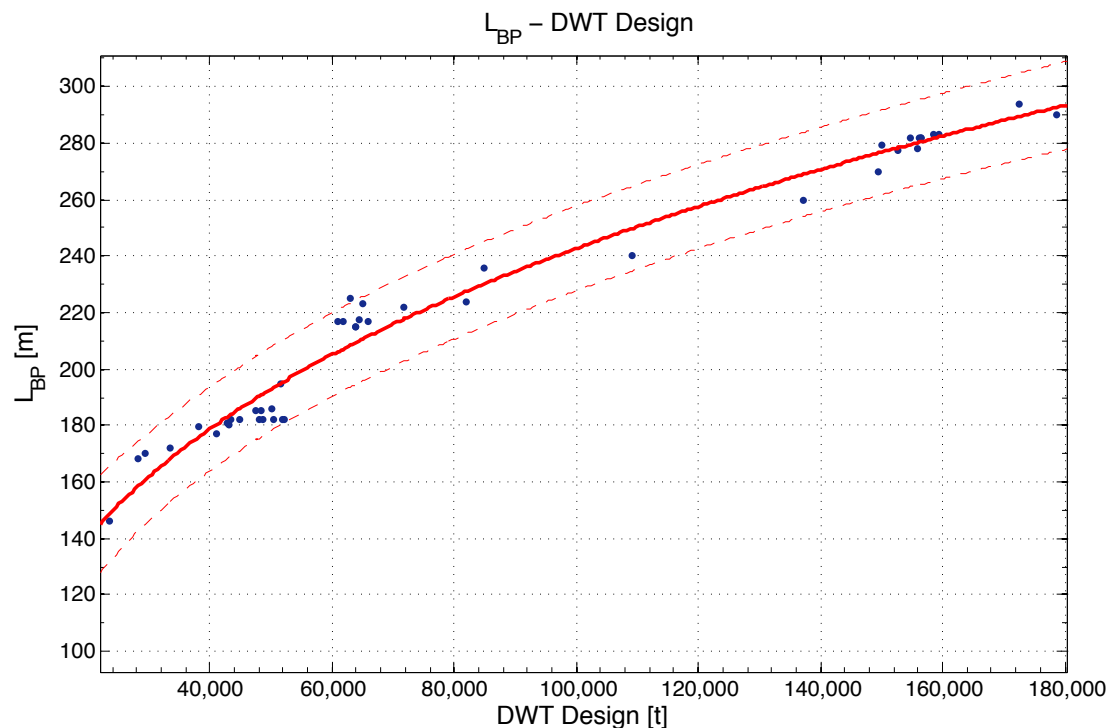
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2}{n}}$$

2. Εκτίμηση στοιχείων Bulk Carriers

Χρησιμοποιώντας την βάση δεδομένων που δημιουργήσαμε, αναλύσαμε τα δεδομένα με την χρήση του Matlab R2014a και του εργαλείου Curve Fitting Tool και προσπαθήσαμε να βρούμε συσχετίσεις μεταξύ των βασικών μεγεθών. Σημειώνεται ότι λόγω του μεγάλου αριθμού διαγραμμάτων που παράχθηκαν, τα διαγράμματα που δεν μας έδωσαν κάποια σημαντική πληροφορία δεν παρουσιάζονται στην έκθεση.

2.1. Κύριες Διαστάσεις

2.1.1. Μήκος μεταξύ καθέτων (L_{BP})



Διάγραμμα 4: L_{BP} συναρτήσει DWT Design

General model Power2:

$$f(x) = a * x^b + c$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 10.94 \quad (-24.95, 46.83)$$

$$b = 0.2819 \quad (0.06105, 0.5027)$$

$$c = -37.98 \quad (-243.3, 167.4)$$

Goodness of fit:

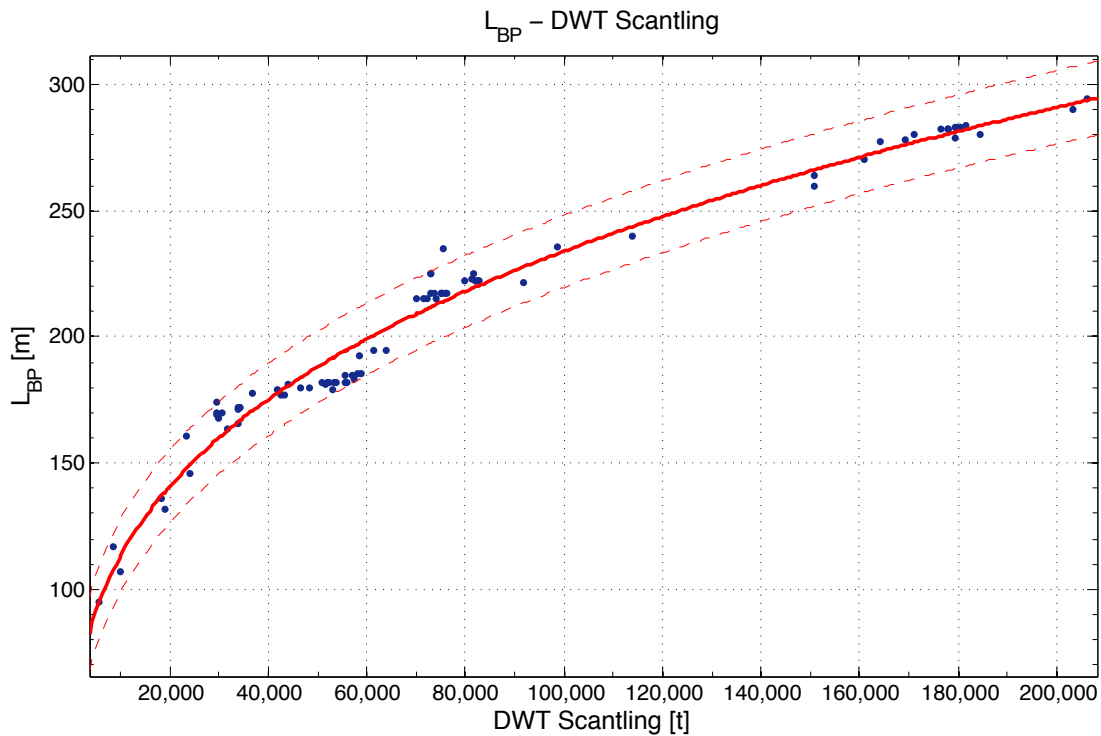
SSE: 2130

R-square: 0.9742

Adjusted R-square: 0.973

RMSE: 7.208

$$L_{BP} = 10.94 * DWT_{Design}^{0.2819} - 37.98$$



Διάγραμμα 5: L_{BP} συναρτήσει DWT Scantling

General model Power1:

$$f(x) = a \cdot x^b$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 6.231 \quad (5.445, 7.018)$$

$$b = 0.3149 \quad (0.3038, 0.326)$$

Goodness of fit:

SSE: 4213

R-square: 0.9765

Adjusted R-square: 0.9763

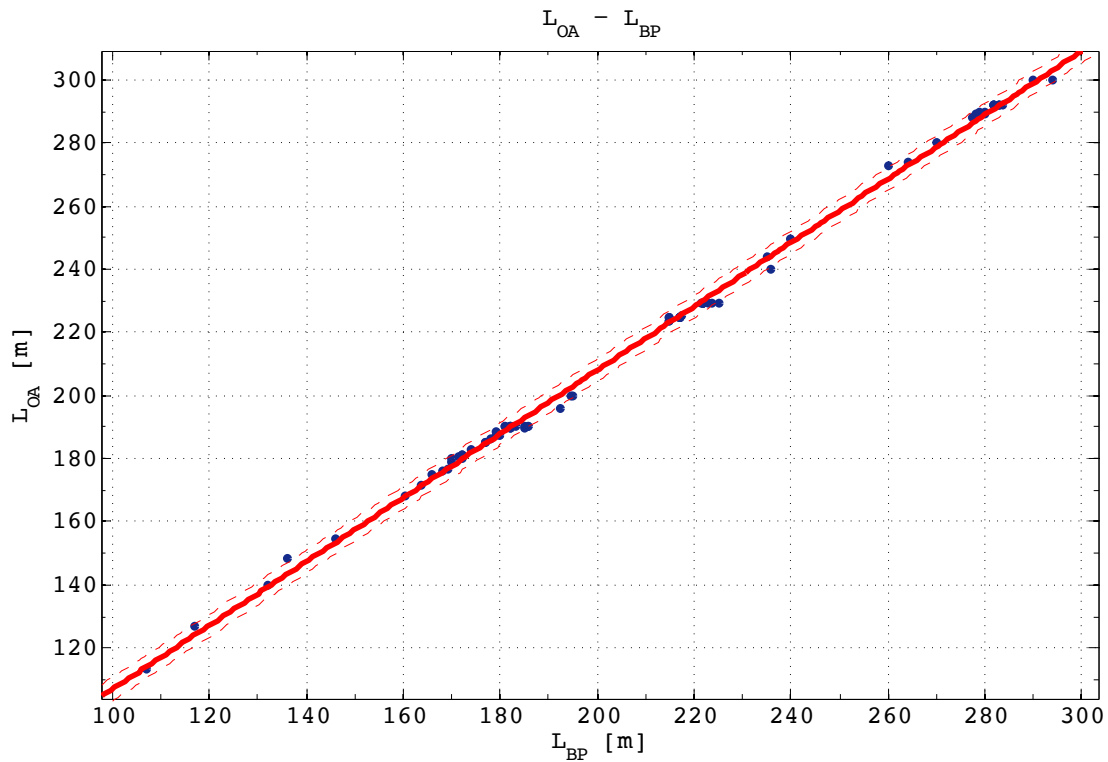
RMSE: 7.124

$$L_{BP} = 6.231 * DWT_{Scantling}^{0.3149}$$

Παρατηρήσεις:

Παρατηρούμε ότι η συσχέτιση μεταξύ του L_{BP} και του DWT είναι πολύ καλή γεγονός που περιμέναμε καθώς αλλαγή στο μήκος του πλοίου επιφέρει ανάλογες αλλαγές τόσο στο κοίλο όσο και στο πλάτος του. Παρατηρούμε ότι η μέγιστη απόκλιση από την καμπύλη τάσης είναι της τάξης των 15m, με μόνο ένα σημείο εκτός των ορίων. Η διασπορά των σημείων στα Handymax πλοία με μέγιστο μήκος τα 190m οφείλεται σε περιορισμούς πολλών σταθμών εκφόρτωσης όπως για παράδειγμα στην Ιαπωνία. Σημειώνεται ότι το διάγραμμα με το DWT Scantling παρουσιάζει ελαφρώς καλύτερη συσχέτιση γεγονός που ίσως οφείλεται στα περισσότερα σημεία του δείγματος.

2.1.2. Ολικό Μήκος (L_{OA})



Διάγραμμα 6: L_{OA} συναρτήσει L_{BP}

Linear model Poly1:

$$f(x) = p1 * x + p2$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 1.011 (1.002, 1.019)$$

$$p2 = 5.9 (4.058, 7.742)$$

Goodness of fit:

SSE: 252.3

R-square: 0.9985

Adjusted R-square: 0.9985

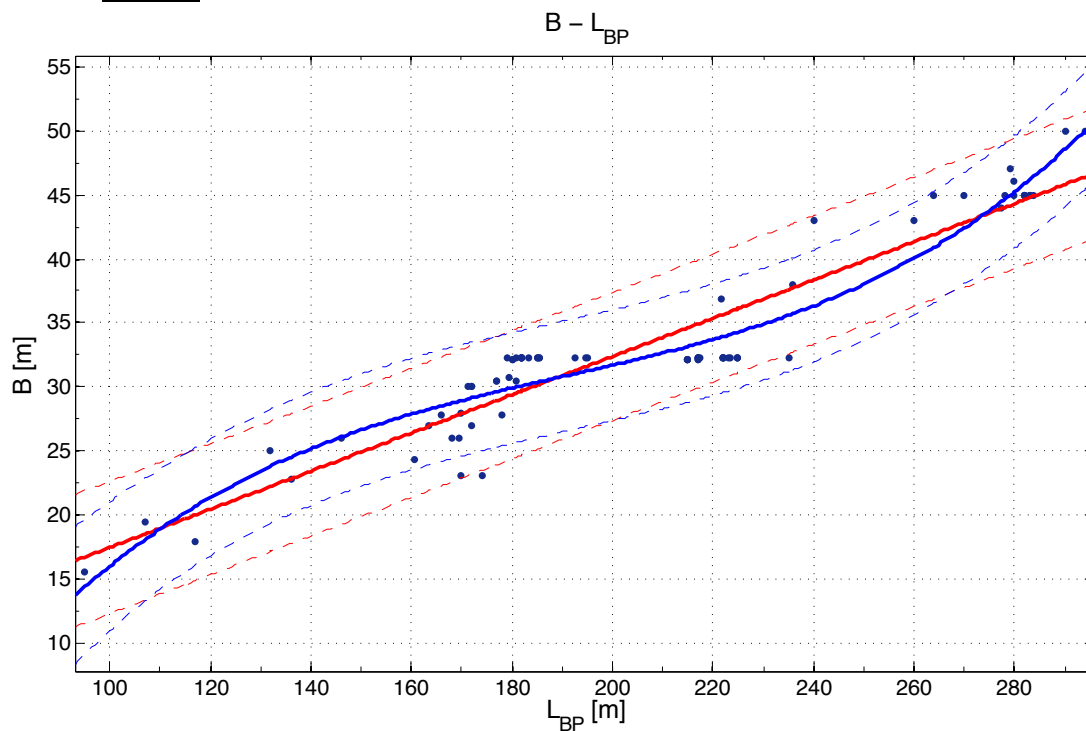
RMSE: 1.765

$$L_{OA} = 1.011 * L_{BP} + 5.9$$

Παρατηρήσεις:

Η προσεγγιστική ευθεία στην προκειμένη περίπτωση αποτελεί μια από τις καλύτερες προσεγγίσεις που παρατηρήθηκαν καθώς το L_{OA} έχει σχεδόν απόλυτη συσχέτιση με το L_{BP} .

2.1.3. Πλάτος



Διάγραμμα 7: B συναρτήσει L_{BP}

Linear model Poly3:

$$f(x) = p1 * x^3 + p2 * x^2 + p3 * x + p4$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$\begin{aligned} p1 &= 9.091e-06 \quad (5.516e-06, 1.267e-05) \\ p2 &= -0.005205 \quad (-0.007347, -0.003062) \\ p3 &= 1.082 \quad (0.6706, 1.493) \\ p4 &= -49.24 \quad (-74.67, -23.82) \end{aligned}$$

Goodness of fit:

$$\text{SSE: } 378.5 \quad \text{R-square: } 0.9164 \quad \text{Adjusted R-square: } 0.9133 \quad \text{RMSE: } 2.149$$

$$B = 9.091 * 10^{-6} * L_{BP}^3 - 0.005205 * L_{BP}^2 + 1.082 * L_{BP} - 49.24$$

Linear model Poly1:

$$f(x) = p1 * x + p2$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$\begin{aligned} p1 &= 0.1492 \quad (0.1374, 0.1609) \\ p2 &= 2.552 \quad (0.05141, 5.053) \end{aligned}$$

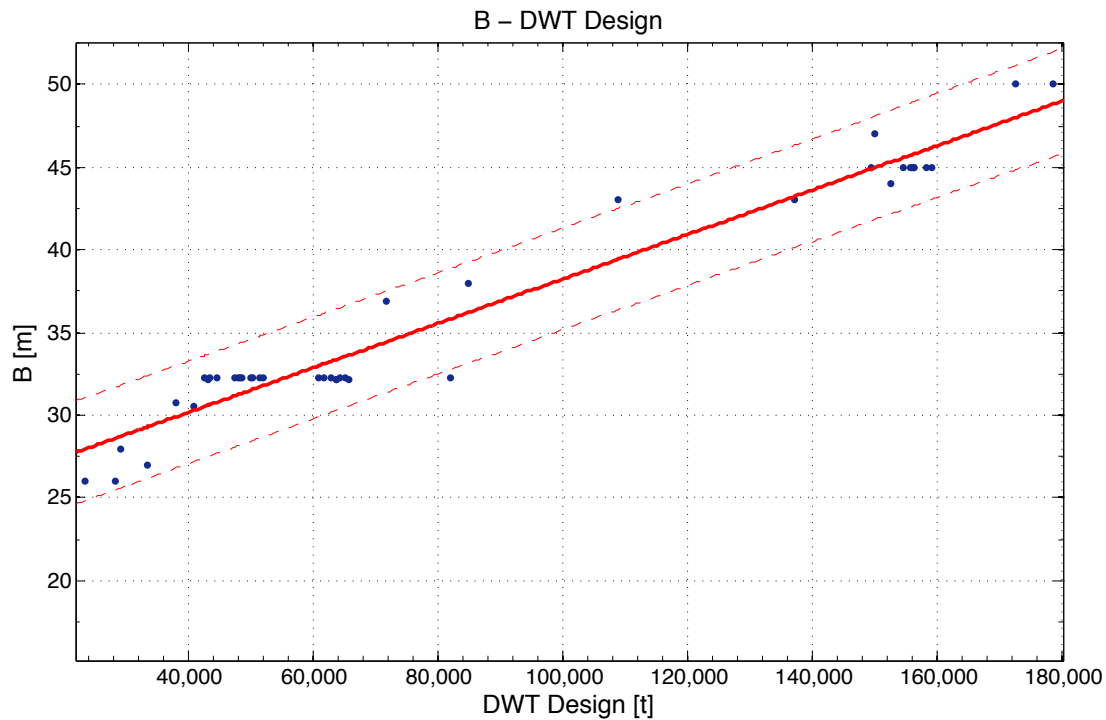
Goodness of fit:

$$\text{SSE: } 525.4 \quad \text{R-square: } 0.8839 \quad \text{Adjusted R-square: } 0.8826 \quad \text{RMSE: } 2.501$$

$$B = 0.1492 * L_{BP} + 2.552$$

Παρατηρήσεις:

Για την σχέση του πλάτους B με το μήκος L_{BP} βρήκαμε σχετικά καλή συσχέτιση τόσο με τη χρήση εξίσωσης ευθείας όσο και με τη χρήση πολυωνύμου 2^{ου} βαθμού. Παρ' όλα αυτά εμφανίζονται μεγάλες αυξομειώσεις της τάξης των 5 μέτρων. Το πολυώνυμο έχει υψηλότερο R^2 και προσεγγίζει πολύ καλύτερα το πλάτος στο εύρος 280-300m του μήκους, ωστόσο προκύπτει πιο περίπλοκη εξίσωση από την ευθεία. Τέλος, σημειώνεται η μεγάλη διασπορά των σημείων στα πλοία με σταθερό πλάτος 32.2m (Panamax) που εξηγείται από το γεγονός ότι προκειμένου να επιτευχθεί το απαιτούμενο εύρος του DWT για τα πλοία τύπου Panamax δηλαδή 60,000-80,000 DWT πρέπει να αυξομειωθεί το μήκος.



Διάγραμμα 8: B συναρτήσει DWT Design

Linear model Poly1:

$$f(x) = p1 * x + p2$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.0001344 \quad (0.0001252, 0.0001437)$$

$$p2 = 24.79 \quad (23.89, 25.69)$$

Goodness of fit:

SSE: 94.59

R-square: 0.9536

Adjusted R-square: 0.9525

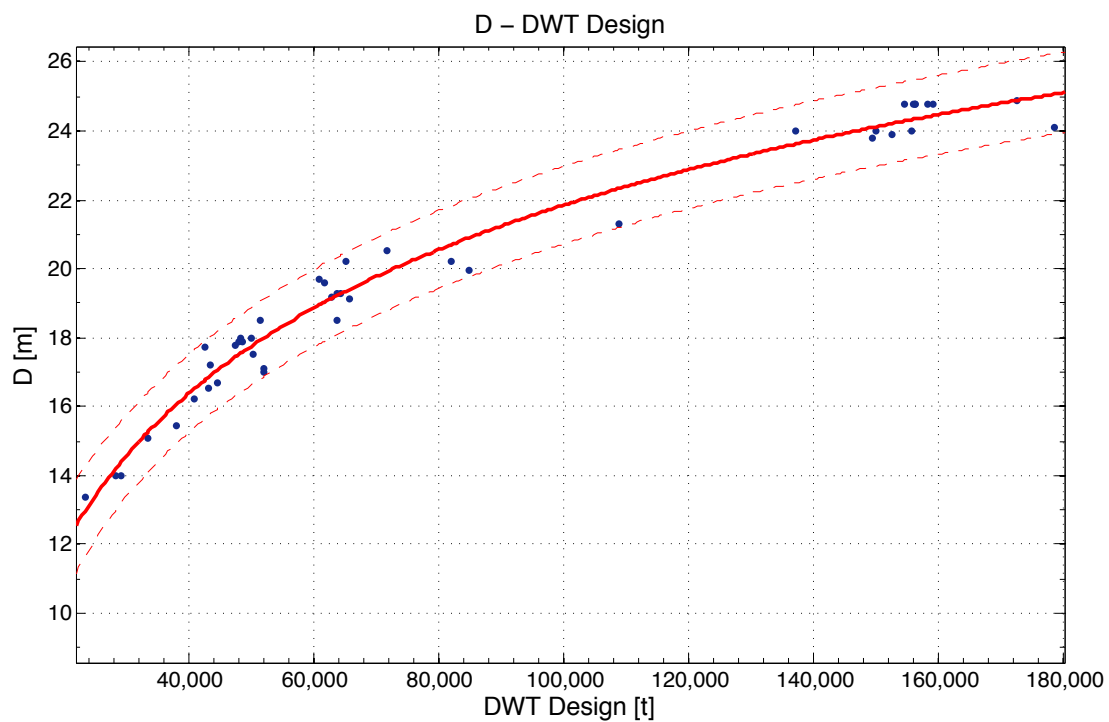
RMSE: 1.501

$$B = 0.0001344 * DWT_{Design} + 24.79$$

Παρατηρήσεις:

Όπως και με το μήκος L , η ποιότητα συσχέτισης του πλάτους B με το DWT Design είναι αρκετά καλή αλλά με σημαντικές αποκλίσεις για τον ίδιο λόγο που εξηγήθηκε στο αντίστοιχο διάγραμμα του μήκους.

2.1.4. Κοίλο (D)



Διάγραμμα 9: D συναρτήσει DWT Design

General model Power2:

$$f(x) = a \cdot x^b + c$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = -179.4 \quad (-196, -162.8)$$

$$b = -0.09269 \quad (-0.2782, 0.09277)$$

$$c = 83.55 \quad (-43.25, 210.4)$$

Goodness of fit:

SSE: 12.22

R-square: 0.9765

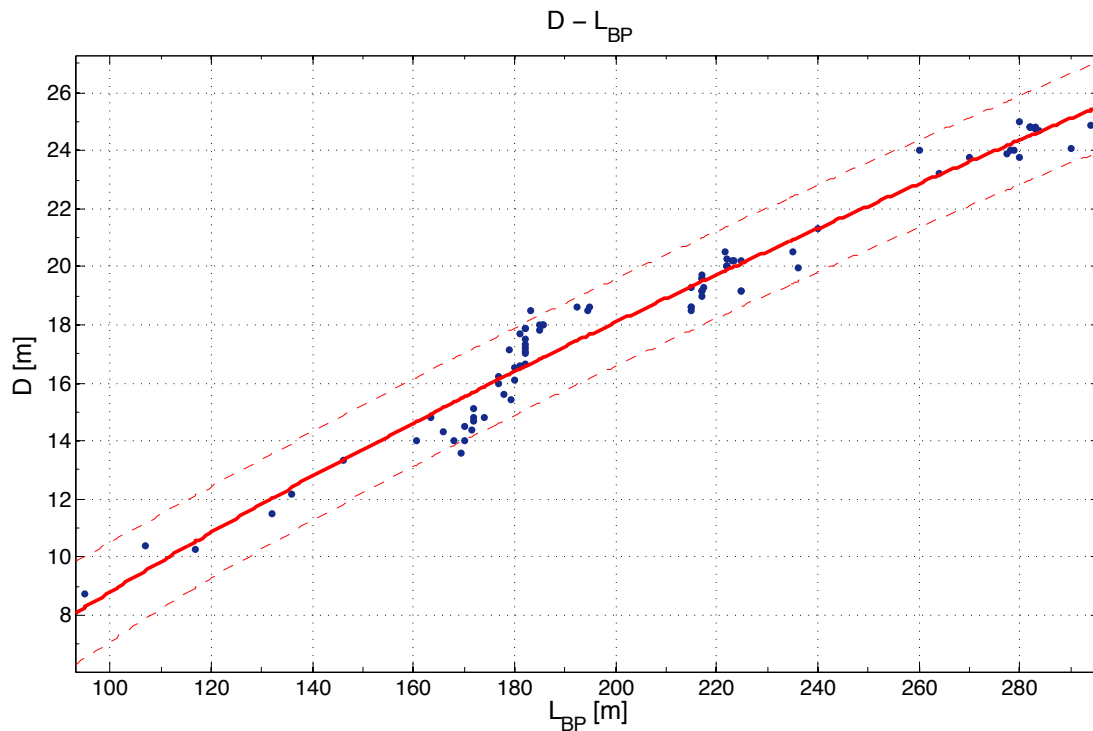
Adjusted R-square: 0.9754

RMSE: 0.5459

$$D = -179.4 * DWT_{Design}^{-0.09269} + 83.55$$

Παρατηρήσεις:

Όμοια και με τα υπόλοιπα διαγράμματα L_{BP} -DWT και B-DWT, έτσι και η συσχέτιση του κοίλου D με το DWT παρουσιάζει εξίσου καλή συσχέτιση, με αποκλίσεις της τάξης του 1 μέτρου και παρουσιάζει οριακά καλύτερη συσχέτιση από το διάγραμμα του πλάτους.



Διάγραμμα 10: D συναρτήσει L_{BP}

General model Power2:

$$f(x) = a \cdot x^b + c$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.7853 \quad (-0.6469, 2.218)$$

$$b = 0.6563 \quad (0.3895, 0.9231)$$

$$c = -7.328 \quad (-17.69, 3.032)$$

Goodness of fit:

SSE: 46.53

R-square: 0.9636

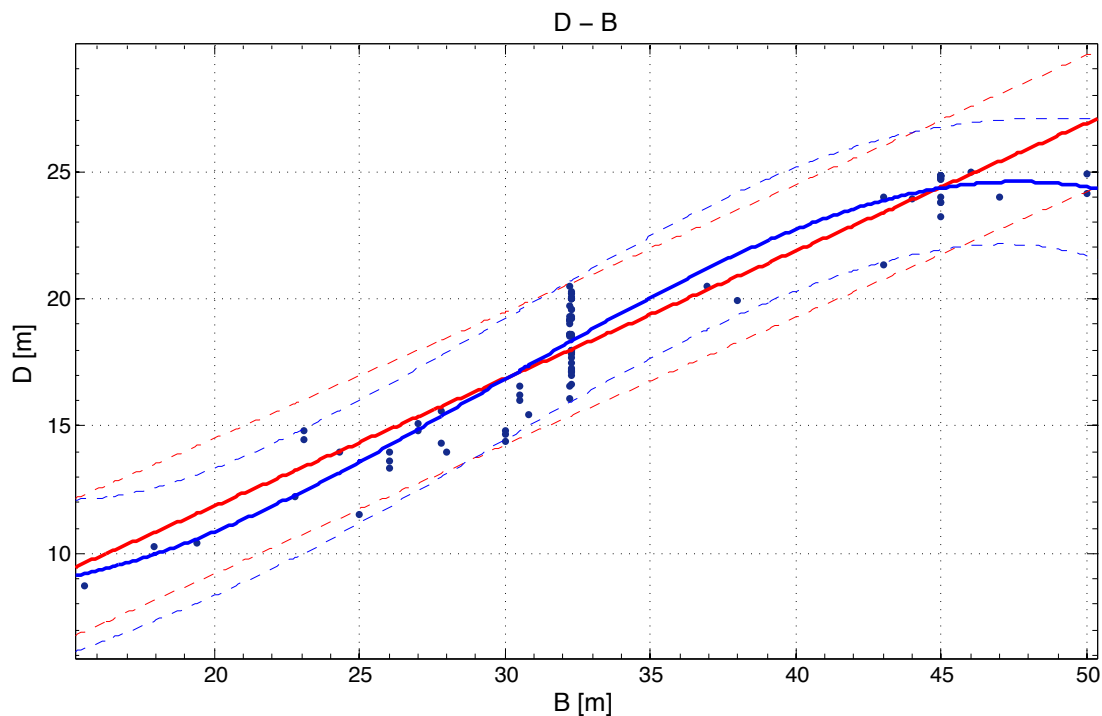
Adjusted R-square: 0.9627

RMSE: 0.7487

$$D = 0.7853 \cdot L_{BP}^{0.6563} - 7.328$$

Παρατηρήσεις:

Στο διάγραμμα αυτό βλέπουμε ότι η συσχέτιση είναι λίγο χειρότερη σε σχέση με το προηγούμενο διάγραμμα με το σφάλμα στις τιμές του κοίλου να είναι μεγαλύτερες απ' ό,τι στο διάγραμμα D-DWT. Παρ' όλα αυτά δίνει πολύ χρήσιμες πληροφορίες στον σχεδιαστή καθώς ο λόγος L_{BP}/D σε συνδυασμό με τον λόγο L_{BP}/B παίζουν σημαντικό ρόλο στην διαμήκη αντοχή του πλοίου καθώς για υψηλές τιμές αυτών, το πρόβλημα ανάγεται στην θεώρηση του πλοίου ως καμπτόμενη δοκός και χρήζει ιδιαίτερης εξέτασης.



Διάγραμμα 11: D συναρτήσει B

Linear model Poly3:

$$f(x) = p_1 * x^3 + p_2 * x^2 + p_3 * x + p_4$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$\begin{aligned} p_1 &= -0.0006855 \quad (-0.001151, -0.0002199) \\ p_2 &= 0.06111 \quad (0.01534, 0.1069) \\ p_3 &= -1.153 \quad (-2.589, 0.2835) \\ p_4 &= 14.93 \quad (0.4673, 29.39) \end{aligned}$$

Goodness of fit:

$$\text{SSE: } 120.8 \quad \text{R-square: } 0.9106 \quad \text{Adjusted R-square: } 0.9075 \quad \text{RMSE: } 1.185$$

$$D = -0.0006855 * B^3 + 0.06111 * B^2 - 1.153 * B + 14.93$$

Exei kai Linear model Poly1:

$$f(x) = p_1 * x + p_2$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$\begin{aligned} p_1 &= 0.5013 \quad (0.464, 0.5387) \\ p_2 &= 1.824 \quad (0.5297, 3.118) \end{aligned}$$

Goodness of fit:

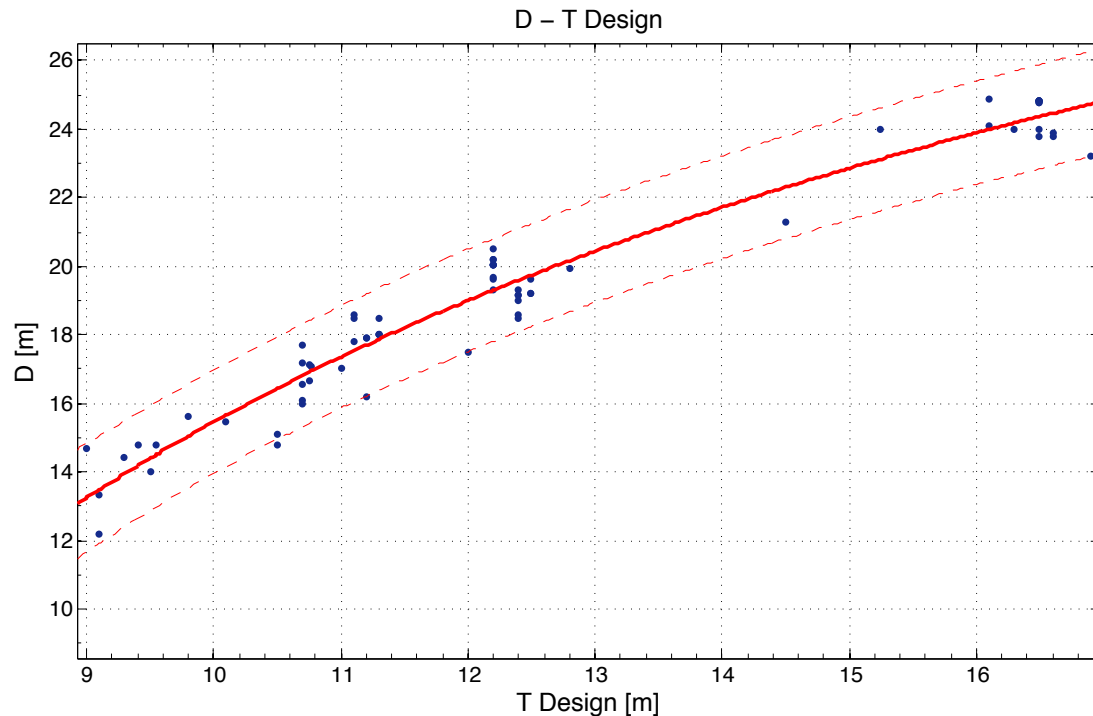
$$\text{SSE: } 149 \quad \text{R-square: } 0.8898 \quad \text{Adjusted R-square: } 0.8885 \quad \text{RMSE: } 1.301$$

$$D = 0.5013 * B + 1.824$$

Παρατηρήσεις:

Στο συγκεκριμένο διάγραμμα θεωρήθηκε απαραίτητο η δημιουργία 2 προσεγγιστικών καμπυλών παρά την μικρή διαφορά τους στο R^2 . Η πολυωνυμική καμπύλη 2^{ου} βαθμού είναι σαν εξίσωση πιο περίπλοκη από την ευθεία αλλά παρατηρούμε ότι προσεγγίζει καλύτερα τα σημεία τόσο στα μικρά

πλάτη όσο και στα μεγαλύτερα και πιο συγκεκριμένα για πλάτος B=50m. Αξίζει να σημειωθεί η μεγάλη διαφοροποίηση των σημείων για σταθερό πλάτος B=32.2m (Panamax) και για B=45m (Suezmax) καθώς και ότι η εξίσωση ευθείας πραγματοποιεί υπερεκτίμηση σχεδόν για όλα τα σημεία του διαγράμματος αν εξαιρεθεί η μεγάλη διασπορά αυτών στο πλάτος B=32.2m. Παρατηρείται επίσης ότι για πλοία με πλάτος άνω των 45m, το κοίλο σταματάει να αυξάνεται με άνω όριο τα 25m.



Διάγραμμα 12: D συναρτήσει T Design

General model Power2:

$$f(x) = a \cdot x^b + c$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$\begin{aligned} a &= -132.6 \quad (-189.2, -75.92) \\ b &= -0.5641 \quad (-1.127, -0.001765) \\ c &= 51.63 \quad (19.98, 83.28) \end{aligned}$$

Goodness of fit:

SSE: 36.64

R-square: 0.954

Adjusted R-square: 0.9526

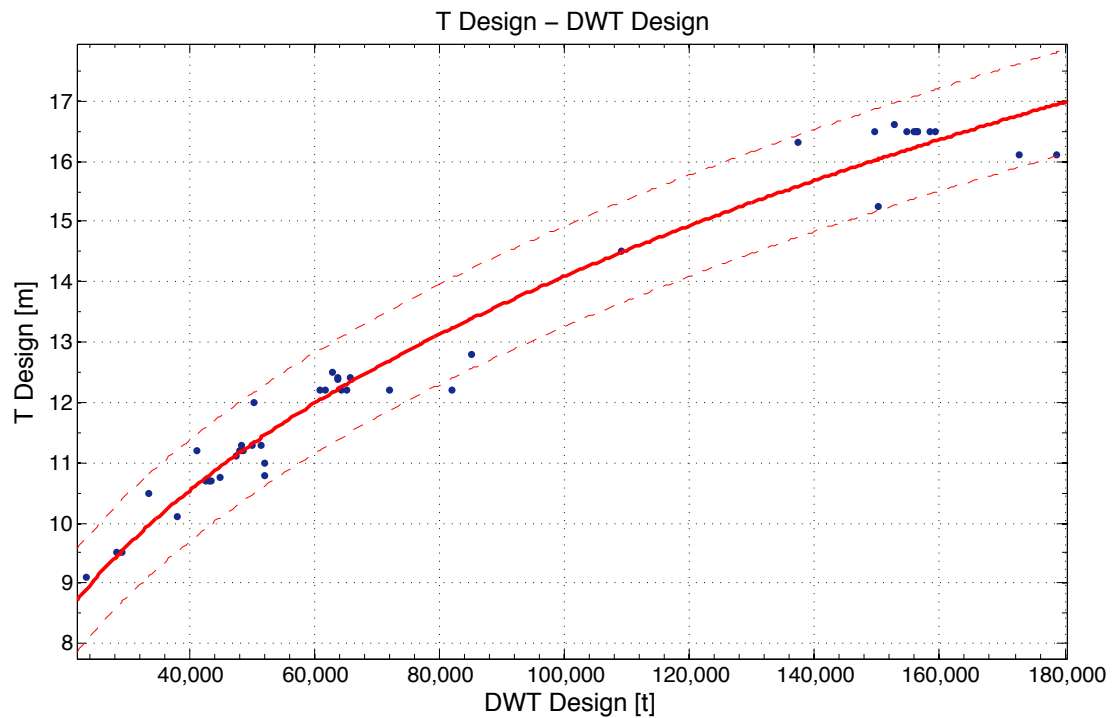
RMSE: 0.7395

$$D = -132.6 * T_{Design}^{-0.5641} + 51.63$$

Παρατηρήσεις:

Το διάγραμμα D-T βλέπουμε ότι δίνει μια αρκετά καλή συσχέτιση ανάμεσα στα δύο μεγέθη με περιθώριο λάθους 1.5 μέτρο στο κοίλο και μπορεί να δώσει στον σχεδιαστή τα όρια διακύμανσης του κοίλου που μπορεί να επιλέξει, αν γνωρίζει εξαρχής κάποιον περιορισμό στο βύθισμα του προς κατασκευή πλοίου.

2.1.5. Βύθισμα Σχεδίασης (T_{design})



Διάγραμμα 13: T Design συναρτήσει DWT Design

General model Power1:

$$f(x) = a \cdot x^b$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.3645 \quad (0.296, 0.4329)$$

$$b = 0.3175 \quad (0.301, 0.3339)$$

Goodness of fit:

SSE: 7.012

R-square: 0.973

Adjusted R-square: 0.9724

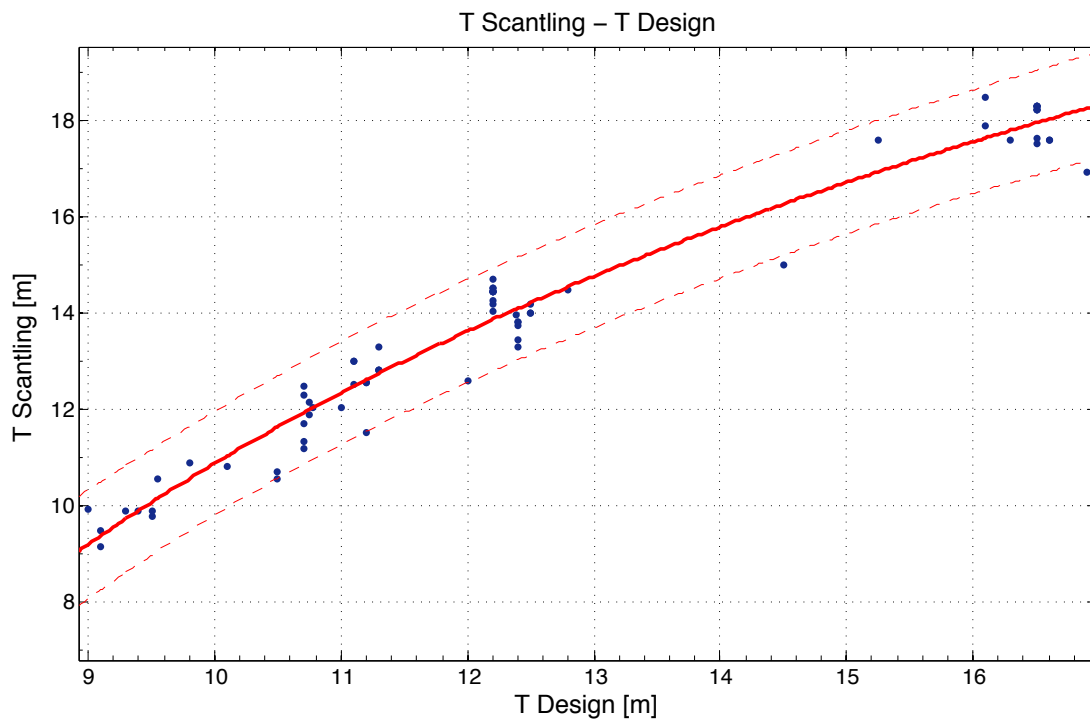
RMSE: 0.4086

$$T_{Design} = 0.3645 * DWT_{Design}^{0.3175}$$

Παρατηρήσεις:

Το βύθισμα σχεδίασης μπορεί να προσεγγιστεί με αρκετή ακρίβεια από το DWT έχοντας μέγιστη απόκλιση 1 μέτρου. Αξίζει να παρατηρηθεί ότι υπάρχουν πολλά σημεία στο εύρος 60.000-80.000 DWT (Panamax) που έχουν σταθερό βύθισμα 12.2-12.3m λόγω του περιορισμού βυθίσματος που έχει η διώρυγα του Παναμά.

2.1.6. Βύθισμα αντοχής ($T_{scantling}$)



Διάγραμμα 14: $T_{scantling}$ συναρτήσει T_{Design}

General model Power2:

$$f(x) = a \cdot x^b + c$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = -97.82 \quad (-105.5, -90.11)$$

$$b = -0.4151 \quad (-0.9262, 0.09611)$$

$$c = 48.5 \quad (6.461, 90.54)$$

Goodness of fit:

SSE: 18.66

R-square: 0.9623

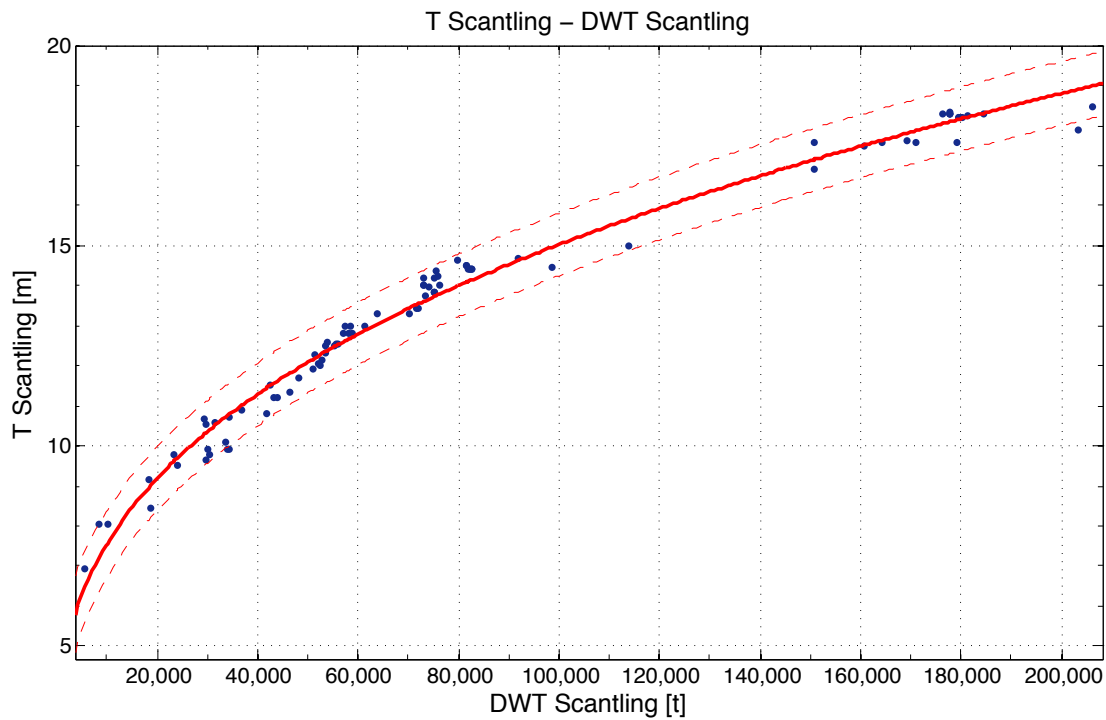
Adjusted R-square: 0.9612

RMSE: 0.5278

$$T_{Scant} = -97.82 \cdot T_{Design}^{-0.4151} + 48.5$$

Παρατηρήσεις:

Η εκτίμηση του βυθίσματος αντοχής ($T_{scantling}$) από το βύθισμα σχεδίασης παρουσιάζει καλή ακρίβεια με μέγιστη απόκλιση της τάξης του 1m. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ενδιαφέρον παρατήρηση αποτελεί η διασπορά των σημείων στα βυθίσματα σχεδίασης 12.2-12.3m λόγω του περιορισμού της διώρυγας του Παναμά.



Διάγραμμα 15: T Scantling συναρτήσει DWT Scantling

General model Power2:

$$f(x) = a \cdot x^b + c$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.206 \quad (0.03201, 0.38)$$

$$b = 0.3617 \quad (0.3011, 0.4223)$$

$$c = 1.78 \quad (-0.1463, 3.705)$$

Goodness of fit:

SSE: 13.04

R-square: 0.9832

Adjusted R-square: 0.9828

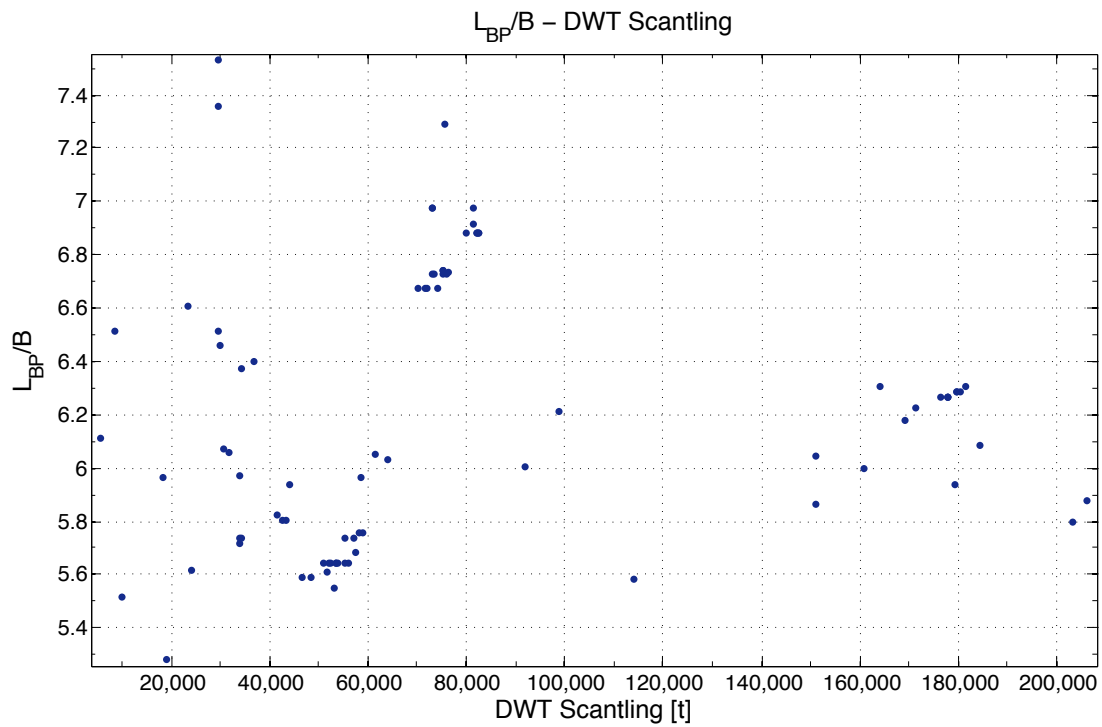
RMSE: 0.3895

$$T_{Scantling} = 0.206 * DWT_{Scantling}^{0.3617} + 1.78$$

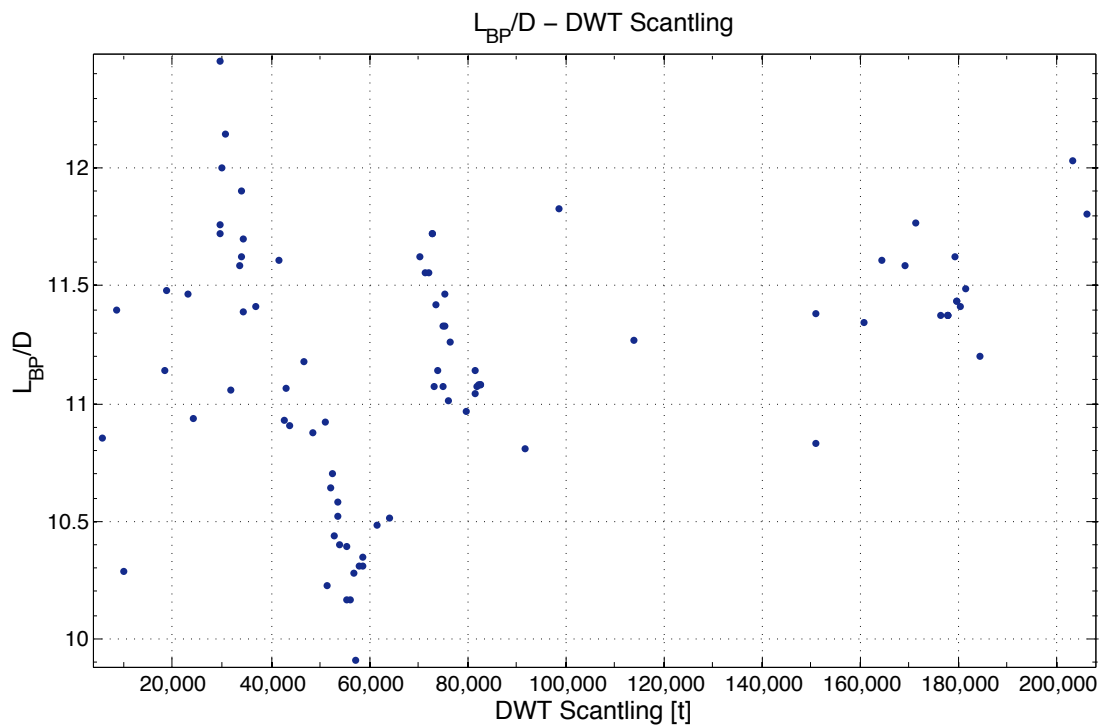
Παρατηρήσεις:

Στο παραπάνω διάγραμμα το βύθισμα αντοχής παρουσιάζει εξαιρετική συσχέτιση με το DWT Scantling έχοντας αποκλίσεις της τάξης του 0,5m αποτελώντας τον πιο αξιόπιστο τρόπο υπολογισμού του βυθίσματος.

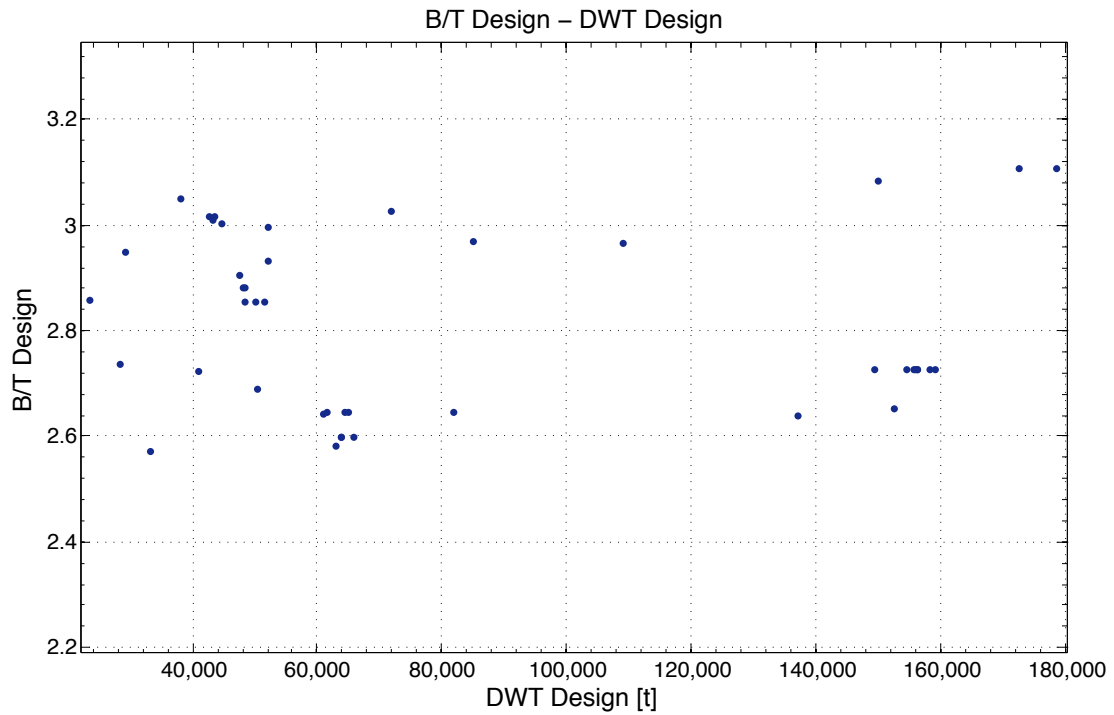
2.1.7. Λόγοι κύριων διαστάσεων



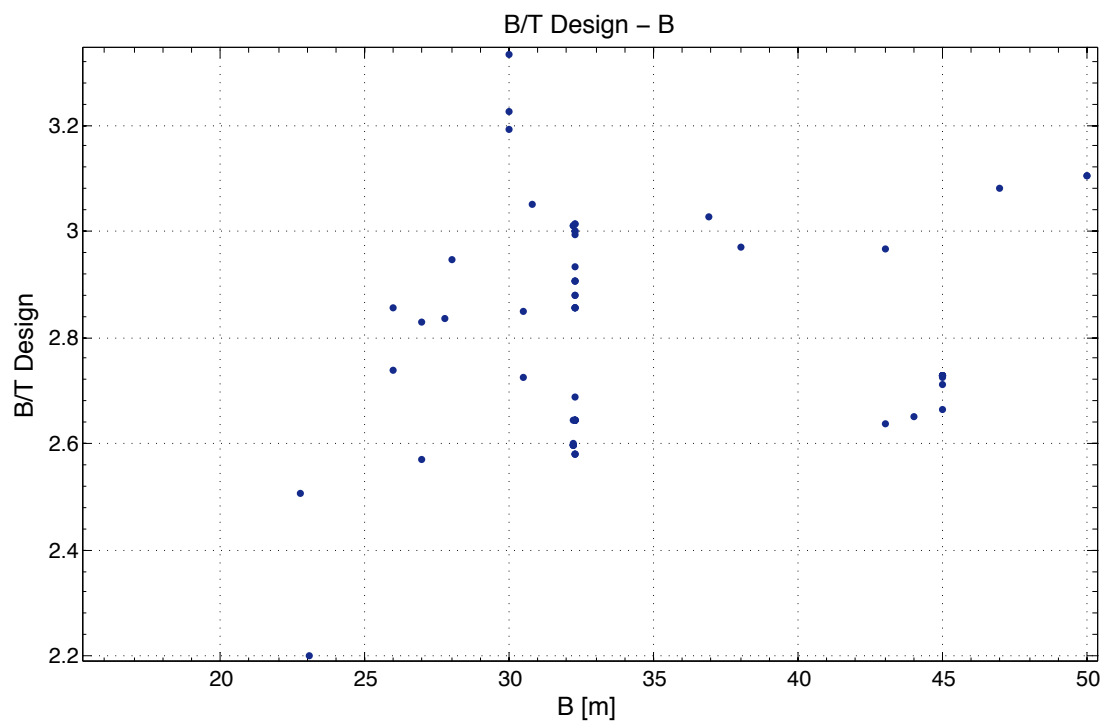
Διάγραμμα 16: L_{BP}/B συναρτήσει DWT Scantling



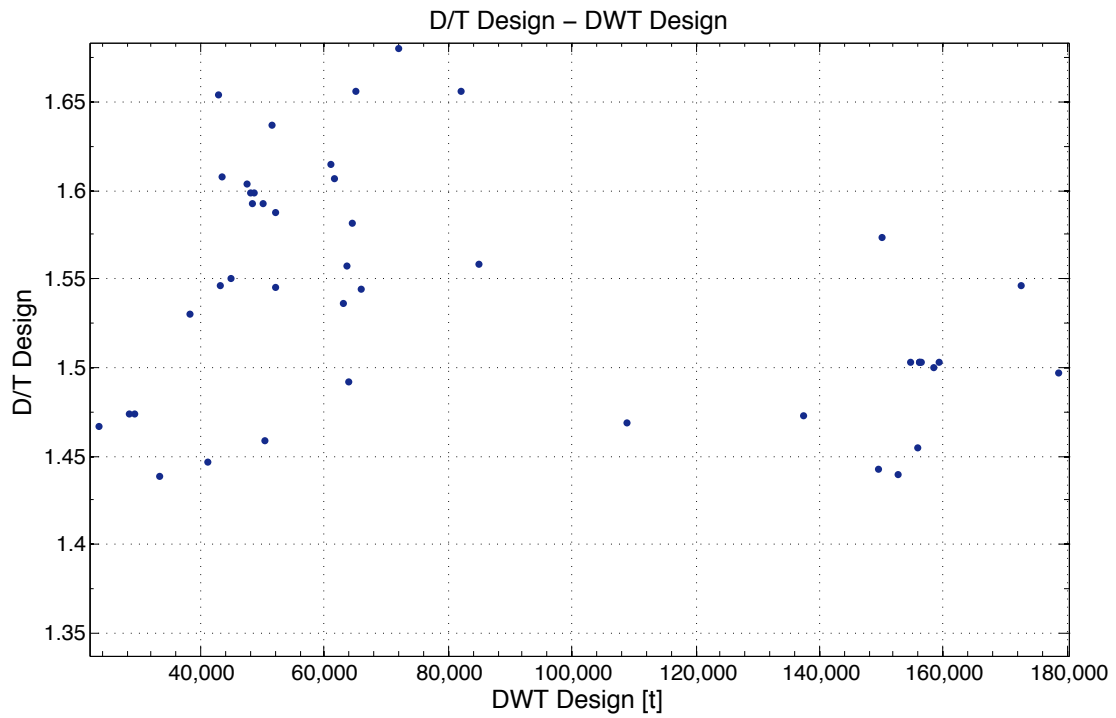
Διάγραμμα 17: L_{BP}/D συναρτήσει DWT Scantling



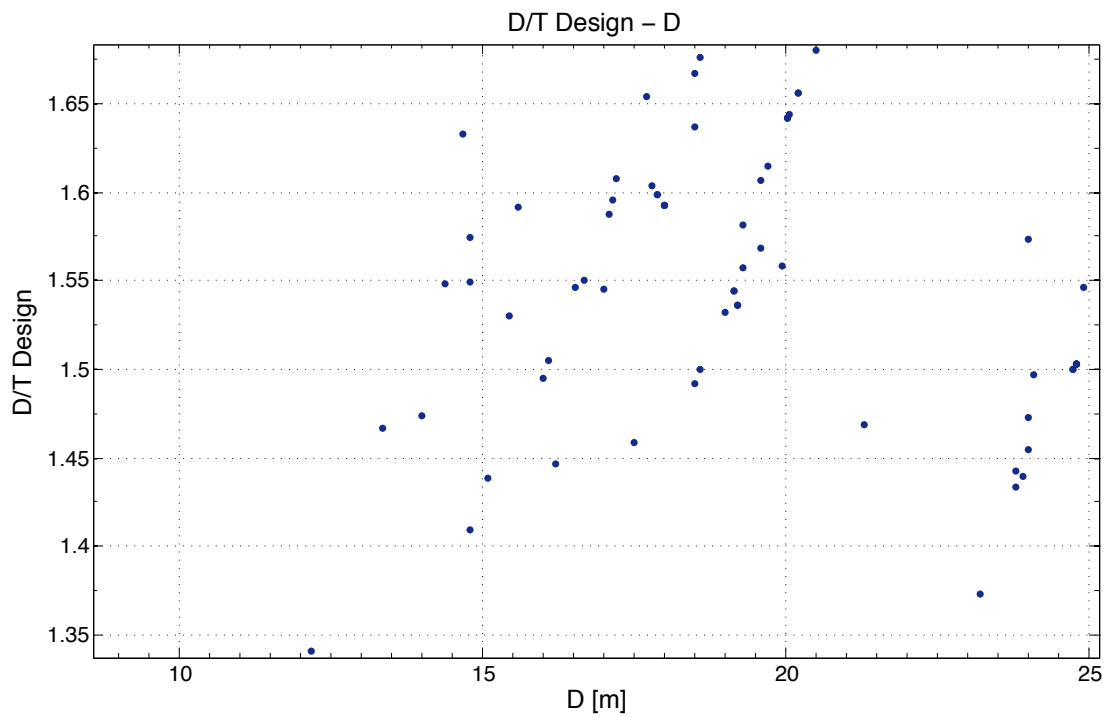
Διάγραμμα 18: B/T Design συναρτήσει DWT Design



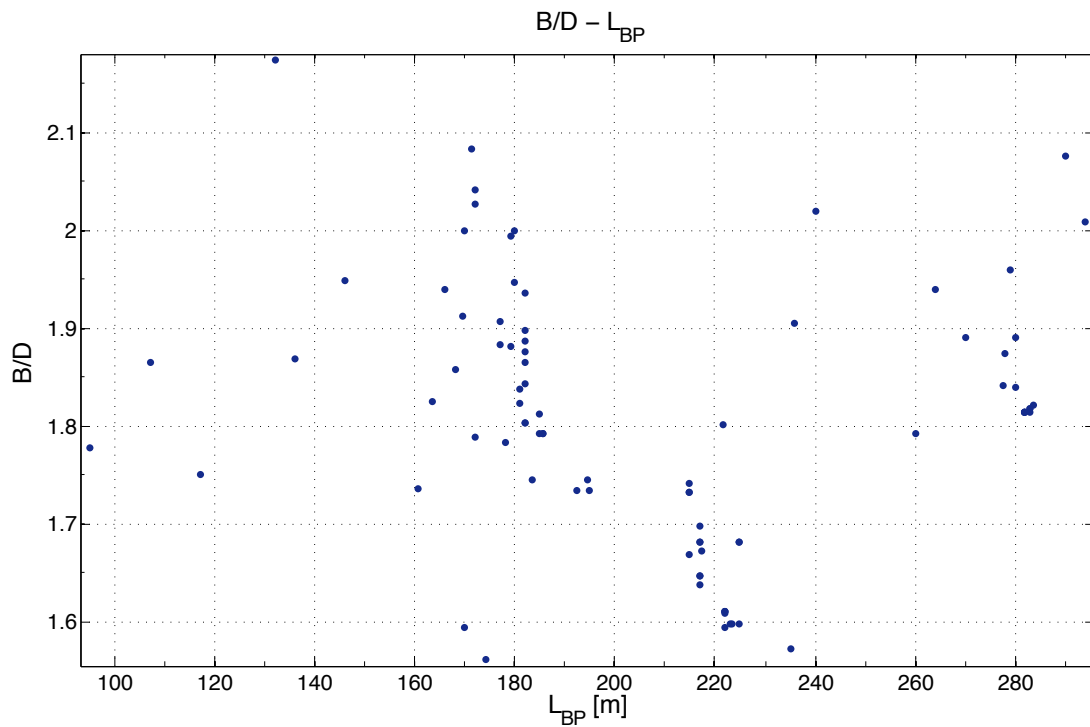
Διάγραμμα 19: B/T Design συναρτήσει B



Διάγραμμα 20: D/T Design συναρτήσει DWT Design



Διάγραμμα 21: D/T Design συναρτήσει D



Διάγραμμα 22: B/D συναρτήσει L_{BP}

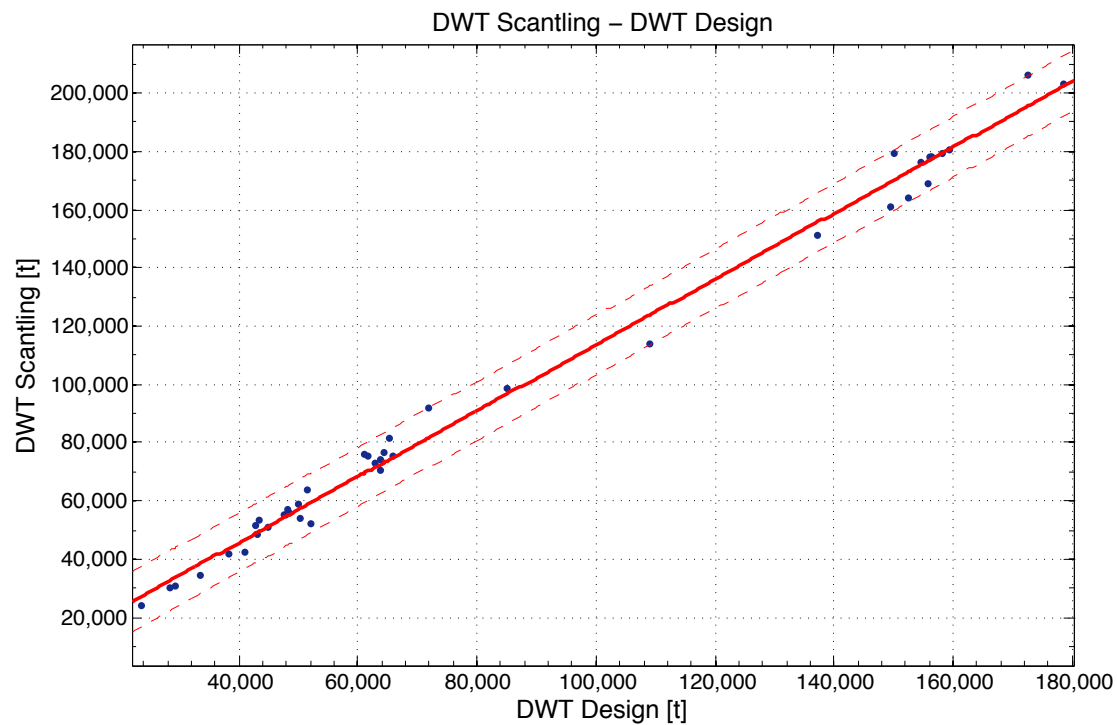
Τα όρια των λόγων των κύριων διαστάσεων συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα:

	MIN	MAX	AVERAGE
L/B	3.765	7.359	5.562
L/D	9.912	12.46	11.186
B/T	2.505	3.335	2.92
B/D	1.593	2.174	1.884
D/T	1.341	1.68	1.51

Πίνακας 2: Όρια των λόγων των κύριων διαστάσεων

2.2. Χωρητικότητα – Βάρη

2.2.1. DWT Scantling



Linear model Poly1:

$$f(x) = p1 * x + p2$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 1.13 \quad (1.099, 1.16)$$

$$p2 = 528.2 \quad (-2464, 3520)$$

Goodness of fit:

SSE: 1.006e+09

R-square: 0.9927

Adjusted R-square: 0.9925

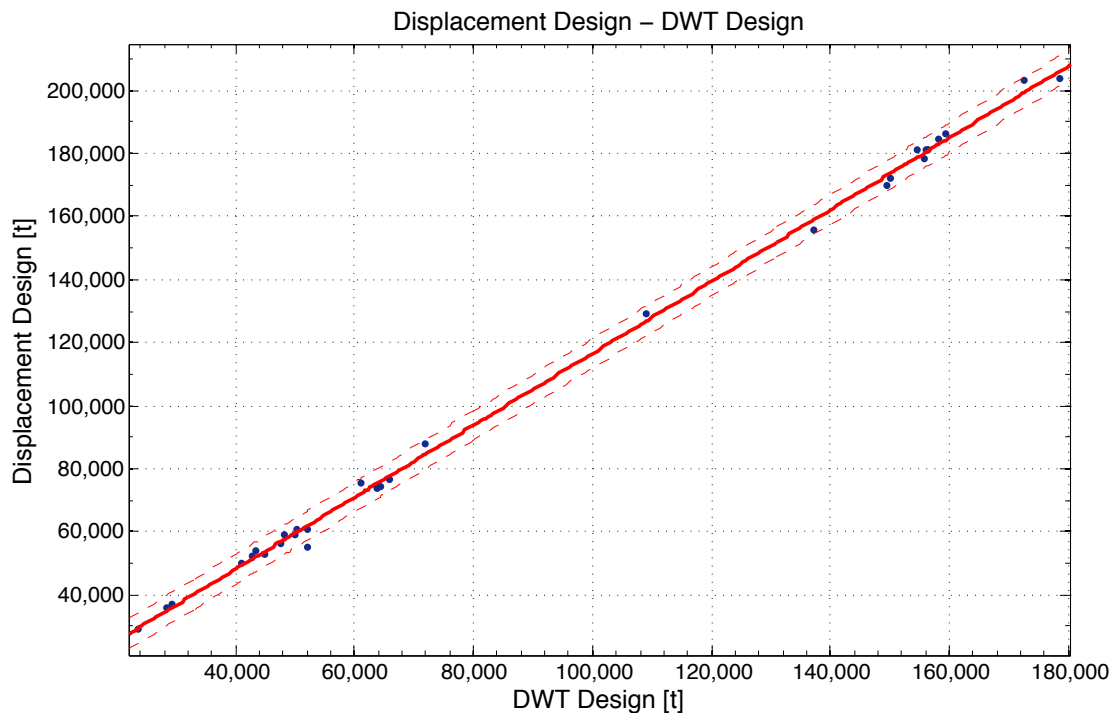
RMSE: 4954

$$DWT_{Scantling} = 1.13 * DWT_{Design} + 528.2$$

Παρατηρήσεις:

Στο παραπάνω διάγραμμα βλέπουμε ότι η συσχέτιση του DWT Scantling και του DWT Design είναι πολύ καλή ωστόσο υπάρχουν σημαντικές διαφορές σε αρκετά από τα σημεία του δείγματος. Οι αποκλίσεις αυτές οφείλονται ως ένα βαθμό στην ελευθερία επιλογής του βυθίσματος σχεδίασης που αντιστοιχεί το DWT Design. Αυτός είναι ο λόγος όπου τα διαγράμματα συναρτήσεως του DWT Scantling παρουσιάζουν καλύτερα αποτελέσματα από τα αντίστοιχα διαγράμματα συναρτήσεως του DWT Design καθώς το DWT Scantling αποτελεί αντιπροσωπευτικότερο μέγεθος των πλοίων.

