

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



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
**«ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΡΟΜΕΛΕΤΗΣ ΠΛΟΙΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΥΓΡΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ»**



**ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ ΚΑΡΑΓΕΩΡΓΟΣ**

**08109018**

**ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:**

Γ. ΖΑΡΑΦΩΝΙΤΗΣ (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ)

Α. ΠΑΠΑΝΙΚΟΛΑΟΥ

Ν. ΒΕΝΤΙΚΟΣ

**ΑΘΗΝΑ, 2015**



## **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	10
1.1. Πρόλογος .....	10
1.2. Στόχοι Διπλωματικής Εργασίας.....	10
1.3. Δεξαμενόπλοια.....	11
1.3.1. Κατηγορίες .....	11
1.3.2. Διάταξη και Υπόβαθρο Κανονισμών .....	11
1.4. Βάση Δεδομένων .....	14
1.5. Στατιστική Ανάλυση .....	17
1.5.1. Διάγραμμα Διασποράς (Scatter Diagram).....	17
1.5.2. Προσεγγιστικές Καμπύλες (Approximating Curves) .....	18
1.5.3. Μέθοδος Ελαχίστων Τετραγώνων .....	19
1.5.4. Παλινδρόμηση (Regression).....	19
1.5.5. Συσχέτιση (Correlation).....	19
2. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ TANKERS .....	21
2.1. Κύριες Διαστάσεις .....	22
2.1.1. Ολικό μήκος ( $L_{OA}$ ) .....	22
2.1.2. Μήκος μεταξύ καθέτων ( $L_{BP}$ ) .....	23
2.1.3. Πλάτος (B) .....	24
2.1.4. Κοίλο (D) .....	26
2.1.5. Βύθισμα (T) .....	29
2.1.6. Λόγοι κύριων διαστάσεων.....	32
2.2. Εκτόπισμα ( $\Delta$ ).....	36
2.3. Βάρος Αφορτου Σκάφους (Lightship) .....	39
2.4. Χωρητικότητα Δεξαμενών.....	44
2.4.1. Ολική χωρητικότητα (Gross Tonnage).....	44
2.4.2. Καθαρή χωρητικότητα (Net Tonnage) .....	48
2.4.3. Όγκος δεξαμενών φορτίου (Cargo Oil) .....	51
2.4.4. Όγκος δεξαμενών έρματος (Ballast Water).....	55
2.4.5. Όγκος δεξαμενών καυσίμων (Fuel Oil).....	58
2.4.6. Όγκος δεξαμενών Diesel (Diesel Oil) .....	59
2.5. Εκτίμηση Ισχύος Πρόωσης .....	60
2.6. Λοιπές Παράμετροι Σχεδίασης.....	62
2.6.1. Ύψος διπυθμένου (Double Bottom).....	62
2.6.2. Απόσταση διπλού τοιχώματος (Double Hull) .....	63
2.6.3. Μήκος πρυμναίου τμήματος.....	64
2.6.4. Μήκος μηχανοστασίου .....	65
2.6.5. Μήκος χώρου φορτίου.....	67
2.6.6. Διάμετρος έλικας.....	68

3. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ .....	72
3.1. Υπολογισμός κύριων χαρακτηριστικών .....	73
3.2. Έλεγχος με βάση τους κανονισμούς .....	75
3.2.1. Έλεγχος κανονισμών MARPOL 73/78 .....	75
3.2.2. Διεθνής Σύμβαση Γραμμής Φόρτωσης .....	75
3.3. Καθορισμός χώρων και οριοθέτηση φρακτών .....	76
3.4. Υπολογισμός χωρητικότητας δεξαμενών .....	79
3.5. Υπολογισμός κέντρου βάρους και υδροστατικών .....	82
3.5.1. Κέντρα βάρους .....	82
3.5.2. Υδροστατικά μεγέθη .....	83
3.6. Υπολογισμός αντίστασης και πρόωσης .....	84
3.6.1. Υπολογισμός ισχύος και στροφών έλικας .....	85
3.6.2. Παραδείγματα υπολογισμών .....	86
3.7. Μεθοδολογία επιλογής μηχανολογικής εγκατάστασης .....	88
3.8. Μέθοδος υπολογισμού Lightship .....	89
3.8.1. Βάρος μεταλλικής κατασκευής ( $W_{ST}$ ) .....	89
3.8.2. Βάρος ενδιαίτησης και εξοπλισμού ( $W_{OT}$ ) .....	91
3.8.3. Βάρος μηχανολογικής εγκατάστασης ( $W_M$ ) .....	92
3.8.4. Βάρος άφορτου σκάφους (LS) .....	93
3.8.5. Αποτελέσματα και Σύγκριση .....	94
3.9. Μέθοδος υπολογισμού συνολικού κόστους .....	95
3.9.1. Κόστος κατασκευής πλοίου .....	95
3.9.2. Κόστος λειτουργίας πλοίου .....	96
3.9.3. Ελάχιστος Απαιτούμενος Ναύλος .....	98
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ .....	99
4.1. Lightship και DWT .....	100
4.2. Χωρητικότητες Δεξαμενών .....	103
4.3. Οριοθέτηση Φρακτών .....	108
4.4. Εκτίμηση Ισχύος .....	110
4.5. Τεχνοοικονομική Μελέτη .....	112
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ .....	114
6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	116
7. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α – ΔΙΑΣΤΑΥΡΩΣΗ ΜΕ IHS FAIRPLAY .....	118
8. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β – ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ .....	124
8.1. Κύριες Διαστάσεις .....	124
8.1.1. Scantling .....	124
8.2. Χωρητικότητα Δεξαμενών .....	127
8.2.1. Ολική Χωρητικότητα (Gross Tonnage) .....	127
8.2.2. Καθαρή Χωρητικότητα (Net Tonnage) .....	128

---

8.2.3.	Όγκος δεξαμενών φορτίου (Cargo Oil) .....	130
8.2.4.	Όγκος δεξαμενών έρματος (Ballast Water).....	134
8.2.5.	Όγκος δεξαμενών καυσίμων (Fuel Oil).....	135
8.2.6.	Όγκος δεξαμενών Diesel (Diesel Oil) .....	138
8.3.	Εκτίμηση Ισχύος Πρόωσης.....	141
8.4.	Κέντρα βάρους για Full Load Departure.....	144
8.4.1.	Lightship.....	144
8.4.2.	Cargo Oil.....	148
8.4.3.	Deadweight .....	154
8.4.4.	Εκτόπισμα.....	158
8.5.	Υδροστατικά μεγέθη για Full Load Departure .....	162
8.5.1.	LCB.....	162
8.5.2.	KM.....	164
8.5.3.	GM.....	166
8.5.4.	TPC .....	168
8.5.5.	MTC .....	169
8.6.	Λοιπές Παράμετροι Σχεδίασης.....	170
8.6.1.	Ύψος διπυθμένου (Double Bottom).....	170
8.6.2.	Απόσταση διπλού τοιχώματος (Double Hull).....	173
8.6.3.	Συντελεστής πρισματικής διατομής $C_p$ .....	176
8.6.4.	Ύψος εξάλων (Freeboard) .....	177
8.6.5.	Διάμετρος έλικας.....	181
8.6.6.	Επιφάνεια πηδαλίου .....	184
9.	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ – MATLAB CURVE FITTING TOOL.....	186

**ΣΧΗΜΑΤΑ**

Σχήμα 1	Τυπική διάταξη εγκάρσιας τομής Tanker .....	12
Σχήμα 2	Τυπικό σκαρίφημα Tanker.....	13
Σχήμα 3	Δείγμα Υπό Μελέτη Πλοίων ανά Κατηγορία Μεγέθους .....	15
Σχήμα 4	Δείγμα Υπό Μελέτη Πλοίων ανά Έτος Ναυπήγησης .....	16
Σχήμα 5	Τυπικό διάγραμμα διασποράς (Scatter Diagram) .....	17
Σχήμα 6	Διάγραμμα διασποράς με προσεγγιστική καμπύλη .....	18
Σχήμα 7	$L_{OA}$ συναρτήσει του $L_{BP}$ .....	22
Σχήμα 8	$L_{BP}$ συναρτήσει του DWT .....	23
Σχήμα 9	B συναρτήσει του DWT.....	24
Σχήμα 10	B συναρτήσει του $L_{BP}$ .....	25
Σχήμα 11	D συναρτήσει του DWT .....	26
Σχήμα 12	D συναρτήσει του $L_{BP}$ .....	27
Σχήμα 13	D συναρτήσει του B.....	28
Σχήμα 14	T συναρτήσει του DWT .....	29
Σχήμα 15	T συναρτήσει του D .....	30
Σχήμα 16	$L_{BP}$ , B, D συναρτήσει του DWT .....	31
Σχήμα 17	$L_{BP}/B$ συναρτήσει του DWT .....	32
Σχήμα 18	$L_{BP}/D$ συναρτήσει του DWT.....	32
Σχήμα 19	B/T συναρτήσει του DWT.....	33
Σχήμα 20	D/T συναρτήσει του DWT.....	33
Σχήμα 21	B/D συναρτήσει του DWT .....	34
Σχήμα 22	TPC συναρτήσει των $L_{BP}$ , B για Full Load Departure .....	35
Σχήμα 23	$\Delta$ συναρτήσει του DWT .....	36
Σχήμα 24	DWT/ $\Delta$ συναρτήσει του DWT.....	37
Σχήμα 25	$\Delta$ συναρτήσει των $L_{BP}$ , B, T.....	38
Σχήμα 26	LS συναρτήσει του $L_{BP}$ .....	39
Σχήμα 27	LS συναρτήσει των $L_{BP}$ , B, D .....	40
Σχήμα 28	$LS/(L_{BP}*B*D)$ συναρτήσει του DWT.....	41
Σχήμα 29	LS συναρτήσει του DWT.....	42
Σχήμα 30	LS/ $\Delta$ συναρτήσει του DWT .....	43
Σχήμα 31	GT συναρτήσει του DWT .....	44
Σχήμα 32	GT/DWT συναρτήσει του DWT .....	45
Σχήμα 33	GT συναρτήσει του $L_{BP}$ .....	46
Σχήμα 34	GT συναρτήσει των $L_{BP}$ , B, D .....	47
Σχήμα 35	NT συναρτήσει του $V_{CARGO}$ .....	48
Σχήμα 36	NT συναρτήσει του GT.....	49
Σχήμα 37	NT/GT συναρτήσει του NT.....	50
Σχήμα 38	$V_{CARGO}$ συναρτήσει του DWT .....	51
Σχήμα 39	$V_{CARGO}$ συναρτήσει των $L_{BP}$ , B, D .....	52
Σχήμα 40	$V_{CARGO}$ συναρτήσει των $L_{CARGO}$ , B, D .....	53
Σχήμα 41	$V_{CARGO}$ συναρτήσει του $L_{CARGO}$ .....	54
Σχήμα 42	$V_{BALLAST}$ συναρτήσει του DWT .....	55
Σχήμα 43	$V_{BALLAST}$ συναρτήσει των $L_{BP}$ , B, D .....	56
Σχήμα 44	$V_{BALLAST}/DWT$ συναρτήσει του DWT .....	57
Σχήμα 45	$V_{FUEL}$ συναρτήσει της MCR .....	58
Σχήμα 46	$V_{DIESEL}/V_{FUEL}$ συναρτήσει του $V_{FUEL}$ .....	59
Σχήμα 47	Συντελεστής ναυαρχείου συναρτήσει του DWT.....	60
Σχήμα 48	MCR συναρτήσει του $\Delta$ , $V_S$ .....	61
Σχήμα 49	Απαιτούμενο και πραγματικό ύψος διπυθμένου $h_{DB}$ συναρτήσει του B .....	62
Σχήμα 50	Απαιτούμενη και πραγματική απόσταση διπλού τοιχώματος $w_{DH}$ συναρτήσει του DWT .....	63
Σχήμα 51	$L_{AFT}$ συναρτήσει του $L_{BP}$ .....	64
Σχήμα 52	$L_{ER}$ συναρτήσει του $L_{BP}$ .....	65

Σχήμα 53 $L_{ER}$ συναρτήσει της MCR .....	66
Σχήμα 54 $L_{CARGO}$ συναρτήσει του $L_{BP}$ .....	67
Σχήμα 55 Διάμετρος έλικας συναρτήσει του T .....	68
Σχήμα 56 Πραγματική και μετρήσιμη διάμετρος έλικας συναρτήσει του T.....	69
Σχήμα 57 Διάμετρος έλικας συναρτήσει της MCR.....	70
Σχήμα 58 Πραγματική και μετρήσιμη διάμετρος έλικας συναρτήσει της MCR .....	71
Σχήμα 59 Τυπικό Layout Diagram ενός κινητήρα .....	88
Σχήμα 60 Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για LS .....	101
Σχήμα 61 Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για DWT .....	102
Σχήμα 62 Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για GT .....	104
Σχήμα 63 Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για $V_{CARGO}$ .....	105
Σχήμα 64 Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για $V_{LIQUID}$ .....	107
Σχήμα 65 Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για $L_{AFT}$ .....	108
Σχήμα 66 Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για $L_{ER}$ .....	108
Σχήμα 67 Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για $L_{CARGO}$ .....	109
Σχήμα 68 Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για MCR.....	110
Σχήμα 69 Ποσοστιαία διαφορά του Lightship (t) .....	118
Σχήμα 70 $LS_{REAL}$ και $LS_{FAIRPLAY}$ συναρτήσει των $L_{BP}$ , B, D.....	119
Σχήμα 71 Ποσοστιαία διαφορά του Gross Tonnage (GT).....	120
Σχήμα 72 $GT_{REAL}$ και $GT_{FAIRPLAY}$ συναρτήσει των $L_{BP}$ , B, D.....	120
Σχήμα 73 Ποσοστιαία διαφορά του DWT Scantling (t).....	121
Σχήμα 74 Ποσοστιαία διαφορά του $T_{SCANTLING}$ (m) .....	122
Σχήμα 75 Ποσοστιαία διαφορά της ταχύτητας (kn) .....	122
Σχήμα 76 Ποσοστιαία διαφορά της MCR (kW).....	123
Σχήμα 77 $T_{SCANTLING}$ συναρτήσει του T .....	124
Σχήμα 78 $T_{SCANTLING}$ συναρτήσει του $DWT_{SCANTLING}$ .....	125
Σχήμα 79 $DWT_{SCANTLING}$ συναρτήσει του DWT .....	126
Σχήμα 80 GT συναρτήσει του LS .....	127
Σχήμα 81 NT συναρτήσει του DWT.....	128
Σχήμα 82 NT συναρτήσει των $L_{BP}$ , B, D.....	129
Σχήμα 83 $V_{CARGO}$ συναρτήσει του $L_{BP}$ .....	130
Σχήμα 84 $V_{CARGO}/(L_{BP}*B*D)$ συναρτήσει του DWT .....	131
Σχήμα 85 $V_{CARGO}$ συναρτήσει του Δ.....	132
Σχήμα 86 $V_{SLOPS}$ συναρτήσει του $V_{CARGO}$ .....	133
Σχήμα 87 $V_{BALLAST}$ συναρτήσει του $V_{CARGO}$ .....	134
Σχήμα 88 $V_{FUEL}$ συναρτήσει του DWT .....	135
Σχήμα 89 $V_{FUEL}$ συναρτήσει των $L_{BP}$ , B, D .....	136
Σχήμα 90 $V_{FUEL}$ συναρτήσει των MCR, $V_S$ .....	137
Σχήμα 91 $V_{DIESEL}/V_{FUEL}$ συναρτήσει της MCR .....	138
Σχήμα 92 $V_{DIESEL}/V_{FUEL}$ συναρτήσει του DWT .....	139
Σχήμα 93 $V_{DIESEL}+V_{FUEL}$ συναρτήσει της MCR .....	140
Σχήμα 94 MCR συναρτήσει του DWT .....	141
Σχήμα 95 MCR συναρτήσει των $L_{BP}$ , B, D .....	142
Σχήμα 96 MCR συναρτήσει της ακτίνας ενέργειας .....	143
Σχήμα 97 $KG_{LS}$ συναρτήσει του D.....	144
Σχήμα 98 $KG_{LS}$ συναρτήσει του LS .....	145
Σχήμα 99 $LCG_{LS}$ συναρτήσει του $L_{BP}$ .....	146
Σχήμα 100 $LCG_{LS}$ συναρτήσει του LS .....	147
Σχήμα 101 $KG_{CARGO}$ συναρτήσει του D για Full Load Departure.....	148
Σχήμα 102 $KG_{CARGO}$ συναρτήσει του $V_{CARGO}$ για Full Load Departure.....	149
Σχήμα 103 $KG_{CARGO}$ συναρτήσει του DWT για Full Load Departure.....	150
Σχήμα 104 $LCG_{CARGO}$ συναρτήσει του $L_{BP}$ για Full Load Departure .....	151
Σχήμα 105 $LCG_{CARGO}$ συναρτήσει του $V_{CARGO}$ για Full Load Departure .....	152
Σχήμα 106 $LCG_{CARGO}$ συναρτήσει του DWT για Full Load Departure .....	153
Σχήμα 107 $KG_{DWT}$ συναρτήσει του D για Full Load Departure.....	154

Σχήμα 108	$KG_{DWT}$ συναρτήσει του DWT για Full Load Departure.....	155
Σχήμα 109	$LCG_{DWT}$ συναρτήσει του $L_{BP}$ για Full Load Departure .....	156
Σχήμα 110	$LCG_{DWT}$ συναρτήσει του DWT για Full Load Departure.....	157
Σχήμα 111	KG συναρτήσει του D για Full Load Departure .....	158
Σχήμα 112	KG συναρτήσει του DWT για Full Load Departure.....	159
Σχήμα 113	LCG συναρτήσει του $L_{BP}$ για Full Load Departure.....	160
Σχήμα 114	LCG συναρτήσει του DWT για Full Load Departure.....	161
Σχήμα 115	LCB συναρτήσει του DWT για Full Load Departure.....	162
Σχήμα 116	LCB συναρτήσει του $L_{BP}$ για Full Load Departure .....	163
Σχήμα 117	KM συναρτήσει του DWT για Full Load Departure .....	164
Σχήμα 118	KM συναρτήσει του D για Full Load Departure .....	165
Σχήμα 119	GM συναρτήσει του DWT για Full Load Departure .....	166
Σχήμα 120	$GM_{COR}$ συναρτήσει του GM για Full Load Departure .....	167
Σχήμα 121	TPC συναρτήσει του DWT για Full Load Departure .....	168
Σχήμα 122	MTC συναρτήσει του $\Delta$ για Full Load Departure.....	169
Σχήμα 123	Ύψος διπυθμένου ( $h_{DB}$ ) συναρτήσει του D .....	170
Σχήμα 124	Ύψος διπυθμένου ( $h_{DB}$ ) συναρτήσει του B.....	171
Σχήμα 125	Ύψος διπυθμένου ( $h_{DB}$ ) συναρτήσει του DWT .....	172
Σχήμα 126	Απόσταση διπλού τοιχώματος ( $w_{DH}$ ) συναρτήσει του ύψους διπυθμένου ( $h_{DB}$ ) ....	173
Σχήμα 127	Απόσταση διπλού τοιχώματος ( $w_{DH}$ ) συναρτήσει του B.....	174
Σχήμα 128	Απόσταση διπλού τοιχώματος ( $w_{DH}$ ) συναρτήσει του DWT.....	175
Σχήμα 129	$C_P$ συναρτήσει του $C_B$ .....	176
Σχήμα 130	$FB_{SCANT}$ συναρτήσει του $L_{BP}$ .....	177
Σχήμα 131	$FB_{SCANT}$ συναρτήσει του $DWT_{SCANT}$ .....	178
Σχήμα 132	$FB_{SCANT}$ συναρτήσει του $\Delta_{SCANT}$ .....	179
Σχήμα 133	$FB_{SCANT}$ συναρτήσει του $T_{SCANT}$ .....	180
Σχήμα 134	Διάμετρος έλικας συναρτήσει του DWT.....	181
Σχήμα 135	Διάμετρος έλικας συναρτήσει του D.....	182
Σχήμα 136	Διάμετρος έλικας συναρτήσει των $L_{BP}$ , B, D.....	183
Σχήμα 137	Επιφάνεια πηδαλίου συναρτήσει του DWT .....	184
Σχήμα 138	Επιφάνεια πηδαλίου συναρτήσει των $L_{BP}$ , B, D .....	185
Σχήμα 139	Περιβάλλον εργασίας του Curve Fitting Tool στο MATLAB.....	186
Σχήμα 140	Παράθυρο επεξεργασίας διαγράμματος στο MATLAB .....	187



**ΠΙΝΑΚΕΣ**

Πίνακας 1 Κατηγοριοποίηση δεξαμενοπλοίων ανάλογα με το μέγεθος.....	11
Πίνακας 2 Δείγμα Υπό Μελέτη Πλοίων ανά Κατηγορία Μεγέθους.....	14
Πίνακας 3 Λόγοι κύριων χαρακτηριστικών των πλοίων του δείγματος.....	15
Πίνακας 4 Λόγοι κυρίων διαστάσεων .....	34
Πίνακας 5 Όρια δεδομένων κυρίων διαστάσεων .....	72
Πίνακας 6 Μεταβλητές προβλήματος υπολογισμού έλικας .....	85
Πίνακας 7 Δεδομένα παραδείγματος υπολογισμού αντίστασης.....	86
Πίνακας 8 Αποτελέσματα παραδείγματος υπολογισμού αντίστασης.....	87
Πίνακας 9 Σύγκριση Lightship πλοίων.....	94
Πίνακας 10 Αρχείο Input του προγράμματος .....	99
Πίνακας 11 Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για LS.....	100
Πίνακας 12 Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για DWT .....	102
Πίνακας 13 Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για GT .....	103
Πίνακας 14 Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για $V_{CARGO}$ .....	105
Πίνακας 15 Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για $V_{LIQUID}$ .....	106
Πίνακας 16 Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για MCR .....	110
Πίνακας 17 Δεδομένα πραγματικών ταξιδιών για πλοία του δείγματος .....	112
Πίνακας 18 Αποτελέσματα τεχνοοικονομικής μελέτης για πλοία του δείγματος .....	112
Πίνακας 19 Σύγκριση ναύλων από το MATLAB με ενδεικτικές τιμές (Ιανουάριος 2015).....	113
Πίνακας 20 Σύγκριση κόστους κατασκευής με ενδεικτικές τιμές (Ιανουάριος 2015) .....	113

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---

### 1.1. Πρόλογος

Το παρόν κείμενο αποτελεί τη διπλωματική μου εργασία με την οποία ολοκληρώνεται η φοίτησή μου στη Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Η εργασία εκπονήθηκε υπό την επίβλεψη του κ. Γ. Ζαραφώνιτη, Αναπληρωτή Καθηγητή του Τομέα Μελέτης Πλοίου και Θαλασσιών Κατασκευών.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Γ. Ζαραφώνιτη για την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας και τις πολύτιμες οδηγίες που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησής της. Επιπρόσθετα, θα ήθελα να ευχαριστήσω και τον κ. Γ. Τσικρικά, κα Ε. Ηλιοπούλου, κα Α. Αλησαφάκη και κ. Γ. Παπατζανάκη για τη βοήθεια στη συγκέντρωση των δεδομένων που ήταν απαραίτητα για την υλοποίηση της εργασίας, καθώς επίσης και τους συναδέλφους Β. Κάραλη και Α. Κανελλοπούλου για τη συνεργασία μας. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον κύριο Μιγάδη από την εταιρεία Dynacom Tankers Management Ltd. και τους κυρίους Ανδρουλακάκη και Μπεζά από την AVIN International S.A. για την πολύτιμη βοήθειά τους, δίνοντάς μου πρόσβαση σε στοιχεία των πλοίων από τις εταιρείες.

### 1.2. Στόχοι Διπλωματικής Εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι, σε αρχικό στάδιο, η στατιστική ανάλυση τεχνικών στοιχείων πλοίων μεταφοράς υγρού φορτίου με απώτερο στόχο τον εντοπισμό πιθανών σχέσεων μεταξύ διαφόρων μεταβλητών σχεδίασης και την παραγωγή προσεγγιστικών τύπων για την εκτίμηση των κύριων χαρακτηριστικών μιας νέας σχεδίασης στο στάδιο της προμελέτης. Οι εμπειρικοί τύποι που προκύπτουν από στατιστικές αναλύσεις σαν τις παραπάνω αποτελούν ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο του μελετητή/σχεδιαστή για την εκτίμηση των κύριων χαρακτηριστικών του υπό σχεδίαση πλοίου στην προκαταρκτική φάση της σχεδίασης. Παρόμοιες σχέσεις θα βρούμε σε βιβλία Μελέτης Πλοίου (βλ. Παπανικολάου 2009). Στην παρούσα διπλωματική εργασία, οι εμπειρικοί τύποι που θα χρησιμοποιηθούν με σκοπό την ανάπτυξη ενός λογισμικού προμελέτης πλοίων υγρού φορτίου που στοχεύει στον καθορισμό των κύριων χαρακτηριστικών μιας νέας σχεδίασης.

Αντίστοιχες ερευνητικές εργασίες συστηματικής ανάλυσης τεχνικών χαρακτηριστικών πλοίων έχουν διεξαχθεί στο παρελθόν για ποικίλους τύπους πλοίων, π.χ. για δεξαμενόπλοια (βλ. Lamb, 2003, Taggart, 1980), για πλοία νέας τεχνολογίας (βλ. Zaraphonitis et. al., 2002, & Zaraphonitis, 2005) κ.ο.κ. Επίσης, έχουν διερευνηθεί και στα πλαίσια πολλών διπλωματικών εργασιών που έχουν ανατεθεί στο Εργαστήριο Μελέτης Πλοίου της Σχολής Ναυπηγών Μηχ/γων Μηχανικών (ενδεικτικά αναφέρονται για δεξαμενόπλοια η αντίστοιχη του Νκοκο Nossa, 2013, για Ε/Γ-Ο/Γ πλοία Νέας Τεχνολογίας η διπλωματική εργασία του Περδίκη, 2000, αλλά και οι διπλωματικές εργασίες επί της Παλινδρομικής Ανάλυσης Στοιχείων Μελέτης Φορτηγών Πλοίων από τους Καλοκαιρινό, Ε., Μαυροειδή, Θ., Ράδου, Γ. τη χρονική περίοδο 2000-2005 και του Ζαχαρίου, Ζ., 2000 για διάφορους τύπους εμπορικών πλοίων).

Με το πέρασμα των χρόνων οι νέες σχεδιάσεις πλοίων παρουσιάζουν διαφορετικά χαρακτηριστικά στις διαστάσεις τους (λόγοι κύριων διαστάσεων) και τα βάρη τους καθώς και σε διάφορα άλλα κύρια χαρακτηριστικά επομένως δημιουργείται η ανάγκη πραγματοποίησης μιας νέας, αντίστοιχης με τις παραπάνω, στατιστικής ανάλυσης από την οποία θα προκύψουν νέα διαγράμματα και εμπειρικοί τύποι. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, η στατιστική ανάλυση και η παραγωγή αντίστοιχων προσεγγιστικών σχέσεων μεταξύ τεχνικών χαρακτηριστικών των υπό μελέτη πλοίων πραγματοποιείται στο πρόγραμμα MATLAB. Της παραπάνω διαδικασίας προηγείται η συλλογή των απαραίτητων δεδομένων για πλοία από το Εργαστήριο Μελέτης Πλοίου της ΣΝΜΜ/ΕΜΠ και από ναυτιλιακές εταιρείες (Dynacom Tankers Management Ltd., AVIN International S.A.). Λόγω των διαφόρων πηγών προέλευσης των υπό επεξεργασία δεδομένων, επιχειρείται διασταύρωση των διαθέσιμων στοιχείων με τα αντίστοιχα της βάσης δεδομένων IHS Fairplay (βλ. Παράρτημα Α).

### 1.3. Δεξαμενόπλοια

#### 1.3.1. Κατηγορίες

Ο τύπος πλοίου που θα μελετηθεί στην παρούσα εργασία είναι τα δεξαμενόπλοια (Tankers). Τα δεξαμενόπλοια σχεδιάζονται για τη μεταφορά υγρού φορτίου χύδην. Ανάλογα με το είδος του μεταφερόμενου φορτίου διακρίνονται σε:

- ✓ Crude Oil Tankers: προορίζονται για τη μεταφορά αργού πετρελαίου.
- ✓ Oil Products Tankers: προορίζονται για τη μεταφορά διαφόρων προϊόντων υδρογονανθράκων (εκτός του αργού πετρελαίου).
- ✓ Chemical Tankers: προορίζονται για τη μεταφορά χημικών.

Ένα δεξαμενόπλοιο μπορεί να μην προορίζεται αποκλειστικά για τη μεταφορά ενός είδους φορτίου αλλά και παραπάνω. Επίσης, ανάλογα με το μέγεθος τους τα δεξαμενόπλοια διακρίνονται σε:

Πίνακας 1 Κατηγοριοποίηση δεξαμενοπλοίων ανάλογα με το μέγεθος

Ship Type	DWT
SMALL OIL TANKERS	Έως 19999
HANDYSIZE	20000 – 34999
HANDYMAX	35000 – 59999
PANAMAX	60000 – 79999
AFRAMAX	80000 – 119999
SUEZMAX	120000 – 199999
VLCC (Very Large Crude Carrier)	200000 – 319999
ULCC (Ultra Large Crude Carrier)	320000 και άνω

#### 1.3.2. Διάταξη και Υπόβαθρο Κανονισμών

Στο πλαίσιο των κανονισμών, ο πιο σημαντικός κανονισμός που διέπει τη σχεδίαση δεξαμενόπλοιοι είναι της MARPOL 73/78. Η σύμβαση αυτή του IMO περιλαμβάνει κανονισμούς για τη μείωση της θαλάσσιας ρύπανσης απ' τα πλοία, είτε λόγω απορρίψεων κατά τη λειτουργία τους επιβαρυντικών για το περιβάλλον ουσιών είτε λόγω ανεπιθύμητων εκροών (π.χ. πετρελαίου) σε περίπτωση ατυχήματος. Προκειμένου να επιτευχθούν τα παραπάνω ο κανονισμός της MARPOL θέτει κάποιους περιορισμούς στη σχεδίαση των δεξαμενόπλοιοι στους οποίους περιλαμβάνονται το ύψος διπυθμένου  $h_{DB}$  (Double Bottom) και η απόσταση του διπλού τοιχώματος  $w_{DH}$  (Double Hull) τα οποία ορίζονται όπως παρακάτω.

- ✓ Ύψος διπυθμένου ( $h_{DB}$ ): ανάλογα με το DWT του πλοίου δεν μπορεί να είναι μικρότερο από:

- DWT < 5000 t

$$h_{DB} = \frac{B}{15}, \text{ not less than } 0.76 \text{ m}$$

- DWT  $\geq$  5000 t

$$h_{DB} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{B}{15} \\ 2 \text{ m} \end{array} \right. , \text{ not less than } 1 \text{ m}$$

✓ Απόσταση διπλού τοιχώματος ( $w_{DH}$ ): η ελάχιστη απόσταση του διπλού (εσωτερικού) τοιχώματος ανάλογα με το DWT του πλοίου είναι:

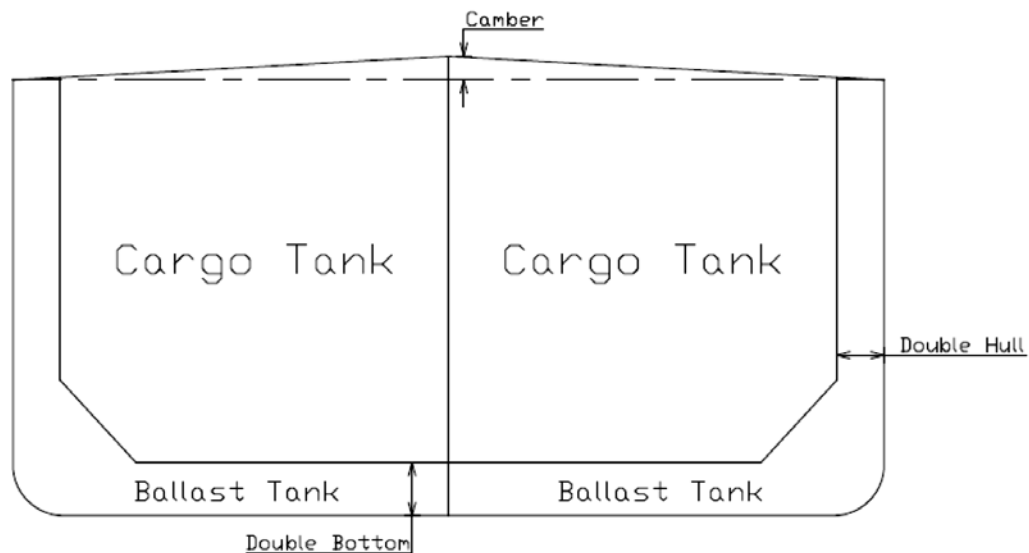
- DWT < 5000 t

$$w_{DH} = 0.4 + \frac{2.4 * DWT}{20000}, \text{ not less than } 0.76 \text{ m}$$

- DWT ≥ 5000 t

$$w_{DH} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0.5 + \frac{DWT}{20000}, \text{ not less than } 1 \text{ m} \\ 2 \text{ m} \end{array} \right.$$

Παρακάτω φαίνεται μια τυπική εγκάρσια τομή στο χώρο φορτίου ενός δεξαμενόπλοιου όπου φαίνονται πώς ορίζονται τα παραπάνω χαρακτηριστικά:



Σχήμα 1 Τυπική διάταξη εγκάρσιας τομής Tanker

Εκτός από τη MARPOL υπάρχουν και οι κανονισμοί των νηογνώμων από τους οποίους ορίζεται ότι κάθε πλοίο πρέπει να έχει κατ' ελάχιστον μία προραία φρακτή σύγκρουσης (Collision Bulkhead), μια πρυμναία φρακτή σύγκρουσης (After Peak Bulkhead) και από μια φρακτή στο πρυμναίο και προραίο όριο του μηχανοστασίου (πρυμναία και προραία φρακτή μηχανοστασίου). Στις περιπτώσεις που εξετάζουμε όπου το μηχανοστάσιο βρίσκεται πρύμνηθεν, η πρυμναία φρακτή σύγκρουσης συμπίπτει με την πρυμναία φρακτή του μηχανοστασίου. Σύμφωνα με τα παραπάνω, μια τυπική διάταξη ενός δεξαμενόπλοιου φαίνεται στο παρακάτω σκαρίφημα:



Σχήμα 2 Τυπικό σκαρίφημα Tanker

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα χρησιμοποιηθούν οι παρακάτω ορισμοί για τους χώρους που προκύπτουν από την τοποθέτηση των φρακτών σύμφωνα με τους κανονισμούς:

- ✓ Πρυμναίο τμήμα ( $L_{AFT}$ ): ορίζεται από την πρυμναία κάθετο (A.P.) έως την πρυμναία φρακτική του μηχανοστασίου που συμπίπτει με την πρυμναία φρακτική σύγκρουσης.
- ✓ Χώρος μηχανοστασίου ( $L_{ER}$ ): ορίζεται μεταξύ της πρυμναίας και πρωραίας φρακτικής του μηχανοστασίου. Περιέχεται η μηχανολογική εγκατάσταση του πλοίου συμπεριλαμβανομένης της κύριας μηχανής, γεννητριών, διαφόρων βοηθητικών μηχανημάτων κλπ.
- ✓ Χώρος φορτίου ( $L_{CARGO}$ ): ορίζεται μεταξύ της πρωραίας φρακτικής μηχανοστασίου και της πρωραίας φρακτικής σύγκρουσης (Collision Bulkhead). Στο χώρο αυτό βρίσκονται οι δεξαμενές φορτίου (Cargo Tanks) που ορίζονται από στεγανές εγκάρσιες φρακτές. Επίσης, υπάρχουν από καμία (για μικρά πλοία) έως μία ή δύο διαμήκεις φρακτές ανάλογα με το μέγεθος του πλοίου. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι στο χώρο φορτίου συμπεριλαμβάνονται και οι δεξαμενές slop.
- ✓ Πρωραίο τμήμα ( $L_{FWD}$ ): ορίζεται από την πρωραία φρακτική σύγκρουσης (Collision Bulkhead) έως την πρωραία κάθετο (F.P.). Η θέση της πρωραίας φρακτικής σύγκρουσης ορίζεται σύμφωνα με τον κανονισμό της SOLAS ως εξής:

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

Όπου  $d$  η απόσταση της πρωραίας φρακτικής σύγκρουσης από την πρωραία κάθετο (F.P.) και  $L$  το μήκος υποδιαίρεσης όπως ορίζεται από τους κανονισμούς της Διεθνούς Σύμβασης Γραμμής Φόρτωσης (International Convention on Load Lines, 1966).

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

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

#### 1.4. Βάση Δεδομένων

Η δημιουργία της βάσης δεδομένων των υπό μελέτη πλοίων έγινε με την πολύτιμη συμβολή των δεδομένων του Εργαστηρίου Μελέτης Πλοίου ΕΜΠ σε συνδυασμό με τα τεχνικά στοιχεία που συλλέχθηκαν από ναυτιλιακές εταιρείες (Dynacom Tankers Management Ltd., AVIN International S.A.).

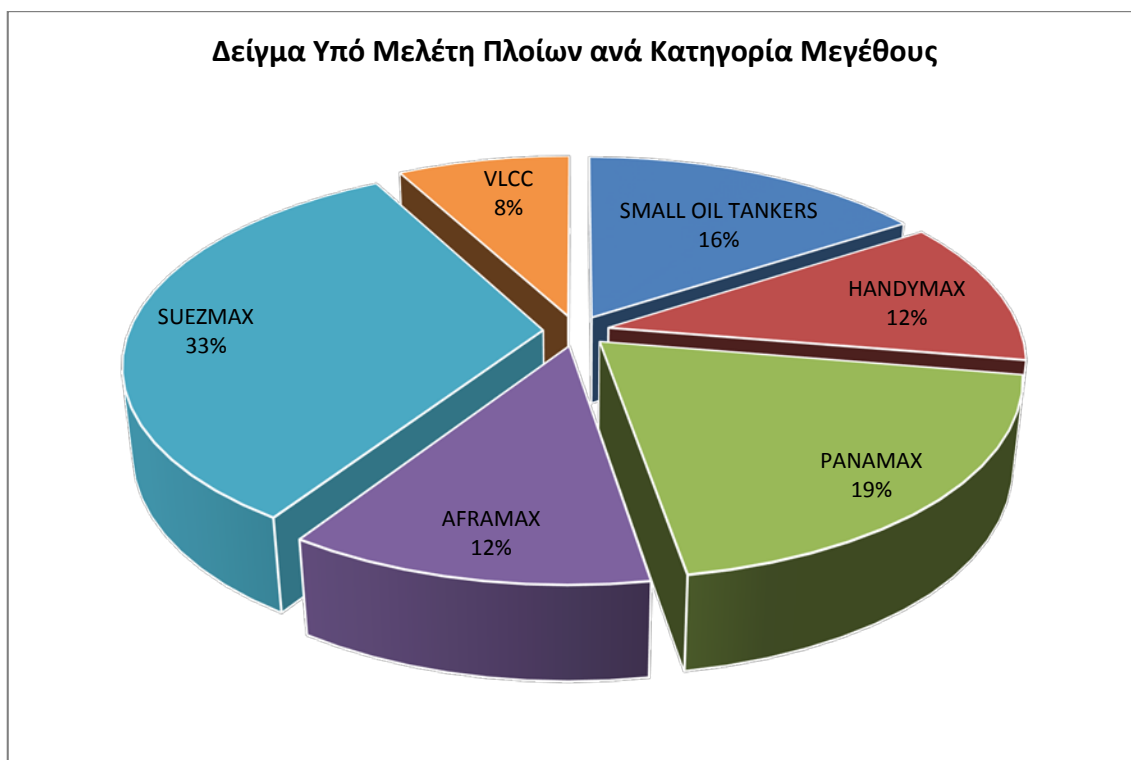
Η βάση δεδομένων που δημιουργήθηκε περιέχει τεχνικά χαρακτηριστικά που συνοψίζονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- Στοιχεία πλοίου (όνομα πλοίου, αριθμός IMO, τύπος, νηογνώμονας, σημαία κλπ.).
- Κύρια χαρακτηριστικά πλοίου (κύριες διαστάσεις, εκτόπισμα, DWT, Lightship, GT, NT κλπ.).
- Διάφορα χαρακτηριστικά σχεδίασης (Double Bottom, Double Hull, βολβός, κυρτότητα, σιμότητα, νομείς, φρακτές).
- Χωρητικότητα δεξαμενών.
- Κέντρα βαρών και υδροστατικά μεγέθη (Full Load Departure, Full Load Arrival, Ballast Arrival, Emergency Ballast Arrival).
- Διαστάσεις υπερκατασκευών.
- Στοιχεία πρόωσης (κύρια μηχανή, ισχύς, στροφές, ταχύτητα, έλικα, πηδάλιο, κλπ.).
- Βοηθητικά μηχανήματα (γεννήτριες, αντλίες, thrusters, γερανοί).

Συνολικά καταγράφηκαν τεχνικά χαρακτηριστικά για 76 πλοία μεταφοράς υγρού φορτίου εκ των οποίων 43 είναι Crude Oil Tankers, 19 Oil Products Tankers και 14 Chemical/Oil Products Tankers. Όσον αφορά το μέγεθος, υπήρχαν από μικρά πλοία (Small Oil Tankers) μέχρι VLCC (Very Large Crude Carrier) πλοία που κατανέμονται ως εξής στο δείγμα μας:

*Πίνακας 2 Δείγμα Υπό Μελέτη Πλοίων ανά Κατηγορία Μεγέθους*

<b>Ship Type</b>	<b>DWT</b>	<b>No. of ships</b>	<b>%</b>
SMALL OIL TANKERS	Έως 19999	12	16
HANDYMAX	35000 - 59999	9	12
PANAMAX	60000 - 79999	15	19
AFRAMAX	80000 - 119999	9	12
SUEZMAX	120000 - 199999	25	33
VLCC	200000 - 319999	6	8
		76	100



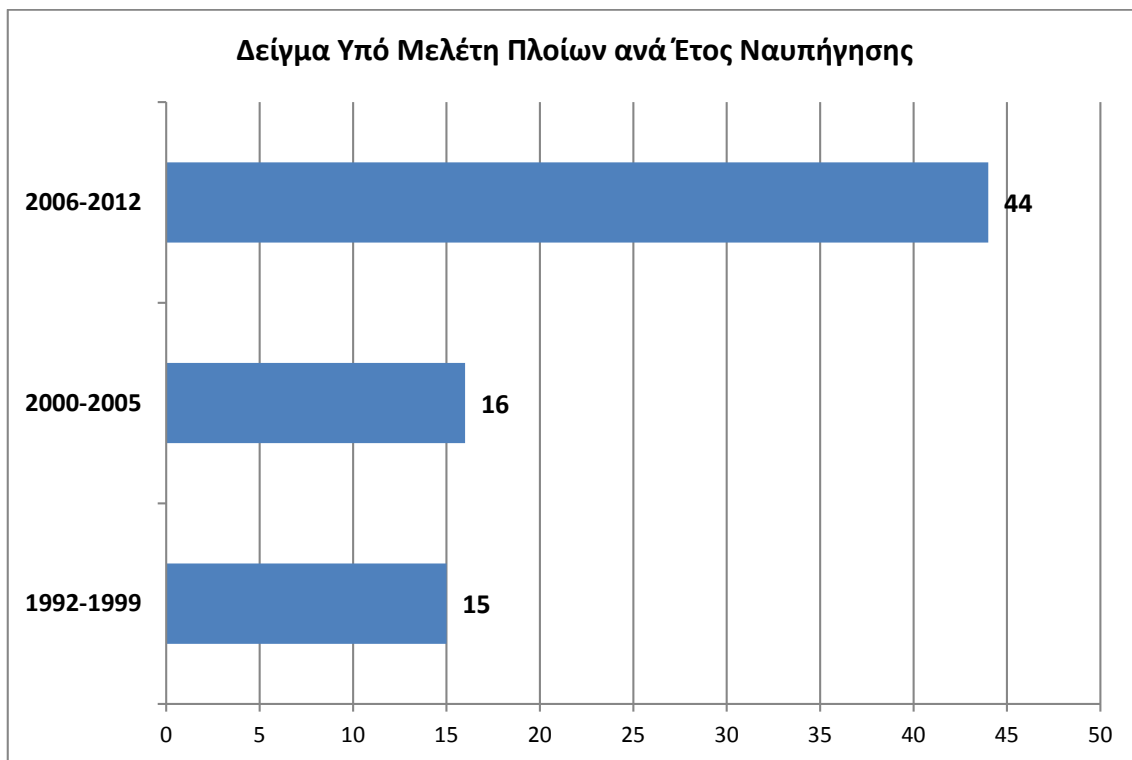
*Σχήμα 3 Δείγμα Υπό Μελέτη Πλοίων ανά Κατηγορία Μεγέθους*

Όσον αφορά το μέγεθος των πλοίων του δείγματός μας μπορούμε επιπλέον να διακρίνουμε κάποιους λόγους κύριων διαστάσεων και βαρών στα όρια των οποίων κινούνται τα πλοία του δείγματός μας. Οι λόγοι αυτοί προέκυψαν από τη στατιστική ανάλυση των δεδομένων (για διαγράμματα βλ. Κεφάλαιο 2) και φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

*Πίνακας 3 Λόγοι κύριων χαρακτηριστικών των πλοίων του δείγματος*

	<b>MIN</b>	<b>MAX</b>	<b>AVERAGE</b>
<b>LBP/B</b>	5.22	6.84	5.79
<b>LBP/D</b>	9.00	14.11	10.89
<b>B/T</b>	2.26	3.45	2.88
<b>B/D</b>	1.54	2.37	1.89
<b>D/T</b>	1.25	1.91	1.53
<b>DWT/Δ</b>	0.58	0.87	0.82
<b>LS/Δ</b>	0.13	0.42	0.18

Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα δόθηκε βαρύτητα σε νεότερες σχεδιάσεις πλοίων που αποτελούν και την πλειοψηφία του δείγματός μας.



Σχήμα 4 Δείγμα Υπό Μελέτη Πλοίων ανά Έτος Ναυπήγησης

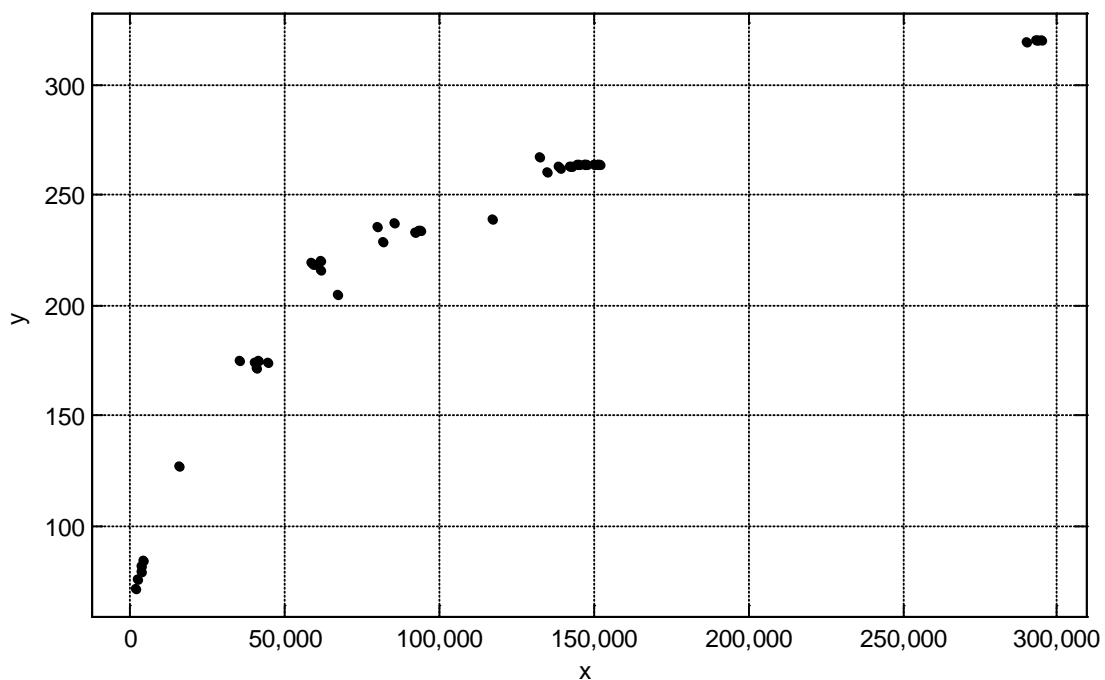


## 1.5. Στατιστική Ανάλυση

Σε πολλές επιστήμες, όπως και στη θεωρία Μελέτης Πλοίου, πολλές φορές εφαρμόζονται μαθηματικές σχέσεις που προσπαθούν να συσχετίσουν τις διάφορες μεταβλητές σχεδίασης μεταξύ τους. Οι μαθηματικές αυτές εξισώσεις προκύπτουν έπειτα από μια στατιστική ανάλυση πλήθους δεδομένων που υπάρχουν στη διάθεσή μας.

### 1.5.1. Διάγραμμα Διασποράς (Scatter Diagram)

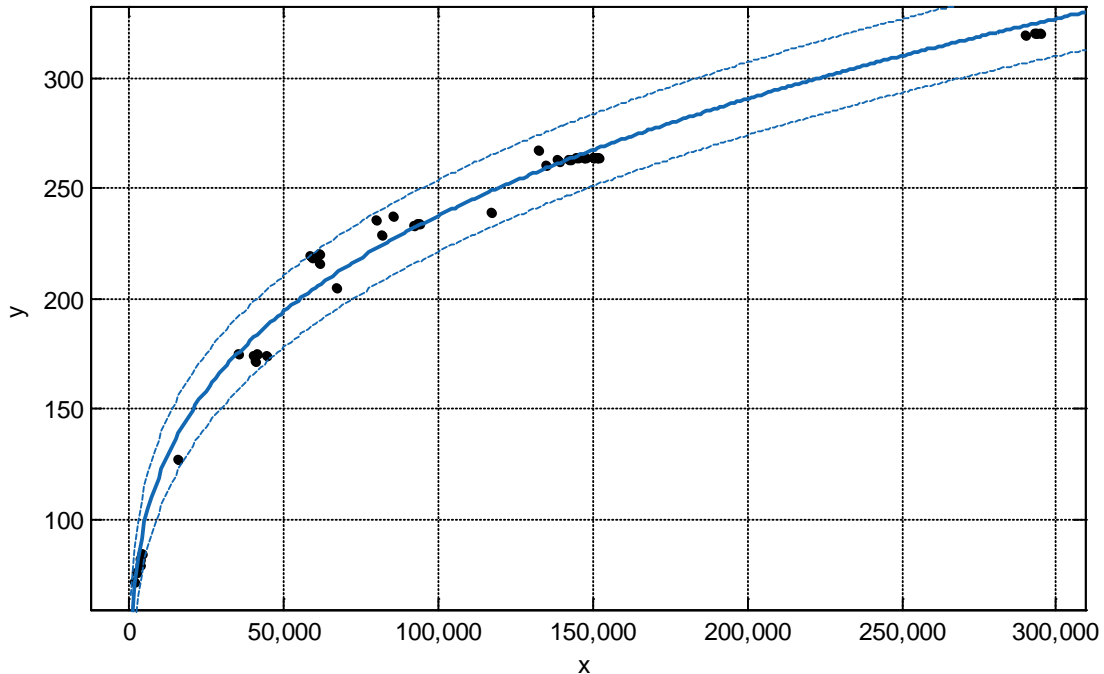
Αρχικά, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, για να προσδιορίσουμε την εξίσωση που συνδέει μεταβλητές πρέπει να συγκεντρώσουμε τις τιμές των υπό θεώρηση μεταβλητών σε μια βάση δεδομένων (π.χ. με τη βοήθεια του προγράμματος Microsoft Excel). Έπειτα, μπορούμε να κατασκευάσουμε διαγράμματα, στα οποία απεικονίζονται τα σημεία  $(x_i, y_i)$ ,  $i=1, \dots, n$  στο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων. Ένα τέτοιο διάγραμμα μόνο με διακριτά σημεία ονομάζεται διάγραμμα διασποράς (Scatter Diagram).



Σχήμα 5 Τυπικό διάγραμμα διασποράς (Scatter Diagram)

### 1.5.2. Προσεγγιστικές Καμπύλες (Approximating Curves)

Σε ένα διάγραμμα διασποράς, όπως παραπάνω, μπορούμε να σχεδιάσουμε μια καμπύλη που προσεγγίζει τα δεδομένα μας και ονομάζεται προσεγγιστική καμπύλη (Approximating Curve), όπως φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 6 Διάγραμμα διασποράς με προσεγγιστική καμπύλη

Το πρόβλημα που εστιάζει στη διαδικασία εύρεσης της εξίσωσης της προσεγγιστικής καμπύλης που προσεγγίζει τα δεδομένα ονομάζεται Curve Fitting. Για τον προσδιορισμό των προσεγγιστικών καμπυλών και των εξισώσεών τους, στο πλαίσιο της εργασίας αυτής, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό MATLAB R2014a που περιέχει το ενσωματωμένο εργαλείο Curve Fitting Tool. Το εργαλείο αυτό περιέχει κάποιες τυποποιημένες εξισώσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν (ως συνάρτηση μιας μεταβλητής), οι μαθηματικοί τύποι των οποίων είναι:

- ✓ Linear model Poly1 (Γραμμικό Μοντέλο):  $f(x) = p1*x + p2$
- ✓ Linear model Poly2 (Γραμμικό Μοντέλο):  $f(x) = p1*x^2 + p2*x + p3$
- ✓ General model Power1 (Μοντέλο Υψωμένο σε Δύναμη):  $f(x) = a*x^b$
- ✓ General model Power2 (Μοντέλο Υψωμένο σε Δύναμη):  $f(x) = a*x^b + c$
- ✓ General model Log1 (Λογαριθμικό Μοντέλο):  $f(x) = a*\ln(x)+b$
- ✓ General model Exp1 (Εκθετικό Μοντέλο):  $f(x) = a*\exp(b*x)$

Οι παραπάνω εξισώσεις είναι αυτές που χρησιμοποιήθηκαν κατά κύριο λόγο στη μελέτη μας. Ωστόσο, το MATLAB 2014a περιέχει και άλλες πιο πολύπλοκες εξισώσεις που δεν χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία και επίσης υπάρχει η δυνατότητα δημιουργίας νέων εξισώσεων (Custom Equation).

Στο παραπάνω διάγραμμα διακρίνονται και δύο επιπλέον οριακές καμπύλες με διακεκομμένες γραμμές εκατέρωθεν της προσεγγιστικής (Boundary Curves). Αντιστοιχούν στις καμπύλες πρόβλεψης (Prediction Bounds) οι οποίες ορίζουν το διάστημα μέσα στο οποίο θα προκύψει μια νέα παρατήρηση με πιθανότητα 95%.

### 1.5.3. Μέθοδος Ελαχίστων Τετραγώνων

Σε ένα διάγραμμα διασποράς βλέπουμε ότι μπορούν να σχεδιαστούν πολλές προσεγγιστικές καμπύλες που διαφέρουν μεταξύ τους ως προς την ποιότητα προσέγγισης. Έτσι, από τις διάφορες πιθανές καμπύλες που υπάρχουν πρέπει να επιλέξουμε εκείνη που μας δίνει την καλύτερη δυνατή προσέγγιση και θα είναι η βέλτιστη καμπύλη (Best – Fitting Curve). Η διαδικασία αυτή στο MATLAB 2014a γίνεται με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων (NonlinearLeastSquares) της οποίας η θεωρία περιγράφεται αναλυτικά παρακάτω.

Αρχικά, θεωρούμε το παραπάνω διάγραμμα, όπου φαίνονται τα σημεία  $(x_i, y_i)$  και η προσεγγιστική καμπύλη. Για μια δεδομένη τιμή  $x_i$  θα υπάρχει διαφορά ανάμεσα στην τιμή  $y_i$  και την τιμή που υπολογίζεται από την καμπύλη  $f(x_i)$ . Αυτή η διαφορά ονομάζεται απόκλιση ή σφάλμα ή υπόλοιπο (Deviation, Error, Residual) και περιγράφεται μαθηματικά:

$$d_i = y_i - f(x_i)$$

Βρίσκοντας την τιμή  $d_i$  για όλα τα σημεία του δείγματός μας μπορούμε να υπολογίσουμε το άθροισμα των τετραγώνων των  $d_i$ , που αναφέρεται σαν SSE (Sum of Squares due to Error):

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

Το παραπάνω μέγεθος μας δίνει μια ένδειξη της ποιότητας προσέγγισης της προσεγγιστικής καμπύλης. Η προσεγγιστική καμπύλη με το μικρότερο SSE είναι η βέλτιστη (Best – Fitting Curve) και λέγεται καμπύλη ελαχίστων τετραγώνων (Least Squares Curve).

### 1.5.4. Παλινδρόμηση (Regression)

Η καμπύλη ελαχίστων τετραγώνων, που προσεγγίζει ένα δείγμα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εκτιμήσουμε την τιμή μιας μεταβλητής  $y$  που αντιστοιχεί σε μία δεδομένη τιμή της μεταβλητής  $x$  του δείγματος και αναφέρεται σαν καμπύλη παλινδρόμησης (Regression Curve). Αυτή η στατιστική τεχνική μοντελοποίησης ονομάζεται ανάλυση παλινδρόμησης (Regression Analysis) και έχει ως σκοπό την έρευνα της συσχέτισης μεταξύ μίας εξαρτώμενης μεταβλητής και μιας ή περισσότερων ανεξάρτητων μεταβλητών.

### 1.5.5. Συσχέτιση (Correlation)

Με τον όρο συσχέτιση εννοούμε το βαθμό της σχέσης μεταξύ δύο μεταβλητών, δηλαδή το πρόβλημα που έχει σκοπό να προσδιορίσει πόσο καλά η προσεγγιστική εξίσωση περιγράφει τη σχέση ανάμεσα στις μεταβλητές. Αποτελεί βασικό μέγεθος αξιολόγησης σε όλη την ανάλυση που πραγματοποιείται σε αυτή την εργασία. Λέμε ότι οι μεταβλητές είναι τέλεια συσχετισμένες ή ότι υπάρχει τέλεια συσχέτιση μεταξύ τους, εάν όλες οι τιμές τους ικανοποιούν την εξίσωση παλινδρόμησης με ακρίβεια.

Η συσχέτιση μπορεί να αναφέρεται σε δύο μόνο μεταβλητές (απλή συσχέτιση) ή και περισσότερες (πολλαπλή συσχέτιση). Στην παρούσα εργασία αναφερόμαστε μόνο σε απλές συσχετίσεις.

#### ✓ 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 σαν 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:

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

Όπου  $SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2$  όπως αναφέρθηκε παραπάνω.

Ο συντελεστής προσδιορισμού (Determination Coefficient) δείχνει το ποσοστό της διακύμανσης που εξηγείται από την καμπύλη παλινδρόμησης. Συμβολίζεται με  $R^2$  (R-square) και ορίζεται:

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

Η τιμή του  $R^2$  μεταβάλλεται μεταξύ 0 και 1. Όσο πιο κοντά στη μονάδα βρίσκεται το  $R^2$  τόσο μεγαλύτερη γραμμική συσχέτιση υπάρχει μεταξύ των υπό εξέταση μεταβλητών  $x$  και  $y$  άρα και η προσέγγιση είναι καλύτερη.

Από τον παραπάνω συντελεστή προκύπτει ο συντελεστής συσχέτισης  $R$  (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. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ TANKERS

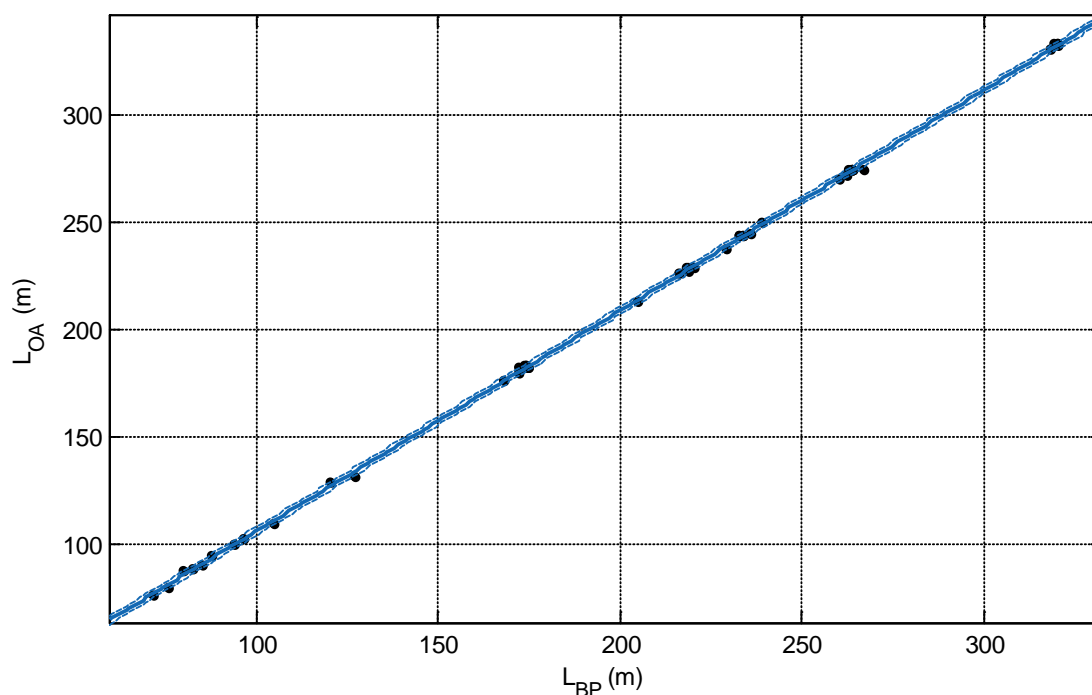
Έχοντας στη διάθεσή μας πλέον τη βάση δεδομένων που δημιουργήσαμε, μπορούμε, με τη χρήση του λογισμικού MATLAB R2014a και του Curve Fitting Tool, να κάνουμε τη στατιστική ανάλυση των δεδομένων μας. Για την παραγωγή των διαγραμμάτων επιλέξαμε μεγέθη που είναι πιθανό να έχουν κάποια αλληλεξάρτηση και όχι μεγέθη που δεν έχουν κάποια φυσική σχέση μεταξύ τους. Τα κυριότερα διαγράμματα παρουσιάζονται παρακάτω, ωστόσο περισσότερα διαγράμματα υπάρχουν στο Παράρτημα Β. Επίσης, διαγράμματα που δεν μας έδωσαν κάποια σημαντική πληροφορία δεν παρουσιάζονται στην έκθεση.

Παρακάτω ακολουθεί η επεξήγηση των συμβολισμών που χρησιμοποιήθηκαν για τα μεγέθη που φαίνονται στο κάθε διάγραμμα:

$L_{OA}$ :	ολικό μήκος (m).
$L_{BP}$ :	μήκος μεταξύ καθέτων (m).
$B$ :	πλάτος (m).
$D$ :	κοίλο (m).
$T$ :	βύθισμα σχεδίασης (m).
$T_{SCANT}$ :	βύθισμα αντοχής (m).
$DWT$ :	πρόσθετο (νεκρό) βάρος στο βύθισμα σχεδίασης (t).
$DWT_{SCANT}$ :	πρόσθετο (νεκρό) βάρος στο βύθισμα αντοχής (t).
$\Delta$ :	εκτόπισμα στο βύθισμα σχεδίασης (t).
$\Delta_{SCANT}$ :	εκτόπισμα στο βύθισμα αντοχής (t).
$LS$ :	βάρος άφορτου σκάφους (t).
$GT$ :	ολική χωρητικότητα (Gross Tonnage).
$NT$ :	καθαρή χωρητικότητα (Net Tonnage).
$V_{CARGO}$ :	χωρητικότητα δεξαμενών φορτίου (m <sup>3</sup> ). Περιλαμβάνονται οι δεξαμενές slop.
$V_{BALLAST}$ :	χωρητικότητα δεξαμενών έρματος (m <sup>3</sup> ).
$V_{FUEL}$ :	χωρητικότητα δεξαμενών καυσίμου (m <sup>3</sup> ).
$V_{DIESEL}$ :	χωρητικότητα δεξαμενών Diesel (m <sup>3</sup> ).
$P$ :	μέγιστη συνεχής ισχύς MCR (Maximum Continuous Rating) σε kW. Στις περιπτώσεις όπου η ισχύς θα αναφέρεται σε PS θα αναγράφεται στο κείμενο (π.χ. συντελεστής ναυαρχείου).
Range:	ακτίνα ενέργειας σε ναυτικά μίλια (sm).
$V_S$ :	ταχύτητα υπηρεσίας (kn).
$L_{AFT}$ :	μήκος πρυμναίου τμήματος (m) όπως ορίζεται στο Κεφάλαιο 1.
$L_{ER}$ :	μήκος χώρου μηχανοστασίου (m) όπως ορίζεται στο Κεφάλαιο 1.
$L_{CARGO}$ :	μήκος χώρου φορτίου (m) όπως ορίζεται στο Κεφάλαιο 1.
$C_B$ :	συντελεστής γάστρας στο βύθισμα σχεδίασης.
$C_P$ :	πρισματικός συντελεστής στο βύθισμα σχεδίασης.
$C_M$ :	συντελεστής μέσης τομής στο βύθισμα σχεδίασης.
$C_{WL}$ :	συντελεστής ισάλου επιφάνειας στο βύθισμα σχεδίασης.
$h_{DB}$ :	ύψους διπυθμένου (m).
$w_{DH}$ :	απόσταση διπλού τοιχώματος (m).
$FB_{SCANT}$ :	ύψος εξάλων στο βύθισμα αντοχής (m).
$D_{PROP}$ :	διάμετρος έλικας (m).
$A_{RUDDER}$ :	επιφάνεια πηδαλίου (m <sup>2</sup> ).

## 2.1. Κύριες Διαστάσεις

### 2.1.1. Ολικό μήκος ( $L_{OA}$ )



Σχήμα 7  $L_{OA}$  συναρτήσεϊ του  $L_{BP}$

#### Αποτελέσματα προσέγγισης

Linear model Poly1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 1.027$$

$$p2 = 3.365$$

Goodness of fit:

SSE: 64.74

R-square: 0.9998

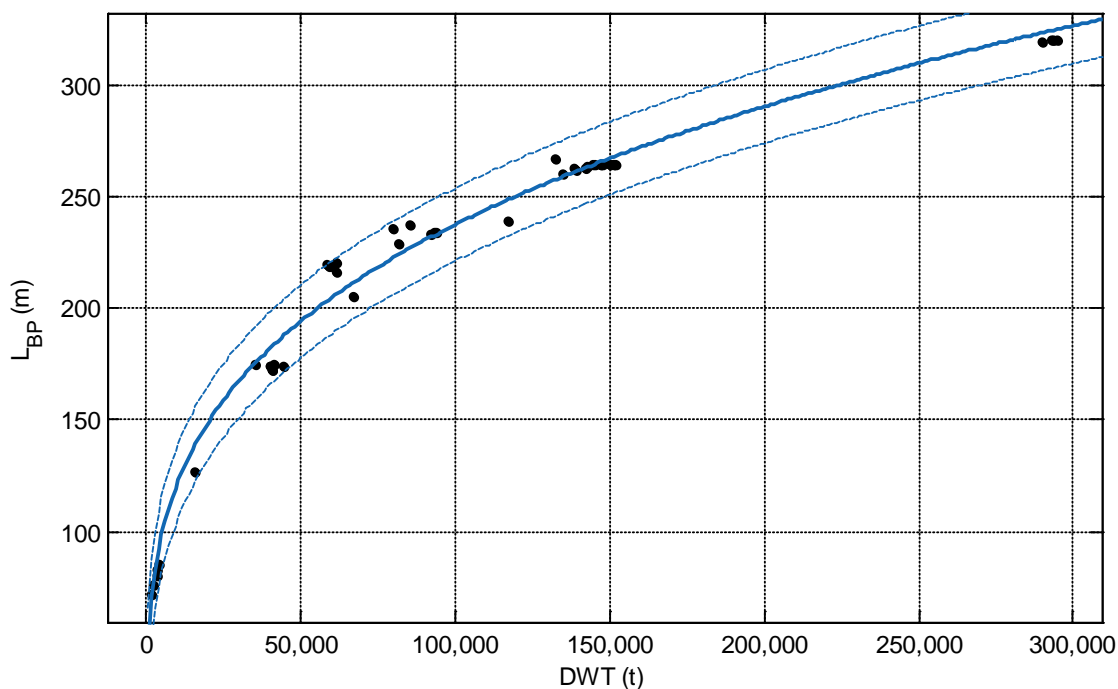
Adjusted R-square: 0.9998

RMSE: 0.9417

$$L_{OA} = 1.027 * L_{BP} + 3.365$$

#### Παρατηρήσεις

Η προσεγγιστική ευθεία που προκύπτει είναι πολύ καλής ποιότητας γεγονός που φαίνεται και από τις οριακές ευθείες που σχεδόν ταυτίζονται με την προσεγγιστική ευθεία. Επομένως η εκτίμηση του  $L_{OA}$  μέσω του  $L_{BP}$  μπορεί να γίνει με πολύ μεγάλη ακρίβεια και ασφάλεια.

2.1.2. Μήκος μεταξύ καθέτων ( $L_{BP}$ )Σχήμα 8  $L_{BP}$  συναρτήσει του DWTΑποτελέσματα προσέγγισης

General model Power1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 8.458$$

$$b = 0.2897$$

Goodness of fit:

SSE: 3270

R-square: 0.9838

Adjusted R-square: 0.9835

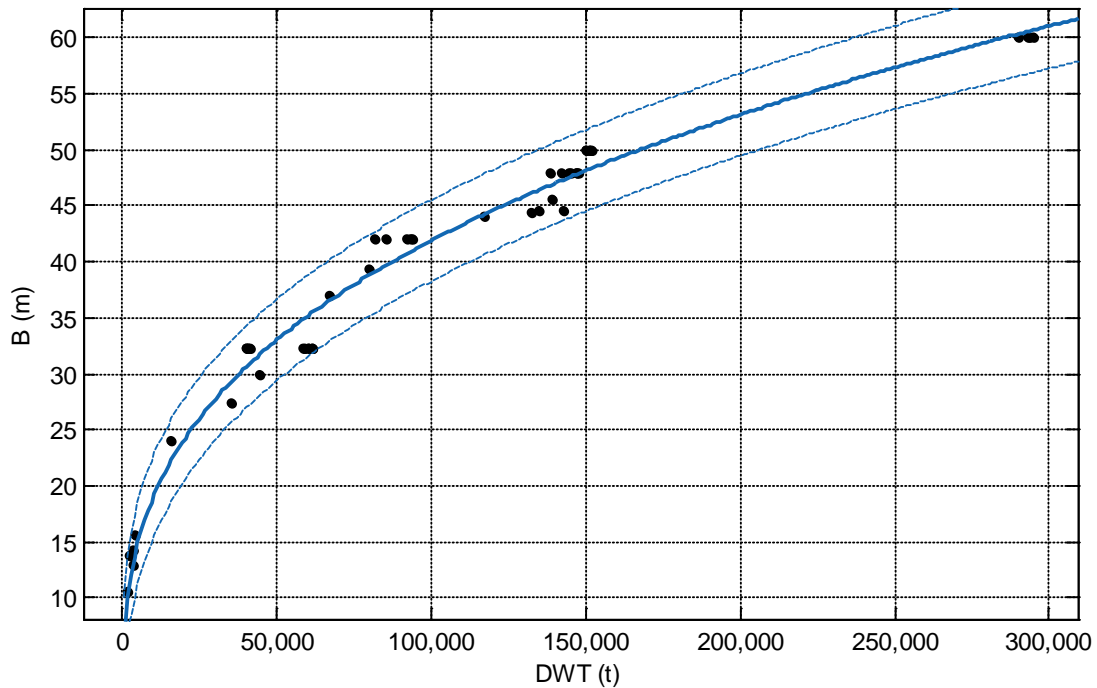
RMSE: 8.007

$$L_{BP} = 8.458 \cdot DWT^{0.2897}$$

Παρατηρήσεις

Η συσχέτιση μεταξύ  $L_{BP}$  και DWT είναι πολύ καλή γεγονός που αποδεικνύει ότι το DWT εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το  $L_{BP}$ . Φαίνεται ότι για τα πλοία με μήκος περί τα 218-220 m (Panamax) τα σημεία βρίσκονται κοντά στην άνω οριακή καμπύλη. Ωστόσο, δεν εμφανίζονται σημεία εκτός των ορίων. Το μήκος είναι πολύ καθοριστικό μέγεθος των χώρων του πλοίου ωστόσο συμβάλλουν και το πλάτος και το κοίλο.

### 2.1.3. Πλάτος (B)



Σχήμα 9 B συναρτήσει του DWT

#### Αποτελέσματα προσέγγισης

General model Power1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.8133$$

$$b = 0.3424$$

Goodness of fit:

SSE: 162.2

R-square: 0.9792

Adjusted R-square: 0.9788

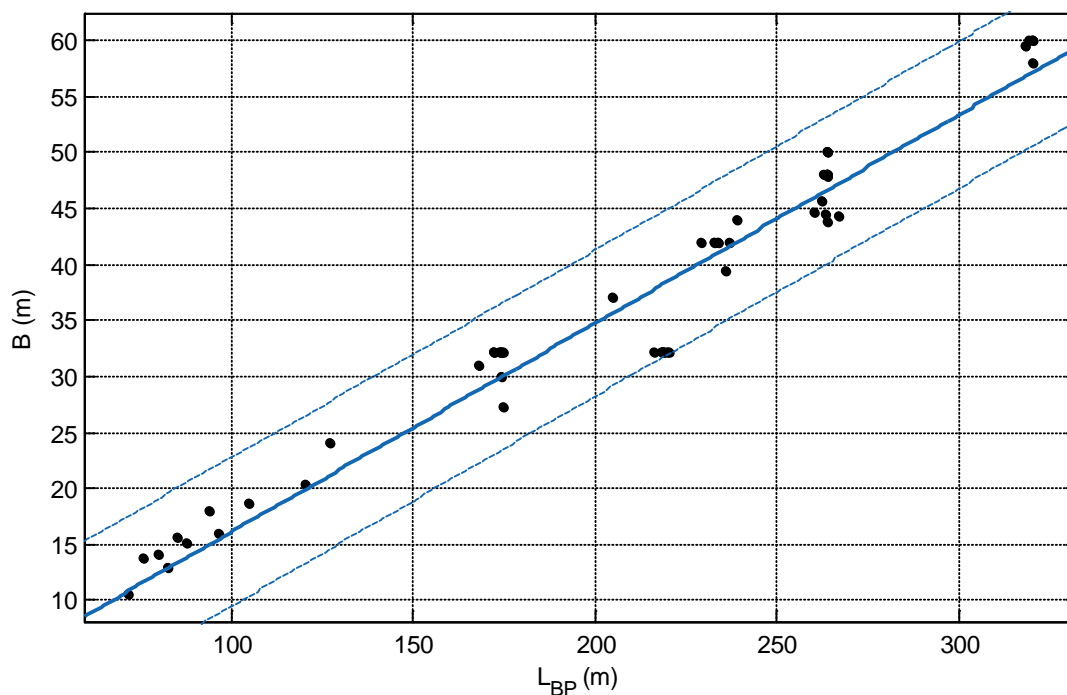
RMSE: 1.784

$$B = 0.8133 \cdot DWT^{0.3424}$$

#### Παρατηρήσεις

Όπως και με το μήκος, το DWT σχετίζεται άμεσα και με το πλάτος του πλοίου. Η ποιότητα της εκτίμησης είναι πολύ καλή. Το πλάτος συνδέεται άμεσα με την ευστάθεια του πλοίου και εξαρτάται από την περατότητα της διαδρομής (π.χ. κανάλια). Στα πλοία με πλάτος περίπου 32.2 m (Panamax), 42 m (Aframax) και 48 m (Suezmax) βλέπουμε ότι για διαφορετικό DWT το πλάτος παραμένει σταθερό γεγονός που οφείλεται στον περιορισμό του από τη διαδρομή.





Σχήμα 10 Β συναρτήσει του  $L_{BP}$

#### Αποτελέσματα προσέγγισης

Linear model Poly1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.1864$$

$$p2 = -2.535$$

Goodness of fit:

SSE: 779.2

R-square: 0.9358

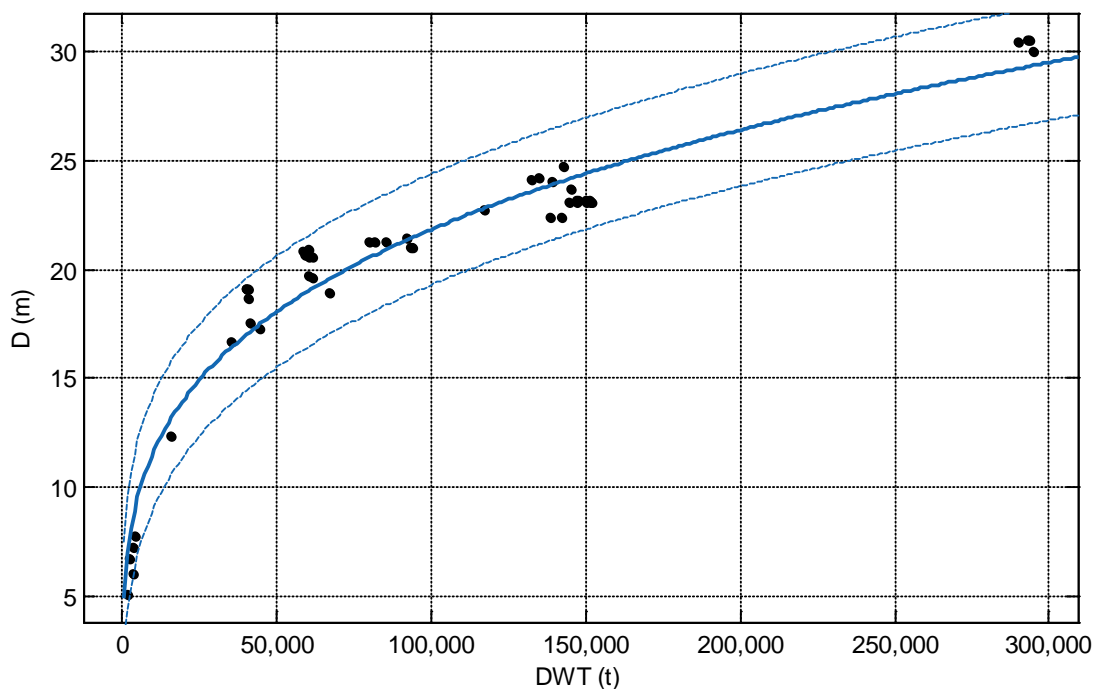
Adjusted R-square: 0.935

RMSE: 3.245

$$B = 0.1864 * L_{BP} - 2.535$$

#### Παρατηρήσεις

Η εκτίμηση του πλάτους από το μήκος μας δίνει μια εικόνα για τη σχέση μήκους και πλάτους. Ο λόγος  $L_{BP}/B$  επιδρά στη μελέτη της αντοχής του πλοίου. Η παραδοχή της καμπτόμενης δοκού είναι ανεκτή για πλοία με υψηλό λόγο  $L_{BP}/B$  και  $L_{BP}/D$ . Κι εδώ για τα πλοία με μέγιστο πλάτος 32.2 m (Panamax) εμφανίζεται μια περιοχική διασποράς σημείων κοντά στην κάτω οριακή ευθεία.

2.1.4. Κοίλο (D)

Σχήμα 11 D συναρτήσει του DWT

Αποτελέσματα προσέγγισης

General model Power1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.9393$$

$$b = 0.2733$$

Goodness of fit:

SSE: 80.5

R-square: 0.9513

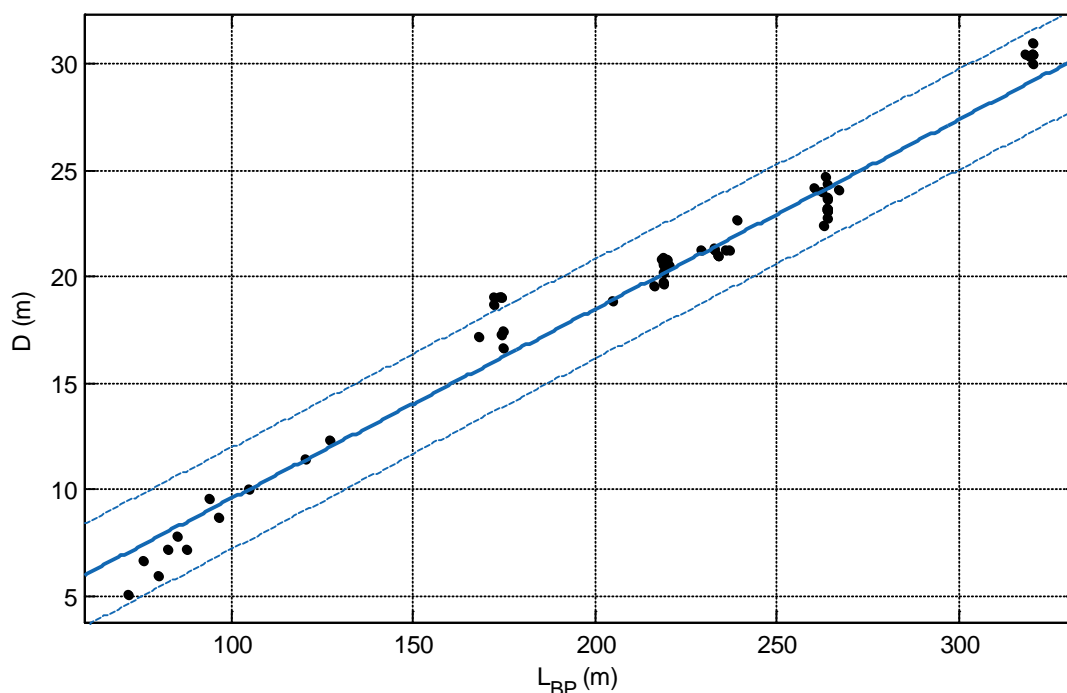
Adjusted R-square: 0.9503

RMSE: 1.256

$$D = 0.9393 \cdot DWT^{0.2733}$$

Παρατηρήσεις

Κι εδώ η προσέγγιση του κοίλου από το DWT είναι αρκετά ακριβής ωστόσο φαίνεται ότι το διάστημα που ορίζουν οι καμπύλες πρόβλεψης είναι μεγαλύτερο από τα αντίστοιχα διαγράμματα  $L_{BP}$ -DWT και B-DWT. Η διάσταση του κοίλου καθορίζει το κατάστρωμα εξάλων και έχει άμεση σχέση με το επιτρεπόμενο ύψος εξάλων που ορίζεται μέσω της Διεθνούς Σύμβασης για τη Γραμμή Φόρτωσης (ILLC, 1966). Επίσης, το κοίλο επιδρά στο διαθέσιμο όγκο κυτών και επομένως και στο DWT.



Σχήμα 12 D συναρτήσει του  $L_{BP}$

#### Αποτελέσματα προσέγγισης

Linear model Poly1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.08913$$

$$p2 = 0.6781$$

Goodness of fit:

SSE: 100.3

R-square: 0.9628

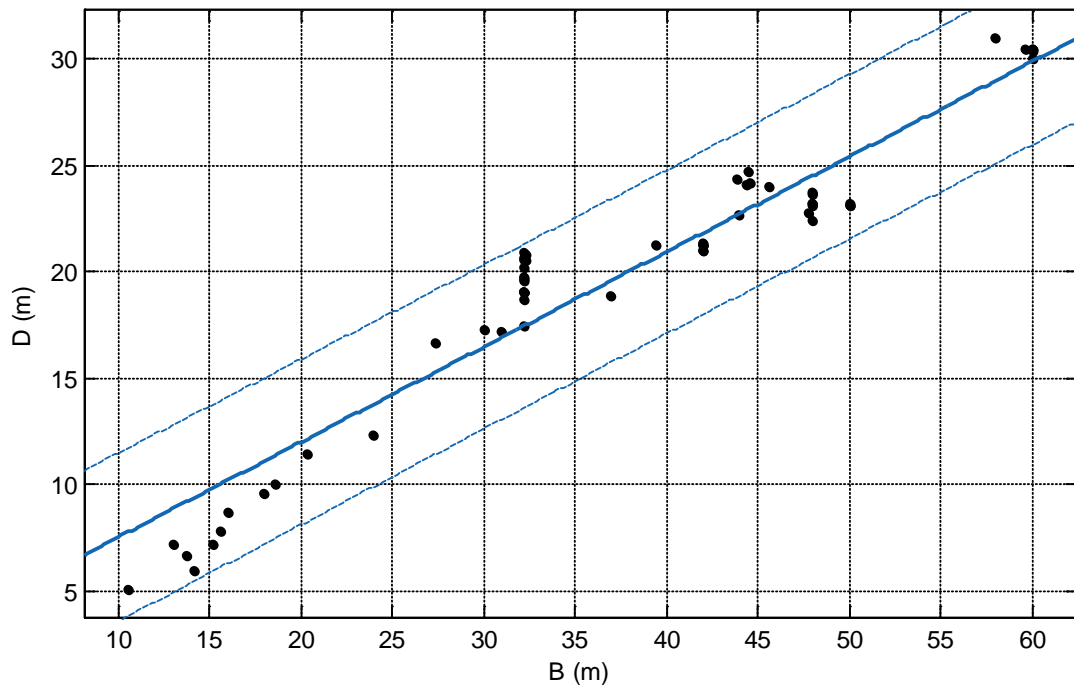
Adjusted R-square: 0.9623

RMSE: 1.164

$$D = 0.08913 * L_{BP} + 0.6781$$

#### Παρατηρήσεις

Η παραπάνω καμπύλη δίνει μια εκτίμηση για τη σχέση κοίλου και μήκους. Όπως έχει προαναφερθεί ο λόγος  $L_{BP}/D$  σε συνδυασμό με τον  $L_{BP}/B$  παίζει σημαντικό ρόλο στη διαμήκη αντοχή του πλοίου και στην θεώρηση της καμπτόμενης δοκού που ισχύει για υψηλές τιμές των λόγων. Οι νηογνώμονες ορίζουν το ανώτατο όριο του λόγου  $L_{BP}/D$  στην τιμή 14-16 (ανάλογα με το Νηογνώμονα). Σε περίπτωση που δεν τηρείται αυτό, απαιτείται ιδιαίτερη εξέταση της διαμήκους αντοχής με έγκριση του Νηογνώμονα. Επί του διαγράμματος φαίνεται ότι εμφανίζονται κάποια σημεία εκτός των οριακών γραμμών για πλοία με μήκος 174 m και κοίλο 19 m.



Σχήμα 13 D συναρτήσει του B

#### Αποτελέσματα προσέγγισης

Linear model Poly1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.447$$

$$p2 = 3.073$$

Goodness of fit:

SSE: 271.3

R-square: 0.8995

Adjusted R-square: 0.8981

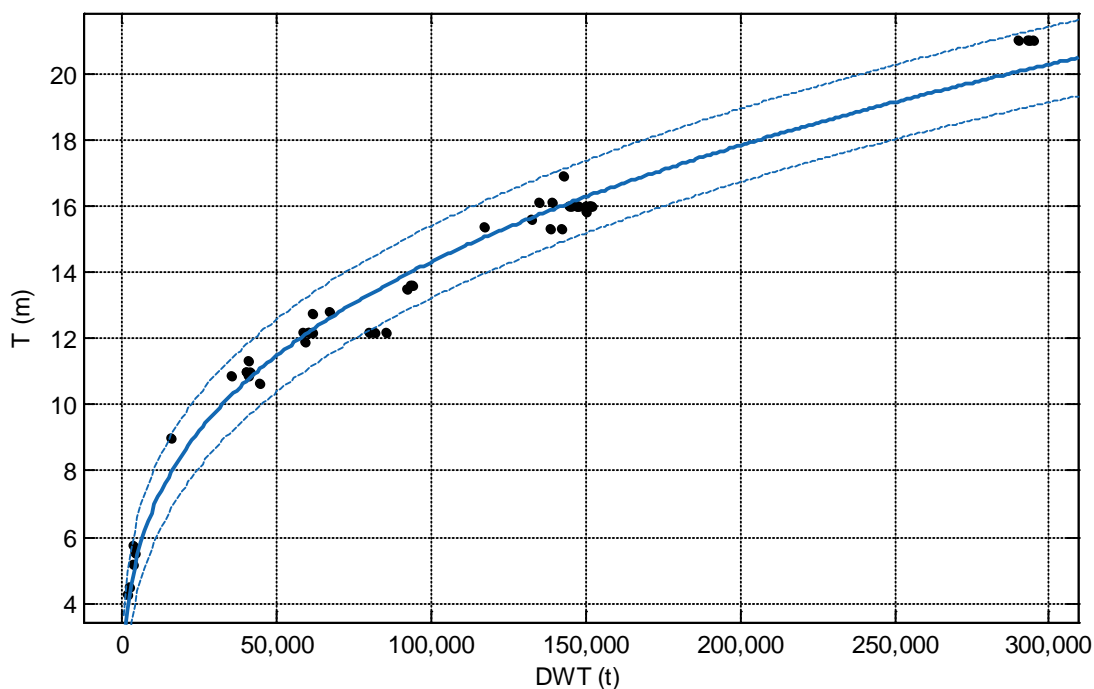
RMSE: 1.915

$$D = 0.447 * B + 3.073$$

#### Παρατηρήσεις

Το παραπάνω διάγραμμα δίνει μια εικόνα της αναλογίας πλάτους και κοίλου. Η προσέγγιση είναι ικανοποιητική εκτός από τις περιοχές με πλάτος 32.2 m (Panamax) και 48 m (Suezmax) όπου φαίνεται ότι το κοίλο διαφοροποιείται για σταθερό πλάτος. Επίσης φαίνεται ότι σε μικρά πλοία με πλάτος έως και 25 m γίνεται μια συστηματική υπερεκτίμηση του κοίλου (όλα τα σημεία βρίσκονται κάτω από την προσεγγιστική ευθεία).