2.2.2. Εκτόπισμα Δ (Displacement)



Διάγραμμα 24: Displacement Design (Δ) συναρτήσει DWT Design

Linear model Poly1:

$$f(x) = p1 * x + p2$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 1.14 \quad (1.124, 1.155)$$

$$p2 = 2603 \quad (976.5, 4230)$$

Goodness of fit:

SSE: 1.519e+08

R-square: 0.9987

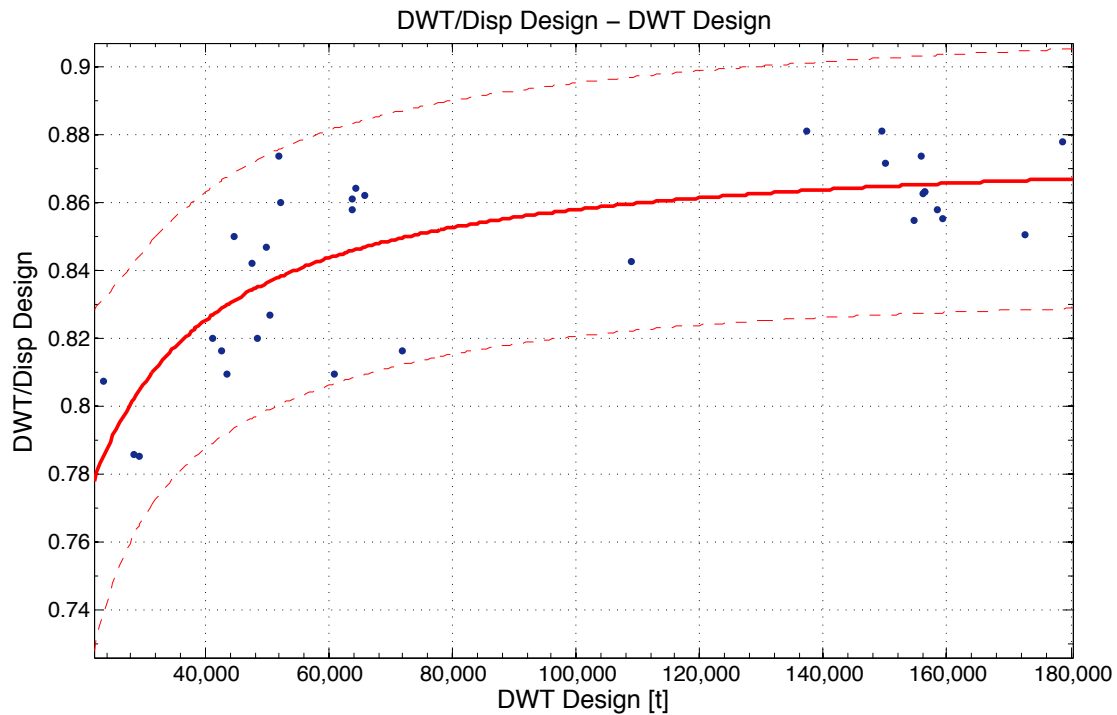
Adjusted R-square: 0.9987

RMSE: 2250

$$\Delta_{Design} = 1.14 * DWT_{Design} + 2603$$

Παρατηρήσεις:

Στο διάγραμμα Δ-DWT βλέπουμε ότι η συσχέτιση των δύο μεγεθών είναι εξαιρετική και αποτελεί πολύ αξιόπιστο τρόπο εκτίμησης του εκτοπίσματος.



Διάγραμμα 25: DWT/Δ Design συνάρτησε DWT Design

General model Power2:

$$f(x) = a \cdot x^b + c$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = -4695 \quad (-5.241e+04, 4.302e+04)$$

$$b = -1.077 \quad (-2.096, -0.05814)$$

$$c = 0.8773 \quad (0.8459, 0.9087)$$

Goodness of fit:

SSE: 0.009229

R-square: 0.598

Adjusted R-square: 0.5703

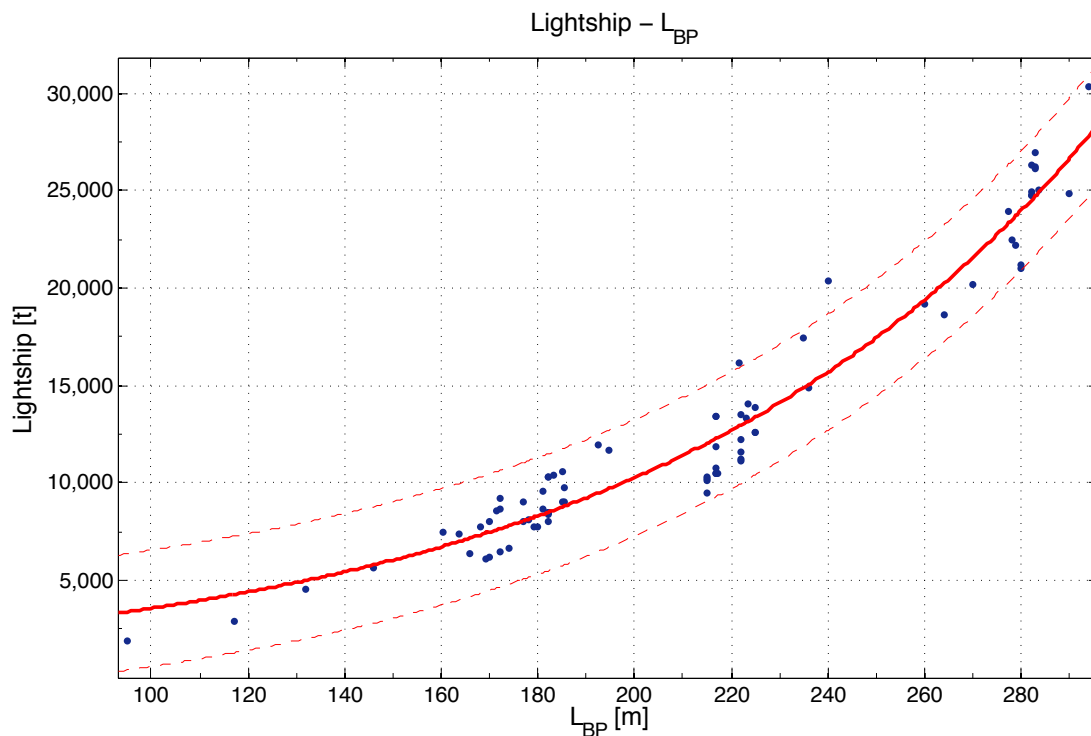
RMSE: 0.01784

$$\frac{DWT}{\Delta_{Design}} = -4695 * DWT_{Design}^{-1.077} + 0.8773$$

Παρατηρήσεις:

Στο διάγραμμα αυτό παρουσιάζεται ο λόγος $\frac{DWT}{\Delta}$ σε σχέση με το μέγεθος του πλοίου σε DWT. Παρατηρούμε ότι όσο μεγαλώνει το μέγεθος του πλοίου, το DWT καταλαμβάνει όλο και μεγαλύτερο ποσοστό του εκτοπίσματος. Παρατηρούμε ότι στα μικρά πλοία το DWT καταλαμβάνει το 78-81% του εκτοπίσματος, στα αμέσως μεγαλύτερα κυμαίνεται μεταξύ 85-88% ενώ από 80.000t και πάνω οι δυνατότητες εκμετάλλευσης του εκτοπίσματος περιορίζονται καθώς ο λόγος αυξάνει με πολύ μικρό ρυθμό.

2.2.3. Βάρος κενού σκάφους (Lightship)



Διάγραμμα 26: Lightship συναρτήσει L_{BP}

General model Exp1:

$$f(x) = a * \exp(b * x)$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 1229 (1047, 1411)$$

$$b = 0.01061 (0.01003, 0.01119)$$

Goodness of fit:

SSE: 1.733e+08

R-square: 0.9505

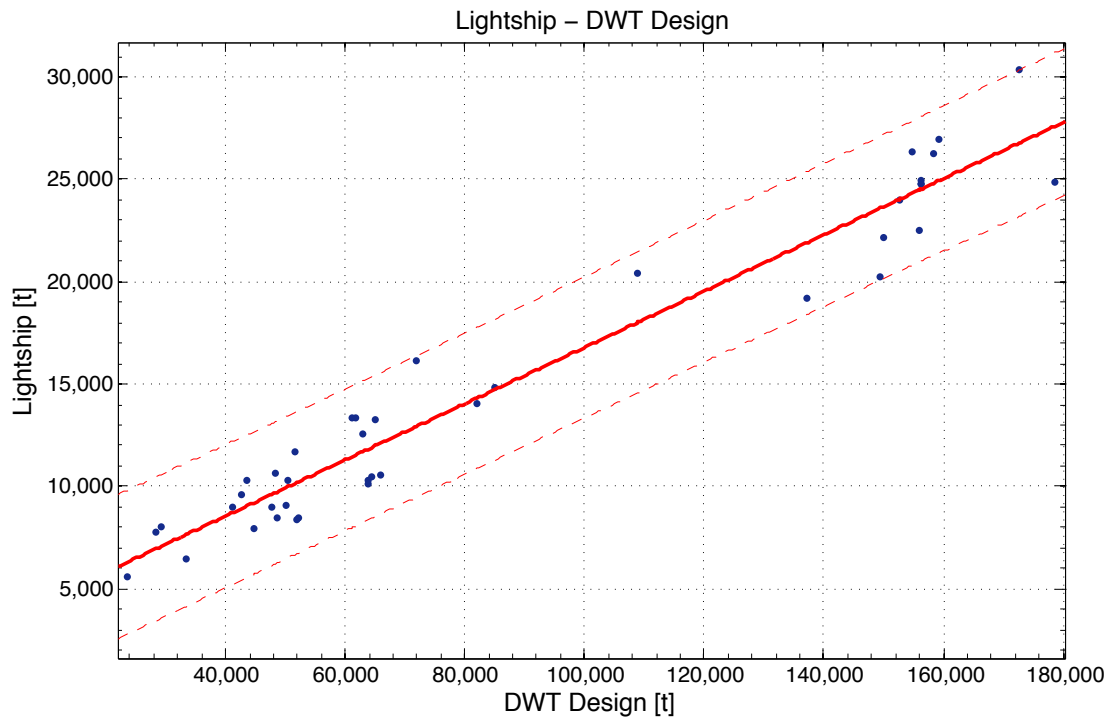
Adjusted R-square: 0.9499

RMSE: 1491

$$\text{Lightship} = 1229 * e^{0.01061 * L_{BP}}$$

Παρατηρήσεις:

Το διάγραμμα παρουσιάζει την σχέση του Lightship με το μήκος L_{BP} . Παρατηρούμε ότι αυξάνοντας το μήκος του πλοίου αυξάνει εκθετικά το βάρος του κενού σκάφους. Οι λόγοι για αυτή την αύξηση ποικίλουν με τον κυριότερο να είναι η ταυτόχρονη αύξηση και των άλλων κύριων διαστάσεων. Ωστόσο υπάρχουν και άλλοι λόγοι για αυτή την αύξηση, όπως για παράδειγμα η αύξηση της απαιτούμενης ισχύς πρόωσης δηλαδή του βάρους της μηχανολογικής εγκατάστασης, η απαίτηση αυξημένης αντοχής και η χρήση μεγαλύτερων δικτύων σωληνώσεων.



Διάγραμμα 27: Lightship συναρτήσει DWT Design

Linear model Poly1:

$$f(x) = p1 * x + p2$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.1374 (0.1267, 0.1481)$$

$$p2 = 3052 (1978, 4126)$$

Goodness of fit:

SSE: 1.11e+08

R-square: 0.9455

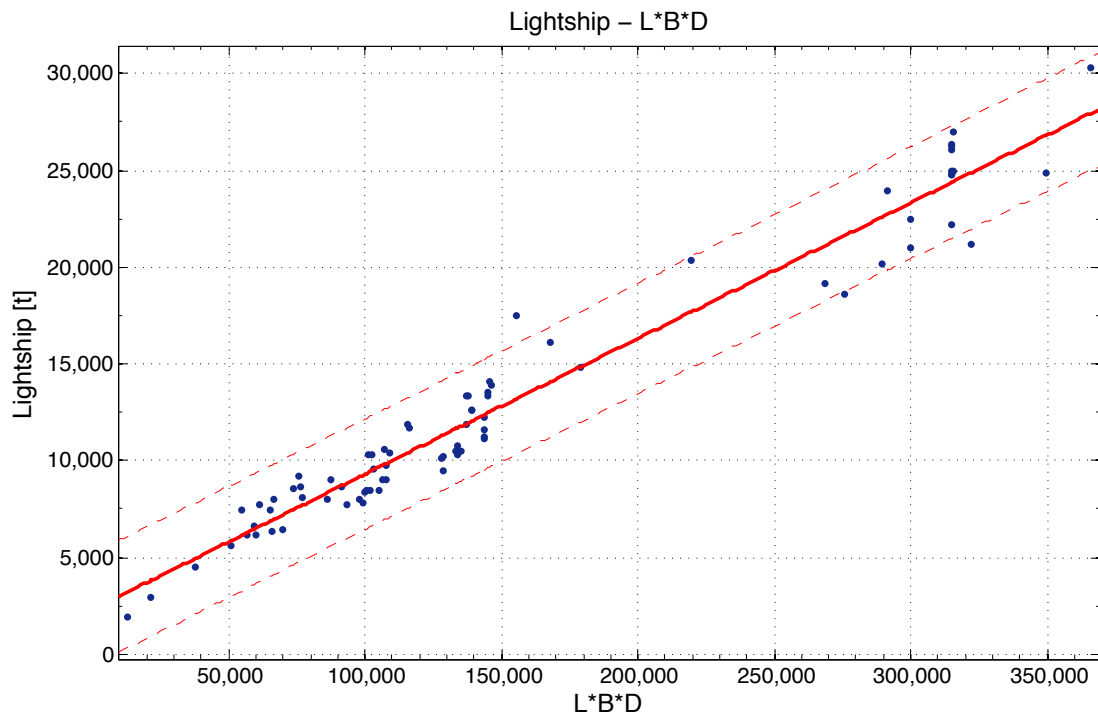
Adjusted R-square: 0.9441

RMSE: 1687

$$Lightship = 0.1374 * DWT_{Design} + 3052$$

Παρατηρήσεις:

Στο διάγραμμα Lightship – DWT Design βλέπουμε την πλήρη εξάρτηση του Lightship με το DWT του πλοίου που μεταφράζεται στην καλή συσχέτιση με ευθεία γραμμή. Ωστόσο υπάρχουν σημαντικές διαφορές από τις πραγματικές τιμές, που μπορεί να οφείλονται στην επιλογή αυξημένου πάχους ελασμάτων για αυξημένη αντοχή έναντι διάβρωσης, στην επιλογή μειωμένου πάχους ελασμάτων με στόχο την μείωση του Lightship, στην ύπαρξη ή μη φορτοεκφορτωτικών μέσων είτε σε πιθανή ενίσχυση του πλοίου για πλεύση σε πάγους. Παρόλο που η συσχέτιση είναι γραμμική, το Lightship σαν ποσοστό του DWT δεν είναι σταθερό. Ειδικότερα, στα μικρά πλοία το Lightship αποτελεί το 20% του DWT ενώ σε μεγαλύτερα πέφτει γραμμικά στο 15,6%.



Διάγραμμα 28: Lightship συναρτήσεως $L_{BP}*B*D$

Linear model Poly1:

$$f(x) = p1*x + p2$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.07011 (0.06668, 0.07354)$$

$$p2 = 2293 (1679, 2906)$$

Goodness of fit:

SSE: 1.578e+08

R-square: 0.955

Adjusted R-square: 0.9544

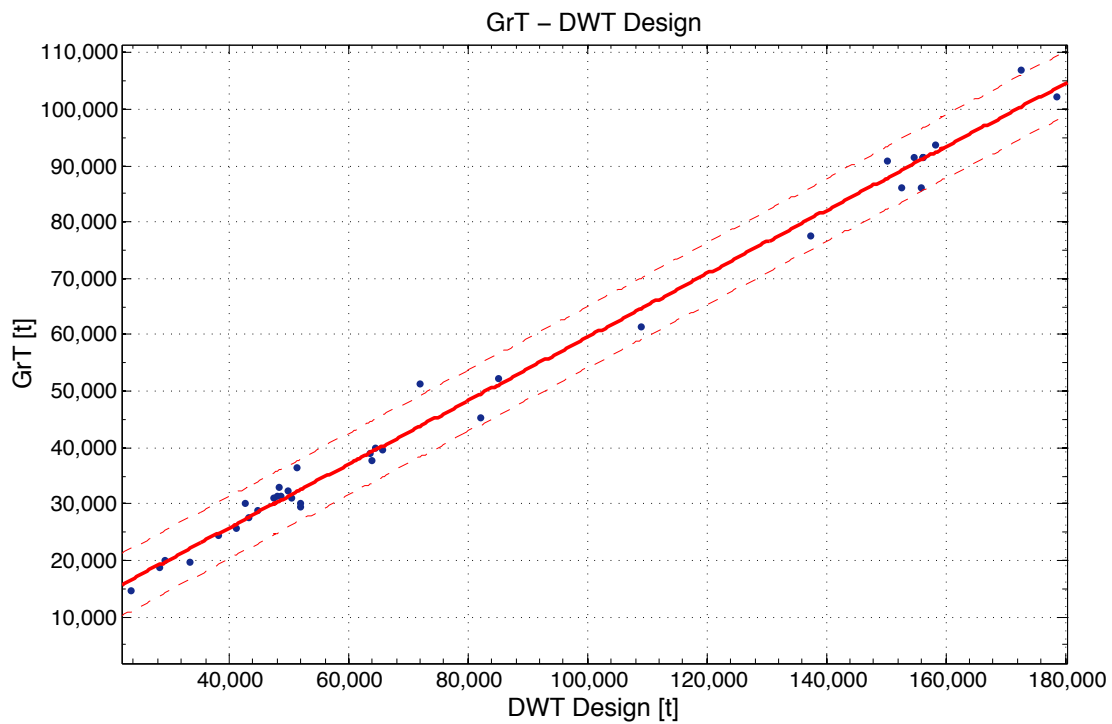
RMSE: 1422

$$Lightship = 0.07011 * L_{BP} * B * D + 2293$$

Παρατηρήσεις:

Στο διάγραμμα του Lightship συναρτήσεως του γινομένου $L_{BP}*B*D$ παρατηρούμε εξίσου καλή συσχέτιση με τα προηγούμενα διαγράμματα έχοντας ωστόσο ελαφρώς μικρότερες αποκλίσεις και τα όρια πρόβλεψης πιο κοντά στην ευθεία. Το γεγονός αυτό δικαιολογείται λόγω της επίδρασης και των τριών κύριων διαστάσεων στο Lightship. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί πως η επίδραση των τριών κύριων διαστάσεων στο Lightship δεν είναι ίδια καθώς αύξηση του μήκους επηρεάζει περισσότερο το βάρος σε σχέση με αύξηση του κοίλου το οποίο έχει ως αποτέλεσμα αύξηση της ροπής αντίστασης (Section Modulus) επομένως την ύπαρξη μικρότερων τάσεων στην διατομή.

2.2.4. Ολική Χωρητικότητα (Gross Tonnage)



Διάγραμμα 29: GrT συναρτήσει DWT Design

Linear model Poly1:

$$f(x) = p1 * x + p2$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.5626 (0.545, 0.5801)$$

$$p2 = 3299 (1581, 5018)$$

Goodness of fit:

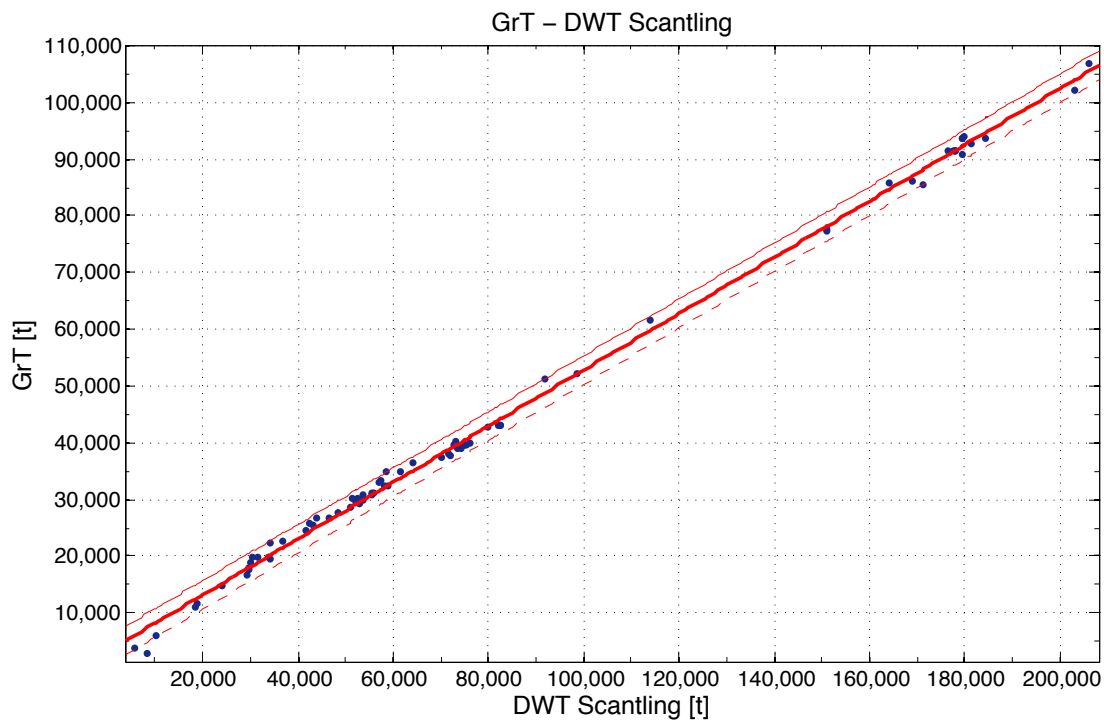
SSE: 2.46e+08

R-square: 0.9918

Adjusted R-square: 0.9916

RMSE: 2651

$$GrT = 0.5626 * DWT_{Design} + 3299$$



Διάγραμμα 30: GrT συναρτήσεως DWT Scantling

Linear model Poly1:

$$f(x) = p1 * x + p2$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.4959 (0.4908, 0.501)$$

$$p2 = 3262 (2751, 3772)$$

Goodness of fit:

SSE: 1.18e+08

R-square: 0.998

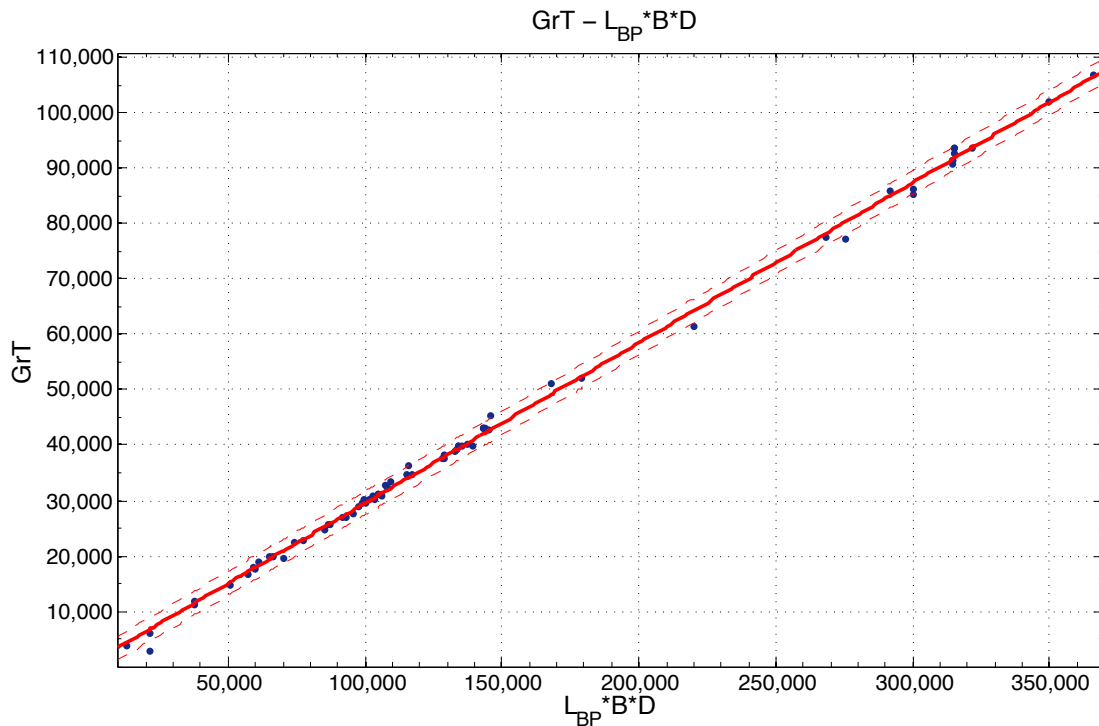
Adjusted R-square: 0.998

RMSE: 1254

$$GrT = 0.4959 * DWT_{Scantling} + 3262$$

Παρατηρήσεις:

Στο διάγραμμα της ολικής χωρητικότητας GrT συναρτήσεως του DWT Design παρατηρούμε ότι ενώ υπάρχει καλή συσχέτιση των δύο μεγεθών, όπως ήταν αναμενόμενο, παρ' όλα αυτά υπάρχουν αποκλίσεις μερικών σημείων από την ευθεία ειδικότερα στο διάστημα 68000-160000 DWT. Οι αποκλίσεις στο διάγραμμα συναρτήσεως του DWT Scantling είναι πολύ μικρότερες καθώς, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, το DWT Scantling αποτελεί αντιπροσωπευτικότερο μέγεθος για το πλοίο.



*Διάγραμμα 31: GrT συναρτήσει $L_{BP} * B * D$*

Linear model Poly1:

$$f(x) = p1 * x + p2$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.2898 \text{ (0.2872, 0.2925)}$$

$$p2 = 536.5 \text{ (77.11, 996)}$$

Goodness of fit:

SSE: 8.123e+07

R-square: 0.9985

Adjusted R-square: 0.9985

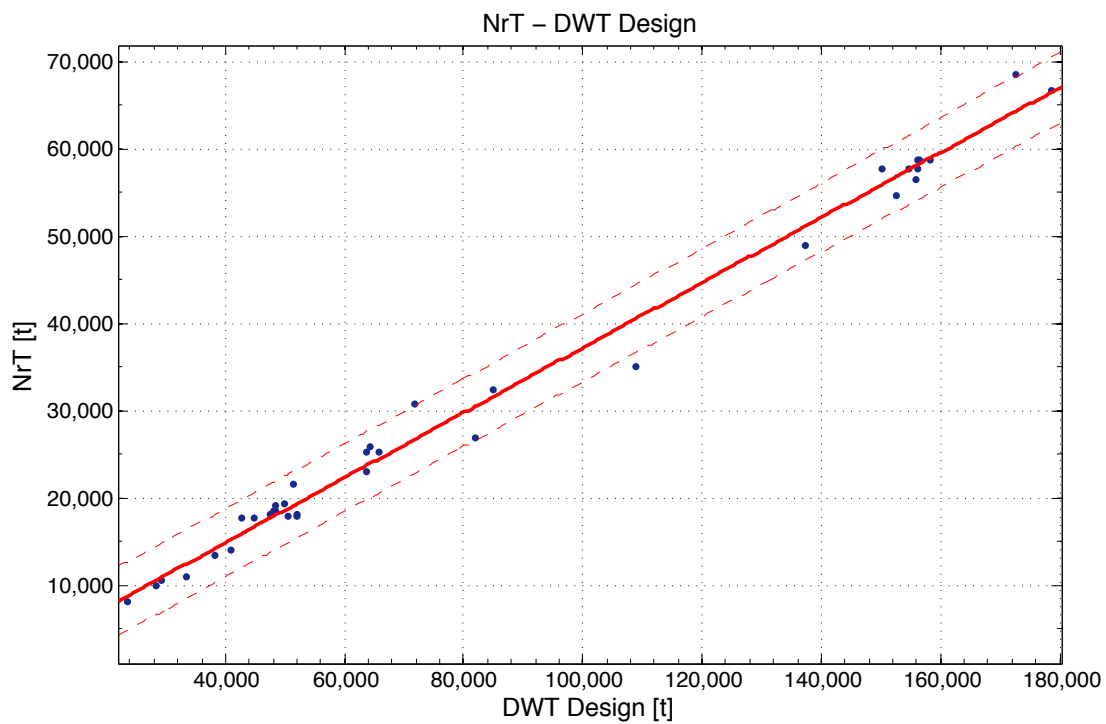
RMSE: 1062

$$GrT = 0.2898 * L_{BP} * B * D + 536.5$$

Παρατηρήσεις:

Στο διάγραμμα αυτό παρατηρούμε την άριστη συσχέτιση του GrT και του γινομένου $L_{BP} * B * D$ αποτελώντας τον πιο αξιόπιστο τρόπο εκτίμησης του έχοντας ταυτόχρονα τις μικρότερες αποκλίσεις. Το γεγονός αυτό ήταν αναμενόμενο καθώς γνωρίζουμε ότι η ολική χωρητικότητα έχει εξ' ορισμού απόλυτη σχέση με τον όγκο των κλειστών χώρων του πλοίου που κατά κύριο λόγο καθορίζονται από τις τρεις κύριες διαστάσεις.

2.2.5. Καθαρή Χωρητικότητα (Net Tonnage)



Διάγραμμα 32: NrT συναρτήσει DWT Design

Linear model Poly1:

$$f(x) = p1 * x + p2$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.3726 \quad (0.36, 0.3852)$$

$$p2 = -16.87 \quad (-1265, 1231)$$

Goodness of fit:

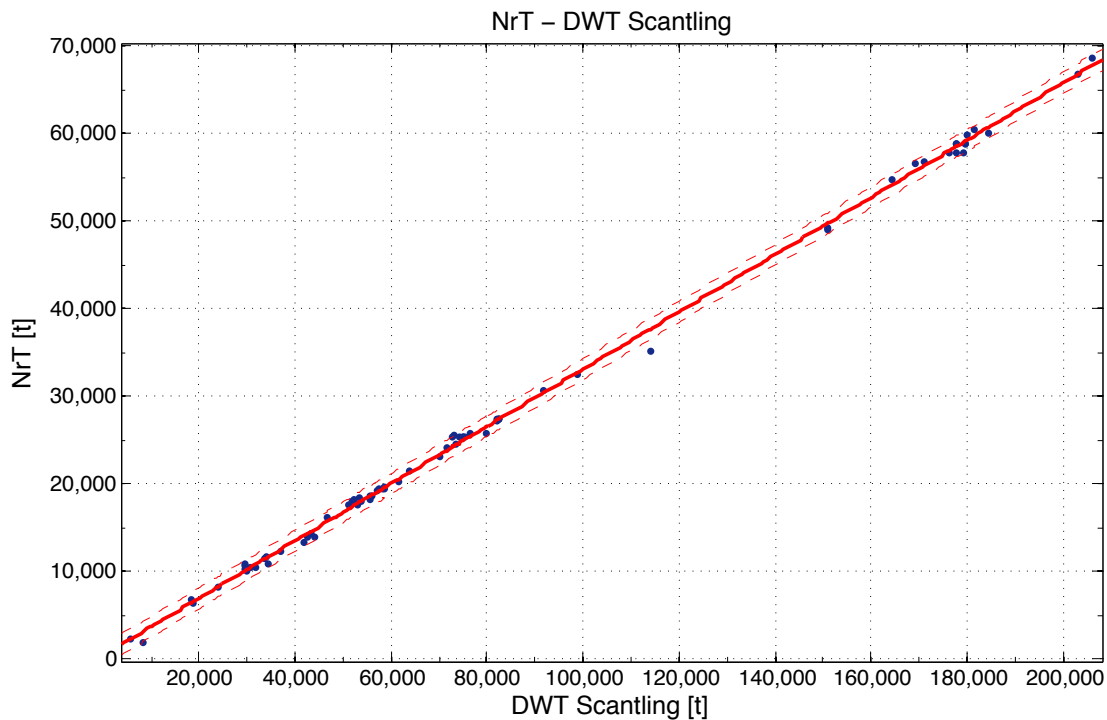
SSE: 1.207e+08

R-square: 0.9907

Adjusted R-square: 0.9904

RMSE: 1884

$$NrT = 0.3726 * DWT_{Design} - 16.87$$



Διάγραμμα 33: NrT συναρτήσει DWT Scantling

Linear model Poly1:

$$f(x) = p1 * x + p2$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.3267 (0.3243, 0.3291)$$

$$p2 = 413.3 (166.6, 659.9)$$

Goodness of fit:

SSE: 2.49e+07

R-square: 0.999

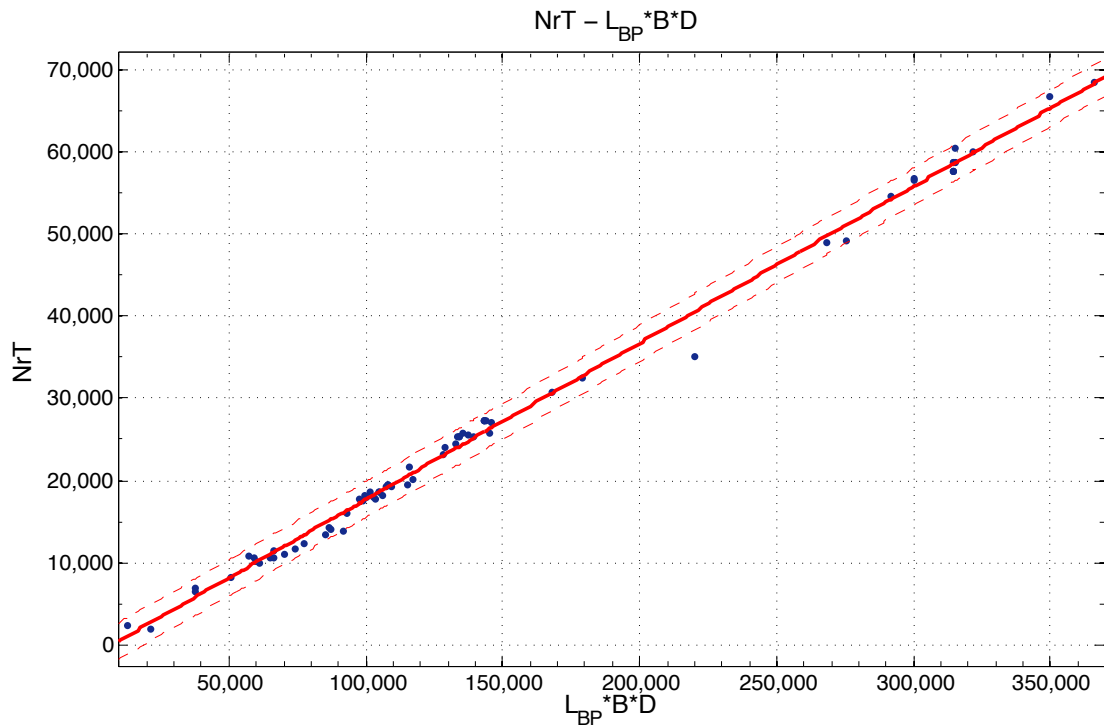
Adjusted R-square: 0.999

RMSE: 588.1

$$NrT = 0.3267 * DWT_{Scantling} + 413.3$$

Παρατηρήσεις:

Όπως και στην περίπτωση του GrT, η καθαρή χωρητικότητα NrT παρουσιάζει απόλυτη συσχέτιση με το DWT χρησιμοποιώντας ευθεία γραμμή. Ωστόσο οι αποκλίσεις της τάξης των 5,000 μονάδων στο διάγραμμα του DWT Design, μειώνονται στο διάγραμμα του DWT Scantling για τον ίδιο λόγο που αναφέρθηκε στα αντίστοιχα διαγράμματα της ολικής χωρητικότητας GrT.



Διάγραμμα 34: NrT συναρτήσει $L_{BP} * B * D$

Linear model Poly1:

$$f(x) = p1 * x + p2$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.1908 \quad (0.1881, 0.1936)$$

$$p2 = -1416 \quad (-1903, -928.9)$$

Goodness of fit:

SSE: 8.232e+07

R-square: 0.9964

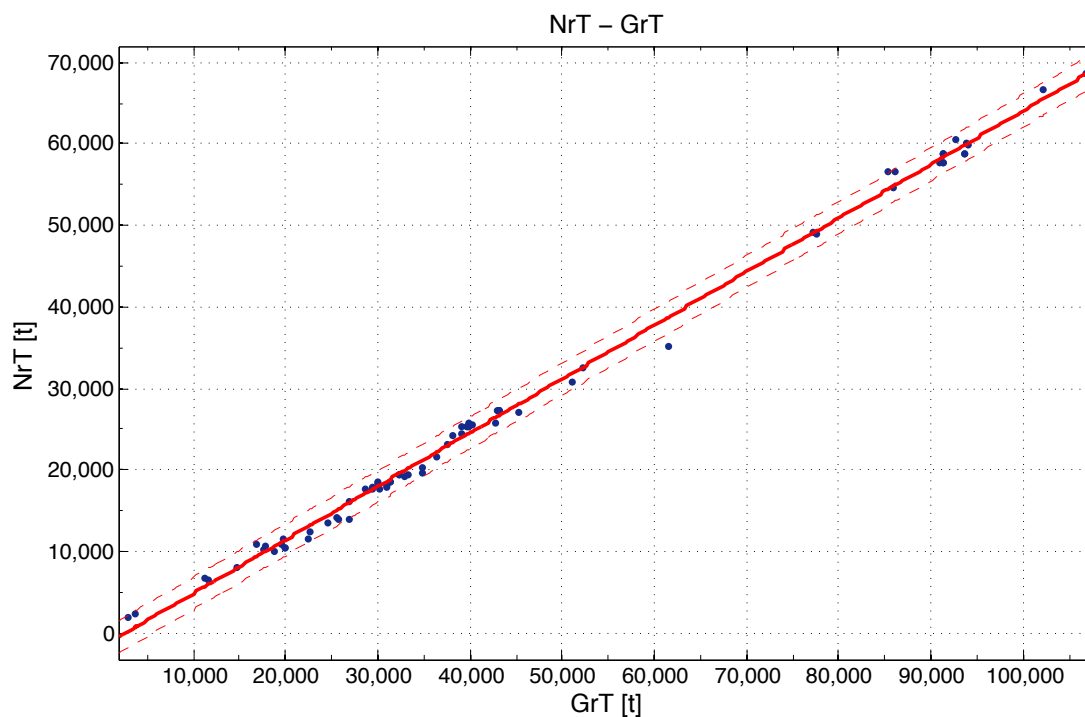
Adjusted R-square: 0.9964

RMSE: 1092

$$NrT = 0.1908 * L_{BP} * B * D - 1416$$

Παρατηρήσεις:

Στο παραπάνω διάγραμμα διαπιστώνουμε την άριστη συσχέτιση, εξαιρουμένου ενός σημείου του NrT με το γινόμενο των κύριων διαστάσεων $L_{BP} * B * D$ για τους ίδιους λόγους που εξηγήθηκαν προηγουμένως στο αντίστοιχο διάγραμμα του GrT .



Διάγραμμα 35: NrT συναρτήσει GrT

Linear model Poly1:

$$f(x) = p1 * x + p2$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.6586 \quad (0.6505, 0.6667)$$

$$p2 = -1769 \quad (-2201, -1338)$$

Goodness of fit:

SSE: 6.961e+07

R-square: 0.9972

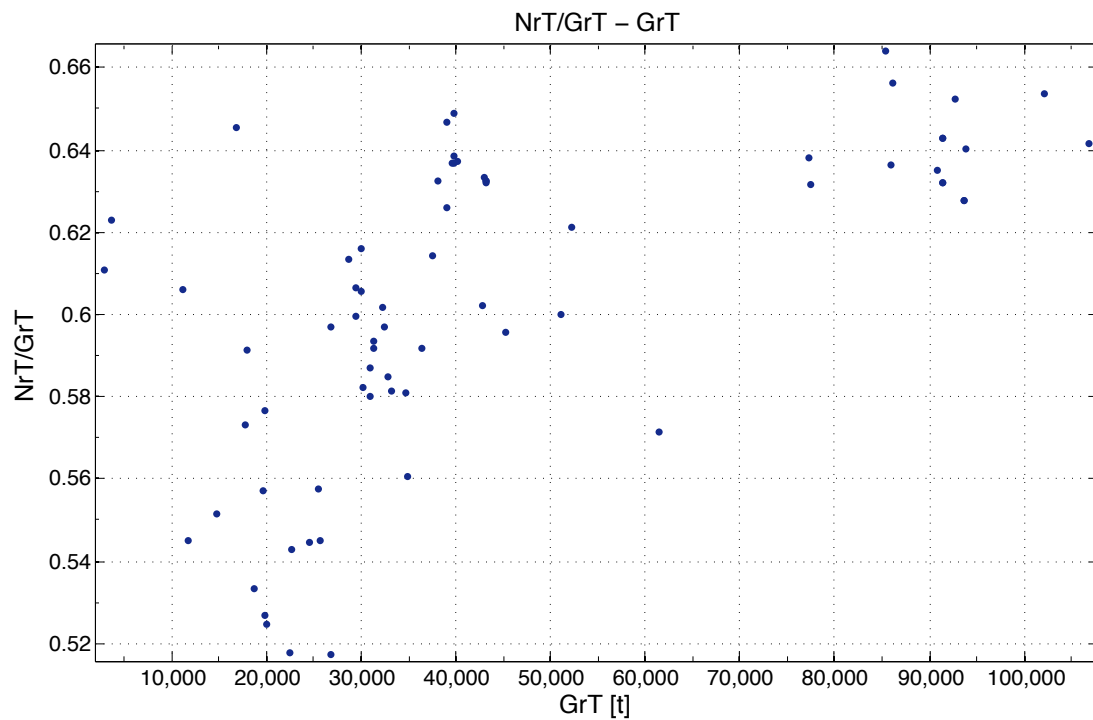
Adjusted R-square: 0.9972

RMSE: 976.5

$$NrT = 0.6586 * GrT - 1769$$

Παρατηρήσεις:

Η καθαρή χωρητικότητα NrT μπορεί να υπολογιστεί με μεγάλη ακρίβεια συναρτήσει της ολικής χωρητικότητας GrT επιβεβαιώνοντας τον ορισμό της χωρητικότητας NrT που προκύπτει από την ολική αν αφαιρέσουμε τον όγκο ορισμένων χώρων που δεν προορίζονται για την μεταφορά φορτίου. Αυτοί οι χώροι είναι και ο λόγος διαφοράς κάποιων σημείων με ίδιο GrT εξαιτίας της διαφορετικής σχεδίασης του εκάστοτε πλοίου.

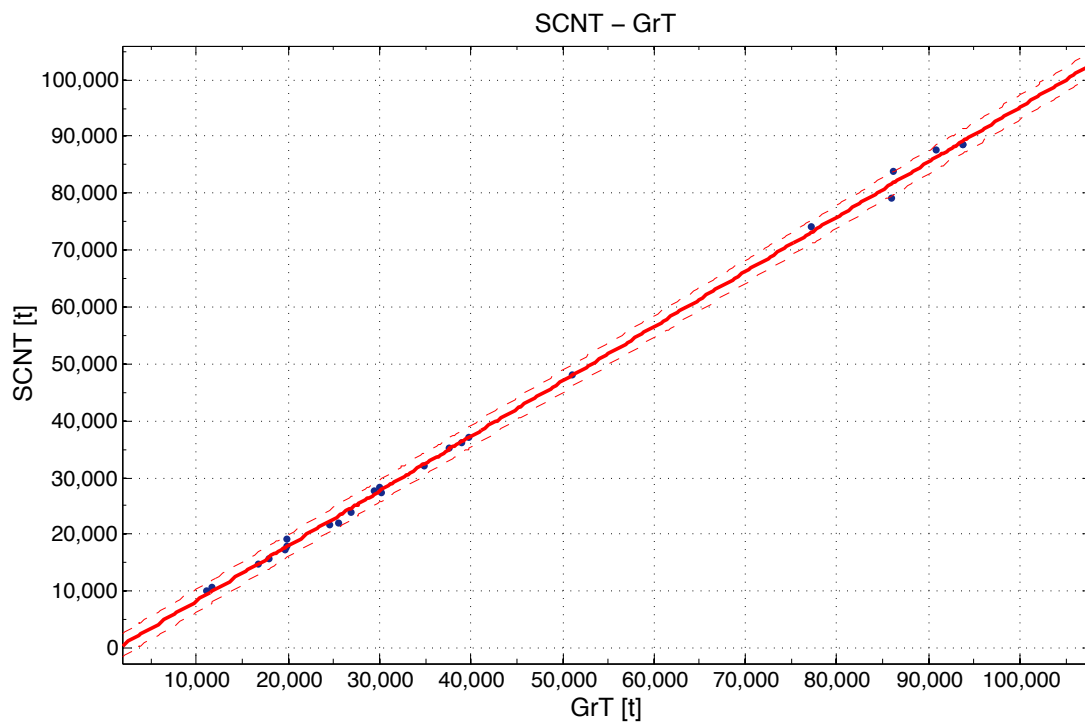


Διάγραμμα 36: NrT/GrT συναρτήσει GrT

Παρατηρήσεις:

Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται πως μεταβάλλεται ο λόγος NrT/GrT σε σχέση με το μέγεθος του πλοίου δηλαδή το GrT. Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται το GrT τόσο αυξάνεται το ποσοστό του NrT σε σχέση με το GrT με αρκετές όμως αυξομειώσεις ανάλογα την σχεδίαση. Από το συγκεκριμένο διάγραμμα ο μελετητής μπορεί να δει το εύρος στο οποίο κινείται ο λόγος σε κάθε περίπτωση. Σημειώνεται ότι το μέγιστο ποσοστό του NrT πλησιάζει το 66% για όλα τα πλοία.

2.2.6. Suez Canal Net Tonnage (SCNT)



Διάγραμμα 37: SCNT συναρτήσει GrT

Linear model Poly1:

$$f(x) = p1 * x + p2$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.965 \quad (0.951, 0.979)$$

$$p2 = -1335 \quad (-2045, -624.5)$$

Goodness of fit:

SSE: 1.893e+07

R-square: 0.9989

Adjusted R-square: 0.9989

RMSE: 927.7

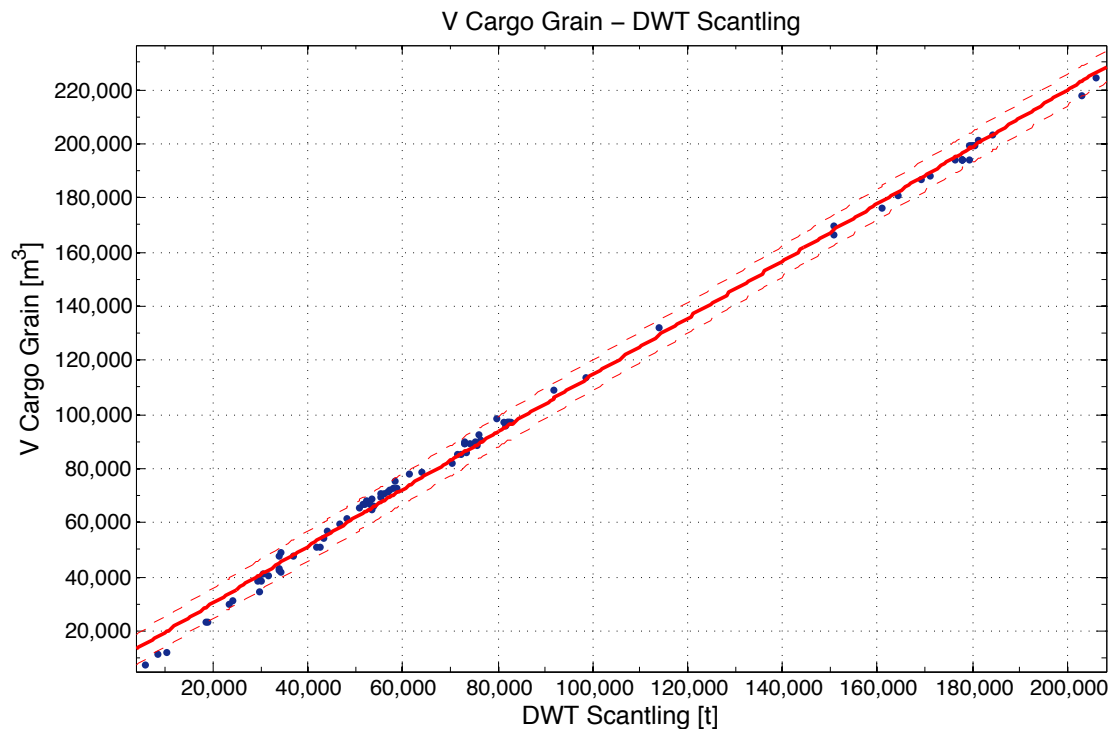
$$SCNT = 0.965 * GrT - 1335$$

Παρατηρήσεις:

Διαθέτοντας λίγα δεδομένα για το Suez Canal Net Tonnage (SCNT), βλέπουμε την άριστη συσχέτιση του με την ολική χωρητικότητα GrT και ο υπολογισμός του οποίου, μπορεί να γίνει με μεγάλη ακρίβεια από την παραπάνω σχέση. Ωστόσο παρατηρούμε ότι για μικρά πλοία το SCNT αποτελεί το 80% του GrT, ενώ για μεγάλα φτάνει στο 95% παρουσιάζοντας αναλογική αύξηση.

2.3. Χωρητικότητα κυτών & δεξαμενών

2.3.1. Χωρητικότητα όγκου κυτών Grain (V Cargo Grain)



Διάγραμμα 38: V Cargo Grain συναρτήσει DWT Scantling

Linear model Poly1:

$$f(x) = p1 * x + p2$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 1.053 (1.043, 1.064)$$

$$p2 = 9189 (8116, 1.026e+04)$$

Goodness of fit:

SSE: 6.859e+08

R-square: 0.9977

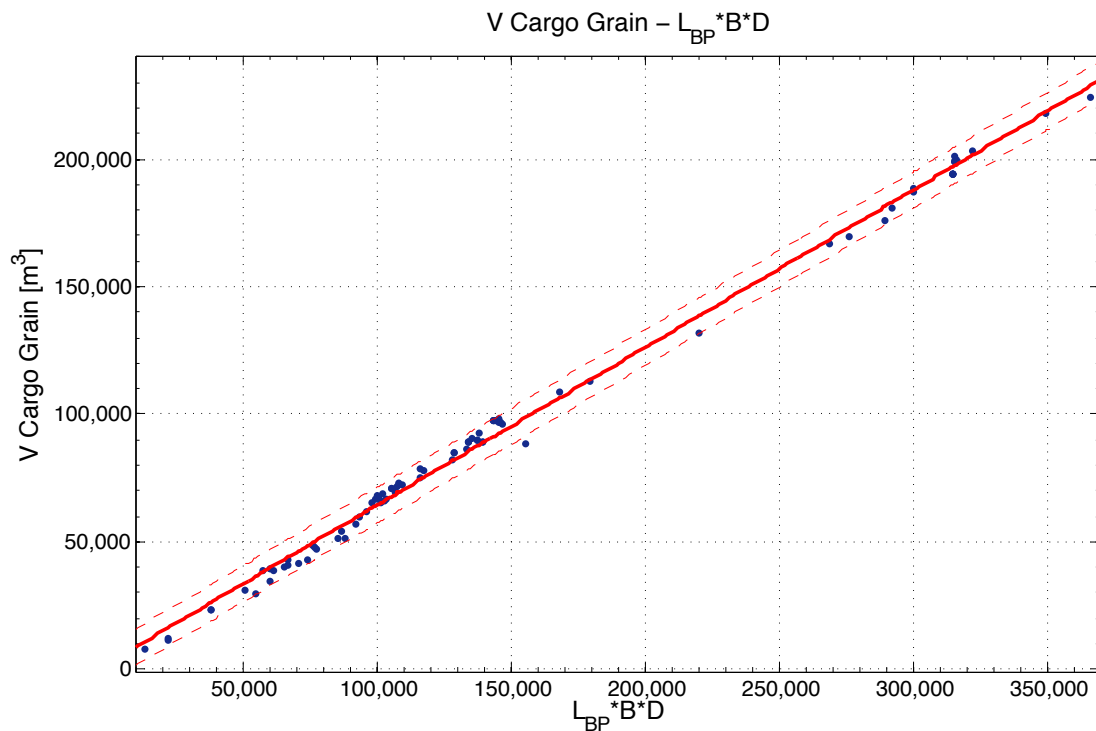
Adjusted R-square: 0.9977

RMSE: 2808

$$V \text{ Cargo}_{\text{Grain}} = 1.053 * DWT_{\text{Scantling}} + 9189$$

Παρατηρήσεις:

Η χωρητικότητα του όγκου κυτών παρουσιάζει απόλυτη συσχέτιση με το DWT καθώς το μεγαλύτερο μέρος του αποτελείται από το βάρος του φορτίου. Επιλέχθηκε το διάγραμμα συναρτήσει του DWT Scantling καθώς αποτελεί αντιπροσωπευτικότερο μέγεθος για το πλοίο σε σχέση με το DWT Design.