## 2.1.5. Βύθισμα (T)



Σχήμα 14 T συναρτήσει του DWT

Αποτελέσματα προσέγγισης

General model Power1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.3735$$

$$b = 0.3167$$

Goodness of fit:

SSE: 14.81

R-square: 0.9814

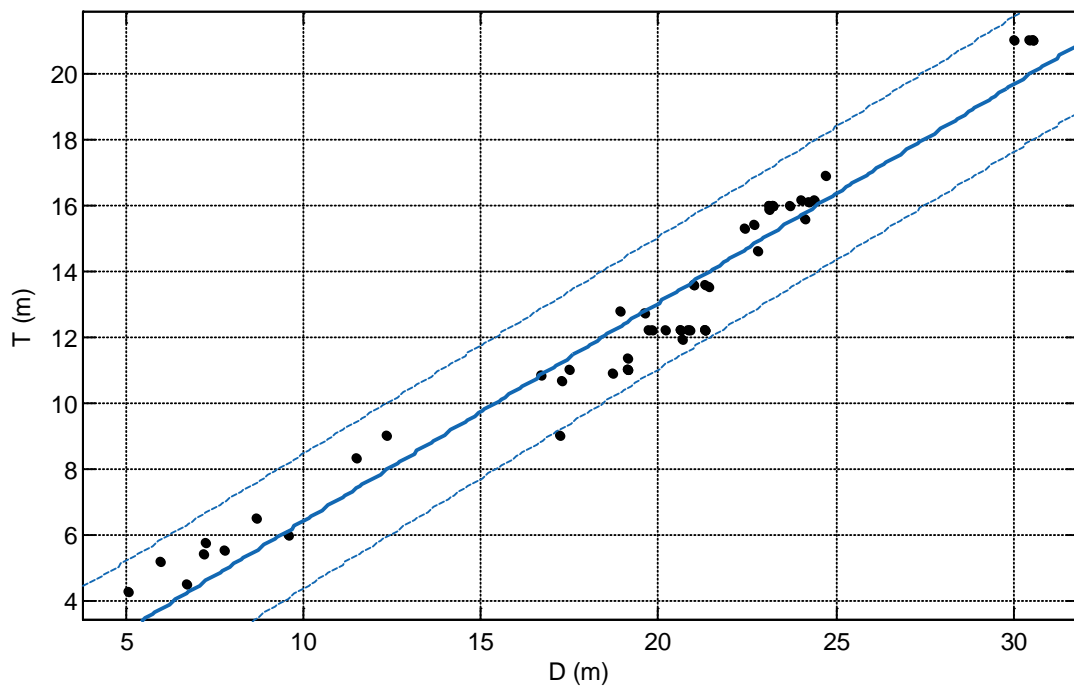
Adjusted R-square: 0.981

RMSE: 0.5389

$$T = 0.3735 * DWT^{0.3167}$$

Παρατηρήσεις

Το βύθισμα μπορεί να εκτιμηθεί με μεγάλη ακρίβεια από το DWT. Όπως και το πλάτος έτσι και το βύθισμα μπορεί να περιοριστεί από την περατότητα της διαδρομής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα στο διάγραμμα να εμφανίζονται σημεία εκτός των οριακών γραμμών για πλοία με βύθισμα στα 12.2 m και DWT 80000-85000 t (Aframax).



Σχήμα 15 T συναρτήσει του D

#### Αποτελέσματα προσέγγισης

Linear model Poly1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.6635$$

$$p2 = -0.2361$$

Goodness of fit:

SSE: 70.92

R-square: 0.9386

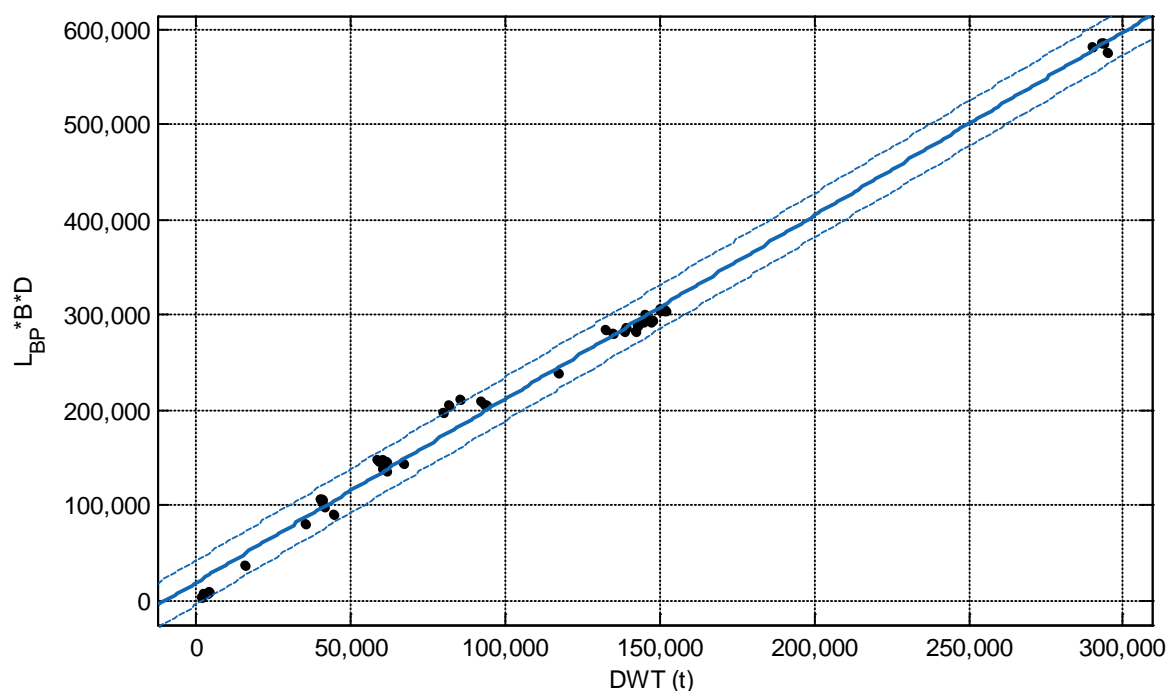
Adjusted R-square: 0.9378

RMSE: 0.9994

$$T = 0.6635 * D - 0.2361$$

#### Παρατηρήσεις

Το βύθισμα συνδέεται άμεσα με το κοίλο και το απαιτούμενο ύψος εξάλων όπως ορίζεται από τη Διεθνή Σύμβαση για τη Γραμμή Φόρτωσης (ILLC, 1966). Για Aframax πλοία με βύθισμα 12.2 m βλέπουμε ότι το κοίλο διαφοροποιείται. Ωστόσο, η καμπύλη μας δίνει μια ικανοποιητική εκτίμηση του βυθίσματος συναρτήσει του κοίλου.



Σχήμα 16  $L_{BP}$ ,  $B$ ,  $D$  συναρτήσει του  $DWT$

#### Αποτελέσματα προσέγγισης

Linear model Poly1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 1.927$$

$$p2 = 1.937e+04$$

Goodness of fit:

SSE: 6.544e+09

R-square: 0.9938

Adjusted R-square: 0.9937

RMSE: 1.133e+04

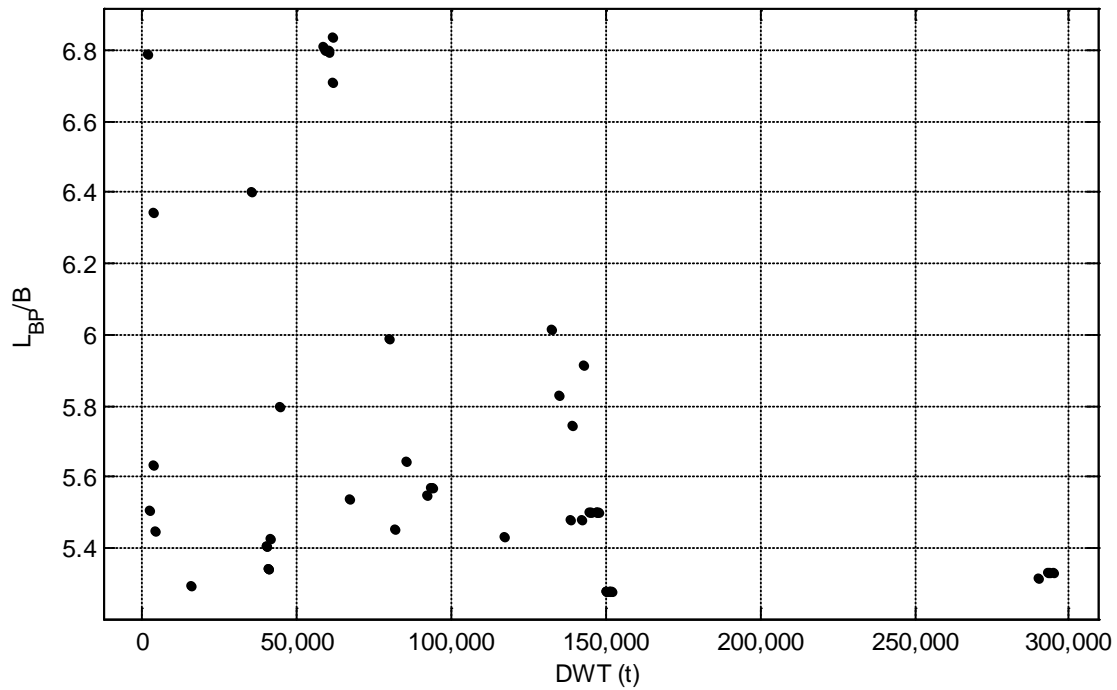
$$L_{BP} * B * D = 1.927 * DWT + 19370$$

#### Παρατηρήσεις

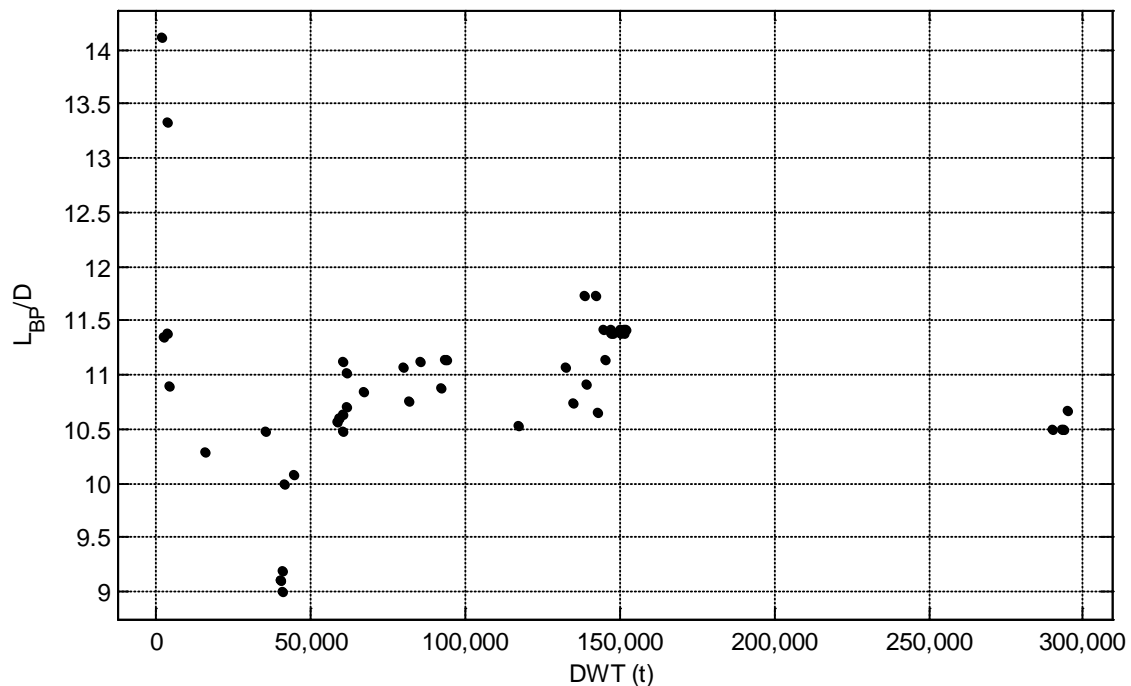
Το γινόμενο των  $L_{BP}$ ,  $B$ ,  $D$  αποτελεί μια ένδειξη μεγέθους του όγκου και των χώρων του πλοίου επομένως και του  $DWT$ . Η συσχέτιση μεταξύ του  $DWT$  και του γινομένου  $L_{BP}$ ,  $B$ ,  $D$  είναι πολύ καλύτερη από αυτή που προκύπτει από τα παραπάνω διαγράμματα όπου συσχετίζεται το  $DWT$  με κάθε μία από τις κύριες διαστάσεις.

### 2.1.6. Λόγοι κύριων διαστάσεων

Όπως έχει αναφερθεί στο Κεφάλαιο 1 τα πλοία του δείγματός μας περιορίζονται σε κάποια όρια που ορίζουν οι λόγοι των κυρίων διαστάσεών τους. Παρακάτω φαίνονται συνοπτικά που κυμαίνονται οι λόγοι των κυρίων διαστάσεων για τα υπό μελέτη πλοία.

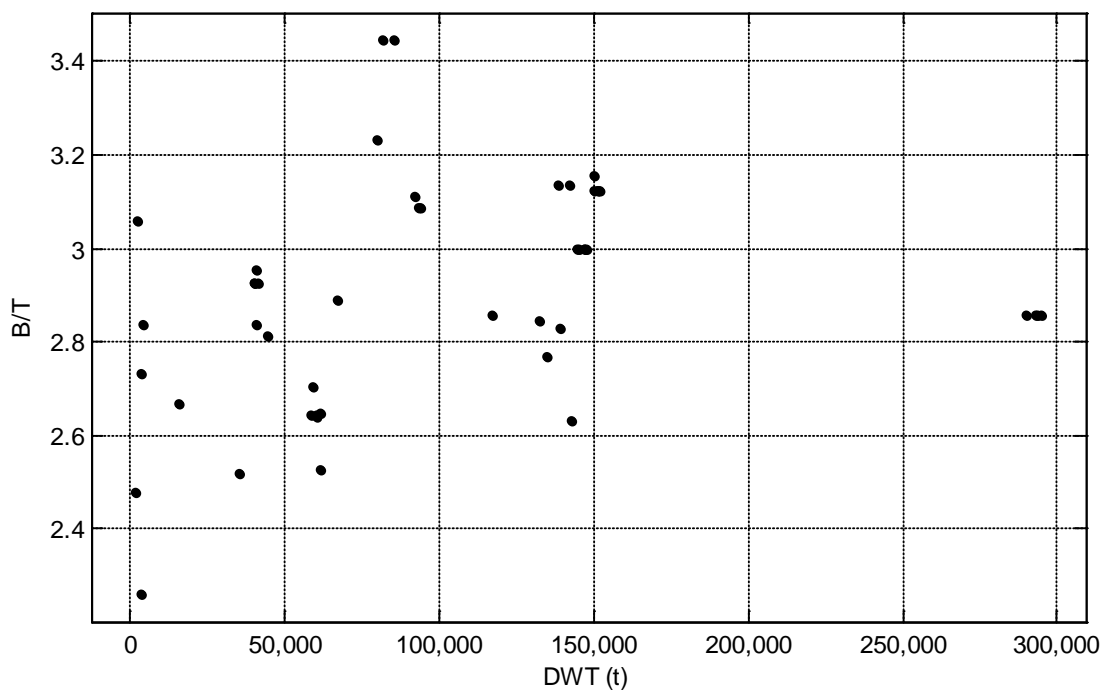


Σχήμα 17  $L_{BP}/B$  συναρτήσει του DWT

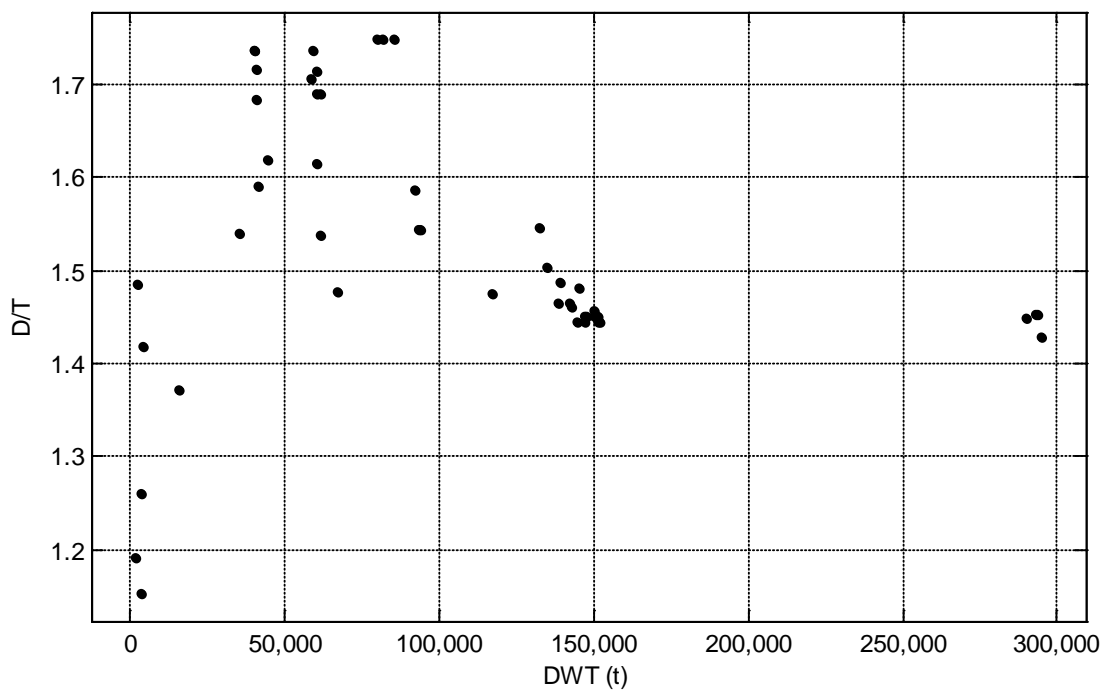


Σχήμα 18  $L_{BP}/D$  συναρτήσει του DWT

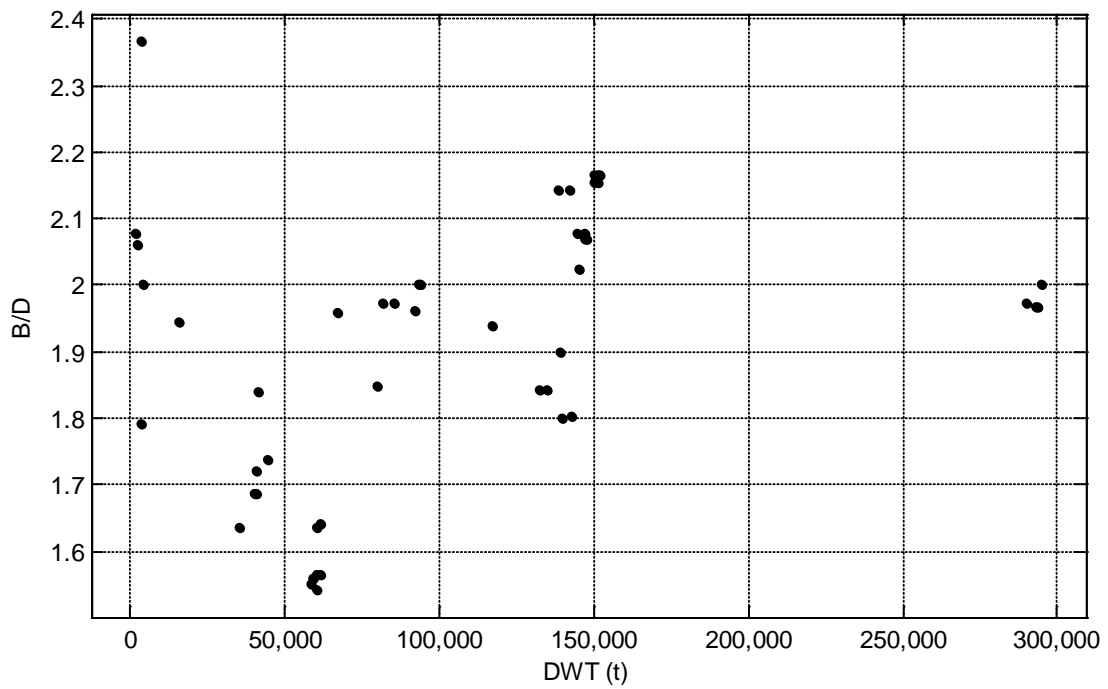




Σχήμα 19 B/T συναρτήσεσι του DWT



Σχήμα 20 D/T συναρτήσεσι του DWT

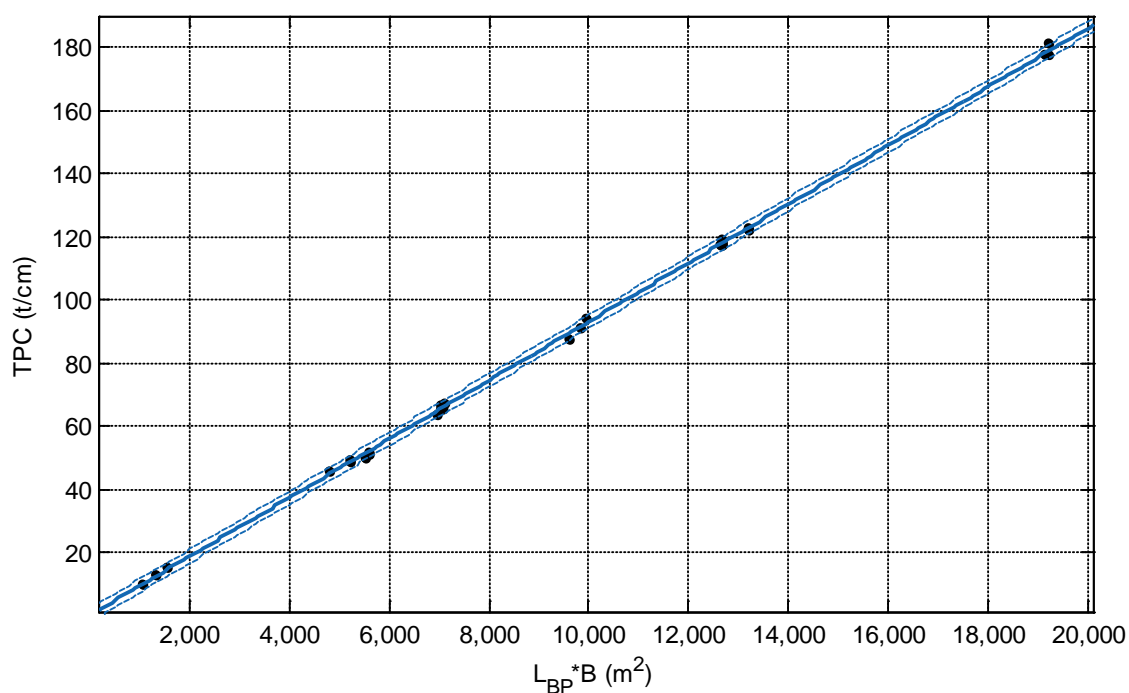


Σχήμα 21 B/D συναρτήσει του DWT

Από τα παραπάνω διαγράμματα ορίζονται γενικά τα όρια των λόγων των κυρίων διαστάσεων:

Πίνακας 4 Λόγοι κυρίων διαστάσεων

	MIN	MAX	AVERAGE
<b>LBP/B</b>	5.22	6.84	5.79
<b>LBP/D</b>	9.00	14.11	10.89
<b>B/T</b>	2.26	3.45	2.88
<b>B/D</b>	1.54	2.37	1.89
<b>D/T</b>	1.25	1.91	1.53



Σχήμα 22 TPC συναρτήσει των  $L_{BP}$ ,  $B$  για Full Load Departure

#### Αποτελέσματα προσέγγισης

Linear model Poly1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.009289$$

$$p2 = 0.135$$

Goodness of fit:

SSE: 33.21

R-square: 0.9995

Adjusted R-square: 0.9995

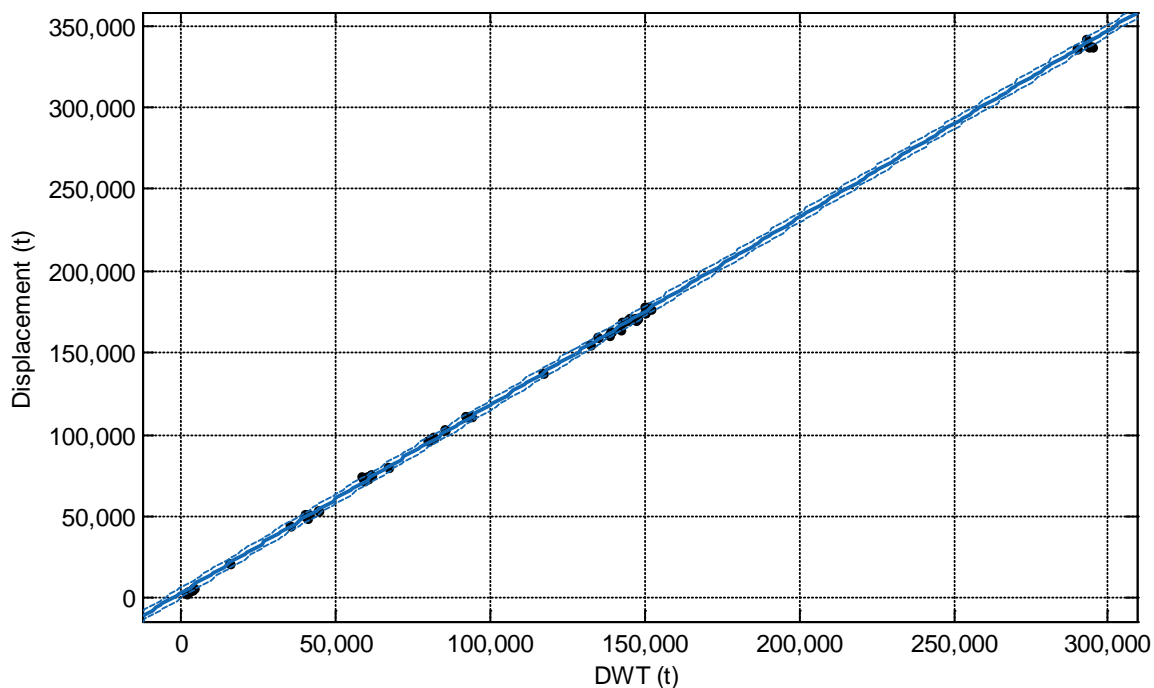
RMSE: 1.003

$$TPC = 0.009289 * L_{BP} * B + 0.135$$

#### Παρατηρήσεις

Η συσχέτιση μεταξύ TPC, μήκους και πλάτους είναι πάρα πολύ καλή. Ο υπολογισμός του TPC γίνεται εξ' ορισμού από την επιφάνεια ισάλου του πλοίου ( $TPC = \gamma * A_{WL}$ ) επομένως σχετίζεται άμεσα με το γινόμενο  $L_{BP} * B$ .

## 2.2. Εκτόπισμα ( $\Delta$ )



Σχήμα 23  $\Delta$  συναρτήσεως του DWT

### Αποτελέσματα προσέγγισης

Linear model Poly1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$\begin{aligned} p1 &= 1.146 \\ p2 &= 3554 \end{aligned}$$

Goodness of fit:

SSE: 1.157e+08

R-square: 0.9997

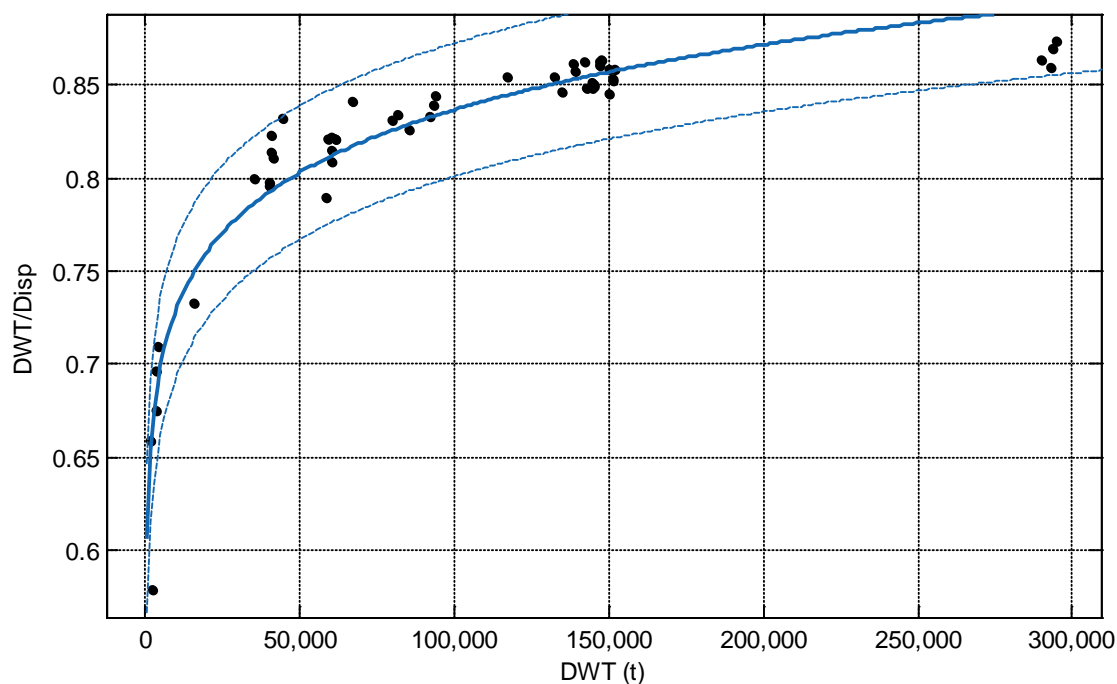
Adjusted R-square: 0.9997

RMSE: 1506

$$\Delta = 1.146 * DWT + 3554$$

### Παρατηρήσεις

Το διάγραμμα μας δίνει το εκτόπισμα συναρτήσεως του DWT. Η αξιοπιστία του διαγράμματος και κατ' επέκταση του προσεγγιστικού τύπου φαίνεται από τιμές των παραμέτρων ποιότητας και από το γεγονός ότι οι οριακές ευθείες σχεδόν ταυτίζονται με την προσεγγιστική ευθεία.



Σχήμα 24 DWT/Δ συναρτήσει του DWT

#### Αποτελέσματα προσέγγισης

General model Power1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.4241$$

$$b = 0.059$$

Goodness of fit:

$$\text{SSE: } 0.01586$$

$$\text{R-square: } 0.9112$$

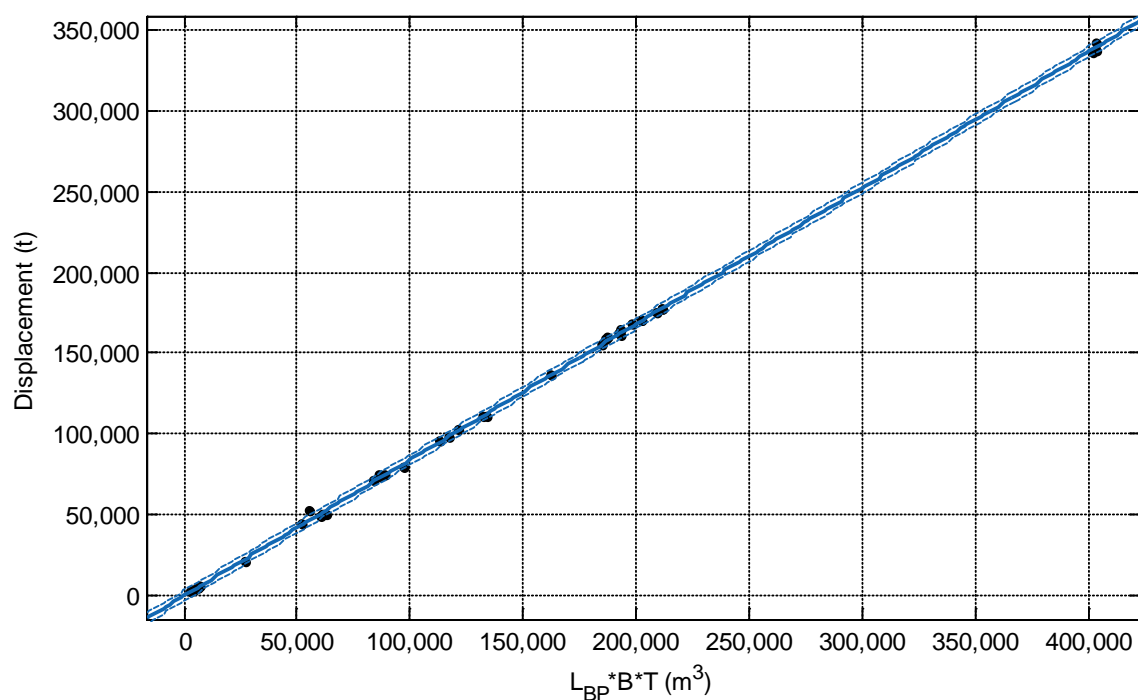
$$\text{Adjusted R-square: } 0.9094$$

$$\text{RMSE: } 0.01763$$

$$\frac{DWT}{\Delta} = 0.4241 * DWT^{0.059}$$

#### Παρατηρήσεις

Το παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζει το λόγο DWT/Δ ανάλογα με το μέγεθος του πλοίου. Όσο αυξάνεται το μέγεθος του πλοίου φαίνεται ότι το DWT καταλαμβάνει όλο και μεγαλύτερο ποσοστό του εκτοπίσματος. Για μικρά πλοία με DWT μικρότερο των 25000 t ο λόγος αυτός κυμαίνεται μεταξύ 0.58-0.74 ενώ για μεγαλύτερα πλοία μεταξύ 0.79-0.87.



Σχήμα 25 Δ συναρτήσει των  $L_{BP}$ ,  $B$ ,  $T$

#### Αποτελέσματα προσέγγισης

Linear model Poly1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.8393$$

$$p2 = 304.9$$

Goodness of fit:

SSE: 1.273e+08

R-square: 0.9997

Adjusted R-square: 0.9997

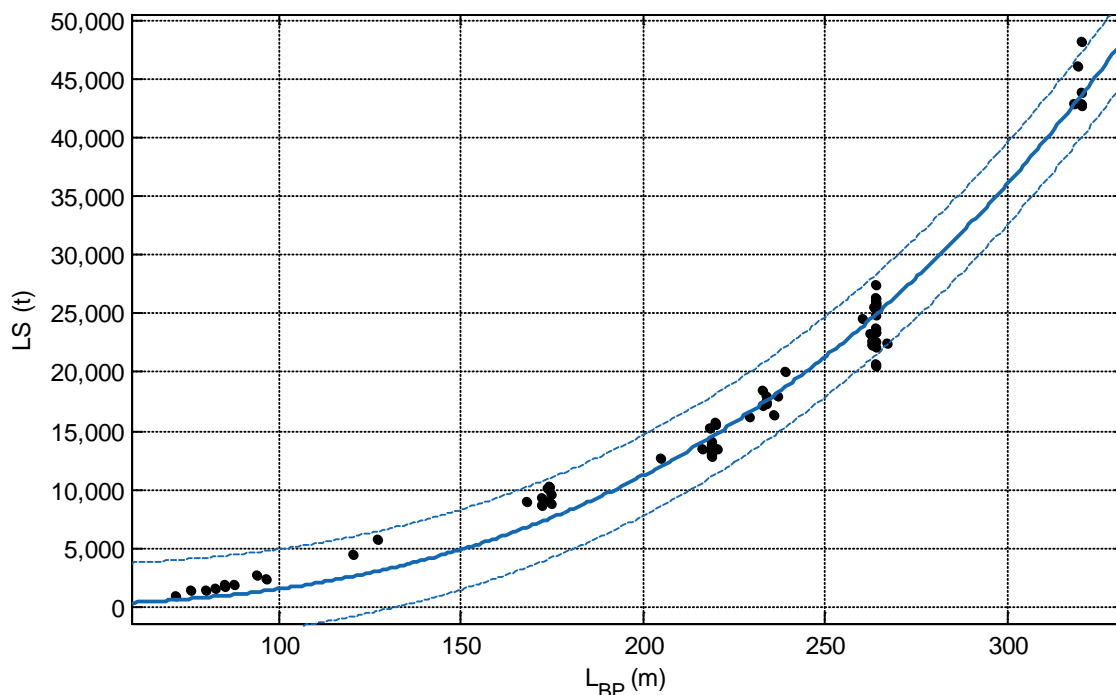
RMSE: 1565

$$\Delta = 0.8393 * L_{BP} * B * T - 304.9$$

#### Παρατηρήσεις

Από την υδροστατική είναι γνωστό πως το εκτόπισμα είναι άμεση συνάρτηση του μήκους, πλάτους και βυθίσματος γεγονός που αποδεικνύεται από το παραπάνω διάγραμμα. Φαίνεται πως οι οριακές ευθείες σχεδόν ταυτίζονται με την προσεγγιστική και η εκτίμηση γίνεται με πολύ μεγάλη ακρίβεια.

### 2.3. Βάρος Άφορτου Σκάφους (Lightship)



Σχήμα 26 LS συναρτήσεως του  $L_{BP}$

#### Αποτελέσματα προσέγγισης

General model Power1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.002509$$

$$b = 2.89$$

Goodness of fit:

SSE: 2.114e+08

R-square: 0.9764

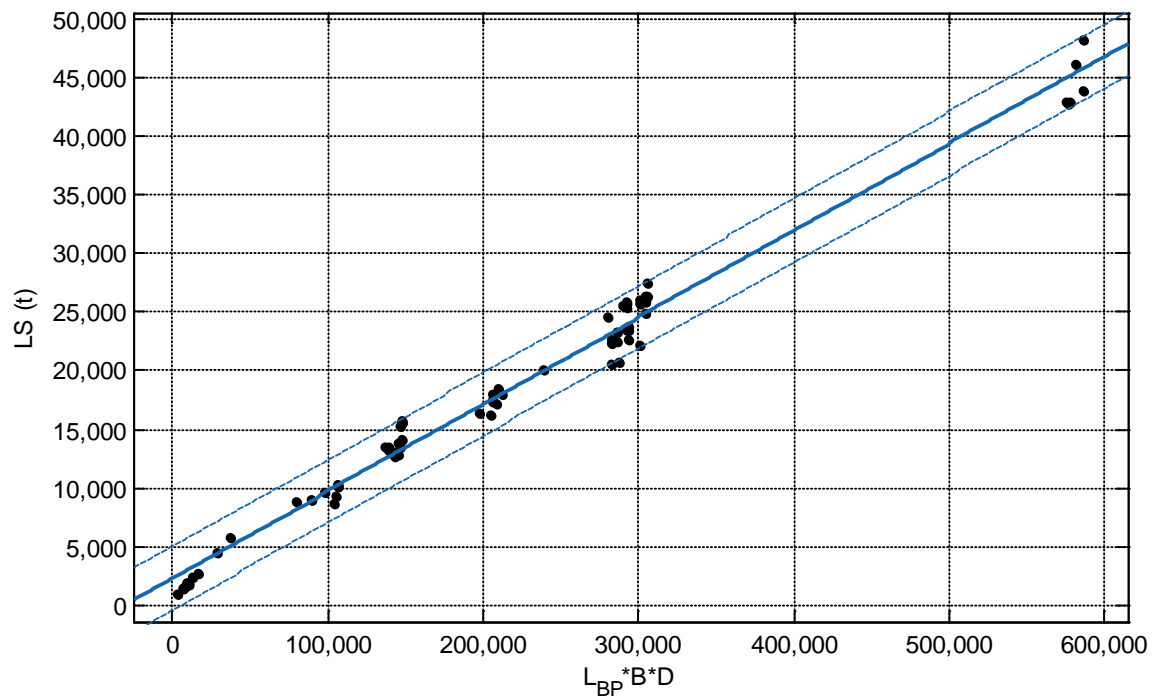
Adjusted R-square: 0.9761

RMSE: 1702

$$LS = 0.002509 * (L_{BP})^{2.89}$$

#### Παρατηρήσεις

Το μήκος παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στον υπολογισμό του Lightship. Από το διάγραμμα φαίνεται ότι αύξηση του μήκους οδηγεί κατά κανόνα σε αύξηση του βάρους της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου. Στην περιοχή περί τα 260 m (Suezmax) και 320 m (VLCC) μήκος βλέπουμε ότι υπάρχει μια διασπορά των τιμών του LS μεταξύ 20000-28000 t και 42000-48500 t αντίστοιχα. Αυτό οφείλεται στο ότι για τον υπολογισμό του LS παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο και οι άλλες δύο κύριες διαστάσεις B, D όπως θα αποδειχθεί στο παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 27 LS συναρτήσεως των  $L_{BP}$ ,  $B$ ,  $D$

#### Αποτελέσματα προσέγγισης

Linear model Poly1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.07422$$

$$p2 = 2297$$

Goodness of fit:

SSE: 1.294e+08

R-square: 0.9856

Adjusted R-square: 0.9854

RMSE: 1331

$$LS = 0.07422 * L_{BP} * B * D + 2297$$

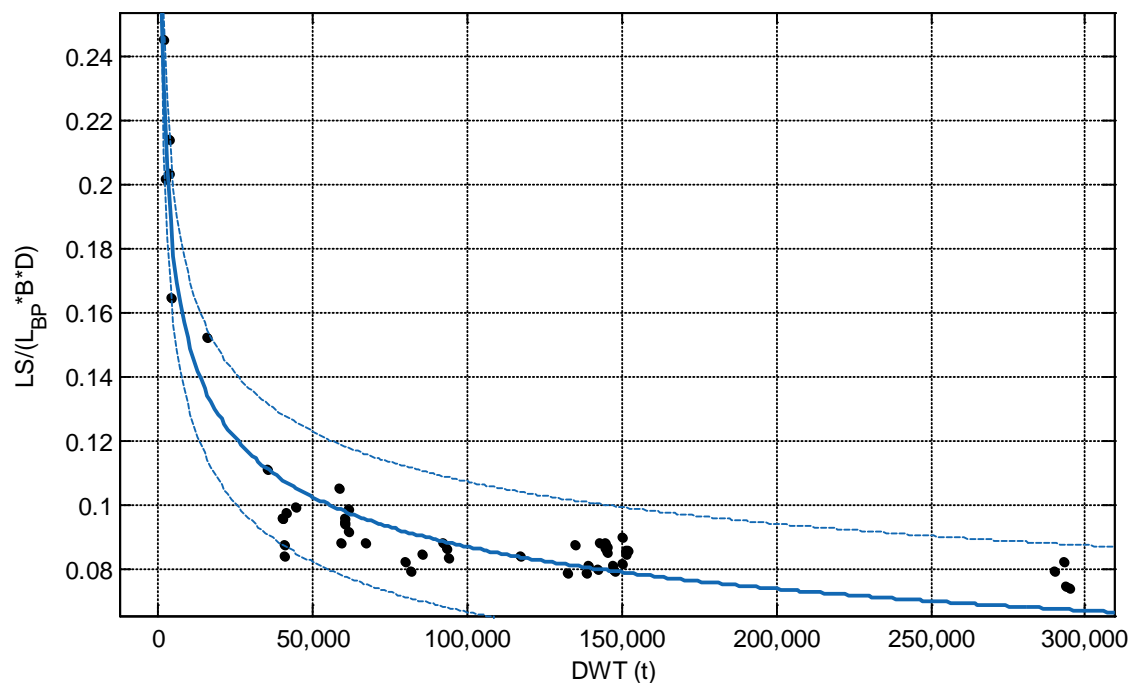
#### Παρατηρήσεις

Επιβεβαιώνοντας την παραπάνω παρατήρηση βλέπουμε ότι η συσχέτιση του LS με το γινόμενο των κυρίων διαστάσεων  $L_{BP}$ ,  $B$ ,  $D$  είναι πολύ καλύτερη και οι διακυμάνσεις είναι πολύ μικρότερες από αυτές που εμφανίζονται στο διάγραμμα LS- $L_{BP}$ .



Με βάση τις κύριες διαστάσεις του πλοίου μπορεί να οριστεί ένας συντελεστής βάρους μεταλλικής κατασκευής ως προς τις κύριες διαστάσεις του πλοίου ως εξής:

$$w_{LS} = \frac{LS}{L_{BP} * B * D}$$



Σχήμα 28  $LS/(L_{BP} * B * D)$  συναρτήσεσι του DWT

#### Αποτελέσματα προσέγγισης

General model Power1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 1.313$$

$$b = -0.2357$$

Goodness of fit:

SSE: 0.005104

R-square: 0.9293

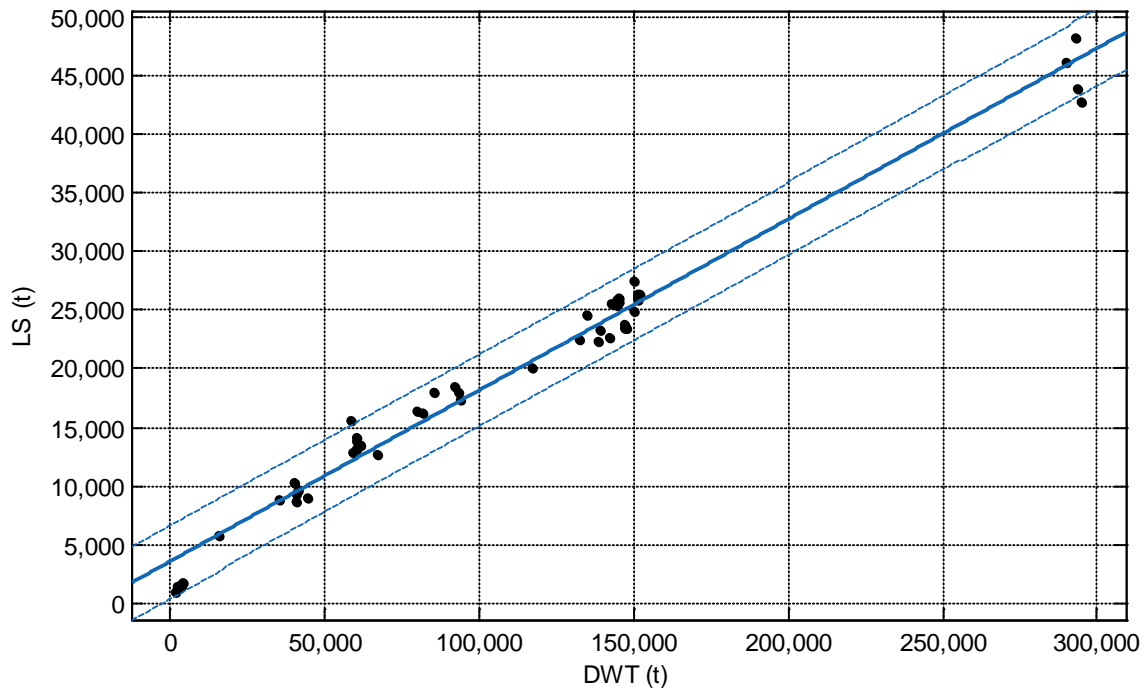
Adjusted R-square: 0.9279

RMSE: 0.01

$$\frac{LS}{L_{BP} * B * D} = 1.313 * DWT^{-0.2357}$$

#### Παρατηρήσεις

Ο συντελεστής βάρους μεταλλικής κατασκευής έχει την τάση να μειώνεται αυξανόμενου του μεγέθους του πλοίου.



Σχήμα 29 LS συναρτήσει του DWT

#### Αποτελέσματα προσέγγισης

Linear model Poly1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.1462$$

$$p2 = 3558$$

Goodness of fit:

SSE: 1.166e+08

R-square: 0.9811

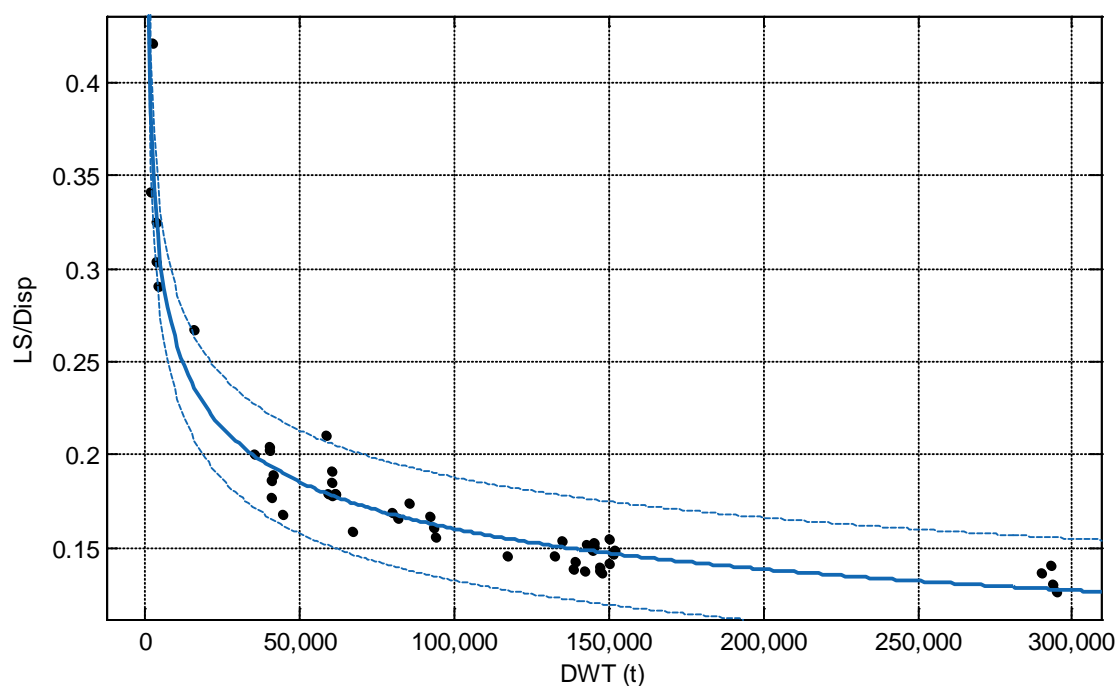
Adjusted R-square: 0.9807

RMSE: 1512

$$LS = 0.1462 * DWT + 3558$$

#### Παρατηρήσεις

Η εκτίμηση του LS από το DWT μπορεί να γίνει σε πολύ ικανοποιητικό βαθμό. Το DWT εξαρτάται από τους χώρους του πλοίου οι οποίοι καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό τον όγκο του πλοίου και κατ' επέκταση το βάρος μεταλλικής κατασκευής.



Σχήμα 30 LS/Δ συναρτήσει του DWT

#### Αποτελέσματα προσέγγισης

General model Power1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 1.783$$

$$b = -0.2092$$

Goodness of fit:

SSE: 0.009498

R-square: 0.9466

Adjusted R-square: 0.9455

RMSE: 0.01365

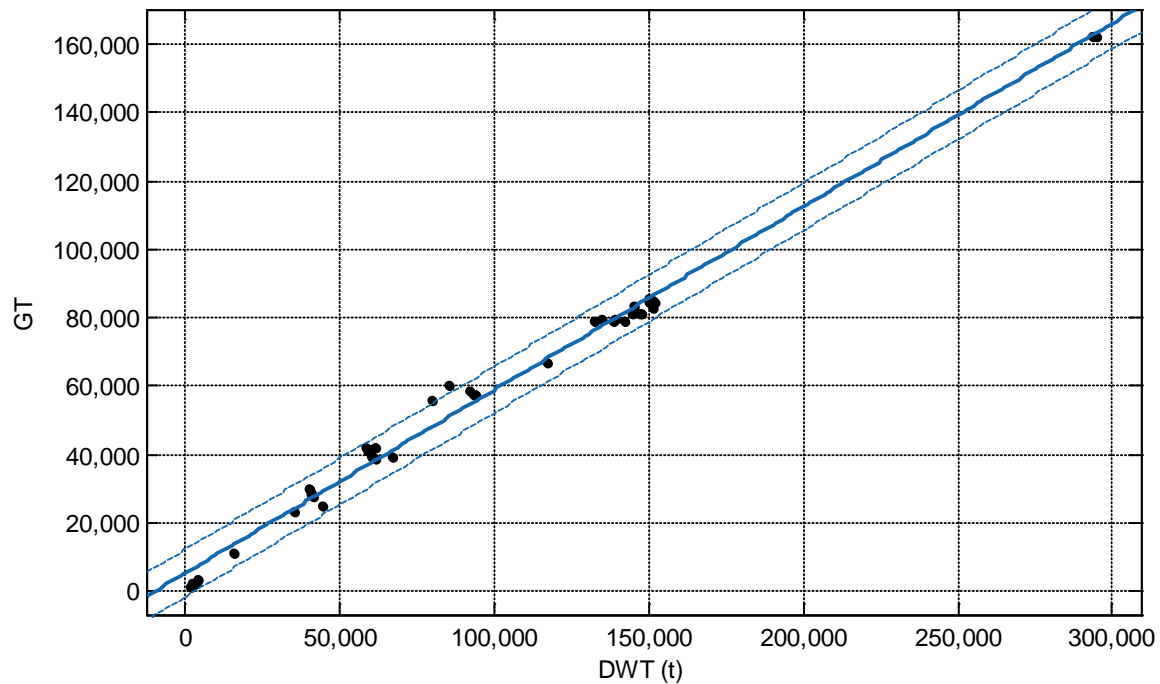
$$\frac{LS}{\Delta} = 1.783 * DWT^{-0.2092}$$

#### Παρατηρήσεις

Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται που κυμαίνεται ο λόγος LS/Δ ανάλογα με το μέγεθος του πλοίου. Βλέπουμε ότι στα μικρά πλοία έως 25000 t DWT το βάρος της μεταλλικής κατασκευής καταλαμβάνει μεγάλο ποσοστό του εκτοπίσματος μεταξύ 26-42%. Όσο μεγαλώνει το μέγεθος του πλοίου φαίνεται ότι το ποσοστό αυτό μειώνεται αρκετά από 21% έως και 13% για πολύ μεγάλα πλοία (VLCC).

## 2.4. Χωρητικότητα Δεξαμενών

### 2.4.1. Ολική χωρητικότητα (Gross Tonnage)



Σχήμα 31 GT συναρτήσει του DWT

#### Αποτελέσματα προσέγγισης

Linear model Poly1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.5356$$

$$p2 = 5450$$

Goodness of fit:

SSE: 4.745e+08

R-square: 0.9918

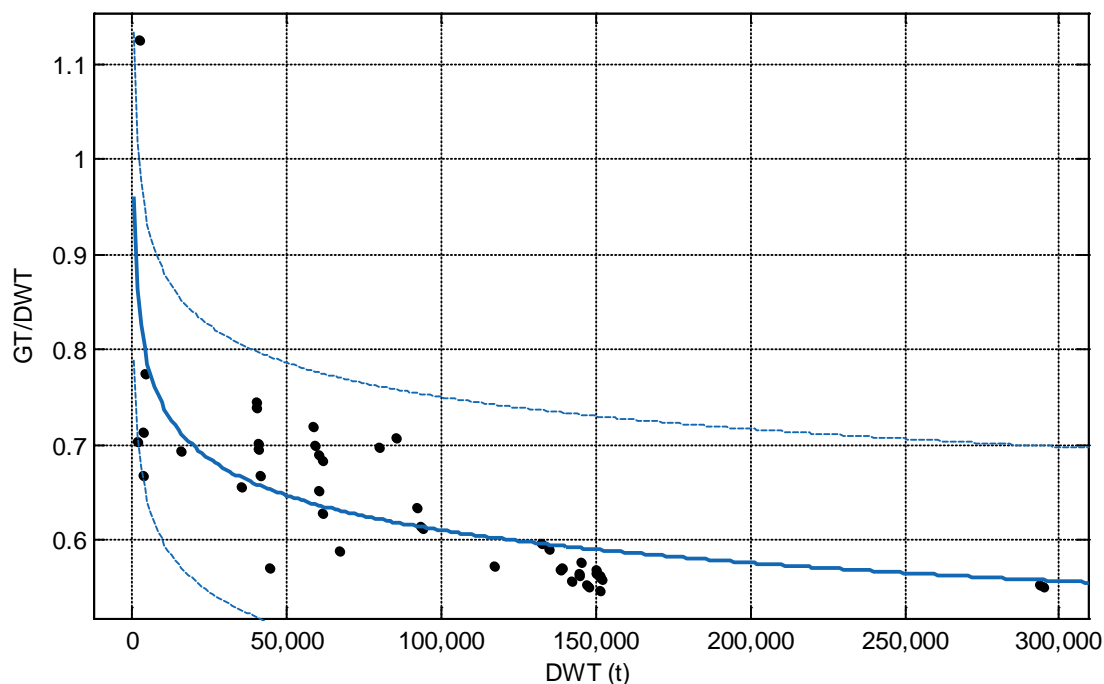
Adjusted R-square: 0.9916

RMSE: 3322

$$GT = 0.5356 * DWT + 5450$$

#### Παρατηρήσεις

Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ότι η ολική χωρητικότητα μπορεί να εκτιμηθεί με μεγάλη ακρίβεια από το DWT. Δεδομένου ότι η ολική χωρητικότητα είναι το άθροισμα του όγκου όλων των καταμετρούμενων χώρων του πλοίου είναι αναμενόμενο το παραπάνω αποτέλεσμα.



Σχήμα 32 GT/DWT συναρτήσεσι του DWT

#### Αποτελέσματα προσέγγισης

General model Power1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 1.591$$

$$b = -0.08324$$

Goodness of fit:

SSE: 0.2009

R-square: 0.5415

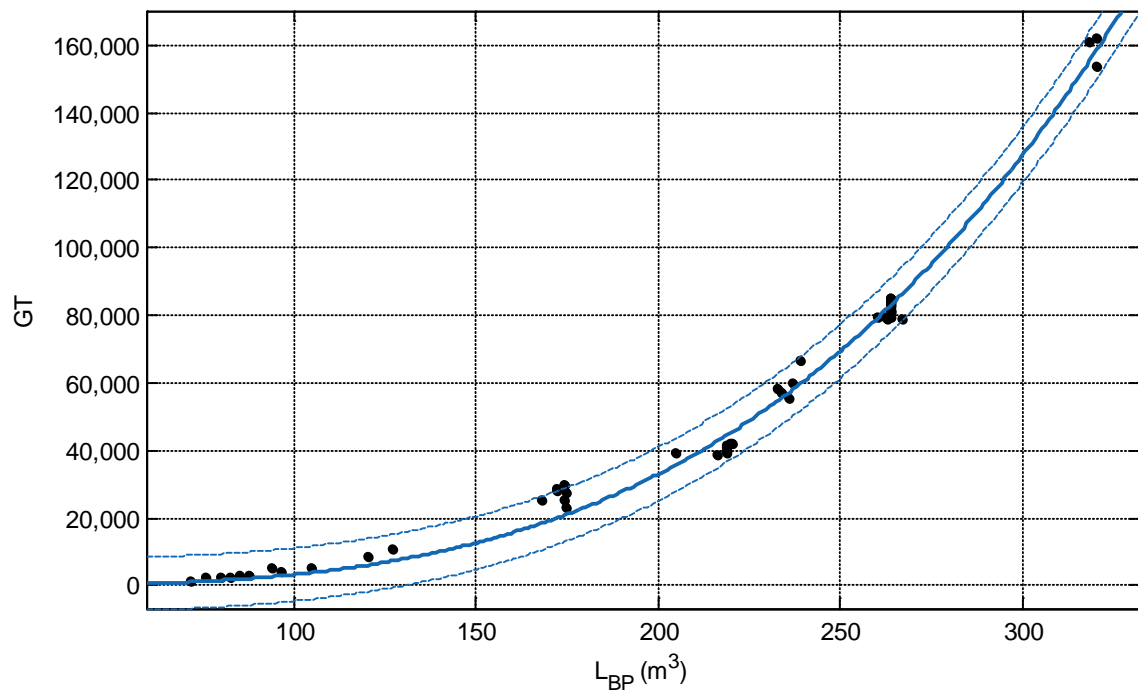
Adjusted R-square: 0.5309

RMSE: 0.06835

$$\frac{GT}{DWT} = 1.591 * DWT^{-0.08324}$$

#### Παρατηρήσεις

Στο διάγραμμα παρουσιάζονται αρκετές αποκλίσεις και ο μαθηματικός τύπος δεν παρέχει μεγάλη ακρίβεια. Ωστόσο, έχουμε μια εικόνα για το πώς μεταβάλλεται ο λόγος GT/DWT ο οποίος έχει την τάση να μειώνεται με την αύξηση του DWT. Σε γενικές γραμμές βλέπουμε ότι ο λόγος κυμαίνεται μεταξύ 0.55-0.77 εκτός μια ειδική περίπτωσης.



Σχήμα 33 GT συναρτήσει του  $L_{BP}$

#### Αποτελέσματα προσέγγισης

General model Power1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.0007034$$

$$b = 3.334$$

Goodness of fit:

SSE: 9.574e+08

R-square: 0.99

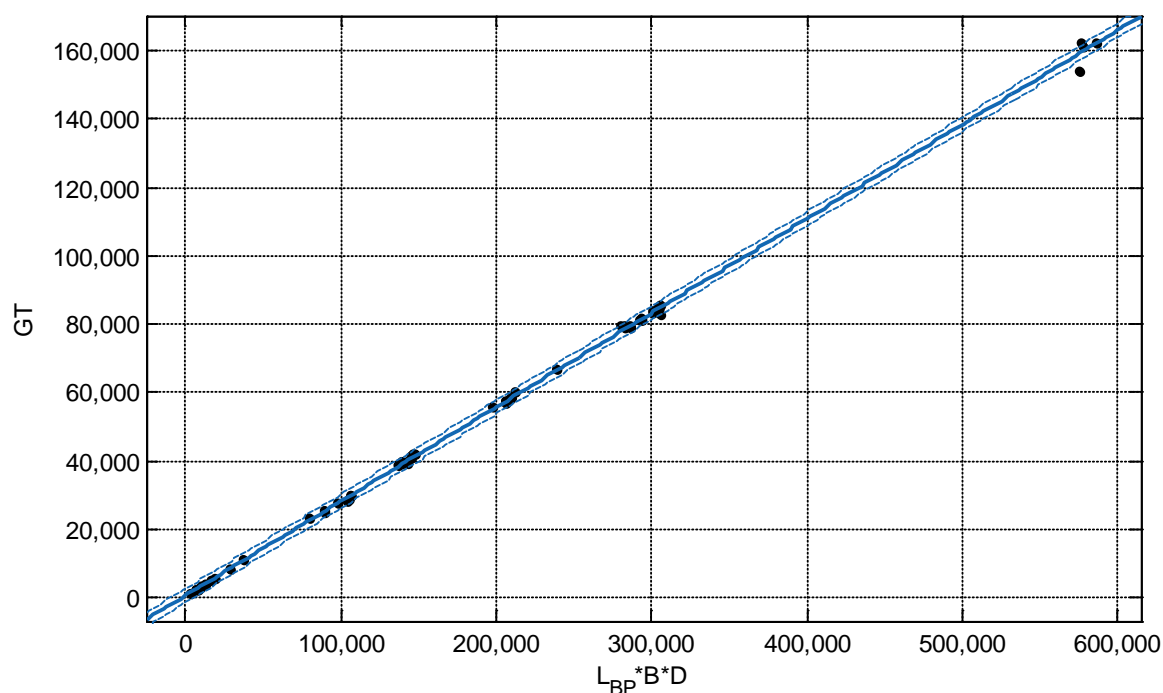
Adjusted R-square: 0.9899

RMSE: 3930

$$GT = 0.0007034 * (L_{BP})^{3.334}$$

#### Παρατηρήσεις

Η ολική χωρητικότητα εκτιμάται σε πολύ καλό βαθμό από το μήκος. Γενικά, το μήκος αποτελεί καθοριστικό μέγεθος για τον υπολογισμό του όγκου του πλοίου και έτσι λογικά εμφανίζεται τόσο καλή προσέγγιση. Παρακάτω που θα συνοπολογίσουμε και τις λοιπές κύριες διαστάσεις θα φανεί ότι υπάρχει ακόμα καλύτερη προσέγγιση.



Σχήμα 34 GT συναρτήσεσι των  $L_{BP}$ ,  $B$ ,  $D$

#### Αποτελέσματα προσέγγισης

Linear model Poly1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.2756$$

$$p2 = 672.2$$

Goodness of fit:

SSE: 6.188e+07

R-square: 0.9994

Adjusted R-square: 0.9993

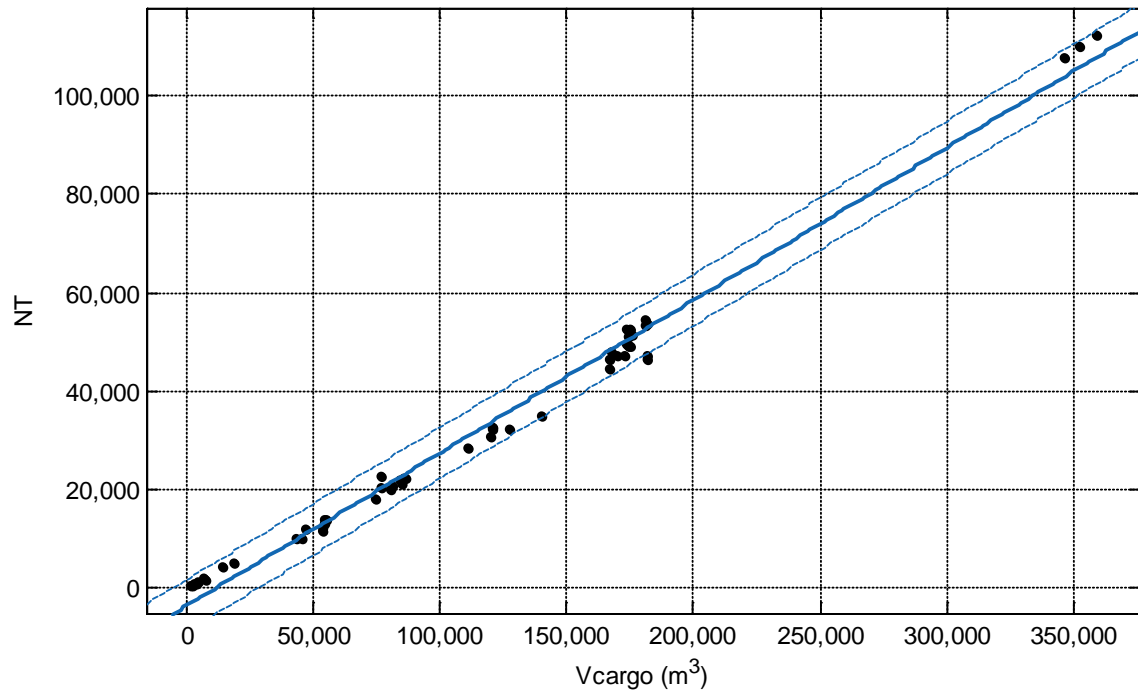
RMSE: 999

$$GT = 0.2756 * L_{BP} * B * D + 672.2$$

#### Παρατηρήσεις

Αποτελεί μια από τις καλύτερες προσεγγίσεις της στατιστικής ανάλυσης. Επιβεβαιώνεται η παραπάνω παρατήρηση ότι λαμβάνοντας υπόψη και τις τρεις κύριες διαστάσεις του πλοίου, που καθορίζουν και τον όγκο του, η προσέγγιση παρέχει τη μεγαλύτερη ακρίβεια και αξιοπιστία για τον υπολογισμό του GT.

### 2.4.2. Καθαρή χωρητικότητα (Net Tonnage)



Σχήμα 35 NT συναρτήσει του  $V_{CARGO}$

#### Αποτελέσματα προσέγγισης

Linear model Poly1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.3102$$

$$p2 = -3566$$

Goodness of fit:

SSE: 3.802e+08

R-square: 0.9912

Adjusted R-square: 0.9911

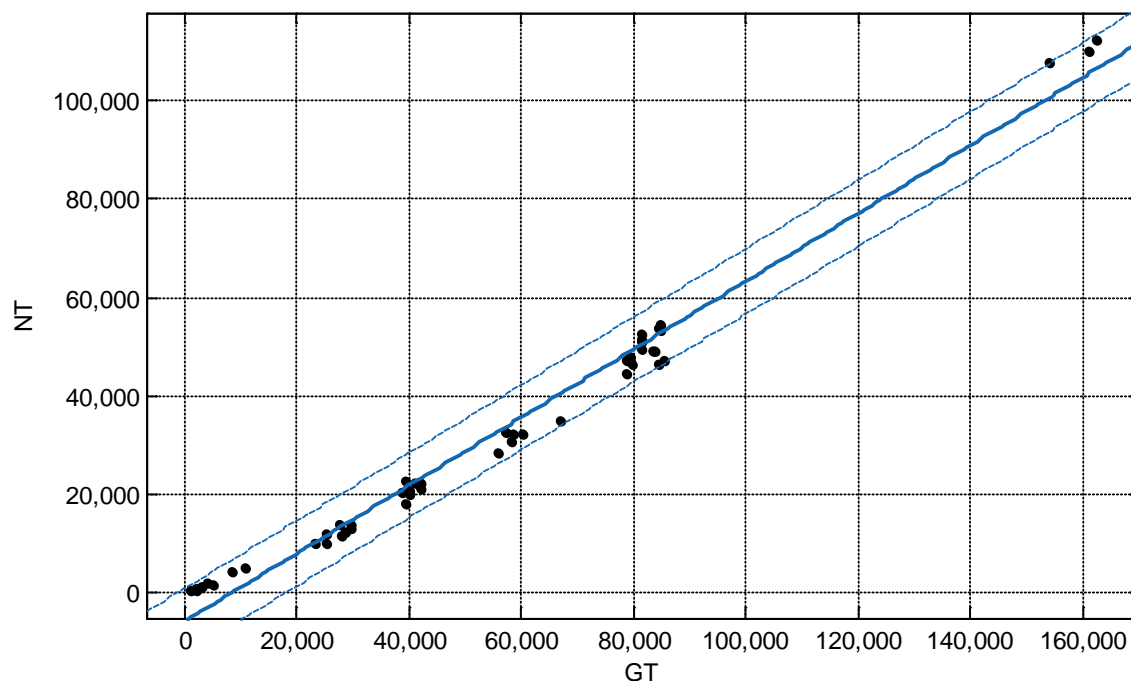
RMSE: 2560

$$NT = 0.3102 * V_{CARGO} - 3566$$

#### Παρατηρήσεις

Το διάγραμμα επιβεβαιώνει τη συσχέτιση που υπάρχει μεταξύ καθαρής χωρητικότητας και όγκων κυτών. Από τους Διεθνείς Κανονισμούς Καταμέτρησης Πλοίων (International Tonnage Measurements of Ships) ισχύει ότι η καθαρή χωρητικότητα υπολογίζεται από τους χώρους που μπορούν να εκμεταλλευτούν για τη μεταφορά φορτίου.





Σχήμα 36 NT συναρτήσει του GT

#### Αποτελέσματα προσέγγισης

Linear model Poly1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.6908$$

$$p2 = -5769$$

Goodness of fit:

SSE: 6.151e+08

R-square: 0.9858

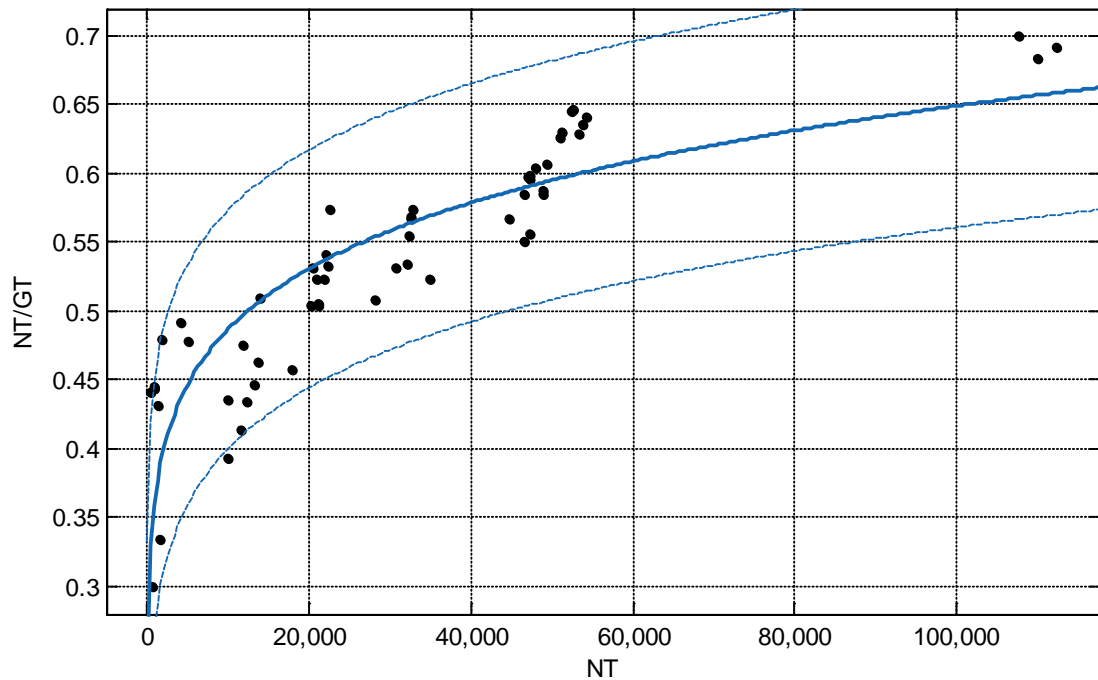
Adjusted R-square: 0.9856

RMSE: 3256

$$NT = 0.6908 * GT - 5769$$

#### Παρατηρήσεις

Φαίνεται ότι το NT μπορεί να υπολογιστεί με μεγάλη ακρίβεια από το GT επιβεβαιώνοντας τον ορισμό για την καθαρή χωρητικότητα η οποία προκύπτει από την ολική χωρητικότητα, μειωμένη κατά τον όγκο ορισμένων «εκπιπτόμενων» χώρων που δεν είναι εκμεταλλεύσιμοι για τη μεταφορά φορτίου.



Σχήμα 37 NT/GT συναρτήσει του NT

#### Αποτελέσματα προσέγγισης

General model Power1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.1534$$

$$b = 0.1253$$

Goodness of fit:

SSE: 0.1062

R-square: 0.7595

Adjusted R-square: 0.7553

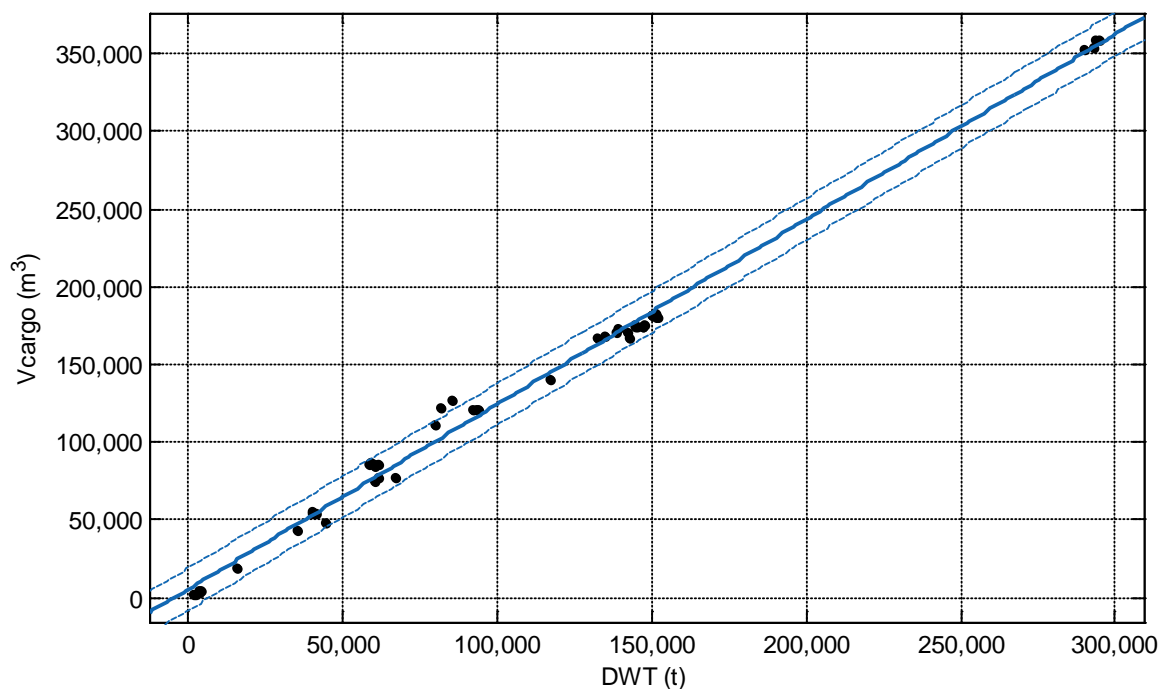
RMSE: 0.04278

$$\frac{NT}{GT} = 0.1534 * NT^{0.1253}$$

#### Παρατηρήσεις

Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ότι ο λόγος NT/GT κυμαίνεται μεταξύ 0.3 (για πολύ μικρά πλοία) έως 0.7 (για πολύ μεγάλα πλοία). Από τους Διεθνείς Κανονισμούς Καταμέτρησης Πλοίων (International Tonnage Measurements of Ships) ισχύει ότι η καθαρή χωρητικότητα δεν μπορεί να είναι μικρότερη της ολικής πέραν του 30% πράγμα που είναι φανερό ότι ικανοποιείται από την ανάλυση των δεδομένων μας.

## 2.4.3. Όγκος δεξαμενών φορτίου (Cargo Oil)

Σχήμα 38  $V_{CARGO}$  συναρτήσει του DWTΑποτελέσματα προσέγγισης

Linear model Poly1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 1.19$$

$$p2 = 5537$$

Goodness of fit:

SSE: 2.208e+09

R-square: 0.9945

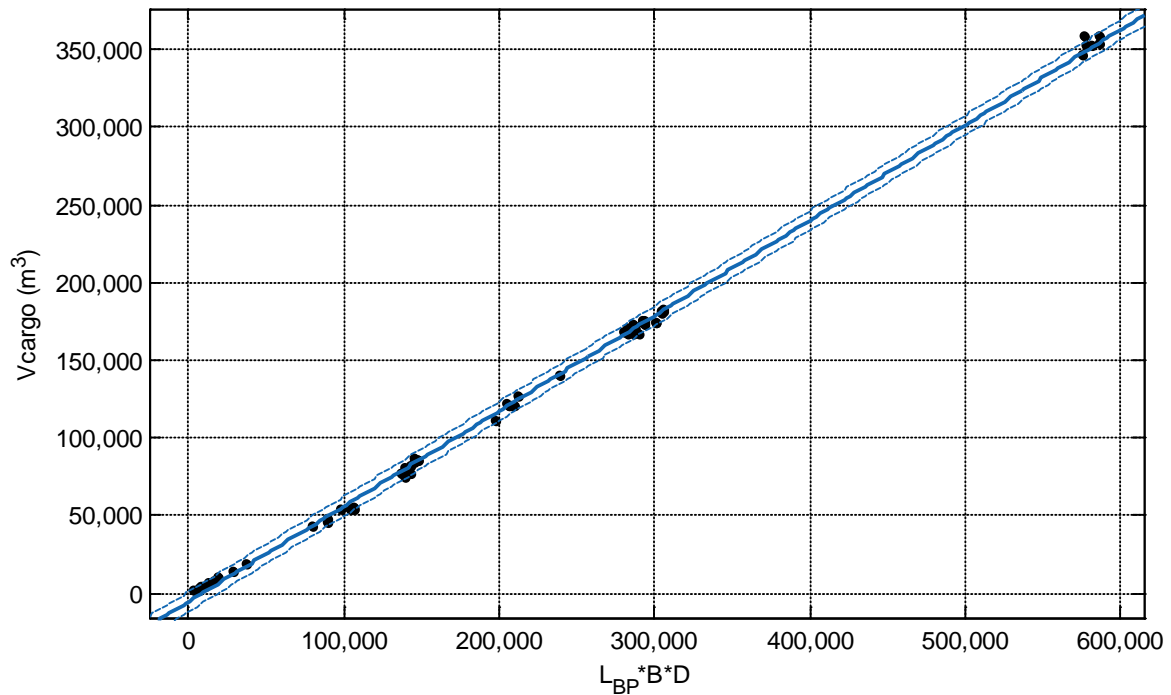
Adjusted R-square: 0.9944

RMSE: 6579

$$V_{CARGO} = 1.19 * DWT + 5537$$

Παρατηρήσεις

Η συσχέτιση του DWT με τον όγκο δεξαμενών φορτίου είναι πολύ ικανοποιητική. Το βάρος του φορτίου του πλοίου αποτελεί το μεγαλύτερο μέρος του DWT επομένως είναι λογικό να εξαρτάται από αυτό σε μεγάλο βαθμό.



Σχήμα 39  $V_{CARGO}$  συναρτήσει των  $L_{BP}$ ,  $B$ ,  $D$

#### Αποτελέσματα προσέγγισης

Linear model Poly1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.6138$$

$$p2 = -5447$$

Goodness of fit:

SSE: 7.172e+08

R-square: 0.9988

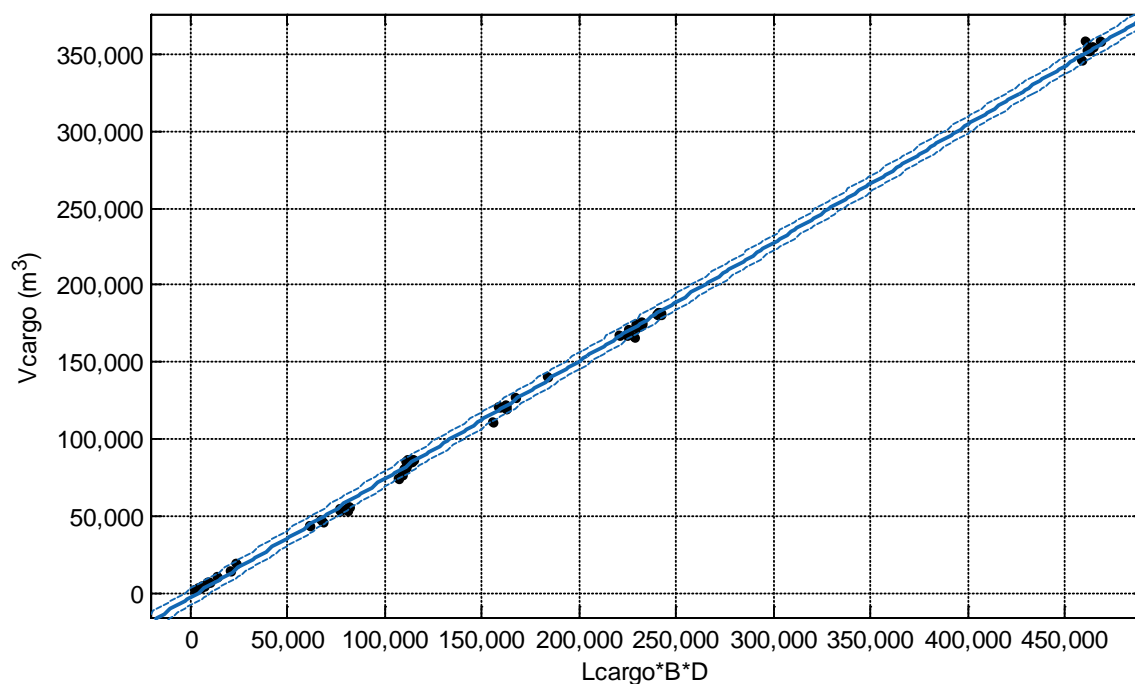
Adjusted R-square: 0.9988

RMSE: 3113

$$V_{CARGO} = 0.6138 * L_{BP} * B * D - 5447$$

#### Παρατηρήσεις

Το παραπάνω διάγραμμα αποτελεί καλύτερη προσέγγιση για τον υπολογισμό του όγκου φορτίου από τις κύριες διαστάσεις απ' ότι από το DWT. Εφόσον, το γινόμενο  $L_{BP} * B * D$  αποτελεί ένδειξη του όγκου του πλοίου είναι λογικό η συσχέτιση με όγκο δεξαμενών φορτίου να είναι καλύτερη.



Σχήμα 40  $V_{CARGO}$  συναρτήσσει των  $L_{CARGO}$ ,  $B$ ,  $D$

#### Αποτελέσματα προσέγγισης

Linear model Poly1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.768$$

$$p2 = -2933$$

Goodness of fit:

SSE: 4.768e+08

R-square: 0.9992

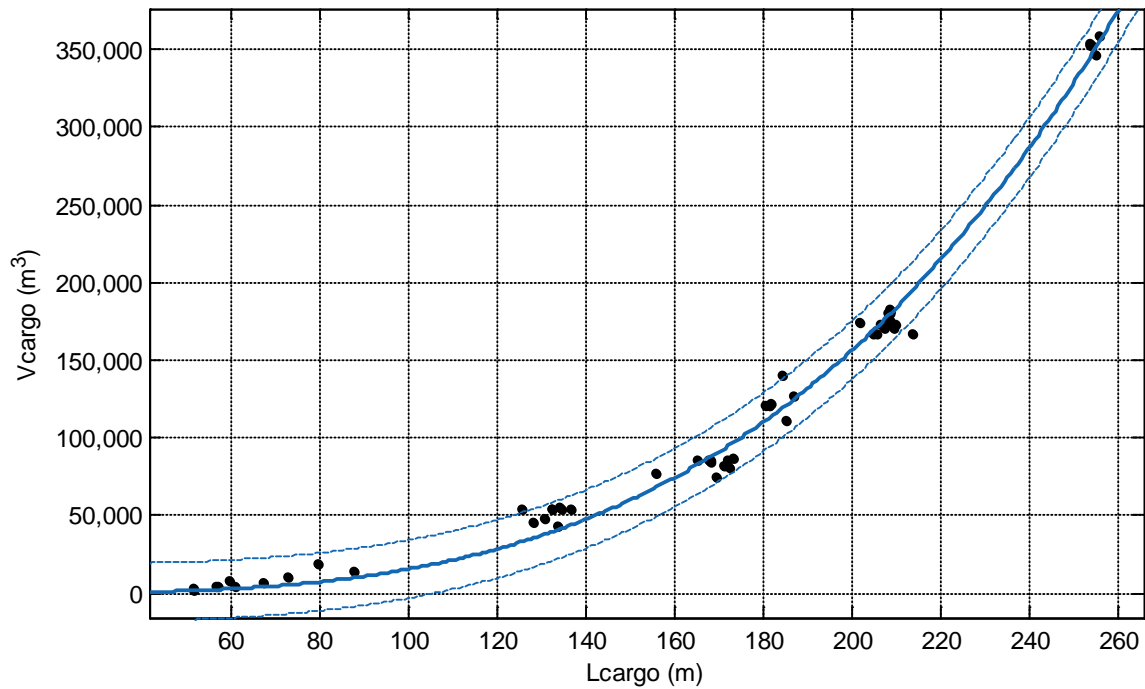
Adjusted R-square: 0.9992

RMSE: 2610

$$V_{CARGO} = 0.768 * L_{CARGO} * B * D - 2933$$

#### Παρατηρήσεις

Αντίστοιχα με το προηγούμενο διάγραμμα ο όγκος εκτιμάται με ακόμα μεγαλύτερη ακρίβεια αν αντί για το μήκος του πλοίου χρησιμοποιήσουμε πιο συγκεκριμένα το μήκος του χώρου φορτίου  $L_{CARGO}$  που σαν γινόμενο  $L_{CARGO} * B * D$  προσεγγίζει με μεγαλύτερη ακρίβεια το χώρο φορτίου. Έτσι, προκύπτει και η καλύτερη δυνατή προσέγγιση.