*Διάγραμμα 39: V Cargo Grain συναρτήσει $L_{BP} * B * D$*

Linear model Poly1:

$$f(x) = p1 * x + p2$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.6175 (0.6092, 0.6257)$$

$$p2 = 2828 (1392, 4263)$$

Goodness of fit:

SSE: 1.043e+09

R-square: 0.9962

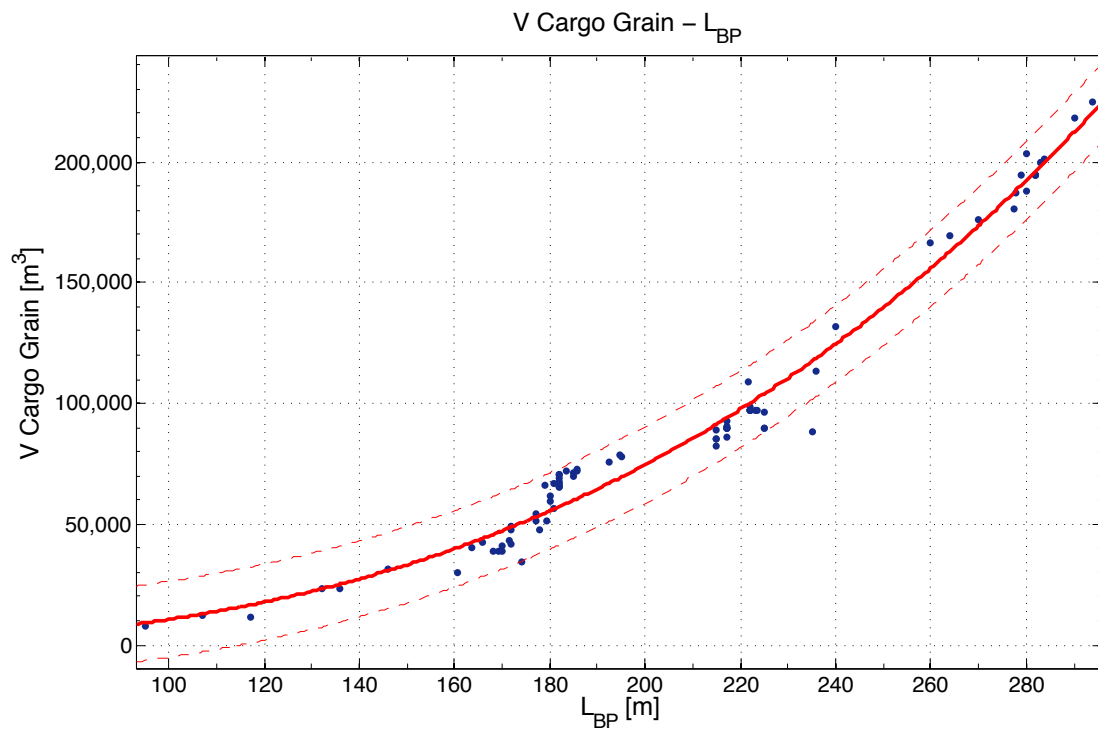
Adjusted R-square: 0.9962

RMSE: 3524

$$V_{GRAIN} = 0.6175 * L_{BP} * B * D + 2828$$

Παρατηρήσεις:

Στο συγκεκριμένο διάγραμμα παρατηρούμε ότι η εκτίμηση του όγκου κυτών μπορεί να γίνει εξίσου με το γινόμενο των κύριων διαστάσεων το οποίο παίζει καθοριστικό ρόλο στο μέγεθος των αμπαριών. Ωστόσο παρατηρούμε ελαφρώς μεγαλύτερες αποκλίσεις σε σχέση με το προηγούμενο διάγραμμα καθώς το γινόμενο των κύριων διαστάσεων περιλαμβάνει και τους μη οικονομικά εκμεταλλεύσιμους χώρους του πλοίου.



Διάγραμμα 40: V Cargo Grain συναρτήσει L_{BP}

General model Power1:

$$f(x) = a \cdot x^b$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.02522 \quad (0.01166, 0.03879)$$

$$b = 2.812 \quad (2.715, 2.909)$$

Goodness of fit:

SSE: 5.235e+09

R-square: 0.981

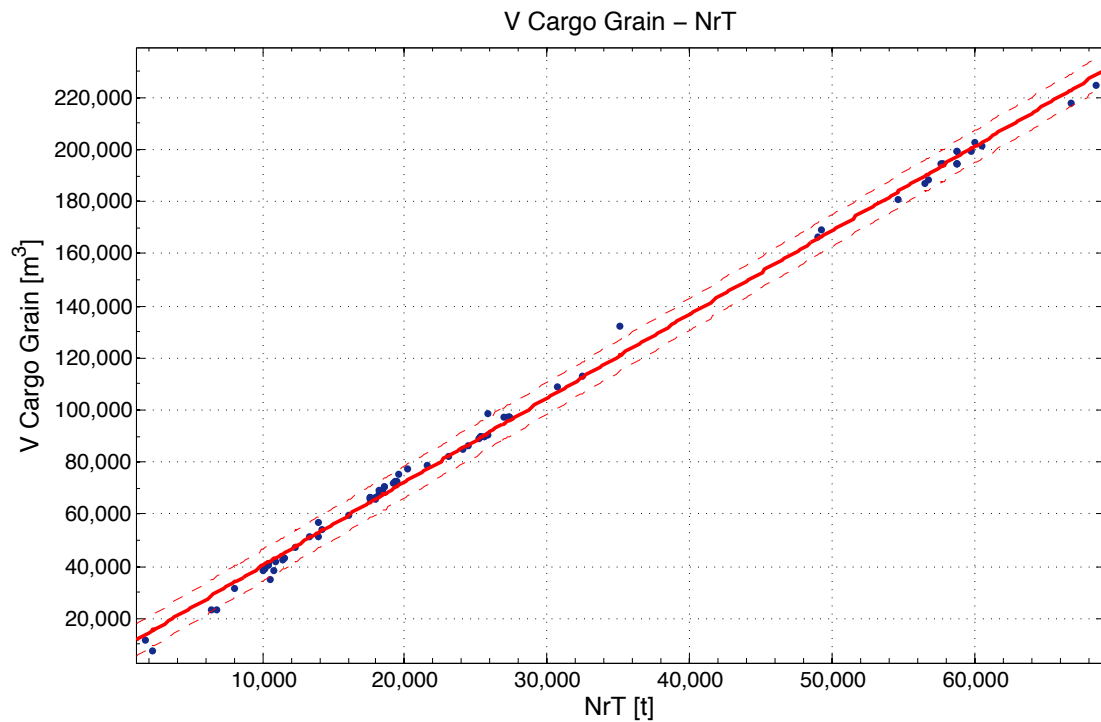
Adjusted R-square: 0.9808

RMSE: 7894

$$V \text{ Cargo}_{Grain} = 0.02522 * L_{BP}^{2.812}$$

Παρατηρήσεις:

Ο όγκος του χώρου φορτίου μπορεί να προσεγγιστεί καλά συναρτήσει μεμονωμένων των κύριων διαστάσεων. Σαφώς και οι αποκλίσεις στο συγκεκριμένο διάγραμμα είναι μεγαλύτερες απ' ότι στο διάγραμμα συναρτήσει του $L_{BP} * B * D$.



Διάγραμμα 41: V Cargo Grain συναρτήσει NrT

Linear model Poly1:

$$f(x) = p1 * x + p2$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 3.219 (3.181, 3.257)$$

$$p2 = 7979 (6702, 9255)$$

Goodness of fit:

SSE: 6.665e+08

R-square: 0.9974

Adjusted R-square: 0.9974

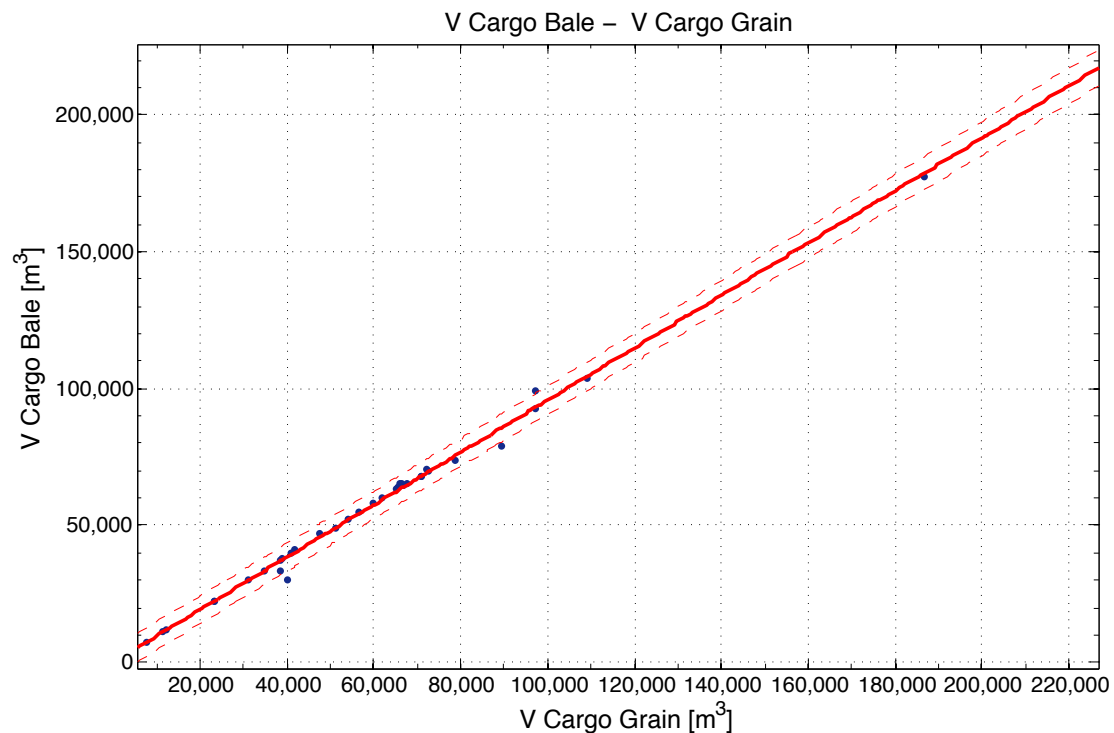
RMSE: 3022

$$V \text{ Cargo}_{Grain} = 3.219 * NrT + 7979$$

Παρατηρήσεις:

Η εκτίμηση του χώρου φορτίου μπορεί να γίνει επίσης με καλή προσέγγιση συναρτήσει της καθαρής χωρητικότητας, η οποία σχετίζεται άμεσα με τους οικονομικά εκμεταλλεύσιμους χώρους του πλοίου δηλαδή με τον χώρο φορτίου.

2.3.2. Χωρητικότητα δεξαμενών φορτίου Bale (V Cargo Bale)



Διάγραμμα 42: V Cargo Bale συναρτήσει V Cargo Grain

Linear model Poly1:

$$f(x) = p1 * x + p2$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.9571 (0.9314, 0.9827)$$

$$p2 = 86.59 (-1638, 1811)$$

Goodness of fit:

SSE: 2.034e+08

R-square: 0.9941

Adjusted R-square: 0.9939

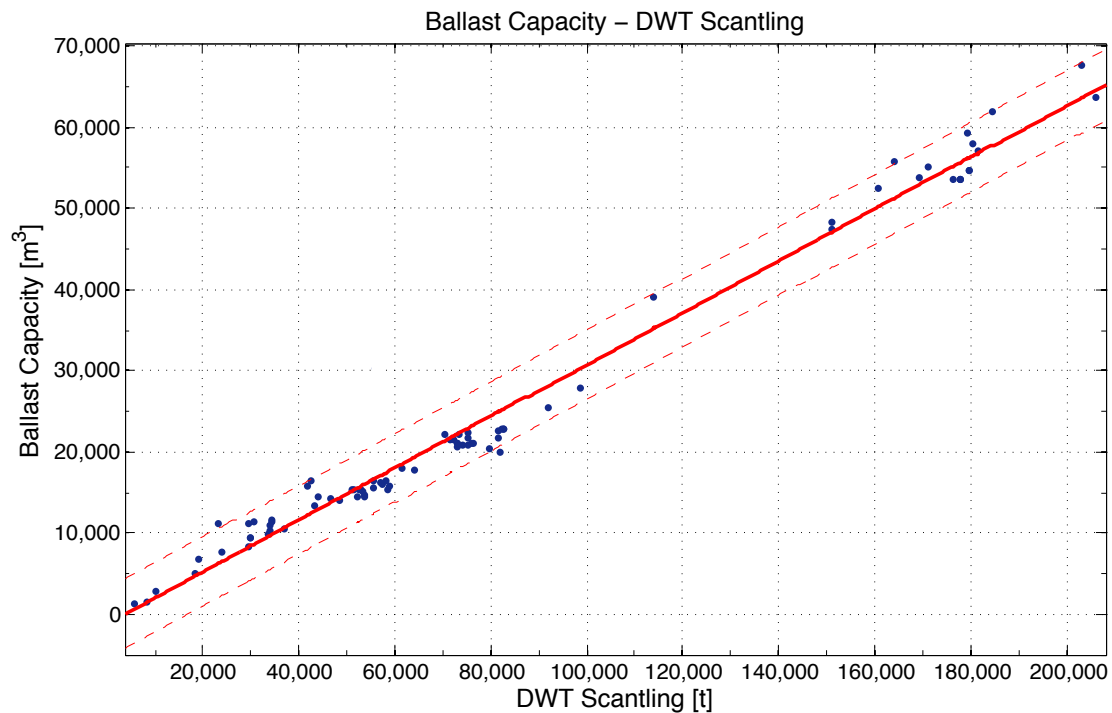
RMSE: 2446

$$V \text{ Cargo}_{Bale} = 0.9571 * V \text{ Cargo}_{Grain} + 86.59$$

Παρατηρήσεις:

Η χωρητικότητα των δεξαμενών φορτίου Bale μπορεί να προσεγγιστεί εύκολα και με μεγάλη ακρίβεια συναρτήσει της χωρητικότητας σε Grain σύμφωνα με την παραπάνω σχέση. Στα μικρά πλοία η χωρητικότητα σε Bale αποτελεί το 90% της αντίστοιχης σε Grain ενώ στα μεγάλα πλοία αυξάνεται γραμμικά έως 96%.

2.3.3. Όγκος δεξαμενών έρματος (Ballast Water Capacity)



Διάγραμμα 43: Ballast Capacity συναρτήσεως DWT Scantling

Linear model Poly1:

$$f(x) = p1 \cdot x + p2$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.3188 \quad (0.3103, 0.3273)$$

$$p2 = -1098 \quad (-1931, -266)$$

Goodness of fit:

SSE: 3.617e+08

R-square: 0.9857

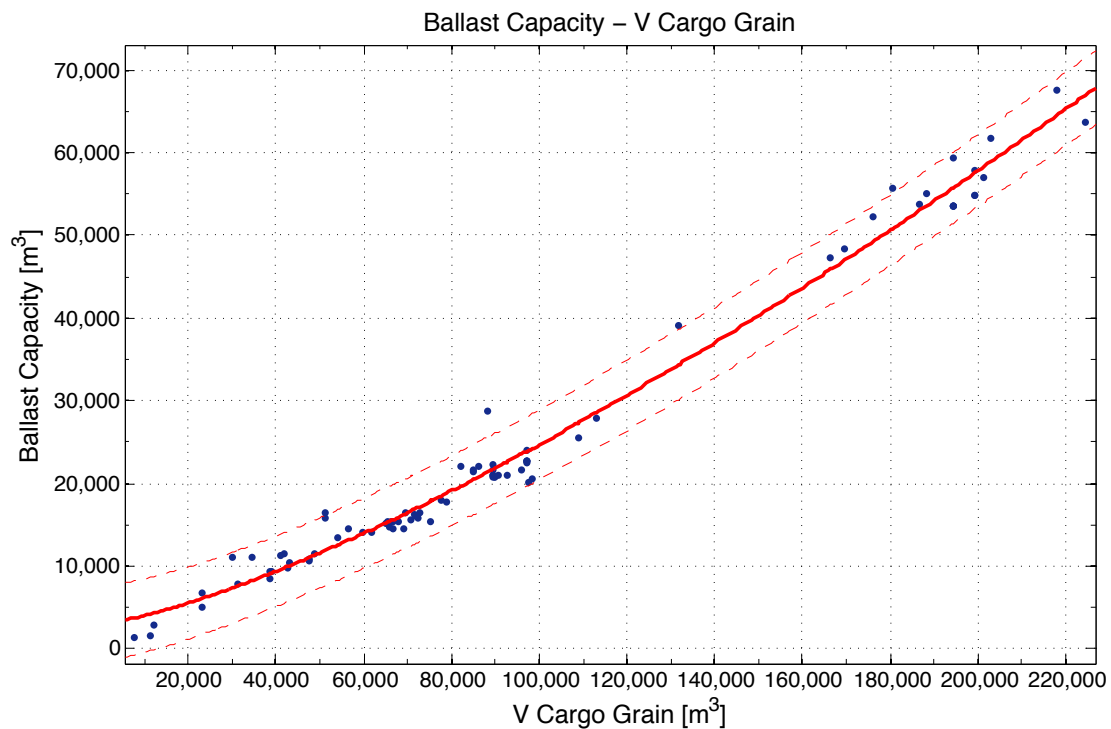
Adjusted R-square: 0.9855

RMSE: 2113

$$V_{Ballast} = 0.3188 \cdot DWT_{Scantling} - 1098$$

Παρατηρήσεις:

Η χωρητικότητα των δεξαμενών έρματος μπορεί να προσεγγιστεί στο στάδιο της προμελέτης του πλοίου με καλή συσχέτιση συναρτήσεως του DWT. Βλέπουμε ωστόσο πώς υπάρχουν σε αρκετά σημεία απόκλιση από την ευθεία της τάξης των 4000t. Παρατηρούμε ότι η χωρητικότητα έρματος κυμαίνεται μεταξύ 25% για τα μικρά έως 31,5% για τα μεγάλα πλοία. Τέλος αξίζει να σημειωθεί η υποεκτίμηση της ποσότητας για τα πλοία έως 47.000 τόνους DWT και η συστηματική υπερεκτίμηση για τα πλοία έως 100.000 τόνους.



Διάγραμμα 44: Ballast Capacity συναρτήσει V Cargo Grain

General model Power2:

$$f(x) = a \cdot x^b + c$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$\begin{aligned} a &= 0.004379 \quad (-0.001624, 0.01038) \\ b &= 1.339 \quad (1.229, 1.449) \\ c &= 3055 \quad (1226, 4884) \end{aligned}$$

Goodness of fit:

SSE: 3.595e+08

R-square: 0.9857

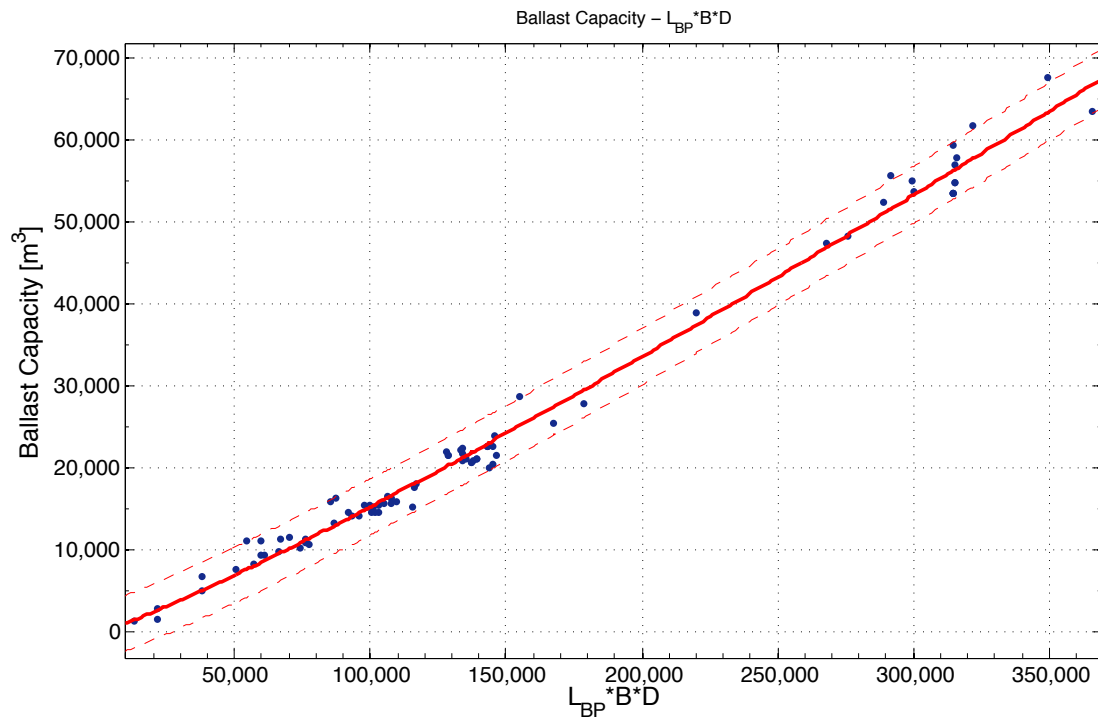
Adjusted R-square: 0.9854

RMSE: 2107

$$V \text{ Ballast} = 0.004379 * V_{\text{Grain}}^{1.339} + 3055$$

Παρατηρήσεις:

Η συσχέτιση της χωρητικότητας των δεξαμενών έρματος συναρτήσει της χωρητικότητας των δεξαμενών φορτίου παρουσιάζει παρόμοια χαρακτηριστικά με το προηγούμενο διάγραμμα του DWT Scantling έχοντας ίδιας τάξης μεγέθους αποκλίσεις. Αυτό συμβαίνει καθώς πλοία με ίδιο DWT και κατ' επέκταση ίδια χωρητικότητα δεξαμενών φορτίου μπορούν να διαθέτουν διαφορετικής χωρητικότητας δεξαμενές έρματος ανάλογα την κάθε σχεδίαση.



*Διάγραμμα 45: Ballast Capacity συναρτήσει $L_{BP} * B * D$*

General model Power1:

$$f(x) = a * x^b$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.03169 (0.02038, 0.04299)$$

$$b = 1.137 (1.108, 1.166)$$

Goodness of fit:

SSE: 2.392e+08

R-square: 0.9905

Adjusted R-square: 0.9904

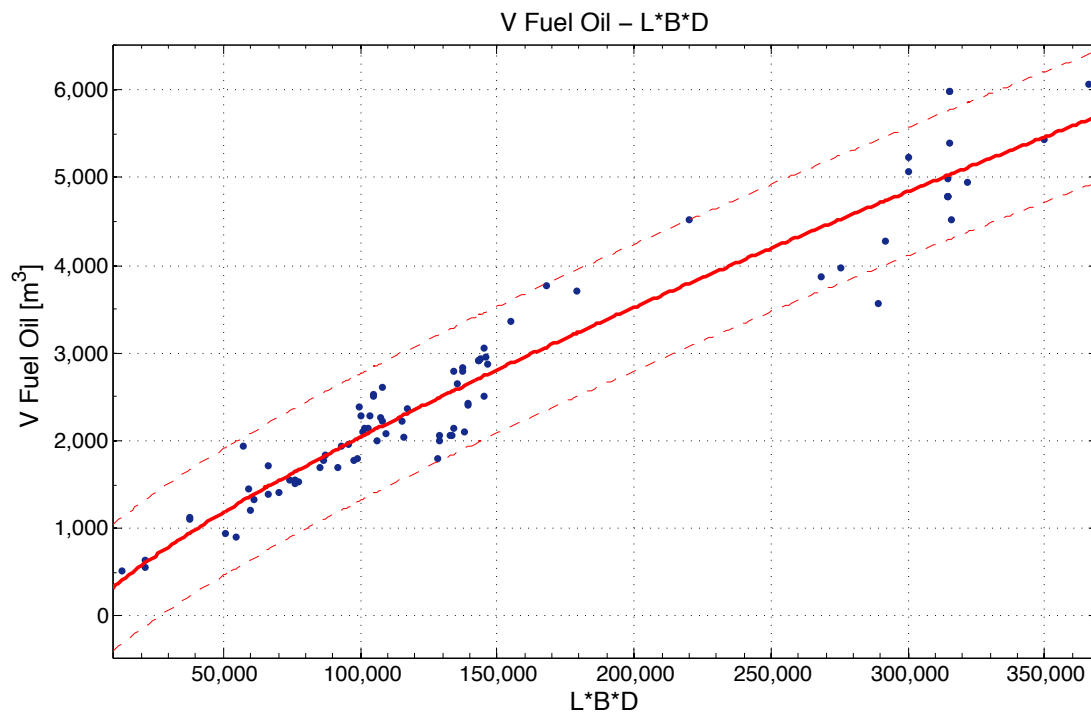
RMSE: 1708

$$V_{Ballast} = 0.03169 * (L_{BP} * B * D)^{1.137}$$

Παρατηρήσεις:

Όπως φαίνεται από το παραπάνω διάγραμμα, ο καλύτερος τρόπος εκτίμησης του Ballast Capacity είναι μέσω του γινομένου $L_{BP} * B * D$ καθώς παρουσιάζει τις καλύτερες παραμέτρους ποιότητας και της μικρότερης τάξης αποκλίσεις. Το γινόμενο αυτό αποτελεί δείκτη της χωρητικότητας της γάστρας, επομένως είναι αναμενόμενη η καλή συσχέτιση του με την χωρητικότητα των δεξαμενών έρματος.

2.3.4. Χωρητικότητα δεξαμενών καυσίμων (Fuel Oil Capacity)



Διάγραμμα 46: V Fuel Oil συναρτήσεως $L_{BP} * B * D$

General model Power1:

$$f(x) = a * x^b$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.2414 (0.09225, 0.3905)$$

$$b = 0.7855 (0.7351, 0.8358)$$

Goodness of fit:

SSE: 1.075e+07

R-square: 0.9316

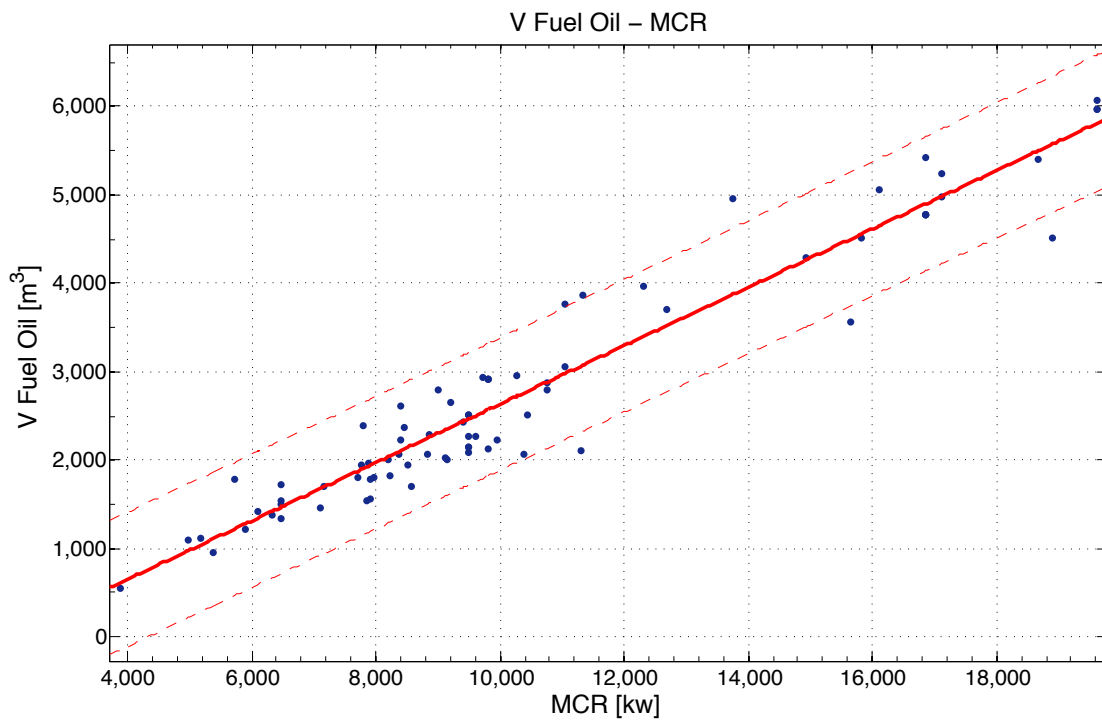
Adjusted R-square: 0.9308

RMSE: 359.8

$$V_{FUEL} = 0.2414 * L_{BP} * B * D + 0.7855$$

Παρατηρήσεις:

Η χωρητικότητα δεξαμενών καυσίμου παρουσιάζει γραμμική συσχέτιση συναρτήσεως του γινομένου $L_{BP} * B * D$ παρουσιάζοντας ωστόσο αποκλίσεις της τάξης των 700t. Όπως θα δούμε και στα παρακάτω διαγράμματα, οι αποκλίσεις αυτές στην εκτίμηση της χωρητικότητας σε καύσιμα μπορεί να οφείλονται στην διαφορετική ακτίνα ενέργειας των πλοίων.



Διάγραμμα 47: V Fuel Oil συναρτήσει MCR

Linear model Poly1:

$$f(x) = p1 * x + p2$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.3304 (0.3091, 0.3518)$$

$$p2 = -670.6 (-909, -432.2)$$

Goodness of fit:

SSE: 1.06e+07

R-square: 0.9261

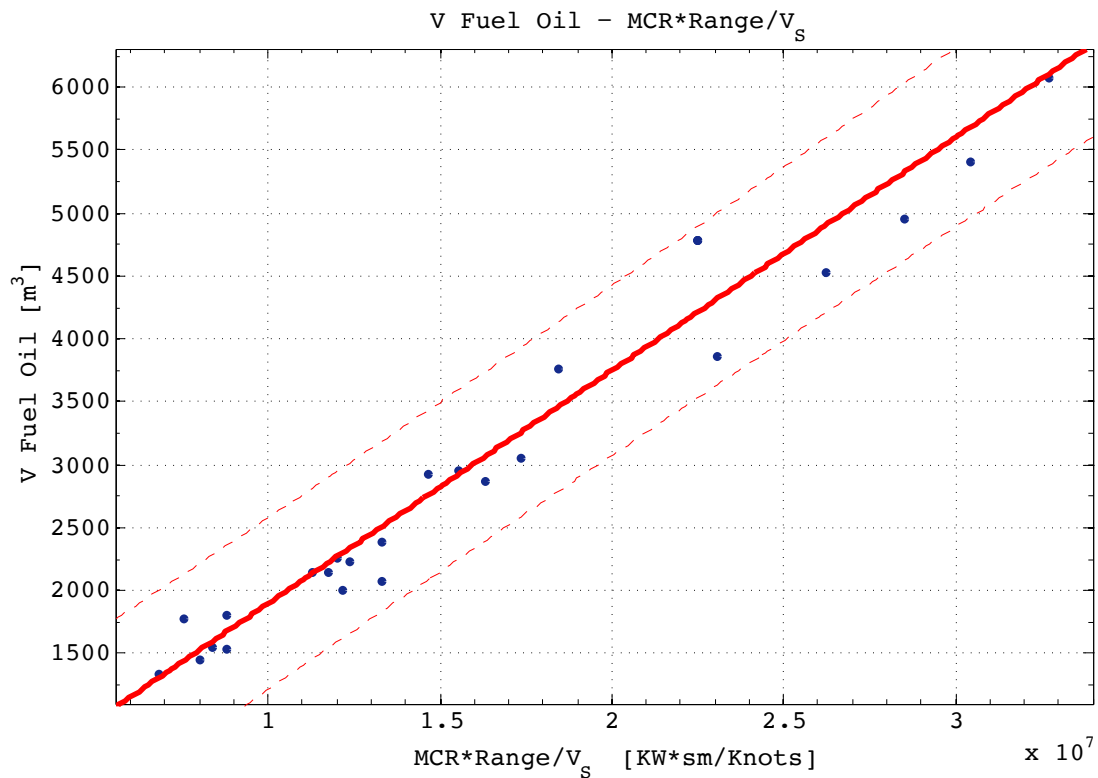
Adjusted R-square: 0.9252

RMSE: 373.4

$$V_{FUEL} = 0.3304 * MCR - 670.6$$

Παρατηρήσεις:

Αντίστοιχη εικόνα με το προηγούμενο διάγραμμα παρουσιάζει η χωρητικότητα δεξαμενών καυσίμων συναρτήσει της ισχύς του πλοίου έχοντας γραμμική συσχέτιση με αποκλίσεις της τάξης των 700t.



Διάγραμμα 48: V Fuel Oil συνάρτησε MCR*Range/V_s

Linear model Poly1:

$$f(x) = p1*x + p2$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.0001853 \text{ (0.0001679, 0.0002026)}$$

$$p2 = 45.35 \text{ (-269.8, 360.5)}$$

Goodness of fit:

SSE: 2.575e+06

R-square: 0.9507

Adjusted R-square: 0.9487

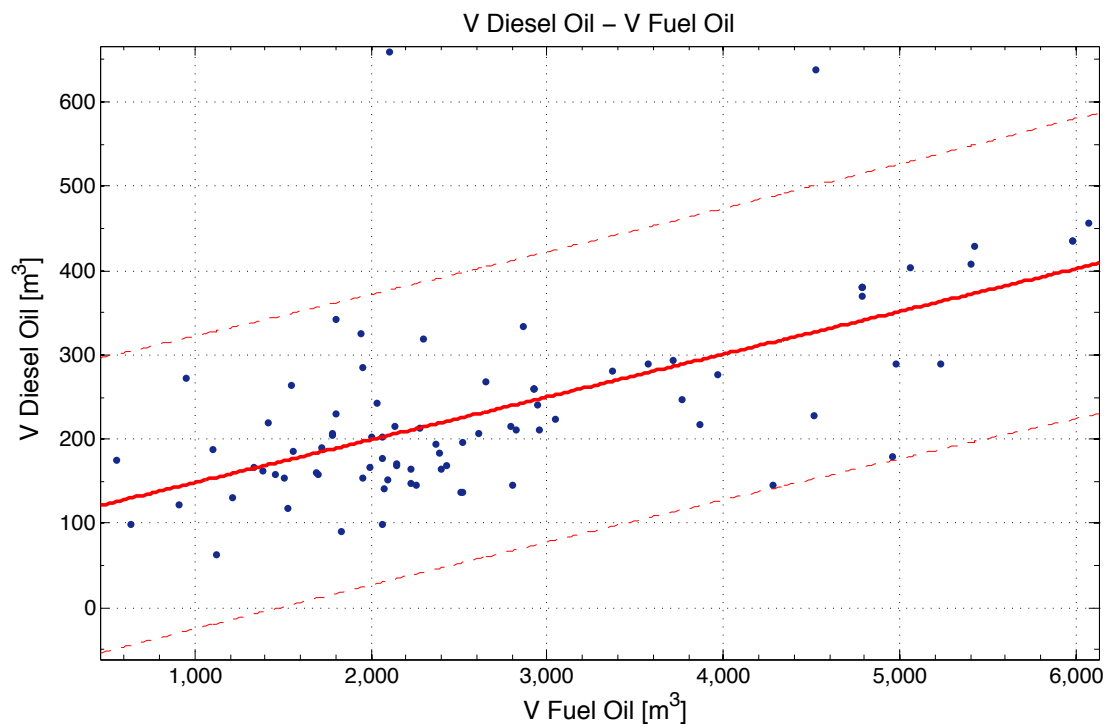
RMSE: 320.9

$$V_{FUEL} = 0.0001853 * \frac{MCR * Range}{V_s} + 45.35$$

Παρατηρήσεις:

Ακόμα καλύτερα αποτελέσματα με καλύτερη συσχέτιση και μικρότερες αποκλίσεις παρουσιάζει το παραπάνω διάγραμμα στο οποίο υπεισέρχεται η ακτίνα ενέργειας και η ταχύτητα του πλοίου. Επιβεβαιώνεται λοιπόν η αλληλεπίδραση αυτών των 3 παραγόντων στον καθορισμό της τελικής χωρητικότητας των δεξαμενών καυσίμων. Σημειώνεται ο περιορισμένος αριθμός πλοίων που διαθέταμε πληροφορίες για την ακτίνα ενέργειας.

2.3.5. Όγκος δεξαμενών Diesel (Diesel Oil Capacity)



Διάγραμμα 49: $V_{Diesel\ Oil}$ συναρτήσει $V_{Fuel\ Oil}$

Linear model Poly1:

$$f(x) = p1 * x + p2$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.05078 \quad (0.03693, 0.06463)$$

$$p2 = 97.74 \quad (55.53, 140)$$

Goodness of fit:

SSE: 6.059e+05

R-square: 0.3933

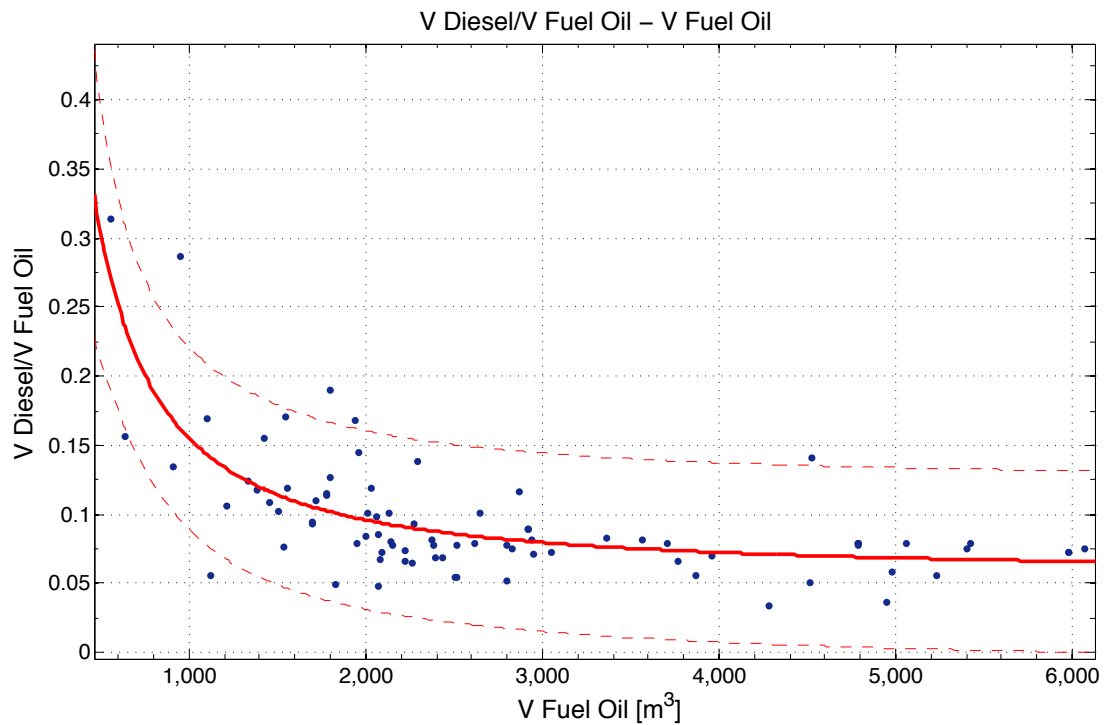
Adjusted R-square: 0.3859

RMSE: 85.96

$$V_{DIESEL} = 0.05078 * V_{FO} + 97.74$$

Παρατηρήσεις:

Η συσχέτιση της χωρητικότητας των δεξαμενών Diesel σε σχέση με την χωρητικότητα σε Fuel δεν παρουσιάζει αξιόπιστα αποτελέσματα έχοντας μεγάλες αποκλίσεις σε όλο το εύρος των σημείων. Ωστόσο η παραπάνω σχέση μπορεί να δώσει μια ενδεικτική τιμή στο στάδιο της προμελέτης του πλοίου. Οι αποκλίσεις αυτές είναι αναμενόμενες καθώς το κάθε πλοίο διαθέτει διαφορετικού μεγέθους ηλεκτρομηχανές.



Διάγραμμα 50: V Diesel Oil/V Fuel Oil συναρτήσει V Fuel Oil

General model Power2:

$$f(x) = a \cdot x^b + c$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$\begin{aligned} a &= 966.4 \quad (-2669, 4602) \\ b &= -1.331 \quad (-1.919, -0.7436) \\ c &= 0.05707 \quad (0.03148, 0.08266) \end{aligned}$$

Goodness of fit:

SSE: 0.08285

R-square: 0.5137

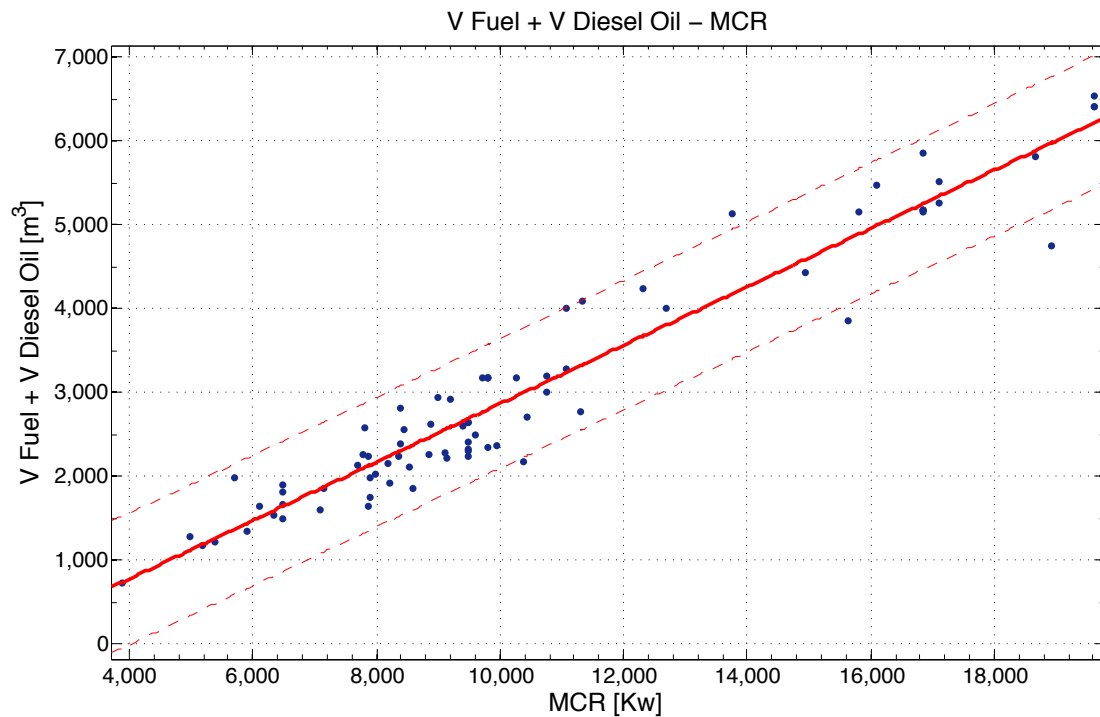
Adjusted R-square: 0.5015

RMSE: 0.03218

$$\frac{V_{DIESEL}}{V_{FUEL}} = 966.4 * V_{FUEL}^{-1.331} + 0.05707$$

Παρατηρήσεις:

Η ποιότητα προσέγγισης και σε αυτό το διάγραμμα δεν είναι ικανοποιητική και το μόνο συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί είναι η μείωση του ποσοστού της χωρητικότητας δεξαμενών Diesel σε σχέση με αυτή των καυσίμων, καθώς αυξάνεται η χωρητικότητα σε Fuel.



Διάγραμμα 51: V Fuel + V Diesel Oil συναρτήσει MCR

Linear model Poly1:

$$f(x) = p1 * x + p2$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.348 \quad (0.326, 0.37)$$

$$p2 = -612.8 \quad (-858.5, -367.1)$$

Goodness of fit:

SSE: 1.126e+07

R-square: 0.929

Adjusted R-square: 0.9281

RMSE: 384.8

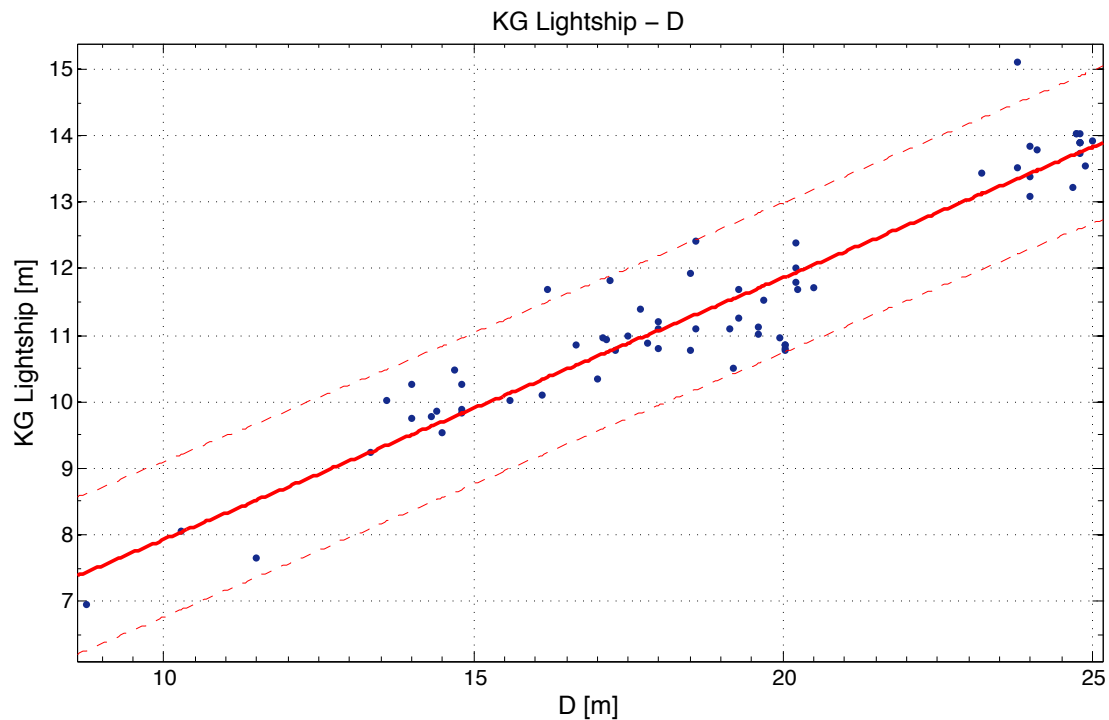
$$V_{DIESEL} + V_{FUEL} = 0.348 * MCR - 612.8$$

Παρατηρήσεις:

Στο συγκεκριμένο διάγραμμα παρατηρούμε καλή συσχέτιση του αθροίσματος της χωρητικότητας δεξαμενών καυσίμων και Diesel συναρτήσει του MCR. Μέσω του συγκεκριμένου διαγράμματος είναι ίσως ο καλύτερος τρόπος προσδιορισμού της χωρητικότητας σε Diesel και καυσίμων στο στάδιο της προμελέτης του πλοίου με δεδομένο όμως την χωρητικότητα ενός εκ των δύο μεγεθών.

2.4. Κέντρα βαρών (Centers of Gravity)

2.4.1. Κέντρο βάρους Lightship



Διάγραμμα 52: KG Lightship συναρτήσει D

Linear model Poly1:

$$f(x) = p1 * x + p2$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.3933 (0.359, 0.4277)$$

$$p2 = 3.996 (3.329, 4.663)$$

Goodness of fit:

SSE: 20.42

R-square: 0.8893

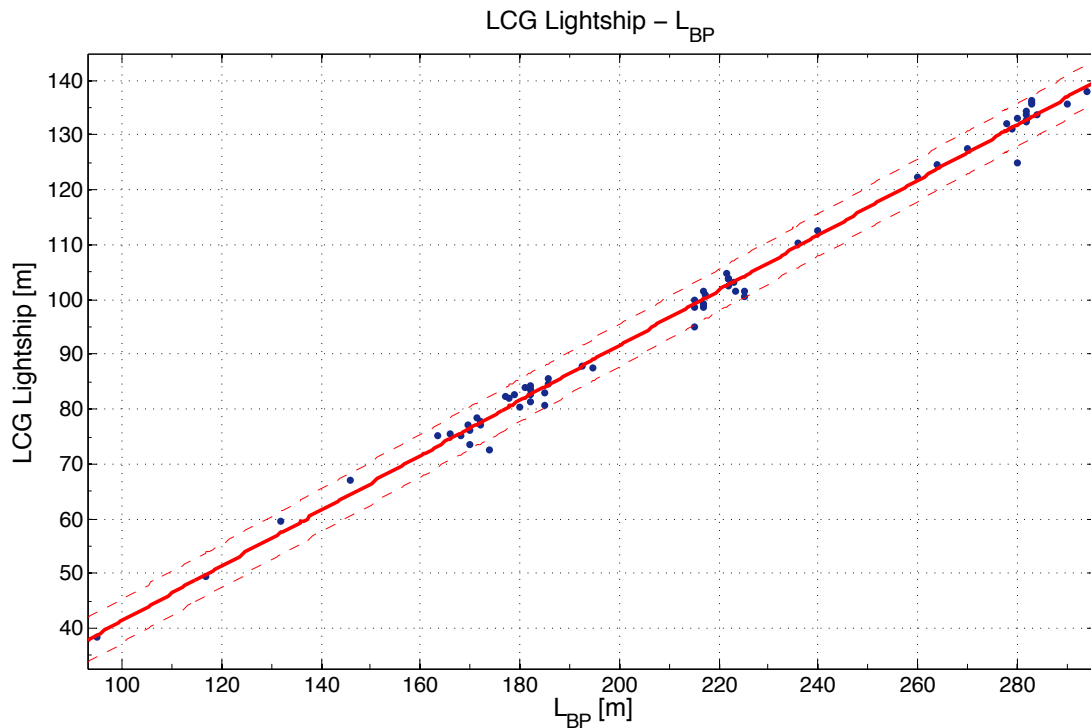
Adjusted R-square: 0.8876

RMSE: 0.5605

$$KG_{LS} = 0.3933 * D + 3.996$$

Παρατηρήσεις:

Στον προσδιορισμό του κατακόρυφου κέντρου βάρους του Lightship συναρτήσει του κοίλου D παρατηρούμε μια γραμμική συσχέτιση έχοντας αξιοσημείωτες αποκλίσεις της τάξης του 1.2m καθιστώντας το αποτέλεσμα όχι και τόσο ακριβές. Σημειώνεται ότι για μικρά πλοία το KG του Lightship αποτελεί το 79% του κοίλου D ενώ για τα μεγάλα πλοία το ποσοστό μειώνεται γραμμικά στο 55%.



Διάγραμμα 53: LCG Lightship συναρτήσει L_{BP}

Linear model Poly1:

$$f(x) = p1 * x + p2$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.5028 (0.4929, 0.5128)$$

$$p2 = -8.915 (-11.09, -6.743)$$

Goodness of fit:

SSE: 238.4

R-square: 0.9937

Adjusted R-square: 0.9936

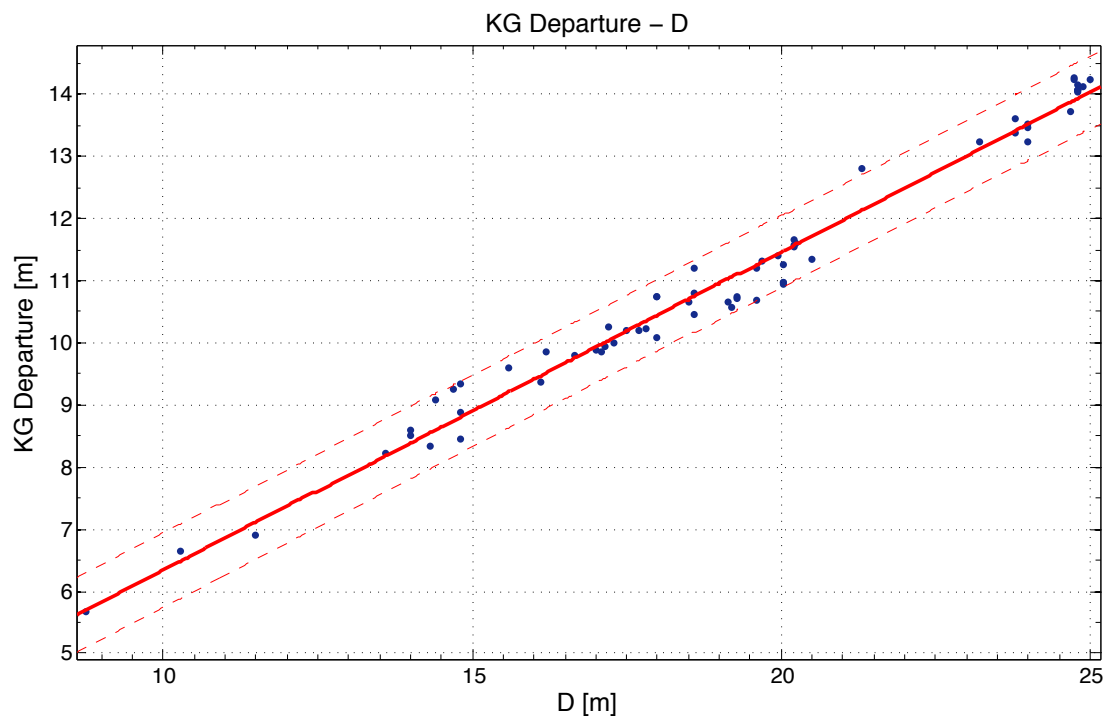
RMSE: 1.915

$$LCG_{LS} = 0.5028 * L_{BP} - 8.915$$

Παρατηρήσεις:

Στο διάγραμμα παρατηρούμε ότι η διαμήκης θέση του κέντρου βάρους του Lightship παρουσιάζει καλά αποτελέσματα συναρτήσει του μήκους με τις ποσοστιαίες αποκλίσεις να είναι έως 3% καθιστώντας την πρόβλεψη του LCG_{LS} από την παραπάνω σχέση αξιόπιστη. Το LCG Lightship αποτελεί το 42,5% του L_{BP} για μικρά μήκη και αντίστοιχα το 47% για μεγάλα.

2.4.2. Κέντρο βάρους σε κατάσταση Full Load Departure



Διάγραμμα 54: KG Departure συναρτήσει D

Linear model Poly1:

$$f(x) = p1 * x + p2$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.5126 (0.4944, 0.5308)$$

$$p2 = 1.215 (0.8607, 1.57)$$

Goodness of fit:

SSE: 5.152

R-square: 0.9805

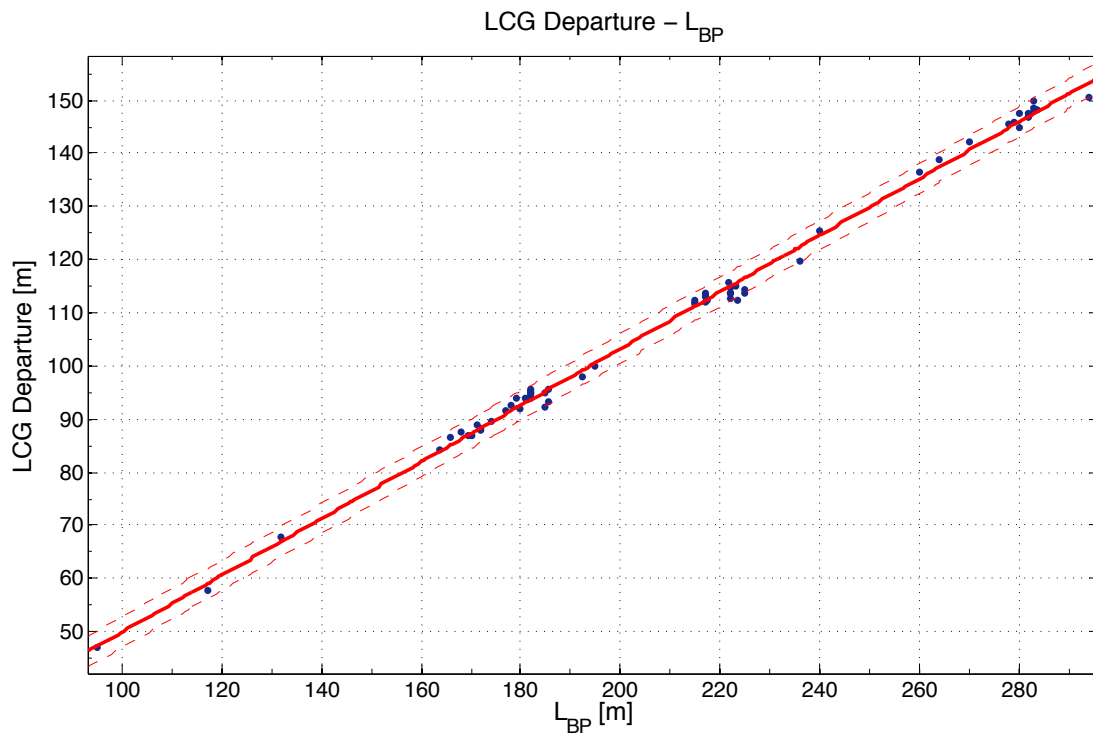
Adjusted R-square: 0.9802

RMSE: 0.286

$$KG_{DEPARTURE} = 0.5126 * D + 1.215$$

Παρατηρήσεις:

Η εκτίμηση του KG σε κατάσταση Full Load Departure μπορεί να γίνει με καλή προσέγγιση συναρτήσει του κοίλου D παρουσιάζοντας αποκλίσεις της τάξης του 0.5m που στο στάδιο της προμελέτης είναι αποδεκτές. Αξίζει να σημειωθεί ότι για τα μικρά πλοία το KG αποτελεί το 64% του D ενώ μειώνεται σταθερά έως το 56% για τα μεγάλα πλοία.



Διάγραμμα 55: LCG Departure συναρτήσει L_{BP}

Linear model Poly1:

$$f(x) = p1 * x + p2$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.5331 (0.5257, 0.5406)$$

$$p2 = -3.361 (-4.986, -1.735)$$

Goodness of fit:

SSE: 118.3

R-square: 0.9969

Adjusted R-square: 0.9969

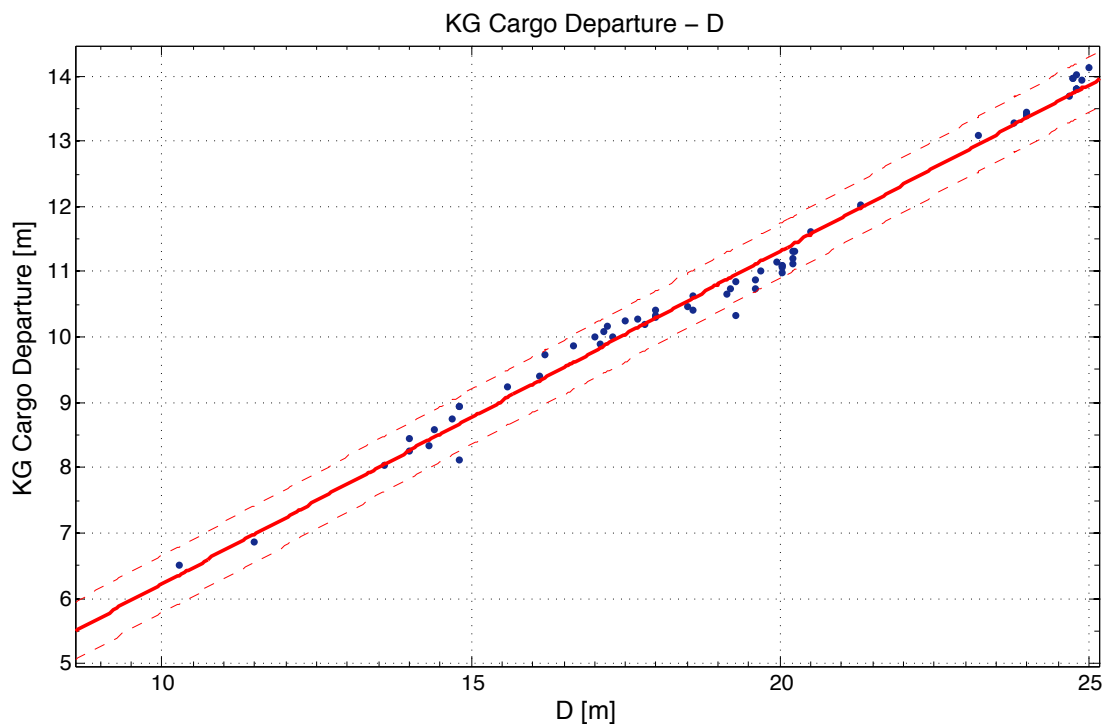
RMSE: 1.37

$$LCG_{DEPARTURE} = 0.5331 * L_{BP} - 3.361$$

Παρατηρήσεις:

Όπως και στα αντίστοιχα διαγράμματα του κέντρου βάρους του Lightship, έτσι και εδώ βλέπουμε την εξαιρετική συσχέτιση του LCG_{DEP} συναρτήσει του L_{BP} έχοντας ελάχιστες αποκλίσεις από τα πραγματικά δεδομένα και τα όρια πρόβλεψης πάρα πολύ κοντά στην ευθεία. Παρατηρούμε ότι παρουσιάζει την καλύτερη συσχέτιση απ' όλα τα διαγράμματα προσδιορισμού του LCG γεγονός που μας δείχνει την άμεση συσχέτιση του με το μήκος. Σαν ποσοστό του L_{BP} , το LCG_{DEP} κυμαίνεται μεταξύ 48-53% για μικρά και μεγάλα πλοία αντίστοιχα.