Σχήμα 41  $V_{CARGO}$  συναρτήσει του  $L_{CARGO}$

#### Αποτελέσματα προσέγγισης

General model Power1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.00349$$

$$b = 3.325$$

Goodness of fit:

SSE: 6.11e+09

R-square: 0.9898

Adjusted R-square: 0.9896

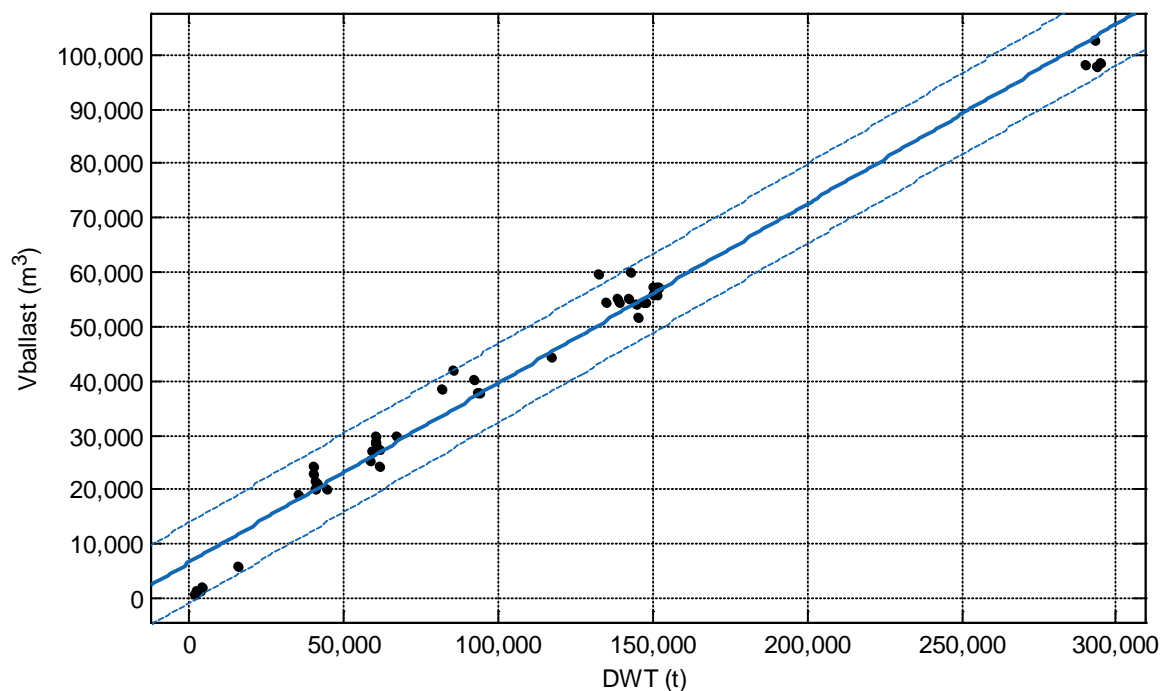
RMSE: 9343

$$V_{CARGO} = 0.00349 * (L_{CARGO})^{3.325}$$

#### Παρατηρήσεις

Ο όγκος των δεξαμενών φορτίου μπορεί να εκτιμηθεί με εξίσου μεγάλη ακρίβεια αποκλειστικά από το μήκος του χώρου φορτίου  $L_{CARGO}$ . Το  $L_{CARGO}$  έχει την πιο σημαντική επίδραση συγκριτικά με το πλάτος και το κοίλο στον υπολογισμό του  $V_{CARGO}$ .

## 2.4.4. Όγκος δεξαμενών έρματος (Ballast Water)

Σχήμα 42  $V_{BALLAST}$  συναρτήσει του DWTΑποτελέσματα προσέγγισης

Linear model Poly1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.33$$

$$p2 = 6632$$

Goodness of fit:

SSE: 6.326e+08

R-square: 0.9798

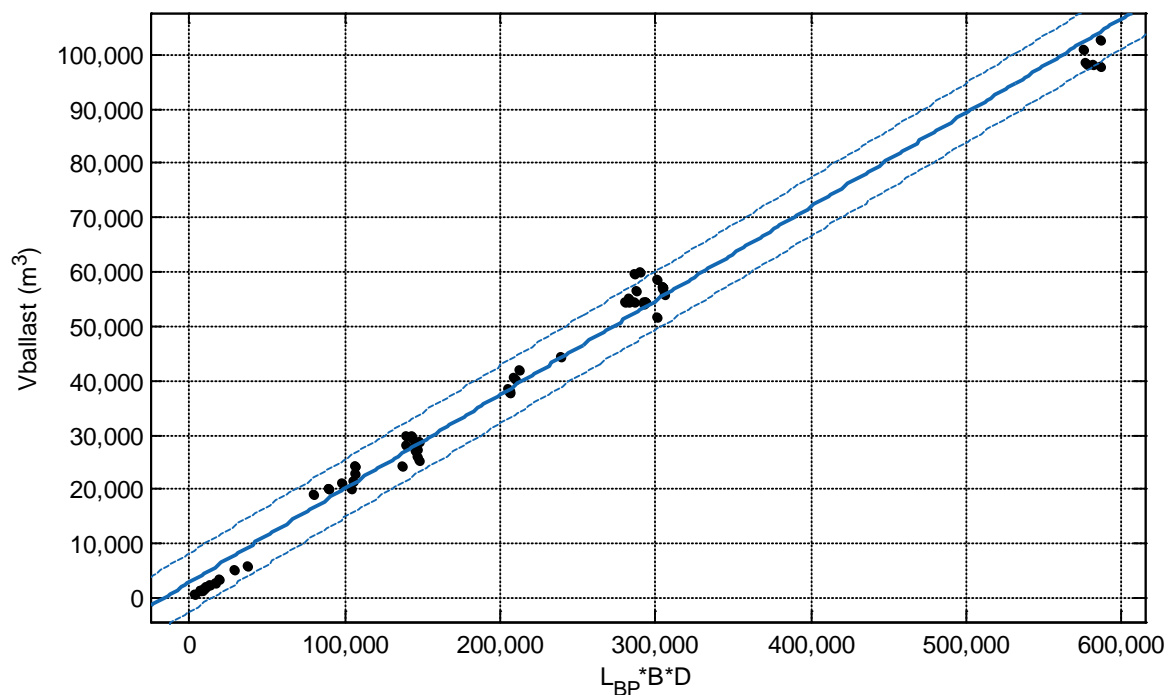
Adjusted R-square: 0.9794

RMSE: 3557

$$V_{BALLAST} = 0.33 * DWT + 6632$$

Παρατηρήσεις

Η χωρητικότητα έρματος εκτιμάται με πολύ καλή ακρίβεια από το DWT. Για τη χωρητικότητα έρματος απαιτείται μια ελάχιστη ποσότητα που προσδιορίζεται από την κατάσταση Ballast Arrival όπως αυτή ορίζεται από τη MARPOL 73/78.



Σχήμα 43  $V_{BALLAST}$  συναρτήσεως των  $L_{BP}$ ,  $B$ ,  $D$

#### Αποτελέσματα προσέγγισης

Linear model Poly1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.173$$

$$p2 = 2856$$

Goodness of fit:

SSE: 5.154e+08

R-square: 0.9896

Adjusted R-square: 0.9895

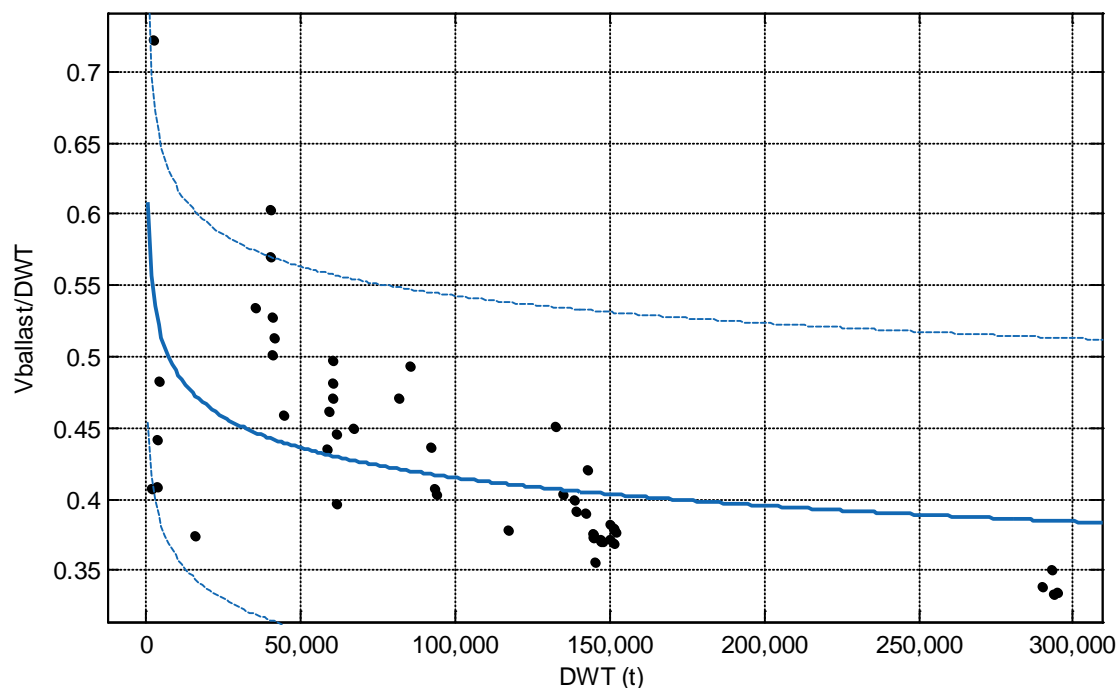
RMSE: 2657

$$V_{BALLAST} = 0.173 * L_{BP} * B * D + 2856$$

#### Παρατηρήσεις

Η χωρητικότητα έρματος εκτιμάται με μεγαλύτερη ακρίβεια από τις κύριες διαστάσεις απ' ότι από το DWT εφόσον συγκρίνουμε όγκους.





Σχήμα 44  $V_{BALLAST}/DWT$  συναρτήσεως του  $DWT$

#### Αποτελέσματα προσέγγισης

General model Power1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.9331$$

$$b = -0.07034$$

Goodness of fit:

SSE: 0.1977

R-square: 0.303

Adjusted R-square: 0.2891

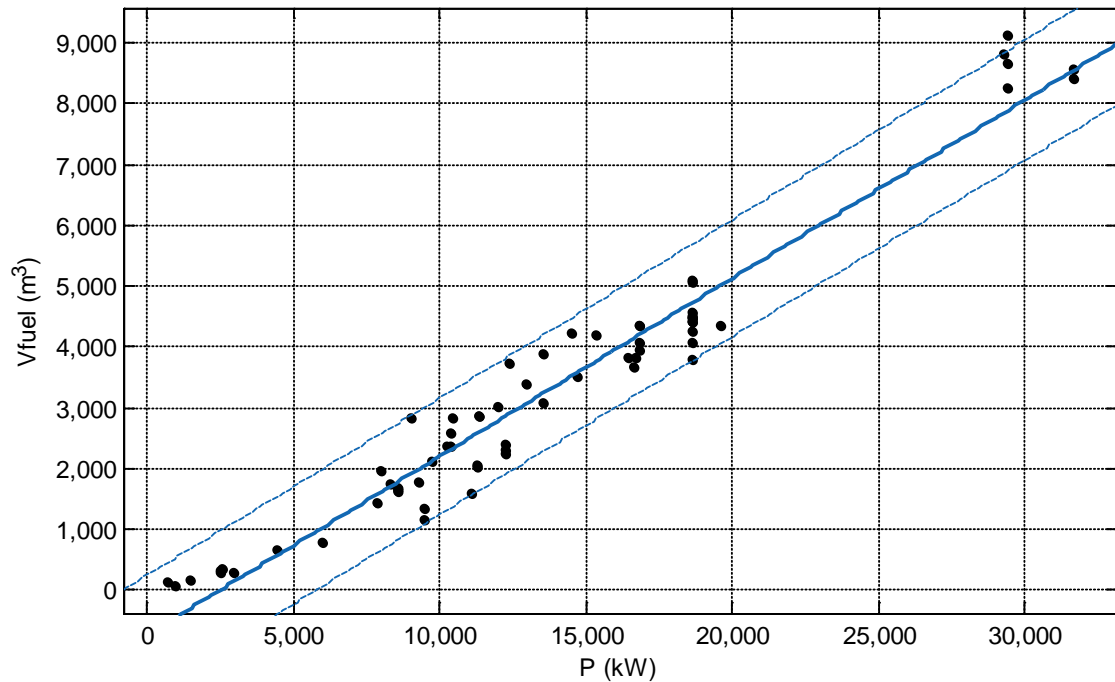
RMSE: 0.06287

$$\frac{V_{BALLAST}}{DWT} = 0.9331 * DWT^{-0.07034}$$

#### Παρατηρήσεις

Βλέπουμε ότι στο παραπάνω διάγραμμα υπάρχει μεγάλη διασπορά και η ποιότητα της προσέγγισης δεν είναι τόσο καλή επομένως και η μαθηματική σχέση δεν προτείνεται να χρησιμοποιηθεί. Ωστόσο, από το διάγραμμα μπορούμε να έχουμε μια γενική εικόνα για την τάση που εμφανίζεται ο χώρος που διατίθεται για έρμα να καταλαμβάνει μικρότερο ποσοστό του  $DWT$  όσο αυξάνεται το μέγεθος του πλοίου. Ο λόγος  $V_{BALLAST}/DWT$  γενικά κυμαίνεται μεταξύ 0.33-0.6 εκτός μια περίπτωσης όπου ξεπερνάει το 0.7.

#### 2.4.5. Όγκος δεξαμενών καυσίμων (Fuel Oil)



Σχήμα 45  $V_{FUEL}$  συναρτήσει της MCR

#### Αποτελέσματα προσέγγισης

Linear model Poly1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.293$$

$$p2 = -731.8$$

Goodness of fit:

SSE: 1.585e+07

R-square: 0.9519

Adjusted R-square: 0.9512

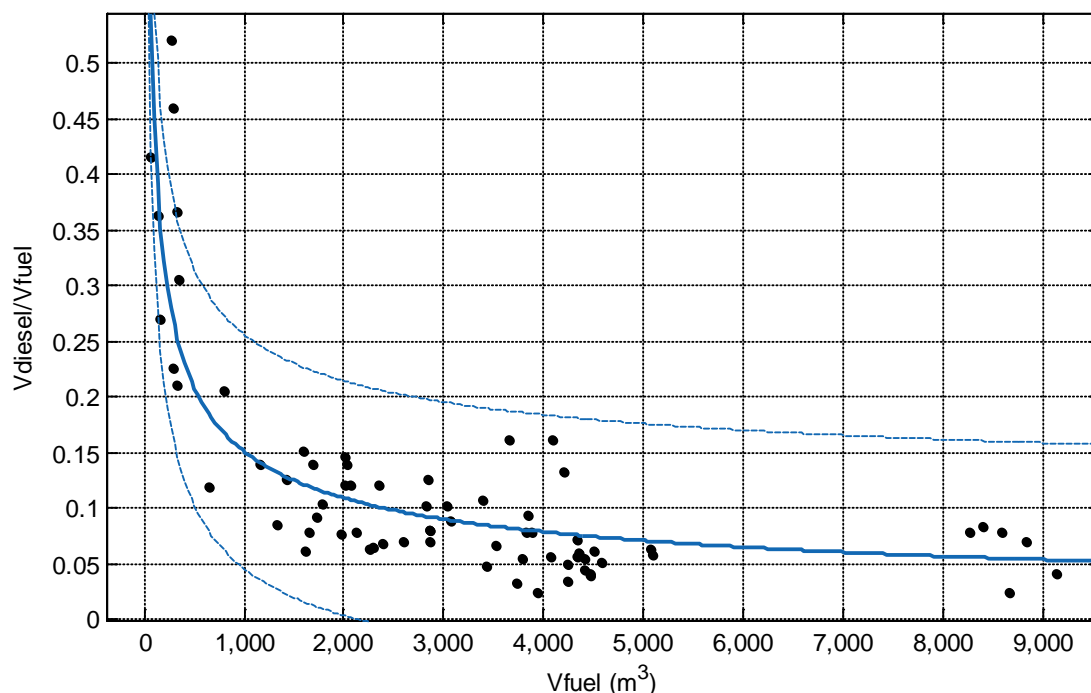
RMSE: 475.9

$$V_{FUEL} = 0.293 * P - 731.8$$

#### Παρατηρήσεις

Η χωρητικότητα των δεξαμενών καυσίμων (Heavy Fuel Oil) είναι άμεση συνάρτηση της ισχύος MCR του κινητήρα. Η ισχύς λειτουργίας του πλοίου καθορίζει την κατανάλωση άρα και την απαιτούμενη ποσότητα καυσίμου. Ωστόσο, όπως θα φανεί και παρακάτω η απαιτούμενη ποσότητα καυσίμων εξαρτάται και από την ακτίνα ενέργειας του πλοίου (Range). Κάποιες αποκλίσεις φαίνονται για πλοία με MCR γύρω στα 18000 kW όπου ο όγκος των δεξαμενών καυσίμων κυμαίνεται μεταξύ 3800-5000 m<sup>3</sup>.

## 2.4.6. Όγκος δεξαμενών Diesel (Diesel Oil)

Σχήμα 46  $V_{DIESEL}/V_{FUEL}$  συναρτήσει του  $V_{FUEL}$ Αποτελέσματα προσέγγισης

General model Power1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$\begin{aligned} a &= 3.851 \\ b &= -0.4686 \end{aligned}$$

Goodness of fit:

SSE: 0.1976

R-square: 0.7297

Adjusted R-square: 0.7259

RMSE: 0.05239

$$\frac{V_{DIESEL}}{V_{FUEL}} = 3.851 * (V_{FUEL})^{-0.4686}$$

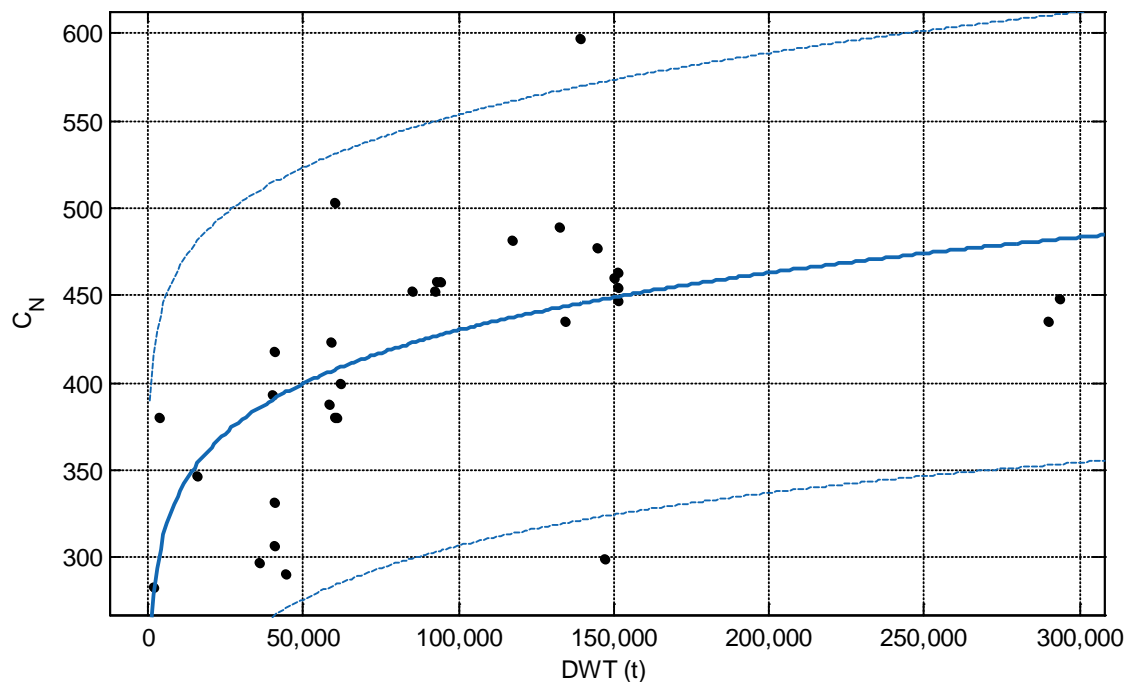
Παρατηρήσεις

Η ποιότητα της προσέγγισης δεν είναι ικανοποιητική. Το συμπέρασμα που λαμβάνεται από το διάγραμμα είναι ότι ο λόγος  $V_{DIESEL}/V_{FUEL}$  μειώνεται όσο αυξάνεται ο όγκος των δεξαμενών καυσίμων. Ο λόγος αυτός κυμαίνεται από 0.03 (για πολύ μεγάλα πλοία) έως 0.53 (για πολύ μικρά πλοία).

## 2.5. Εκτίμηση Ισχύος Πρόωσης

Ο συντελεστής Αγγλικού ναυαρχείου  $C_N$  συσχετίζει την ισχύ MCR (PS) με το εκτόπισμα στο βύθισμα σχεδίασης και την ταχύτητα σχεδίασης του πλοίου  $V_S$  όπως προκύπτει από τον παρακάτω τύπο:

$$C_N = \frac{\Delta^{2/3} * V_S}{P (PS)}$$



Σχήμα 47 Συντελεστής ναυαρχείου συναρτήσει του DWT

### Αποτελέσματα προσέγγισης

General model Power1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 126.7$$

$$b = 0.1062$$

Goodness of fit:

SSE: 1.063e+05

R-square: 0.3493

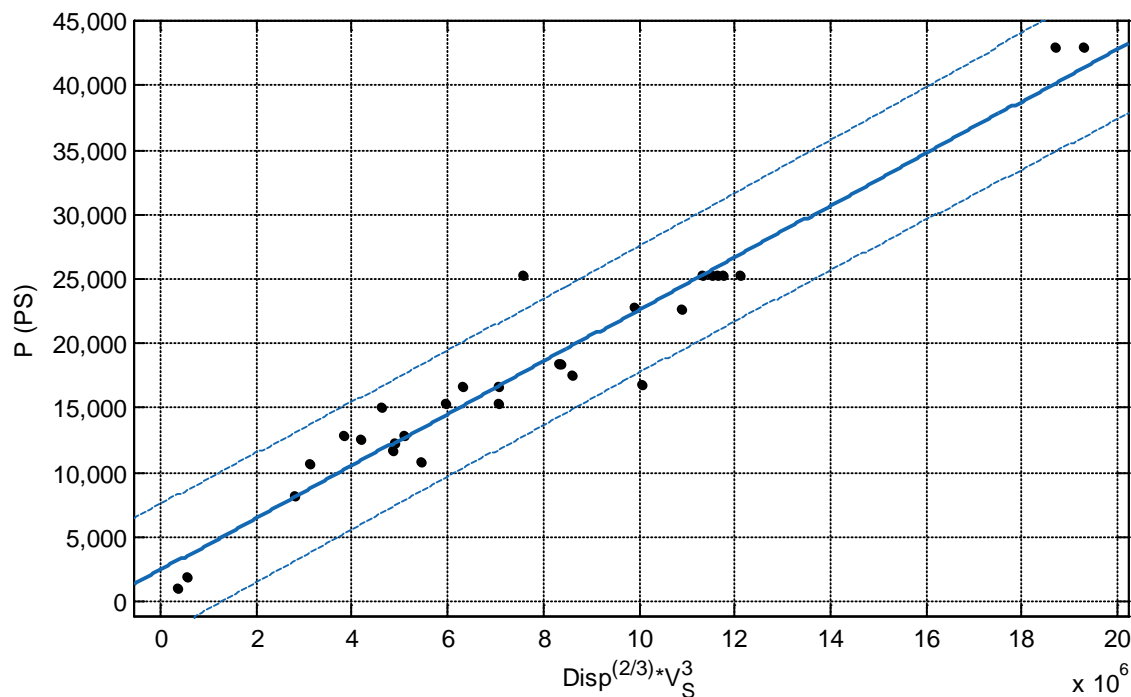
Adjusted R-square: 0.3276

RMSE: 59.52

$$C_N = 126.7 * DWT^{0.1062}$$

### Παρατηρήσεις

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι για πλοία με DWT μεγαλύτερο των 80000 t η συσχέτιση είναι πολύ καλή εκτός από δύο σημεία όπου υπάρχει μεγάλη διασπορά των τιμών του  $C_N$ .

Σχήμα 48 MCR συναρτήσει του  $\Delta$ ,  $V_s$ Αποτελέσματα προσέγγισης

Linear model Poly1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.002022$$

$$p2 = 2417$$

Goodness of fit:

SSE: 1.673e+08

R-square: 0.9359

Adjusted R-square: 0.9338

RMSE: 2362

$$P(PS) = 0.002022 * \left( \Delta^{\frac{2}{3}} * V_s^3 \right) + 2417$$

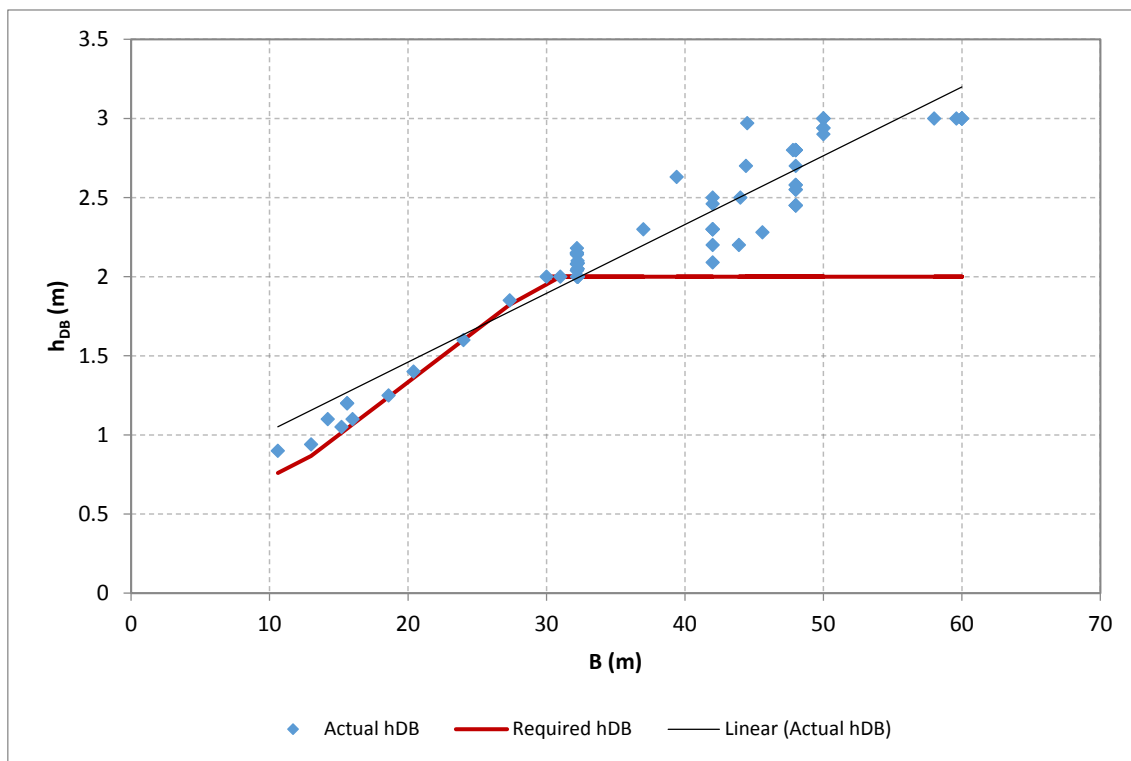
Παρατηρήσεις

Εδώ φαίνεται μια διαφορετική προσέγγιση για το συντελεστή ναυαρχείου όπου επιβεβαιώνεται η αξιοπιστία του. Βλέπουμε κι εδώ ότι μόνο 2 σημεία βρίσκονται εκτός των οριακών γραμμών του διαγράμματος και είναι τα ίδια σημεία που εμφανίζουν μεγάλη διασπορά στο προηγούμενο διάγραμμα.

## 2.6. Λοιπές Παράμετροι Σχεδίασης

### 2.6.1. Ύψος διπυθμένου (Double Bottom)

Από τον κανονισμό της MARPOL έχει αναφερθεί στο Κεφάλαιο 1 ότι απαιτείται ένα ελάχιστο ύψος διπυθμένου (Required  $h_{DB}$ ) το οποίο ορίζεται ανάλογα με το DWT του πλοίου και υπολογίζεται συναρτήσει του πλάτους του. Παρακάτω φαίνονται οι τιμές του απαιτούμενου και του πραγματικού ύψους διπυθμένου συναρτήσει του πλάτους του πλοίου:



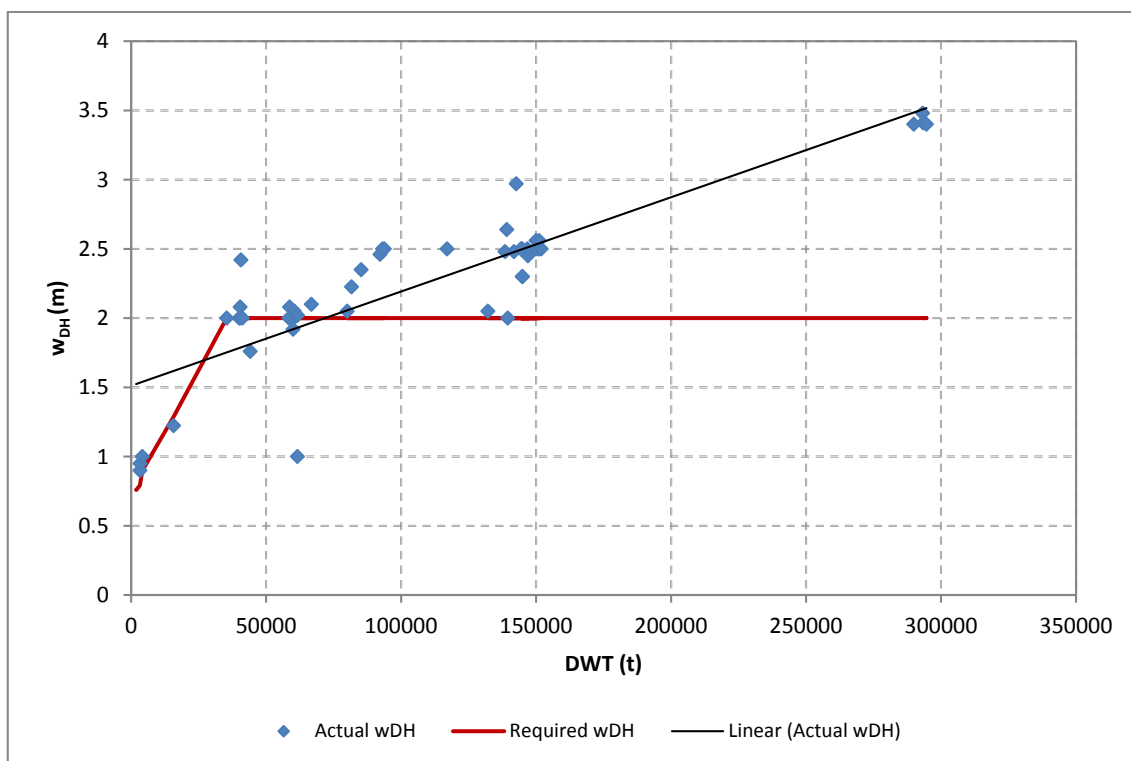
Σχήμα 49 Απαιτούμενο και πραγματικό ύψος διπυθμένου  $h_{DB}$  συναρτήσει του  $B$

#### Παρατηρήσεις

Η κόκκινη γραμμή δείχνει το όριο πάνω από το οποίο μπορεί να βρίσκεται το ύψος διπυθμένου. Από τη σύγκριση φαίνεται ότι ο κανονισμός ικανοποιείται για όλα τα πλοία.

### 2.6.2. Απόσταση διπλού τοιχώματος (Double Hull)

Όμοια με το ύψος διπυθμένου η MARPOL ορίζει την ελάχιστη απόσταση του διπλού (εσωτερικού) τοιχώματος συναρτήσει του DWT του πλοίου:

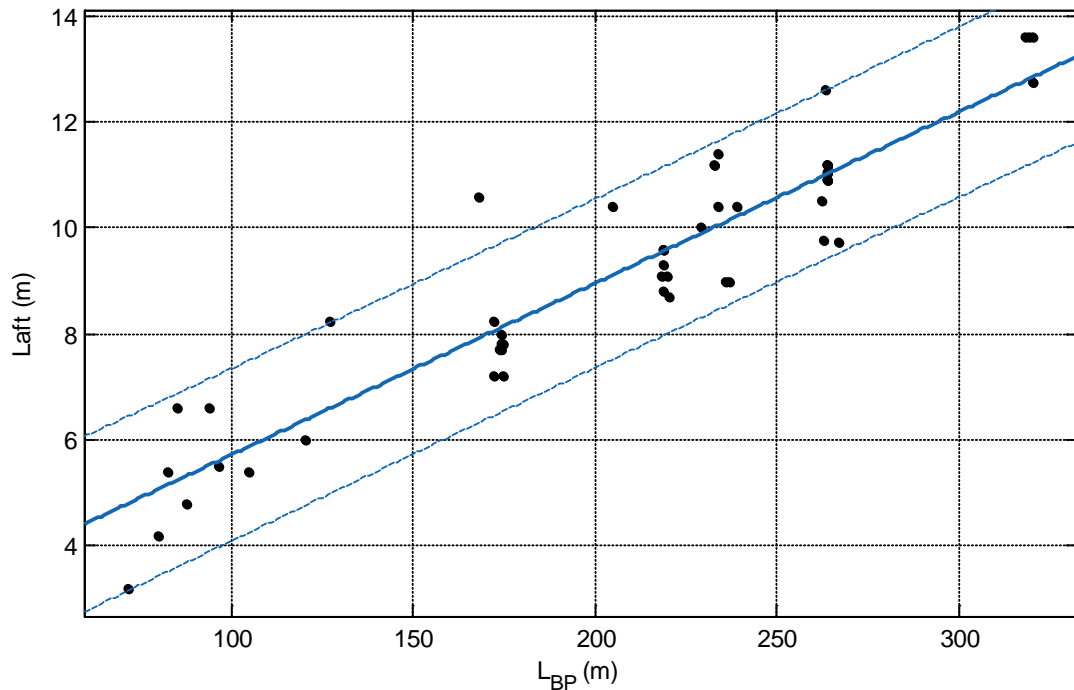


Σχήμα 50 Απαιτούμενη και πραγματική απόσταση διπλού τοιχώματος  $w_{DH}$  συναρτήσει του DWT

#### Παρατηρήσεις

Κι εδώ η κόκκινη γραμμή ορίζει την ελάχιστη απόσταση που μπορεί να επιλεγεί για το διπλό τοίχωμα που όμως παρατηρείται ότι δεν ικανοποιείται ο κανονισμός για κάποιες περιπτώσεις.

### 2.6.3. Μήκος πρυμναίου τμήματος



Σχήμα 51  $L_{AFT}$  συναρτήσει του  $L_{BP}$

#### Αποτελέσματα προσέγγισης

Linear model Poly1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.03237$$

$$p2 = 2.482$$

Goodness of fit:

SSE: 43.95

R-square: 0.8784

Adjusted R-square: 0.8767

RMSE: 0.7924

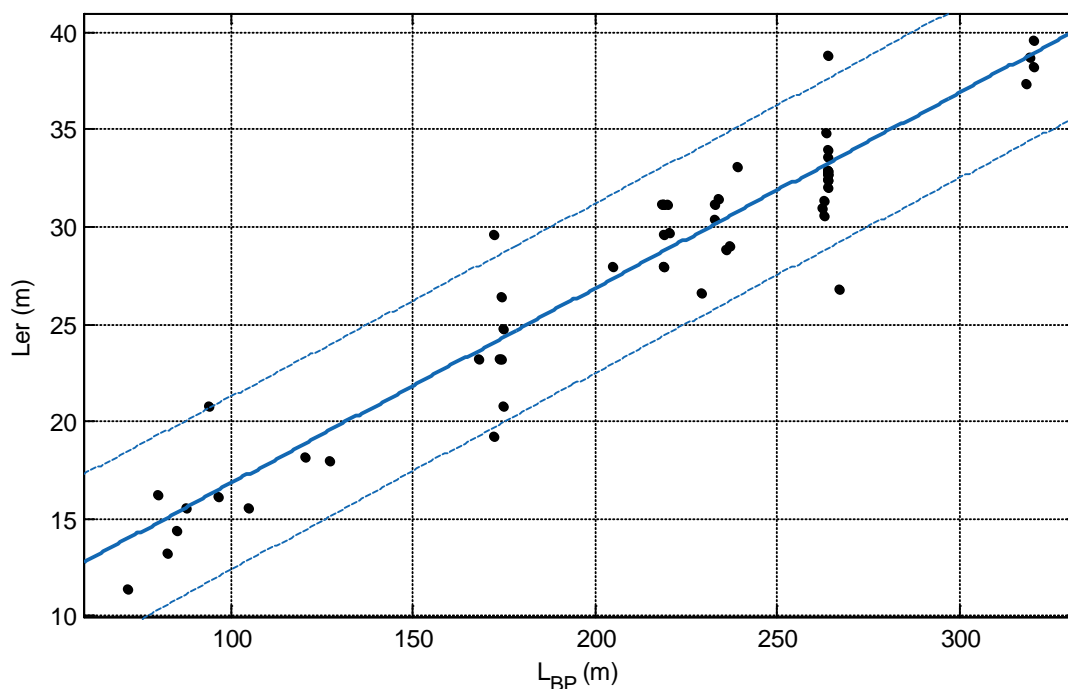
$$L_{AFT} = 0.03237 * L_{BP} + 2.482$$

#### Παρατηρήσεις

Ο παραπάνω εμπειρικός τύπος μπορεί να μας δώσει μια αρχική εκτίμηση για την έκταση του πρυμναίου τμήματος του πλοίου. Οι αποκλίσεις που εμφανίζονται είναι λογικές καθώς τα πλοία μπορεί διαφέρουν στην ισαπόσταση νομέων επομένως υπάρχει απόκλιση στο ακριβές μήκος η οποία όμως δεν ξεπερνάει τα  $\pm 2$  m.



## 2.6.4. Μήκος μηχανοστασίου

Σχήμα 52  $L_{ER}$  συναρτήσει του  $L_{BP}$ Αποτελέσματα προσέγγισης

Linear model Poly1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.1005$$

$$p2 = 6.766$$

Goodness of fit:

SSE: 329.1

R-square: 0.9029

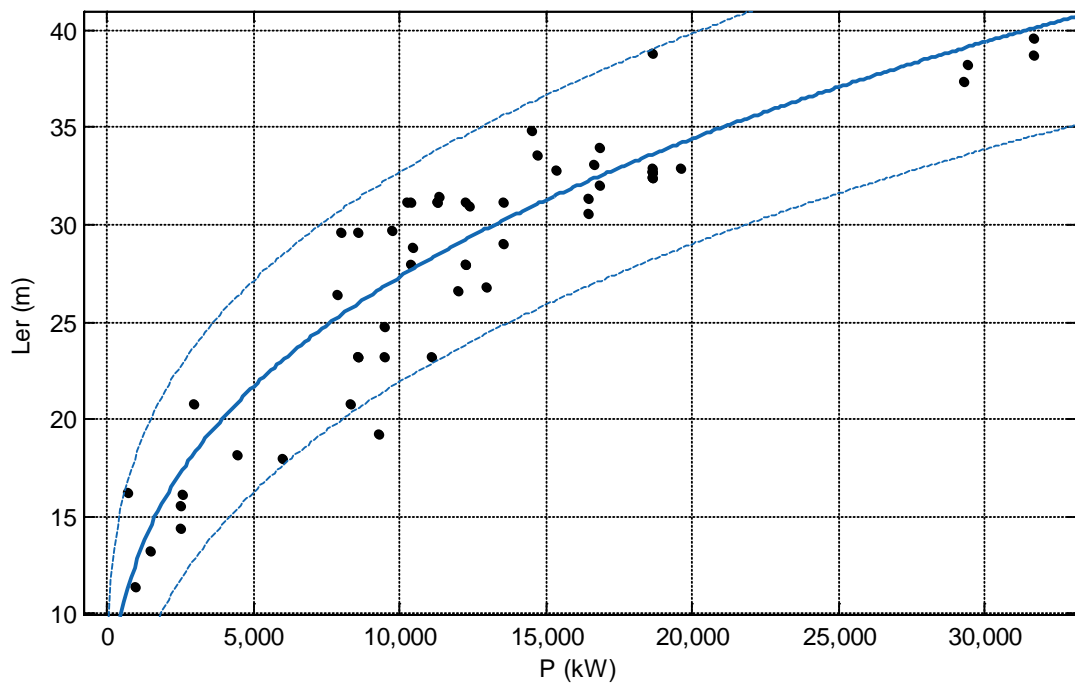
Adjusted R-square: 0.9015

RMSE: 2.168

$$L_{ER} = 0.1005 * L_{BP} + 6.766$$

Παρατηρήσεις

Για την έκταση του χώρου μηχανοστασίου μπορεί να γίνει μια αρχική εκτίμηση από το μήκος του πλοίου με ικανοποιητική ακρίβεια. Όπως και για το πρυμναίο τμήμα έτσι κι εδώ υπάρχουν αποκλίσεις οι οποίες φαίνονται σε μεγάλο βαθμό για κάποιες περιοχές με μήκος πλοίου περίπου 175 m και 260 m. Η εξήγηση κι εδώ στηρίζεται εν μέρει στη διαφορετική ισαπόσταση νομέων που χρησιμοποιείται αλλά και στις διαφορετικές απαιτήσεις μηχανολογικής εγκατάστασης που υπάρχουν σε κάθε πλοίο και διαμορφώνουν το χώρο του μηχανοστασίου.



Σχήμα 53  $L_{ER}$  συναρτήσει της  $MCR$

#### Αποτελέσματα προσέγγισης

General model Power1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 1.268$$

$$b = 0.3334$$

Goodness of fit:

SSE: 488

R-square: 0.8481

Adjusted R-square: 0.8459

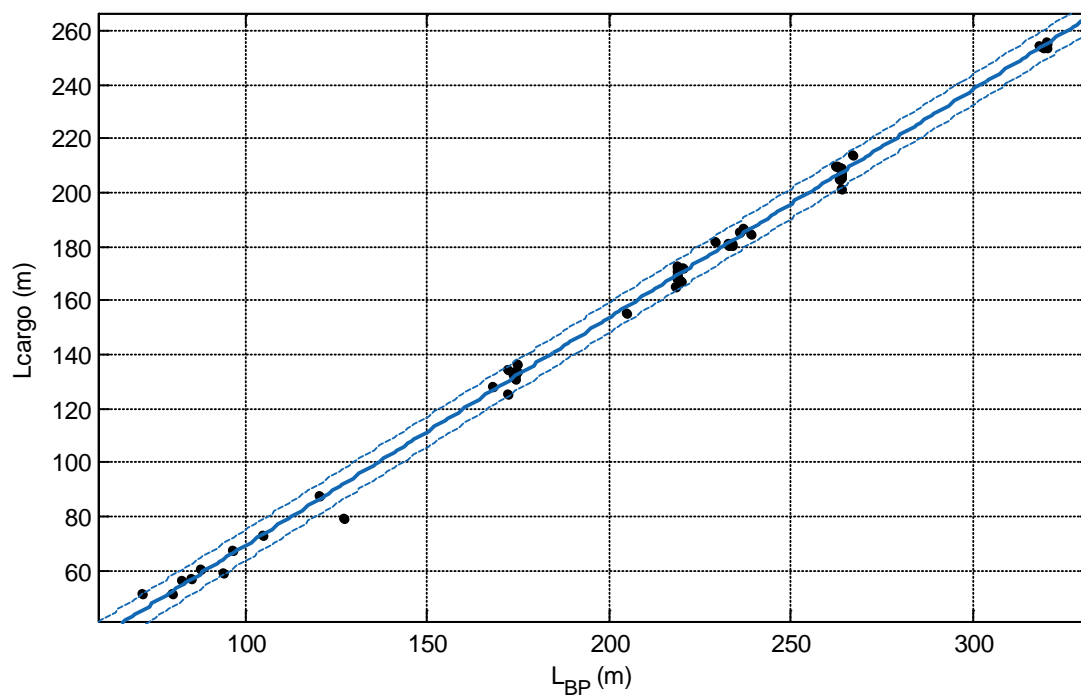
RMSE: 2.679

$$L_{ER} = 1.268 * P^{0.3334}$$

#### Παρατηρήσεις

Ο χώρος μηχανοστασίου επομένως και το μήκος του εξαρτάται άμεσα από τη μηχανολογική εγκατάσταση όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Η ισχύς αποτελεί μια ένδειξη του μεγέθους της κύριας μηχανής και των βοηθητικών μηχανημάτων που χρησιμοποιούνται.

## 2.6.5. Μήκος χώρου φορτίου

Σχήμα 54  $L_{CARGO}$  συναρτήσεσι του  $L_{BP}$ Αποτελέσματα προσέγγισης

Linear model Poly1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.8441$$

$$p2 = -15.14$$

Goodness of fit:

SSE: 540.5

R-square: 0.9975

Adjusted R-square: 0.9975

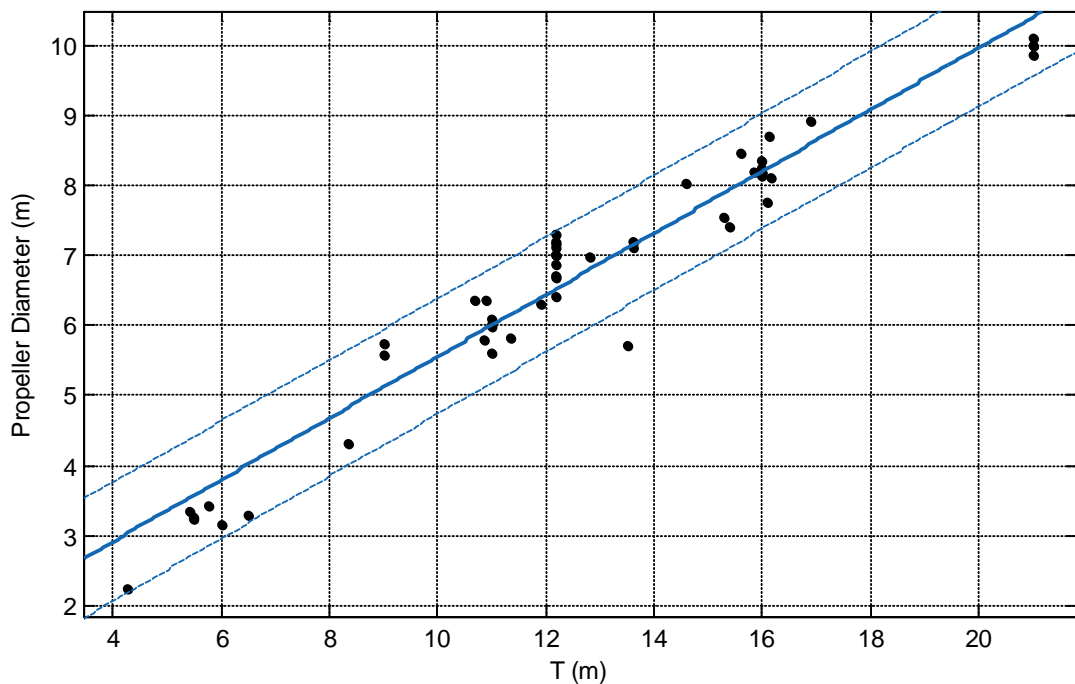
RMSE: 2.779

$$L_{CARGO} = 0.8441 * L_{BP} - 15.14$$

Παρατηρήσεις

Το μήκος του χώρου φορτίου προσεγγίζεται με πολύ μεγάλη ακρίβεια από το μήκος του πλοίου. Οι οριακές ευθείες είναι πολύ κοντά στην προσεγγιστική ευθεία.

### 2.6.6. Διάμετρος έλικας



Σχήμα 55 Διάμετρος έλικας συναρτήσει του  $T$

#### Αποτελέσματα προσέγγισης

Linear model Poly1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.4404$$

$$p2 = 1.156$$

Goodness of fit:

SSE: 11.13

R-square: 0.9462

Adjusted R-square: 0.9454

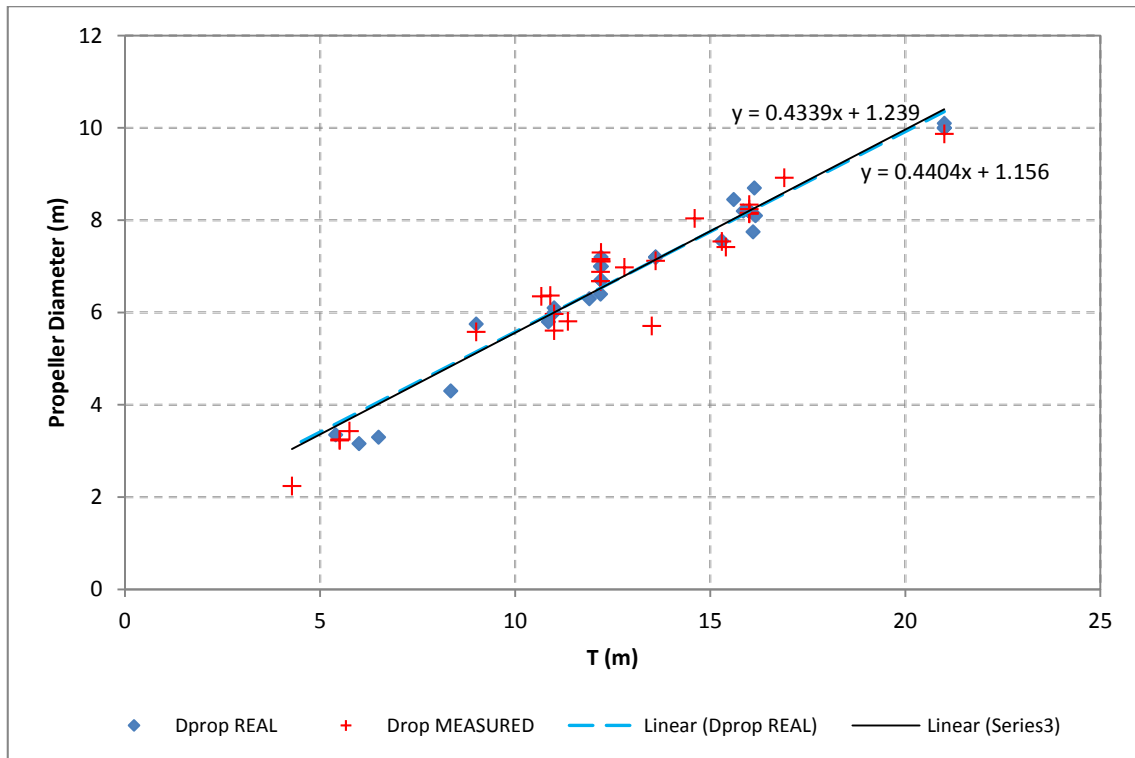
RMSE: 0.4075

$$D_{PROP} = 0.4404 * T + 1.156$$

#### Παρατηρήσεις

Η διάμετρος της έλικας εξαρτάται άμεσα από το βύθισμα του πλοίου καθώς απαιτείται πλήρης βύθιση της έλικας. Ο εμπειρικός τύπος προσεγγίζει ικανοποιητικά τη διάμετρο της έλικας καλύπτοντας παράλληλα και την παραπάνω απαίτηση.

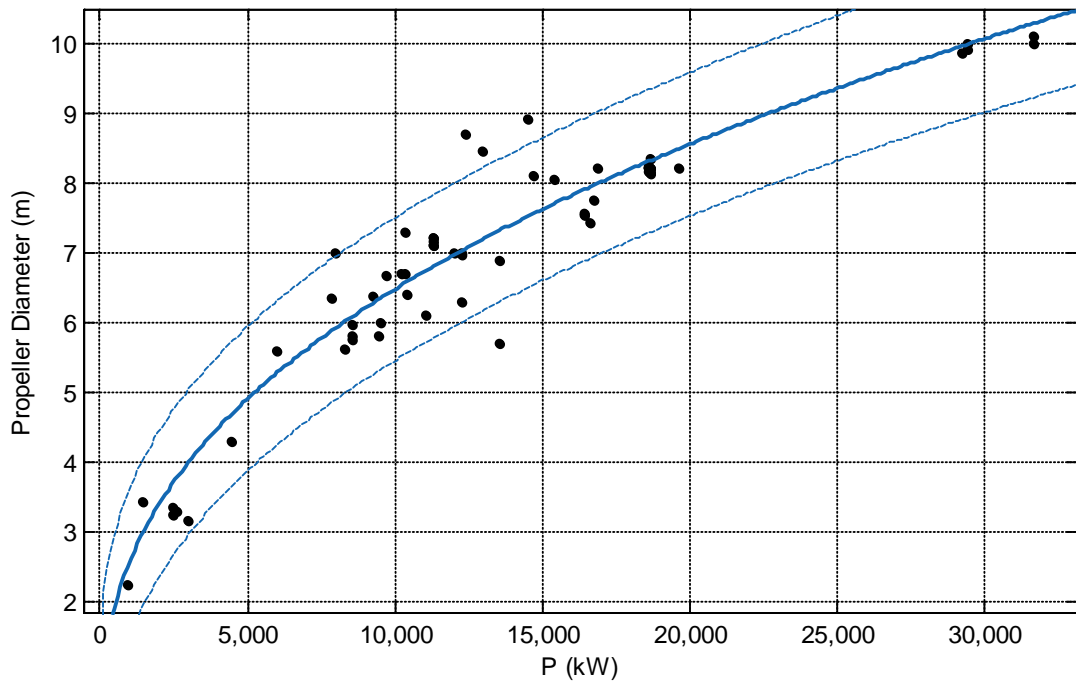
Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι σε κάποιες περιπτώσεις η διάμετρος της έλικας χρειάστηκε να μετρηθεί από το σχέδιο γενικής διάταξης εφόσον δεν υπήρχαν δεδομένα από τα χειρίδια. Σε μια τέτοια περίπτωση εγκυμονούν κίνδυνοι ώστε η τιμή της διαμέτρου που μετριέται να μην είναι ακριβής λόγω λανθασμένης κλίμακας στο σχέδιο κλπ. Επομένως θα ήταν χρήσιμο να παρατεθεί το παρακάτω συγκριτικό διάγραμμα που φαίνονται ποιες τιμές αναφέρονται σε πραγματικές ή μετρήσιμες. Στο διάγραμμα αυτό φαίνεται η προσεγγιστική ευθεία που προκύπτει από όλες τις τιμές (μαύρη συνεχής γραμμή) και μόνο από τις πραγματικές τιμές διαμέτρου έλικας (μπλε διακεκομμένη γραμμή). Βλέπουμε ότι οι συντελεστές των εξισώσεων που προκύπτουν για κάθε περίπτωση βρίσκονται πολύ κοντά και οι προσεγγιστικές ευθείες σχεδόν ταυτίζονται η μία με την άλλη επομένως οι τιμές που μετρήθηκαν δεν αλλοιώνουν τον προσεγγιστικό τύπο.



Σχήμα 56 Πραγματική και μετρήσιμη διάμετρος έλικας συναρτήσει του T

### Παρατηρήσεις

- Τύπος από όλα τα πλοία:  $D_{PROP} = 0.4404 * T + 1.156$
- Τύπος μόνο από τις πραγματικές τιμές:  $D_{PROP} = 0.4339 * T + 1.239$



Σχήμα 57 Διάμετρος έλικας συναρτήσει της MCR

#### Αποτελέσματα προσέγγισης

General model Power1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.1608$$

$$b = 0.4012$$

Goodness of fit:

SSE: 17.31

R-square: 0.9195

Adjusted R-square: 0.9183

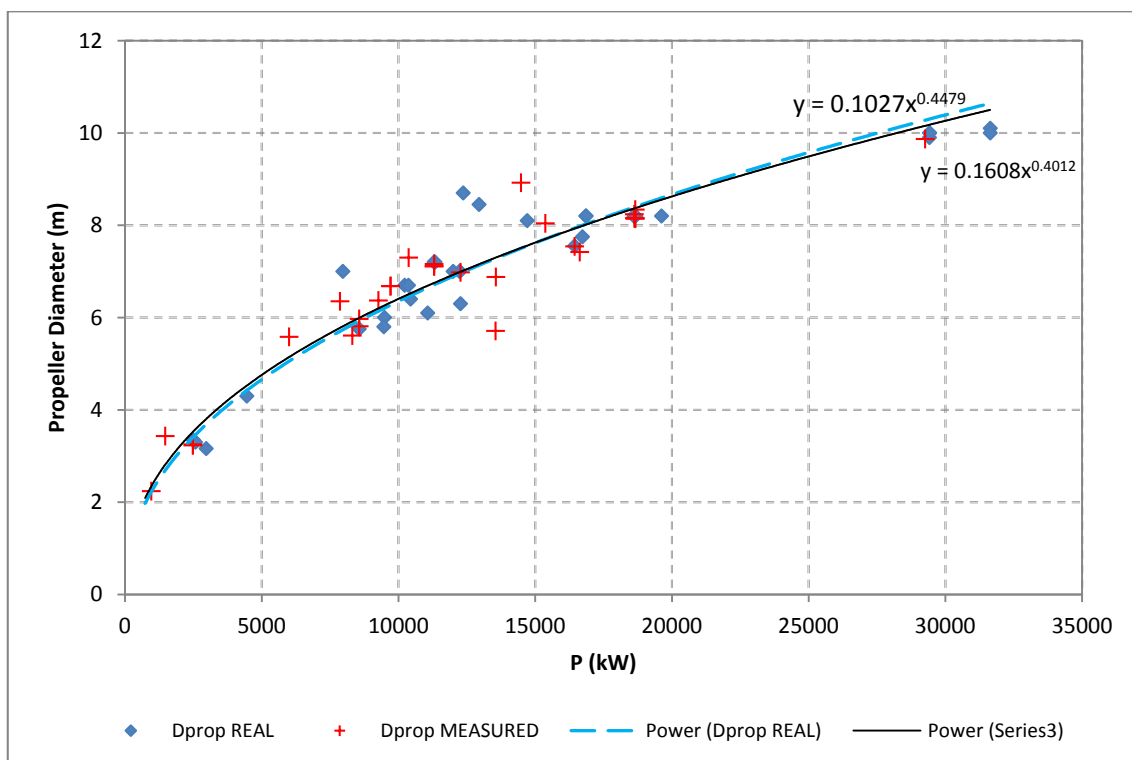
RMSE: 0.5083

$$D_{PROP} = 0.1608 * P^{0.4012}$$

#### Παρατηρήσεις

Η ισχύς MCR που επιλέγεται υπολογίζεται από την απαιτούμενη ισχύ της έλικας (SHP) η οποία υπολογίζεται συναρτήσει της αντίστασης του πλοίου και της έλικας που επιλέγεται, από τα κύρια χαρακτηριστικά της οποίας είναι η διάμετρος.

Όμοια με προηγούμενο διάγραμμα κι εδώ παρουσιάζουμε συγκριτικά την προσεγγιστική καμπύλη που προκύπτει από όλες τις τιμές διαμέτρου έλικας και μόνο από τις πραγματικές. Εδώ, παρουσιάζεται μια μεγαλύτερη απόκλιση στους συντελεστές των εξισώσεων αλλά και πάλι η επίδραση των τιμών που έχουν μετρηθεί δεν είναι τόσο σημαντική.



Σχήμα 58 Πραγματική και μετρήσιμη διάμετρος έλικας συναρτήσει της MCR

#### Παρατηρήσεις

- Τύπος από όλα τα πλοία:  $D_{PROP} = 0.1608 * T^{0.4012}$
- Τύπος μόνο από τις πραγματικές τιμές:  $D_{PROP} = 0.1027 * T^{0.4479}$

### 3. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται η ανάπτυξη λογισμικού προμελέτης πλοίων μεταφοράς υγρού φορτίου. Ο χρήστης του προγράμματος (σχεδιαστής) θα εισάγει κάποιες βασικές παραμέτρους σχεδίασης σύμφωνα με τις απαιτήσεις του και το πρόγραμμα θα εκτελεί μια σειρά υπολογισμών που θα επιστρέφει τα χαρακτηριστικά σχεδίασης που προκύπτουν στη φάση της προμελέτης.

Η αλληλεπίδραση του χρήστη με το πρόγραμμα γίνεται μέσω ενός αρχείου εισαγωγής των δεδομένων του προγράμματος (Input). Το αρχείο είναι μορφής Microsoft Excel που μπορεί να «διαβάσει» το πρόγραμμα και περιέχει όλα τα απαραίτητα δεδομένα που χρειάζονται για να γίνουν οι υπολογισμοί. Ο χρήστης θα συμπληρώνει το αρχείο με όλα τα απαραίτητα δεδομένα και στη συνέχεια θα εκτελείται το πρόγραμμα. Στις παρακάτω ενότητες που περιγράφονται αναλυτικά οι υπολογισμοί αναφέρονται σε κάθε περίπτωση οι παράμετροι που χρειάζεται να εισαχθούν από το χρήστη και βρίσκονται στο αρχείο Input. Οι βασικές παράμετροι σχεδίασης σε πρώτη φάση είναι οι παρακάτω:

- $L_{BP}$ : μήκος μεταξύ καθέτων (m).
- $B$ : πλάτος (m).
- $D$ : κοίλο (m).
- $T$ : βύθισμα σχεδίασης (m).
- $C_B$ : συντελεστής γάστρας.

Για τον υπολογισμό διαφόρων μεγεθών στην πορεία του προγράμματος χρησιμοποιούνται οι προσεγγιστικοί τύποι που προέκυψαν από τη στατιστική ανάλυση (βλ. Κεφάλαιο 2) οι οποίοι εξαρτώνται σε πολύ σημαντικό βαθμό από τα παραπάνω μεγέθη. Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 1 τα πλοία του δείγματός μας περιορίζονται στα όρια που ορίζουν οι λόγοι των κυρίων διαστάσεών τους. Προκειμένου, λοιπόν, οι προσεγγιστικοί τύποι να μπορούν να χρησιμοποιηθούν με ασφάλεια θα πρέπει τα υπό μελέτη πλοία να βρίσκονται μέσα στα όρια των παραπάνω λόγων. Επομένως, θα ήταν χρήσιμο να τεθούν αρχικά κάποιοι περιορισμοί για τις παραπάνω μεταβλητές που θα εισάγει ο χρήστης οι οποίες θα πρέπει να οριοθετούνται στις παρακάτω τιμές:

Πίνακας 5 Όρια δεδομένων κυρίων διαστάσεων

	MIN	MAX
$L_{BP}/B$	5.22	6.84
$B/T$	2.26	3.45
$B/D$	1.54	2.37
$C_B$	0.76	0.84

Το πρόγραμμα καλείται να κάνει έναν έλεγχο των παραπάνω μεγεθών και να επιστρέφει στο χρήστη μήνυμα σε περίπτωση που κάποια από τα πλοία δεν βρίσκεται εντός των επιτρεπτών ορίων. Σε κάθε περίπτωση το πρόγραμμα συνεχίζει να εκτελείται.



### 3.1. Υπολογισμός κύριων χαρακτηριστικών

Από τις παραπάνω βασικές παραμέτρους σχεδίασης υπολογίζονται σε πρώτη φάση κάποια βασικά χαρακτηριστικά του πλοίου όπως:

- ✓ Εκτόπισμα (Displacement): υπολογίζεται από τις κύριες διαστάσεις του πλοίου από την παρακάτω σχέση υδροστατικής για το βύθισμα σχεδίασης:

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

Όπου  $\gamma$  το ειδικό βάρος του θαλασσινού νερού ( $1.025 \text{ t/m}^3$ ) 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 σκάφους (Lightship): υπολογίζεται από προσεγγιστικό τύπο που έχει προκύψει από τη στατιστική ανάλυση:

$$LS = 0.07422 * L_{BP} * B * D + 2297$$

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

$$DWT = \Delta - LS$$

Τα παραπάνω μεγέθη θα πρέπει να υπολογιστούν και για το βύθισμα αντοχής ( $T_{SCANT}$ ) το οποίο υπολογίζεται από τον προσεγγιστικό τύπο:

$$T_{SCANT} = 1.031 * T + 0.8677$$

Για να υπολογίσουμε το εκτόπισμα του πλοίου στο παραπάνω βύθισμα αντοχής ( $T_{SCANT}$ ) θα χρησιμοποιήσουμε το μέγεθος TPC που μας δίνει τη μεταβολή του εκτοπίσματος ανά 1cm μεταβολής βυθίσματος. Το TPC ( $\text{t/cm}$ ) υπολογίζεται από τον προσεγγιστικό τύπο:

$$TPC = 0.009289 * L_{BP} * B + 0.135$$

Επομένως από τον ορισμό του TPC προκύπτει το εκτόπισμα στο βύθισμα αντοχής ( $\Delta_{SCANT}$ ):

$$TPC = \frac{\delta\Delta}{\delta T} \rightarrow \Delta_{SCANT} = \Delta + TPC * (T_{SCANT} - T) * 100$$

Το DWT στο βύθισμα αντοχής ( $DWT_{SCANT}$ ) θα είναι τελικά:

$$DWT_{SCANT} = \Delta_{SCANT} - LS$$

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

$$V = L_{BP} * B * T * C_B$$

- ✓ Πρισματικός συντελεστής ( $C_P$ ): υπολογίστηκε με τη χρήση προσεγγιστικού τύπου που προέκυψε από τη στατιστική ανάλυση:

$$C_P = 0.985 * C_B + 0.01485$$

- ✓ Συντελεστής μέσης τομής ( $C_M$ ): υπολογίστηκε από τη σχέση:

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

- ✓ Συντελεστής ισάλου επιφάνειας ( $C_{WL}$ ): από την υδροστατική έχοντας υπολογίσει παραπάνω το TPC μπορεί να υπολογιστεί η ισάλος επιφάνεια ( $A_{WL}$ ) και κατ' επέκταση ο συντελεστής ισάλου επιφάνειας:

$$TPC = \frac{\gamma * A_{WL}}{100} \rightarrow A_{WL} = \frac{TPC * 100}{\gamma}$$

$$C_{WL} = \frac{A_{WL}}{L_{BP} * B}$$

- ✓ Ολική χωρητικότητα (Gross Tonnage): υπολογισμός από τον προσεγγιστικό τύπο:

$$GT = 0.2756 * L_{BP} * B * D + 672.2$$

- ✓ Καθαρή χωρητικότητα (Net Tonnage): υπολογισμός από τον προσεγγιστικό τύπο:

$$NT = 0.6908 * GT - 5769$$

### 3.2. Έλεγχος με βάση τους κανονισμούς

Εφόσον έχουν προσδιοριστεί αρχικά οι κύριες διαστάσεις και τα χαρακτηριστικά του υπό σχεδίαση πλοίου μπορεί πλέον να γίνει έλεγχος με βάση τα κριτήρια κάποιων κανονισμών ώστε να κριθεί αν μια σχεδίαση είναι αποδεκτή ή όχι.

#### 3.2.1. Έλεγχος κανονισμών MARPOL 73/78

Αρχικά, μπορεί να γίνει έλεγχος για το ύψος διπυθμένου  $h_{DB}$  και την απόσταση του διπλού τοιχώματος  $w_{DH}$  που εισάγονται από το χρήστη στο αρχείο Input του προγράμματος. Όπως έχει αναφερθεί στο Κεφάλαιο 1, από τους κανονισμούς της MARPOL 73/78 υπολογίζονται το ελάχιστο ύψος διπυθμένου και η ελάχιστη απόσταση του διπλού τοιχώματος. Από τον έλεγχο το πρόγραμμα ειδοποιεί το χρήστη όταν δεν ικανοποιείται κάποιος από τους κανονισμούς.

#### 3.2.2. Διεθνής Σύμβαση Γραμμής Φόρτωσης

Σαν δεύτερος έλεγχος γίνεται αυτός του βυθίσματος γραμμής φόρτωσης ( $T_{ILLC}$ ) σύμφωνα με τους κανονισμούς της Διεθνούς Σύμβασης Γραμμής Φόρτωσης (International Convention on Load Lines, 1966). Ο κανονισμός αυτός καθορίζει το μέγιστο επιτρεπόμενο έμφορτο βύθισμα του πλοίου. Ο υπολογισμός του βυθίσματος γραμμής φόρτωσης γίνεται στα παρακάτω βήματα:

1. Υπολογισμός βασικού ύψους εξάλων από πίνακες για πλοία τύπου A.
2. Διόρθωση για συντελεστή γάστρας στο βύθισμα στο 85% του κοίλου.
3. Διόρθωση για πλευρικό ύψος. Θεωρούμε σαν μέσο πάχος ελάσματος καταστρώματος τα 20 mm.
4. Έλεγχος πραγματικού ύψους πλώρας με το ελάχιστο απαιτούμενο για τη χρήση ή μη προστέγου.
5. Διόρθωση για υπερκατασκευές. Ο χρήστης θα χρειαστεί να εισάγει τις διαστάσεις των υπερκατασκευών ( $L_{SS}$ ,  $B_{SS}$ ,  $H_{SS}$ ) στο αρχείο Input.
6. Διόρθωση για σιμότητα. Επιλέγεται μηδενική πραγματική σιμότητα στο πλοίο.
7. Υπολογισμός ύψους εξάλων (Freeboard) και μέγιστου έμφορτου βυθίσματος ( $T_{ILLC}$ ) και έλεγχος με το βύθισμα σχεδίασης. Από τον παραπάνω έλεγχο το πρόγραμμα θα επιστρέφει μήνυμα στον χρήστη σε περίπτωση που το βύθισμα σχεδίασης είναι μεγαλύτερο από το επιτρεπόμενο.

### 3.3. Καθορισμός χώρων και οριοθέτηση φρακτών

Το επόμενο στάδιο της σχεδίασης είναι να καθοριστούν πλήρως οι χώροι του πλοίου και η θέση των φρακτών (Bulkheads) και των κατασκευαστικών νομέων (Frames). Η οριοθέτηση των φρακτών για κάθε τμήμα μπορεί να γίνει με τα επιμέρους μήκη ( $L_i$ ) για ισαπόσταση νομέων (Frame Spacing) που θα δίνεται από το χρήστη. Συγκεκριμένα για το πρυμναίο, πρωραίο τμήμα και το χώρο μηχανοστασίου ο χρήστης θα επιλέγει την επιθυμητή ισαπόσταση νομέων ( $FS_i$ ). Έτσι, το πρόγραμμα θα υπολογίσει τον αριθμό των κατασκευαστικών νομέων ( $FR_i$ ) και το τελικό μήκος κάθε τμήματος και επίσης και την ισαπόσταση νομέων για το χώρο φορτίου.

Αρχικά, με εμπειρικούς τύπους που προκύπτουν από τη στατιστική ανάλυση μπορούν να προσδιοριστούν το μήκος του πρυμναίου τμήματος ( $L_{AFT}$ ) και του μηχανοστασίου ( $L_{ER}$ ). Δεδομένης της ισαπόστασης των νομέων του κάθε τμήματος υπολογίζεται ο ακριβής αριθμός των κατασκευαστικών νομέων ( $FR'_i$ ) και το τελικό μήκος κάθε τμήματος ( $L'_i$ ) ως εξής:

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

Όσον αφορά το χώρο φορτίου, το μήκος του εξαρτάται από τη θέση της πρωραίας φρακτής σύγκρουσης που σύμφωνα με τον κανονισμό της SOLAS περιορίζεται σύμφωνα με τα παρακάτω όρια:

$$\min \begin{cases} 5\%L \\ 10 \text{ m} \end{cases} \leq d \leq \max \begin{cases} 8\%L \\ 5\%L + 3 \text{ m} \end{cases}$$

Όπου  $d$  η απόσταση της πρωραίας φρακτής σύγκρουσης από την πρωραία κάθετο (F.P.) και  $L$  το μήκος υποδιαίρεσης όπως ορίζεται από τους κανονισμούς της Διεθνούς Σύμβασης Γραμμής Φόρτωσης (International Convention on Load Lines, 1966). Για τους υπολογισμούς στην προκειμένη περίπτωση για  $L$  χρησιμοποιείται το μήκος μεταξύ καθέτων του πλοίου  $L_{BP}$ .

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

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

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

Άρα η τελική ανισότητα είναι:

$$\min \begin{cases} 5\%L \\ 10 \text{ m} \end{cases} \leq d + a \leq \max \begin{cases} 8\%L \\ 5\%L + 3 \text{ m} \end{cases}$$

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

$$L_{FWD,min} = d_{min} = \min \begin{cases} 5\%L \\ 10 \text{ m} \end{cases} - a$$

$$L_{FWD,max} = d_{max} = \max \begin{cases} 8\%L \\ 5\%L + 3 \text{ m} \end{cases} - a$$

Προκειμένου να ικανοποιηθεί ο κανονισμός τοποθετούμε την πρωραία φρακτική στο μέσο των ορίων δηλαδή:

$$L_{FWD} = \frac{L_{FWD,max} + L_{FWD,min}}{2}$$

Έτσι μπορεί πλέον να οριστεί και το μήκος του χώρου φορτίου:

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

Για τον υπολογισμό της ισαπόστασης των νομέων στο χώρο φορτίου ο σχεδιαστής πρέπει να λάβει υπόψη:

1. Τον αριθμό των εγκαρσίων φρακτών που ορίζουν τον αριθμό των δεξαμενών.
2. Το γεγονός ότι οι εγκάρσιες φρακτές θα πρέπει να «πέφτουν» πάνω σε κατασκευαστικούς νομείς.
3. Το χώρο που καταλαμβάνουν οι δεξαμενές slop που υπάρχουν στα δεξαμενόπλοια.

Για τους παραπάνω λόγους ο χρήστης καλείται να δώσει στο αρχείο Input τις ακόλουθες παραμέτρους:

1. Αριθμό εγκαρσίων φρακτών στο χώρο φορτίου (Cargo Bulkheads).
2. Ένα σταθερό αριθμό νομέων μεταξύ δύο διαδοχικών φρακτών, δηλαδή στο χώρο κάθε δεξαμενής φορτίου ( $FR_{TANK}$ ).
3. Την ισαπόσταση και τον αριθμό των νομέων για τις δεξαμενές slop ( $FS_{SLOP}$ ,  $FR_{SLOP}$ ).

Με βάση τα παραπάνω μπορούμε να ορίσουμε το μήκος των δεξαμενών slop:

$$L_{SLOP} = FR_{SLOP} * FS_{SLOP}$$

Έτσι μπορούμε να καθορίσουμε το μήκος του χώρου φορτίου χωρίς τις δεξαμενές slop και γνωρίζοντας και τον αριθμό των εγκαρσίων φρακτών να βρούμε το μήκος κάθε δεξαμενής:

$$L_{TANK} = \frac{L_{CARGO} - L_{SLOP}}{Cargo\ bulkheads}$$

Τώρα μπορεί πλέον να υπολογιστεί η ισαπόσταση νομέων για κάθε δεξαμενή που είναι και σταθερή σε ολόκληρο το χώρο φορτίου:

$$FS_{CARGO} = \frac{L_{TANK}}{FR_{TANK}} \rightarrow \text{Στρογγυλοποίηση } FS'_{CARGO} \rightarrow L'_{TANK} = FR_{TANK} * FS'_{CARGO}$$

Το τελικό μήκος του χώρου φορτίου θα είναι τότε:

$$L'_{CARGO} = L'_{TANK} * Cargo\ bulkheads + L_{SLOP}$$

Ο τελικός χώρος φορτίου προκύπτει με μετακίνηση της πρωραίας φρακτικής σύγκρουσης επομένως μεταβάλλεται και το μήκος του πρωραίου τμήματος:

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

Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι για τις στρογγυλοποιήσεις στην ισαπόσταση νομέων επιλέγεται να γίνει στρογγυλοποίηση στο εκατοστό του μέτρου (π.χ. 4258 mm→4260 mm) ώστε, όταν υπολογίζονται τα τελικά επιμέρους μήκη, η μετακίνηση των φρακτών να γίνεται σε επίπεδο εκατοστού και έτσι να μην διαφέρουν κατά πολύ από τα αρχικά μήκη που υπολογίστηκαν. Έτσι, δεν χρειάζεται να γίνει έλεγχος ξανά κατά SOLAS για τη νέα θέση της προωραίας φρακτής σύγκρουσης που θα προκύψει από το νέο μήκος του φορτίου.

### 3.4. Υπολογισμός χωρητικότητας δεξαμενών

Στο σημείο αυτό πρέπει να γίνει η ανάλυση του DWT σε επιμέρους κατηγορίες βαρών καθώς και να υπολογιστεί το βάρος της κάθε μίας. Οι κατηγορίες βαρών που υπολογίστηκαν είναι:

- ✓ Fuel Oil: ο όγκος των δεξαμενών καυσίμων Heavy Fuel προσεγγίζεται από τον τύπο:

$$V_{FUEL} = 0.02722 * DWT + 411.8$$

Για ειδικό βάρος καυσίμων Heavy Fuel ίσο με  $0.99 \text{ t/m}^3$  και πλήρωση δεξαμενών στο 98% το βάρος είναι:

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

- ✓ Diesel Oil: ο όγκος των δεξαμενών καυσίμων Diesel προσεγγίζεται από τον τύπο:

$$\frac{V_{DIESEL}}{V_{FUEL}} = 3.851 * (V_{FUEL})^{-0.4686}$$

Για ειδικό βάρος καυσίμων Diesel ίσο με  $0.9 \text{ t/m}^3$  και πλήρωση δεξαμενών στο 98% το βάρος είναι:

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

- ✓ Lubricating Oil: το βάρος των δεξαμενών λιπαντικών θεωρείται ότι αντιστοιχεί στο 3-5% του συνόλου των δεξαμενών Fuel και Diesel (Παπανικολάου, 2009):

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

Για ειδικό βάρος λιπαντικών ίσο με  $0.9 \text{ t/m}^3$  και πλήρωση δεξαμενών στο 98% ο όγκος είναι:

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

- ✓ Fresh Water: ο χρήστης θα δίνει τη ζητούμενη ακτίνα ενέργειας (Range) και ταχύτητα του πλοίου  $V_S$  στο αρχείο Input για να υπολογιστεί η διάρκεια σε μέρες ενός ταξιδιού του πλοίου:

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

Ο αριθμός των μελών του πληρώματος δίνεται από το χρήστη. Θεωρούμε ότι για πόσιμο νερό απαιτούνται  $10\text{--}20 \text{ kg/ανθρωποημέρα}$  και  $200 \text{ kg/ανθρωποημέρα}$  οπότε συνολικά έχουμε (Παπανικολάου, 2009):

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

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

Από την εκτέλεση του προγράμματος προέκυψε ότι γίνεται σε μεγάλο βαθμό υποεκτίμηση της χωρητικότητας του φρέσκου νερού σε σχέση με τα πραγματικά δεδομένα. Επομένως κρίθηκε αναγκαίο να προσθέσουμε στο παραπάνω βάρος μια προσαύξηση της τάξης του 40%.

- ✓ 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):

$$W_{CREW} = \frac{(75 + 60)}{1000} * crew$$

- ✓ Provisions: τα εφόδια που καταναλώνονται κατά τη διάρκεια του ταξιδιού υπολογίζονται στα 7–16 kg/ανθρωποημέρα (Παπανικολάου 2009):

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

- ✓ Constants: από τη στατιστική ανάλυση δεν προέκυψε κάποια σχέση για τα σταθερά βάρη. Από το μέσο όρο των τιμών που έχουμε για υπάρχοντα πλοία επιλέγουμε  $W_{CONSTANTS}=200$  t.
- ✓ Payload: το βάρος του ωφέλιμου φορτίου που προκύπτει τελικά είναι:

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

Ο όγκος των δεξαμενών φορτίου (συμπεριλαμβανομένων των slop tanks) προσεγγίζεται από προσεγγιστικό τύπο που προκύπτει από τη στατιστική ανάλυση των δεδομένων μας:

$$V_{CARGO} = 0.6138 * L_{BP} * B * D - 5447$$

Για τον όγκο μόνο των slop tanks προκύπτει επίσης προσεγγιστικός τύπος:

$$V_{SLOPS} = 0.0248 * V_{CARGO} + 187.3$$

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

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



✓ Όγκος δεξαμενών έρματος (Ballast Water)

Η διάμετρος της έλικας μπορεί να υπολογιστεί από προσεγγιστικό τύπο συναρτήσε του βυθίσματος σχεδίασης:

$$D_{PROP} = 0.4404 * T + 1.156$$

Σύμφωνα με τον κανονισμό της MARPOL 73/78 η ποσότητα έρματος πρέπει να είναι τόσο ώστε να ικανοποιούνται τα παρακάτω κριτήρια:

$$V_{BALLAST} \rightarrow \begin{cases} T_m \geq 2 + 0.02L_{BP} \\ T_A \geq D_{PROP} \\ trim \leq 0.015L_{BP} \end{cases}$$

Από τα παραπάνω κριτήρια ορίζεται το ελάχιστο δυνατό βύθισμα  $T_{min}$  του πλοίου το οποίο αντιστοιχεί στην κατάσταση ερματισμού (Ballast Arrival) και για την οποία υπολογίζεται το εκτόπισμα και το DWT:

$$\Delta_{B.ARRIVAL} = c\gamma * L_{BP} * B * T_{min} * C_{B,T_{min}}$$

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

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

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

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

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

Το ελάχιστο απαιτούμενο βάρος θαλάσσιου έρματος είναι τότε:

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

Και ο ελάχιστος απαιτούμενος όγκος:

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

Η ποσότητα θαλάσσιου έρματος που επιλέγεται υπολογίζεται από τον τύπο:

$$V_{BALLAST} = 0.173 * L_{BP} * B * D + 2856$$

Η ποσότητα αυτή ελέγχεται με την ελάχιστη απαιτούμενη και σε περίπτωση που δεν επαρκεί ο χώρος θαλάσσιου έρματος το πρόγραμμα επιστρέφει προειδοποιητικό μήνυμα στο χρήστη και οριοθετεί την ποσότητα του έρματος να είναι ίση με την ελάχιστη απαιτούμενη.

### 3.5. Υπολογισμός κέντρου βάρους και υδροστατικών

Οι παρακάτω υπολογισμοί για τα κέντρα βάρους και τα υδροστατικά του πλοίου αφορούν την κατάσταση Full Load Departure του πλοίου.

#### 3.5.1. Κέντρα βάρους

- ✓ Cargo Oil: το κέντρο βάρους του φορτίου υπολογίζεται από το μέσο όρο των παρακάτω τύπων:

$$KG_{CARGO} = average \left\{ \begin{array}{l} 0.5765 * D - 0.1577 \\ h_{DB} + 0.52 * (D - h_{DB}) \end{array} \right.$$

$$LCG_{CARGO} = average \left\{ \begin{array}{l} 0.5469 * L_{BP} + 1.905 \\ L_{AFT} + L_{ER} + 0.5 * L_{CARGO} \end{array} \right.$$

- ✓ Lightship: το κέντρο βάρους του Lightship δίνεται από προσεγγιστικούς τύπους:

$$KG_{LS} = 0.3927 * D + 3.571$$

$$LCG_{LS} = 0.5025 * L_{BP} - 10.36$$

- ✓ DWT: το κέντρο βάρους του DWT δίνεται από προσεγγιστικούς τύπους:

$$KG_{DWT} = 0.5957 * D - 0.3888$$

$$LCG_{DWT} = 0.5352 * L_{BP} - 0.6353$$

- ✓ Full Load Departure: ο υπολογισμός του κέντρου βάρους του εκτοπίσματος γίνεται με τη μέθοδο των ροπών:

$$KG = \frac{KG_{DWT} * DWT + KG_{LS} * LS}{DWT + LS}$$

$$LCG = \frac{LCG_{DWT} * DWT + LCG_{LS} * LS}{DWT + LS}$$

### 3.5.2. Υδροστατικά μεγέθη

- ✓ Κέντρο Άντωσης (Centre of Buoyancy): για την κατακόρυφη θέση του κέντρου άντωσης KB δεν προέκυψαν προσεγγιστικοί τύποι επομένως η τιμή του προκύπτει από το μέσο όρο των ήδη υπάρχοντων εμπειρικών τύπων (Παπανικολάου 2009):

$$KB = T * \left( \frac{5}{6} - \frac{C_B}{3 * C_{WL}} \right)$$

$$KB = T * (0.9 - 0.36 * C_M)$$

$$KB = T * (0.9 - 0.3 * C_M - 0.1 * C_B)$$

Για τη διαμήκη θέση του κέντρου άντωσης LCB θα λάβουμε υπόψη τον προσεγγιστικό τύπο της στατιστικής ανάλυσης συναρτήσει του μήκους του πλοίου:

$$LCB = 0.5447 * L_{BP} - 4.263$$

- ✓ Μετάκεντρο: για την εγκάρσια μετακεντρική ακτίνα BM δεν υπήρχαν επαρκή δεδομένα για να γίνει στατιστική ανάλυση επομένως θα υπολογιστεί από εμπειρικό τύπο (Παπανικολάου 2009):

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

Όπου  $C_1$  ο μέσος όρος των παρακάτω συντελεστών:

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

Το μετακεντρικό ύψος τώρα μπορεί να υπολογιστεί από τις σχέσεις υδροστατικής:

$$KM = KB + BM$$

$$GM = KM - KG$$

Στα δεξαμενόπλοια η ύπαρξη ελεύθερων επιφανειών συμβάλλει στην αύξηση του κέντρου βάρους του εκτοπίσματος και κατ' επέκταση στη μείωση του μετακεντρικού ύψους. Ο προσεγγιστικός τύπος που προκύπτει συνδέει το διορθωμένο από ελεύθερες επιφάνειες μετακεντρικό ύψος  $GM_{COR}$  με εκείνο χωρίς τις ελεύθερες επιφάνειες:

$$GM_{COR} = 0.8572 * GM - 0.337$$

- ✓ TPC (Tons Per Centimeter): όπως έχει προαναφερθεί υπολογίζεται από προσεγγιστικό τύπο:

$$TPC = 0.009289 * L_{BP} * B + 0.135$$

- ✓ MTC (Moment to change Trim): υπολογίζεται από προσεγγιστικό τύπο:

$$MTC = 0.01218 * \Delta + 105.1$$

### 3.6. Υπολογισμός αντίστασης και πρόωσης

Ο υπολογισμός της αντίστασης του πλοίου είναι καθοριστικός για τον προσδιορισμό της απαιτούμενης ισχύος πρόωσης και κατ' επέκταση της επιλογής προωστήτριας εγκατάστασης. Η μέθοδος που θεωρήθηκε η πιο κατάλληλη για να προγραμματιστεί στο MATLAB είναι των Holtrop-Mennen 1982 και Holtrop 1984. Στην ουσία οι δύο παραπάνω μέθοδοι ταυτίζονται με τη διαφορά ότι η μέθοδος Holtrop 1984 χρησιμοποιεί κάποιους νέους εμπειρικούς τύπους, για κάποια μεγέθη, που έχουν προκύψει από μια νεότερη στατιστική ανάλυση. Ο χρήστης θα μπορεί να επιλέγει στο αρχείο Input (1982,1984) με ποια από τις δύο μεθόδους επιθυμεί να γίνουν οι υπολογισμοί αντίστασης. Σε περίπτωση που εισάγει λανθασμένη ή καμία τιμή το πρόγραμμα εκτελεί τους υπολογισμούς με τη μέθοδο Holtrop 1984.

Επιπλέον της επιλογής της επιθυμητής μεθόδου για εκτέλεση των υπολογισμών, ο χρήστης καλείται να εισάγει στο αρχείο Input τιμές για τις παρακάτω παραμέτρους που θα χρειαστούν στους υπολογισμούς της μεθόδου:

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

Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή η συνολική αντίσταση του πλοίου απαρτίζεται από τις παρακάτω επιμέρους συνιστώσες:

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

- $R_F$ : αντίσταση τριβής (Frictional Resistance).
- $R_W$ : αντίσταση κυματισμού (Wave Resistance).
- $R_{APP}$ : αντίσταση παρελκομένων (Appendages Resistance).
- $R_B$ : αντίσταση λόγω βολβοειδούς πλώρας (Bulbous Bow Resistance).
- $R_{TR}$ : αντίσταση λόγω βύθισης της πρύμνης (Transom Stern Resistance).
- $R_A$ : αντίσταση λόγω συντελεστή συσχέτισης (Correlation Resistance).
- $1+k_1$ : συντελεστής μορφής γάστρας.