2.4.3. Κέντρο βάρους φορτίου σε κατάσταση Full Load Departure



Διάγραμμα 56: KG Cargo Departure συναρτήσει D

Linear model Poly1:

$$f(x) = p1 * x + p2$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.5097 (0.4955, 0.5238)$$

$$p2 = 1.124 (0.8477, 1.4)$$

Goodness of fit:

SSE: 2.565

R-square: 0.9886

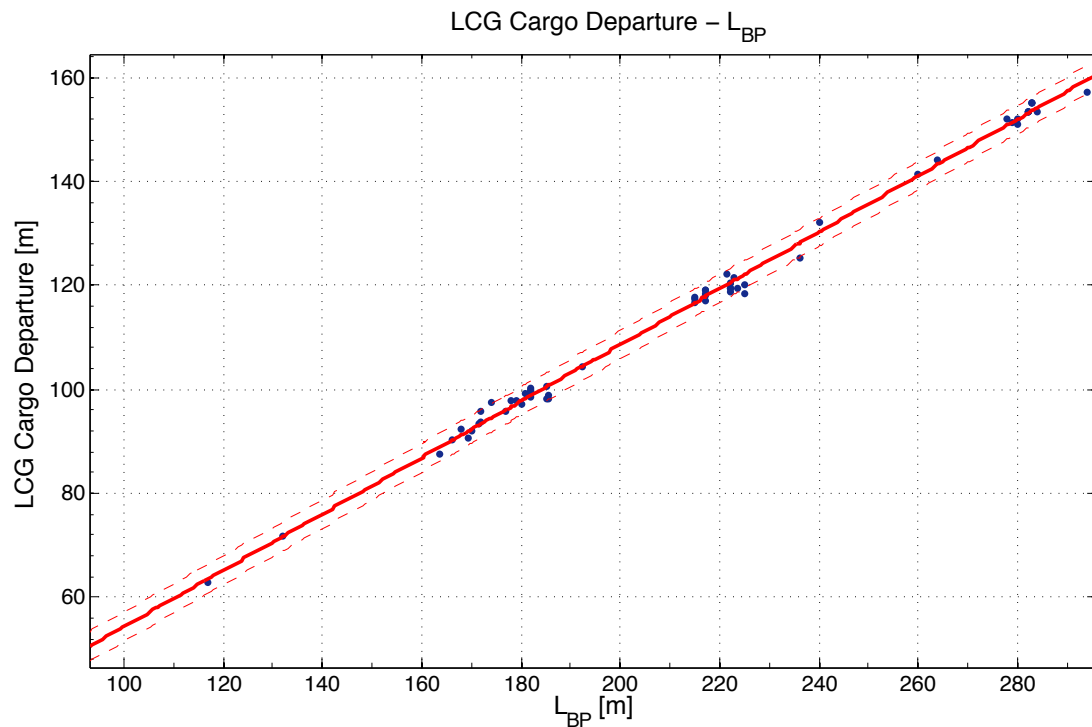
Adjusted R-square: 0.9884

RMSE: 0.2068

$$KG \text{ Cargo}_{DEPARTURE} = 0.5097 * D + 1.124$$

Παρατηρήσεις:

Στο διάγραμμα αυτό παρατηρούμε καλή συσχέτιση του κατακόρυφου κέντρου βάρους του φορτίου σε σχέση με το κοίλο D παρουσιάζοντας αποκλίσεις της τάξης του 0.4m και αποτελώντας έναν αξιόπιστο τρόπο προσέγγισης του.



Διάγραμμα 57: LCG Cargo Departure συναρτήσει L_{BP}

Linear model Poly1:

$$f(x) = p1 * x + p2$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.5418 \quad (0.534, 0.5496)$$

$$p2 = 0.1962 \quad (-1.508, 1.9)$$

Goodness of fit:

SSE: 106.5

R-square: 0.9969

Adjusted R-square: 0.9969

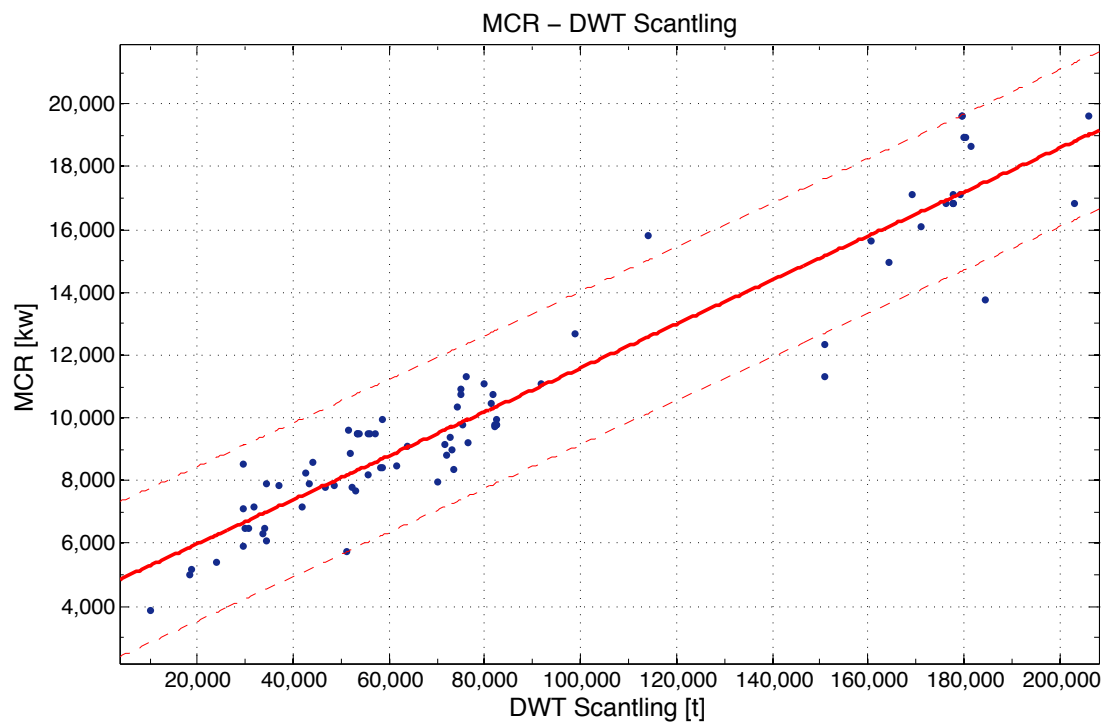
RMSE: 1.332

$$LCG \text{ Cargo}_{DEPARTURE} = 0.5418 * L_{BP} + 0.1962$$

Παρατηρήσεις:

Όπως αναμενόταν, το LCG του φορτίου παρουσιάζει εξαιρετική προσέγγιση με το μήκος δίνοντας πολύ αξιόπιστα αποτελέσματα με πολύ μικρές αποκλίσεις.

2.5. Εκτίμηση ισχύος πρόωσης (MCR)



Διάγραμμα 58: MCR συναρτήσει DWT Scantling

Linear model Poly1:

$$f(x) = p1 * x + p2$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.07 \quad (0.06515, 0.07485)$$

$$p2 = 4594 \quad (4099, 5089)$$

Goodness of fit:

SSE: 1.186e+08

R-square: 0.9117

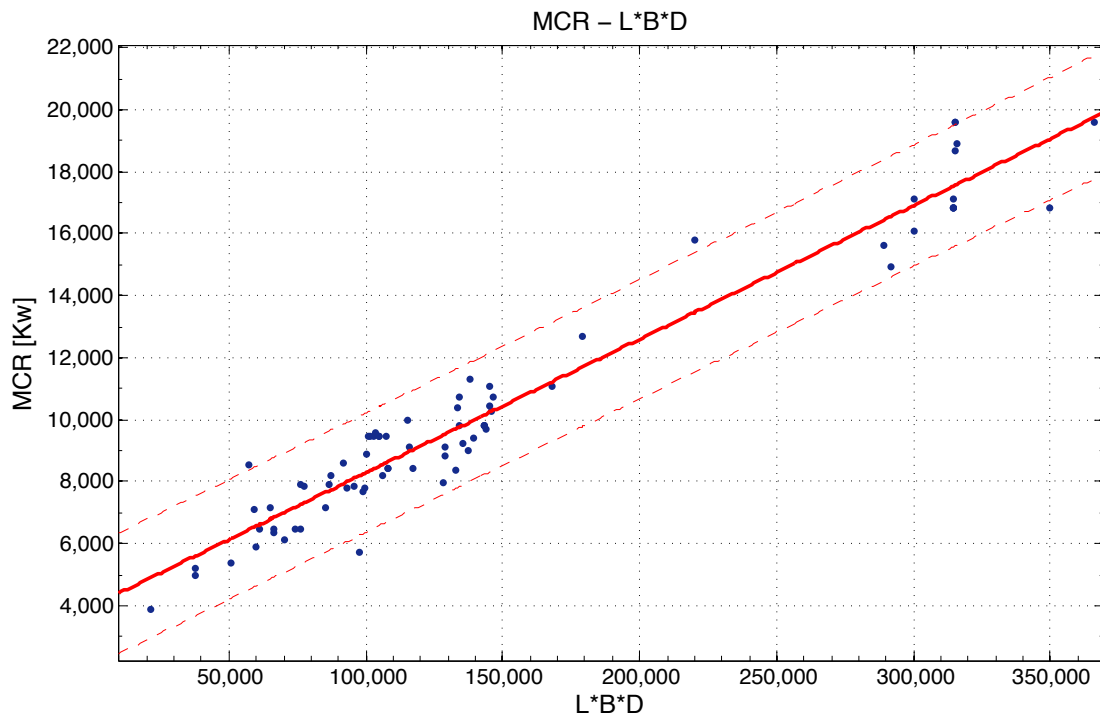
Adjusted R-square: 0.9106

RMSE: 1217

$$MCR = 0.07 * DWT_{Scantling} + 4594$$

Παρατηρήσεις:

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι η ισχύς πρόωσης των πλοίων παρουσιάζει καλή γραμμική συσχέτιση με το DWT έχοντας όμως σε ένα μεγάλο πλήθος πλοίων μεγάλες αποκλίσεις από τις υπολογιζόμενες τιμές. Οι διακυμάνσεις αυτές δικαιολογούνται καθώς η απαιτούμενη ισχύς του πλοίου εξαρτάται από πολλές επιπρόσθετες παραμέτρους όπως η ταχύτητα σχεδίασης του πλοίου, η ακτίνα ενέργειας, η αντίσταση του, καθώς και ο βαθμός απόδοσης της έλικας.



Διάγραμμα 59: MCR συναρτήσει $L_{BP} * B * D$

Linear model Poly1:

$$f(x) = p1 * x + p2$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.04313 (0.0407, 0.04557)$$

$$p2 = 3975 (3554, 4395)$$

Goodness of fit:

SSE: 6.779e+07

R-square: 0.944

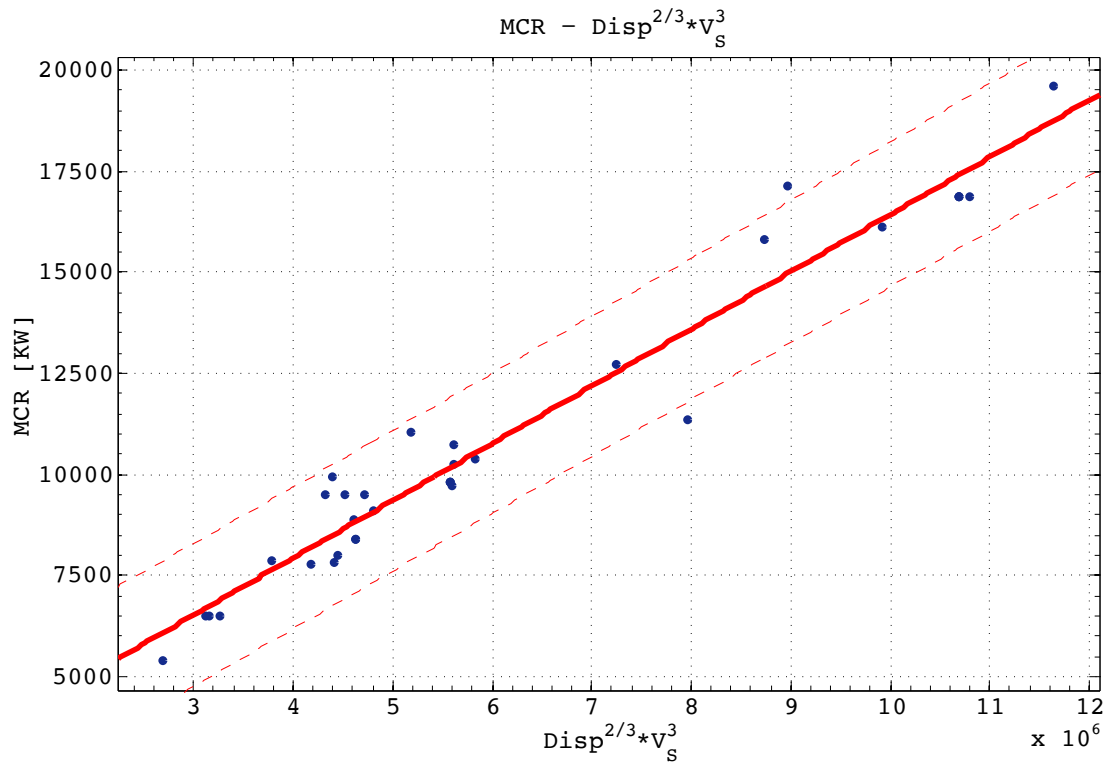
Adjusted R-square: 0.9433

RMSE: 957.2

$$MCR = 0.04313 * (L_{BP} * B * D) + 3975$$

Παρατηρήσεις:

Σε αυτό το διάγραμμα παρατηρούμε ότι η ισχύς παρουσιάζει καλύτερη συσχέτιση συναρτήσει του γινομένου $L_{BP} * B * D$ σε σχέση με το προηγούμενο διάγραμμα έχοντας αρκετά μικρότερες αποκλίσεις και στενότερα όρια πρόβλεψης. Αυτό μας δείχνει την επίδραση του όγκου της γάστρας στο MCR, που σχετίζεται εν μέρει με την αντίσταση του πλοίου και την ισχύ πρόωσης.



Διάγραμμα 60: $\Delta^{2/3} * V_s^3$ συναρτήσει MCR

Linear model Poly1:

$$f(x) = p1 * x + p2$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.001416 (0.001301, 0.00153)$$

$$p2 = 2273 (1517, 3030)$$

Goodness of fit:

SSE: 2.253e+07

R-square: 0.9521

Adjusted R-square: 0.9506

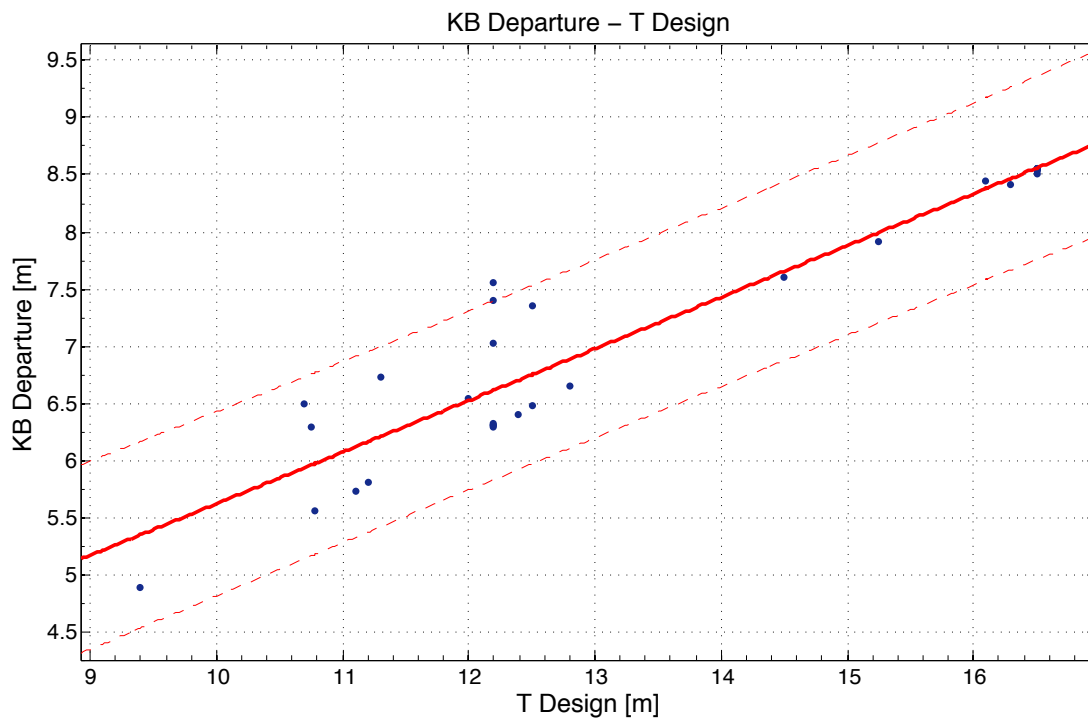
RMSE: 839

$$MCR = 0.001416 * \Delta^{\frac{2}{3}} * V_s^3 + 2273$$

Παρατηρήσεις:

Παρόμοια αποτελέσματα με ίδια τάξη μεγέθους αποκλίσεις παρουσιάζει και αυτό το διάγραμμα του MCR με το γινόμενο $\Delta^{2/3} * V_s^3$ δείχνοντας ωστόσο την γραμμική συσχέτιση του εκτοπίσματος και της ταχύτητας με την εγκατεστημένη ισχύ.

2.6. Βασικά υδροστατικά στοιχεία



Διάγραμμα 61: KB Departure συναρτήσει T Design

Linear model Poly1:

$$f(x) = p1 * x + p2$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.4512 (0.3899, 0.5126)$$

$$p2 = 1.113 (0.2846, 1.941)$$

Goodness of fit:

SSE: 4.062

R-square: 0.8863

Adjusted R-square: 0.8824

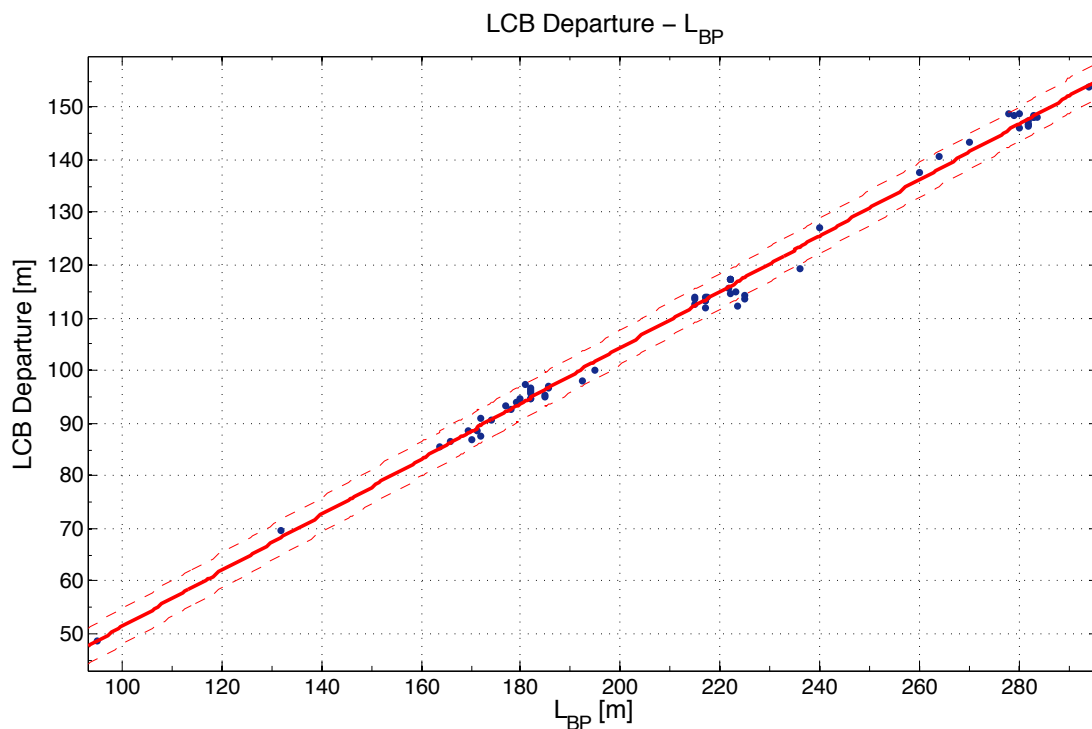
RMSE: 0.3743

$$KB_{DEPARTURE} = 0.4512 * T_{DESIGN} + 1.113$$

Παρατηρήσεις:

Διαθέτοντας λίγα δεδομένα, παρατηρούμε ότι το κατακόρυφο κέντρο άντωσης KB παρουσιάζει συσχέτιση με το βύθισμα ωστόσο υπάρχουν αποκλίσεις της τάξης του 0.8m. Σημειώνεται ότι το KB αντιστοιχεί στην κατάσταση Full Load Departure. Παρατηρούμε όμως ότι για βύθισμα μεγαλύτερο από 14m, το διάγραμμα δίνει εξαιρετικά αποτελέσματα ωστόσο λόγω του μικρού πλήθους των δεδομένων σε αυτό το διάστημα δεν μπορεί να εξαχθεί κάποιο ασφαλές συμπέρασμα. Ποσοστιαία, το KB ξεκινάει από 57% του βυθίσματος για μικρά πλοία και μειώνεται γραμμικά έως 52%.

2.6.1. Διάμηκες κέντρο άντωσης LCB (Longitudinal Center of Buoyancy)



Διάγραμμα 62: LCB Departure συναρτήσει L_{BP}

Linear model Poly1:

$$f(x) = p1 * x + p2$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.5299 \quad (0.5207, 0.5391)$$

$$p2 = -1.598 \quad (-3.627, 0.4315)$$

Goodness of fit:

SSE: 159.9

R-square: 0.9954

Adjusted R-square: 0.9953

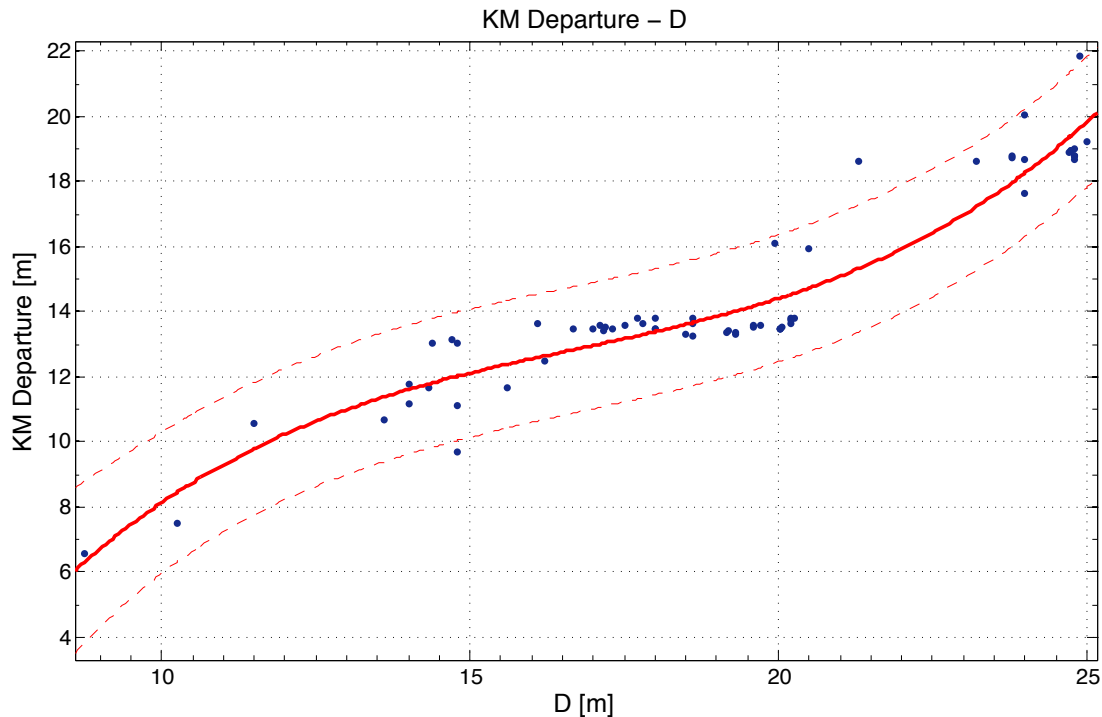
RMSE: 1.619

$$LCB_{DEPARTURE} = 0.5299 * L_{BP} - 1.598$$

Παρατηρήσεις:

Για το διάμηκες κέντρο άντωσης παρατηρούμε την εξαιρετική συσχέτιση του με το μήκος L_{BP} έχοντας ελάχιστες αποκλίσεις και αποτελώντας έναν πολύ χρήσιμο τρόπο εκτίμησης του LCB στο στάδιο της προμελέτης. Σημειώνεται επίσης ότι για όλα τα μεγέθη των πλοίων, το LCB αποτελεί περίπου το 52% του μήκους.

2.6.2. Μετάκεντρο ΚΜ



Διάγραμμα 63: KM Departure συναρτήσει D

Linear model Poly3:

$$f(x) = p1*x^3 + p2*x^2 + p3*x + p4$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.00643 \quad (0.00342, 0.00944)$$

$$p2 = -0.3231 \quad (-0.4835, -0.1627)$$

$$p3 = 5.82 \quad (3.076, 8.564)$$

$$p4 = -24.18 \quad (-39.24, -9.117)$$

Goodness of fit:

SSE: 55.94

R-square: 0.9086

Adjusted R-square: 0.9041

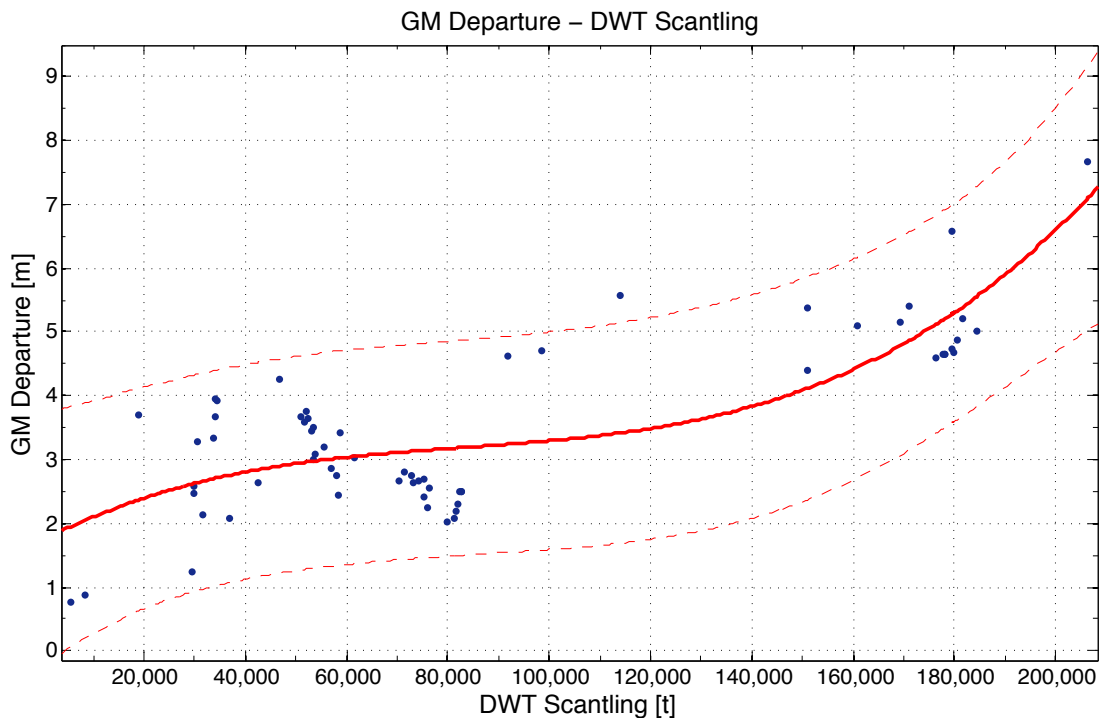
RMSE: 0.9576

$$KM_{DEPARTURE} = 0.00643 * D^3 - 0.3231 * D^2 + 5.82 * D - 24.18$$

Παρατηρήσεις:

Σε αυτό το διάγραμμα παρατηρούμε ότι το ΚΜ, σε κατάσταση Full Load Departure, παρουσιάζει συσχέτιση με το κοίλο D ως πολυώνυμο τρίτου βαθμού παρ' όλα αυτά υπάρχει σημαντική διασπορά των σημείων. Αξίζει να σημειωθεί ότι όλα τα πλοία με κοίλο από 16-20.5m έχουν ΚΜ στο διάστημα 13-14m.

2.6.3. Μετακεντρικό ύψος GM (Metacentric Height)



Διάγραμμα 64: GM Departure συναρτήσει DWT Scantling

Linear model Poly3:

$$f(x) = p1*x^3 + p2*x^2 + p3*x + p4$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$\begin{aligned} p1 &= 1.717e-15 \quad (-4.63e-17, 3.48e-15) \\ p2 &= -4.278e-10 \quad (-9.487e-10, 9.296e-11) \\ p3 &= 4.128e-05 \quad (-2.666e-06, 8.523e-05) \\ p4 &= 1.728 \quad (0.6078, 2.848) \end{aligned}$$

Goodness of fit:

SSE: 41.13

R-square: 0.6272

Adjusted R-square: 0.6086

RMSE: 0.828

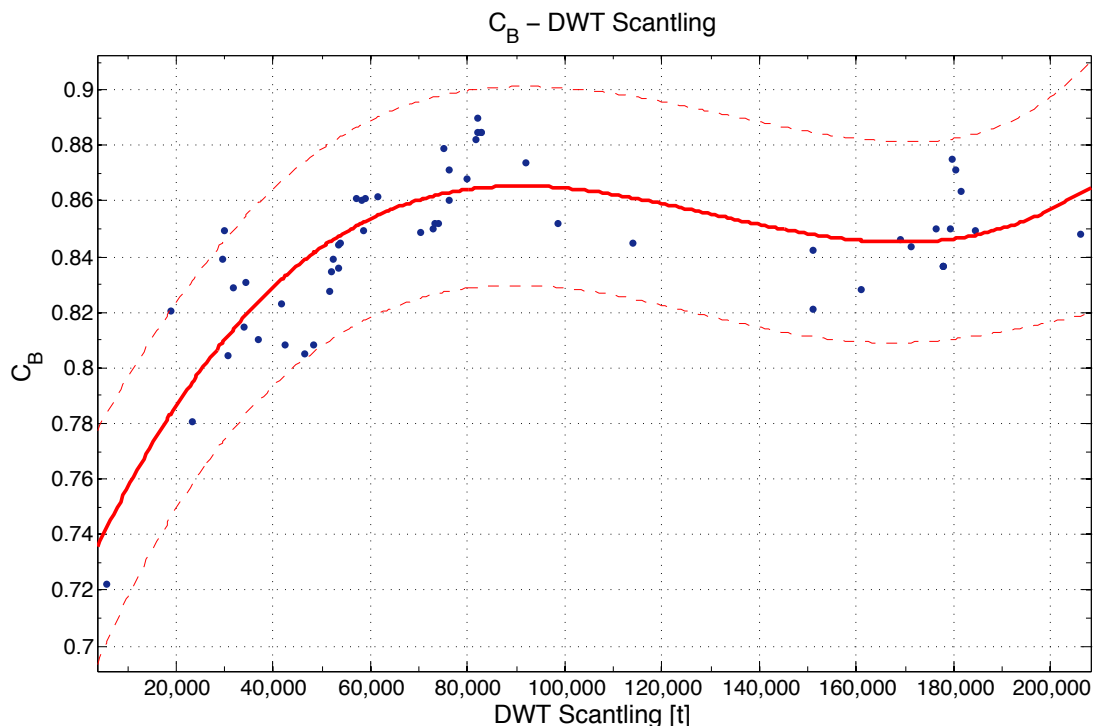
$$GM_{DEPARTURE} = 1.717 * 10^{-15} * DWT_{Scantling}^3 - 4.278 * 10^{-10} * DWT_{Scantling}^2 + 4.128 * 10^{-5} * DWT_{Scantling} + 1.728$$

Παρατηρήσεις:

Το διάγραμμα το GM Departure σε σχέση με το DWT Scantling δεν παρουσιάζει καλή συσχέτιση έχοντας αποκλίσεις έως και 1,2m. Χρησιμοποιήθηκε πολυώνυμο 3^{ου} βαθμού για καλύτερη προσέγγιση ωστόσο πάλι το αποτέλεσμα κρίνεται αναξιόπιστο. Σημειώνεται ότι το διάγραμμα παρουσιάζεται μόνο ως αναφορά ώστε ο μελετητής να γνωρίζει το εύρος της διακύμανσης του GM ανάλογα με το μέγεθος του πλοίου.

2.7. Λοιπές παράμετροι σχεδίασης

2.7.1. Συντελεστής γάστρας C_B (Hull Coefficient)



Διάγραμμα 65: C_B συναρτήσει DWT Scantling

Linear model Poly3:

$$f(x) = p1 * x^3 + p2 * x^2 + p3 * x + p4$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$\begin{aligned} p1 &= 8.366e-17 \quad (4.44e-17, 1.229e-16) \\ p2 &= -3.263e-11 \quad (-4.446e-11, -2.08e-11) \\ p3 &= 3.856e-06 \quad (2.823e-06, 4.889e-06) \\ p4 &= 0.7217 \quad (0.6946, 0.7488) \end{aligned}$$

Goodness of fit:

SSE: 0.01566

R-square: 0.6537

Adjusted R-square: 0.6338

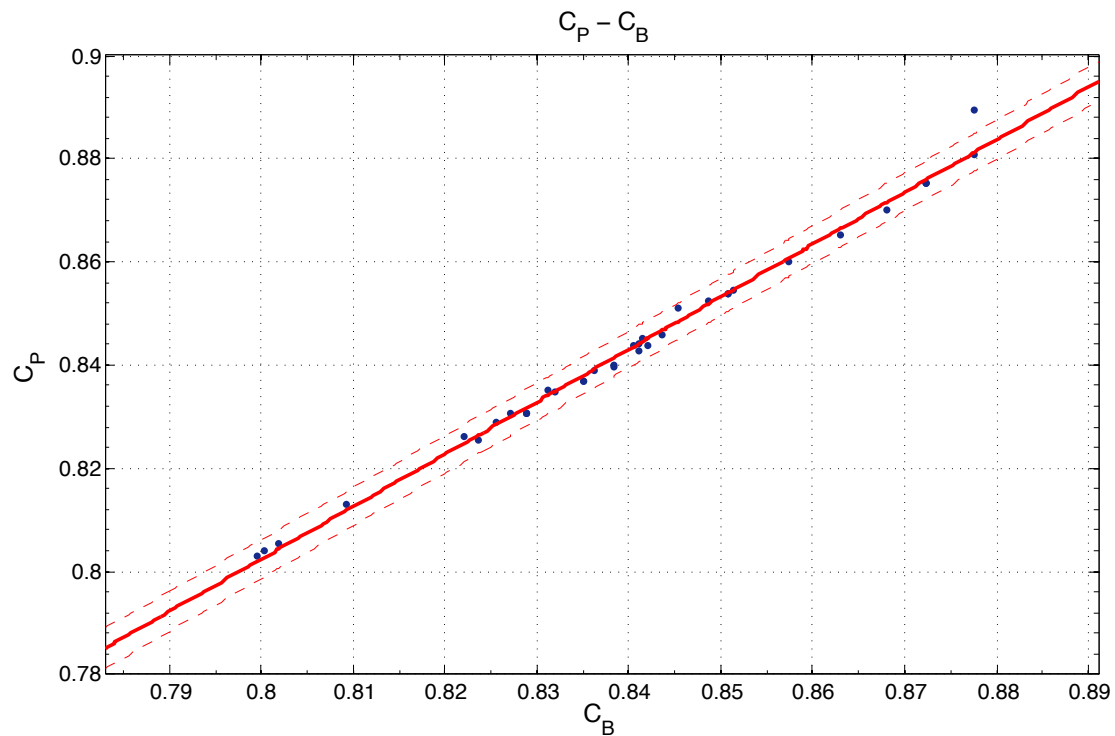
RMSE: 0.01736

$$C_B = 8.366 * 10^{-17} * DWT_{Scant}^3 - 3.263 * 10^{-11} * DWT_{Scant}^2 + 3.856 * 10^{-6} * DWT_{Scant} + 0.7217$$

Παρατηρήσεις:

Στο συγκεκριμένο διάγραμμα βλέπουμε ότι ο συντελεστής γάστρας δεν παρουσιάζει καλή συσχέτιση με το DWT παρουσιάζοντας αρκετές αποκλίσεις. Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι ο συντελεστής γάστρας αποτελεί επιλογή του κάθε σχεδιαστή. Αξίζει να σημειωθεί το τοπικό μέγιστο που παρουσιάζει η καμπύλη για πλοία χωρητικότητας 90.000t DWT έχοντας $C_B=0,865$ και η μείωση του συντελεστή για πλοία μεγαλύτερου μεγέθους.

2.7.2. Πρισματικός συντελεστής C_p (Prismatic Coefficient)



Διάγραμμα 66: C_p συναρτήσει C_B

Linear model Poly1:

$$f(x) = p1 * x + p2$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 1.016 (0.9875, 1.045)$$

$$p2 = -0.01054 (-0.03466, 0.01359)$$

Goodness of fit:

SSE: 0.0001065

R-square: 0.9933

Adjusted R-square: 0.9931

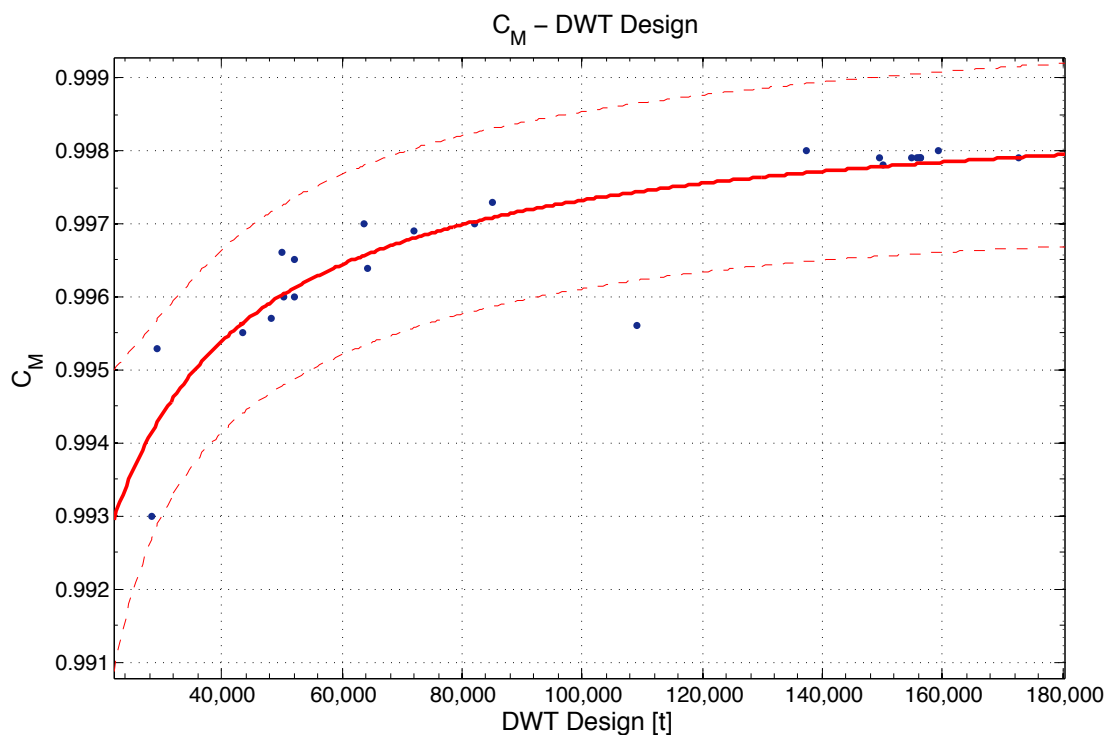
RMSE: 0.001744

$$C_p = 1.016 * C_B - 0.01054$$

Παρατηρήσεις:

Η συσχέτιση του πρισματικού συντελεστή C_p συναρτήσει του C_B είναι εξαιρετική με πολύ μικρές αποκλίσεις αποτελώντας αξιόπιστο τρόπο υπολογισμού του C_p .

2.7.3. Συντελεστής μέσης τομής C_M (Midship Coefficient)



Διάγραμμα 67: C_M συναρτήσει DWT Design

General model Power2:

$$f(x) = a \cdot x^b + c$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = -45.44 \quad (-412.9, 322)$$

$$b = -0.8951 \quad (-1.711, -0.07928)$$

$$c = 0.9988 \quad (0.9969, 1.001)$$

Goodness of fit:

SSE: 6.735e-06

R-square: 0.809

Adjusted R-square: 0.7909

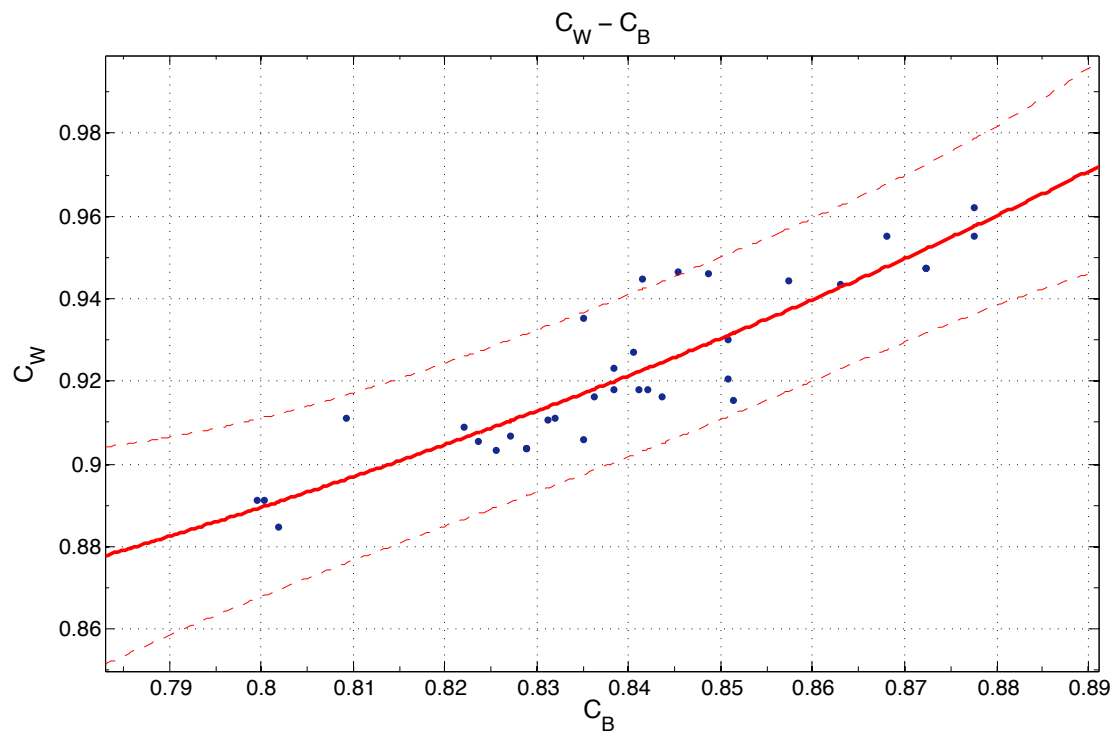
RMSE: 0.0005663

$$C_M = -45.44 * DWT_{Design}^{-0.8951} + 0.9988$$

Παρατηρήσεις:

Στο παραπάνω διάγραμμα βλέπουμε ότι ο συντελεστής μέσης τομής δίνει καλή συσχέτιση συναρτήσει του DWT με σχετικά μικρές αποκλίσεις εξαιρουμένου ενός σημείου που βρίσκεται έξω από τις οριακές γραμμές. Σημειώνεται ότι το R^2 γίνεται 0.90 αν αφαιρεθεί αυτό το σημείο.

2.7.4. Συντελεστής ισάλου επιφανείας C_W (Waterplane coefficient)



Διάγραμμα 68: C_W συναρτήσει C_B

General model Power2:

$$f(x) = a \cdot x^b + c$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.3521 \quad (0.2253, 0.4789)$$

$$b = 5.047 \quad (-6.616, 16.71)$$

$$c = 0.7753 \quad (0.434, 1.117)$$

Goodness of fit:

SSE: 0.002942

R-square: 0.8016

Adjusted R-square: 0.7895

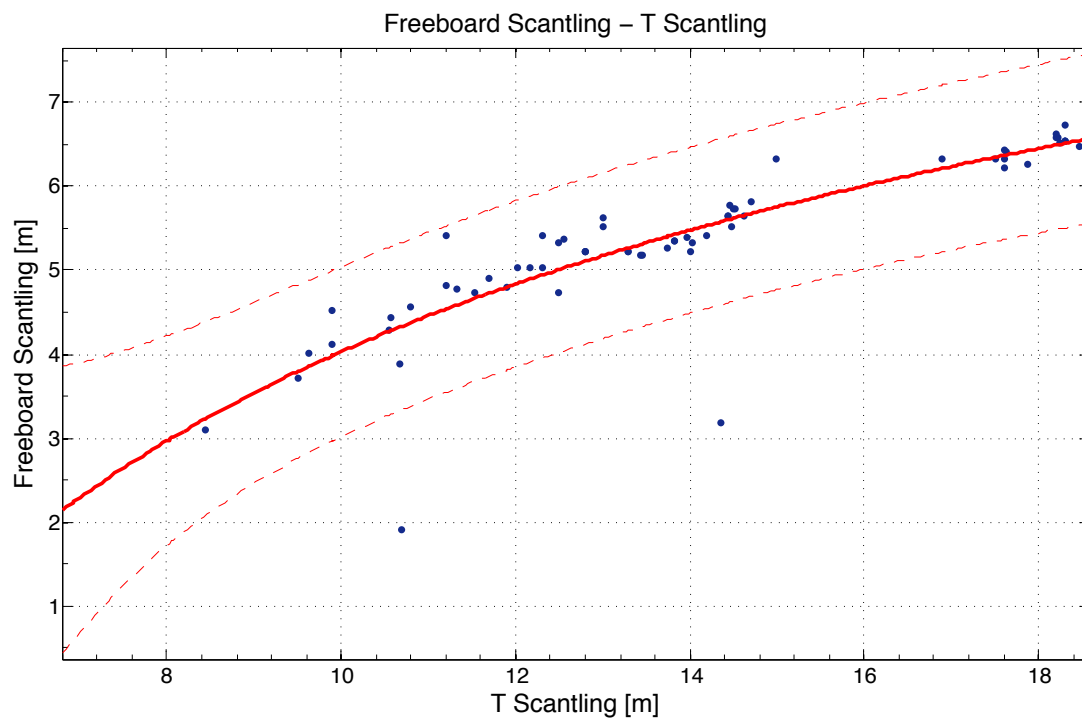
RMSE: 0.009443

$$C_W = 0.3521 * C_B^{5.047} + 0.7753$$

Παρατηρήσεις:

Η συσχέτιση του συντελεστή ισάλου επιφανείας C_W με το C_B είναι ικανοποιητική ωστόσο υπάρχει διασπορά ορισμένων σημείων.

2.7.5. Ύψος εξάλλων σε κατάσταση αντοχής (Freeboard Scantling)



Διάγραμμα 69: Freeboard Scantling συναρτήσει T Scantling

General model Power2:

$$f(x) = a \cdot x^b + c$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$\begin{aligned} a &= -29.07 \quad (-36.94, -21.19) \\ b &= -0.3619 \quad (-1.662, 0.9383) \\ c &= 16.66 \quad (-24.18, 57.5) \end{aligned}$$

Goodness of fit:

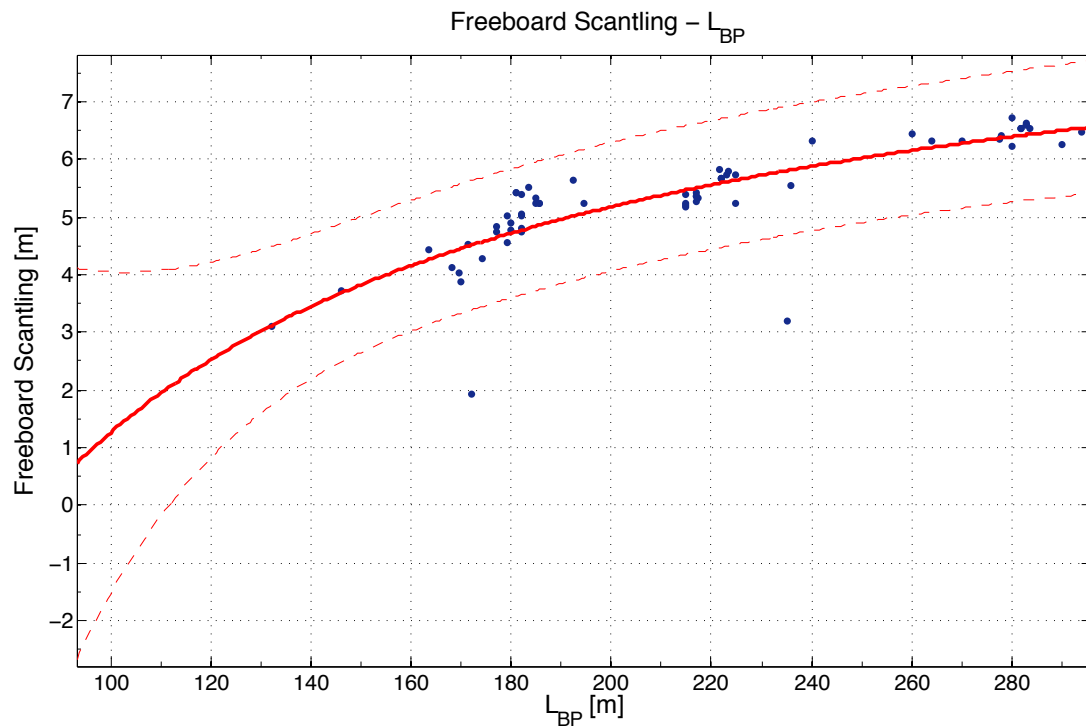
SSE: 14.79

R-square: 0.7427

Adjusted R-square: 0.7344

RMSE: 0.4884

$$Freeboard_{scant} = -29.07 * T_{Scantling}^{-0.3619} + 16.66$$



Διάγραμμα 70: Freeboard Scantling συναρτήσει L_{BP}

General model Power2:

$$f(x) = a \cdot x^b + c$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = -427.6 \quad (-3220, 2365)$$

$$b = -0.8429 \quad (-2.417, 0.7316)$$

$$c = 10.09 \quad (1.25, 18.92)$$

Goodness of fit:

SSE: 18.8

R-square: 0.6728

Adjusted R-square: 0.6623

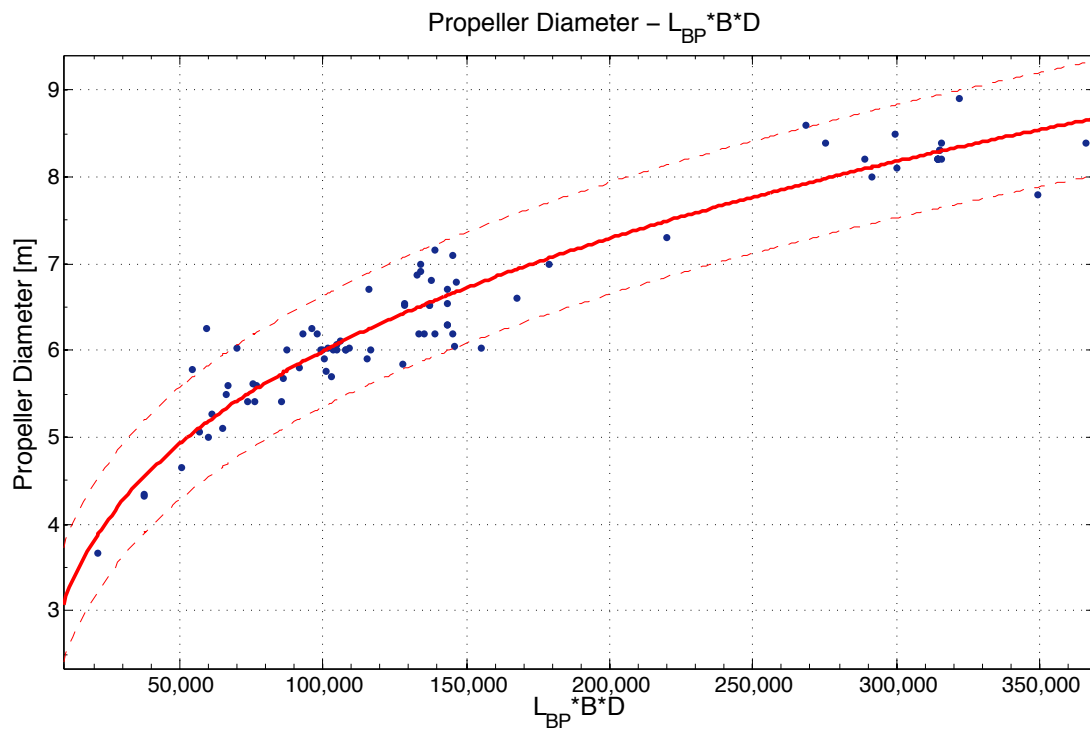
RMSE: 0.5507

$$Freeboard_{scant} = -427.6 * L_{BP}^{-0.8429} + 10.09$$

Παρατηρήσεις:

Ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα παραπάνω διαγράμματα που βλέπουμε ότι το ύψος εξάλων του πλοίου μπορεί να προσεγγιστεί τόσο σε σχέση με το βύθισμα αντοχής όσο και με το μήκος, παρουσιάζοντας και στις δύο περιπτώσεις καλά χαρακτηριστικά ποιότητας. Σαφώς στην πράξη το ύψος εξάλων υπολογίζεται με βάση τους κανονισμούς της γραμμής φόρτωσης που αποτελεί απαραίτητο τμήμα της προμελέτης του πλοίου.

2.7.6. Διάμετρος έλικας



Διάγραμμα 71: Propeller Diameter συναρτήσεως $L_{BP} * B * D$

General model Power1:

$$f(x) = a * x^b$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.2288 (0.1779, 0.2798)$$

$$b = 0.2836 (0.265, 0.3022)$$

Goodness of fit:

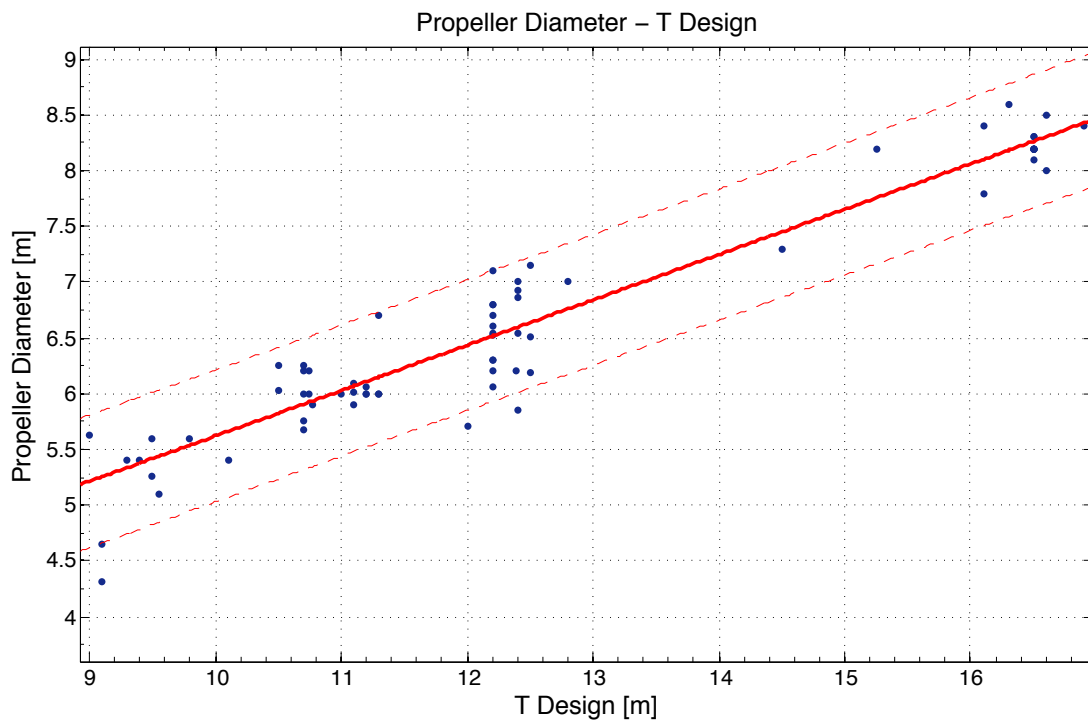
SSE: 8.203

R-square: 0.9203

Adjusted R-square: 0.9193

RMSE: 0.3202

$$\text{Propeller Diameter} = 0.2288 * L_{BP} * B * D^{0.2836}$$



Διάγραμμα 72: Propeller Diameter συναρτήσει T Design

Linear model Poly1:

$$f(x) = p1 * x + p2$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.4066 (0.3769, 0.4363)$$

$$p2 = 1.555 (1.177, 1.934)$$

Goodness of fit:

SSE: 5.613

R-square: 0.9189

Adjusted R-square: 0.9176

RMSE: 0.2916

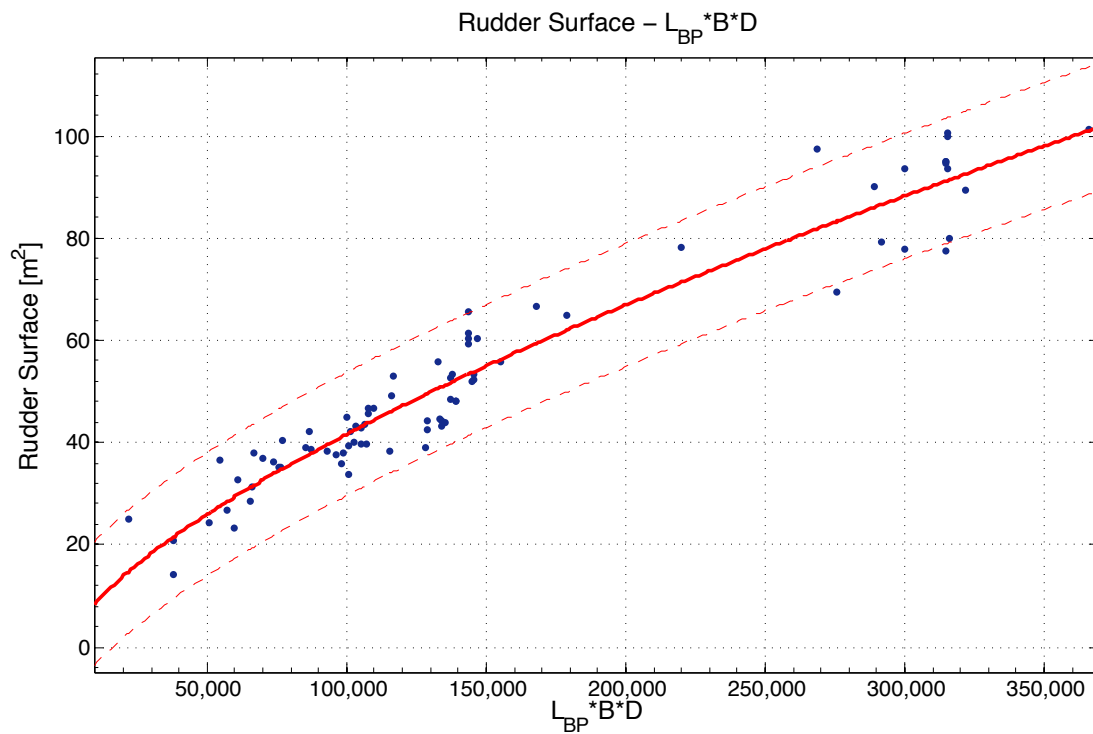
$$Propeller\ Diameter = 0.4066 * T_{Design} + 1.555$$

Παρατηρήσεις:

Η διάμετρος της έλικας προσεγγίζεται ικανοποιητικά συναρτήσει του γινομένου $L_{BP} * B * D$ έχοντας πολύ καλή συσχέτιση. Η διάμετρος της έλικας εξαρτάται από το βύθισμα καθώς απαιτείται πλήρης βύθιση της ωστόσο το αντίστοιχο διάγραμμα παρουσιάζει ελαφρώς μικρότερη συσχέτιση με μεγαλύτερες αποκλίσεις από το πρώτο διάγραμμα. Παρατηρούμε ότι για μικρά βυθίσματα, η διάμετρος της έλικας αποτελεί το 56% του βυθίσματος και μειώνεται γραμμικά έως το 50% σε μεγάλα βυθίσματα.

Σημειώνεται ότι κατά την δημιουργία της βάσης δεδομένων μας, στις περιπτώσεις έλλειψης πληροφοριών σχετικά με την διάμετρο, μετρήθηκε μέσω των σχεδίων υπό κλίμακα με όποιο λάθος μπορεί αυτή η μέθοδος να εγκυμονεί.