Από τη συνολική αντίσταση προκύπτει και η απαιτούμενη ισχύς ρυμούλκησης:

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

Στη συνέχεια υπολογίζονται κάποιοι συντελεστές πρόωσης που είναι απαραίτητοι για τον προσδιορισμό της κατάλληλης που περιγράφεται στην παρακάτω ενότητα. Οι συντελεστές αυτοί είναι:

- Συντελεστής μείωσης ώσης  $t$  (Thrust deduction factor).
- Ποσοστό ομόρρου  $w$  (Wake fraction).
- Βαθμός απόδοσης σχετικής περιστροφής έλικας  $\eta_R$  (Relative rotative efficiency).
- Λόγος εκτεταμένης επιφάνειας πτερυγίων έλικας  $A_E/A_0$  (Expanded Area Ratio, EAR).

Οι παραπάνω συντελεστές χρησιμεύουν για να υπολογιστούν η απαιτούμενη ώση της έλικας (Thrust) και η ταχύτητα προχώρησης της έλικας  $V_A$ :

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

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

### 3.6.1. Υπολογισμός ισχύος και στροφών έλικας

Έχοντας καθορίσει μέσω της αντίστασης την απαιτούμενη ισχύ ρυμούλκησης και τους συντελεστές πρόωσης μπορούμε για δεδομένη ταχύτητα του πλοίου να επιλέξουμε την κατάλληλη έλικα της σειράς Wageningen-B. Το πρόβλημα υπολογισμού ισχύος και στροφών της έλικας είναι ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης με μεταβλητές τα παρακάτω μεγέθη:

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

Τα όρια των τιμών που μπορούν να πάρουν οι παραπάνω μεταβλητές σχεδίασης για το πρόβλημά μας είναι τα παρακάτω:

Πίνακας 6 Μεταβλητές προβλήματος υπολογισμού έλικας

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

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 παλινδρομικά πολυώνυμα (συναρτήσεις των P/D,  $A_E/A_0$ , Z και J) οι συντελεστές των οποίων είναι γνωστοί για έλικα σειράς Wageningen-B (Oosterveld, Oossanen, 1975 που αναγράφονται στο βιβλίο του Πολίτη, 2008). Ο συντελεστής προχώρησης της έλικας J υπολογίζεται ως εξής:

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

Για την επίλυση του παραπάνω προβλήματος θα πρέπει να ισχύει η σχέση που ορίζει το συντελεστή ώσης της έλικας (περιορισμός προβλήματος):

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

Από τη λύση του προβλήματος και την εύρεση του μέγιστου  $\eta_0$  υπολογίζεται η ισχύς που απαιτεί η έλικα:

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

Όπου  $\eta_S$  ο βαθμός απόδοσης του άξονα που θεωρείται ίσος με 0.99.

### 3.6.2. Παραδείγματα υπολογισμών

Παρακάτω ακολουθεί ένα τυπικό παράδειγμα υπολογισμών που περιλαμβάνεται στη μέθοδο των Holtrop-Mennen 1982 και χρησιμοποιείται για να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα με αυτά του προγράμματός μας και να επαληθεύσουμε την ορθότητά του.

Τα δεδομένα του προγράμματος θα είναι:

*Πίνακας 7 Δεδομένα παραδείγματος υπολογισμού αντίστασης*

$L_{WL}$ (m)	205
$L_{BP}$ (m)	200
B (m)	32
$T_F$ (m)	10
$T_A$ (m)	10
Volume (m <sup>3</sup> )	37500
lcb	-0.75
$A_{BT}$ (m <sup>2</sup> )	20
$h_B$ (m)	4
$C_M$	0.98
$C_{WL}$	0.75
$C_P$	0.5833
$A_T$ (m <sup>2</sup> )	16
$S_{app}$ (m <sup>2</sup> )	50
c_stern	10
D	8
Z	4
V (kn)	25

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα αποτελέσματα του προγράμματος που εκτελέστηκε και για τις δύο μεθόδους.

Πίνακας 8 Αποτελέσματα παραδείγματος υπολογισμού αντίστασης

	<b>EXAMPLE Holtrop-Mennen 1982</b>	<b>MATLAB Holtrop-Mennen 1982</b>	<b>MATLAB Holtrop 1984</b>
$R_F$ (kN)	869.63	869.47	869.49
$R_{APP}$ (kN)	8.83	8.83	8.83
$R_W$ (kN)	557.11	556.63	553.53
$R_B$ (kN)	0.049	0.049	0.049
$R_{TR}$ (kN)	0	0	0
$R_A$ (kN)	221.98	220.53	220.53
$R_{TOTAL}$ (kN)	1793.26	1791.54	1813.36
EHP (kW)	23063	23039	23320
w	0.2584	0.2599	0.2445
t	0.1747	0.1747	0.1984
Thrust (kN)	2172.75	2170.69	2262.11
EAR	0.7393	0.7388	0.7615
$\eta_R$	0.9931	0.9931	0.9918
$\eta_0$	0.6416	0.6430	0.6416
n	99.564	98.807	100.201
SHP (kW)	32621	32678	34891

Από τα παραπάνω αποτελέσματα φαίνεται ότι όσον αφορά τη μέθοδο Holtrop-Mennen 1982 το πρόγραμμα έχει πολύ μεγάλη ακρίβεια. Για τη μέθοδο Holtrop 1984 όπως είναι αναμενόμενο εμφανίζονται κάποιες αποκλίσεις που οφείλονται στους διαφορετικούς μαθηματικούς τύπους υπολογισμών για κάποια μεγέθη. Συγκρίνοντας γενικά τις δύο μεθόδους μεταξύ τους βλέπουμε ότι η Holtrop 1984 κάνει μια υπερεκτίμηση στη συνολική αντίσταση  $R_{TOTAL}$  της τάξης του 1% η οποία οδηγεί σε αυξημένη ώση και κατ' επέκταση αυξημένη απαιτούμενη ισχύ κατά 7%.

### 3.7. Μεθοδολογία επιλογής μηχανολογικής εγκατάστασης

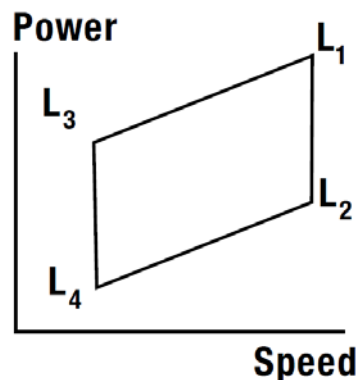
Από τις παραπάνω μεθόδους έχει καθοριστεί η απαίτηση ισχύος (SHP) και στροφών της έλικας. Ωστόσο οι παραπάνω υπολογισμοί αντίστασης και έλικας έχουν γίνει για ιδανικές καταστάσεις θάλασσας (ήρεμο νερό) και καθαρής γάστρας. Προκειμένου να λάβουμε υπόψη τη ρυπασμένη γάστρα (Fouled Hull) και τις άσχημες καταστάσεις θάλασσας που μπορεί να εμφανιστούν πρέπει να λάβουμε υπόψη ένα περιθώριο θάλασσας (Sea Margin) 15% στην υπολογιζόμενη ισχύ SHP. Το σημείο λειτουργίας που προκύπτει τότε είναι το σημείο NCR (Nominal Continuous Rating) με ισχύ ίση με το 90% της μέγιστης συνεχούς ισχύος MCR (Maximum Continuous Rating). Συνοπτικά λοιπόν έχουμε για τα παραπάνω:

$$NCR = \frac{SHP}{0.85}$$

$$MCR = \frac{NCR}{0.9} = \frac{SHP}{0.9 * 0.85}$$

Η επιλογή του κατάλληλου κινητήρα θα γίνει από μια λίστα διαθέσιμων κινητήρων. Δημιουργήθηκε, λοιπόν, μια βιβλιοθήκη (στο Microsoft Excel) με τα χαρακτηριστικά κινητήρων που υπάρχουν στα διαθέσιμα εγχειρίδια των κατασκευαστών MAN και Wärtsila. Ωστόσο, ο χρήστης θα μπορεί να προσθέσει στη βιβλιοθήκη και νέους κινητήρες της επιλογής του από διάφορους κατασκευαστές. Τα στοιχεία που αναγράφονται στη βιβλιοθήκη για κάθε κινητήρα είναι:

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



Σχήμα 59 Τυπικό Layout Diagram ενός κινητήρα

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

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι σκοπός της επιλογής κινητήρα είναι να έχουμε στοιχεία για την MCR, την κατανάλωση και το βάρος του που καθορίζει και το βάρος της μηχανολογικής εγκατάστασης. Επομένως, η επιλογή κινητήρα αρκεί να γίνει μόνο με βάση την MCR. Η επιλογή στροφών αποτελεί πρόβλημα βελτιστοποίησης της έλικας που δεν είναι σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας. Έτσι, επιλέγουμε τον κινητήρα του οποίου το σημείο L1 είναι πιο κοντά στην MCR που έχει υπολογιστεί.



### 3.8. Μέθοδος υπολογισμού Lightship

Στο σημείο αυτό θα γίνει αναλυτικός υπολογισμός του Lightship ώστε 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 ( $W_M$ )

Ο υπολογισμός του βάρους κάθε κατηγορίας έγινε με τις παρακάτω μεθόδους (Παπανικολάου, 2009).

#### 3.8.1. Βάρος μεταλλικής κατασκευής ( $W_{ST}$ )

Το βάρος μεταλλικής κατασκευής υπολογίστηκε με τη μέθοδο Schneekluth (Schneekluth, 1998) η οποία είναι σύνθετη μέθοδος καλής ακρίβειας για τη φάση της προμελέτης χωρίς να περιλαμβάνει ωστόσο το βάρος των υπερκατασκευών ( $W_{SS}$ ) το οποίο θα δίνεται από το χρήστη.

Η μέθοδος υπολογίζει τον όγκο κάτω από το ανώτατο συνεχές καταστρώμα  $V_U$  από τον τύπο:

$$V_U = V_D + V_S + V_b + V_H$$

Όπου:

- $V_D$ : όγκος του πλοίου έως το D.
- $V_S$ : αύξηση όγκου λόγω σιμότητας (μηδενική αφού δεν υπάρχει σιμότητα).
- $V_b$ : αύξηση όγκου λόγω κυρτότητας καταστρώματος.
- $V_H$ : αύξηση όγκου λόγω στομιών κυτών (στα δεξαμενόπλοια είναι μηδενική).

Ο όγκος του πλοίου έως το D είναι:

$$V_D = L_{BP} * B * D * C_{BD}$$

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:

$$V_b = L_{BP} * B * b * C_3$$

Όπου:

- $b$ : κυρτότητα του καταστρώματος που δίνεται από το χρήστη (m).
- $C_3 = 0.7C_{BD}$

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

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

Όπου:

- $n=1$ : ο αριθμός των καταστροφμάτων.
- $D_0=4$  m.
- $L/D \geq 9$ .
- $C'_{ST} = [0.112 + L_{BP} * 10^{-4}]$ : συντελεστής ειδικού μοναδιαίου βάρους για δεξαμενόπλοια ( $t/m^3$ ).

Στο παραπάνω βάρος πρέπει να γίνει διόρθωση για βολβοειδή πλώρα όπου το βάρος θα προσαυξηθεί κατά 0.4÷0.7% του  $W'_{ST}$  και τελικά το βάρος της μεταλλικής κατασκευής χωρίς τις υπερκατασκευές προκύπτει:

$$W_{ST} = 1.0055 * W'_{ST}$$

Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι επειδή στις νέες σχεδιάσεις δεξαμενοπλοίων γίνεται χρήση χάλυβα υψηλής αντοχής τοπικά (κατάστρομα-πυθμένας) το βάρος της μεταλλικής κατασκευής μπορεί να μειωθεί κατά 5-7% περίπου. Έτσι, το τελικό βάρος της μεταλλικής κατασκευής θα είναι:

$$W_{ST,Schneekluth} = 0.93 * W_{ST}$$

Το τελικό βάρος της μεταλλικής κατασκευής που θα προκύψει λαμβάνοντας υπόψη και το δεδομένο από το χρήστη βάρος υπερκατασκευών ( $W_{SS}$ ) είναι:

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

### 3.8.2. Βάρος ενδίαιτησης και εξοπλισμού ( $W_{OT}$ )

Για το βάρος ενδίαιτησης και εξοπλισμού θα χρησιμοποιηθούν δύο διαφορετικές μέθοδοι. Το τελικό βάρος ενδίαιτησης και εξοπλισμού  $W_{OT,CALC}$  προκύπτει από το μέσο όρο των δύο μεθόδων.

#### ✓ Μέθοδος με προσεγγιστικό τύπο

Ο προσεγγιστικός τύπος για φορτηγά πλοία στην προκαταρκτική φάση μελέτης είναι (Schneekluth, 1998):

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

Όπου:

- $K_{OT} = 0.28 \text{ t/m}^3$  για δεξαμενόπλοια με  $L_{BP}=150 \text{ m}$ .
- $K_{OT} = 0.17 \text{ t/m}^3$  για δεξαμενόπλοια με  $L_{BP}=300 \text{ m}$ .

Για ενδιάμεσα μήκη γίνεται γραμμική παρεμβολή.

#### ✓ Μέθοδος ομάδων βαρών

Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει τον υπολογισμό του βάρους για 4 μεγάλες ομάδες βαρών (Schneekluth, 1998):

##### I. Καλύμματα στομιών κυτών

Εφόσον δεν υπάρχουν στόμια κυτών στα δεξαμενόπλοια έχουμε  $W_I = 0$ .

##### II. Φορτοεκφορτωτικά μέσα

Στα φορτοεκφορτωτικά μέσα που χρησιμοποιούνται στα δεξαμενόπλοια ανήκουν οι γερανοί το βάρος των οποίων δίνεται από το χρήστη καθώς ποικίλει από τον αριθμό τους και την ανυψωτική τους ικανότητα.

##### III. Ενδίαιτηση

Για το βάρος ενδίαιτησης θεωρούμε ένα συντελεστή βάρους ίσο με  $80\div90 \text{ kp/m}^3$ . Ο όγκος των υπερκατασκευών θα υπολογιστεί προσεγγιστικά:

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

Άρα το βάρος της ενδίαιτησης σε τόνους είναι:

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

##### IV. 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 η μέθοδος ομάδων βαρών κατά Schneekluth τελικά θα μας δώσει:

$$W_{OT} = W_I + W_{II} + W_{III} + W_{IV}$$

### 3.8.3. Βάρος μηχανολογικής εγκατάστασης ( $W_M$ )

#### ✓ Μέθοδος ομάδων βαρών κατά Strohbusch

Το βάρος μηχανολογικής εγκατάστασης αναλύεται ως (Παπανικολάου, 2009):

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

Όπου:

- $W_{MM}$ : βάρος κύριας μηχανής και μειωτήρα.
- $W_{MS}$ : βάρος ελικοφόρου άξονα και έλικας.
- $W_{MR}$ : βάρος λοιπής μηχανολογικής εγκατάστασης.

Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή ορίζονται συντελεστές βάρους για κάθε μια από τις τρεις παραπάνω ομάδες αλλά και για το συνολικό βάρος της μηχανολογικής εγκατάστασης. Ωστόσο για το βάρος της κύριας μηχανής  $W_{MM}$  έχουμε ακριβή στοιχεία από τους κατασκευαστές και εφόσον έχουμε επιλέξει κινητήρα. Επομένως ο υπολογισμός θα γίνει μόνο για τις υπόλοιπες ομάδες.

Έτσι για το βάρος ελικοφόρου άξονα και έλικας έχουμε:

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

Όπου  $w_3 = 4 \text{ kp/HP}$ .

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

$$W_{MR} = \frac{w_1}{1000} * L_{BP} * B * D$$

$$W_{MR} = \frac{w_2}{1000} * SHP$$

Όπου:

- $w_1 = 3 \div 5 / \text{m}^3$ .
- $w_2 = 25 \div 35 \text{ kp/HP}$ .

Από τα παραπάνω προκύπτει το συνολικό βάρος μηχανολογικής εγκατάστασης.

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  $w_5 = 55 \div 60 \text{ kp/HP}$ .

### 3.8.4. 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 από ένα συντελεστή διόρθωσης  $\lambda_{LS}$  μεταξύ του υπολογιζόμενου Lightship ( $LS_{CALC}$ ) και του  $LS_{MATLAB}$  που έχει υπολογιστεί από προσεγγιστικό τύπο:

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

Επομένως τα διορθωμένα βάρη για κάθε ομάδα είναι:

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

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

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

### 3.8.5. Αποτελέσματα και Σύγκριση

Ο υπολογισμός του βάρους Lightship πραγματοποιήθηκε για έναν αριθμό πλοίων τόσο από τη βάση δεδομένων μας όσο και εκτός αυτής. Παρακάτω συγκρίνεται το  $LS_{CALC}$  που προκύπτει από την παραπάνω μέθοδο (διάκριση 3 ομάδων βαρών) με αυτό που υπολογίζεται από τον προσεγγιστικό τύπο  $LS_{MATLAB}$  και με το πραγματικό  $LS_{REAL}$ .

Πίνακας 9 Σύγκριση Lightship πλοίων

	$LS_{CALC}$ (t)	$\lambda_{LS}$	$LS_{MATLAB}$ (t)	$LS_{REAL}$ (t)
Ship 13	8497.9	0.950	8945.4	8900
Ship 18	9578.8	0.935	10239.5	10294.763
Ship 19	9423.3	0.920	10239.5	10260
Ship 25	13355.4	1.019	13100.0	12838
Ship 27	13343.1	1.054	12660.0	13418.3
Ship 30	13442.0	1.027	13092.1	13750
Ship 41	18014.7	1.023	17615.1	17903
Ship 44	18982.0	1.053	18033.1	17950
Ship 58	26100.2	1.047	24928.2	26000
Ship 63	24612.1	1.025	24022.9	23517
Ship 67	25339.0	1.055	24022.9	25690
Ship 69	26115.2	1.044	25026.1	26300
Ship 72	41711.6	0.917	45482.4	46100
Ship 74	41253.8	0.902	45760.2	43938.7
Ship 77	13477.8	1.017	13249.3	14485
Ship 78	18016.0	1.023	17615.1	16993
Ship 79	18028.8	1.011	17840.2	18115.82
Ship 80	26307.2	1.055	24928.2	26330
Ship 81	25304.9	1.053	24022.9	26073.4
Ship 82	41588.5	0.914	45482.4	46750

### 3.9. Μέθοδος υπολογισμού συνολικού κόστους

Η μέθοδος που ακολουθήσαμε για τον υπολογισμό του συνολικού κόστους του πλοίου διακρίνεται στο κόστος κατασκευής του πλοίου και στο κόστος λειτουργίας αυτού στο οποίο περιλαμβάνονται όλα τα τρέχοντα έξοδα ανά έτος λειτουργίας. Το κόστος απόκτησης είναι αυτό που θα καθορίσει και τον ελάχιστο απαιτούμενο ναύλο RFR (Required Freight Rate).

#### 3.9.1. Κόστος κατασκευής πλοίου

Το κόστος κατασκευής του πλοίου αναλύεται σύμφωνα με τις κύριες κατασκευαστικές μονάδες από τις οποίες αποτελείται και είναι η μεταλλική κατασκευή, η ενδίαιτηση και ο εξοπλισμός και η μηχανολογική εγκατάσταση. Το κόστος της κάθε ομάδας μπορεί να διαχωριστεί σε κόστος υλικών και κόστος εργατικών.

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

##### ✓ Κόστος μεταλλικής κατασκευής

Το κόστος των υλικών της μεταλλικής κατασκευής υπολογίζεται από τον παρακάτω εμπειρικό τύπο (Aalbers, 2000):

$$C_{ST,MATERIAL} = 1900 * W_{ST} * \left(1 + \frac{Scrap}{100}\right)$$

Όπου Scrap είναι το ποσοστό του χάλυβα που παραμένει αναξιοποίητος και ισούται με (Aalbers, 2000):

$$Scrap = 12 + \left(\left(\frac{W_{ST}}{1000} + 100\right)^{-5.3} * 54 * 10^{10}\right)$$

Το κόστος των εργατικών υπολογίζεται από τον εμπειρικό τύπο (Aalbers, 2000):

$$C_{ST,WORK} = 120 * (W_{ST})^{0.89}$$

Άρα το συνολικό κόστος για τη μεταλλική κατασκευή είναι:

$$C_{ST} = C_{ST,WORK} + C_{ST,MATERIAL}$$

##### ✓ Κόστος ενδίαιτησης και εξοπλισμού

Το κόστος των υλικών δίνεται από την εξής σχέση (Aalbers, 2000):

$$C_{OT,MATERIAL} = 15000 * (W_{OT})^{0.80}$$

Το κόστος των εργατικών είναι (Aalbers, 2000):

$$C_{OT,WORK} = 8.5 * (W_{OT})^{0.86}$$

Το συνολικό κόστος είναι:

$$C_{OT} = C_{OT,WORK} + C_{OT,MATERIAL}$$

✓ Κόστος μηχανολογικής εγκατάστασης

Το συνολικό κόστος της μηχανολογικής εγκατάστασης  $C_M$  δίνεται από το μέσο όρο των δύο παρακάτω εμπειρικών τύπων που ορίζουν το άνω και κάτω όριο του κόστους (Aalbers, 2000):

$$C_{M,HIGH} = 9375 * MCR^{0.79}$$

$$C_{M,LOW} = 6046 * MCR^{0.82}$$

Το συνολικό κόστος κατασκευής του πλοίου είναι:

$$C_{BUILD} = C_{ST} + C_{OT} + C_M$$

3.9.2. Κόστος λειτουργίας πλοίου

Ο χρόνος ενός κυκλικού ταξιδιού (αναχώρηση και επιστροφή) συμπεριλαμβάνει το χρόνο πλεύσης και το χρόνο φορτοεκφόρτωσης στα λιμάνια. Ο χρήστης μπορεί να θεωρήσει ένα ταξίδι της επιλογής του εισάγοντας το μήκος της διαδρομής που θα διανύει το πλοίο από το ένα λιμάνι ( $L_{TRIP}$ ) στο άλλο με μια συγκεκριμένη ταχύτητα ( $V_{TRIP}$ ) και την παραμονή του πλοίου σε κάθε λιμάνι (portA, portB). Επομένως, ο συνολικός χρόνος ενός κυκλικού ταξιδιού σε μέρες θα είναι:

$$Roundtrip = 2 * \frac{L_{TRIP}}{24 * V_{TRIP}} + portA + portB$$

Από τις 365 μέρες του χρόνου, θα θεωρήσουμε ότι οι 20 διατίθενται για επισκευές και δεξαμενισμούς του πλοίου (docking days). Ο αριθμός ταξιδιών του πλοίου το χρόνο θα είναι τότε:

$$N_{TRIPS} = \frac{365 - 20}{Roundtrip}$$

✓ Κόστος καυσίμων

Η τιμή των καυσίμων  $K_{FUEL}$  (\$/t) μεταβάλλεται με το πώς διαμορφώνεται η αγορά και αποτελεί επιλογή του χρήστη ανάλογα με τις εκάστοτε τιμές. Με γνωστή την κατανάλωση καυσίμου (SFOC, gr/kWh) από την επιλογή του κινητήρα το συνολικό ετήσιο κόστος καυσίμων του πλοίου θα είναι:

$$C_{FUEL} = N_{TRIPS} * \frac{2 * L_{TRIP}}{V_{TRIP}} * (SFOC * MCR * 10^{-6}) * K_{FUEL}$$

✓ Κόστος τροφοδοσίας και μισθοδοσίας

Για κάθε μέλος πληρώματος θεωρείται ένα κόστος των 10 \$/μέρα και το συνολικό κόστος εφοδίων για τις συνολικές μέρες ταξιδιού ανά έτος χρόνο είναι:

$$C_{PR} = crew * K_{PR} * Roundtrip * N_{TRIPS}$$

Επίσης, για το κόστος μισθοδοσίας επιλέγεται από το χρήστη ένας μέσος μηνιαίος μισθός  $K_{SALARY}$  (\$/άτομο/μήνα) και θεωρώντας 14 μισθούς (12+δώρα Χριστουγέννων, Πάσχα) το ετήσιο κόστος μισθοδοσίας είναι:

$$C_{SALARY} = crew * K_{SALARY} * 14$$



✓ Λιμενικά τέλη

Τα λιμενικά τέλη για προσέγγιση σε ένα λιμάνι αντιστοιχούν στο 86% της ολικής χωρητικότητας (GT) του πλοίου (Aalbers, 2000). Επομένως για το σύνολο των ταξιδιών για ένα έτος τα συνολικά λιμενικά τέλη θα είναι:

$$C_{PORT} = 2 * N_{TRIPS} * 0.86 * GT$$

✓ Κόστος Ασφάλισης

Το κόστος ασφάλισης του πλοίου ανά έτος λειτουργίας υπολογίζεται ότι αντιστοιχεί στο 1% του κόστους κατασκευής του πλοίου (Aalbers, 2000):

$$C_{INSURANCE} = 0.01 * C_{BUILD}$$

✓ Κόστος Συντήρησης και Επισκευών

Το κόστος συντήρησης και επισκευών ανά έτος λειτουργίας μπορεί να θεωρηθεί ότι αντιστοιχεί στο 0.5% του κόστους κατασκευής του πλοίου (Aalbers, 2000):

$$C_{REPAIR} = 0.005 * C_{BUILD}$$

### 3.9.3. Ελάχιστος Απαιτούμενος Ναύλος

Για τον υπολογισμό του 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 για το υπόλοιπο ποσό θα διατεθούν ίδια κεφάλαια. Οπότε, έχουμε για το ύψος δανείου και κεφαλαίου:

$$Loan = 0.6 * C_{BUILD}$$

$$Cash = 0.4 * C_{BUILD}$$

Ως επιτόκιο δανεισμού θα θεωρήσουμε  $r=8\%$  με περίοδο αποπληρωμής τα 20 χρόνια και απόδοση επενδυμένου κεφαλαίου  $i=12\%$ . Τέλος, η τελική αξία του πλοίου, μετά από 20 χρόνια, θεωρείται ότι είναι ίση με το 2.5% της αρχικής, δηλαδή:

$$Value_{t=20} = 0.025 * C_{BUILD}$$

Η τελική αξία του πλοίου πρέπει να εκφραστεί σε σημερινές τιμές:

$$Value_{t=0} = \frac{Value_{t=20}}{(1+i)^{20}}$$

Η ετήσια δόση του δανείου (Instalment) για N χρόνια αποπληρωμής θα υπολογιστεί από τον παρακάτω τύπο:

$$Instalment = Loan * \frac{r * (1+r)^N}{(1+r)^N - 1}$$

Τα συνολικά ετήσια λειτουργικά έξοδα του πλοίου θα είναι τότε:

$$C_{RUNNING} = C_{FUEL} + C_{PR} + C_{SALARY} + C_{PORT} + C_{INSURANCE} + C_{REPAIR} + Instalment$$

Το ωφέλιμο φορτίο που μεταφέρει το πλοίο για το σύνολο των ταξιδιών που εκτελεί σε ένα χρόνο είναι:

$$Payload_{TOTAL} = N_{TRIPS} * Payload$$

Το οικονομικό κριτήριο της Καθαρής Παρούσας Αξίας NPV (Net Present Value) λαμβάνει υπόψη όλα τα έσοδα και τα έξοδα που εμφανίζονται για κάποιο χρονικό διάστημα μελέτης:

$$NPV = \sum \frac{ΕΣΟΔΑ_t - ΕΞΟΔΑ_t}{(1+i)^t}$$

Στην παρούσα θεώρηση το χρονικό διάστημα είναι τα 20 χρόνια αποπληρωμής του δανείου επομένως ο παραπάνω τύπος εκφράζεται όπως παρακάτω:

$$NPV = Value_{t=0} - Cash + (F * Payload_{TOTAL} - C_{RUNNING}) \sum_{t=1}^{20} \frac{1}{(1+i)^t}$$

Ο ναύλος F που μηδενίζει την Καθαρή Παρούσα Αξία ονομάζεται ελάχιστος απαιτούμενος ναύλος RFR (Required Freight Rate) και εκφράζεται σε \$/t.

#### 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ

Έχοντας ολοκληρώσει την επεξήγηση της πορείας του προγράμματος είμαστε σε θέση να εκτελέσουμε το πρόγραμμα. Το πεδίο του αρχείου Input του προγράμματος έχουν διαμορφωθεί ως εξής:

*Πίνακας 10 Αρχείο Input του προγράμματος*

Length between perpendiculars (m)
Breadth (m)
Depth (m)
Draft design (m)
Block coefficient
Sea water specific gravity (t/m <sup>3</sup> )
Double Bottom (m)
Double Hull (m)
Camber (m)
Aft Frame Spacing (m)
Engine Room Frame Spacing (m)
Forward Frame Spacing (m)
No. of bulkheads at cargo area
No. of frames for every tank
Frame Spacing for slop tanks (m)
No. of frames for slop tanks (m)
Crew members
Superstructures Height (m)
Superstructures Length (m)
Superstructures Breadth (m)
Superstructures Weight (t)
Bulb Length (m)
Service Speed (kn)
Range (sm)
No. of propeller blades
Transverse bulb area (m <sup>2</sup> )
Centre of bulb area above keel line (m)
Immersed transom area (m <sup>2</sup> )
Wetted surface of appendages (m <sup>2</sup> )
Heavy fuel oil cost (\$/t)
Mean month salary (\$/person/month)
Cranes Weight (t)
Resistance method (1982,1984)
Distance between ports (sm)
Days at loading port
Days at discharging port
Typical vessel's speed (kn)

Η εκτέλεση του προγράμματος πραγματοποιήθηκε για έναν αριθμό πλοίων τόσο από τη βάση δεδομένων μας (Ship 1-76) όσο και εκτός αυτής (Ship 77-82). Στο παραπάνω αρχείο Input εισάγουμε κάθε φορά τα δεδομένα στα κενά πεδία. Κάποιες τιμές ωστόσο διατηρούνται σταθερές για τους υπολογισμούς.

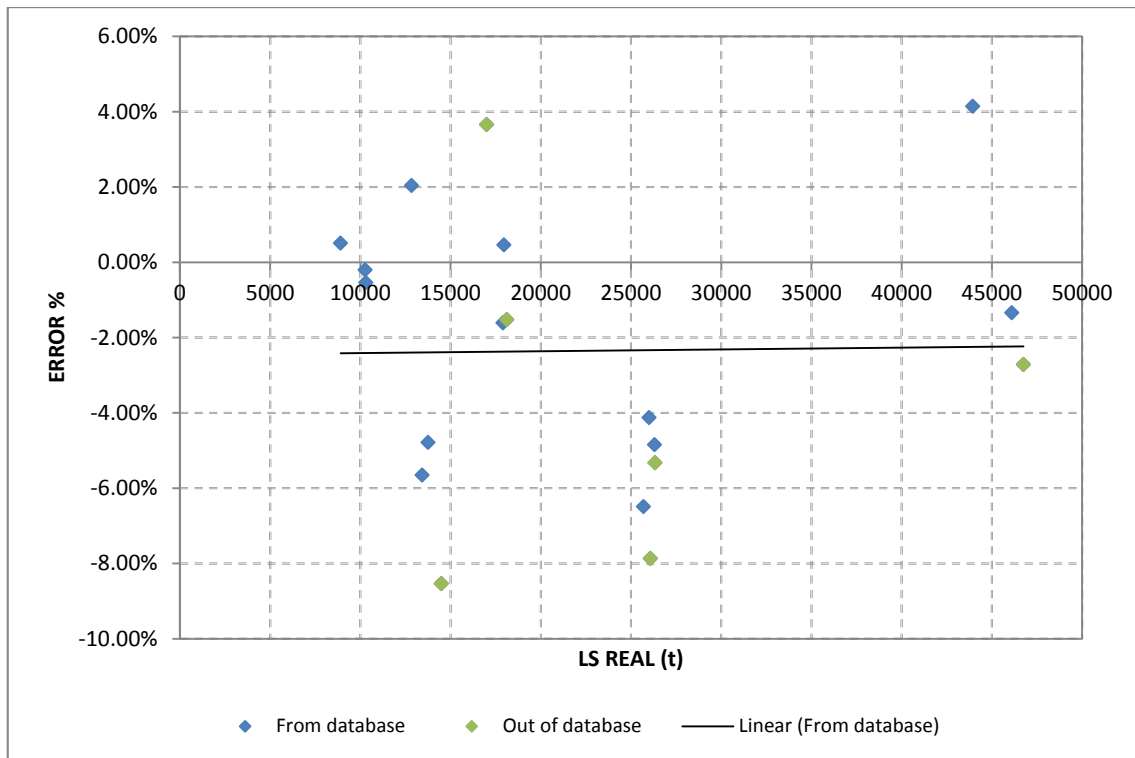
Η εκτέλεση του προγράμματος δίνει αναλυτικά αποτελέσματα σε ένα αρχείο Output (Microsoft Excel). Από τα αναλυτικά αποτελέσματα επιλέγονται ορισμένα κύρια χαρακτηριστικά που έχουν υπολογιστεί και συγκρίνονται με τα πραγματικά δεδομένα των πλοίων σε πίνακες και διαγράμματα. Στα διαγράμματα τα πράσινα σημεία αναφέρονται στα πλοία που δεν συμπεριλαμβάνονται στο δείγμα μας (Ship 77-82).

#### 4.1. Lightship και DWT

##### ✓ Lightship

Πίνακας 11 Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για LS

		<b>LS REAL</b>	<b>LS MATLAB</b>	<b>ERROR %</b>
Ship 13	HANDYMAX	8900	8945.4	0.51%
Ship 18	HANDYMAX	10294.763	10239.5	-0.54%
Ship 19	HANDYMAX	10260	10239.5	-0.20%
Ship 25	PANAMAX	12838	13100.0	2.04%
Ship 27	PANAMAX	13418.3	12660.0	-5.65%
Ship 30	PANAMAX	13750	13092.1	-4.78%
Ship 41	AFRAMAX	17903	17615.1	-1.61%
Ship 44	AFRAMAX	17950	18033.1	0.46%
Ship 58	SUEZMAX	26000	24928.2	-4.12%
Ship 67	SUEZMAX	25690	24022.9	-6.49%
Ship 69	SUEZMAX	26300	25026.1	-4.84%
Ship 72	VLCC	46100	45482.4	-1.34%
Ship 74	VLCC	43938.7	45760.2	4.15%
Ship 77	PANAMAX	14485	13249.3	-8.53%
Ship 78	AFRAMAX	16993	17615.1	3.66%
Ship 79	AFRAMAX	18115.82	17840.2	-1.52%
Ship 80	SUEZMAX	26330	24928.2	-5.32%
Ship 81	SUEZMAX	26073.4	24022.9	-7.86%
Ship 82	VLCC	46750	45482.4	-2.71%



Σχήμα 60 Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για LS

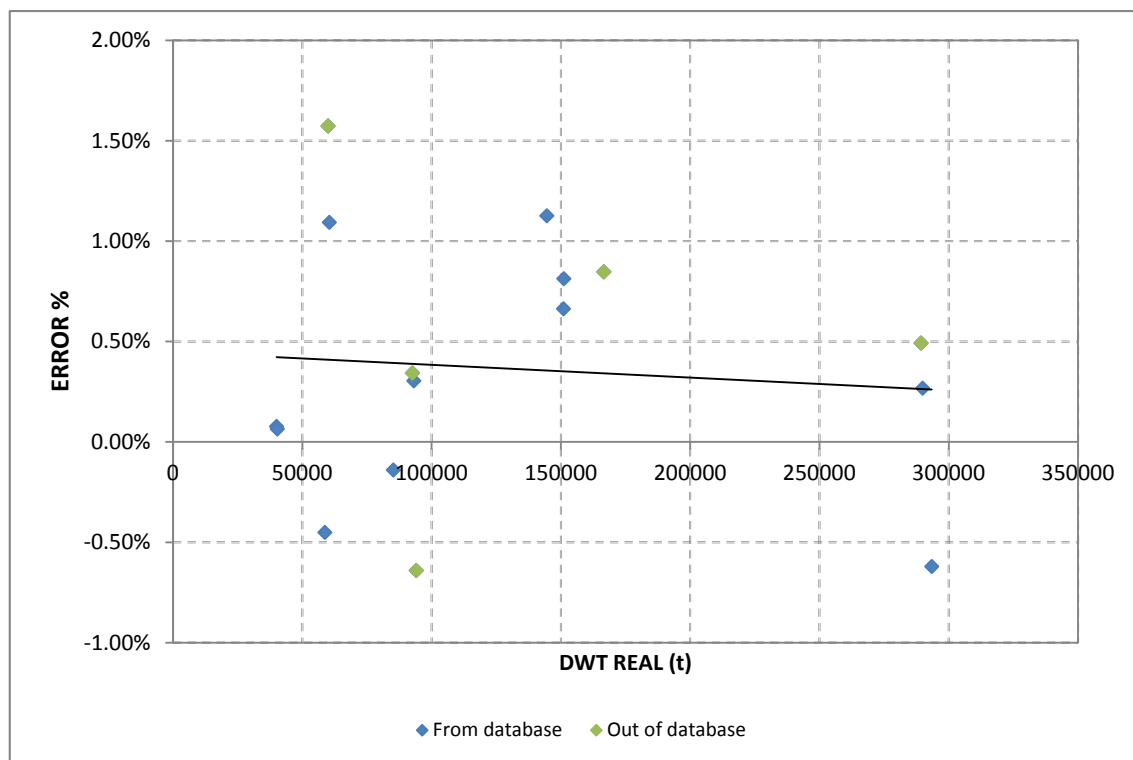
### Παρατηρήσεις

Η εκτίμηση του Lightship είναι ικανοποιητική. Κάποιες υποεκτιμήσεις που παρουσιάζονται μπορούν να εξηγηθούν από το αυξημένο βάρος της μεταλλικής κατασκευής των πλοίων λόγω δυνατότητας πλεύσης σε πάγους. Επίσης, ανάλογα με τις απαιτήσεις του πλοιοκτήτη σχετικά με την ελάχιστη συντήρηση το πλοίο μπορεί να είναι περισσότερο ή λιγότερο ενισχυμένο. Το ποσοστό ενίσχυσης θα μπορούσε να σχετίζεται ακόμα και με το ναυπηγείο και τη χώρα κατασκευής του πλοίου. Ακόμα και ο αριθμός των δεξαμενών ποικίλει και επηρεάζει άμεσα το βάρος της μεταλλικής κατασκευής. Τέλος, διάφοροι περιορισμοί που τίθενται στις κύριες διαστάσεις του πλοίου λόγω της διέλευσης από διώρυγες (Panama, Suez) έχουν άμεση επίδραση στο βάρος της μεταλλικής κατασκευής.

✓ DWT

Πίνακας 12 Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για DWT

		<b>DWT REAL</b>	<b>DWT MATLAB</b>	<b>ERROR %</b>
Ship 18	HANDYMAX	40034.591	40065.5	0.08%
Ship 19	HANDYMAX	40349.81	40375.9	0.06%
Ship 25	PANAMAX	58707	58442.3	-0.45%
Ship 30	PANAMAX	60478.6	61140.0	1.09%
Ship 41	AFRAMAX	93151	93434.2	0.30%
Ship 44	AFRAMAX	85218	85099.2	-0.14%
Ship 58	SUEZMAX	151018	152019.4	0.66%
Ship 67	SUEZMAX	144594	146222.9	1.13%
Ship 69	SUEZMAX	151128.5	152356.6	0.81%
Ship 72	VLCC	289916	290692.5	0.27%
Ship 74	VLCC	293415.8	291596.0	-0.62%
Ship 77	PANAMAX	59967.1	60910.5	1.57%
Ship 78	AFRAMAX	94050	93448.0	-0.64%
Ship 79	AFRAMAX	92581.7	92899.4	0.34%
Ship 80	SUEZMAX	166605	168016.2	0.85%
Ship 82	VLCC	289267	290692.5	0.49%



Σχήμα 61 Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για DWT

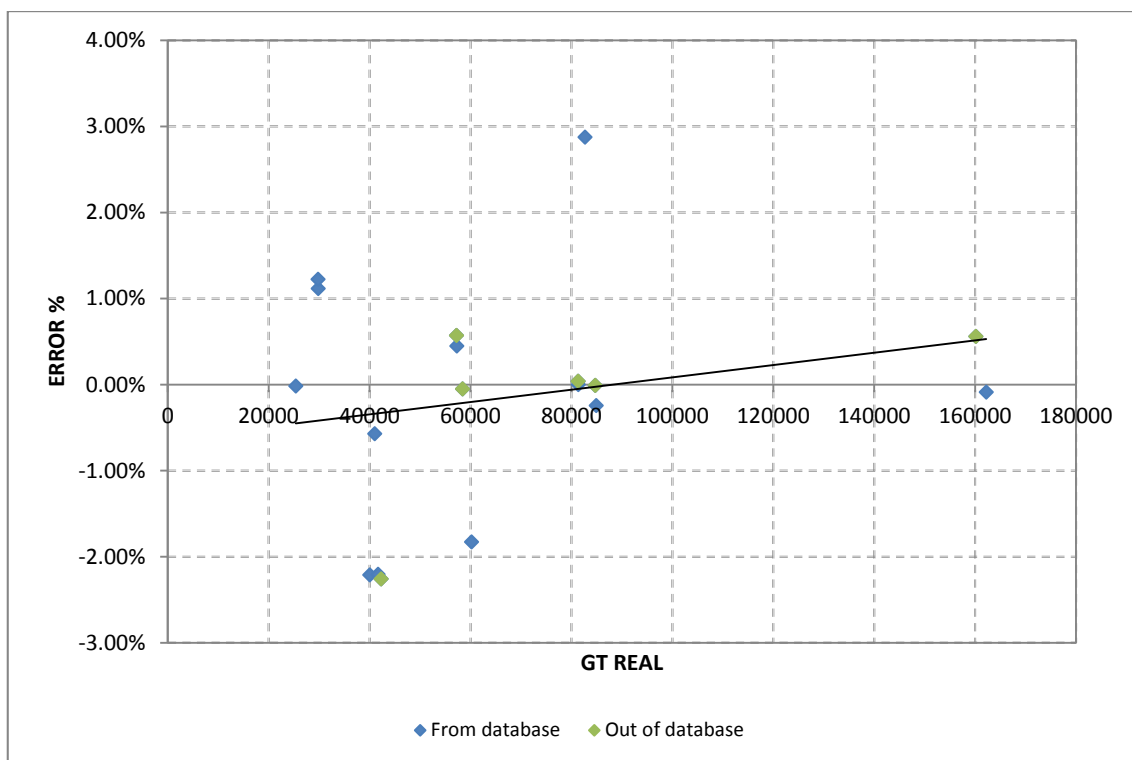
Παρατηρήσεις

Οι αποκλίσεις που εμφανίζονται στον υπολογισμό του DWT δεν ξεπερνούν το  $\pm 2\%$ . Αυτές οι αποκλίσεις οφείλονται κυρίως στις αποκλίσεις που προκύπτουν από τον υπολογισμό του LS καθώς το DWT υπολογίζεται από τη διαφορά του LS από το εκτόπισμα. Το εκτόπισμα υπολογίζεται με πολύ μεγάλη ακρίβεια αφού οι κύριες διαστάσεις του πλοίου είναι δεδομένες από το χρήστη επομένως οποιαδήποτε διαφορά προκύπτει στον υπολογισμό του LS έχει επίπτωση και στον υπολογισμό του DWT.