2.7.7. Επιφάνεια πηδαλίου



Διάγραμμα 73: Rudder Surface συναρτήσεσι $L_{BP} * B * D$

General model Power1:

$$f(x) = a * x^b$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.0161 (0.0073, 0.02489)$$

$$b = 0.6826 (0.6378, 0.7275)$$

Goodness of fit:

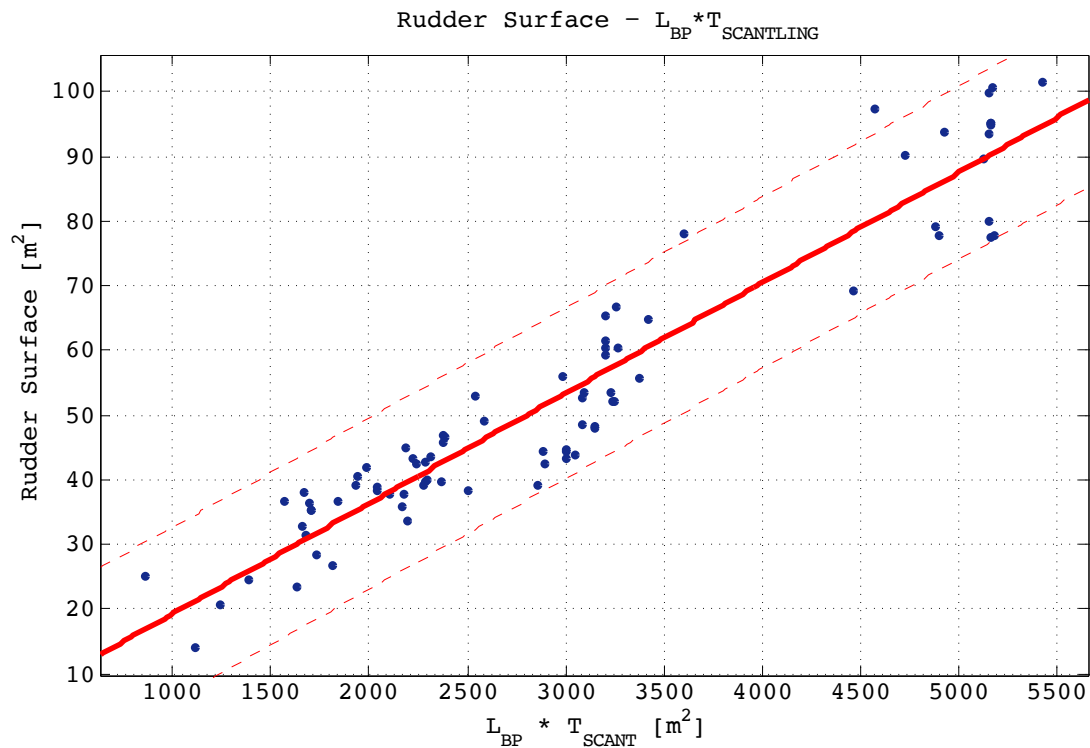
SSE: 2810

R-square: 0.925

Adjusted R-square: 0.9241

RMSE: 6.002

$$Rudder\ Surface = 0.0161 * L_{BP} * B * D^{0.6826}$$



*Διάγραμμα 74: Rudder Surface συναρτήσεως $L_{BP} * T_{scant}$*

Linear model Poly1:

$$f(x) = p1 * x + p2$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.01706 (0.01586, 0.01826)$$

$$p2 = 2.204 (-1.658, 6.067)$$

Goodness of fit:

SSE: 3428

R-square: 0.9101

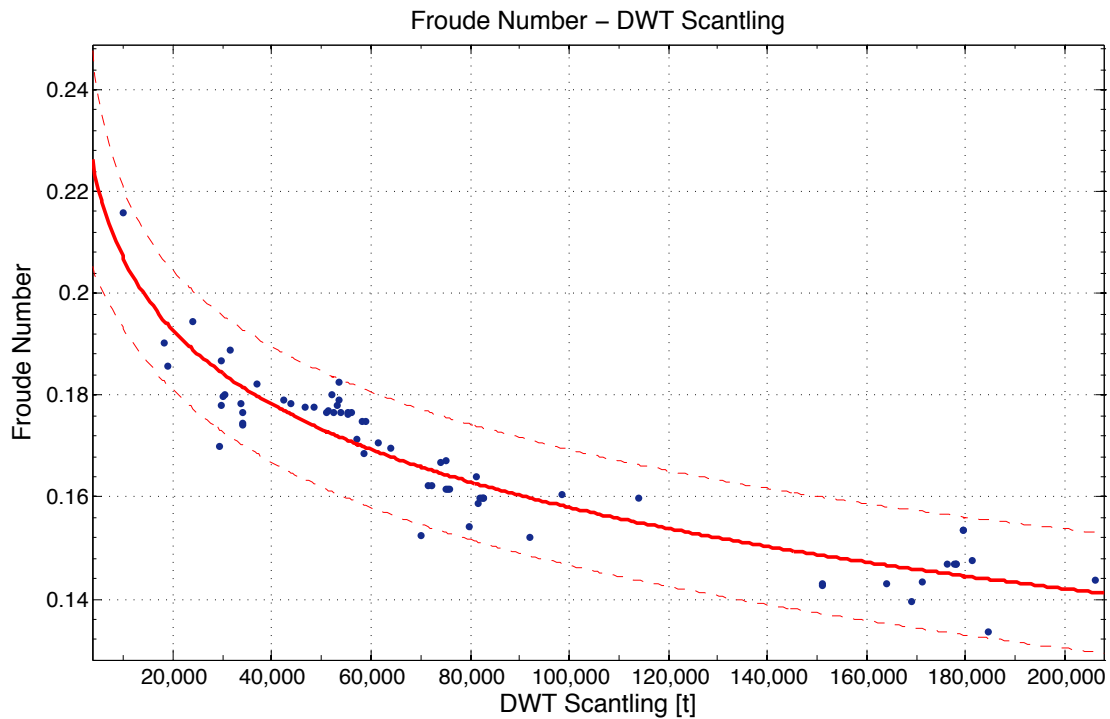
Adjusted R-square: 0.9089

RMSE: 6.587

Παρατηρήσεις:

Εξίσου καλές προσεγγίσεις για την επιφάνεια πηδαλίου δίνουν και τα δύο παραπάνω διαγράμματα συναρτήσεως του γινομένου $L_{BP} * B * D$ και του $L_{BP} * T_{scant}$. Τα διαγράμματα παρουσιάζουν πολύ καλά στοιχεία ποιότητας και αποτελούν έναν τρόπο προσέγγισης της επιφάνειας στο στάδιο της προμελέτης. Σημειώνεται ότι στις περισσότερες περιπτώσεις δεν υπήρχαν τα απαραίτητα στοιχεία για την επιφάνεια του πηδαλίου και οι μετρήσεις έγιναν μέσω της κλίμακας του σχεδίου.

2.7.8. Εκτίμηση Froude Number



Διάγραμμα 75: Froude Number συναρτήσει DWT Scantling

General model Power2:

$$f(x) = a \cdot x^b + c$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = -0.2305 \quad (-1.743, 1.282)$$

$$b = 0.05314 \quad (-0.1663, 0.2726)$$

$$c = 0.5829 \quad (-1.132, 2.297)$$

Goodness of fit:

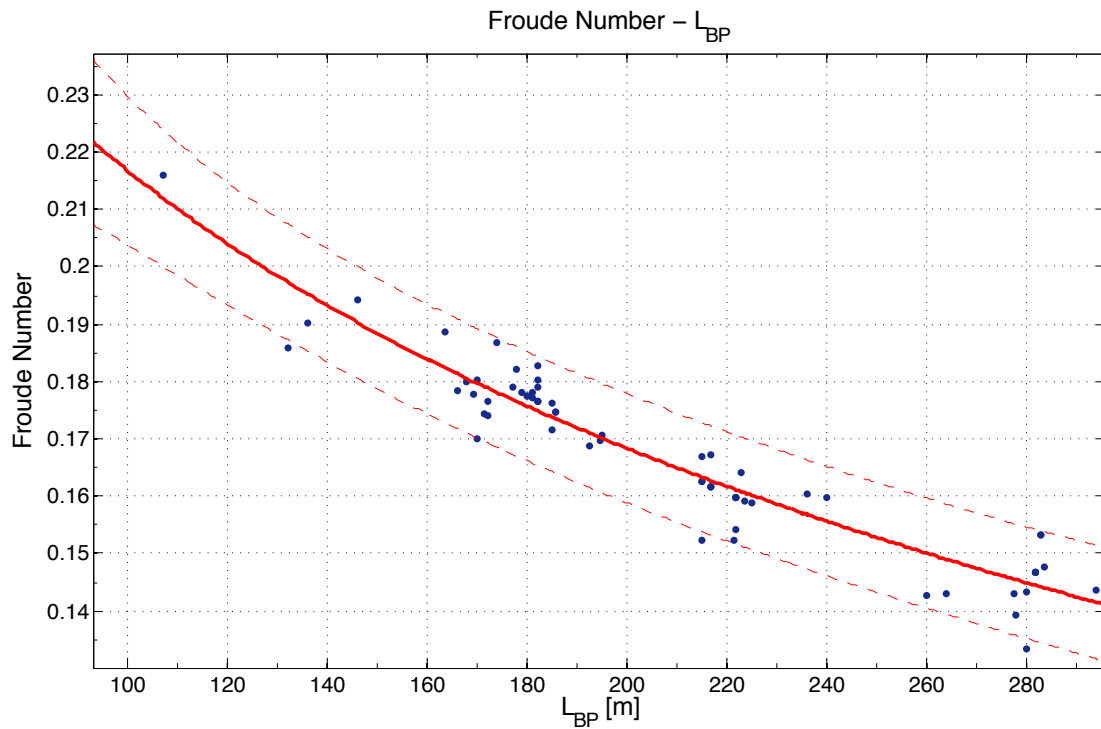
SSE: 0.002045

R-square: 0.8732

Adjusted R-square: 0.8693

RMSE: 0.005608

$$F_N = -0.2305 * DWT_{Scantling}^{0.05314} + 0.5829$$



Διάγραμμα 76: Froude Number συναρτήσει L_{BP}

General model Power2:

$$f(x) = a \cdot x^b + c$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 22.04 \quad (-3451, 3495)$$

$$b = -0.003219 \quad (-0.5191, 0.5126)$$

$$c = -21.5 \quad (-3495, 3452)$$

Goodness of fit:

SSE: 0.00147

R-square: 0.9092

Adjusted R-square: 0.9064

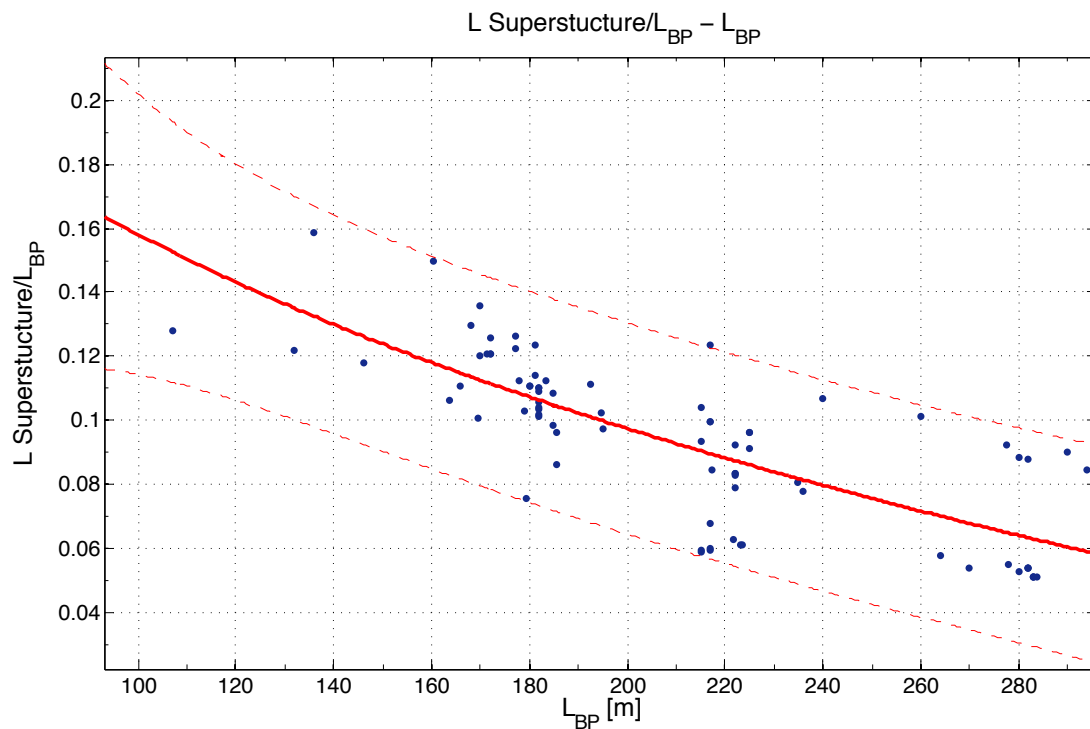
RMSE: 0.00472

$$F_N = 22.04 * L_{BP}^{-0.003219} - 21.5$$

Παρατηρήσεις:

Στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε την πολύ καλή προσέγγιση του αριθμού Froude ενός πλοίου στην υπηρεσιακή του ταχύτητα συναρτήσει του DWT και του μήκους L_{BP} με τα αποτελέσματα να είναι ικανοποιητικά. Επιβεβαιώνεται ότι όσο μεγαλύτερο είναι το πλοίο λειτουργεί σε μικρότερους αριθμούς Froude.

2.7.9. Εκτίμηση διαστάσεων υπερκατασκευών



Διάγραμμα 77: $L_{Superstructure}/L_{BP}$ συναρτήσει L_{BP}

General model Power2:

$$f(x) = a \cdot x^b + c$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = -0.1088 \quad (-1.455, 1.237)$$

$$b = 0.2423 \quad (-1.066, 1.551)$$

$$c = 0.4903 \quad (-1.645, 2.625)$$

Goodness of fit:

SSE: 0.02136

R-square: 0.5993

Adjusted R-square: 0.5892

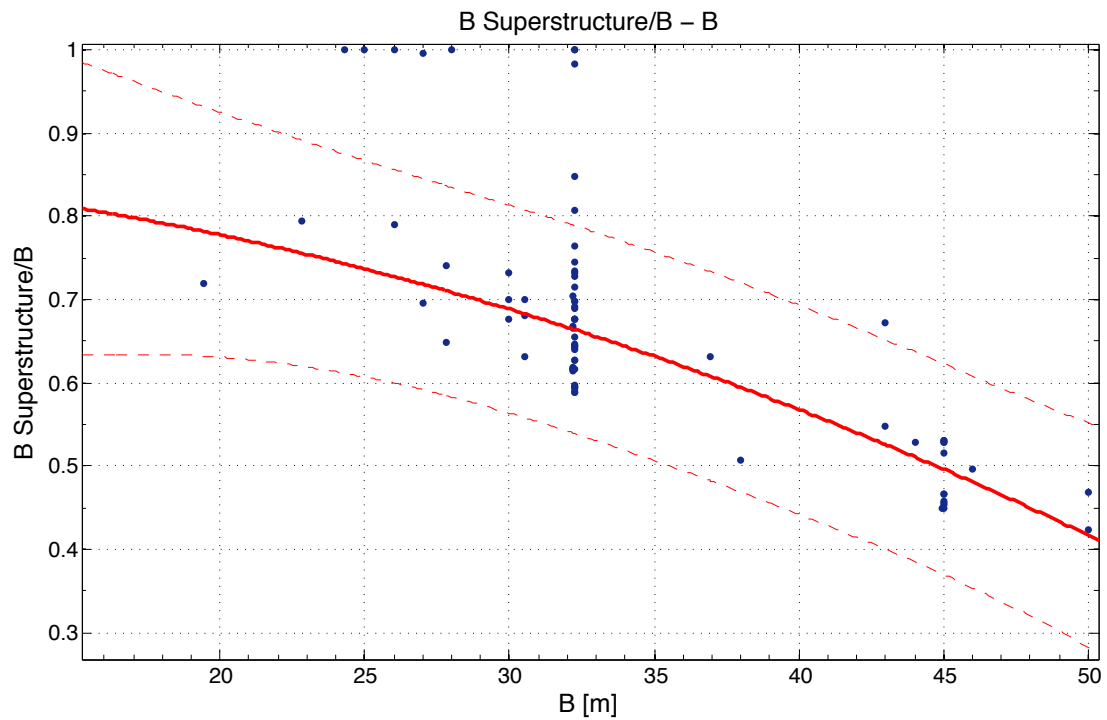
RMSE: 0.01644

$$\frac{L_{SS}}{L_{BP}} = -0.1088 * (L_{BP})^{0.2423} + 0.4903$$

Παρατηρήσεις:

Το ποσοστό του μήκους της υπερκατασκευής σε σχέση με το μήκος L_{BP} παρουσιάζει αρκετές αποκλίσεις γεγονός που δικαιολογείται καθώς όλες οι διαστάσεις των υπερκατασκευών είναι στην κρίση του κάθε μελετητή. Σίγουρα όμως η παραπάνω σχέση μπορεί να δώσει μια ενδεικτική τιμή για το μήκος των υπερκατασκευών σε μια νέα σχεδίαση.

Σημειώνεται ότι η μέτρηση του μήκους έγινε μέσω της ισαπόστασης των κατασκευαστικών νομέων του κάθε πλοίου.



Διάγραμμα 78: $B_{Superstructure}/B$ συναρτήσει B

General model Power2:

$$f(x) = a \cdot x^b + c$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = -0.0002729 \quad (-0.00249, 0.001945)$$

$$b = 1.887 \quad (-0.06517, 3.839)$$

$$c = 0.8554 \quad (0.6011, 1.11)$$

Goodness of fit:

SSE: 0.2482

R-square: 0.6608

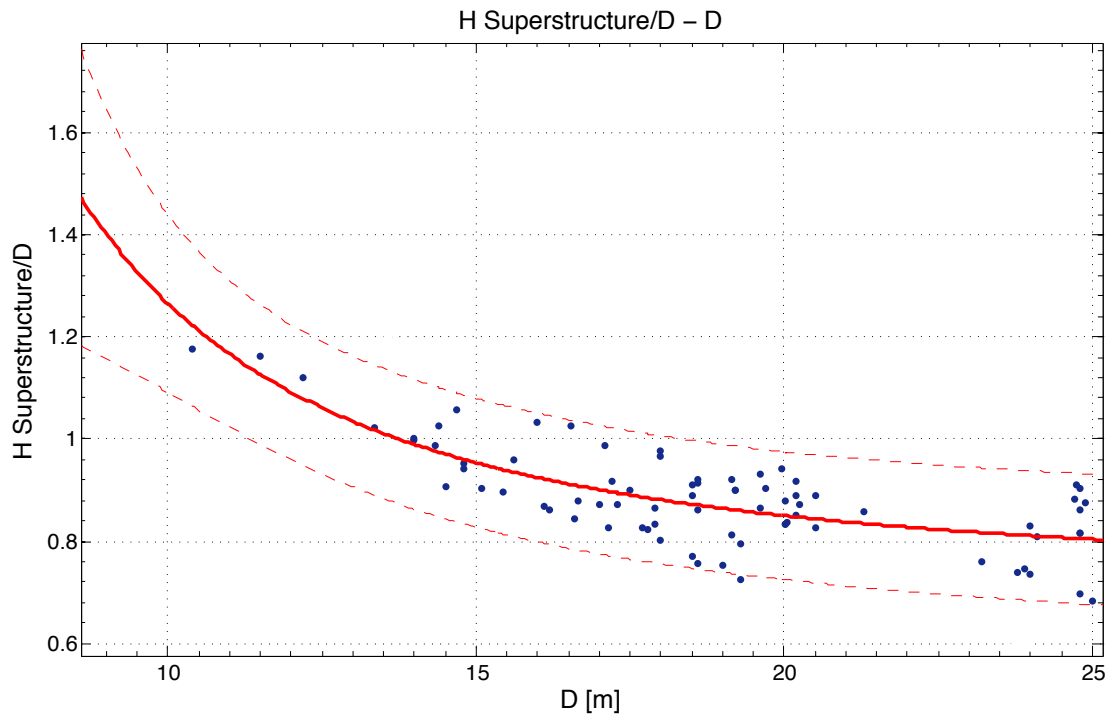
Adjusted R-square: 0.6504

RMSE: 0.06179

$$\frac{B_{SS}}{B} = -0.0002729 * B^{1.887} + 0.8554$$

Παρατηρήσεις:

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, το πλάτος της υπερκατασκευής αποτελεί προσωπική επιλογή του κάθε μελετητή ωστόσο μια ενδεικτική τιμή μπορεί να δοθεί από τον παραπάνω τύπο. Σημειώνεται ότι τα πλάτη μετρήθηκαν μέσω κλίμακας του σχεδίου.



Διάγραμμα 79: H Superstructure/D συναρτήσει D

General model Power2:

$$f(x) = a \cdot x^b + c$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$\begin{aligned} a &= 74.65 \quad (-146.8, 296.1) \\ b &= -2.143 \quad (-3.442, -0.8444) \\ c &= 0.7286 \quad (0.6112, 0.8461) \end{aligned}$$

Goodness of fit:

SSE: 0.2915

R-square: 0.5915

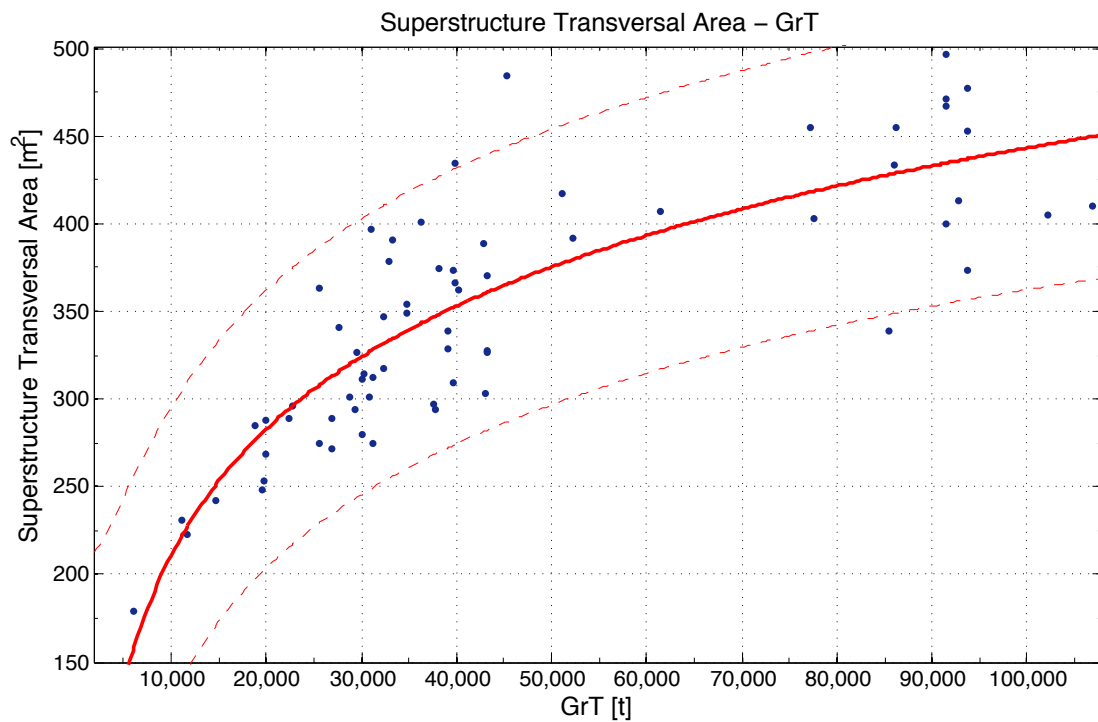
Adjusted R-square: 0.5806

RMSE: 0.06235

$$\frac{H_{SS}}{D} = 74.65 \cdot D^{-2.143} + 0.7286$$

Παρατηρήσεις:

Όμοια, στο συγκεκριμένο διάγραμμα δίνεται μια ενδεικτική τιμή του ύψους της υπερκατασκευής το οποίο έχει μετρηθεί μέσω της κλίμακας των σχεδίων.



Διάγραμμα 80: Superstructure Transversal Area συναρτήσει GrT

General model Power2:

$$f(x) = a \cdot x^b + c$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = -4056 \quad (-2.87e+04, 2.059e+04)$$

$$b = -0.0362 \quad (-0.39, 0.3177)$$

$$c = 3117 \quad (-2.403e+04, 3.026e+04)$$

Goodness of fit:

SSE: 9.692e+04

R-square: 0.7068

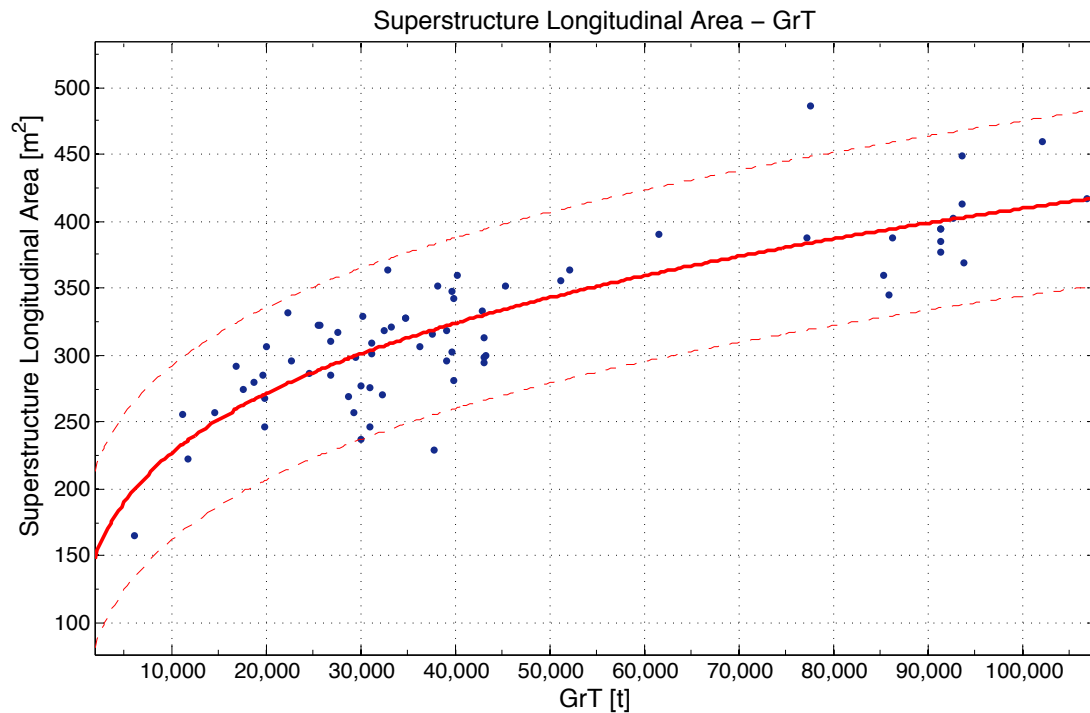
Adjusted R-square: 0.6976

RMSE: 38.91

$$\text{Superstructure Transverse Area} = -4056 * GrT^{-0.0362} + 3117$$

Παρατηρήσεις:

Μέσω των μετρημένων διαστάσεων των υπερκατασκευών, πραγματοποιήθηκε προσεγγιστικός υπολογισμός της εγκάρσιας επιφάνειας αυτών και όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα υπάρχει συσχέτιση συναρτήσει της ολικής χωρητικότητας GrT έχοντας ωστόσο σημαντική διασπορά των σημείων.



Διάγραμμα 81: Superstructure Longitudinal Area συνάρτησε GrT

General model Power1:

$$f(x) = a \cdot x^b$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 21.47 \quad (12.22, 30.72)$$

$$b = 0.2561 \quad (0.2159, 0.2963)$$

Goodness of fit:

SSE: 6.839e+04

R-square: 0.7063

Adjusted R-square: 0.7019

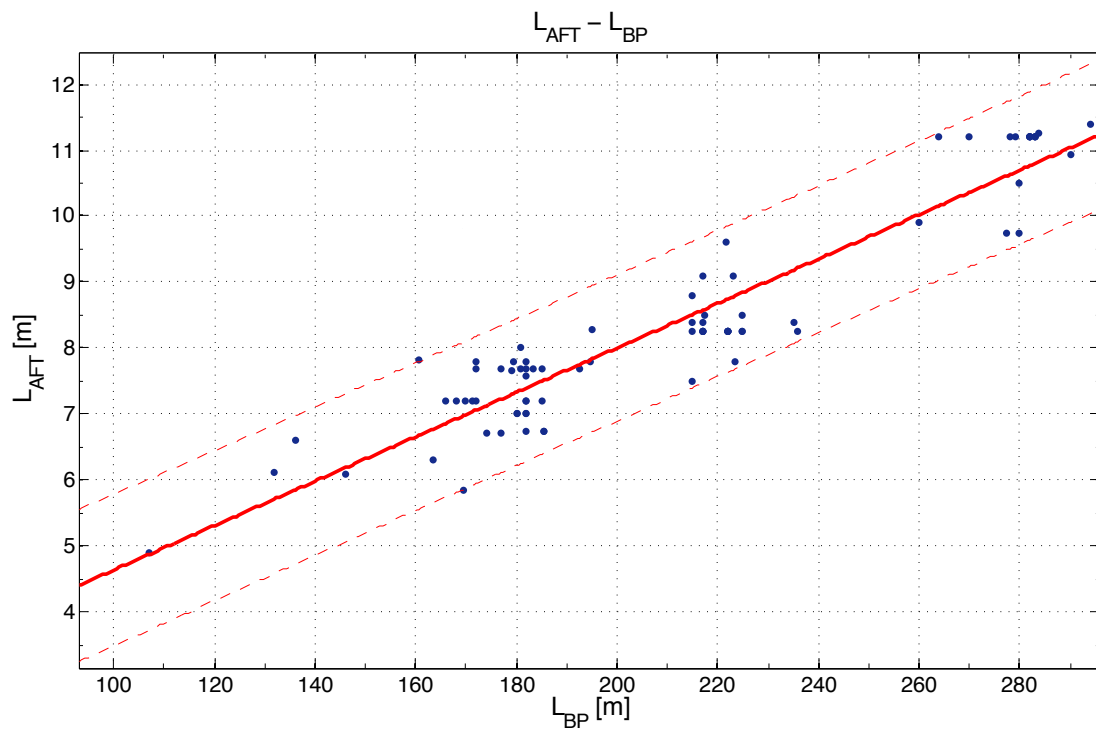
RMSE: 31.71

$$\text{Superstructure Longitudinal Area} = 21.47 * GrT^{0.2561}$$

Παρατηρήσεις:

Η ίδια διαδικασία πραγματοποιήθηκε και για την διαμήκη επιφάνεια των υπερκατασκευών συμπεριλαμβανομένης της διαμήκου επιφάνειας του φουγάρου. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα τα αποτελέσματα έχουν καλή συσχέτιση με την ολική χωρητικότητα GrT με ελαφρώς μικρότερη διασπορά σε σχέση με το προηγούμενο διάγραμμα.

2.7.10. Θέση πρυμναίας φρακτής L_{AFT}



Διάγραμμα 82: L_{AFT} συναρτήσει L_{BP}

Linear model Poly1:

$$f(x) = p1 * x + p2$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.03366 (0.03087, 0.03645)$$

$$p2 = 1.273 (0.6716, 1.875)$$

Goodness of fit:

SSE: 24.54

R-square: 0.8778

Adjusted R-square: 0.8763

RMSE: 0.5539

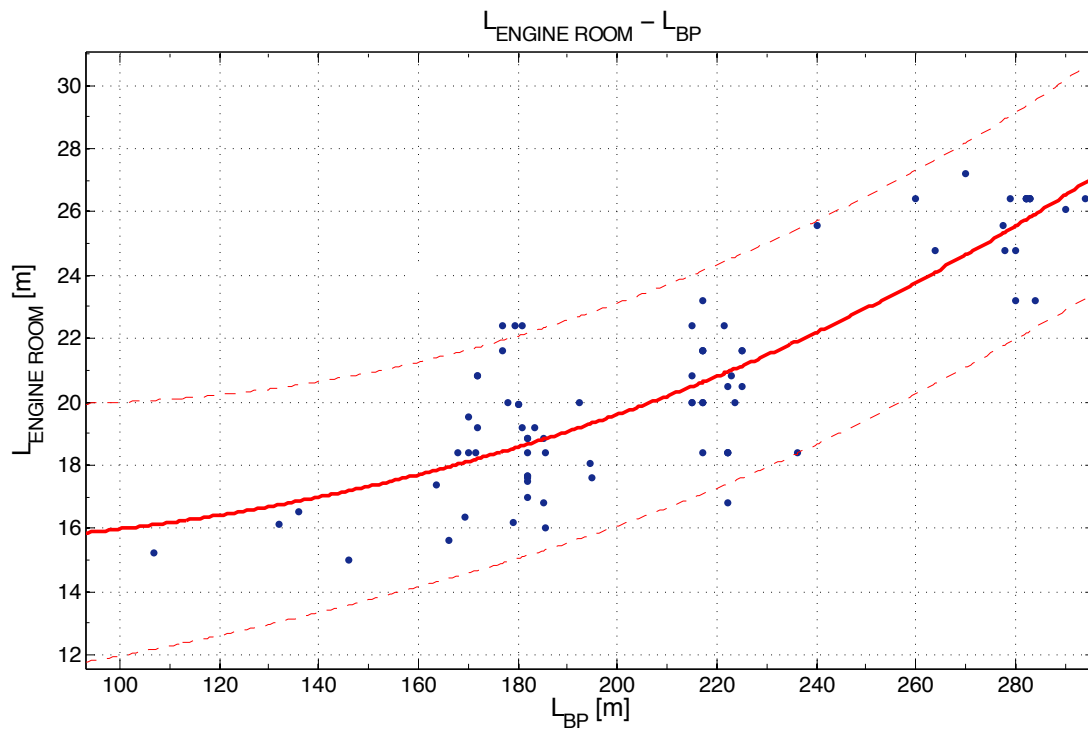
$$L_{AFT} = 0.03366 * L_{BP} + 1.273$$

Παρατηρήσεις:

Θέση πρυμναίας φρακτής ορίζεται η απόσταση της φρακτής από την πρυμναία κάθετο (Α.Ρ.) και συμπίπτει με την πρυμναία φρακτή του μηχανοστασίου.

Ο παραπάνω εμπειρικός τύπος μας δίνει τη θέση της πρυμναίας φρακτής του πλοίου σε σχέση με το ολικό μήκος. Οι αποκλίσεις που εμφανίζονται είναι μικρότερες του 1.5m και είναι λογικές καθώς διαφέρει από πλοίο σε πλοίο η ισαπόσταση των νομένων.

2.7.11. Μήκος μηχανοστασίου L_{ER}



Διάγραμμα 83: $L_{EngineRoom}$ συναρτήσει L_{BP}

General model Power2:

$$f(x) = a \cdot x^b + c$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):-

$$a = 5.516e-06 \text{ } (-4.302e-05, 5.405e-05)$$

$$b = 2.563 \text{ } (1.052, 4.074)$$

$$c = 15.24 \text{ } (11.95, 18.53)$$

Goodness of fit:

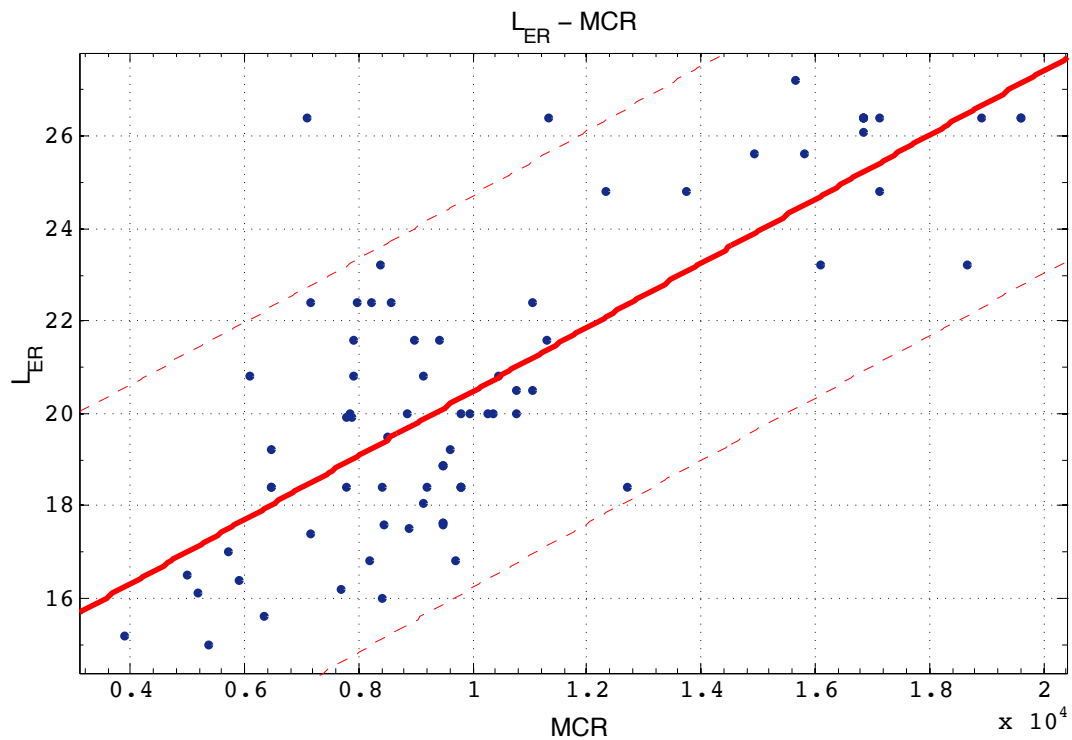
SSE: 239.4

R-square: 0.7363

Adjusted R-square: 0.7295

RMSE: 1.752

$$L_{ENGINE ROOM} = 5.516 \cdot 10^{-6} \cdot L_{BP}^{2.563} + 15.24$$



Διάγραμμα 84: $L_{EngineRoom}$ συναρτήσει MCR

Linear model Poly1:

$$f(x) = p1 * x + p2$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.0006936 \text{ (0.0005732, 0.000814)}$$

$$p2 = 13.54 \text{ (12.2, 14.88)}$$

Goodness of fit:

SSE: 345.5

R-square: 0.6309

Adjusted R-square: 0.6261

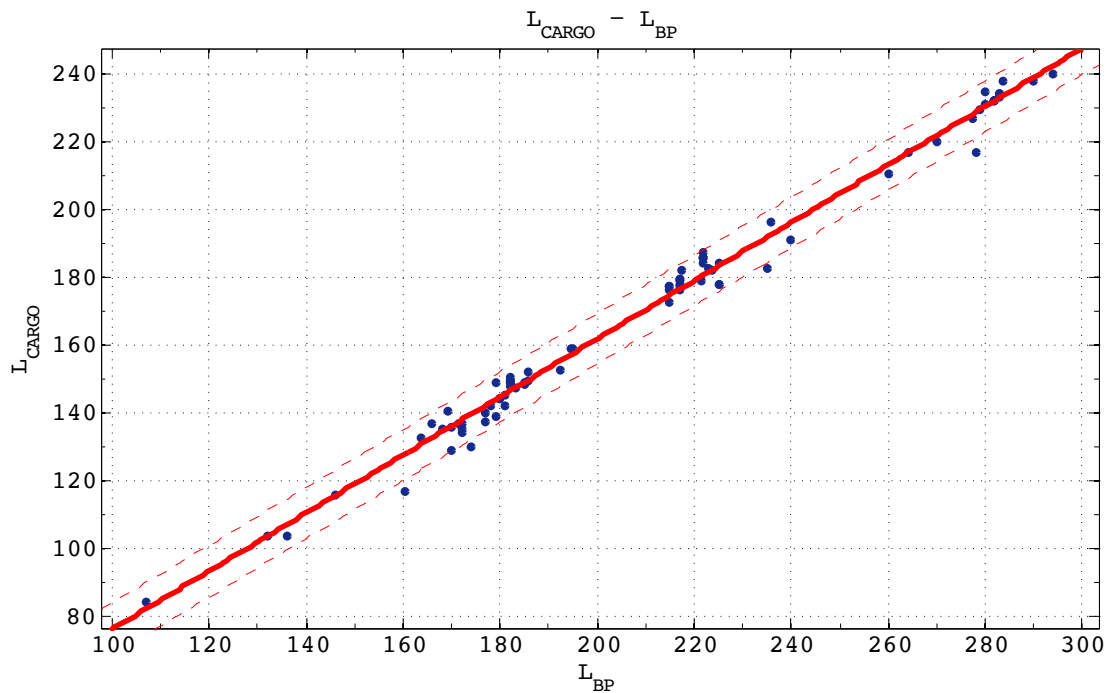
RMSE: 2.118

$$L_{ENGINE ROOM} = 0.0006936 * MCR + 13.54$$

Παρατηρήσεις:

Το μήκος του μηχανοστασίου μπορεί να δοθεί τόσο συναρτήσει του συνολικού μήκους του πλοίου όσο και συναρτήσει του MCR. Ωστόσο υπάρχουν αντίστοιχου μεγέθους διαφορές ανάμεσα στα δύο διαγράμματα λόγω των διαφορετικών αναγκών των πλοίων σε μηχανολογικό εξοπλισμό.

2.7.12. Μήκος χώρου φορτίου



Διάγραμμα 85: L Cargo συναρτήσει L_{BP}

Linear model Poly1:

$$f(x) = p1 * x + p2$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.8589 \text{ (0.8405, 0.8773)}$$

$$p2 = -9.703 \text{ (-13.66, -5.746)}$$

Goodness of fit:

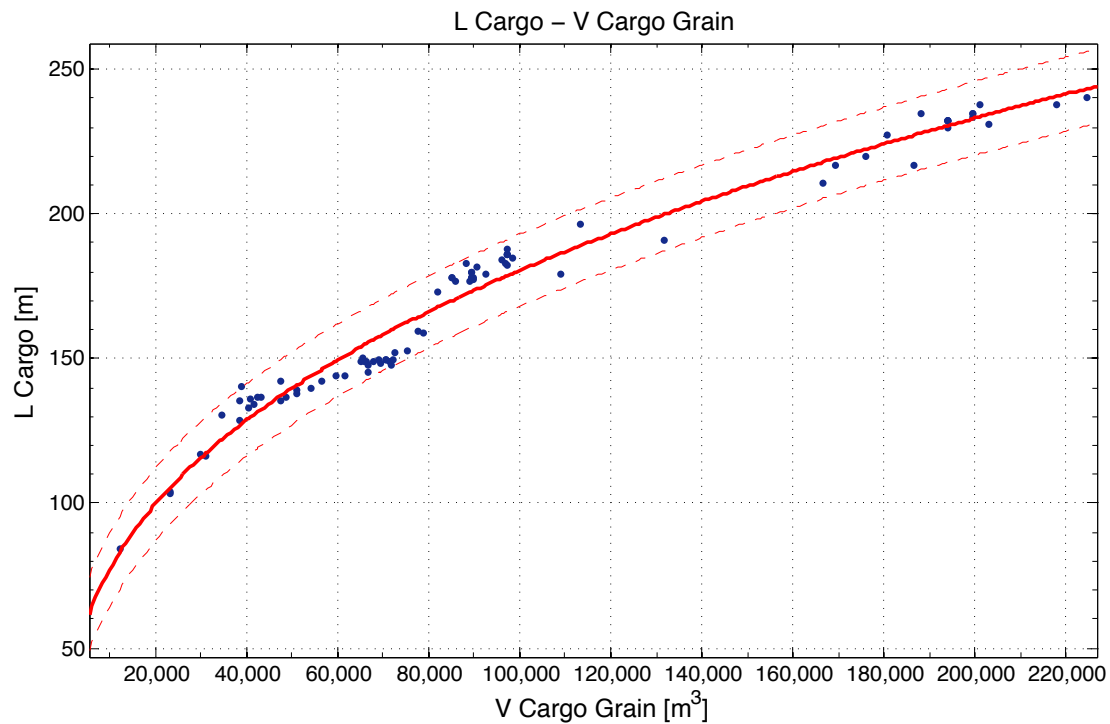
SSE: 1080

R-square: 0.9908

Adjusted R-square: 0.9907

RMSE: 3.675

$$L \text{ Cargo} = 0.8589 * L_{BP} - 9.703$$



Διάγραμμα 86: L Cargo συναρτήσει V Cargo Grain

General model Power1:

$$f(x) = a \cdot x^b$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 2.576 \quad (2.164, 2.988)$$

$$b = 0.3691 \quad (0.3553, 0.3829)$$

Goodness of fit:

SSE: 3179

R-square: 0.9731

Adjusted R-square: 0.9726

RMSE: 6.227

$$L \text{ Cargo} = 2.576 * V \text{ Cargo}_{\text{Grain}}^{0.3691}$$

Παρατηρήσεις:

Στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε την καλή συσχέτιση του μήκους του χώρου φορτίου με την χωρητικότητα του πλοίου καθώς και με το μήκος του πλοίου, με τις όποιες αποκλίσεις να οφείλονται στην επίδραση και των άλλων δύο κύριων διαστάσεων στον καθορισμό του συνολικού όγκου του χώρου φορτίου. Σημειώνεται ότι το Lcargo αποτελεί το 80-82% του μήκους του πλοίου.

3. Ανάπτυξη προγράμματος

3.1. Γενικά

Σε αυτό το μέρος παρουσιάζεται η ανάπτυξη του προγράμματος σε γλώσσα Matlab το οποίο πραγματοποιεί την προμελέτη πλοίων μεταφοράς ξηρού φορτίου χύδην (Bulk Carriers). Ο χρήστης εισάγει μια σειρά απαραίτητων δεδομένων σύμφωνα με τις απαιτήσεις του και το πρόγραμμα εκτελώντας μια σειρά υπολογισμών επιστρέφει όλα τα κύρια χαρακτηριστικά της σχεδίασης που προκύπτουν στην φάση της προμελέτης.

Το πρόγραμμα χωρίζεται σε δύο κύρια μέρη τα οποία θα αναλυθούν λεπτομερώς στην συνέχεια.

Το πρώτο μέρος περιλαμβάνει τον υπολογισμό των κύριων χαρακτηριστικών της σχεδίασης δηλαδή την εκτίμηση των κύριων διαστάσεων, των βασικών μεγεθών του πλοίου, των δεξαμενών έρματος, φορτίου και αναλωσίμων, των κέντρων βαρών συνολικά του πλοίου αλλά και των επιμέρους βαρών του, των βασικών υδροστατικών στοιχείων και την οριοθέτηση των χώρων του πλοίου. Στην συνέχεια γίνεται εκτίμηση της αντίστασης του πλοίου άρα και της απαιτούμενης εγκατεστημένης ισχύς υπολογίζοντας επίσης τα βέλτιστα χαρακτηριστικά της έλικας (βήμα, λόγος βήμα/διάμετρος, στροφές κ.α.) προκειμένου να μεγιστοποιείται ο βαθμός απόδοσης της σε ελεύθερη ροή.

Το δεύτερο μέρος περιλαμβάνει μια οικονομική μελέτη λαμβάνοντας υπόψιν ένα ρεαλιστικό οικονομικό σενάριο και υπολογίζοντας προσεγγιστικά τα κόστη κατασκευής και λειτουργίας του πλοίου κατά την διάρκεια ζωής του. Σκοπός της ανάλυσης αυτής είναι ο υπολογισμός του ελάχιστου απαιτούμενου ναύλου ώστε το πλοίο να είναι οικονομικά βιώσιμο.

3.2. Εισαγωγή Δεδομένων

Η ανάγνωση των δεδομένων πραγματοποιείται μέσω ενός αρχείου εισαγωγής δεδομένων (Input) σε μορφή Microsoft Excel το οποίο μπορεί να διαβαστεί από το πρόγραμμα και να υλοποιήσει τους υπολογισμούς. Οι παράμετροι που απαιτούνται για την υλοποίηση του πρώτου κύριου μέρους του προγράμματος είναι οι εξής:

L _{BP}	Μήκος μεταξύ καθέτων [m]	Κύριες απαιτήσεις πρώτου μέρους
B	Πλάτος [m]	
D	Κοίλο [m]	
T	Βύθισμα σχεδίασης [m]	
C _B	Συντελεστής γάστρας	
V _s	Ταχύτητα υπηρεσίας	Δευτερεύουσες απαιτήσεις πρώτου μέρους
Range	Ακτίνα ενέργειας	
Crew	Αριθμός πληρώματος	
sg	Ειδική Πυκνότητα νερού	
FSaft	Frame Spacing πρύμνης [m]	
FSer	Frame Spacing μηχανοστασίου [m]	
FSfwd	Frame Spacing πλώρης [m]	
Holds	Αριθμός κυτών	
FR_hold	No. Of Web Frames per hold	
Camber	Κυρτότητα [m]	
Lhatch	Μήκος καλύματος στομίων [m]	
Bhatch	Πλάτος καλύματος στομίων [m]	
Hhatch	Ύψος καλύματος στομίων [m]	
Lbulb	Μήκος βολβού [m]	
Wss	Βάρος υπερκατασκευών [t]	
Z	Αριθμό πτερυγίων έλικας	
Wcranes	Βάρος γερανών	

Πίνακας 3: Input χρήση 1ου μέρους προγράμματος

Για το δεύτερο μέρος του προγράμματος και την οικονομική μελέτη απαιτούνται οι ακόλουθοι παράμετροι που δίνονται από τον χρήστη.

Kst1	Κόστος χάλυβα [\$/ton]
Kst2	Κόστος εργατικών [\$/Hour]
Dock_days	Ημέρες δεξαμενισμού του πλοίου τον χρόνο [Days]
Kfuel	Κόστος καυσίμου Heavy Fuel Oil [\$/ton]
Kpr	Κόστος Provision [\$/crew/day]
Ksalary	Μέσος μισθός πληρώματος [\$/crew/month]
Loan_percentage	Ποσοστό δανείου [%]
l	Επιτόκιο δανεισμού [%]
r	Απόδοση του επενδεδυμένου κεφαλαίου
T_loan	Χρόνος αποπληρωμής δανείου [years]
tportA	Χρόνος φόρτωσης [days]
tportB	Χρόνος εκφόρτωσης [days]
Ltrip	Απόσταση ταξιδιού [sm]
Vtrip	Ταχύτητα ταξιδιού [knots]
Cinsurance	Κόστος ασφάλισης [\$/]

Πίνακας 4: Input χρήση 2ου μέρους προγράμματος

Για τον υπολογισμό ενός μέρους των μεγεθών χρησιμοποιούνται οι εμπειρικοί τύποι που αναπτύχθηκαν από την στατιστική ανάλυση (Κεφάλαιο 2).

3.3. Υπολογισμός κύριων χαρακτηριστικών

Αρχικά το πρόγραμμα ελέγχει τα ακόλουθα στοιχεία του χρήστη με βάση τους παρακάτω περιορισμούς και επιστρέφει μήνυμα σε περίπτωση που κάποιο από τα κριτήρια δεν ικανοποιείται:

- Λόγοι κύριων διαστάσεων:

$$3.5 < \frac{L}{B} < 7.5$$

$$1.1 < \frac{D}{T} < 1.9$$

$$2.5 < \frac{B}{T} < 3.5$$

$$9.8 < \frac{L}{D} < 12.6$$

$$1.4 < \frac{B}{D} < 2.3$$

- $15 \leq crew \leq 35$
- $1 < sg \leq 1.04$
- $FS_{AFT}, FS_{ER}, FS_{FWD} \leq 1m$
- $Holdts \leq 12$
- $L_{bulb} \leq 0,8T_{Scant}$
- $L_{hatch} \leq 25m$
- $B_{hatch} \leq B$
- $H_{hatch} \leq 2.5$
- $Z \leq 8$

Αρχικά υπολογίζονται τα ακόλουθα βασικά χαρακτηριστικά του πλοίου:

- Εκτόπισμα (Displacement): υπολογίζεται από την σχέση υδροστατικής μέσω των κυρίων διαστάσεων:

$$\Delta = c\gamma * L_{BP} * B * T * C_B$$

όπου γ είναι το ειδικό βάρος του θαλασσινού νερού (1.025 t/m^3) και c ένας συντελεστής περιβλήματος γάστρας. Το γινόμενο $c\gamma$ κυμαίνεται μεταξύ 1.026 και 1.031 και αποτελεί επιλογή του χρήστη ανάλογα με το μέγεθος του πλοίου (1.026 για μεγάλα και 1.031 για μικρά πλοία).

- Βάρος άφορτου πλοίου (Lightship): υπολογίζεται από προσεγγιστικό τύπο που έχει προκύψει από τη στατιστική ανάλυση (Διάγραμμα 28):

$$Lightship = 0.07011 * L_{BP} * B * D + 2293$$

- Πρόσθετο βάρος (Deadweight): το DWT υπολογίζεται από τη διαφορά του Lightship από το εκτόπισμα στο βύθισμα σχεδίασης:

$$DWT = \Delta - LS$$

- Βύθισμα αντοχής (T Scantling): επιλέξαμε να υπολογισθεί από τον μέσο όρο των δύο ακόλουθων προσεγγιστικών τύπων:

$$\text{Average} \begin{cases} T_{scant} = -97.82 * T_{des}^{-0.4151} + 48.5 \text{ (Διάγραμμα 14)} \\ T_{scant} = 0.206 * DWT_{scant}^{0.3617} + 1.78 \text{ (Διάγραμμα 15)} \end{cases}$$

- Πρόσθετο βάρος στο βύθισμα αντοχής (DWT Scantling): υπολογίζεται από τον προσεγγιστικό τύπο (Διάγραμμα 23):

$$DWT_{scant} = 1.13 * DWT_{des} + 528.2$$

- Όγκος γάστρας (Volume): ο βυθισμένος όγκος της γάστρας στο βύθισμα σχεδίασης από την υδροστατική είναι:

$$\nabla = L_{BP} * B * T * C_B$$

- Ολική χωρητικότητα (Gross Tonnage): υπολογίζεται από τον προσεγγιστικό τύπο (Διάγραμμα 31):

$$GrT = 0.2898 * L_{BP} * B * D + 536.5$$

- Καθαρή χωρητικότητα (Net Tonnage): υπολογίζεται από τον προσεγγιστικό τύπο (Διάγραμμα 35):

$$NrT = 0.6586 * GrT - 1769$$

- Συντελεστής μέσης τομής (C_M): υπολογίστηκε με τη χρήση προσεγγιστικού τύπου που προέκυψε από τη στατιστική ανάλυση (Διάγραμμα 67):

$$C_M = -45.44 * DWT_{Design}^{-0.8951} + 0.9988$$

- Πρισματικός συντελεστής (C_P): υπολογίστηκε με τον τύπο:

$$C_P = \frac{C_B}{C_M}$$

- Συντελεστής ισάλου επιφάνειας (C_{WL}): έγινε υπολογισμός από ήδη υπάρχοντες εμπειρικούς τύπους καθώς η στατιστική ανάλυση έδωσε μια μαθηματική σχέση μεταξύ C_{WL} και C_B αλλά όχι με τόσο καλή συσχέτιση. Για αυτό επιλέξαμε να χρησιμοποιηθεί ο μέσος όρος των παρακάτω σχέσεων (Παπανικολάου 2009):

$$C_{WL} = 0.778 * C_B + 0.248$$

$$C_{WL} = 0.95 * C_P + 0.17 * (1 - C_P)^{\frac{1}{3}}$$

$$C_{WL} = \frac{1 + 2 * C_B}{3}$$

3.4. Υπολογισμός χωρητικότητας δεξαμενών

Σε αυτό το σημείο γίνεται η επιμέρους ανάλυση του DWT και ο υπολογισμός των επιμέρους βαρών. Οι κατηγορίες βαρών που υπολογίζονται είναι οι εξής:

- Fuel Oil: ο όγκος των δεξαμενών καυσίμων Heavy Fuel προσεγγίζεται από τον παρακάτω τύπο (Διάγραμμα 46):

$$V_{FUEL} = (0.2414 * L_{BP} * B * D + 0.7855) * C$$

όπου C ένας συντελεστής ασφαλείας που επιλέγει ο χρήστης με σκοπό την αύξηση του όγκου δεξαμενών καυσίμων. Στα παραδείγματα της παρούσας διπλωματικής θεωρήθηκε $C=1$.

Το βάρος των δεξαμενών των καυσίμων υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας με το ειδικό βάρος του καυσίμου (0.99 t/m^3) και με την πλήρωση των δεξαμενών στο 98% οπότε προκύπτει:

$$W_{FUEL} = V_{FUEL} * 0.99 * 0.98$$

Αξίζει να σημειώσουμε ότι δεν χρησιμοποιήσαμε κάποιον συντελεστή ασφαλείας καθώς από την ανάλυση των αποτελεσμάτων και την σύγκριση τους με τα πραγματικά στοιχεία των πλοίων προέκυψε ότι σε όλες τις περιπτώσεις κάναμε υπερεκτίμηση των καυσίμων.

- Diesel Oil: ο όγκος των δεξαμενών καυσίμων Diesel προσεγγίζεται από τον τύπο (Διάγραμμα 50):

$$\frac{V_{DIESEL}}{V_{FUEL}} = 966.4 * (V_{FUEL})^{-1.331} + 0.05707$$

Όμοια το βάρος των δεξαμενών του Diesel Oil υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας με το ειδικό βάρος του Diesel (0.9 t/m^3) και με την πλήρωση των δεξαμενών στο 98% οπότε προκύπτει:

$$W_{DIESEL} = V_{DIESEL} * 0.9 * 0.98$$

- Lubricating Oil: το βάρος των δεξαμενών λιπαντικών θεωρείται ότι αντιστοιχεί στο 3-5% του συνόλου των δεξαμενών Fuel και Diesel (Παπανικολάου 2009) οπότε επιλέγοντας τον μέσο όρο έχουμε:

$$W_{LUB} = 0.04 * (W_{FUEL} + W_{DIESEL})$$

Όμοια ο όγκος των δεξαμενών του Lubricating Oil υπολογίζεται διαιρώντας με το ειδικό βάρος του Lub Oil (0.9 t/m^3) και με την πλήρωση των δεξαμενών στο 98% οπότε προκύπτει:

$$V_{LUB} = \frac{W_{LUB}}{0.98 * 0.9}$$

- Fresh Water: έχοντας ως δεδομένα από τον χρήστη την ακτίνα ενέργειας (Range) και την υπηρεσιακή ταχύτητα του πλοίου V_S υπολογίζεται η διάρκεια ενός ταξιδιού του πλοίου σε μέρες:

$$trip = \frac{Range}{V_S * 24}$$

Στην συνέχεια διαθέτοντας από τον χρήστη τον αριθμό των μελών του πληρώματος και θεωρώντας ότι για πόσιμο νερό απαιτούνται 10 – 20 kg/ανθρωπομέρα, για καθαριότητα 200 kg/ανθρωπομέρα (Παπανικολάου 2009) και έναν συντελεστή ασφαλείας 15% έχουμε:

$$W_{FW} = \frac{(15 + 200)}{1000} * crew * trip * 1.15$$

$$V_{FW} = W_{FW}$$

- Crew & Effects: το μέσο βάρος για κάθε μέλος πληρώματος θεωρείται ότι είναι 75 kg/άτομο και επιπλέον 60 kg/άτομο για τις αποσκευές του καθενός (Παπανικολάου 2009):

$$W_{CREW} = (75 + 60) * crew$$

- Provisions: τα εφόδια που καταναλώνονται κατά τη διάρκεια του ταξιδιού υπολογίζονται στα 7 – 16 kg/ανθρωπομέρα (Παπανικολάου 2009) οπότε παίρνοντας τον μέσο όρο έχουμε:

$$W_{PR} = \frac{12}{1000} * crew * trip$$

- Σταθερό βάρος (Constants): μια εκτίμηση για το σταθερό βάρος μπορούμε να πάρουμε από την στατιστική ανάλυση που προηγήθηκε και την ακόλουθη σχέση:

$$Const = 6.242 * 10^{-14} * (L_{BP} * B * D)^3 - 3.233 * 10^{-8} * (L_{BP} * B * D)^2 + 0.005318 * (L_{BP} * B * D) - 50.76$$

Η συσχέτιση δεν είναι και η καλύτερη δυνατή ($R^2=0.8105$) αλλά σίγουρα αποτελεί μια ενδεικτική τιμή στο στάδιο της προμελέτης.

- Ωφέλιμο φορτίο (Payload): το βάρος του ωφέλιμου φορτίου που προκύπτει τελικά είναι:

$$Payload = DWT - W_{FUEL} - W_{DIESEL} - W_{LUB} - W_{FW} - W_{CREW} - W_{PR} - W_{CONSTANTS}$$

- Όγκος κυτών: Ο όγκος κυτών προσεγγίζεται από τους ακόλουθους προσεγγιστικούς τύπους που προκύπτουν από τη στατιστική ανάλυση των δεδομένων μας:

$$V_{CARGO, Grain} = 0.6175 * L_{BP} * B * D + 2828 \text{ (Διάγραμμα 39)}$$

$$V_{CARGO, Bale} = 0.9571 * V_{CARGO, Grain} + 86.59 \text{ (Διάγραμμα 42)}$$

Το ειδικό βάρος του φορτίου (t/m^3) για ομογενή φόρτωση και για πλήρωση των δεξαμενών στο 98% της συνολικής χωρητικότητας τους είναι:

$$\gamma_{HOMO} = \frac{Payload}{0.98 * V_{CARGO}}$$

3.5. Έλεγχος γραμμής φόρτωσης

Σε αυτό το στάδιο το πρόγραμμα πραγματοποιεί έλεγχο του βυθίσματος σχεδίασης σε σχέση με τις απαιτήσεις του κανονισμού της γραμμής φόρτωσης (International Load Line Convention, 1966) όπου υπολογίζεται το μέγιστο επιτρεπόμενο έμφορτο βύθισμα του πλοίου και το ύψος εξάλων του.

3.6. Καθορισμός διάταξης και οριοθέτηση φρακτών

Αρχικά στο σημείο αυτό γίνεται υπολογισμός του ύψους του διπύθμενου (Double Bottom) το οποίο καθορίζεται από τον εκάστοτε νηογνώμονα όπως παρακάτω:

$$H_{DB} = 32 * B + 190 * \sqrt{T} \text{ (ABS)}$$

$$H_{DB} = \min \left\{ \begin{array}{l} 28 * B + 205 * \sqrt{T} \\ 650mm \end{array} \right. \text{ (LLOYDS)}$$

$$H_{DB} = \min \left\{ \begin{array}{l} 250 + 20 * B + 50 * T \\ 650mm \end{array} \right. \text{ (DNV)}$$

Στο πρόγραμμα επιλέξαμε να γίνει ο υπολογισμός με τον μέσο όρο των δύο πρώτων καθώς έπειτα από ανάλυση των αποτελεσμάτων διαπιστώθηκε ότι παρουσιάζεται συνολικά υποεκτίμηση και η σχέση από τον DNV δίνει τα μικρότερα αποτελέσματα.

Το επόμενο στάδιο της σχεδίασης περιλαμβάνει τον καθορισμό των χώρων του πλοίου, την θέση των φρακτών (Bulkheads) και των κατασκευαστικών νομέων (Frames).

Ξεκινώντας υπολογίζουμε με τους εμπειρικούς τύπους που προέκυψαν από την στατιστική ανάλυση την θέση της πρυμναίας φρακτής (L_{AFT}) και το μήκος του μηχανοστασίου (L_{ER}) ως εξής:

$$L_{AFT} = 0.03366 * L_{BP} + 1.273 \text{ (Διάγραμμα 82)}$$

$$L_{ENGINE ROOM} = 5.516 * 10^{-6} * L_{BP}^{2.563} + 15.24 \text{ (Διάγραμμα 83)}$$

Έχοντας ως δεδομένο από τον χρήστη την ισαπόσταση των κατασκευαστικών νομέων (Frame Spacing) στο πρυμναίο τμήμα (FS_{AFT}) και στο μηχανοστάσιο (FS_{ER}), καθώς αυτό αποτελεί σχεδιαστική επιλογή και είναι στην ευχέρεια του κάθε μελετητή, υπολογίζεται ο ακριβής αριθμός των κατασκευαστικών νομέων (FR'_i) και το τελικό μήκος κάθε τμήματος (L'_i) ως εξής:

$$FR_i = \frac{L_i}{FS_i} \rightarrow \text{Στρογγυλοποίηση } FR'_i \rightarrow L'_i = FR'_i * FS_i$$

Σημειώνεται ότι αυτή η διαδικασία γίνεται καθώς οι εγκάρσιες φρακτές πρέπει να συμπίπτουν με κάποιον κατασκευαστικό νομέα του πλοίου.

Στην συνέχεια υπολογίζουμε το μήκος του χώρου φορτίου (L_{cargo}) μέσω της εμπειρικής σχέσης (Διάγραμμα 86):

$$L_{Cargo} = 2.576 * V_{Cargo}^{0.3691}$$

και με δεδομένο από τον χρήστη τον αριθμό των κυτών (Holds) υπολογίζεται το μήκος του κάθε ενός (L_{hold}):

$$L_{hold} = \frac{L_{cargo}}{Holds}$$

Έχοντας ως δεδομένο από τον χρήστη τον αριθμό των Web Frames ανά κύτος, υπολογίζουμε την ισαπόσταση τους στον χώρο κυτών (FS_{HOLD}), στρογγυλοποιούμε το αποτέλεσμα και εν συνεχεία υπολογίζουμε ξανά το νέο μήκος κυτών (L'_{HOLD}) οπότε και το νέο μήκος του χώρου φορτίου (L'_{Cargo}).

$$FS_{HOLD} = \frac{L_{HOLD}}{FR_{HOLD}} \rightarrow \text{Στρογγυλοποίηση} \rightarrow FS'_{HOLD} \rightarrow L'_{HOLD} = FS'_{HOLD} * FR_{HOLD} \rightarrow L'_{Cargo} = L'_{Hold} * Holds$$

Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι οι στρογγυλοποιήσεις γίνονται στο εκατοστό του μέτρου, ώστε όταν υπολογίζονται τελικά τα επιμέρους μήκη, οι μετακινήσεις των φρακτών να γίνονται σε επίπεδο εκατοστών και να μην διαφέρουν πολύ από τα αρχικά μήκη που υπολογίστηκαν.

Γνωρίζοντας λοιπόν το μήκος του πρυμναίου τμήματος, του μηχανοστασίου και του χώρου φορτίου μπορούμε να υπολογίσουμε το μήκος του πρωραίου τμήματος του πλοίου (L_{FWD}):

$$L'_{FWD} = L_{BP} - L'_{AFT} - L'_{ER} - L'_{CARGO}$$

Σε αυτό το στάδιο, επειδή το τοίχωμα της τελευταίας δεξαμενής συμπίπτει με την τοποθέτηση της πρωραίας φρακτής σύγκρουσης, πρέπει να γίνει έλεγχος της απόστασης της φρακτής σύμφωνα με τους κανονισμούς της SOLAS (2014) που την περιορίζουν στα ακόλουθα όρια:

$$\min \left\{ \begin{array}{l} 5\%L_{BP} \\ 10 \text{ m} \end{array} \right\} \leq d \leq \max \left\{ \begin{array}{l} 8\%L_{BP} \\ 5\%L_{BP} + 3 \text{ m} \end{array} \right\}$$

όπου d η απόσταση της πρωραίας φρακτής σύγκρουσης από την πρωραία κάθετο (F.P.).

Εφόσον αναφερόμαστε σε πλοία με βολβό η απόσταση της πρωραίας φρακτής σύγκρουσης μετριέται από το σημείο a όπου:

$$a = \min \left\{ \begin{array}{l} \text{Μέσο του βολβού} \left(\frac{L_{BULB}}{2} \right) \\ 1.5\%L_{BP} \text{ πρῶραθεν της F.P.} \\ 3 \text{ m πρῶραθεν της F.P.} \end{array} \right.$$

όπου L_{BULB} το μήκος του βολβού από την πρωραία κάθετο (F.P.) και δίνεται από το χρήστη.

Έτσι λοιπόν η τελική ανισότητα που προκύπτει είναι:

$$\min \left\{ \begin{array}{l} 5\%L_{BP} \\ 10 \text{ m} \end{array} \right\} \leq d + a \leq \max \left\{ \begin{array}{l} 8\%L_{BP} \\ 5\%L_{BP} + 3 \text{ m} \end{array} \right\}$$

Από την παραπάνω ανισότητα προκύπτουν η ελάχιστη και η μέγιστη απόσταση της πρωραίας φρακτής σύγκρουσης από την πρωραία κάθετο:

$$L_{FWD,min} = d_{min} = \min \left\{ \begin{array}{l} 5\%L_{BP} \\ 10 \text{ m} \end{array} \right\} - a$$

$$L_{FWD,max} = d_{max} = \max \left\{ \begin{array}{l} 8\%L_{BP} \\ 5\%L_{BP} + 3 \text{ m} \end{array} \right\} - a$$

Το πρόγραμμα λοιπόν στο σημείο αυτό ελέγχει αν το L_{FWD} ικανοποιεί τα όρια και πραγματοποιεί την ακόλουθη διαδικασία:

$$\begin{cases} \text{Αν } L_{FWD} > L_{FWD,max} \text{ τότε } L'_{FWD} = L_{FWD,max} \\ \text{Αν } L_{FWD} < L_{FWD,min} \text{ τότε } L'_{FWD} = L_{FWD,min} \end{cases}$$

Στην συνέχεια σε κάθε περίπτωση υπολογίζει ξανά τον χώρο του φορτίου ως εξής:

$$L_{CARGO} = L_{BP} - L'_{AFT} - L'_{ER} - L'_{FWD}$$

Με δεδομένο το νέο L_{CARGO} , το πρόγραμμα επαναλαμβάνει τα παραπάνω βήματα επαναπροσδιορισμού του FS_{HOLD} με σκοπό τον τελικό υπολογισμό του χώρου φορτίου. Σημειώνεται ότι στο στάδιο αυτό, οι στρογγυλοποιήσεις γίνονται κατάλληλα σε κάθε περίπτωση

(προς τα πάνω στην πρώτη και προς τα κάτω στην δεύτερη) ώστε να ικανοποιείται ο κανονισμός της πρωραίας φρακτής σύγκρουσης.

Έχοντας οριστικοποιήσει λοιπόν τον χώρο φορτίου και γνωρίζοντας ότι ικανοποιούμε τους κανονισμούς της SOLAS για την απόσταση της πρωραίας φρακτής σύγκρουσης υπολογίζουμε το τελικό μήκος του πρωραίου τμήματος L'_{FWD} το οποίο μετακινήθηκε λίγα εκατοστά από τις τελευταίες στρογγυλοποιήσεις στο χώρο του φορτίου.

3.7. Όγκος δεξαμενών έρματος (Ballast Water)

Η διάμετρος της έλικας μπορεί να υπολογιστεί από προσεγγιστικό τύπο συναρτήσει του γινομένου $L_{BP} * B * D$ (Διάγραμμα 71):

$$D_{PROP} = 0.2288 * (L_{BP} * B * D)^{0.2836}$$

Αρχικά υπολογίζουμε την ποσότητα του θαλάσσιου έρματος από την εμπειρική σχέση συναρτήσει του γινομένου $L_{BP} * B * D$ (Διάγραμμα 45):

$$V_{BALLAST} = 0.03169 * (L_{BP} * B * D)^{1.137}$$

Η ποσότητα αυτή πρέπει να συγκριθεί με την ποσότητα $V_{BALLAST,min}$ που υπολογίζεται μέσω των κανονισμών. Η ελάχιστη αυτή ποσότητα υπολογίζεται σε ένα βύθισμα T_m :

$$T_m = \frac{T_a + T_F}{2}$$

όπου:

$$T_a = D_{PROP} + 0.6$$

$$T_F = 0.027 * L_{BP}$$

Υπολογίζουμε το εκτόπισμα και το DWT στην κατάσταση ερματισμού του πλοίου (Ballast Arrival) στο βύθισμα T_m :

$$\Delta_{B.ARRIVAL} = c_Y * L_{BP} * B * T_m * C_{B,T_m}$$

$$DWT_{B.ARRIVAL} = \Delta_{B.ARRIVAL} - LS$$

Όπου ο συντελεστής γάστρας στο ελάχιστο βύθισμα υπολογίζεται με βάση τον εμπειρικό τύπο:

$$C_{B,T_{min}} = C_B * \left(\frac{T_m}{T} \right)^{\frac{C_{WL}}{C_B} - 1}$$

Τα αναλώσιμα (Consumables) στην κατάσταση αυτή αντιστοιχούν στο 10% της κατάστασης Full Load Departure άρα:

$$CONS_{ARRIVAL} = 0.1 * (W_{FUEL} + W_{DIESEL} + W_{LUB} + W_{FW} + W_{PR})$$

Επομένως το ελάχιστο απαιτούμενο βάρος θαλάσσιου έρματος είναι:

$$W_{BALLAST,min} = DWT_{B.ARRIVAL} - CONS_{ARRIVAL} - W_{CR} - W_{CONSTANTS}$$

και ο ελάχιστος απαιτούμενος όγκος:

$$V_{BALLAST,min} = \frac{W_{BALLAST,min}}{1.025}$$

Στο στάδιο αυτό, το πρόγραμμα πραγματοποιεί έλεγχο αν η ποσότητα του έρματος είναι μεγαλύτερη από την ελάχιστη απαιτούμενη ποσότητα δηλαδή αν:

$$V_{BALLAST} \geq V_{BALLAST,min}$$

Σε περίπτωση που δεν ικανοποιείται το κριτήριο αυτό τότε το πρόγραμμα θέτει ως $V'_{BALLAST} = V_{BALLAST,min}$.

Η αύξηση αυτή της ποσότητας έρματος πρέπει να αφαιρεθεί από το μεταφερόμενο φορτίο οπότε έχουμε ότι:

$$V_{Cargo'_{GRAIN}} = V_{Cargo_{GRAIN}} - (V_{BALLAST,min} - V_{BALLAST})$$

Πλέον, έχοντας αλλάξει την χωρητικότητα φορτίου πρέπει να επαναληφθούν όλα τα βήματα που έγιναν στην παράγραφο 3.6 υπολογίζοντας ξανά το L_{cargo} ακολουθώντας στην συνέχεια την διαδικασία επανελέγχου της πρωραίας φρακτής σύγκρουσης.

3.8. Υπολογισμός κέντρου βάρους και υδροστατικών

Όλοι οι παρακάτω υπολογισμοί αφορούν την κατάσταση Full Load Departure του πλοίου.

3.8.1. Κέντρα βάρους

Φορτίου: Υπολογίζεται από τον μέσο όρο των παρακάτω σχέσεων:

$$KG_{CARGO} = \text{average} \left\{ \begin{array}{l} 0.5097 * D + 1.124 \text{ (Διάγραμμα 56)} \\ h_{DB} + 0.52 * (D - h_{DB}) \end{array} \right.$$

$$LCG_{CARGO} = \text{average} \left\{ \begin{array}{l} 0.5418 * L_{BP} + 0.1962 \text{ (Διάγραμμα 57)} \\ L_{AFT} + L_{ER} + 0.485 * L_{CARGO} \end{array} \right.$$

Lightship: Υπολογίζεται από τους ακόλουθους εμπειρικούς τύπους που προέκυψαν από την στατιστική ανάλυση:

$$KG_{LS} = 0.3933 * D + 3.996 \text{ (Διάγραμμα 52)}$$

$$LCG_{LS} = 0.5028 * L_{BP} - 8.915 \text{ (Διάγραμμα 53)}$$

DWT: Υπολογίζεται από τους ακόλουθους εμπειρικούς τύπους που προέκυψαν από την στατιστική ανάλυση:

$$KG_{DWT} = 0.5352 * D - 0.7465$$

$$LCG_{DWT} = 0.5296 * L_{BP} - 0.36$$

Full Load Departure: Υπολογίζεται από τους ακόλουθους εμπειρικούς τύπους που προέκυψαν από την στατιστική ανάλυση:

$$KG = 0.5126 * D + 1.215 \text{ (Διάγραμμα 54)}$$

$$LCG = 0.5331 * L_{BP} - 3.361 \text{ (Διάγραμμα 55)}$$

3.8.2. Υδροστατικά μεγέθη

Κέντρο άντωσης (Centre of Buoyancy):

Για την κατακόρυφη θέση του κέντρου άντωσης KB δεν προέκυψαν προσεγγιστικοί τύποι επομένως υπολογίζεται από τον μέσο όρο των ήδη υπάρχοντων εμπειρικών τύπων:

$$KB = average \begin{cases} T * (0.9 - 0.36 * C_M) & \text{Normand I} \\ T * (0.9 - 0.3 * C_M - 0.1 * C_B) & \text{Schneekluth} \\ T * \left(\frac{5}{6} - \frac{C_B}{3 * C_{WL}} \right) & \text{Normand II} \end{cases}$$

Η διαμήκης θέση του κέντρου άντωσης LCB (Longitudinal Centre of Buoyancy) προκύπτει από τον μέσο όρο των παρακάτω εμπειρικών σχέσεων που προέκυψαν από την παραπάνω ανάλυση:

$$LCB = 4.459 * DWT^{0.2898}$$

$$LCB = 0.5447 * L_{BP} - 4.263 \text{ (Διάγραμμα 62)}$$

Μετάκεντρο: η μετακεντρική ακτίνα BM προκύπτει από τον εμπειρικό τύπο (Παπανικολάου 2009):

$$BM = C_1 * \frac{B^2}{12 * T * C_B}$$

Όπου C_1 ο μέσος όρος των παρακάτω συντελεστών:

$$C_1 = \begin{cases} 0.096 + 0.89 * C_{WL}^2 \\ C_{WL}^{1.8} \\ 0.0372 * (2 * C_{WL} + 1)^3 \\ 0.13 * C_{WL} + 0.87 * C_{WL}^2 \end{cases}$$

Το μετακεντρικό ύψος GM μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$GM = KM - KG = KB + BM - KG$$

3.9. Υπολογισμός αντίστασης και πρόωσης

Για τον υπολογισμό της ισχύς πρόωσης του υπό μελέτη πλοίου, βασικό προαπαιτούμενο αποτελεί ο υπολογισμός της αντίστασης του πλοίου. Προκειμένου να γίνει αυτό, εφαρμόστηκε η μέθοδος Holtrop – Mennen 1978 (1982,1984) η οποία προγραμματίστηκε στο Matlab αποτελώντας υποπρόγραμμα του κύριου προγράμματος.

Αρχικά θα ήταν χρήσιμο να δοθούν κάποιοι ορισμοί και κάποιες σταθερές που χρησιμοποιούνται μέσα στο πρόγραμμα και είναι παρακάτω:

- L: μήκος ισάλου στο βύθισμα σχεδίασης (θεωρούμε $L=1.02 * L_{BP}$).
- ∇ : βυθισμένος όγκος γάστρας (m^3).
- V_S : ταχύτητα πλοίου σε m/s ($1kn=0.5144m/s$).
- ρ : πυκνότητα θαλασσινού νερού ($1.025 t/m^3$ για θερμοκρασία $15^\circ C$).
- ν : κινηματική συνεκτικότητα θαλασσινού νερού ($1.18831 * 10^{-6} m^2/s$ για θερμοκρασία $15^\circ C$).
- $g=9.81 m/s^2$: επιτάχυνση βαρύτητας.
- $Re = \frac{V_S * L}{\nu}$: αριθμός Reynolds.

- $F_n = \frac{V_S}{\sqrt{g \cdot L}}$: αριθμός Froude.
- $\rho_0 + \rho g h$: στατική πίεση στον άξονα της έλικας (kN/m^2).
- ρ_v : πίεση ατμοποίησης νερού (kN/m^2) ($\rho_0 - \rho_v = 99.047 \text{ kN/m}^2$ για θερμοκρασία 15°C).
- lcb : διαμήκης θέση του κέντρου άντωσης ως προς το μέσο νομέα σε ποσοστό του L_{BP} . Γνωρίζοντας το LCB από την πρυμναία κάθετο (Α.Ρ.) υπολογίζεται από τον τύπο:

$$lcb = \left(LCB - \frac{L_{BP}}{2} \right) * \frac{100}{L_{BP}}$$

Τα πρόσθετα δεδομένα που αφορούν αυτό το στάδιο του προγράμματος δίνονται από τον χρήστη μέσω του αρχείου Input και είναι τα ακόλουθα:

- Z : αριθμός πτερυγίων της έλικας.
- A_{BT} : το εμβαδόν της εγκάρσιας επιφάνειας βολβού (m^2) στο σημείο τομής της ισάλου με το προφίλ της πλήρης.
- h_B : η απόσταση του κέντρου του A_{BT} από τον πυθμένα (m) ($h_B < 0.6 * T_F$).
- A_T : η βυθισμένη επιφάνεια της πρύμνης άβακα (m^2).
- S_{APP} : η συνολική επιφάνεια των παρελκομένων (m^2).

Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι τα δεδομένα αυτά είναι πιο εξειδικευμένα και μπορεί ο χρήστης του προγράμματος να μην τα γνωρίζει. Για τον λόγο αυτό μπορούν τα A_{BT} , h_B , A_T , S_{APP} να θεωρηθούν ίσα με το μηδέν, όπως πραγματοποιήθηκε και στην παρούσα εργασία, με τις αποκλίσεις στα αποτελέσματα από τα πραγματικά στοιχεία να είναι μικρές.

3.9.1. Υπολογισμός αντίστασης

Ξεκινώντας την μέθοδο Holtrop-Mennen, αρχικά υπολογίζουμε κάποιους απαραίτητους συντελεστές που θα χρησιμοποιηθούν στην συνέχεια:

$$i_E = 1 + 89e^{\left(-\left(\frac{L}{B}\right)^{0.80856} (1 - C_{WL})^{0.30484} (1 - C_P - 0.0225lcb)^{0.6367} \left(\frac{L_R}{B}\right)^{0.34574} \left(\frac{100V}{L^3}\right)^{0.16302} \right)}$$

$$\lambda = \begin{cases} 1.446C_P - 0.03 * \frac{L}{B} & \frac{L}{B} \leq 12 \\ 1.446C_P - 0.36 & \frac{L}{B} > 12 \end{cases}$$

$$c_{14} = 1 + 0.011 * c_{stern}$$

Όπου $c_{stern} = 0$ για κανονική μορφή νομέων στην πρύμνη.

$$c_7 = \begin{cases} 0.229577 * \left(\frac{B}{L}\right)^{0.33333} & \frac{B}{L} \leq 0.11 \\ \frac{B}{L} & 0.11 < \frac{B}{L} < 0.25 \\ 0.5 - 0.0625 * \frac{L}{B} & \frac{B}{L} \geq 0.25 \end{cases}$$

$$c_1 = 2223105 * c_7^{3.78613} * \left(\frac{T}{B}\right)^{1.07961} (90 - i_E)^{-1.37565}$$

$$c_3 = \frac{0.56 * A_{BT}^{1.5}}{B * T * (0.31 * \sqrt{A_{BT}} + T_F - h_B)}$$

$$c_2 = \exp(-1.89 * \sqrt{c_3})$$

$$c_5 = 1 - \frac{0.8 * A_T}{B * T * C_M}$$

$$c_{15} = \begin{cases} -1.69385 & \frac{L^3}{V} \leq 512 \\ -1.69385 + \frac{\left(\frac{L}{V^{\frac{1}{3}}} - 8\right)}{2.36} & 512 < \frac{L^3}{V} < 1726.91 \\ 0 & \frac{L^3}{V} \geq 1726.91 \end{cases}$$

$$c_{16} = \begin{cases} 8.07981 * C_P - 13.8673 * C_P^2 + 6.984388 * C_P^3 & C_P < 0.8 \\ 1.73014 - 0.7067 * C_P & C_P \geq 0.8 \end{cases}$$

$$c_{17} = 6919.3 * C_M^{-1.3346} \left(\frac{V}{L^3}\right)^{2.00977} \left(\frac{L}{B} - 2\right)^{1.40692}$$

$$m_1 = 0.0140407 * \frac{L}{T} - 1.75254 * \frac{V^{\frac{1}{3}}}{L} - 4.79323 * \frac{B}{L} - c_{16}$$

$$m_3 = -72035 \left(\frac{B}{L}\right)^{0.326869} \left(\frac{T}{B}\right)^{0.605375}$$

$$m_4 = 0.4 * c_{15} * \exp(-0.034 * F_n^{-3.29})$$

3.9.2. Αντίσταση Κυματισμού (Wave Resistance)

Η αντίσταση κυματισμού εξαρτάται από τον αριθμό Froude και υπολογίζεται ως εξής:

$$R_W = \begin{cases} R_{W-A} = c_1 c_2 c_5 \nabla \rho g \exp(m_1 F_n^{-0.9} + m_4 \cos(\lambda F_n^{-2})), F_n < 0.4 \\ R_{W-B} = c_{17} c_2 c_5 \nabla \rho g \exp(m_3 F_n^{-0.9} + m_4 \cos(\lambda F_n^{-2})), F_n > 0.55 \\ R_{W-A} + (10F_n - 4) \frac{R_{W-B} - R_{W-A}}{1.5}, 0.4 \leq F_n \leq 0.55 \end{cases}$$

3.9.3. Αντίσταση Τριβής (Friction Resistance)

Η αντίσταση τριβής υπολογίζεται από την σχέση:

$$R_F = \frac{1}{2} * \rho * S * V_S^2 * C_F$$

όπου S είναι η βρεχόμενη επιφάνεια και C_F ο συντελεστής τριβής που υπολογίζονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$S = L(2T + B) \sqrt{C_M} \left(0.453 + 0.4425 C_B - 0.2862 C_M - 0.0003467 \frac{B}{T} + 0.3696 C_{WL} \right) + 2.38 \frac{A_{BT}}{C_B}$$

$$C_F = \frac{0.075}{(\log Re - 2)^2}$$

3.9.4. Αντίσταση παρελκομένων (Appendages Resistance)

Η αντίσταση των παρελκομένων δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$R_{APP} = \frac{1}{2} * \rho * S_{APP} * V_S^2 * C_F * (1 + k_2)$$

όπου S_{APP} η επιφάνεια των παρελκομένων και $(1 + k_2)$ ο συνολικός συντελεστής παρελκομένων που υπολογίζεται ως εξής:

$$1 + k_2 = \frac{\sum_i (1 + k_2)_i * S_i}{S_{APP}}$$

Appendage Type	(1+k ₂) value
Rudder behind skeg	1.5 – 2
Rudder behind stern	1.3 – 1.5
Twin – screw balance rudders	2.8
Shaft brackets	3.0
Skeg	1.5 – 2.0
Strut bossings	3.0
Hull bossings	2.0
Shafts	2.0 – 4.0
Stabilizer fins	2.8
Dome	2.7
Bilge keels	1.4

Πίνακας 5: Υπολογισμός συντελεστή παρελκομένων (1+k₂)

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήσαμε μια σταθερή ενδεικτική τιμή του συντελεστή $1 + k_2 = 1.5$ καθώς δεν υπήρχαν επαρκή δεδομένα για τον ακριβή υπολογισμό του.

3.9.5. Αντίσταση λόγω βύθισης της πρύμνης (Transom Stern Resistance)

Η πρόσθετη αντίσταση λόγω βύθισης της πρύμνης δίνεται από την σχέση:

$$R_{TR} = \frac{1}{2} * \rho * A_T * V_S^2 * c_6$$

όπου $c_6 = \begin{cases} 0.2 * (1 - 0.2 * F_{nT}) & F_{nT} < 5 \\ 0 & F_{nT} \geq 5 \end{cases}$ με F_{nT} τον αριθμό Froude που βασίζεται στην βύθιση της πρύμνης και δίνεται από τη σχέση $F_{nT} = \frac{V_S}{\sqrt{\frac{2 * g * A_T}{B + B * C_{WL}}}}$.

3.9.6. Αντίσταση λόγω βολβοειδούς πλώρας (Bulbous Bow Resistance)

Η αντίσταση λόγω βολβοειδούς πλώρης δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$R_B = \frac{0.11 * e^{-3P_B^2} * F_{ni}^3 * A_{BT}^{1.5} * \rho * g}{1 + F_{ni}^2}$$

Όπου P_B αποτελεί ένα μέτρο ανάδυσσης του βολβού και F_{ni} ο αριθμός Froude που βασίζεται στη βύθισή του και υπολογίζονται ως εξής:

$$P_B = \frac{0.56 * \sqrt{A_{BT}}}{T_F - 1.5 * h_B}$$

$$F_{ni} = \frac{V_S}{\sqrt{g * (T_F - h_B - 0.25 * \sqrt{A_{BT}}) + 0.15 * V_S^2}}$$

3.9.7. Αντίσταση λόγω συντελεστή συσχέτισης (Correlation Resistance)

Λόγω διαφορών στα χαρακτηριστικά τραχύτητας της γάστρας και της ροής στην πλήρη μεταξύ του μοντέλου και του πραγματικού πλοίου έχει εισαχθεί ένας διορθωτικός συντελεστής C_A :

$$C_A = 0.006 * (L + 100)^{-0.16} - 0.00205 + 0.003 * \sqrt{\frac{L}{7.5}} * C_B^4 * c_2 * (0.04 - c_4)$$

$$\text{όπου } c_4 = \begin{cases} \frac{T_F}{L} & \frac{T_F}{L} < 0.04 \\ 0.04 & \frac{T_F}{L} \geq 0.04 \end{cases}$$

Έτσι η αντίσταση λόγω αυτού του συντελεστή συσχέτισης είναι:

$$R_A = \frac{1}{2} * \rho * S * V_S^2 * C_A$$

3.9.8. Συνολική αντίσταση (Total Resistance)

Η συνολική αντίσταση προκύπτει αθροίζοντας τις παραπάνω επιμέρους συνιστώσες της με την διαφορά ότι η αντίσταση τριβής πολλαπλασιάζεται από έναν συντελεστή μορφής γάστρας ($1 + k_1$) δηλαδή:

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

$$\text{όπου } 1 + k_1 = 0.93 + 0.487118 c_{14} \left(\frac{B}{L}\right)^{1.06806} \left(\frac{T}{L}\right)^{0.46106} \left(\frac{L}{L_R}\right)^{0.121563} \left(\frac{L^3}{V}\right)^{0.36486} (1 - C_P)^{-0.604247}$$

$$\text{και } L_R = L \left(1 - C_P + \frac{0.06 * C_P * lcb}{4 * C_P - 1}\right)$$

3.9.9. Απαιτούμενη ισχύς ρυμούλκησης

Έχοντας υπολογίσει την συνολική αντίσταση που παρουσιάζει το πλοίο μπορούμε να υπολογίσουμε την απαιτούμενη ισχύς ρυμούλκησης:

$$EHP = R_{TOTAL} * V_S$$

3.9.10. Υπολογισμός ισχύος και στροφών έλικας

Αρχικά σύμφωνα με την Holtrop υπολογίζονται τα εξής μεγέθη:

- Συντελεστής μείωσης ώσης t (Thrust deduction factor)

$$t = \frac{0.25014 \left(\frac{B}{L}\right)^{0.28956} \left(\frac{\sqrt{B * T}}{D_{PROP}}\right)^{0.2624}}{(1 - C_P + 0.0225 * lcb)^{0.01762}} + 0.0015 * c_{stern}$$

- Ποσοστό ομόρρου w (Wake fraction)

$$w = c_9 c_{20} C_V \frac{L}{T_A} \left(0.050776 + 0.93405 c_{11} \frac{C_V}{(1 - C_{P1})} \right) + 0.27915 c_{20} \sqrt{\frac{B}{L(1 - C_{P1})}} + c_{19} c_{20}$$

όπου C_V ο συντελεστής αντίστασης λόγω συνεκτικότητας του ρευστού:

$$C_V = (1 + k) * C_F + C_A$$

Και $1+k$ ο συντελεστής μορφής που συνδέει το συντελεστή γάστρας $(1+k_1)$ και των παρελκομένων $(1+k_2)$:

$$1 + k = 1 + k_1 + ((1 + k_2) - (1 + k_1)) \frac{S_{APP}}{S + S_{APP}}$$

Οι υπόλοιποι συντελεστές είναι οι εξής:

$$c_9 = \begin{cases} c_8 & c_8 < 28 \\ 32 - \frac{16}{c_8 - 24} & c_8 \geq 28 \end{cases}$$

$$c_{11} = \begin{cases} \frac{T_A}{D_{PROP}} & \frac{T_A}{D_{PROP}} < 2 \\ 0.0833333 \left(\frac{T_A}{D_{PROP}} \right)^3 + 1.33333 & \frac{T_A}{D_{PROP}} \geq 2 \end{cases}$$

$$c_{20} = 1 + 0.015 * c_{stern}$$

$$C_{P1} = 1.45 * C_P - 0.315 - 0.0225 * lcb$$

$$c_{19} = \begin{cases} \frac{0.12997}{0.95 - C_B} - \frac{0.11056}{0.95 - C_P} & C_P < 0.7 \\ \frac{0.18567}{1.3571 - C_M} - 0.71276 + 0.38648 * C_P & C_P \geq 0.7 \end{cases}$$

- Λόγος εκτεταμένης επιφάνειας πτερυγίων EAR (Expanded Area Ratio)

$$EAR = K + (1.3 + 0.3 * Z) \frac{Thrust}{D_{PROP}^2 * (p_0 + \rho gh - p_v)}$$

Όπου $K=0.2$ για μονέλικα πλοία και η απαιτούμενη ώση της έλικας είναι:

$$Thrust = \frac{R_{TOTAL}}{1 - t}$$

- Βαθμός απόδοσης σχετικής περιστροφής η_R

$$\eta_R = 0.9922 - 0.05908 * EAR + 0.07424(C_P - 0.0225 * lcb)$$

- Συντελεστής προχώρησης J

$$J = \frac{V_A}{n * D_{PROP}}$$

Όπου V_A η ταχύτητα προχώρησης της έλικας:

$$V_A = V_S * (1 - w)$$

Στο σημείο αυτό μπορούμε να επιλέξουμε την κατάλληλη έλικα της σειράς Wageningen-B series. Το πρόβλημα υπολογισμού ισχύος και στροφών της έλικας είναι ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης δύο μεταβλητών που πραγματοποιείται στο Matlab (Optimization Tool). Οι παράμετροι είναι τα παρακάτω μεγέθη:

- P/D (Pitch Ratio): λόγος βήματος προς διάμετρο έλικας.
- n: ταχύτητα περιστροφής της έλικας (rpm).

Αρχικά θέτουμε στο Matlab τα όρια των μεταβλητών τα οποία είναι τα εξής:

Variables	Lower Bound	Upper Bound
n (rpm)	1	2
P/D	0.5	1.4

Πίνακας 6: Όρια μεταβλητών προβλήματος υπολογισμού έλικας

Η λύση του προβλήματος εστιάζει στην εύρεση της ταχύτητας περιστροφής n και του λόγου P/D που μεγιστοποιεί το βαθμό απόδοσης της έλικας σε ελεύθερη ροή:

$$\eta_0 = \frac{J * K_T}{2\pi * K_Q}$$

Οι συντελεστές ώσης K_T και ροπής K_Q υπολογίζονται από γνωστά πολυώνυμα για έλικα της σειράς Wageningen B-series συναρτήσεων των P/D, EAR, Z και J. Ο υπολογισμός του K_T , του K_Q και του η_0 πραγματοποιείται μέσω υποπρογράμματος-συνάρτησης στο Matlab.

Για την επίλυση του παραπάνω προβλήματος θα πρέπει να τεθεί ο περιορισμός για το συντελεστή ώσης της έλικας που ορίζεται μέσω ενός νέου υποπρογράμματος-συνάρτησης.

$$K_T = \frac{Thrust}{\rho * n^2 * D_{PROP}^4}$$

Από τη λύση του προβλήματος υπολογίζεται ο λόγος βήματος προς διάμετρο (P/D) και η ταχύτητα περιστροφής (rpm) της έλικας ώστε να μεγιστοποιείται ο βαθμός απόδοσης της σε ελεύθερη ροή η_0 . Τέλος, έχοντας όλα τα απαραίτητα δεδομένα, υπολογίζεται η ισχύς SHP (Shaft Horse Power) που απαιτεί η έλικα:

$$SHP = \frac{EHP}{\frac{1-t}{1-w} \eta_0 \eta_R \eta_S}$$

όπου η_S ο βαθμός απόδοσης του άξονα που θεωρείται ίσος με 0.99.

3.10. Επιλογή μηχανολογικής εγκατάστασης

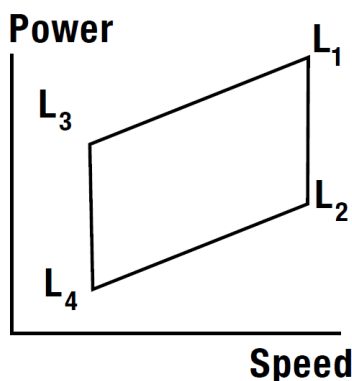
Προκειμένου να επιλέξουμε κατάλληλη μηχανή πρέπει να υπολογίσουμε το MCR (Maximum Continuous Rating). Έχοντας το SHP που αντιστοιχεί σε ήρεμη κατάσταση θάλασσας και καθαρή γάστρα, λαμβάνουμε μια προσαύξηση 17% για ένα περιθώριο θάλασσας (Sea Margin) και για ρυπασμένη γάστρα (Fouled Hull) με αποτέλεσμα να προκύπτει το MCR:

$$MCR = \frac{SHP}{0.83}$$

Στο σημείο αυτό σημειώνεται ότι έπρεπε να θεωρήσουμε μια μείωση κατά 90% στο τελικό MCR με το οποίο θα γίνει η επιλογή της μηχανής καθώς δεν πρέπει ο κινητήρας να λειτουργεί στο 100% της ισχύς του. Ωστόσο, λόγω της συστηματικής υπερεκτίμησης της μεθόδου του Holtrop-Mennen αποφασίστηκε να μην χρησιμοποιηθεί τέτοιος συντελεστής.

Η επιλογή της μηχανής γίνεται από μια βιβλιοθήκη που δημιουργήσαμε στο Microsoft Excel με χαρακτηριστικά που περιέχονται στα εγχειρίδια του κατασκευαστή MAN. Ο χρήστης, ωστόσο μπορεί να προσθέσει νέους κινητήρες της επιλογής του. Τα στοιχεία που περιλαμβάνονται στο Excel είναι τα εξής:

- Μοντέλο μηχανής
- Το διάγραμμα λειτουργίας (Layout Diagram) του κινητήρα που ορίζεται από 4 σημεία (L1, L2, L3, L4) όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Πίνακας 7: Τυπικό Layout Diagram ενός κινητήρα

- Το εύρος στροφών λειτουργίας κινητήρα (n_{min} , n_{max})
- Ειδική κατανάλωση καυσίμου SFOC (Specific Oil Fuel Consumption, gr/kWh)
- Βάρος κινητήρα

Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειώσουμε ότι η επιλογή κινητήρα γίνεται με μοναδικό κριτήριο την ισχύ MCR και όχι τις στροφές της έλικας καθώς οι στροφές μπορούν να αλλάξουν διαφοροποιώντας τον λόγο P/D. Πιο συγκεκριμένα επιλέγεται ο κινητήρας όπου το σημείο L1 είναι πιο κοντά στην MCR που έχει υπολογιστεί.

Στην συνέχεια το πρόγραμμα ελέγχει αν η χωρητικότητα δεξαμενών καυσίμων που έχει ήδη υπολογιστεί, ικανοποιεί τις απαιτήσεις της ακτίνας ενέργειας με δεδομένο την ειδική κατανάλωση καυσίμου στο 100% του MCR. Σε περίπτωση που το κριτήριο δεν ικανοποιείται, το πρόγραμμα επιστρέφει προειδοποιητικό μήνυμα στον χρήστη.

3.11. Μέθοδος υπολογισμού Lightship

Στο σημείο αυτό θα γίνει αναλυτικός υπολογισμός του Lightship προκειμένου να γίνει έλεγχος της απόκλισης από αυτό που υπολογίστηκε στην αρχή του προγράμματος από προσεγγιστικό τύπο και με το οποίο έγιναν όλοι οι υπολογισμοί.

Επίσης θα προκύψει η ανάλυση του Lightship σε τρεις βασικές κατηγορίες που θα χρησιμεύσουν στον υπολογισμό του κόστους απόκτησης του πλοίου. Οι κατηγορίες αυτές είναι:

- Βάρος μεταλλικής κατασκευής (W_{ST})
- Βάρος ενδιαίτησης και εξοπλισμού (W_{OT})
- Βάρος μηχανολογικής εγκατάστασης (W_M)

Βάρος μεταλλικής κατασκευής (W_{ST})

Το βάρος της μεταλλικής κατασκευής υπολογίστηκε με τη μέθοδο Schneekluth, η οποία όμως δεν περιλαμβάνει το βάρος των υπερκατασκευών (W_{SS}) το οποίο δίνεται από τον χρήστη λόγω έλλειψης δεδομένων για τον υπολογισμό του.

Η μέθοδος υπολογίζει τον όγκο κάτω από το ανώτατο συνεχές κατάστρωμα ∇_U από τον τύπο:

$$\nabla_U = \nabla_D + \nabla_S + \nabla_b + \nabla_H$$

Όπου:

∇_D : όγκος του πλοίου έως το D.

∇_S : αύξηση όγκου λόγω σιμότητας.

∇_b : αύξηση όγκου λόγω κυρτότητας καταστρώματος.

∇_H : αύξηση όγκου λόγω στομιών κυτών.

Ο όγκος του πλοίου έως το D είναι:

$$\nabla_D = L_{BP} * B * D * C_{BD}$$

όπου:

$C_{BD} = C_B + C_1 \frac{(D-T)}{T} (1 - C_B)$ συντελεστής γάστρας στο κοίλο D

$C_1 = 0.25$: για πλοία με μικρό άνοιγμα νομέων υπεράνω της ισάλου.

Η αύξηση του όγκου λόγω κυρτότητας του καταστρώματος είναι:

$$\nabla_b = L_{BP} * B * b * C_3$$

Όπου:

b: κυρτότητα του καταστρώματος που δίνεται από το χρήστη σε μέτρα.

$C_3 = 0.7C_{BD}$

Το βάρος της μεταλλικής κατασκευής W'_{ST} χωρίς τις υπερκατασκευές δίνεται συναρτήσει του υπολογισμένου συνολικού όγκου ∇_U , ενός συντελεστή ειδικού μοναδιαίου βάρους C'_{ST} και διαφόρων διορθώσεων όπως φαίνεται στον παρακάτω τύπο:

$$W'_{ST} = \nabla_U * C'_{ST} * \left[1 + 0.033 \left(\frac{L}{D} - 12 \right) \right] * \left[1 + 0.06 \left(n - \frac{D}{D_0} \right) \right] * \left[1 + 0.05 \left(1.85 - \frac{B}{D} \right) \right] \\ * \left[1 + 0.2 \left(\frac{T}{D} - 0.85 \right) \right] * [0.92 + (1 - C_{BD})^2] * [1 + 0.75C_{BD}(C_M - 0.98)]$$

όπου:

$n = 1$: ο αριθμός των καταστρωμάτων.

$D_0 = 4$ m

$L/D \geq 9$

$C'_{ST} = 0.108 - 0.117$ συντελεστής ειδικού μοναδιαίου βάρους για φορτηγά πλοία (t/m^3).

Στο παραπάνω βάρος γίνεται διόρθωση για:

- Βολβοειδή πλώρα: αύξηση 0.4÷0.7%
- Χρήση χάλυβα υψηλής αντοχής: μείωση 5-7%

Επομένως προκύπτει:

$$W_{ST} = (1.0055 * W'_{ST}) * 0.93$$

Το τελικό βάρος της μεταλλικής κατασκευής λαμβάνοντας υπόψιν το βάρος των υπερκατασκευών (W_{SS}) είναι:

$$W_{ST,CALC} = W_{ST} + W_{SS}$$

Βάρος ενδιαίτησης και εξοπλισμού (W_{OT})

Για το βάρος ενδιαίτησης και εξοπλισμού θα χρησιμοποιηθούν δύο διαφορετικές μέθοδοι με το τελικό βάρος $W_{OT,CALC}$ να προκύπτει από τον μέσο όρο αυτών.

- Μέθοδος με προσεγγιστικό τύπο (Παπανικολάου 2009)

Ο προσεγγιστικός τύπος για φορτηγά πλοία στην προκαταρκτική φάση μελέτης είναι:

$$W_{OT,1} = K_{OT} * L_{BP} * B$$

όπου:

$K_{OT} = 0.25 \text{ t/m}^3$ για bulk carriers μήκους $L_{BP}=140 \text{ m}$.

$K_{OT} = 0.17 \text{ t/m}^3$ για bulk carriers μήκους $L_{BP}=250 \text{ m}$.

$K_{OT} = 0.15 \text{ t/m}^3$ για bulk carriers μήκους $L_{BP}=300 \text{ m}$.

Για τα ενδιάμεσα μήκη γίνεται γραμμική παρεμβολή.

- Μέθοδος ομάδων βαρών κατά Schneekluth

Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει τον υπολογισμό του βάρους για 4 μεγάλες ομάδες βαρών:

Καλύμματα στομίων κυτών

Το βάρος των καλυμμάτων υπολογίζεται από το πρόγραμμα μέσω γραμμικής παρεμβολής από τον παρακάτω πίνακα της μεθόδου:

	Βάρος [κρ] ανά μέτρο μήκους στομίου				
Πλάτος στομίου [m]	6	8	10	12	14
[κρ/m ³]	826	1230	1720	2360	3150

Φορτοεκφορτωτικά μέσα

Στα φορτοεκφορτωτικά μέσα που χρησιμοποιούνται στα φορτηγά πλοία, ανήκουν οι γερανοί το βάρος των οποίων δίνεται από το χρήστη καθώς ποικίλει ανάλογα την ανυψωτική τους ικανότητα.

Ενδιαίτηση

Για το βάρος ενδιαίτησης θεωρούμε ένα συντελεστή βάρους ίσο με $80\div 90 \text{ κρ/m}^3$. Ο όγκος των υπερκατασκευών θα υπολογιστεί προσεγγιστικά χρησιμοποιώντας τους εμπειρικούς τύπους που παράχθηκαν στο πρώτο μέρος της παρούσας εργασίας:

$$V_{SS} = L_{SS} * B_{SS} * H_{SS}$$

Άρα το βάρος της ενδιαίτησης σε τόνους υπολογίζεται:

$$W_{III} = V_{SS} * \frac{85}{1000}$$

Λοιπά βάρη

Για τα υπόλοιπα βάρη πάνω στο πλοίο υπάρχει ο προσεγγιστικός τύπος:

$$W_{IV} = (L_{BP} * B * D)^{2/3} * C_1$$

όπου $C_1 = 0.18 \div 0.26 \text{ t/m}^3$.

Άρα τελικά προκύπτει: $W_{OT,2} = W_I + W_{II} + W_{III} + W_{IV}$

Βάρος μηχανολογικής εγκατάστασης (W_M)

Μέθοδος ομάδων βαρών κατά Strohbusch

Το βάρος μηχανολογικής εγκατάστασης αναλύεται σε 3 μέρη ως:

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

όπου:

W_{MM} : βάρος κύριας μηχανής και μειωτήρα.

W_{MS} : βάρος ελικοφόρου άξονα και έλικας.

W_{MR} : βάρος λοιπής μηχανολογικής εγκατάστασης.

- βάρος ελικοφόρου άξονα και έλικας W_{MS} :

Για το βάρος ελικοφόρου άξονα και έλικας έχουμε:

$$W_{MS} = w_3 * SHP$$

όπου $w_3 = 7.5 \text{ kp/m}^3$.

- βάρος κύριας μηχανής και μειωτήρα W_{MM} : Για το βάρος της κύριας μηχανής δεν χρησιμοποιήσαμε τύπο της βιβλιογραφίας καθώς γνωρίζουμε το ακριβές βάρος της μηχανής δεδομένης της επιλογής που έχει γίνει προηγουμένως από το πρόγραμμα.
- βάρος της υπόλοιπης μηχανολογικής εγκατάστασης W_{MR} :

Για το βάρος της υπόλοιπης μηχανολογικής εγκατάστασης χρησιμοποιείται ο μέσος όρος των παρακάτω τύπων:

$$W_{MR,1} = w_1 * L_{BP} * B * D$$

$$W_{MR,2} = w_2 * SHP$$

όπου:

$$w_1 = 10 \div 15 \text{ kp/m}^3$$

$$w_2 = 35 \div 50 \text{ kp/m}^3$$

Ωστόσο το τελικό βάρος μηχανολογικής εγκατάστασης $W_{M,CALC}$ θα προκύψει από το μέσο όρο του παραπάνω βάρους με αυτό που προκύπτει από τον τύπο:

$$W_M = \frac{w_5}{1000} * SHP$$

όπου $w_5 = 85 \div 90 \text{ kp/m}^3$.

Βάρος άφορτου σκάφους (LS)

Το βάρος του άφορτου σκάφους που προκύπτει από τον αναλυτικό υπολογισμό των επιμέρους ομάδων βαρών θα είναι:

$$LS_{CALC} = W_{ST,CALC} + W_{OT,CALC} + W_{M,CALC}$$

Τα τελικά βάρη των επιμέρους ομάδων θα προκύψουν χρησιμοποιώντας έναν συντελεστή διόρθωσης λ_{LS} μεταξύ του υπολογιζόμενου Lightship (LS_{CALC}) και του πραγματικού (LS) που έχει υπολογιστεί προηγουμένως από προσεγγιστικό τύπο:

$$\lambda_{LS} = \frac{LS_{CALC}}{LS}$$

Επομένως τα διορθωμένα βάρη για κάθε ομάδα είναι:

$$W_{ST} = \frac{W_{ST,CALC}}{\lambda_{LS}}$$

$$W_{OT} = \frac{W_{OT,CALC}}{\lambda_{LS}}$$

$$W_M = \frac{W_{M,CALC}}{\lambda_{LS}}$$

3.12. Μέθοδος υπολογισμού κόστους απόκτησης

3.12.1. Κόστος κατασκευής πλοίου

Το κόστος κατασκευής του πλοίου αναλύεται με βάση τις κύριες κατασκευαστικές μονάδες από τις οποίες αποτελείται, οι οποίες είναι η μεταλλική κατασκευή, η ενδιαίτηση και ο εξοπλισμός, καθώς και η μηχανολογική εγκατάσταση. Το κόστος της κάθε ομάδας θα διαχωριστεί σε κόστος υλικών και κόστος εργατικών.

$$C_i = C_{i,WORK} + C_{i,MATERIAL}$$

Η κατανομή του κόστους κάθε ομάδας βαρών σε εργατικά και υλικά γίνεται με βάση τον παρακάτω πίνακα λαμβάνοντας υπόψιν τον μέσο όρο των τιμών:

Weight	Εργατικά	Υλικά
Steel	70 – 80%	30 – 20%
Outfit	18 – 25%	82 – 75%
Machinery	12 – 18%	88 – 82%

Πίνακας 8: Κατανομή του κόστους κάθε ομάδας βαρών σε εργατικά και υλικά

- Κόστος μεταλλικής κατασκευής

Οι απαιτούμενες εργατοώρες για την κατασκευή της γάστρας του πλοίου δίνονται από τη σχέση:

$$MHS = a * (W_{ST})^b$$

Όπου $a=175$, $b=0.90$ συντελεστές κατά Benford για bulk carriers.

Το κόστος εργατοώρας $K_{MANHOUR}$ (\$/h) ποικίλει ανάλογα με τη χώρα κατασκευής του πλοίου ή το ναυπηγείο. Ο χρήστης είναι σε θέση να επιλέξει μια τιμή κόστους εργατοώρας επομένως το κόστος εργατικών για την κατασκευή της γάστρας του πλοίου υπολογίζεται από τη σχέση:

$$C_{ST,WORK} = MHS * K_{MANHOUR}$$

Αντίστοιχα για το κόστος των υλικών χρειάζεται μια τιμή του χάλυβα K_{ST} (\$/t) υπό μορφή ελάσματος που επιλέγεται επίσης από τον χρήστη. Επιπροσθέτως, στο βάρος της μεταλλικής κατασκευής συνυπολογίζουμε ένα ποσοστό 12%, το οποίο αντιστοιχεί στην ποσότητα χάλυβα που μένει αναξιοποίητη. Οπότε, το κόστος των υλικών της μεταλλικής κατασκευής θα είναι:

$$C_{ST,MATERIAL} = 1.12 * W_{ST} * K_{ST}$$

- Κόστος ενδιαίτησης και εξοπλισμού

Θεωρούμε ότι το κόστος ενδιαίτησης και εξοπλισμού χωρίζεται στο κόστος των υλικών που αποτελεί το 79% και στο κόστος των εργατικών που αποτελεί το υπόλοιπο 21%.

Το κόστος των υλικών δίνεται από την σχέση (Benford 1967):

$$C_{OT,MATERIAL} = 5000 * (W_{OT})^{0.95}$$

Το συνολικό κόστος είναι:

$$C_{OT} = \frac{C_{OT,MATERIAL}}{0.79}$$

Άρα το κόστος των εργατικών υπολογίζεται:

$$C_{OT,WORK} = C_{OT} - C_{OT,MATERIAL}$$

- Κόστος μηχανολογικής εγκατάστασης

Το κόστος της μηχανολογικής εγκατάστασης υπολογίζεται σαν τον μέσο όρο των τιμών που δίνονται από τους παρακάτω εμπειρικούς τύπους που αποτελούν το άνω και το κάτω όριο του κόστους (Aalbers, 2000):

$$C_{M,HIGH} = 9375.44 * MCR^{0.79}$$

$$C_{M,LOW} = 6046 * MCR^{0.82}$$

Τελικά, το συνολικό κόστος κατασκευής του πλοίου υπολογίζεται ως εξής:

$$C_{BUILD} = C_{ST} + C_{OT} + C_M$$

3.12.2. Λειτουργικά έξοδα του πλοίου

Οι μέρες όπου το πλοίο βρίσκεται σε κατάσταση δεξαμενισμού για επισκευές και εργασίες συντήρησης (Dock_days) αποτελούν επιλογή του χρήστη. Στην προκειμένη περίπτωση επιλέξαμε ότι 10 μέρες το πλοίο θα βρίσκεται στην κατάσταση αυτή. Έτσι λοιπόν ο αριθμός ταξιδιών του πλοίου μέσα σε έναν χρόνο δίνεται από τη σχέση:

$$N_{TRIPS} = \frac{365 - Dock_{days}}{t_{TRIP}}$$

όπου t_{TRIP} είναι ο χρόνος που διαρκεί ένα κυκλικό ταξίδι (αναχώρηση και επιστροφή). Στον χρόνο αυτό περιλαμβάνεται τόσο ο χρόνος πλεύσης όσο και ο χρόνος φορτοεκφόρτωσης. Ο χρήστης μπορεί να θεωρήσει ένα σενάριο ταξιδιού της επιλογής του εισάγοντας το μήκος της διαδρομής (L_{TRIP}) που θα διανύσει το πλοίο από το ένα λιμάνι (port A) στο άλλο (port B), την ταχύτητα πλεύσης (V_{TRIP}) καθώς επίσης και τον χρόνο παραμονής σε κάθε ένα λιμάνι (t_{portA} , t_{portB}).

Επομένως, ο χρόνος του κυκλικού ταξιδιού υπολογίζεται:

$$t_{TRIP} = 2 * \frac{L_{TRIP}}{24 * V_{TRIP}} + t_{portA} + t_{portB}$$

Κόστος καυσίμων

Η τιμή των καυσίμων K_{FUEL} (\$/t) μεταβάλλεται ανάλογα την αγορά οπότε αποτελεί πληροφορία που δίνεται από τον χρήστη. Το συνολικό κόστος καυσίμων στην διάρκεια ενός έτους είναι:

$$C_{FUEL} = N_{TRIPS} * \frac{2 * L_{TRIP}}{V_{TRIP}} * (SFOC * MCR * 10^{-6}) * K_{FUEL}$$

Κόστος τροφοδοσίας και μισθοδοσίας

Για κάθε άτομο του πληρώματος, ο χρήστης δίνει ένα μέσο κόστος εφοδίων K_{PR} (\$/άτομο/μέρα) οπότε το συνολικό κόστος εφοδίων είναι:

$$C_{PR} = crew * K_{PR} * Roundtrip * N_{TRIPS}$$

Επίσης, θεωρώντας 12 μήνες μισθοδοσίας, ο χρήστης επιλέγει έναν μέσο μηνιαίο μισθό K_{SALARY} (\$/άτομο/μήνα). Το συνολικό κόστος μισθοδοσίας υπολογίζεται:

$$C_{SALARY} = crew * K_{SALARY} * 12$$

Λιμενικά τέλη

Τα συνολικά λιμενικά τέλη στην διάρκεια ενός χρόνου λειτουργίας του πλοίου υπολογίζονται από την παρακάτω σχέση (Aalbers, 2000):

$$C_{PORT} = \left(600 + 50 * \frac{L_{BP} * B * D}{10^5} \right) * 2 * N_{TRIPS}$$

όπου L_{BP} , B , D σε ft (1m=3.2808 ft).

Κόστος Συντήρησης και Επισκευών

Το κόστος συντήρησης και επισκευών μπορεί να θεωρηθεί ότι αντιστοιχεί στο 0.5% του κόστους κατασκευής του πλοίου (Aalbers, 2000):

$$C_{REPAIR} = 0.005 * C_{BUILD}$$

Τα συνολικά λειτουργικά έξοδα του πλοίου ανά έτος λειτουργίας είναι:

$$C_{RUNNING} = C_{FUEL} + C_{PR} + C_{SALARY} + C_{PORT} + C_{INSURANCE} + C_{REPAIR}$$

όπου τα ετήσια έξοδα ασφάλισης $C_{INSURANCE}$ δίνονται από τον χρήστη.

3.13. Ελάχιστος απαιτούμενος ναύλος

Για τον υπολογισμό του ελάχιστου απαιτούμενου ναύλου θα χρειαστεί να υποθέσουμε ένα οικονομικό σενάριο, σύμφωνα με το οποίο υποθέτουμε αρχικά ότι για την αγορά του πλοίου θα χρειαστεί δάνειο ίσο με το 60% του κόστους κατασκευής του, ενώ το υπόλοιπο ποσό θα διατεθεί από κεφάλαια της εταιρείας. Οπότε:

$$\begin{aligned} Loan &= 0.6 * C_{BUILD} \\ Cash &= 0.4 * C_{BUILD} \end{aligned}$$

Το επιτόκιο του δανείου i , ο χρόνος αποπληρωμής του T_{loan} καθώς και η απόδοση του επενδυμένου κεφαλαίου r δίνονται από τον χρήστη. Στο δικό μας οικονομικό σενάριο θεωρήθηκε ως επιτόκιο του δανείου $i=8\%$ με περίοδο αποπληρωμής τα 20 χρόνια και απόδοση επενδυμένου κεφαλαίου $r=12\%$. Τέλος, η τελική αξία του πλοίου, μετά από 20 χρόνια, θεωρείται ότι είναι ίση με το 18% της αρχικής, δηλαδή:

$$Value_{t=20} = 0.18 * C_{BUILD}$$

Η τελική αξία του πλοίου πρέπει να εκφραστεί σε σημερινές τιμές:

$$Value_{t=0} = \frac{Value_{t=20}}{(1+r)^{20}}$$

Η ετήσια δόση του δανείου (Installment) θα υπολογιστεί από τον παρακάτω τύπο:

$$Installment = Loan * \frac{i * (1+i)^N}{(1+i)^N - 1}$$

Το ωφέλιμο φορτίο που μεταφέρει το πλοίο για το σύνολο των ταξιδιών που εκτελεί σε ένα χρόνο είναι:

$$Payload_{TOTAL} = N_{TRIPS} * Payload$$

Ο ελάχιστος απαιτούμενος ναύλος RFR (Required Freight Rate) (\$/t) είναι ο ναύλος εκείνος που μηδενίζει την Καθαρή Παρούσα Αξία NPV (Net Present Value), η οποία υπολογίζεται από τον εξής τύπο:

$$NPV = \sum \frac{EΣΟΔΑ_t - ΕΞΟΔΑ_t}{(1+r)^t}$$

$$NPV = Value_{t=0} - Cash + (RFR * Payload_{TOTAL} - C_{RUNNING} - Installment) \sum_{t=1}^{20} \frac{1}{(1+r)^t}$$

4. Αποτελέσματα προγράμματος

Η εκτέλεση του προγράμματος περιλαμβάνει την εισαγωγή των δεδομένων μέσω ενός αρχείου Input (Microsoft Excel) στο οποίο ο χρήστης πρέπει να συμπληρώσει τα ακόλουθα πεδία:

Length between perpendiculars [m]
Breadth [m]
Depth [m]
Draft Design [m]
Block Coefficient
Service Speed [Kn]
Range [sm]
Crew members
Sea water spesific gravity [t/m ³]
Aft Frame Spacing [m]
Engine Room Frame Spacing [m]
Forward Frame Spacing [m]
No. of Holds
No. of Web Frames per hold
Camber [m]
Length of Hatches [m]
Breadth of Hatches [m]
Height of Hatches [m]
Bulb Length [m]
Superstructures Weight [t]
No. of Propeller Blades
Safety factor for fuel oil tank's capacity
Cranes Weight [t]
Steel Price [\$/t]
Work Price [\$/hour]
Insurance Cost [\$/Year]
Docking Days per Year
Heavy Fuel Oil Cost [\$/t]
Provisions Cost [\$/crew/day]
Mean Month Salary [\$/person/month]
Loan's Percentage of Investment
Return of Invested Capital
Years of Loan Payment
Loan Interest Rate [%]
Stringer Plate [mm]
Distance Between Ports [sm]
Days at Loading Port
Days at Discharging Port
Typical Vessel's Speed [Kn]
Wetted Surface of Appendages (m ²)
Immersed Transom Area (m ²)
Centre of Bulb Area Above Keel Line (m)
Transverse Bulb Area (m ²)

Πίνακας 9: Αρχείο Input του προγράμματος

Κάποιες τιμές χρησιμοποιήθηκαν σταθερές σε όλα τα παραδείγματα για τα οποία τρέξαμε το πρόγραμμα σύμφωνα με τις τρέχουσες τιμές της αγοράς. Πιο συγκεκριμένα η τιμή Fuel Oil που χρησιμοποιήθηκε αντιστοιχεί στο HFO 380LST στο Rotterdam στις 22/1/2016, το κόστος χάλυβα standard plate αντιστοιχεί σε ενδεικτικό κόστος στην Κίνα στις 11/1/2016 και το κόστος ασφάλισης αντιστοιχεί σε πραγματικό ετήσιο κόστος του συνόλου των ασφαλίσεων ενός Capesize πλοίου. Επίσης κάποιες από αυτές αποτελούν επιλογή του εκάστοτε σχεδιαστή:

Cranes Weight [t]	70
Safety factor for fuel oil tank's capacity	1
Steel Price [\$/t]	250
Work Price [\$/hour]	5
Insurance Cost [\$/Year]	140,000
Docking Days per Year	10
Heavy Fuel Oil Cost [\$/t]	123.50
Provisions Cost [\$/crew/day]	10
Mean Monthly Salary [\$/person/month]	2500
Loan's Percentage of Investment	60
Return of Invested Capital	12
Years of Loan Payment	20
Loan Interest Rate [%]	8
Stringer Plate [mm]	20
Distance Between Ports [sm]	4481
Days at Loading Port	7
Days at Discharging Port	5
Typical Vessel's Speed [Kn]	11
Wetted Surface of Appendages [m ²]	0
Immersed Transom Area [m ²]	0
Centre of Bulb Area Above Keel Line [m]	0
Transverse Bulb Area [m ²]	0

Πίνακας 10: Οι σταθερές τιμές που χρησιμοποιήθηκαν στα παραδείγματα

Οι τιμές που επιλέχθηκαν ως μηδενικές είναι λόγω έλλειψης επαρκών δεδομένων από τα σχέδια των πλοίων ωστόσο έχουν μικρή επιρροή στον υπολογισμό της αντίστασης των πλοίων με την μέθοδο Holtrop-Mennen.

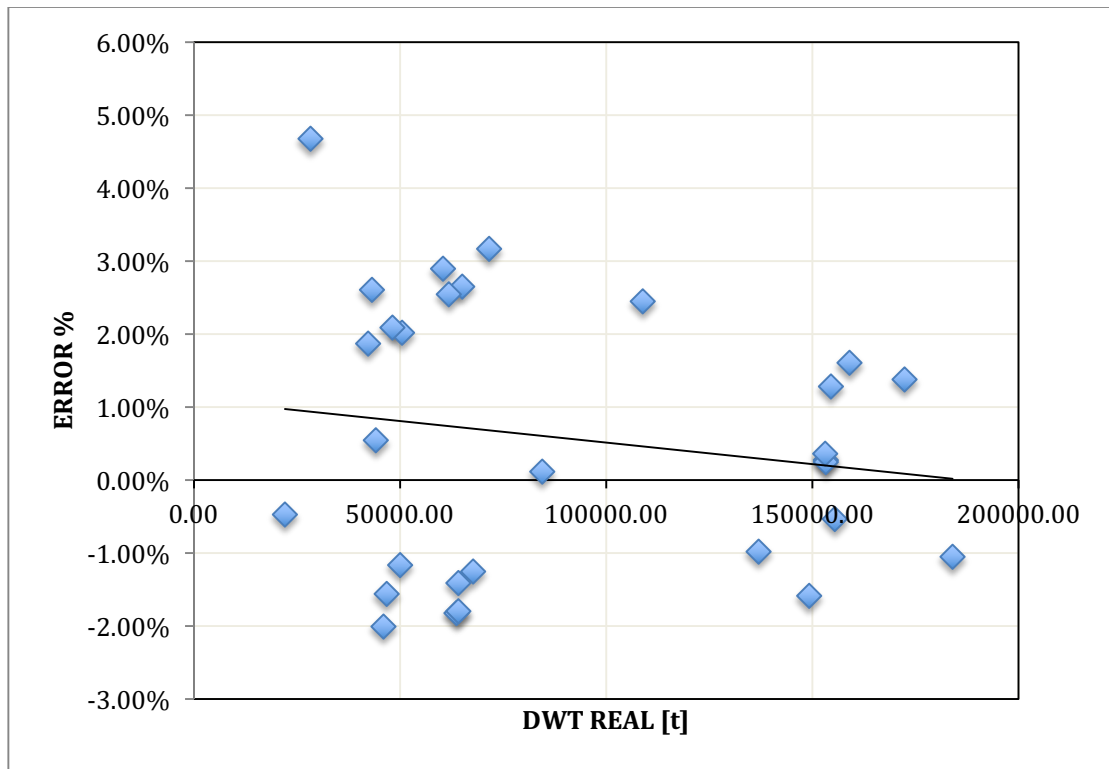
Μετά το πέρας του προγράμματος τα αποτελέσματα αποθηκεύονται σε ένα όμοιο αρχείο Output (Microsoft Excel).

Η εκτέλεση του προγράμματος πραγματοποιήθηκε για 31 πλοία από την βάση δεδομένων μας, με σκοπό την σύγκριση τους με τα πραγματικά αποτελέσματα καθώς και την εκτίμηση των αποκλίσεων τους. Στην συνέχεια θα παρουσιαστούν ενδεικτικά η σύγκριση ορισμένων από τα βασικά μεγέθη.

4.1. DWT Design

	PROGRAM	REAL	ΠΟΣΟΣΤΟ
Ship 2	46055,5	46784,41	-1,56%
Ship 3	51498,008	50481,18	2,01%
Ship 5	62580,891	63741,12	-1,82%
Ship 9	29583,576	28262,36	4,67%
Ship 14	111476,38	108811,68	2,45%
Ship 15	161640,73	159084,78	1,61%
Ship 16	49128,383	48124,06	2,09%
Ship 17	174802,19	172422,56	1,38%
Ship 21	73914,617	71647,34	3,16%
Ship 23	153714,31	153292,77	0,27%
Ship 25	66854,016	65129,44	2,65%
Ship 27	135625,44	136963,69	-0,98%
Ship 29	153714,31	153338,77	0,24%
Ship 31	63345,734	64250,03	-1,41%
Ship 41	45125,172	46050,94	-2,01%
Ship 53	156550,05	154577,51	1,28%
Ship 54	182129,39	184062,33	-1,05%
Ship 63	62247,332	60495,85	2,90%
Ship 69	153714,31	153157,80	0,36%
Ship 6	63074,727	64226,62	-1,79%
Ship 30	63435,035	61864,11	2,54%
Ship 37	22075,793	22181,32	-0,48%
Ship 42	49441,5	50026,30	-1,17%
Ship 43	154695,86	155524,33	-0,53%
Ship 48	146857,97	149224,67	-1,59%
Ship 50	44411,961	43284,62	2,60%
Ship 51	43150,672	42358,90	1,87%
Ship 52	44361,555	44121,33	0,54%
Ship 68	66941,453	67790,48	-1,25%
Ship 76	84615,297	84519,95	0,11%

Πίνακας 11: Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για DWT Design



Διάγραμμα 87: Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για DWT Design

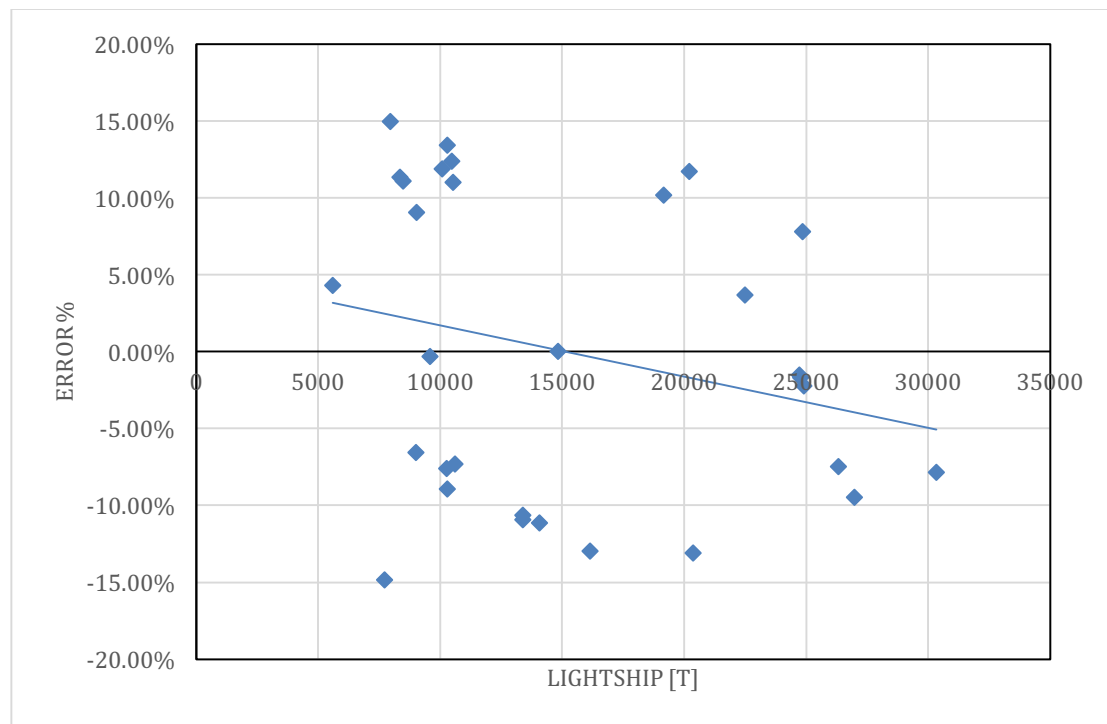
Παρατηρήσεις:

Το DWT Design παρουσιάζει πολύ καλή προσέγγιση με τα σημεία, σχεδόν εξολοκλήρου, να περιλαμβάνονται στο αποδεκτό εύρος του +3% έως -2%. Στο σημείο αυτό υπενθυμίζεται ότι το DWT υπολογίζεται από την διαφορά του εκτοπίσματος με το Lightship. Επομένως, οι αποκλίσεις αυτές οφείλονται στις αποκλίσεις του υπολογισμού του Lightship όπως φαίνεται και στο επόμενο διάγραμμα.

4.2. Lightship

	PROGRAM	REAL	ΠΟΣΟΣΤΟ
Ship 75	9414,3418	8476	11,07%
Ship 2	9290,8506	8347	11,31%
Ship 3	9496,6689	10276,62	-7,59%
Ship 5	11660,671	10284	13,39%
Ship 9	6580,3667	7726,2	-14,83%
Ship 14	17704,299	20369	-13,08%
Ship 15	24435,701	26991,65	-9,47%
Ship 16	9824,623	10600	-7,31%
Ship 17	27955,363	30335	-7,84%
Ship 21	14051,861	16148	-12,98%
Ship 23	24357,459	24779	-1,70%
Ship 25	12504,116	14074,3	-11,16%
Ship 27	21104,916	19158	10,16%
Ship 29	24357,459	24733	-1,52%
Ship 31	11272,373	10078,3	11,85%
Ship 41	9155,0098	7966	14,93%
Ship 53	24357,459	26330	-7,49%
Ship 54	26792,939	24860	7,78%
Ship 63	11912,669	13376,15	-10,94%
Ship 69	24357,459	24913,97	-2,23%
Ship 6	11778,524	10481	12,38%
Ship 30	11958,752	13383	-10,64%
Ship 37	5845,9365	5605	4,30%
Ship 42	9849,0498	9034	9,02%
Ship 43	23333,471	22505	3,68%
Ship 48	22566,709	20200	11,72%
Ship 50	9373,1777	10291,64	-8,92%
Ship 51	8424,5195	9016	-6,56%
Ship 52	9538,9639	9569,87	-0,32%
Ship 68	11674,329	10520	10,97%
Ship 76	14836,492	14835	0,01%

Πίνακας 12: Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για Lightship



Διάγραμμα 88: Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για Lightship

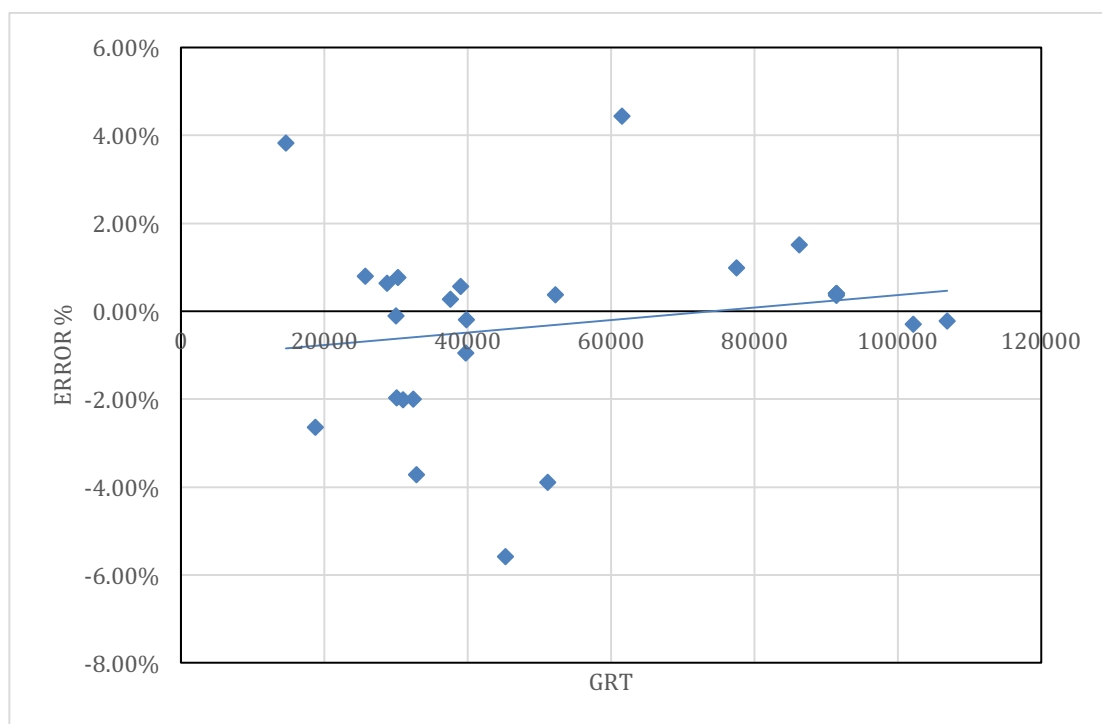
Παρατηρήσεις:

Το Lightship παρουσιάζει μεγαλύτερες αποκλίσεις με αρκετά σημεία να βρίσκονται τόσο στο εύρος 5%-10% όσο και στο 10%-15%, χωρίς ωστόσο κανένα σημείο να ξεπερνάει το όριο αυτό. Σημειώνεται ότι το Lightship υπολογίζεται στο πρόγραμμα μέσω της στατιστικής ανάλυσης που έχει προηγηθεί (Διάγραμμα 28) με αποτέλεσμα οι ίδιες τάξης μεγέθους αποκλίσεις που παρουσιάστηκαν, να μεταφέρονται και στα αποτελέσματα του προγράμματος. Η διαφορά αυτού του μεγέθους μπορεί να δικαιολογηθεί καθώς πολλοί παράγοντες επηρεάζουν την μεταλλική κατασκευή του πλοίου. Τέτοιοι μπορεί να είναι ο διαφορετικός σχεδιασμός ίδιας κατηγορίας πλοίων (διαφορετικοί συντελεστές γάστρας, περιορισμός των κύριων διαστάσεων για διέλευση πλοίων από διώρυγες), ο διαφορετικός αριθμός κυτών, ο διαφορετικός τρόπος ενίσχυσης των πλοίων, οι διαφορετικές διαστάσεις υπερκατασκευών, η διάθεση αυτόνομων φορτοεκφορτωτικών μέσων, η επιλογή αυξημένου πάχους της μεταλλικής κατασκευής για λόγους αυξημένης αντοχής σε διάβρωση καθώς και η επιπλέον ενίσχυση ορισμένων πλοίων για πλεύση σε πάγους.

4.3. GrT

	PROGRAM	REAL	ΠΟΣΟΣΤΟ
Ship 75	29972,598	30002	-0,10%
Ship 2	29462,145	30054	-1,97%
Ship 3	30312,898	30937	-2,02%
Ship 5	39257,809	39035	0,57%
Ship 9	18258,35	18753	-2,64%
Ship 14	64239,176	61504	4,45%
Ship 16	31668,496	32888	-3,71%
Ship 17	106611,99	106847	-0,22%
Ship 21	49141,809	51130	-3,89%
Ship 23	91740,039	91373	0,40%
Ship 25	42744,195	45271	-5,58%
Ship 27	78295,633	77529	0,99%
Ship 29	91740,039	91373	0,40%
Ship 31	37652,781	37550	0,27%
Ship 41	28900,646	28718	0,64%
Ship 53	91740,039	91374	0,40%
Ship 54	101807,11	102112	-0,30%
Ship 69	91740,039	91407	0,36%
Ship 6	39744,961	39818	-0,18%
Ship 37	15222,579	14661	3,83%
Ship 42	31769,465	32415	-1,99%
Ship 43	87507,383	86201	1,52%
Ship 51	25881,162	25676	0,80%
Ship 52	30487,725	30256	0,77%
Ship 68	39314,266	39691	-0,95%
Ship 76	52385,082	52186	0,38%

Πίνακας 13: Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για GrT



Διάγραμμα 89: Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για GrT

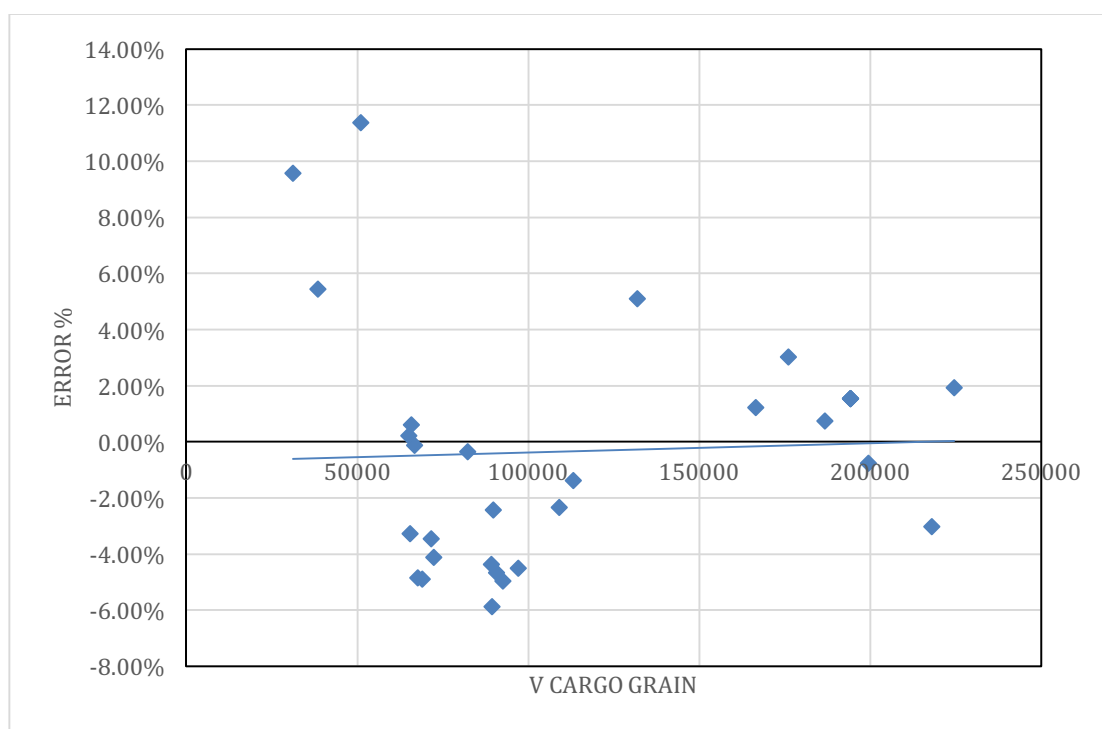
Παρατηρήσεις:

Ο προσεγγιστικός τύπος της στατιστικής ανάλυσης που προηγήθηκε για τον υπολογισμό του GrT παρουσιάζει αξιόλογα αποτελέσματα με το ποσοστό απόκλισης σε μεμονωμένες περιπτώσεις να ξεπερνάει το $\pm 2\%$ (Διάγραμμα 31).

4.4. Χωρητικότητα κυτών (Cargo Capacity Grain)

	PROGRAM	REAL	ΠΟΣΟΣΤΟ
Ship 75	65549,844	68927,4	-4,90%
Ship 2	64462,184	67756,3	-4,86%
Ship 3	66274,953	65876,2	0,61%
Ship 5	85334,586	89245,9	-4,38%
Ship 9	40589,359	38500	5,43%
Ship 14	138564,38	131861,2	5,08%
Ship 15	197851,8	199381,6	-0,77%
Ship 16	69163,43	71634,09	-3,45%
Ship 17	228851,53	224546,6	1,92%
Ship 21	106395,21	108951,7	-2,35%
Ship 23	197162,66	194179	1,54%
Ship 25	92750,398	97123,1	-4,50%
Ship 27	168515,59	166493,6	1,21%
Ship 29	197162,66	194179	1,54%
Ship 31	81910,773	82209,8	-0,36%
Ship 41	63265,754	65414	-3,28%
Ship 53	197162,66	194179,1	1,54%
Ship 54	211358,58	217968	-3,03%
Ship 63	87554,086	89728,6	-2,42%
Ship 69	197162,66	194179	1,54%
Ship 6	86372,594	90606,1	-4,67%
Ship 30	87959,961	92544,8	-4,95%
Ship 37	34120,801	31140,57	9,57%
Ship 42	69378,57	72360,3	-4,12%
Ship 43	188143,8	186769	0,74%
Ship 48	181390,47	176073,4	3,02%
Ship 50	65187,289	65044,98	0,22%
Ship 51	56831,895	51035,5	11,36%
Ship 52	66647,469	66731,2	-0,13%
Ship 68	84176,313	89422,5	-5,87%
Ship 76	111668,98	113237,1	-1,38%

Πίνακας 14: Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για Cargo Capacity (Grain)



Διάγραμμα 90: Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για Cargo Capacity (Grain)

Παρατηρήσεις:

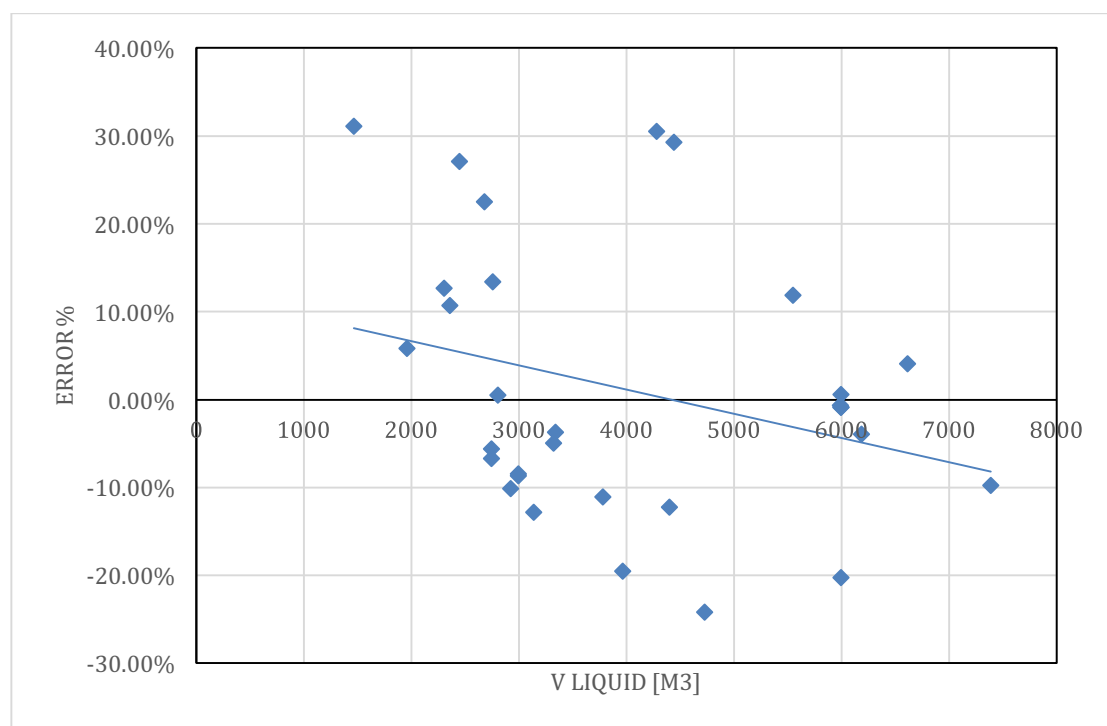
Εξίσου ικανοποιητικά αποτελέσματα δίνει και ο υπολογισμός της χωρητικότητας φορτίου, με τις αποκλίσεις να περιορίζονται στο $\pm 6\%$ έχοντας μόνο δύο σημεία εκτός αυτού του ορίου καθιστώντας αξιόπιστο τον τρόπο υπολογισμού του (Διάγραμμα 39).

4.5. Χωρητικότητα συνόλου δεξαμενών καυσίμων και δεξαμενών νερού

	PROGRAM	REAL	ΠΟΣΟΣΤΟ
Ship 75	2589,642994	2743,63	-5,61%
Ship 2	2734,508579	2995,4	-8,71%
Ship 3	2817,25708	2804,13	0,47%
Ship 5	3122,53584	2754,6	13,36%
Ship 9	2074,735584	1961,4	5,78%
Ship 14	4780,01872	5994,5	-20,26%
Ship 15	6204,3312	5549,4	11,80%
Ship 16	2740,602801	2993,79	-8,46%
Ship 17	6663,62499	7386	-9,78%
Ship 21	3580,09915	4724,2	-24,22%
Ship 23	5942,88851	5996,2	-0,89%
Ship 25	3358,66652	3779,2	-11,13%
Ship 27	5584,5049	4279	30,51%
Ship 29	5942,88851	5986,1	-0,72%
Ship 31	3110,8289	2448,3	27,06%
Ship 41	2607,129883	2355,9	10,66%
Ship 53	6028,70618	5996,1	0,54%
Ship 54	6882,1693	6614,1	4,05%

Ship 63	3190,87897	3964,9	-19,52%
Ship 69	5942,88851	5996,2	-0,89%
Ship 6	3156,78078	3322,9	-5,00%
Ship 30	3215,96237	3342,1	-3,77%
Ship 37	1921,841681	1466,58	31,04%
Ship 42	2734,89349	3139,2	-12,88%
Ship 43	5938,27628	6185,4	-4,00%
Ship 48	5738,85766	4439,4	29,27%
Ship 50	2561,848922	2746,77	-6,73%
Ship 51	2592,319533	2301,3	12,65%
Ship 52	2628,631038	2924,8	-10,13%
Ship 68	3278,88238	2676,7	22,50%
Ship 76	3860,12207	4399,92	-12,27%

Πίνακας 15: Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για Χωρητικότητα Δεξαμενών Υγρού Φορτίου



Διάγραμμα 91: Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για Χωρητικότητα Δεξαμενών Υγρού Φορτίου

Παρατηρήσεις:

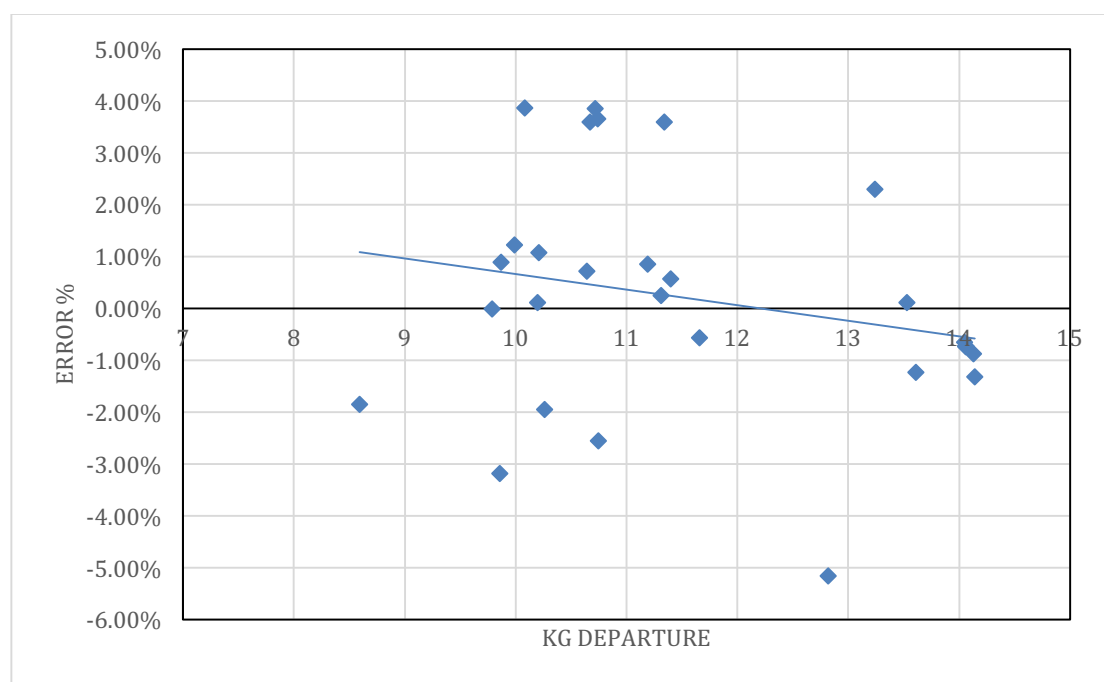
Επειδή η χωρητικότητα των δεξαμενών ποικίλει για κάθε ομάδα βάρους (Fuel Oil, Diesel Oil, Lub. Oil, Fresh Water) ανάλογα με τις απαιτήσεις του κάθε πλοιοκτήτη, θεωρήθηκε καλύτερο να υπολογιστεί η συνολική χωρητικότητα των δεξαμενών. Ωστόσο παρατηρούνται μεγάλες αποκλίσεις από τα πραγματικά δεδομένα καθώς κατά τον υπολογισμό των δεξαμενών Diesel Oil και Lubricating Oil εμφανίζονται μεγάλες διαφορές που επηρεάζουν σημαντικά το συνολικό αποτέλεσμα. Τα καύσιμα και τα λιπαντικά διαφέρουν σε κάθε πλοίο ανάλογα με την κατανάλωση που έχουν ο κινητήρας και οι γεννήτριες, και σχετίζονται επίσης με το πλήθος και τη λειτουργία των βοηθητικών μηχανημάτων. Επίσης, η ακτίνα ενέργειας καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την απαιτούμενη ποσότητα καυσίμων.

4.6. Κέντρο βάρους πλοίου

4.6.1. Κατακόρυφο κέντρο βάρους (KG)

	PROGRAM	REAL	ΠΟΣΟΣΤΟ
Ship 75	10,112204	9,99	1,22%
Ship 2	9,9573193	9,87	0,88%
Ship 3	10,208652	10,198	0,10%
Ship 5	11,132136	10,72	3,84%
Ship 9	8,4302483	8,59	-1,86%
Ship 14	12,155377	12,818	-5,17%
Ship 15	13,955767	14,144	-1,33%
Ship 16	10,468886	10,744	-2,56%
Ship 17	14,006295	14,131	-0,88%
Ship 21	11,7479	11,341	3,59%
Ship 23	13,95503	14,058	-0,73%
Ship 25	11,593713	11,66	-0,57%
Ship 27	13,54384	13,24	2,29%
Ship 29	13,95503	14,058	-0,73%
Ship 31	10,720059	10,645	0,71%
Ship 41	9,7887135	9,79	-0,01%
Ship 53	13,955319	14,048	-0,66%
Ship 63	11,286799	11,192	0,85%
Ship 69	13,95503	14,06	-0,75%
Ship 6	11,132211	10,74	3,65%
Ship 30	11,337592	11,31	0,24%
Ship 42	10,468699	10,08	3,86%
Ship 43	13,544121	13,53	0,10%
Ship 48	13,441064	13,61	-1,24%
Ship 50	10,062306	10,263	-1,96%
Ship 51	9,545577	9,86	-3,19%
Ship 52	10,319072	10,21	1,07%
Ship 68	11,052944	10,67	3,59%
Ship 76	11,463778	11,4	0,56%

Πίνακας 16: Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για KG Departure



Διάγραμμα 92: Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για KG Departure

Παρατηρήσεις:

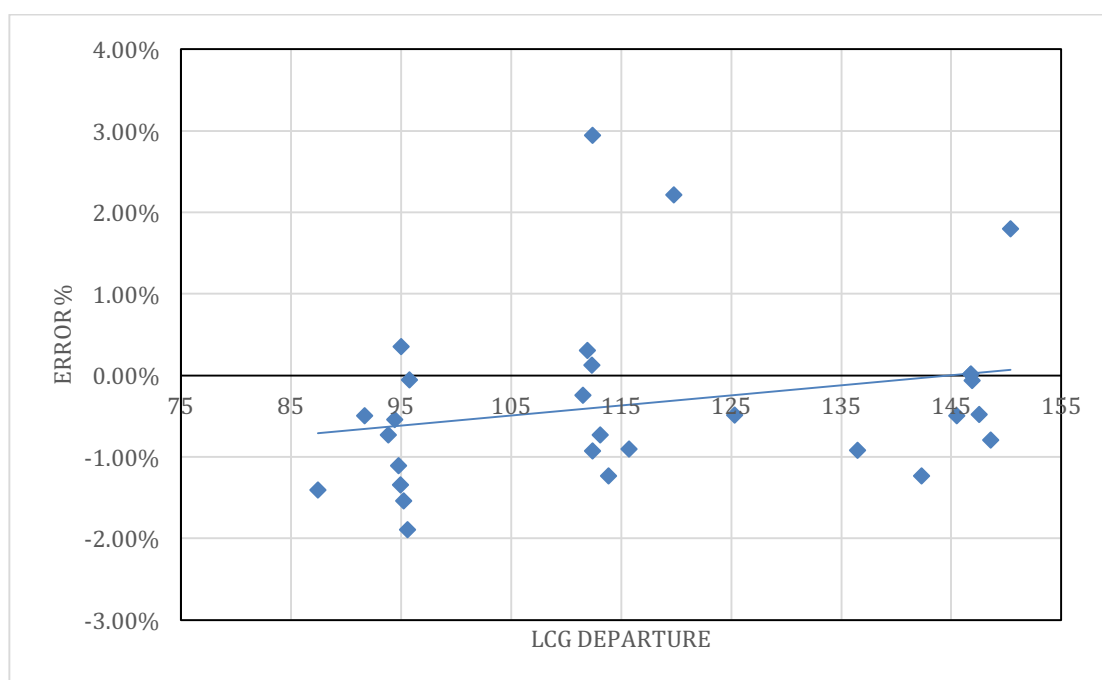
Τα αποτελέσματα του προγράμματος στον υπολογισμό του κατακόρυφου κέντρου βάρους είναι ικανοποιητικά με τις αποκλίσεις να κυμαίνονται στο $\pm 4\%$ όπου στις περισσότερες περιπτώσεις δεν ξεπερνάει το $\pm 2\%$. Η απόκλιση αυτής της τάξης μεγέθους κυμαίνεται στα αποδεκτά επίπεδα καθώς στο κέντρο βάρους του πλοίου συντελούν ένα μεγάλο πλήθος μη σταθερών παραγόντων όπως είναι η τοποθέτηση όλων των δεξαμενών υγρού φορτίου (Fuel Oil, Diesel Oil, Lub. Oil, Fresh Water), το ύψος των υπερκατασκευών καθώς και η κατανομή του βάρους της μεταλλικής κατασκευής.

4.6.2. Διάμηκες κέντρο βάρους (LCG)

	PROGRAM	REAL	ΠΟΣΟΣΤΟ
Ship 75	93.72879607	94.78	-1.11%
Ship 2	93.77230382	95.24	-1.54%
Ship 3	93.93578867	94.449	-0.54%
Ship 5	111.2553159	111.53	-0.25%
Ship 9	86.23688425	87.47	-1.41%
Ship 14	124.6900215	125.308	-0.49%
Ship 15	147.3973615	148.584	-0.80%
Ship 16	95.36403466	95.027	0.35%
Ship 17	153.0765213	150.379	1.79%
Ship 21	114.6840918	115.73	-0.90%
Ship 23	146.783246	146.875	-0.06%
Ship 25	115.7138391	112.41	2.94%
Ship 27	135.2457118	136.5	-0.92%
Ship 29	146.783246	146.763	0.01%
Ship 31	111.3411661	112.385	-0.93%
Ship 41	93.76162941	95.57	-1.89%
Ship 53	146.8177932	147.527	-0.48%

Ship 63	112.254783	111.912	0.31%
Ship 69	146.783246	146.76	0.02%
Ship 6	112.4595308	112.32	0.12%
Ship 30	112.2837756	113.11	-0.73%
Ship 42	95.6863769	95.74	-0.06%
Ship 43	144.7710471	145.5	-0.50%
Ship 48	140.5287001	142.29	-1.24%
Ship 50	93.68629036	94.962	-1.34%
Ship 51	91.20694799	91.66	-0.49%
Ship 52	93.12512849	93.814	-0.73%
Ship 68	112.4291869	113.84	-1.24%
Ship 76	122.4057903	119.76	2.21%

Πίνακας 17: Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για LCG Departure

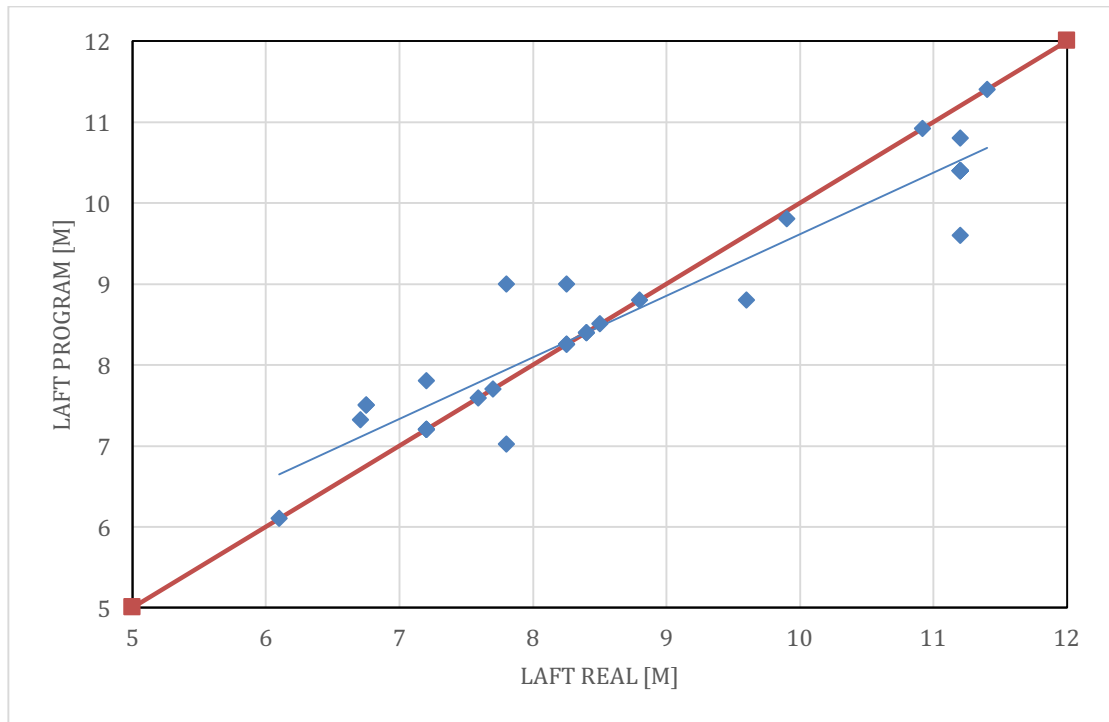


Διάγραμμα 93: Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για LCG Departure

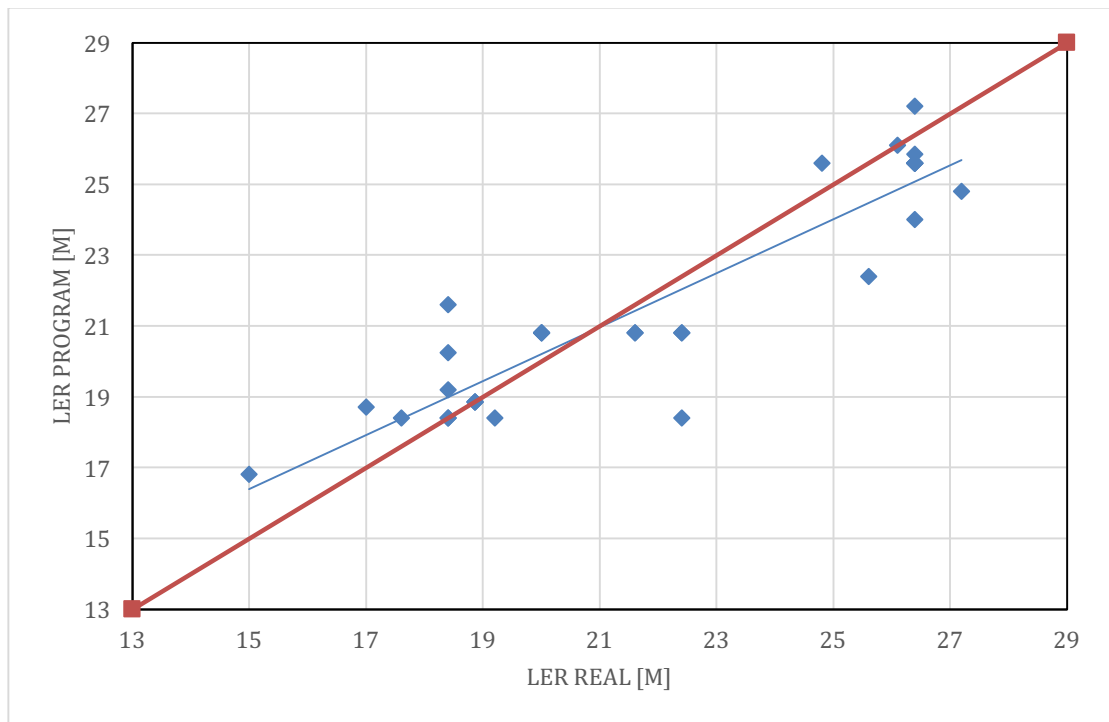
Παρατηρήσεις:

Εν συνεχεία του προηγούμενου διαγράμματος, το διάμηκες κέντρο βάρους του πλοίου σε κατάσταση Full Load Departure υπολογίζεται με ακόμα καλύτερη ακρίβεια καθώς οι αποκλίσεις όλων των σημείων, εκτός τριών μεμονωμένων, κυμαίνεται από το +0,3% έως -2%.

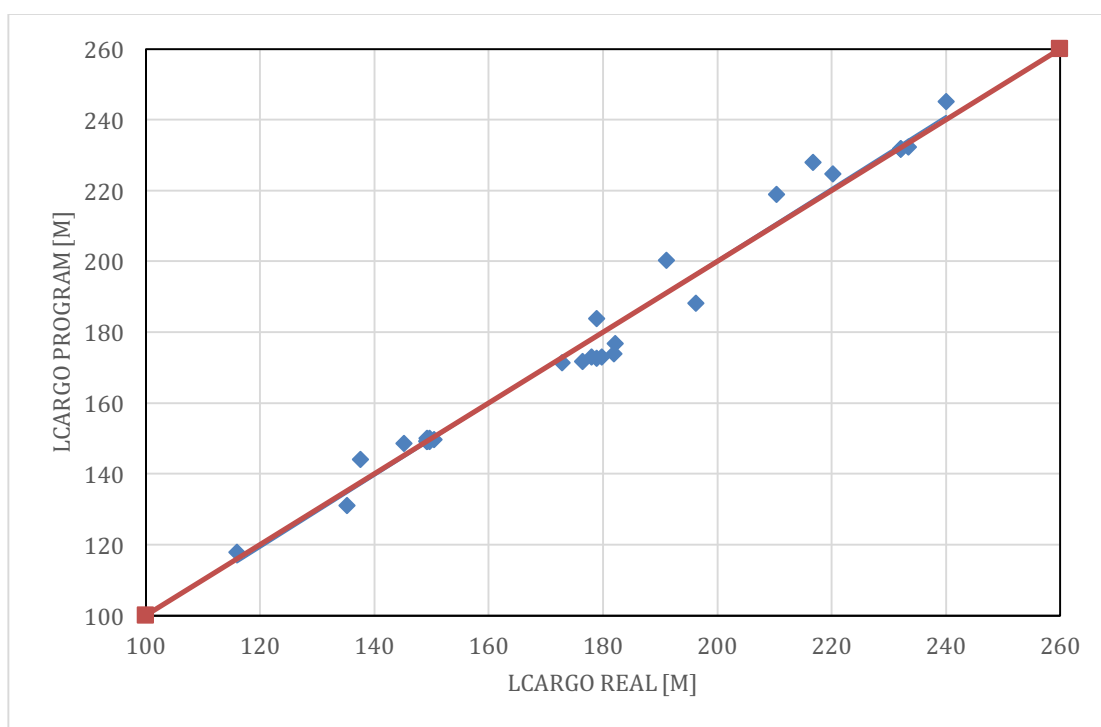
4.7. Οριοθέτηση φρακτών



Διάγραμμα 94: Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για LAFT



Διάγραμμα 95: Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για LER



Διάγραμμα 96: Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για L_{CARGO}

Παρατηρήσεις:

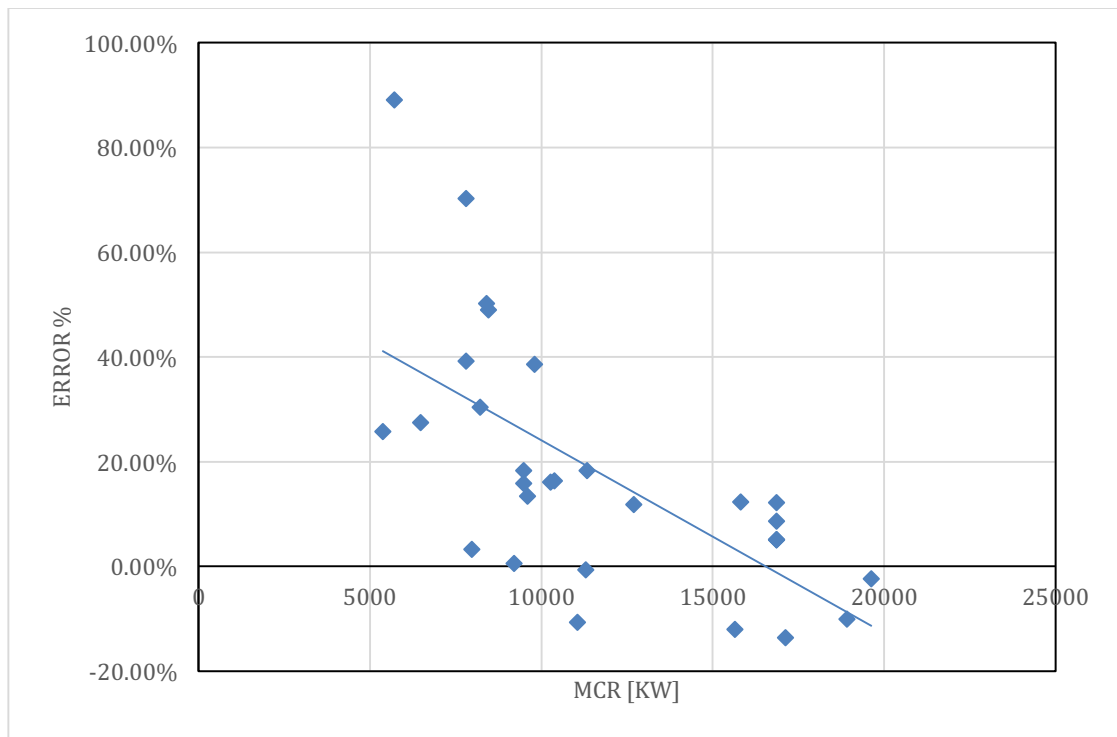
Ο καθορισμός των χώρων και η οριοθέτηση των φρακτών, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ακολουθεί τους κανονισμούς της SOLAS αλλά ταυτόχρονα αποτελεί και επιλογή του κάθε ναυπηγού-μελετητή ο οποίος ορίζει τους κατασκευαστικούς νομείς του πλοίου και την οριοθέτηση τους (Frame Spacing). Πιο συγκεκριμένα, για το χώρο του μηχανοστασίου δεν λαμβάνονται υπόψιν οι απαιτήσεις της μηχανολογικής εγκατάστασης (κύριας μηχανής, βοηθητικών μηχανημάτων, αντλιών κλπ.) που μπορεί να ποικίλει για πλοία ίδιου μήκους με αποτέλεσμα αυτή η διαφορά να επηρεάζει και τους υπόλοιπους χώρους.

4.8. Εκτίμηση ισχύος

	PROGRAM	REAL	ΠΟΣΟΣΤΟ
Ship 75	12584,437	8450	48,93%
Ship 2	10858,688	7800	39,21%
Ship 3	13272,921	7800	70,17%
Ship 5	12062,264	10371	16,31%
Ship 9	8256,2861	6480	27,41%
Ship 14	17766,51	15820	12,30%
Ship 15	16998,988	18914	-10,12%
Ship 16	10983,749	9480	15,86%
Ship 17	19150,586	19620	-2,39%
Ship 21	9874,3438	11060	-10,72%
Ship 23	17708,24	16860	5,03%
Ship 25	11901,814	10260	16,00%
Ship 27	13407,564	11340	18,23%
Ship 29	17708,232	16860	5,03%
Ship 31	8238,0244	7978	3,26%

Ship 41	10799,046	5714	88,99%
Ship 53	18310,08	16860	8,60%
Ship 54	18917,701	16860	12,20%
Ship 69	17708,238	16860	5,03%
Ship 6	9263,2891	9210	0,58%
Ship 30	11217,802	11300	-0,73%
Ship 37	6760,0396	5379	25,67%
Ship 42	12618,101	8400	50,22%
Ship 43	14785,917	17121	-13,64%
Ship 48	13748,818	15642	-12,10%
Ship 50	11211,549	9480	18,27%
Ship 51	10708,793	8217	30,32%
Ship 52	10884,71	9597	13,42%
Ship 68	13575,586	9800	38,53%
Ship 76	14202,404	12700	11,83%

Πίνακας 18: Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για MCR



Διάγραμμα 97: Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για MCR

Παρατηρήσεις:

Το παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζει τις αποκλίσεις της υπολογιζόμενης ισχύς MCR από το πρόγραμμα συγκριτικά με την πραγματική MCR των πλοίων. Παρατηρούμε ότι εξαιρουμένων έξι σημείων όπου πραγματοποιείται υποεκτίμηση της ισχύς κατά 10%, σε όλα τα υπόλοιπα σημεία του δείγματος γίνεται συστηματική υπερεκτίμηση κυρίως έως 20%, έχοντας ωστόσο αρκετά σημεία με απόκλιση έως 50% και δύο μεμονωμένα σημεία με ακόμη μεγαλύτερη. Ο κύριος λόγος παρουσίασης τόσο μεγάλων αποκλίσεων είναι η μέθοδος υπολογισμού της αντίστασης και πρόωσης του πλοίου, καθώς η μέθοδος Holtrop-Mennen, η οποία αποτελεί παλιά μέθοδο υπολογισμού, πραγματοποιεί συστηματική και μεγάλη υπερεκτίμηση στα αποτελέσματα της ενώ τα σύγχρονα πλοία παρουσιάζουν πολύ καλύτερα χαρακτηριστικά αντίστασης λόγω βελτιστοποίησης της γάστρας. Επίσης, πιθανή λάθος αναγραφή της ταχύτητας σχεδίασης των πλοίων που παρατηρείται συχνά στα

σχέδια τους μπορεί να έχει οδηγήσει σε ορισμένα λάθη κατά την δημιουργία της βάσης δεδομένων και κατ' επέκταση στους υπολογισμούς του προγράμματος. Τέλος σημειώνεται ότι ο τελικός υπολογισμός του MCR στο πρόγραμμα περιλαμβάνει συνολική προσαύξηση 17% για ρυπασμένη γάστρα και sea margin, ποσοστό το οποίο μπορεί να διαφέρει στους αντίστοιχους υπολογισμούς των πραγματικών πλοίων.

4.9. Τεχνοοικονομική μελέτη

Διαθέτοντας πραγματικά στοιχεία διαδρομής ενός Capesize πλοίου που πραγματοποιούσε κυκλικό ταξίδι, τρέξαμε το πρόγραμμα για τέσσερα αντίστοιχου μεγέθους πλοία του δείγματος μας προκειμένου να συγκρίνουμε το υπολογιζόμενο RFR με κάποιες ενδεικτικές τιμές ναύλων. Τα στοιχεία του πραγματικού αυτού ταξιδιού καθώς και των αποτελεσμάτων του Matlab παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες.

Λιμάνι Φόρτωσης	Maracaibo
Λιμάνι Εκφόρτωσης	Rotterdam
Απόσταση [sm]	4481
Χρόνος Φόρτωσης [days]	7
Χρόνος Εκφόρτωσης [days]	5
Ενδεικτική Ταχύτητα [knots]	11

Πίνακας 19: Δεδομένα πραγματικού ταξιδιού Capesize πλοίου

	Ship 17	Ship 54	Ship 69	Ship 43
L_{BP} [m]	294	290	282	278
B [m]	50	50	45	44,98
D [m]	24,9	24,1	24,8	24
Tscant [m]	18,47	17,88	18,3	17,63

	Ship 17	Ship 54	Ship 69	Ship 43
Steel Weight [t]	22.332,80	21.657,67	19.165,74	18.703,26
Outfitting Weight [t]	2.150,16	20.216,32	2.012,65	1.962,91
Machinery Weight [t]	3.472,40	3.113,64	3.179,08	2.667,30
Lightship Calc [t]	26.395,67	26.567,87	22.790,14	22.075,49
Lighthship Program [t]	27.955,36	26.792,94	24.357,46	23.333,47
Lightship Factor	0,94	0,99	0,94	0,95
Steel Cost [\$]	13.432.068,52	13.047.411,94	11.622.179,26	11.356.664,15
Outfitting Cost [\$]	9.272.357,43	8.745.003,17	8.708.074,20	8.503.508,41
Machinery Cost [\$]	21.134.590,77	20.927.713,25	19.845.184,50	17.166.784,33
Build Cost [\$]	43.839.016,72	42.720.128,37	40.175.437,96	37.026.956,88
Fuel Costs [\$/year]	2.516.050,09	2.485.451,51	2.299.017,95	1.954.106,25
Provision Costs [\$/year]	99.400,00	85.200,00	102.950,00	88.750,00
Salaries Costs [\$/year]	980.000,00	840.000,00	1.015.000,00	875.000,00
Port Costs [\$/year]	109.139,81	104.616,09	95.138,12	91.153,14
Repair Costs [\$/year]	219.195,08	213.600,64	200.877,19	185.134,78
Running Costs [\$/year]	4.063.784,98	3.868.868,25	3.852.983,25	3.334.144,17
RFR [\$/ton]	7,09	6,53	7,53	6,67
Daily Rate [\$/day]	24.605,41	23.727,56	22.902,05	20.513,04

Πίνακας 20: Αποτέλεσμα τεχνοοικονομικής μελέτης για πλοία του δείγματος

Παρατηρούμε ότι ο χαμηλότερος υπολογιζόμενος ημερήσιος ναύλος αντιστοιχεί στο πλοίο 43 με 20,513\$/day. Ωστόσο στο σημείο αυτό πρέπει να σημειώσουμε ότι οι παραπάνω υπολογισμοί περιλαμβάνουν μεγάλο πλήθος απλουστεύσεων. Ενδεικτικά, στο πρόγραμμα έχει θεωρηθεί ότι η ταχύτητα του πλοίου παραμένει σταθερή σε όλη την διάρκεια του κυκλικού ταξιδιού γεγονός που δεν ισχύει στην πραγματικότητα καθώς υπάρχουν αυξομειώσεις ανάλογα με τις συνθήκες. Επίσης έχει θεωρηθεί σταθερή κατανάλωση καυσίμου ενώ στην πραγματικότητα διαφέρει τόσο λόγω της αλλαγής της ταχύτητας του πλοίου όσο και από το γεγονός ότι επιστρέφοντας το πλοίο σε κατάσταση ερματισμού, η κατανάλωση είναι μειωμένη. Επιπροσθέτως, όλες οι εκτιμήσεις του κόστους κατασκευής, των καυσίμων, των μισθών, των αναλωσίμων και των υπόλοιπων στοιχείων έχουν υπολογιστεί με βάση εμπειρικούς τύπους και περιλαμβάνουν πιθανές αποκλίσεις. Τέλος, πρέπει να τονιστεί ότι όλα τα παραπάνω έχουν υπολογιστεί με βάση το υποθετικό οικονομικό σενάριο που παρουσιάστηκε αναλυτικά στην παράγραφο 3.13.

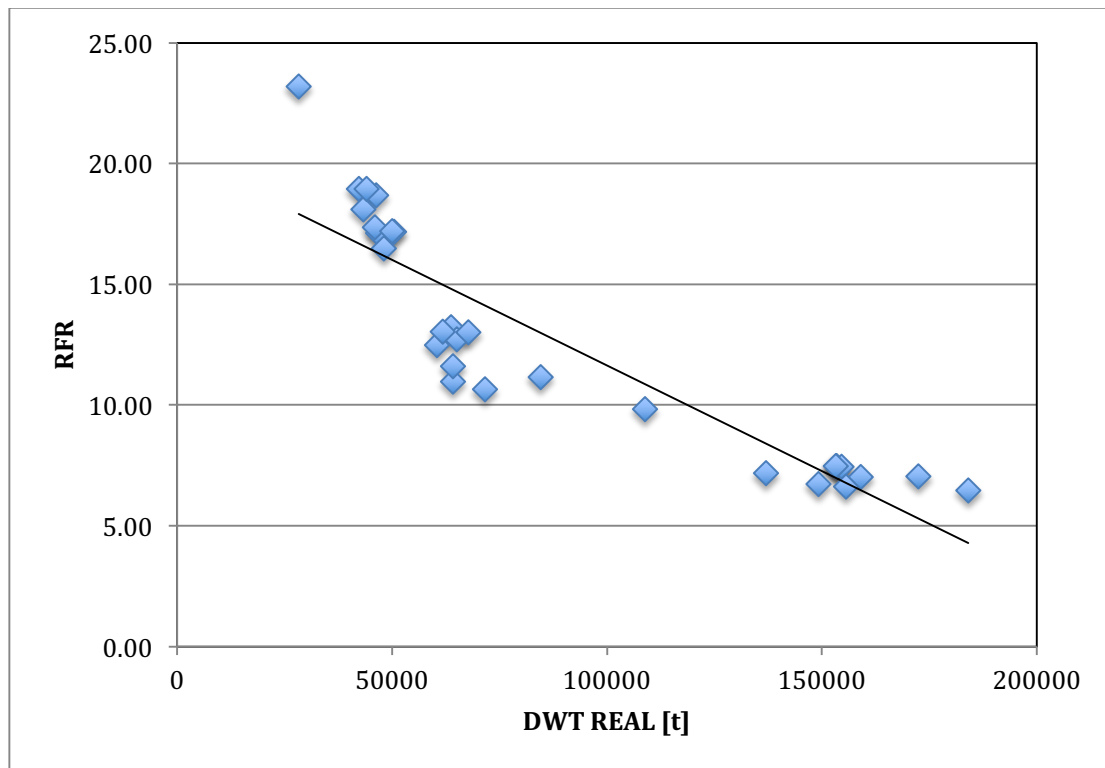
Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι την σημερινή περίοδο, ο Baltic Dry Index (BDI) που αποτελεί τον κύριο δείκτη ναυλαγοράς ξηρού φορτίου βρίσκεται στα χαμηλότερα επίπεδα όλων των εποχών κλείνοντας τις τελευταίες μέρες στις 363 μονάδες με αποτέλεσμα ο μέσος ημερήσιος ναύλος να κυμαίνεται τον Ιανουάριο στο εύρος \$3.100-4.000/μέρα για τα Capesize πλοία.

Στο σημείο αυτό κρίθηκε ενδιαφέρον να υπολογίσουμε για όλα τα πλοία του δείγματος μας το υπολογιζόμενο RFR για την συγκεκριμένη διαδρομή διατηρώντας το οικονομικό σενάριο και όλα τα δεδομένα σταθερά, προκειμένου να συγκρίνουμε τις διαφοροποιήσεις τους σε σχέση με το μέγεθος του πλοίου. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο παρακάτω πίνακα και διάγραμμα:

	RFR	DWT Design
Ship 75	18,67	50489
Ship 2	17,12	52000
Ship 3	17,17	50400
Ship 5	13,22	63750
Ship 9	23,18	28335,4
Ship 14	9,81	108997,9
Ship 15	7,01	159338,5
Ship 16	16,48	48297,8
Ship 17	7,04	172662
Ship 21	10,65	71860,3
Ship 23	7,47	156322,3
Ship 25	12,73	82000
Ship 27	7,18	137315
Ship 29	7,47	156368
Ship 31	10,96	63800
Ship 41	17,36	44764
Ship 53	7,45	154771
Ship 54	6,47	178721
Ship 63	12,48	61700
Ship 69	7,47	156187,3
Ship 6	11,61	64388
Ship 30	13,03	61000
Ship 42	17,20	49997
Ship 43	6,61	155830
Ship 48	6,72	149513
Ship 50	18,10	43500,8
Ship 51	18,94	41057
Ship 52	18,94	42720,7

Ship 68	13,01	65806
Ship 76	11,16	84993

Πίνακας 21: Υπολογιζόμενο RFR για τα πλοία του δείγματος



Διάγραμμα 98: Υπολογιζόμενο RFR για όλα τα πλοία του δείγματος

Από το παραπάνω διάγραμμα συμπεραίνουμε ότι το καταλληλότερο πλοίο για την συγκεκριμένη διαδρομή θα ήταν το νούμερο 54 που αποτελεί το μεγαλύτερο πλοίο του δείγματος μας με RFR 6,47\$/t και ακολουθούν τα νούμερα 43 και 48 με RFR 6,61\$/t και 6,72\$/t αντίστοιχα. Επομένως παρατηρούμε ότι τα Capesize πλοία αποτελούν την καλύτερη επιλογή για το συγκεκριμένο σενάριο ενώ τα μικρότερα πλοία αποτελούν μια λιγότερο συμφέρουσα επιλογή.

5. Συμπεράσματα και προτάσεις

Συνοψίζοντας την παρούσα διπλωματική εργασία, αρχικώς έγινε μια στατιστική ανάλυση στοιχείων από βάση δεδομένων 90 πλοίων ξηρού φορτίου όλων των μεγεθών που συγκεντρώσαμε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας με την βοήθεια της σχολής αλλά και ναυτιλιακών εταιρειών.

Η στατιστική επεξεργασία των δεδομένων έγινε μέσω παλινδρομικής ανάλυσης στο Matlab και είχε σκοπό την δημιουργία νέων εμπειρικών σχέσεων μεταξύ των κύριων χαρακτηριστικών σχεδίασης ενός πλοίου. Οι σχέσεις αυτές αποδεικνύονται πολύτιμες για τον μελετητή προκειμένου να εκτιμήσει τα βασικά χαρακτηριστικά του υπό σχεδίαση πλοίου στην προκαταρκτική φάση της σχεδίασης.

Πιο συγκεκριμένα οι εμπειρικές σχέσεις για τις κύριες διαστάσεις παρουσιάζουν ικανοποιητικά στοιχεία συσχέτισης τόσο με το DWT όσο και μεταξύ τους έχοντας μικρές αποκλίσεις λόγω της αλληλεπίδρασης τους.

Τα βάρη του πλοίου (LS, DWT, Δ) υπολογίστηκαν με αρκετά καλές εκτιμήσεις με τις όποιες διαφορές να οφείλονται στις κατασκευαστικές ιδιαιτερότητες κάθε σχεδίασης όπως η ενισχυμένη διαμήκης αντοχή ορισμένων πλοίων, η χρήση αυξημένου πάχους ελασμάτων για λόγους διάβρωσης, οι διαφορετικές διαστάσεις υπερκατασκευών, καθώς και η δυνατότητα πλεύσης ορισμένων πλοίων σε πάγους. Τέτοιοι παράμετροι δεν μπορούν να ληφθούν υπόψη στην προεκτίμηση του βάρους.

Οι εκτιμήσεις του όγκου κυτών παρουσίασαν πολύ καλά αποτελέσματα σε αντίθεση όμως με τις δεξαμενές καυσίμων, λιπαντικών και πόσιμου νερού όπου οι αποκλίσεις ήταν μεγάλες. Ο λόγος είναι οι διαφορετικές ανάγκες κάθε πλοίου σε καύσιμα και λιπαντικά καθώς παράγοντες όπως, η ισχύς μηχανών, η ταχύτητα σχεδίασης, η ακτίνα ενέργειας και η ισχύς βοηθητικών μηχανημάτων, παίζουν καθοριστικό ρόλο στις ανάγκες του πλοίου.

Λόγω των παραπάνω, αντίστοιχες αποκλίσεις παρουσιάζονται και στον υπολογισμό του κέντρου βάρους των αντίστοιχων δεξαμενών καθώς τοποθετούνται σε διαφορετικές θέσεις ανάλογα με τον διαθέσιμο χώρο σε κάθε σχεδίαση.

Ωστόσο ο υπολογισμός του κέντρου βάρους του φορτίου, του Lighthouse καθώς και του πλοίου στην κατάσταση Full Load Departure γίνεται με μεγάλη ακρίβεια με τις μικρές αποκλίσεις να οφείλονται στις ιδιαιτερότητες της κάθε μιας κατασκευής. Σημειώνονται επίσης τα πολύ καλά αποτελέσματα στην εκτίμηση της διαμήκης θέσης του κέντρου βάρους όλων των παραπάνω.

Τα υδροστατικά στοιχεία παρουσίασαν ικανοποιητικά αποτελέσματα περιλαμβάνοντας ωστόσο λογικές αποκλίσεις λόγω διαφορετικών σχεδιάσεων.

Στην συνέχεια της διπλωματικής, αναπτύχθηκε στο Matlab ένα λογισμικό πραγματοποίησης της προμελέτης πλοίων ξηρού φορτίου το οποίο βασίστηκε εν μέρει σε τύπους της στατιστικής ανάλυσης που προηγήθηκε καθώς επίσης και σε αντίστοιχους τύπους της βιβλιογραφίας. Σημειώνεται ότι όλη η ανάλυση έγινε λαμβάνοντας υπόψη τους διεθνείς κανονισμούς της SOLAS και την διεθνή σύμβαση γραμμής φόρτωσης (International Load Line Convention). Επίσης το πρόγραμμα χρησιμοποιεί την μέθοδο Holtrop-Mennen για τον υπολογισμό της αντίστασης και πρόωσης του πλοίου καθώς και την μέθοδο Schneekluth για τον αναλυτικό υπολογισμό του βάρους του. Στο τελευταίο στάδιο γίνεται μια αναλυτική εκτίμηση του κόστους κατασκευής του πλοίου με σκοπό τον υπολογισμό του ελάχιστου απαιτούμενου ναύλου RFR.

Τα αποτελέσματα του προγράμματος για τα κύρια στοιχεία παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 4 και δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα με τις αποκλίσεις να είναι αντίστοιχες της στατιστικής ανάλυσης που προηγήθηκε. Το μεγαλύτερο ενδιαφέρον αποτελεί το διάγραμμα του MCR, όπου με εξαίρεση ορισμένων σημείων, γίνεται συστηματική υπερεκτίμηση της τάξης του 20% φτάνοντας ωστόσο στο 50% και ακόμα παραπάνω σε δύο μεμονωμένες περιπτώσεις. Οι παραδοχές για τις διάφορες προσαυξήσεις που έχουν εφαρμοστεί αλλά και η περίπτωση, οι ταχύτητες που έχουμε λάβει υπόψη να είναι υπερεκτιμημένες, μπορεί να εξηγήσει τα παραπάνω αποτελέσματα. Επίσης, η μέθοδος Holtrop-Mennen που έχει χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της αντίστασης και πρόωσης,

αποτελεί παλιά μέθοδο και στηρίζεται σε παλαιότερες σχεδιάσεις. Αντίθετα, οι νέες σχεδιάσεις είναι πιο αποδοτικές παρουσιάζοντας μειωμένη αντίσταση λόγω βελτιστοποίησης της γάστρας.

Στο τελευταίο στάδιο του προγράμματος γίνεται μία τεχνοοικονομική μελέτη σε 4 Capsize πλοία του δείγματος μας, υιοθετώντας ένα πραγματικό σενάριο μεταφοράς κάρβουνου, με σκοπό τον υπολογισμό του ελάχιστου απαιτούμενου ναύλου RFR και εν συνεχεία του ελάχιστου ημερήσιου ναύλου. Η σύγκριση τους με τα σημερινά δεδομένα παρουσιάζει πολύ μεγάλες αποκλίσεις γεγονός που οφείλεται στην ναυλαγορά του ξηρού φορτίου το μήνα Ιανουάριο που βρίσκεται στα χαμηλότερα επίπεδα όλων των εποχών. Τέλος, το ίδιο οικονομικό σενάριο εφαρμόστηκε για όλα τα πλοία του δείγματος μας προκειμένου να παρουσιαστεί η σύγκριση του RFR των πλοίων σε σχέση με το μέγεθος τους.

Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα:

- Παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον η πραγματοποίηση παρόμοιας στατιστικής ανάλυσης διαθέτοντας μεγαλύτερο στατιστικό δείγμα πλοίων. Αυτό προϋποθέτει επίσης συνεργασία πολλών ναυτιλιακών εταιρειών προκειμένου να συγκεντρωθεί η απαραίτητη βάση δεδομένων. Ταυτόχρονα σε αυτή τη μελέτη θα είχε μεγάλο ενδιαφέρον η διάκριση του δείγματος ανάλογα με το έτος κατασκευής, το μέγεθος των πλοίων ή ακόμα και την χώρα κατασκευής τους.
- Η πραγματοποίηση παρόμοιας στατιστικής ανάλυσης και ανάπτυξη αντίστοιχου λογισμικού για άλλα είδη πλοίων.
- Σύνδεση του λογισμικού που αναπτύχθηκε με κάποιο ναυπηγικό πακέτο της αγοράς με σκοπό την εισαγωγή των δεδομένων από το Matlab και εν συνεχεία, αυτοματοποιημένα, να γίνεται η σχεδίαση της αντίστοιχης γάστρας πραγματοποιώντας κατ'επέκταση αναλυτικούς υπολογισμούς βαρών, υδροστατικών στοιχείων καθώς και μελέτη αντοχής και ευστάθειας.
- Ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης η δυνατότητα βελτιστοποίησης των υπό μελέτη πλοίων, εφαρμόζοντας κριτήρια όπως είναι η ελαχιστοποίηση του Lightship ή της αντίστασης του πλοίου. Αυτό θα είχε αποτέλεσμα την μικρότερη ανάγκη σε ισχύ πρόωσης επομένως και μικρότερη κατανάλωση καυσίμου. Επίσης διαφορετικά κριτήρια αλλά εξίσου σημαντικά αποτελούν η ελαχιστοποίηση του κόστους κατασκευής του πλοίου ή η ελαχιστοποίηση του ελάχιστου απαιτούμενου ναύλου (RFR). Οι βελτιστοποιήσεις αυτές θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν είτε μέσω του Matlab (Optimization Tool) είτε με τη χρήση κάποιου εξωτερικού προγράμματος βελτιστοποίησης.

6. Βιβλιογραφία

1. Ζαραφωνίτης Γεώργιος, «Εισαγωγή στη Ναυπηγική και τη Θαλάσσια Τεχνολογία», Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2015.
2. Παπανικολάου Α. –Αναστασόπουλος Κ., «Μελέτη και Εξοπλισμός Πλοίου Ι (Μεθοδολογία Προμελέτης) – Συλλογή Βοηθημάτων», Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2007.
3. Παπανικολάου Δ. Απόστολος, «Μελέτη Πλοίου – Μεθοδολογίες Προμελέτης Πλοίου» (Τεύχος 1 & 2), Εκδόσεις Συμεών, τεύχος 1: ISBN 978-960-9600-09-01 & τεύχος 2: ISBN 978-969-9400-11-4, Αθήνα 2009.
4. Πολίτης Κ. Γ., «Σημειώσεις Μαθήματος: Αντίστασης και Πρόωσης Πλοίου», Μάιος 2008.
5. Ψαραύτης Ν. Χαρίλαος, «Οικονομική Θαλασσίων Μεταφορών Ι», Αθήνα 2006.
6. D.G.M Watson, "Practical Ship Design", Scotland 1998
7. Evans, J., 1959. Basic Design Concepts. Naval Engineers Journal, pp. 671-678.
8. Holtrop, J. & Mennen, G.G.J., "An Approximate Power Prediction Method", International Shipbuilding Progress, Vol. 29, pp. 166-170, July 1982.
9. Holtrop, J., «A Statistical Re-Analysis of Resistance and Propulsion Data», International Shipbuilding Progress, Vol. 31, pp.272–276, 1984.
10. Anthony E. Molland, Stephen Turnock, Dominic Hudson, «Ship Resistance and Propulsion», Cambridge University, 2011
11. G.P. Piko, "Regression Analysis of Ship Characteristics", Australian Government Publishing Service, Canberra 1980
12. Aalbers,A., "Evaluation of ship design alternatives", In proceedings of the 34th Wegemt school, Delft, 2000
13. Harry Benford, "The Practical Application of Economics to Merchant Ship Design", SNAME, 1967
14. International Maritime Organization, IMO, «Adoptions of Amendments to the Protocol of 1988 relating to the International Convention on Load Lines, 1966», Εφημερίς της Κυβερνήσεως, Αθήνα 2007
15. International Maritime Organization, IMO, SOLAS, Consolidated Edition, 2013, Consolidated text of the International Convention for the Safety of Life at Sea, 1974, and its Protocol of 1988: articles, annexes and certificates
16. International Maritime Organization, International Convention of Tonnage Measurement of Ships 1969.
17. Anthony E. Molland, «The Maritime Engineering Reference Book», Elsevier, 2008
18. MAN Diesel & Turbo, «Basic Principles of Ship Propulsion»
19. MAN Diesel & Turbo, «Marine Engine – IMO Tier II Programme 2nd edition 2014», <http://marine.man.eu>
20. Mathworks MATLAB R2014b, «Curve Fitting Toolbox – User's Guide», <http://www.mathworks.com>
21. Nkoko Nossa Anneck, «Στατιστική Ανάλυση Τεχνικών Στοιχείων Πλοίων Μεταφοράς Πετρελαίου», Διπλωματική εργασία, Επιβλέπων Καθηγητής κ. Γ. Ζαραφωνίτης, Εργαστήριο Μελέτης Πλοίου ΕΜΠ, Αθήνα 2013.
22. Ευάγγελος Καραγεώργος, «Μεθοδολογία Προμελέτης Πλοίων Μεταφοράς Υγρού Φορτίου» Διπλωματική εργασία, Επιβλέπων Καθηγητής κ. Γ. Ζαραφωνίτης, Εργαστήριο Μελέτης Πλοίου ΕΜΠ, Αθήνα 2015.
23. Papanikolaou, A.D., «Ship Design: Methodologies of Preliminary Design», SPRINGER, ISBN 978-94-017-8751-2, September 2014.
24. Sarris E., «Naval Ship Propulsion and Electric Power Systems Selection for Optimal Fuel Consumption», MIT 2011
25. Schneekluth, H. and Bertram, V., "Ship Design For Efficiency and Economy", 2nd edition, 1998 (Butterworth– Heinemann, Oxford).
26. SHOPERA , Energy Efficient Safe SHip OPERAtion , FP7 Thematic Priority Transport/ FP7-SST-2013-RTD-1/ Activity 7.2.4 Improving Safety and Security/ SST.2013.4-1:Ships in operation (Grant Agreement number 605221) , 2013-2016, <http://shopera.org>

-
27. IHS World Shipping Encyclopaedia version 12.01, IHS Fairplay Eds.
 28. IHS Sea-Web Online Database, <http://www.sea-web.com>
Πρόσβαση σε πληροφορίες από τις παρακάτω διευθύνσεις ιστοσελίδων:
 29. <http://en.wikipedia.org>
 30. <http://www.worldsteelprices.com/index.htm>

7. Παράρτημα – Κώδικας Matlab

7.1. Basic Program

```

clc
clear all

tic

%input
[a,b,c]=xlsread('input.xlsx');
DWTmin=10000;
DWTmax=200000;

Lbp=a(1,1);
B=a(2,1);
D=a(3,1);
T=a(4,1);
Cb=a(5,1);
Vs=a(6,1);
Range=a(7,1);
Crew=a(8,1);
sg=a(9,1); %1.031 small ships - 1.026 big ships
FSaft=a(10,1)/1000; %[m]
FSer=a(11,1)/1000; %[m]
FSfwd=a(12,1)/1000; %[m]
Holds=a(13,1);
FR_hold=a(14,1); %Number of Web Frames per hold
Camber=a(15,1)/1000;
Lhatch=a(16,1);
Bhatch=a(17,1);
Hhatch=a(18,1);
Lbulb=a(19,1);
Wss=a(20,1);
Cfuelcapacity=a(44,1);

Z=a(21,1); % Number of blades
Wcranes=a(22,1); % Cranes Weight [t]
Kst1=a(23,1); % Steel Price [$/ton]
Kst2=a(24,1); % Work Price [$/Hour]
Dock_days=a(26,1); % Docking Days per Year
Kfuel=a(27,1); % Heavy fuel cost $/ton 30jan2015
Kpr=a(28,1); % Provision cost $/(crew*day)
Ksalary=a(29,1); % Mean man salary $/person/month
Loan_percentage=a(30,1); % Percentage of Investment's Loan
I=a(33,1); % Loan Interest Rate
r=a(31,1); % Return of Invested Capital
T_loan=a(32,1); % Years of Loan Payment
ty=a(34,1); % Margin Plate [mm]
Ltrip=a(35,1) ; % Miles of Trip
tportA=a(36,1) ; % Days of loading and waiting
tportB=a(37,1) ; % Days of discharging and waiting
Vtrip=a(38,1) ; % Knots
Cinsurance=a(39,1) ; % $/year
Abt=a(43,1); % Transverse bulb area (m2)
hb=a(42,1); % Centre of bulb area above keel line (m)
At=a(41,1); % Immersed transom area (m2)
S_APP=a(40,1); % Wetted surface of appendages (m2)

```

```

global Lbp LCB Cp Vs B Cwl VOLdes T Cm Cb Dprop Z Abt hb At S_APP
%Checking Restrictions
if (Lbp/B>7.5 | Lbp/B<3.5 | Lbp/D>12.6 | Lbp/D<9.8 | B/T>3.5 |
B/T<2.5 | B/D>2.3 | B/D<1.4 | D/T>1.9 | D/T<1.1)
    disp('Out of Main Dimensions ratio')
end

if (Crew>35 | Crew<15)
    disp('Not logical crew members')
end

if (FSaft>1 | FSer>1 | FSfwd>1)
    disp('Not logical crew members')
end

if (sg>1.4 | sg<1)
    disp('Not logical specific gravity')
end

if (Holds<3 | Holds>12)
    disp('Not logical number of holds')
end

if (Lbulb>0.8*T)
    disp('Not logical length of bulb')
end

if (Lhatch>=25 | Bhatch>B | Hhatch>2.5)
    disp('Not logical dimentions of hatch covers')
end

if (z>8)
    disp('Not logical number of blades')
end

%Basic Informations
DISP=sg*Lbp*B*T*Cb
LS=0.07011*Lbp*B*D+2293
DWT=DISP-LS
if (DWT>=DWTmax | DWT<=DWTmin)
    DISP('DWT is out of constraints')
end

Loa=1.011*Lbp+5.9
DWTscant=1.13*DWT+528.2
Tscant1=-97.82*T^-0.4151+48.5;
Tscant2=0.206*DWTscant^0.3617+1.78;
Tscant=(Tscant1+Tscant2)/2
DISPscant=DWTscant+LS
VOLdes=Cb*Lbp*B*T
Gt=0.2898*Lbp*B*D+536.5
Nt=0.6586*Gt-1769

%Form Coefficients
Cm=-45.44*DWT^-0.8951+0.9988
Cp=Cb/Cm
Cwl1=0.778*Cb+0.248
Cwl2=0.95*Cp+0.17*(1-Cp)^1/3
Cwl3=(1+2*Cb)/3
Cwl=(Cwl1+Cwl2+Cwl3)/3

```

%Fuel Oil

Vfuel=(0.2414*Lbp*B*D+0.7855)*Cfuelcapacity %No use of safety factor due to overestimation
Wfuel=Vfuel*0.99*0.98 %0.98:fullness of tank 0.99:specific gravity of fuel

%Diesel Oil

Vdiesel=(966.4*Vfuel^-1.331+0.05707)*Vfuel
Wdiesel=Vdiesel*0.98*0.9 %0.98:fullness of tank 0.9:specific gravity of diesel

%Lub Oil

Wlub=0.04*(Wfuel+Wdiesel) % 3:5% of fuel + diesel oil
Vlub=Wlub/(0.98*0.9) %0.98:fullness of tank 0.9:specific gravity of lubs

%Fresh Water

Trip_hours=Range/Vs
Trip_days=Trip_hours/24
Wfw=((15+200)*Crew*Trip_days)*1.15/1000 %15kg/person for drinking water and 200kg/person for sanitation. Use safety factor 1.15.

%Crew and Effects

Wcrew=(75+60)*Crew %75kg/person + 60kg/person for luggages

%Provisions

Wpr=12*Crew*Trip_days/1000 % 7-16 kg/person/day

%Constants

Wconst=6.242e-14*(Lbp*B*D)^3-3.233e-8*(Lbp*B*D)^2+0.005318*(Lbp*B*D)-50.76

%Payload

PAYLOAD=DWT-Wfuel-Wdiesel-Wlub-Wfw-Wcrew-Wpr-Wconst

%Cargo Capacity

Vcargo_grain=0.6175*Lbp*B*D+2828 % 100% cargo capacity
Vcargo_bale=0.9571*Vcargo_grain+86.59 % 100% cargo capacity
Ghomo=PAYLOAD/(0.98*Vcargo_grain)

%ILLC

L=Lbp

% Basic Height of Freeboard

BYE_L_A	[24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	50	51	52	53	54	55	56
57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73
74	75	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91
92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	104	105	106	107	108	109
110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126
127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143
144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160
161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177
178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194
195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211
212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228
229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245
246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262
263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279
280	281	282	283	284	285	286	287	288	289	290	291	292	293	294	295	296
297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312	313
314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327	328	329	330
331	332	333	334	335	336	337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347

```

348 349 350 351 352 353 354 355 356 357 358 359 360 361 362 363 364
365];
BYE_A=[200 208 217 225 233 242 250 258 267 275 283 292 300 308 316
325 334 344 354 364 374 385 396 408 420 443 455 467 478 490 503 516
530 544 559 573 587 600 613 626 639 653 666 680 693 706 720 733 746
760 773 800 814 828 841 855 869 883 897 911 926 940 955 969 984 999
1014 1029 1044 1059 1074 1089 1105 1120 1135
1151 1166 1196 1212 1228 1244 1260 1276 1293
1309 1326 1342 1359 1376 1392 1409 1426 1442
1459 1476 1494 1511 1528 1546 1563 1580 1598
1615 1632 1650 1667 1684 1702 1719 1736 1753
1770 1787 1803 1820 1837 1853 1870 1886 1903
1919 1935 1952 1968 1984 2000 2016 2032 2048
2064 2080 2096 2111 2126 2141 2155 2169 2184
2198 2212 2226 2240 2254 2268 2281 2294 2307
2320 2332 2345 2357 2369 2381 2393 2405 2416
2428 2440 2451 2463 2474 2486 2497 2508 2519
2530 2541 2552 2562 2572 2582 2592 2602 2612
2622 2632 2641 2650 2659 2669 2678 2687 2696
2705 2714 2723 2732 2741 2749 2758 2767 2775
2784 2792 2801 2809 2817 2825 2833 2841 2849
2857 2865 2872 2880 2888 2895 2903 2910 2918
2925 2932 2939 2946 2953 2959 2966 2973 2979
2986 2993 3000 3006 3012 3018 3024 3030 3036
3042 3048 3054 3060 3066 3072 3078 3084 3089
3095 3101 3106 3112 3117 3123 3128 3133 3138
3143 3148 3153 3158 3163 3167 3172 3176 3181
3185 3189 3194 3198 3202 3207 3211 3215 3220
3224 3228 3233 3237 3241 3246 3250 3254 3258
3262 3266 3270 3274 3278 3281 3285 3288 3292
3295 3298 3302 3305 3308 3312 3315 3318 3322
3325 3328 3331 3334 3337 3339 3342 3345 3347
3350 3353 3355 3358 3361 3363 3366 3368 3371
3373 3375 3378 3380 3382 3385 3387 3389 3392
3394 3396 3399 3401 3403 3406 3408 3410 3412
3414 3416 3418 3420 3422 3423 3425 3427 3428
3430 3432 3433];
BYE_L_B=[24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38
39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55
56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72
73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89
90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100 101 102 103 104 105 106
107 108 109 110 111 112 113 114 115 116 117 118 119 120 121 122 123
124 125 126 127 128 129 130 131 132 133 134 135 136 137 138 139 140
141 142 143 144 145 146 147 148 149 150 151 152 153 154 155 156 157
158 159 160 161 162 163 164 165 166 167 168 169 170 171 172 173 174
175 176 177 178 179 180 181 182 183 184 185 186 187 188 189 190 191
192 193 194 195 196 197 198 199 200 201 202 203 204 205 206 207 208
209 210 211 212 213 214 215 216 217 218 219 220 221 222 223 224 225
226 227 228 229 230 231 232 233 234 235 236 237 238 239 240 241 242
243 244 245 246 247 248 249 250 251 252 253 254 255 256 257 258 259
260 261 262 263 264 265 266 267 268 269 270 271 272 273 274 275 276
277 278 279 280 281 282 283 284 285 286 287 288 289 290 291 292 293
294 295 296 297 298 299 300 301 302 303 304 305 306 307 308 309 310
311 312 313 314 315 316 317 318 319 320 321 322 323 324 325 326 327
328 329 330 331 332 333 334 335 336 337 338 339 340 341 342 343 344
345 346 347 348 349 350 351 352 353 354 355 356 357 358 359 360 361
362 363 364 365];
BYE_B=[200 208 217 225 233 242 250 258 267 275 283 292 300 308 316
325 334 344 354 364 374 385 396 408 420 432 443 455 467 478 490 503
516 530 544 559 573 587 601 615 629 644 659 674 689 705 721 738 754
769 784 800 816 833 850 868 887 905 923 942 960 978 996 1015 1034
1054 1075 1096 1116 1135 1154 1172 1190 1209

```

```

1229 1250 1271 1293 1315 1337 1359 1380 1401
1421 1440 1459 1479 1500 1521 1543 1565 1587
1609 1630 1651 1671 1690 1709 1729 1750 1771
1793 1815 1837 1859 1880 1901 1921 1940 1959
1979 2000 2021 2043 2065 2087 2109 2130 2151
2171 2190 2209 2229 2250 2271 2293 2315 2334
2354 2375 2396 2418 2440 2460 2480 2500 2520
2540 2560 2580 2600 2620 2640 2660 2680 2698
2716 2735 2754 2774 2795 2815 2835 2855 2875
2895 2915 2933 2952 2970 2988 3007 3025 3044
3062 3080 3098 3116 3134 3151 3167 3185 3202
3219 3235 3249 3264 3280 3296 3313 3330 3347
3363 3380 3397 3413 3430 3445 3460 3475 3490
3505 3520 3537 3554 3570 3586 3601 3615 3630
3645 3660 3675 3690 3705 3720 3735 3750 3765
3780 3795 3808 3821 3835 3849 3864 3880 3893
3906 3920 3934 3949 3965 3978 3992 4005 4018
4032 4045 4058 4072 4085 4098 4112 4125 4139
4152 4165 4177 4189 4201 4214 4227 4240 4252
4264 4276 4289 4302 4315 4327 4339 4350 4362
4373 4385 4397 4408 4420 4432 4443 4455 4467
4478 4490 4502 4513 4525 4537 4548 4560 4572
4583 4595 4607 4618 4630 4642 4654 4665 4676
4686 4695 4704 4714 4725 4736 4748 4757 4768
4779 4790 4801 4812 4823 4834 4844 4855 4866
4878 4890 4899 4909 4920 4931 4943 4955 4965
4975 4985 4995 5005 5015 5025 5035 5045 5055
5065 5075 5086 5097 5108 5119 5130 5140 5150
5160 5170 5180 5190 5200 5210 5220 5230 5240
5250 5260 5268 5276 5285 5294 5303];

```

```

BYEa=interp1(BYE_L_A,BYE_A,L)
BYEb=interp1(BYE_L_B,BYE_B,L)

```

```

BYE2=BYEb-0.60*(BYEb-BYEa)

```

```

% Correction for Hatch Covers

```

```

corr1_L=[108 109 110 111 112 113 114 115 116 117 118 119 120 121
122 123 124 125 126 127 128 129 130 131 132 133 134 135 136 137 138
139 140 141 142 143 144 145 146 147 148 149 150 151 152 153 154 155
156 157 158 159 160 161 162 163 164 165 166 167 168 169 170 171 172
173 174 175 176 177 178 179 180 181 182 183 184 185 186 187 188 189
190 191 192 193 194 195 196 197 198 199 200 350];
corr1_Y=[50 52 55 57 59 62 64 68 70 73 76 80 84 87 91
95 99 103 108 112 116 121 126 131 136 142 147 153 159 164 170 175
181 186 191 196 201 206 210 215 219 224 228 232 236 240 244 247 251
254 258 261 264 267 270 273 275 278 280 283 285 287 290 292 294 297
299 301 304 306 308 311 313 315 318 320 322 325 327 329 332 334 336
339 341 343 346 348 350 353 355 357 358 450];
corr1=interp1(corr1_L,corr1_Y,L)

```

```

%Correction for Cb

```

```

Cb_85D=Cb*(0.85*D/T)^(Cwl/Cb -1)
if Cb_85D>0.68
    corr2=(Cb_85D+0.68)/1.36
else
    corr2=0
end

```

```

%Correction for Side Height Df

```

```

Df=D+ty/1000
if L<120

```

```

    R=L/0.48
else
    R=250
end
if Df>L/15
    corr3=(Df-L/15)*R
else
    corr3=0
end

%Elenxos Ypsous Prwras
if L<250
    EYP=56*L*(1-L/500)*(1.36/(Cb_85D+0.68)) %[mm]
else
    EYP=7000*(1.36/(Cb_85D+0.68)) %[mm]
end
PYP=(Df-T)*1000 %[mm]
if PYP>=EYP
    disp('The ship does not need foredeck')
    Lforecastle=0;
    Hforecastle=0;
    flag1=0;
else
    disp('The ship need foredeck with the following details:')
    Lforecastle=0.07*L % minimum 7% tou L
    Hforecastle=max(2.5,EYP-PYP)
    flag1=1;
end

%Calculation of Superstructure's Dimensions
Lss=(-0.1088*Lbp^0.2423+0.4903)*Lbp
Bss=(-0.0002729*B^1.887+0.8554)*B
Hss=(74.65*D^-2.143+0.7286)*D

%Correction for Superstructures
if Bss>=0.92*B
    disp('it is active superstructure')
    flag2=1
else
    disp('einai purgwto yperkataskeuasma')
    flag2=0
end

%Normal Height
if L<125
    hs=1.8
else
    hs=2.3
end

%Active Height
if flag2==1 %if it is superstructure
    if Hss<=hs
        le_ss=Lss*(Bss/B)*(Hss/hs)
    else
        le_ss=Lss*(Bss/B)
    end
elseif flag2==0 %an einai purgwto
    if (flag1==0 & Bss>=0.60*B & Lss>=0.60*L) %if does not exist
foredeck
        disp('energo uperkataskeuasma')
    end
end

```

```

        if Hss<=hs
            le_ss=Lss*(Bss/B)*(Hss/hs)
        else
            le_ss=Lss*(Bss/B)
        end
    elseif (flag1==1 & Bss>=0.60*B) %if exist foredeck
        disp('it is active superstructure')
        if Hss<=hs
            le_ss=Lss*(Bss/B)*(Hss/hs)
        else
            le_ss=Lss*(Bss/B)
        end
    else
        disp('it is not active superstructure and is not under
consideration')
        le_ss=0
    end
end

S=Lforecastle+Lss
E=Lforecastle+le_ss
Discount_X=[0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1]';
Discount_Y=[0 7 14 21 31 41 52 63 75.3 87.7 100]';
Discount=interp1(Discount_X,Discount_Y,E/L);
corr4=(Discount/100)*1070 %deduction

%Correction for Sheer
Mna=8.3375*(L/3+10);
Mnf=16.6750*(L/3+10);
Mn=(Mna+Mnf)/2
Ms=0 %real sheer
corr5=(Mn-Ms)*(0.75-S/(2*L))

%Correction for length L<100
if (L<100 & E<=0.35*Lbp)
    corr6=7.5*(100-L)*(0.35-E/L)
else
    corr6=0
end

Fb=(BYE2+corr6+corr1)*corr2+corr3-corr4+corr5
T_ILLC=Df-Fb/1000 %[mm]

if T_ILLC>=T
    disp('The Load Line is in order')
else
    disp('The Load Line has problem')
end

PYPfinal=(Df-T+Hforecastle)*1000 %[mm]

%Double Bottom
Hdb_min1=32*B+190*sqrt(T) %ABS
Hdb_min2=max(28*B+205*sqrt(T),650) %LLOYDS
%Hdb_min3=max(250+20*B+50*T,650) %DNV Has been ignored due to
%underestimation
Hdb=(round(mean([Hdb_min1,Hdb_min2])/10))*10 % [mm]

%Bulkheads & Frames
%FSaft,FSer,FSfwd,Holds,Fr_hold
Laft=0.03366*Lbp+1.273
Ler=5.516e-6*Lbp^2.563+15.24

```



```

FR_aft=round(Laft/FSaft)
Laft=FR_aft*FSaft
FR_er=round(Ler/FSer)
Ler=FR_er*FSer
Lcargo=2.576*Vcargo_grain^0.3691  %[m]
Lhold=Lcargo/Holds
FS_hold=(round(Lhold*1000/FR_hold/10))*10 % Web Frame Spacing
Lhold=(FS_hold*FR_hold)/1000
Lcargo=Lhold*Holds
Lfwd=Lbp-Laft-Ler-Lcargo

%Check the distance of Collision Bulkhead
a=min([Lbulb/2 0.015*Lbp 3])
d=Lfwd+a
Lfwd_min=min(0.05*Lbp,10)-a
Lfwd_max=max(0.08*Lbp,0.05Lbp+3)-a
if Lfwd<Lfwd_min
    disp('Lfwd<Lfwd_min')
    Lfwd=Lfwd_min
    Lcargo=Lbp-Laft-Ler-Lfwd
    Lhold=Lcargo/Holds
    FS_hold=(fix(Lhold*1000/FR_hold/10))*10
    Lhold=(FS_hold*FR_hold)/1000
    Lcargo=Lhold*Holds
    Lfwd2=Lbp-Laft-Lcargo-Ler
elseif Lfwd>Lfwd_max
    disp('Lfwd>Lfwd_max')
    Lfwd=Lfwd_max
    Lcargo=Lbp-Laft-Ler-Lfwd
    Lhold=Lcargo/Holds
    FS_hold=(ceil(Lhold*1000/FR_hold/10))*10
    Lhold=(FS_hold*FR_hold)/1000
    Lcargo=Lhold*Holds
    Lfwd2=Lbp-Laft-Lcargo-Ler
else
    Lfwd2=Lfwd
end

%Propeller Diameter
%Dprop=0.4066*T+1.555  alternative calculation
Dprop=0.2288*(Lbp*B*D)^0.2836

%Check Ballast
Ta_min=Dprop+0.6
Tf_min=0.027*Lbp
Tmean=mean([Ta_min,Tf_min])
Cb_Tmean=Cb*(Tmean/T)^(Cwl/Cb -1)
DISP_ballast_arr=sg*Lbp*B*Tmean*Cb_Tmean
DWT_ballast_arr=DISP_ballast_arr-LS
Cons_arr=0.1*(Wfuel+Wdiesel+Wlub+Wfw+Wpr) % 10% of consumables
Wballast_min=DWT_ballast_arr-Cons_arr-Wcrew-Wconst
Vballast_min=Wballast_min/1.025
Vballast=0.03169*(Lbp*B*D)^1.137
if Vballast<Vballast_min
    Vcargo_grain=Vcargo_grain-(Vballast_min-Vballast)
    Vballast=Vballast_min
    Lcargo=2.576*Vcargo_grain^0.3691  %[m]
    Lhold=Lcargo/Holds
    FS_hold=(round(Lhold*1000/FR_hold/10))*10 % Web Frame Spacing
    Lhold=(FS_hold*FR_hold)/1000
    Lcargo=Lhold*Holds
    Lfwd=Lbp-Laft-Ler-Lcargo
    Lfwd2=Lfwd

```

```

%Checking distance of collision bulkhead
a=min([Lbulb/2 0.015*Lbp 3])
d=Lfwd+a
Lfwd_min=min(0.05*Lbp,10)-a
Lfwd_max=0.08*Lbp-a
if Lfwd<Lfwd_min
    disp('Lfwd<Lfwd_min')
    Lfwd=Lfwd_min
    Lcargo=Lbp-Laft-Ler-Lfwd
    Lhold=Lcargo/Holds
    FS_hold=(fix(Lhold*1000/FR_hold/10))*10
    Lhold=(FS_hold*FR_hold)/1000
    Lcargo=Lhold*Holds
    Lfwd2=Lbp-Laft-Lcargo-Ler
elseif Lfwd>Lfwd_max
    disp('Lfwd>Lfwd_max')
    Lfwd=Lfwd_max
    Lcargo=Lbp-Laft-Ler-Lfwd
    Lhold=Lcargo/Holds
    FS_hold=(ceil(Lhold*1000/FR_hold/10))*10
    Lhold=(FS_hold*FR_hold)/1000
    Lcargo=Lhold*Holds
    Lfwd2=Lbp-Laft-Lcargo-Ler
end
end

%CVcargo
CVcargo=Vcargo_grain/(Lcargo*B*D-Hdb)

%Lightship
KG_ls=0.3933*D+3.996
LCG_ls=0.5028*Lbp-8.915

%Cargo
KG_cargo1=0.5097*D+1.124
KG_cargo2=Hdb/1000+0.52*(D-Hdb/1000) %0.50-0.54 We use 0.52
KG_cargo=mean([KG_cargo1 KG_cargo2])
LCG_cargo1=0.5418*Lbp+0.1962
LCG_cargo2=Laft+Ler+0.485*Lcargo %0.47-0.5 We use 0.485
LCG_cargo=(mean([LCG_cargo1,LCG_cargo2]))*1.015 % We use safety
factor 1.5%

%Fresh Water
KG_fw=0.9123*D-0.5871

%DWT
KG_DWT=0.5352*D+0.7465
LCG_DWT=0.5296*Lbp-0.36

%Full Load Departure
KG_fld1=0.5126*D+1.215
%LCG_fld=0.5331*Lbp-3.361 ignore because we calculate it later with
better
%approach and less deviation

%Full Load Departure Calculated
KG_fld_calc=(KG_ls*LS+KG_DWT*DWT)/(LS+DWT)
LCG_fld_calc=(LCG_ls*LS+LCG_DWT*DWT)/(LS+DWT)

KG_fld=mean([KG_fld1 KG_fld_calc])
LCG_fld=LCG_fld_calc

```

```

%LCB
LCB1=4.459*DWT^0.2898
LCB2=0.5447*Lbp-4.263
LCB=mean([LCB1 LCB2])

%KB
KB1=T*(0.9-0.36*Cm) %Normand I
KB2=T*(0.9-0.3*Cm-0.1*Cb) %Schneekluth
KB3=T*(5/6-Cb/(3*Cwl)) %Normand II
KB=mean([KB1 KB2 KB3])

%BM
% For c1 it is used also the: 0.0372*(2*Cwl+1)^3 but it reverts with
lower
% values and the BM is underestimated.
C1=mean([0.096+0.89*Cwl^2 Cwl^1.8 0.13*Cwl+0.87*Cwl^2]) % Normand,
Schneekluth, Bauer, Dudszus-Danckwardt
BM=((C1*B^2)/(12*T*Cb))*0.97 % We use deduction factor based on the
results

%KM
KM=KB+BM

%GM
GM1=KM-KG_fld1
GM2=KM-KG_fld_calc
GM=KM-KG_fld

%Resistanceandpropulsion
[R_W,R_F,R_APP,R_B,R_TR,R_A,R_TOTAL,EHP,w,t,VA,Thrust,EAR,nR,Wsa,n0,P
D,rps,SHP,PC]= resistanceandpropulsion(Vs)
rpm_prop=rps*60

MCR=SHP/(0.83) % 17% power and sea margin

%Engine Selection
[a,b,c]=xlsread('englibrary.xls');
size(a,1);
cyl=a(2:size(a,1),1);
L1=a(2:size(a,1),2);
L2=a(2:size(a,1),3);
L3=a(2:size(a,1),4);
L4=a(2:size(a,1),5);
rpm_min=a(2:size(a,1),6);
rpm_max=a(2:size(a,1),7);
sfoc=a(2:size(a,1),8);
weight=a(2:size(a,1),9);
j=1;
for i=1:(size(a,1)-1)
    if MCR<=L1(i)
        model(j,1)=b(i+1,2);
        engine(j,1)=cyl(i);
        engine(j,2)=L1(i);
        engine(j,3)=L2(i);
        engine(j,4)=L3(i);
        engine(j,5)=L4(i);
        engine(j,6)=rpm_min(i);
        engine(j,7)=rpm_max(i);
        engine(j,8)=sfoc(i);
        engine(j,9)=weight(i);
        engine(j,10)=L1(i)-MCR;
        j=j+1;
    end
end

```

```

    end

end

all_approved_engines=[model num2cell(engine)];
[MCRengine,k]=min(engine(:,10));
optimengine=[model(k) num2cell(engine(k,:))];
rpm_engine=engine(k,7)
sfoc=engine(k,8)
Wengine=engine(k,9)

if (MCR*sfoc*Trip_hours*10^-6>Wfuel)
    disp('Not sufficient capacity of fuel oil tanks')
end

%Steel Weight
%Harvald & Jensen
%Vc=Cb*Lbp*B*D+Lss*Bss*Hss
%Cs=0.07+0.064*exp(-0.5*log10(DISP)+1-0.1*(log10(DISP)-2)^2.45)
%Wsteel=Cs*Vc

%Schneekluth
c1=0.25
Cb_D=Cb+c1*(D-T)/T*(1-Cb)
VOL_D=Lbp*B*D*Cb_D
VOL_S=0 % sheer=0
c3=0.7*Cb_D
VOL_B=Lbp*B*c3*Camber
VOL_H=Holds*Lhatch*Bhatch*Hhatch
VOL_U=VOL_D+VOL_S+VOL_B+VOL_H
Cst=interp1([150 300],[0.108 0.117],Lbp)
Wsteel=VOL_U*Cst*(1+0.033*(Lbp/D-12))*(1+0.06*(1-D)/4)*(1+0.05*(1.85-
B/D))*(1+0.2*(T/D-0.85))*(0.92+(1-Cb_D)^2)*(1+0.75*Cb_D*(Cm-0.98))
Wsteel=Wsteel*1.0055 %increment for bulbous bow
Wsteel=(Wsteel-Wsteel*0.07)+Wss % deduction for use of high
tensile steel

%Outfitting
Wot1=(interp1([140 250 300],[0.25 0.17 0.15],Lbp))*Lbp*B
Wot2=(interp1([6 8 10 12 14],[826 1230 1720 2360
3150],Bhatch,'pchip')*Lhatch)/1000+Wcranes+(Lss*Bss*Hss*85)/1000+0.22
*(Lbp*B*D)^(2/3) %Kp/m^3, /1000 for tranform Kp to tons
Wot=mean([Wot1 Wot2])

%Machinery
%with coefficients
Wmr1=12.5*Lbp*B*D
Wmr2=42.5*SHP
Wms=7.5*SHP
Wm1=(mean([Wmr1 Wmr2])+Wms)/1000+Wengine
Wm2=87.5*SHP/1000

LScalc=Wm1+Wsteel+Wot
LS
LSfactor=LScalc/LS
Wm1=Wm1/LSfactor
Wsteel=Wsteel/LSfactor
Wot=Wot/LSfactor

%Cost Calculations

%Steel Cost

```

```

Cst_material=Kst1*Wsteel*1.12 %1.12 for safety factor
MHS=175*Wsteel^0.90 %Benford manhours
Cst_work=Kst2*MHS
Cst=Cst_material+Cst_work

%Outfitting Cost
Cot_material=5000*Wot^0.95
Cot=Cot_material/0.79 % Cot_material=82-79%Cot
Cot_work=Cot*0.21 % Cot_work=18-25%Cot

%Machinery Cost
%cmachinery_material=Km*MCR
%cmachinery=cmachinery_material/0.85 % cmachinery_material=88-
82%cmachinery
%cmachinery_work=0.15*cmachinery % cmachinery_work=12-
18%0.15*cmachinery
cmachinery=mean([9375.44*MCR^0.79 6046*MCR^0.82])

%Cost Build
%Cost_material=Cst_material+Cot_material+cmachinery_material
%Cost_work=Cst_work+Cot_work+cmachinery_work
Cost_build=Cst+Cot+cmachinery

%Running Cost
Trip=2*(Ltrip/(24*Vtrip))+tportA+tportB
N_trips=(365-Dock_days)/Trip % trips per year
Trip_daysperyear=N_trips*Trip

%Fuel Cost
cfuel=(N_trips*2*Ltrip/Vtrip)*(sfoc*MCR*10^-6)*Kfuel

%Provision Cost
Cpr=Crew*Trip_daysperyear*Kpr

%Crew Cost
Csalary=Crew*Ksalary*14 % 14 salaries per year

%Port Cost
Cport=(600+(50*(Lbp*B*D)))/(10^5)*(3.2808^3))*N_trips*2 % 2 ports per
trip, lbp,B,D to ft (1m=3.2808ft)

%Repair and Maintenance Cost
%crepair_steel=25000*(Lbp*B*D*3.2808^3/10^5)^(2/3) % L,B,D to feet,
1m=3.2808feet
%crepair_machinery=13.6*MCR
%crepair=crepair_steel+crepair_machinery
crepair=0.005*Cost_build

Cost_running=cfuel+Cpr+Csalary+Cport+Cinsurance+crepair

%Required Freight Rate
Loan=(Loan_percentage/100)*Cost_build
Cash=Cost_build-Loan
Price_end_loan=0.18*Cost_build % Ship's value at the end of loan
I=I/100;
r=r/100;

C_t0=Price_end_loan/((1+r)^T_loan) % Present Ship's value
Installment_loan=Loan*I*(1+I)^T_loan/((1+I)^T_loan-1) % Installments
of Loan per year

```

```

Payload_per_year=PAYLOAD*N_trips

sum=0;
for j=1:1:T_loan
    sum=sum+(1+r)^(-j);
end

RFR1=(Cash-
C_t0+Cost_running*sum+Installment_loan*sum)/(sum*Payload_per_year) %
$/t
RFR2=(Payload_per_year/365)*RFR1 % $/day

toc

```

7.2. Subroutine for Resistance and Propulsion Calculations

```

%Resistanceandpropulsion
function
[R_W,R_F,R_APP,R_B,R_TR,R_A,R_TOTAL,EHP,w,t,VA,Thrust,EAR,nR,Wsa,n0,P
D,rps,SHp,PC]= resistanceandpropulsion(Vs)

global Lbp LCB Cp Vs B Cwl VOLdes T Cm Cb Dprop Z g h p0_pv dens
Thrust EAR VA Abt hb At S_APP

Lwl=1.02*Lbp;
L=Lwl;
lcb=(LCB-Lbp/2)*100/Lbp;
LR=L*(1-Cp+0.06*Cp*lcb/(4*Cp-1)); % Run Length (m)

Vs=Vs*0.5144;

% Constants
g=9.81;
visc=1.1883e-6;
dens=1.025;
d=-0.9;
Fn=Vs/(g*L)^0.5
Re=Vs*L/visc

ie=1+89*exp(-(L/B)^0.80856*(1-Cwl)^0.30484*(1-Cp-
0.0225*lcb)^0.6367*(LR/B)^0.34574*(100*VOLdes/L^3)^0.16302);
if L/B<=12
    lamda=1.446*Cp-0.03*L/B;
else
    lamda=1.446*Cp-0.36;
end

% Coefficients
c_stern=0;
c14=1+0.011*c_stern;

if B/L<=0.11
    c7=0.229577*(B/L)^0.33333;
elseif (0.11<B/L)&(B/L<0.25)
    c7=B/L;
elseif B/L>=0.25
    c7=0.5-0.0625*L/B;
end

Tf=T;

```

```

c1=2223105*c7^3.78613*(T/B)^1.07961*(90-ie)^(-1.37565);
c3=0.56*Abt^1.5/(B*T*(0.31*Abt^0.5+Tf-hb));
c2=exp(-1.89*c3^0.5);
c5=1-0.8*At/(B*T*Cm);

if L^3/VOLdes<=512
    c15=-1.69385;
elseif 512<L^3/VOLdes<1726.91
    c15=-1.69385+(L/VOLdes^(1/3)-8)/2.36;
elseif L^3/VOLdes>=1726.91
    c15=0;
end

if Cp<0.8
    c16=8.07981*Cp-13.8673*Cp^2+6.984388*Cp^3;
elseif Cp>=0.8
    c16=1.73014-0.7067*Cp;
end

c17=6919.3*Cm^-1.3346*(VOLdes/L^3)^2.00977*(L/B-2)^1.40692;

m1=0.014040*L/T-1.75254*VOLdes^(1/3)/L-4.79323*B/L-c16;
m3=-7.2035*(B/L)^0.326869*(T/B)^0.605375;
m4=0.4*c15*exp(-0.034*Fn^-3.29);

% Wave Resistance
k1=-
1+0.93+0.487118*c14*(B/L)^1.06806*(T/L)^0.46106*(L/LR)^0.121563*(L^3/
VOLdes)^0.36486*(1-Cp)^-0.604247;

R_WA=c1*c2*c5*VOLdes*dens*g*exp(m1*Fn^d+m4*cos(lamda*Fn^-2));
R_WB=c17*c2*c5*VOLdes*dens*g*exp(m3*Fn^d+m4*cos(lamda*Fn^-2));
if Fn<0.4
    R_W=R_WA
elseif (Fn>=0.4)&(Fn<=0.55)
    R_W=R_WA+(10*Fn-4)*(R_WB-R_WA)/1.5
elseif Fn>0.55
    R_W=R_WB
end

% Frictional Resistance
C_F=0.075/(log10(Re)-2)^2;
Wsa=L*(2*T+B)*(Cm^0.5)*(0.453+0.4425*Cb-0.2862*Cm-
0.003467*B/T+0.3696*Cwl)+2.38*Abt/Cb;
R_F=0.5*dens*Wsa*Vs^2*C_F

% Appendage Resistance
k2=-1+1.5;
R_APP=0.5*dens*S_APP*Vs^2*(1+k2)*C_F

% Transom Stern Resistance
Fnt=Vs/(2*g*At/(B+B*Cwl))^0.5;

if Fnt<5
    c6=0.2*(1-0.2*Fnt);
else
    c6=0;
end

R_TR=0.5*dens*Vs^2*At*c6

```

```

% Bulbous Bow Resistance
Fni=Vs/(g*(Tf-hb-0.25*(Abt)^0.5)+0.15*Vs^2)^0.5;
P_B=0.56*(Abt^0.5)/(Tf-1.5*hb);
R_B=(0.11*exp(-3*P_B^-2)*Fni^3*Abt^1.5*dens*g)/(1+Fni^2)

% Correlation Resistance
if Tf/L<=0.04
    c4=Tf/L;
else
    c4=0.04;
end

C_A=0.006*(L+100)^(-0.16)-0.00205+0.003*(L/7.5)^(0.5)*Cb^4*c2*(0.04-
c4);
R_A=0.5*dens*Wsa*Vs^2*C_A

% Total Resistance
R_TOTAL=R_F*(1+k1)+R_APP+R_W+R_B+R_TR+R_A
R_TOTAL=R_TOTAL*1.2 %Faouled Hull 20%

% Effective Shaft Horsepower
EHP=R_TOTAL*Vs

Ta=T;
if (B/Ta)<5
    c8=(B*Wsa)/(L*Dprop*Ta);
else
    c8=(Wsa*(7*B/Ta-25))/(L*Dprop*(B/Ta-3));
end

if c8<28
    c9=c8;
else
    c9=32-16/(c8-24);
end

if (Ta/Dprop)<2
    c11=Ta/Dprop;
else
    c11=0.08333333*(Ta/Dprop)^3+1.333333;
end

if Cp<0.7
    c19=0.12997/(0.95-Cb)-0.11056/(0.95-Cp);
else
    c19=0.18567/(1.3571-Cm)-0.71276+0.38648*Cp;
end

c20=1+0.015*c_stern;
k=-1+(1+k1)+((1+k2)-(1+k1))*S_APP/(Wsa+S_APP);
C_V=(1+k)*C_F+C_A;

C_P1=1.45*Cp-0.315-0.0225*lcb;

K=0.2; % Single-screw ships
p0_pv=99.047; % p0-pv N/m^2
h=Dprop/2; %distance from shaft line to keel

nS=0.99;
w=c9*c20*C_V*L/Ta*(0.050776+0.93405*c11*C_V/(1-
C_P1))+0.27915*c20*((B/(Lbp*(1-C_P1)))^0.5+c19*c20)

```



```

t=(0.25014*(B/L)^0.28956*((B*T)^0.5/Dprop)^0.2624)/((1-
Cp+0.0225*lcb)^0.01762)+0.0015*c_stern
VA=Vs*(1-w)
Thrust=R_TOTAL/(1-t) % Thrust
EAR=K+(1.3+0.3*Z)*Thrust/(Dprop^2*(p0_pv+dens*g*h))
nR=0.9922-0.05908*EAR+0.07424*(Cp-0.0225*lcb)

% fmincon setup
% Design variables: P/D, rps
lb = [0.5;1];
ub = [1.4;2];
x0 = [1;1.5];
A=[];
b=[];
Aeq=[];
beq=[];
%Non Linear Equalities
nonlcon = @constraints;
options = optimset('Algorithm','active-set','TolFun',1e-
6,'TolCon',1e-6,'TolX',1e-6,'Display','off');

problem =
createOptimProblem('fmincon','objective',@n0calc,'x0',x0,'lb',lb,'ub'
,ub,'nonlcon',nonlcon,'options',options);

%[x,f]=fmincon(@n0calc,x0,[],[],[],[],lb,ub,@constraints,options)

%Global search optimization solver
gs = GlobalSearch('Display','off');
[x,f] = run(gs,problem);
PD = x(1)
rps = x(2)
n0= -f

SHP=EHP*(1-w)/((1-t)*n0*nR*nS)
PC=EHP/SHP

Vs=Vs/0.5144;

```

7.3. Function for open water efficiency η_0

```

function J1 = n0calc(x)

global VA Dprop Z EAR

% Function input variables
PD = x(1); % P/D
rps = x(2); % Revolution of Propeller per Second [1/sec]

J =VA/(rps*Dprop); % Advance coefficient

% Kt regression equation implementation
K_t=8.80496e-3;
K_t=K_t-0.204554*J;
K_t=K_t+0.166351*PD;
K_t=K_t+0.158114*PD^2;
K_t=K_t-0.147581*J^2*EAR;
K_t=K_t-0.481497*J*PD*EAR;
K_t=K_t+0.415437*PD^2*EAR;

```

```

K_t=K_t+0.0144043*Z;
K_t=K_t-0.0530054*J^2*Z;
K_t=K_t+0.0143481*PD*Z;
K_t=K_t+0.0606826*J*PD*Z;
K_t=K_t-0.0125894*EAR*Z;
K_t=K_t+0.0109689*J*EAR*Z;
K_t=K_t-0.133698*PD^3;
K_t=K_t+6.38407e-3*PD^6;
K_t=K_t-1.32718e-3*J^2*PD^6;
K_t=K_t+0.168496*J^3*EAR;
K_t=K_t-0.0507214*EAR^2;
K_t=K_t+0.0854559*J^2*EAR^2;
K_t=K_t-0.0504475*J^3*EAR^2;
K_t=K_t+0.010465*J*PD^6*EAR^2;
K_t=K_t-6.48272e-3*J^2*PD^6*EAR^2;
K_t=K_t-8.417281e-3*PD^3*Z;
K_t=K_t+0.0168424*J*PD^3*Z;
K_t=K_t-1.02296e-3*J^3*PD^3*Z;
K_t=K_t-0.0317791*PD^3*EAR*Z;
K_t=K_t+0.018604*J*EAR^2*Z;
K_t=K_t-4.10798e-3*PD^2*EAR^2*Z;
K_t=K_t-6.06848e-4*Z^2;
K_t=K_t-4.9819e-3*J*Z^2;
K_t=K_t+2.5983e-3*J^2*Z^2;
K_t=K_t-5.60528e-4*J^3*Z^2;
K_t=K_t-1.63652e-3*J*PD^2*Z^2;
K_t=K_t-3.28787e-4*J*PD^6*Z^2;
K_t=K_t+1.16502e-4*J^2*PD^6*Z^2;
K_t=K_t+6.90904e-4*EAR*Z^2;
K_t=K_t+4.21749e-3*PD^3*EAR*Z^2;
K_t=K_t+5.65229e-5*J^3*PD^6*EAR*Z^2;
K_t=K_t-1.46564e-3*PD^3*EAR^2*Z^2;

```

```

% K-q regression equation implementation

```

```

K_q=3.79368e-3;
K_q=K_q+8.86523e-3*J^2;
K_q=K_q-0.032241*J*PD;
K_q=K_q+3.44778e-3*PD^2;
K_q=K_q-0.0408811*PD*EAR;
K_q=K_q-0.108009*J*PD*EAR;
K_q=K_q-0.0885381*J^2*PD*EAR;
K_q=K_q+0.188561*PD^2*EAR;
K_q=K_q-3.70871e-3*J*Z;
K_q=K_q+5.13696e-3*PD*Z;
K_q=K_q+0.0209449*J*PD*Z;
K_q=K_q+4.74319e-3*J^2*PD*Z;
K_q=K_q-7.23408e-3*J^2*EAR*Z;
K_q=K_q+4.38388e-3*J*PD*EAR*Z;
K_q=K_q-0.0269403*PD^2*EAR*Z;
K_q=K_q+0.0558082*J^3*EAR;
K_q=K_q+0.0161886*PD^3*EAR;
K_q=K_q+3.18086e-3*J*PD^3*EAR;
K_q=K_q+0.015896*EAR^2;
K_q=K_q+0.0471729*J*EAR^2;
K_q=K_q+0.0196283*J^3*EAR^2;
K_q=K_q-0.0502782*PD*EAR^2;
K_q=K_q-0.030055*J^3*PD*EAR^2;
K_q=K_q+0.0417122*J^2*PD^2*EAR^2;
K_q=K_q-0.0397722*PD^3*EAR^2;
K_q=K_q-3.50024e-3*PD^6*EAR^2;
K_q=K_q-0.0106854*J^3*Z;
K_q=K_q+1.10903e-3*J^3*PD^3*Z;
K_q=K_q-3.13912e-4*PD^6*Z;

```

```

K_q=K_q+3.5985e-3*J^3*EAR*Z;
K_q=K_q-1.42121e-3*PD^6*EAR*Z;
K_q=K_q-3.83637e-3*J*EAR^2*Z;
K_q=K_q+0.0126803*PD^2*EAR^2*Z;
K_q=K_q-3.18278e-3*J^2*PD^3*EAR^2*Z;
K_q=K_q+3.34268e-3*PD^6*EAR^2*Z;
K_q=K_q-1.83491e-3*J*PD*Z^2;
K_q=K_q+1.12451e-4*J^3*PD^2*Z^2;
K_q=K_q-2.97228e-5*J^3*PD^6*Z^2;
K_q=K_q+2.69551e-4*J*EAR*Z^2;
K_q=K_q+8.3265e-4*J^2*EAR*Z^2;
K_q=K_q+1.55334e-3*PD^2*EAR*Z^2;
K_q=K_q+3.02683e-4*PD^6*EAR*Z^2;
K_q=K_q-1.843e-4*EAR^2*Z^2;
K_q=K_q-4.25399e-4*PD^3*EAR^2*Z^2;
K_q=K_q+8.69243e-5*J^3*PD^3*EAR^2*Z^2;
K_q=K_q-4.659e-4*PD^6*EAR^2*Z^2;
K_q=K_q+5.54194e-5*J*PD^6*EAR^2*Z^2;

```

```
% Open Water Efficiency calculation
```

```
n0 = J*K_t/(2*pi*K_q);
```

```
J1 = -n0;
```

7.4. Function with optimization's constraints

```
function [c,ceq] = constraints(x)
```

```
global VA Dprop EAR Thrust dens g h p0_pv Z
```

```
PD = x(1); % P/D
```

```
rps = x(2); % Revolution of Propeller per Second [1/sec]
```

```
J = VA/(rps*Dprop); % Advance coefficient
```

```
% Kt regression equation implementation
```

```
K_t=8.80496e-3;
```

```
K_t=K_t-0.204554*J;
```

```
K_t=K_t+0.166351*PD;
```

```
K_t=K_t+0.158114*PD^2;
```

```
K_t=K_t-0.147581*J^2*EAR;
```

```
K_t=K_t-0.481497*J*PD*EAR;
```

```
K_t=K_t+0.415437*PD^2*EAR;
```

```
K_t=K_t+0.0144043*Z;
```

```
K_t=K_t-0.0530054*J^2*Z;
```

```
K_t=K_t+0.0143481*PD*Z;
```

```
K_t=K_t+0.0606826*J*PD*Z;
```

```
K_t=K_t-0.0125894*EAR*Z;
```

```
K_t=K_t+0.0109689*J*EAR*Z;
```

```
K_t=K_t-0.133698*PD^3;
```

```
K_t=K_t+6.38407e-3*PD^6;
```

```
K_t=K_t-1.32718e-3*J^2*PD^6;
```

```
K_t=K_t+0.168496*J^3*EAR;
```

```
K_t=K_t-0.0507214*EAR^2;
```

```
K_t=K_t+0.0854559*J^2*EAR^2;
```

```
K_t=K_t-0.0504475*J^3*EAR^2;
```

```
K_t=K_t+0.010465*J*PD^6*EAR^2;
```

```
K_t=K_t-6.48272e-3*J^2*PD^6*EAR^2;
```

```
K_t=K_t-8.417281e-3*PD^3*Z;
```

```
K_t=K_t+0.0168424*J*PD^3*Z;
```

```
K_t=K_t-1.02296e-3*J^3*PD^3*Z;
```

```
K_t=K_t-0.0317791*PD^3*EAR*Z;
```

```
K_t=K_t+0.018604*J*EAR^2*Z;  
K_t=K_t-4.10798e-3*PD^2*EAR^2*Z;  
K_t=K_t-6.06848e-4*Z^2;  
K_t=K_t-4.9819e-3*J*Z^2;  
K_t=K_t+2.5983e-3*J^2*Z^2;  
K_t=K_t-5.60528e-4*J^3*Z^2;  
K_t=K_t-1.63652e-3*J*PD^2*Z^2;  
K_t=K_t-3.28787e-4*J*PD^6*Z^2;  
K_t=K_t+1.16502e-4*J^2*PD^6*Z^2;  
K_t=K_t+6.90904e-4*EAR*Z^2;  
K_t=K_t+4.21749e-3*PD^3*EAR*Z^2;  
K_t=K_t+5.65229e-5*J^3*PD^6*EAR*Z^2;  
K_t=K_t-1.46564e-3*PD^3*EAR^2*Z^2;  
  
% Equality constraint  
ceq = K_t-Thrust/(dens*Dprop^4*rps^2);  
  
% Inequality constraint  
c = (1.3+0.3*Z)*Thrust/(p0_pv+dens*g*h)/Dprop^2-EAR;
```