**4.2. Χωρητικότητες Δεξαμενών**✓ Ολική Χωρητικότητα (GT)

Πίνακας 13 Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για GT

		<b>GT REAL</b>	<b>GT MATLAB</b>	<b>Error %</b>
Ship 13	HANDYMAX	25364	25360	-0.02%
Ship 18	HANDYMAX	29832	30165	1.12%
Ship 19	HANDYMAX	29800	30165	1.23%
Ship 25	PANAMAX	41021	40787	-0.57%
Ship 27	PANAMAX	40038	39153	-2.21%
Ship 30	PANAMAX	41676	40758	-2.20%
Ship 41	AFRAMAX	57296	57553	0.45%
Ship 44	AFRAMAX	60205	59105	-1.83%
Ship 58	SUEZMAX	84914	84708	-0.24%
Ship 67	SUEZMAX	81347	81347	0.00%
Ship 69	SUEZMAX	82693	85072	2.88%
Ship 74	VLCC	162203	162064	-0.09%
Ship 77	PANAMAX	42296	41341	-2.26%
Ship 78	AFRAMAX	57226	57553	0.57%
Ship 79	AFRAMAX	58418	58388	-0.05%
Ship 80	SUEZMAX	84716	84708	-0.01%
Ship 81	SUEZMAX	81314	81347	0.04%
Ship 82	VLCC	160135	161032	0.56%



Σχήμα 62 Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για GT

### Παρατηρήσεις

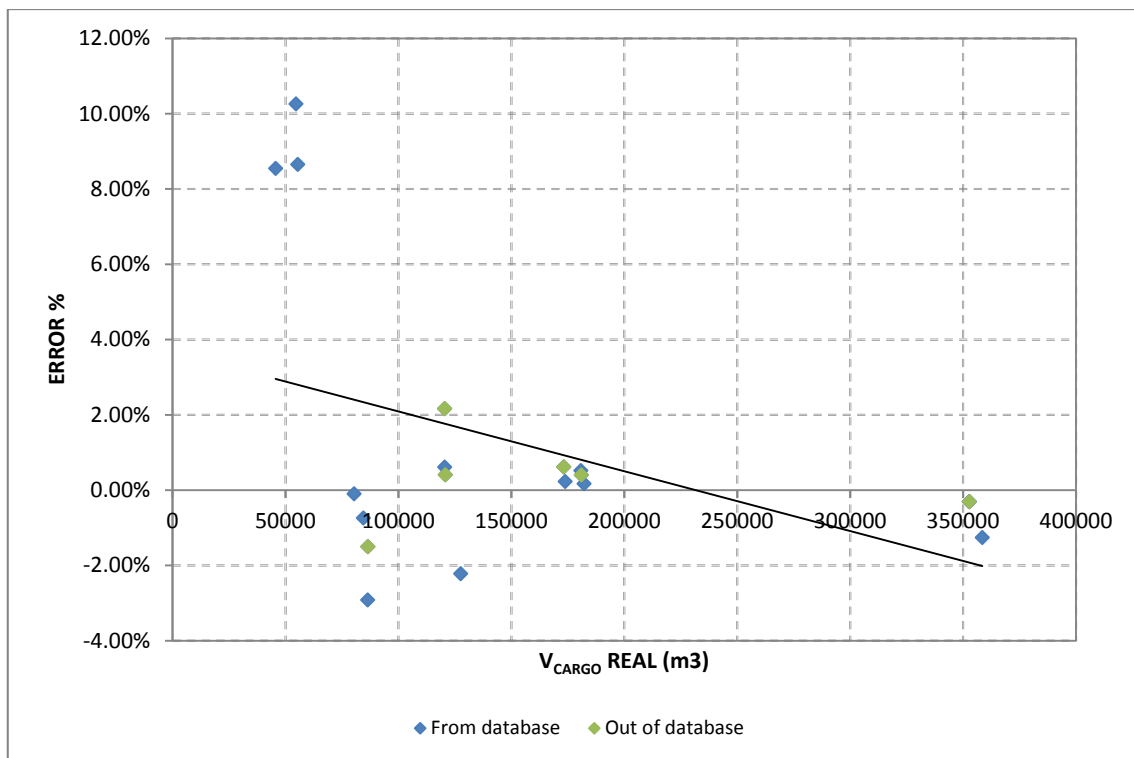
Ο προσεγγιστικός τύπος που προέκυψε από τη στατιστική ανάλυση και χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της ολικής χωρητικότητας βλέπουμε ότι δίνει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα τόσο για πλοία που συμπεριλαμβάνονται στο δείγμα μας (και με τα οποία έγινε η στατιστική ανάλυση) όσο και εκτός αυτής. Η απόκλιση δεν ξεπερνάει το  $\pm 3\%$ .



✓ Χωρητικότητα δεξαμενών φορτίου ( $V_{CARGO}$ )

Πίνακας 14 Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για  $V_{CARGO}$

		<b><math>V_{CARGO}</math> REAL</b>	<b><math>V_{CARGO}</math> MATLAB</b>	<b>Error %</b>
Ship 13	HANDYMAX	45634.39	49535.7	8.55%
Ship 18	HANDYMAX	54631.691	60237.9	10.26%
Ship 19	HANDYMAX	55440.14	60237.9	8.65%
Ship 25	PANAMAX	86411	83893.5	-2.91%
Ship 27	PANAMAX	80330.8	80255.2	-0.09%
Ship 30	PANAMAX	84452.2	83828.7	-0.74%
Ship 41	AFRAMAX	120494.2	121234.0	0.61%
Ship 44	AFRAMAX	127517.3	124691.0	-2.22%
Ship 58	SUEZMAX	180769.9	181712.9	0.52%
Ship 67	SUEZMAX	173826	174226.5	0.23%
Ship 69	SUEZMAX	182213.4	182523.1	0.17%
Ship 72	VLCC	352770.8	351696.2	-0.30%
Ship 74	VLCC	358499.2	353994.3	-1.26%
Ship 77	PANAMAX	86422.3	85128.8	-1.50%
Ship 78	AFRAMAX	120739.7	121234.0	0.41%
Ship 79	AFRAMAX	120485.1	123095.2	2.17%
Ship 80	SUEZMAX	180978.3	181712.9	0.41%
Ship 81	SUEZMAX	173157.2	174226.5	0.62%
Ship 82	VLCC	352770.8	351696.2	-0.30%



Σχήμα 63 Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για  $V_{CARGO}$

Παρατηρήσεις

Και σε αυτή την περίπτωση ο προσεγγιστικός τύπος συναρτήσει των κυρίων διαστάσεων που προέκυψε από τη στατιστική ανάλυση για τον υπολογισμό της χωρητικότητας φορτίου είναι πολύ καλής ακρίβειας. Οι μεγαλύτερες αποκλίσεις παρουσιάζονται για μικρά πλοία όπου μπορεί να υπάρχει κάποια ειδική διαμόρφωση του χώρου φορτίου. Ο χώρος του φορτίου διαμορφώνεται από την επιλογή της απόστασης του διπλού τοιχώματος και του ύψους διπτυθμένου, παράμετροι οι οποίες δεν λαμβάνονται υπόψη στον προσεγγιστικό μας τύπο και θα μπορούσαν να επηρεάζουν τα αποτελέσματα για τα πλοία στα οποία εμφανίζονται μεγαλύτερες αποκλίσεις.

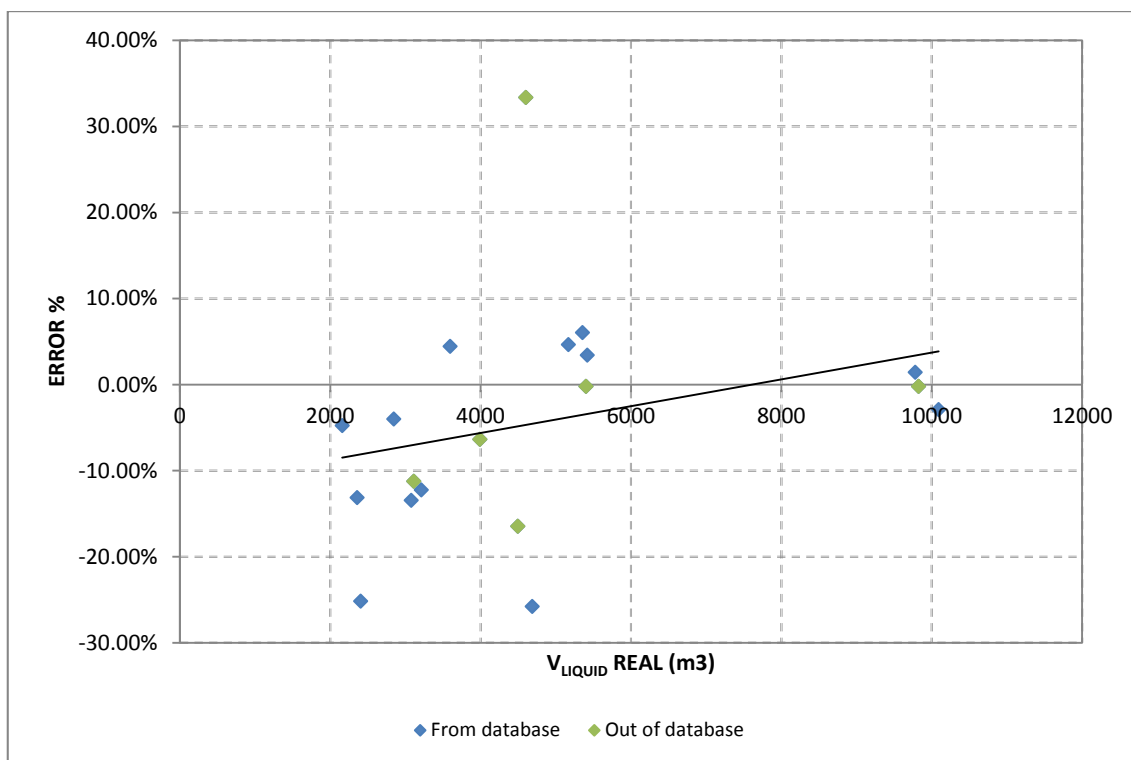
✓ Χωρητικότητα συνόλου δεξαμενών ( $V_{LIQUID}$ )

Επειδή η χωρητικότητα των δεξαμενών για κάθε ομάδα βάρους (Fuel Oil, Diesel Oil, Lub. Oil, Fresh Water) ποικίλει ανάλογα με τις απαιτήσεις του πλοιοκτήτη θεωρήθηκε καλύτερο να υπολογιστεί η συνολική χωρητικότητα των δεξαμενών που περιέχουν υγρά ως εξής:

$$V_{LIQUID} = V_{FUEL} + V_{DIESEL} + V_{LUB.} + V_{FW}$$

Πίνακας 15 Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για  $V_{LIQUID}$

		<b><math>V_{LIQUID}</math> REAL</b>	<b><math>V_{LIQUID}</math> MATLAB</b>	<b>Error %</b>
Ship 13	HANDYMAX	2402.9	1798.3	-25.16%
Ship 18	HANDYMAX	2157.9	2055.1	-4.76%
Ship 19	HANDYMAX	2356.3	2047.1	-13.12%
Ship 25	PANAMAX	3076.2	2662.7	-13.44%
Ship 27	PANAMAX	3210.9	2818.4	-12.23%
Ship 30	PANAMAX	2844.7	2731.3	-3.99%
Ship 41	AFRAMAX	3594.3	3754.1	4.45%
Ship 44	AFRAMAX	4686.2	3478.2	-25.78%
Ship 58	SUEZMAX	5354.8	5678.5	6.05%
Ship 67	SUEZMAX	5166.0	5406.9	4.66%
Ship 69	SUEZMAX	5418.0	5603.7	3.43%
Ship 72	VLCC	10091.2	9799.0	-2.90%
Ship 74	VLCC	9779.0	9920.1	1.44%
Ship 77	PANAMAX	3110.3	2761.3	-11.22%
Ship 78	AFRAMAX	4494.0	3754.5	-16.45%
Ship 79	AFRAMAX	3988.9	3735.5	-6.35%
Ship 80	SUEZMAX	4599.6	6135.1	33.38%
Ship 81	SUEZMAX	5401.2	5390.3	-0.20%
Ship 82	VLCC	9825.7	9805.8	-0.20%



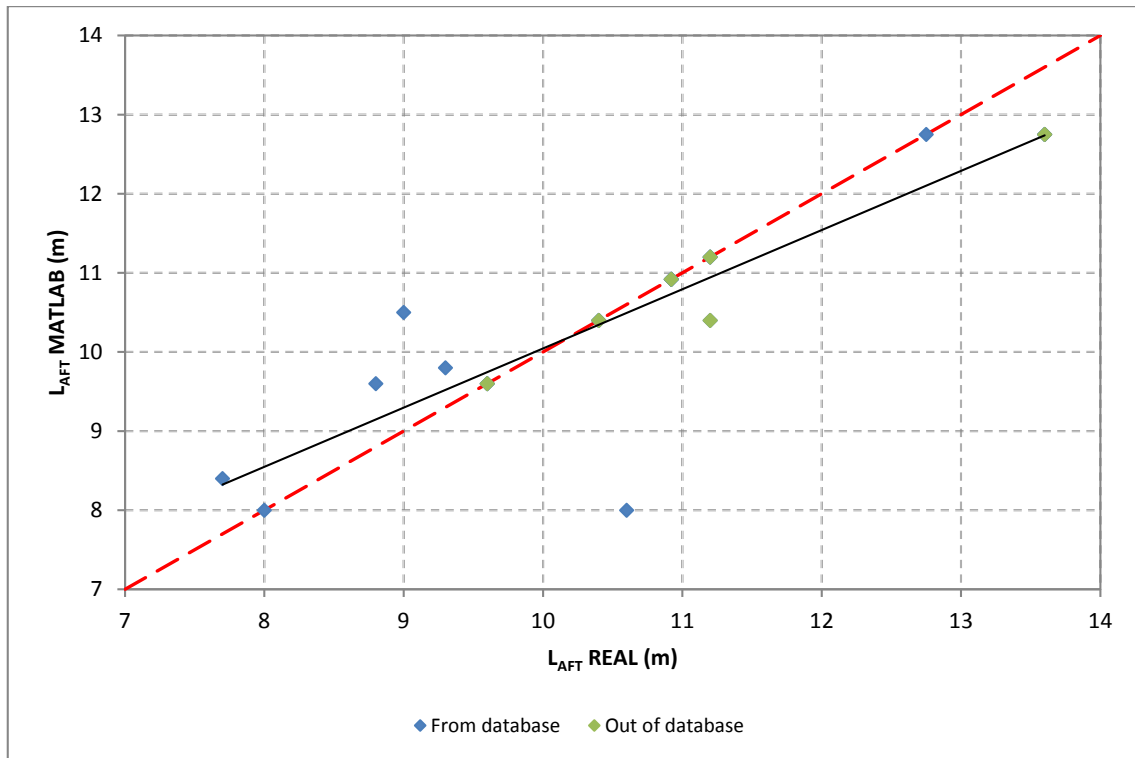
Σχήμα 64 Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για V<sub>LIQUID</sub>

### Παρατηρήσεις

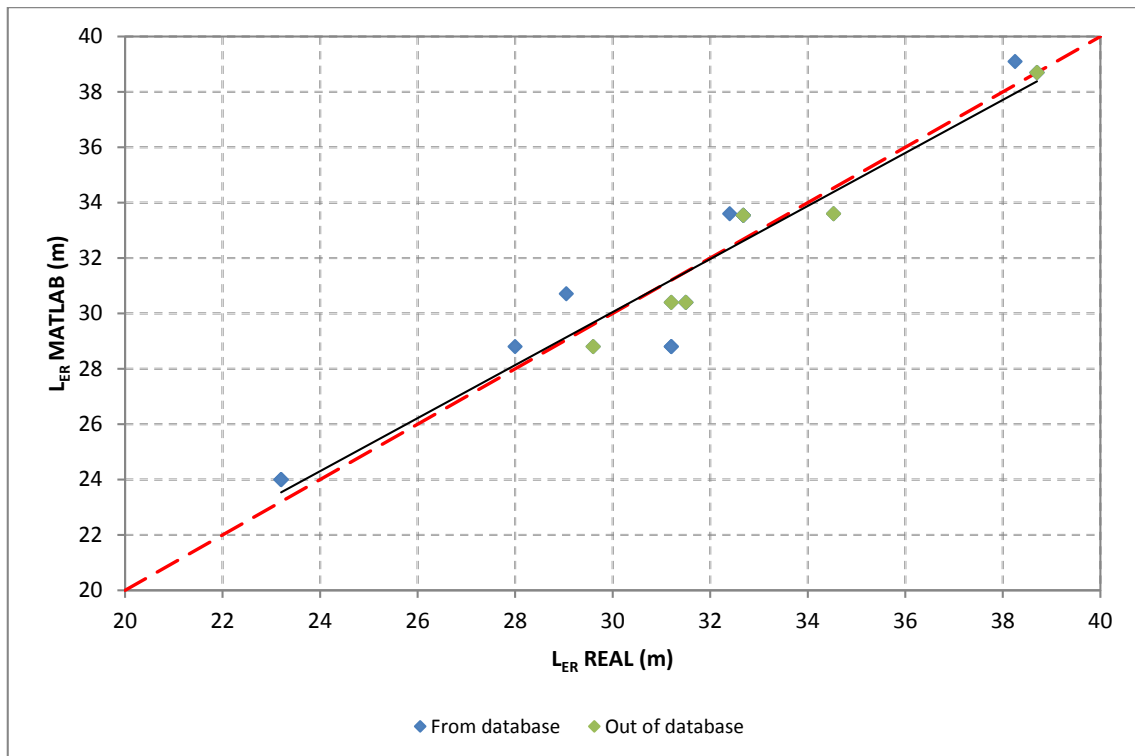
Παρατηρούνται μεγάλες αποκλίσεις οι οποίες όμως είναι δικαιολογημένες καθώς όπως αναφέρθηκε παραπάνω η επιλογή των δεξαμενών ποικίλει ανάλογα με τις απαιτήσεις του πλοιοκτήτη. Πιο συγκεκριμένα για δεξαμενές Diesel Oil και Lubricating Oil εμφανίζονται μεγάλες διαφορές που επηρεάζουν και το συνολικό αποτέλεσμα. Τα καύσιμα και λιπαντικά διαφέρουν ανάλογα με την κατανάλωση που έχει ο κάθε κινητήρας και οι γεννήτριες αλλά και με το πλήθος και τη λειτουργία των βοηθητικών μηχανημάτων. Επίσης, η ακτίνα ενέργειας που διαφέρει από πλοίο σε πλοίο καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την απαιτούμενη ποσότητα καυσίμων.

### 4.3. Οριοθέτηση Φρακτών

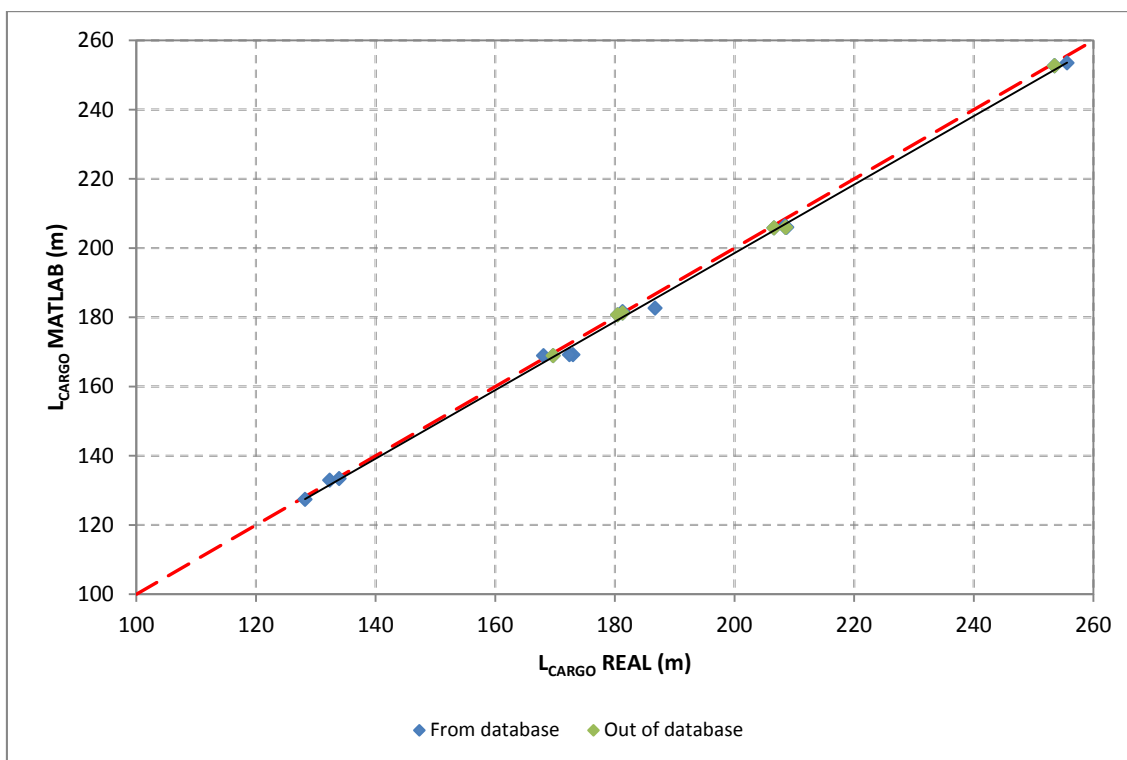
Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα του προγράμματος που προέκυψαν για την τοποθέτηση φρακτών:



Σχήμα 65 Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για  $L_{AFT}$



Σχήμα 66 Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για  $L_{ER}$



Σχήμα 67 Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για  $L_{CARGO}$

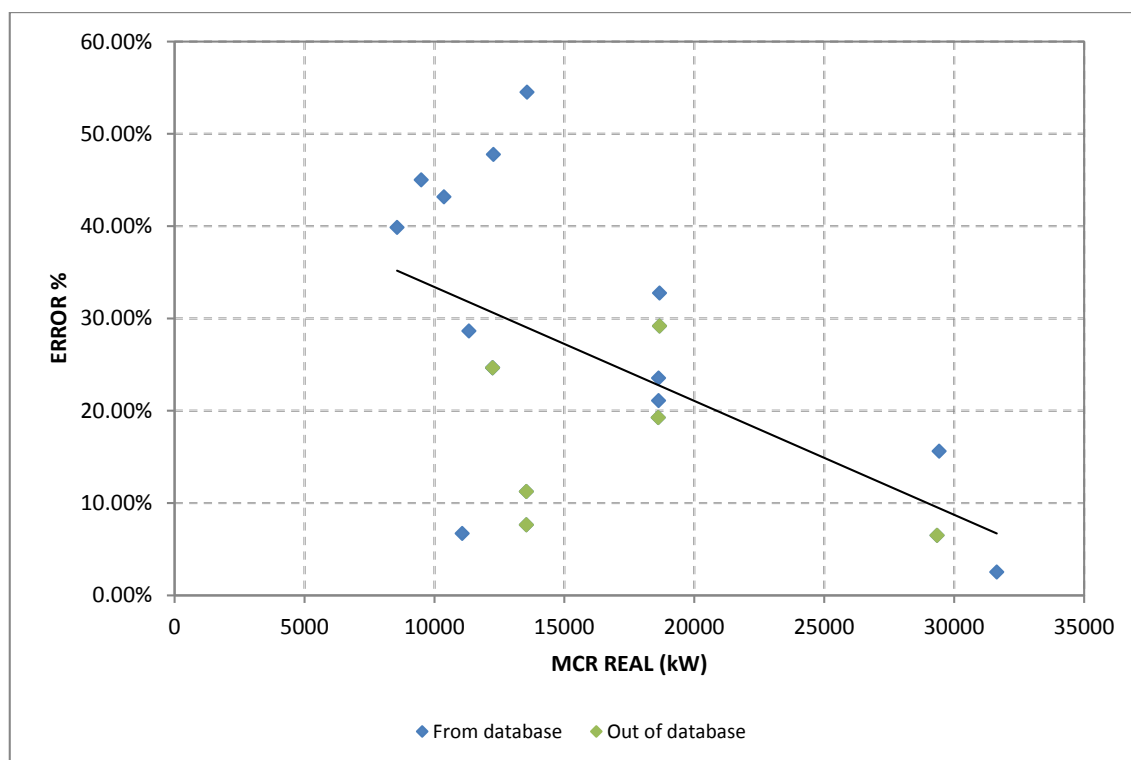
### Παρατηρήσεις

Η θέση των φρακτών συμπίπτει σε μεγάλο βαθμό με την πραγματική από τα υπάρχοντα πλοία. Εδώ πρέπει να σημειωθεί πως η τοποθέτηση των φρακτών γίνεται να μεν σύμφωνα με κανονισμούς αλλά εξαρτάται και από τον εκάστοτε σχεδιαστή που ορίζει τους κατασκευαστικούς νομείς που υπάρχουν στο πλοίο και την ισαπόστασή τους (Frame spacing). Επομένως μικρές αποκλίσεις είναι αποδεκτές. Πιο συγκεκριμένα, για το χώρο του μηχανοστασίου δεν λαμβάνεται υπόψη για τον υπολογισμό του μήκους οι απαιτήσεις της μηχανολογικής εγκατάστασης καθώς για πλοία ίδιου μήκους οι απαιτήσεις μηχανολογικής εγκατάστασης (κύριας μηχανής, βοηθητικών μηχανημάτων, αντλιών κλπ.) μπορεί να ποικίλουν. Αυτή η απόκλιση έχει επίπτωση και στους άλλους χώρους του πλοίου. Ακόμη για το χώρο φορτίου παίζει πολύ σημαντικό ρόλο η τοποθέτηση της πρωραίας φρακτής σύγκρουσης που πρέπει να συμβαδίζει με τις απαιτήσεις των κανονισμών της SOLAS. Στο πρόγραμμά μας έχουμε θεωρήσει ότι η πρωραία φρακτή σύγκρουσης τοποθετείται στο μέσο των ορίων που ορίζονται από τους κανονισμούς αυτούς, υπόθεση η οποία δεν ακολουθείται κατ' ανάγκη για την κατασκευή των πλοίων του δείγματός μας.

#### 4.4. Εκτίμηση Ισχύος

Πίνακας 16 Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για MCR

		<b>MCR REAL</b>	<b>MCR MATLAB</b>	<b>Error %</b>
Ship 13	HANDYMAX	8561	11973	39.85%
Ship 18	HANDYMAX	9488	13758	45.00%
Ship 19	HANDYMAX	11069	11811	6.70%
Ship 25	PANAMAX	12270	18130	47.76%
Ship 27	PANAMAX	10365	14840	43.17%
Ship 30	PANAMAX	12240	15258	24.66%
Ship 41	AFRAMAX	11327	14572	28.65%
Ship 44	AFRAMAX	13560	20952	54.51%
Ship 58	SUEZMAX	18623	23009	23.55%
Ship 67	SUEZMAX	18660	24770	32.75%
Ship 69	SUEZMAX	18623	22552	21.10%
Ship 72	VLCC	31640	32436	2.52%
Ship 74	VLCC	29424	34017	15.61%
Ship 77	PANAMAX	12240	15258	24.66%
Ship 78	AFRAMAX	13539	14574	7.65%
Ship 79	AFRAMAX	13539	15062	11.25%
Ship 80	SUEZMAX	18610	22195	19.27%
Ship 81	SUEZMAX	18660	24104	29.18%
Ship 82	VLCC	29340	31244	6.49%



Σχήμα 68 Συγκριτικά αποτελέσματα προγράμματος για MCR

Παρατηρήσεις

Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ότι γίνεται μια συστηματική υπερεκτίμηση στην ισχύ MCR σε ποσοστό έως και 55%. Στο πρόγραμμα, η ταχύτητα που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της αντίστασης και της ισχύος είναι αυτή που αντιστοιχεί στο βύθισμα σχεδίασης. Ωστόσο, για τα πλοία μπορεί να έχουν γίνει οι παραπάνω υπολογισμοί για μικρότερες ταχύτητες. Επίσης, οι παραδοχές που έχουμε θεωρήσει για τις προσαυξήσεις που χρειάζονται να γίνουν στην απαιτούμενη ισχύ SHP της έλικας προκειμένου να επιλεγεί η κατάλληλη ισχύ MCR είναι πιθανό να διαφέρουν από αυτές που λαμβάνονται υπόψη στα πλοία. Τέλος, για τον υπολογισμό της αντίστασης όπως έχει προαναφερθεί έχει χρησιμοποιηθεί η μέθοδος Holtrop-Mennen (1982, 1984). Η μέθοδος αυτή μετράει 30 χρόνια ύπαρξης και στηρίζεται στη στατιστική ανάλυση πλοίων που είναι ακόμα παλαιότερα. Είναι πιθανό λοιπόν, η αντίσταση που υπολογίζεται να είναι μεγαλύτερη από την πραγματική καθώς οι νέες σχεδιάσεις είναι πιο αποδοτικές και στοχεύουν στη μείωση της ολικής αντίστασης μέσω βελτιστοποίησης της γάστρας που έχουν ως αποτέλεσμα μειωμένη απαίτηση ισχύος πρόωσης και μικρότερη κατανάλωση καυσίμων.

#### 4.5. Τεχνοοικονομική Μελέτη

Έχοντας στη διάθεσή μας κάποια πραγματικά ταξίδια για πλοία του δείγματος μας μπορούμε εκτελώντας το πρόγραμμα να κάνουμε μια σύγκριση με κάποιες ενδεικτικές τιμές ναύλων (\$/μέρα). Τα ταξίδια που πρόκειται να πραγματοποιηθούν τα υπό μελέτη πλοία φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 17 Δεδομένα πραγματικών ταξιδιών για πλοία του δείγματος

	Ship 15	Ship 56
	Product	Crude Oil
	HANDYMAX	SUEZMAX
DWT	40696	139497.3
Λιμάνι φόρτωσης	Sidi Kerir, Egypt	Basrah, Iraq
Παραμονή στο λιμάνι φόρτωσης (μέρες)	2	3
Λιμάνι εκφόρτωσης	Agioli Theodoroi, Greece	Agioli Theodoroi, Greece
Παραμονή στο λιμάνι εκφόρτωσης (μέρες)	1	2
Απόσταση μεταξύ λιμένων (sm)	538	3972
Ταχύτητα πλεύσης (kn)	13	12
Διάρκεια κυκλικού ταξιδιού (μέρες)	6.4	32.6

Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι ο ναύλος υπολογίζεται από τη στιγμή άφιξης στο λιμάνι φόρτωσης μέχρι τη στιγμή αναχώρησης από το λιμάνι εκφόρτωσης.

Εκτελώντας το πρόγραμμα για τα δύο παραπάνω πλοία προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα:

Πίνακας 18 Αποτελέσματα τεχνοοικονομικής μελέτης για πλοία του δείγματος

	Ship 15	Ship 56
	Product	Crude Oil
	HANDYMAX	SUEZMAX
Steel Cost (\$)	18,262,466	44,817,449
Outfit Cost (\$)	4,926,722	6,188,758
Machinery Cost (\$)	14,940,864	22,890,639
Build Cost (\$)	38,130,052	73,896,846
Fuel Cost (\$/year)	2,809,421	7,427,325
Provisions Cost (\$/year)	82,800	89,700
Salary Cost (\$/year)	672,000	728,000
Port Cost (\$/year)	2,744,548	1,431,592
Insurance Cost (\$/year)	381,300	738,968
Repair Cost (\$/year)	190,650	369,484
Instalment (\$/year)	2,330,178	4,515,934
Running Costs (\$/year)	9,210,898	15,301,004
Payload (t/year)	2,013,921	1,393,031
RFR (\$/day)	32,578	55,747
RFR (\$/t)	5.58	13.81



Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα για τους ναύλους θα γίνει σύγκριση με κάποιες ενδεικτικές τιμές (Clarkson Research Services, Shipping Intelligence Weekly, January 2015):

Πίνακας 19 Σύγκριση ναύλων από το MATLAB με ενδεικτικές τιμές (Ιανουάριος 2015)

	<b>MATLAB RFR (\$/day)</b>	<b>CLARKSON Rate (\$/day)</b>
Ship 15	32,578.5	23,995
Ship 56	55,746.8	49,231

Όπως φαίνεται από την παραπάνω σύγκριση βλέπουμε ότι το πρόγραμμα κάνει μια υπερεκτίμηση στους ναύλους σε σχέση με τις πραγματικές τιμές. Υπάρχουν πολλοί λόγοι στους οποίους μπορεί να οφείλεται αυτό. Αρχικά, όσον αφορά τα λειτουργικά έξοδα του πλοίου, το κόστος των καυσίμων αποτελεί το μεγαλύτερο ποσοστό του συνόλου των λειτουργικών εξόδων. Στην προκειμένη περίπτωση έχουμε λάβει υπόψη ότι το πλοίο πλέει με την ίδια ταχύτητα και έχει την ίδια κατανάλωση και στις δύο διαδρομές του κυκλικού ταξιδιού. Το πλοίο όταν επιστρέφει από το λιμάνι εκφόρτωσης πλέει σε κατάσταση ερματισμού γεγονός που σημαίνει ότι η κατανάλωση καυσίμου είναι πιθανότατα μικρότερη για τη διαδρομή αυτή. Επίσης, σε περιόδους ιδιαίτερα χαμηλών ναύλων όπως η σημερινή, είναι πολύ πιθανό ο πλοιοκτήτης να μειώνει την ταχύτητα πλεύσης ώστε το ταξίδι να είναι πιο οικονομικό. Επιπλέον, οι αποκλίσεις που παρουσιάζονται θα μπορούσαν να εξηγηθούν από την υπερεκτίμηση στο κόστος κατασκευής του πλοίου το οποίο υπεισέρχεται στον υπολογισμό της Καθαρής Παρούσας Αξίας και κατ' επέκταση του ναύλου. Παρακάτω φαίνεται ένας πίνακας με συγκριτικά αποτελέσματα:

Πίνακας 20 Σύγκριση κόστους κατασκευής με ενδεικτικές τιμές (Ιανουάριος 2015)

	<b>MATLAB Build Cost (\$)</b>	<b>CLARKSON Newbuilding Price (\$)</b>
Ship 15	38,130,052	36,800,000
Ship 56	73,896,846	65,000,000

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε μια στατιστική ανάλυση τεχνικών στοιχείων πλοίων μεταφοράς υγρού φορτίου. Για να γίνει αυτό χρειάστηκε να δημιουργηθεί μια βάση δεδομένων η οποία αποτελείται από δεδομένα του Εργαστηρίου Μελέτης Πλοίου της ΣΝΜΜ/ΕΜΠ σε συνδυασμό με τεχνικά στοιχεία που συλλέχθηκαν από ναυτιλιακές εταιρείες (Dynacom Tankers Management Ltd., AVIN International S.A.). Το αποτέλεσμα ήταν η δημιουργία μια βάσης δεδομένων με συνολικά 76 πλοία μεταφοράς υγρού φορτίου.

Από τη στατιστική ανάλυση των παραπάνω προέκυψαν διαγράμματα και προσεγγιστικοί τύποι που συνδέουν τις διάφορες μεταβλητές σχεδίασης μεταξύ τους. Οι σχέσεις αυτές αποδεικνύονται πολύτιμες για το σχεδιαστή προκειμένου να εκτιμήσει τα βασικά χαρακτηριστικά του υπό σχεδίαση πλοίου στην προκαταρκτική φάση της σχεδίασης. Συγκρίνοντας τις σχέσεις αυτές και τα διαγράμματα, από τα οποία προήλθαν, με παρόμοια από παλαιότερες αντίστοιχες ερευνητικές εργασίες για δεξαμενόπλοια παρατηρούμε ομοιότητες και πολλά κοινά στοιχεία (βλ. Ζαχαρίου, 2000, Nkoko Nossa, 2013) γεγονός που ενισχύει την εγκυρότητά τους.

Στη συνέχεια της διπλωματικής εργασίας αναπτύξαμε ένα λογισμικό προμελέτης πλοίων μεταφοράς υγρού φορτίου για το οποίο στηριχθήκαμε στα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκαν διάφορες μέθοδοι υπολογισμού της αντίστασης του πλοίου, των ομάδων βαρών του Lightship και εκτίμησης του συνολικού κόστους.

Το πρόγραμμα μας έδωσε αποτελέσματα για έναν αριθμό πλοίων που συμπεριλαμβάνονται στο δείγμα αλλά και για έναν αριθμό πλοίων που δεν συμπεριλήφθηκαν στη στατιστική ανάλυση ώστε να δούμε κατά πόσο οι εμπειρικοί μας τύποι έχουν ισχύ και στα πλοία αυτά. Υπολογίστηκαν τα βάρη του πλοίου ( $\Delta$ , LS, DWT) και οι χωρητικότητες των δεξαμενών. Επίσης, σύμφωνα με τις επιλογές του σχεδιαστή γίνεται η οριοθέτηση των χώρων του πλοίου. Ο υπολογισμός της αντίστασης έγινε με τη μέθοδο Holtrop-Mennen 1982 και Holtrop 1984 με στόχο την επιλογή του κατάλληλου κινητήρα από μια λίστα διαθέσιμων, τα στοιχεία των οποίων έχουμε συγκεντρώσει από τα εγχειρίδια των κατασκευαστών. Ακολουθεί αναλυτικός υπολογισμός του Lightship με αναλυτικές μεθόδους ώστε στη συνέχεια να υπολογιστεί το κόστος κατασκευής του πλοίου που στηρίζεται στα επιμέρους βάρη του Lightship. Το κόστος κατασκευής που θα προκύψει σε συνδυασμό με τα λειτουργικά έξοδα του πλοίου μπορούν να καθορίσουν τον ελάχιστο απαιτούμενο ναύλο του πλοίου (RFR).

Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων όπως παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 4 φαίνεται ότι αρχικά για το DWT και Lightship του πλοίου το πρόγραμμα κάνει πολύ καλές εκτιμήσεις. Κάποιες αποκλίσεις στον υπολογισμό του Lightship μπορούν να εξηγηθούν από διάφορες κατασκευαστικές ιδιαιτερότητες όπως τη δυνατότητα πλεύσης στους πάγους ή το μεγαλύτερο ποσοστό ενίσχυσης για τη διαμήκη αντοχή, παράμετροι οι οποίες δεν μπορούν να ληφθούν υπόψη στην προεκτίμηση του βάρους. Εν συνέχεια, βλέπουμε ότι η χωρητικότητα των δεξαμενών φορτίου εκτιμάται με μεγάλη ακρίβεια πέρα από κάποιες ιδιαίτερες περιπτώσεις μικρών πλοίων. Για τις δεξαμενές καυσίμων (Heavy Fuel και Diesel), λιπαντικών και φρέσκου νερού έγινε μια προσπάθεια να βγουν εμπειρικοί τύποι για τον υπολογισμό της χωρητικότητας της κάθε δεξαμενής. Ωστόσο, επειδή δεν προέκυψαν ακριβείς προσεγγιστικοί τύποι θεωρήθηκε καλύτερο να εκτιμήσουμε τη συνολική χωρητικότητα των παραπάνω δεξαμενών. Η χωρητικότητα και επομένως το βάρος των δεξαμενών αυτών έχουν σημαντικό ρόλο στον υπολογισμό του ωφέλιμου φορτίου (Payload). Τέλος, ένα αξιοσημείωτο αποτέλεσμα είναι η εκτίμηση της ισχύος για την οποία γίνεται υπερεκτίμηση σε ένα ποσοστό που φτάνει έως και το 55%. Οι παραδοχές για διάφορες προσαυξήσεις που έχουν γίνει εδώ 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 αντίστασης μετράει ήδη αρκετά χρόνια ύπαρξης και στηρίζεται σε ακόμα παλαιότερα πλοία. Οι νέες σχεδιάσεις είναι πιο αποδοτικές παρουσιάζοντας μειωμένη αντίσταση λόγω βελτιστοποίησης γάστρας. (βλ. Κεφάλαιο 4.4).

Στο τελευταίο στάδιο της διπλωματικής έγινε μια τεχνοοικονομική μελέτη σε δύο από τα πλοία του δείγματός μας για τα οποία υπήρχαν επαρκή στοιχεία για τα ταξίδια που εκτελούσαν. Οι

τιμές ναύλων που προέκυψαν ήταν υπερεκτιμημένες συγκριτικά με ενδεικτικές πραγματικές τιμές. Οι διαφορές αυτές εξηγούνται από διάφορες υποθέσεις που έχουν γίνει στη θεώρησή μας όπως η σταθερή κατανάλωση καυσίμου και η σταθερή ταχύτητα όταν το πλοίο πλέει άδειο και πλήρως φορτωμένο όπως εξηγούνται αναλυτικότερα στο Κεφάλαιο 4.5.

Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα:

- Η πραγματοποίηση παρόμοιας στατιστικής ανάλυσης αλλά για μεγαλύτερο αριθμό πλοίων. Στην περίπτωση αυτή θα χρειαζόταν η συμβολή ναυτιλιακών εταιρειών για τη συγκέντρωση των στοιχείων. Στα πλαίσια αυτής της ανάλυσης θα μπορούσε να γίνει πιο εξειδικευμένη μελέτη κάνοντας μια διάκριση των πλοίων ανάλογα με:
  - Τη χρονολογία ναυπήγησης. Θα μπορούσε να χωριστούν σε πλοία της τελευταίας και προηγούμενης δεκαετίας.
  - Το μέγεθος των πλοίων. Για κάθε κατηγορία μεγέθους να γίνει διαφορετική ανάλυση.
  - Το είδος του πλοίου. Ανάλογα με τη λειτουργία τους ή το είδος του μεταφερόμενου φορτίου τα δεξαμενόπλοια διακρίνονται σε διάφορα είδη που παρουσιάζουν ιδιαίτερα χαρακτηριστικά προς μελέτη.
  - Τη χώρα κατασκευής και το ναυπηγείο.
  - Το νηογνώμονα (IACS/non IACS).
- Η πραγματοποίηση της στατιστικής ανάλυσης και ανάπτυξης λογισμικού θα μπορούσε να γίνει και για άλλους τύπους πλοίων (π.χ. Containerships, E/Γ-O/Γ κλπ.). Στην περίπτωση αυτή θα έπρεπε να δοθεί βαρύτητα στη συλλογή των δεδομένων όπου για τέτοιου είδους πλοία είναι περιορισμένα.
- Το πρόγραμμα που δημιουργήθηκε θα μπορούσε να συνδεθεί με την κατάλληλη επεξεργασία με κάποιο ναυπηγικό πακέτο το οποίο θα μπορούσε να κάνει τη σχεδίαση της γάστρας του πλοίου και κατ' επέκταση να εκτελέσει κάποιους υδροστατικούς υπολογισμούς.
- Η βελτιστοποίηση με χρήση κάποιου εξωτερικού προγράμματος που θα μπορεί να συνδεθεί με το υπάρχον πρόγραμμα ή με τη χρήση της δυνατότητας βελτιστοποίησης από το MATLAB (Optimization Tool). Η βελτιστοποίηση μπορεί να γίνει με βάση κάποια τεχνικά κριτήρια που εστιάζουν στην ελαχιστοποίηση του Lightship του πλοίου και επομένως στη μεγιστοποίηση του ωφέλιμου φορτίου ή στη μειωμένη αντίσταση γάστρας που οδηγεί σε μικρότερη απαίτηση ισχύος και κατανάλωση καυσίμων. Επίσης, όσον αφορά οικονομικά κριτήρια, η ελαχιστοποίηση του κόστους κατασκευής θα μπορούσε να αποτελέσει ένα στόχο βελτιστοποίησης που αφορά περισσότερο το ναυπηγείο ενώ ένα τεχνοοικονομικό κριτήριο που ενδιαφέρει περισσότερο τον πλοιοκτήτη είναι η ελαχιστοποίηση του ελάχιστου απαιτούμενου ναύλου (RFR).

## 6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Ζαραφωνίτης Γεώργιος, «Εισαγωγή στη Ναυπηγική και τη Θαλάσσια Τεχνολογία», Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2015.
2. Ζαχαρίου Ζαχαρίας, «Στατιστική Ανάλυση και Επεξεργασία Τεχνικών Στοιχείων και Επεξεργασία Τεχνικών Στοιχείων Διαφόρων Τύπων Εμπορικών Πλοίων», Διπλωματική Εργασία – Επιβλ. Καθ. κ. Γ. Ζαραφωνίτη, Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Εργαστήριο Μελέτης Πλοίου, 2000.
3. Καλοκαιρινός, Ε., Μαυροειδής, Θ., Ράδου, Γ., «Παλινδρομική Ανάλυση Στοιχείων Μελέτης Φορτηγών Πλοίων», Διπλωματικές Εργασίες – Επιβλ. Καθ. κ. Α. Παπανικολάου, Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Εργαστήριο Μελέτης Πλοίου, 2000-2005.
4. Παπανικολάου Α. – Αναστασόπουλος Κ., «Μελέτη και Εξοπλισμός Πλοίου Ι (Μεθοδολογία Προμελέτης) – Συλλογή Βοηθημάτων», Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2007.
5. 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.
6. Περδίκης Ανδρέας, «Μελέτη & Σχεδίαση Ταχύπλοου Ε/Γ-ΟΓ Πλοίου Νέας Τεχνολογίας με Χρήση Η/Υ», Διπλωματική Εργασία – Επιβλ. Καθ. κ. Γ. Ζαραφωνίτη,, Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Εργαστήριο Μελέτης Πλοίου, 2000.
7. Πολίτης Κ. Γ., «Σημειώσεις Μαθήματος: Αντίστασης και Πρόωσης Πλοίου», Μάϊος 2008.
8. Ψαραύτης Ν. Χαρίλαος, «Οικονομική Θαλασσιών Μεταφορών Ι», Αθήνα 2006.
9. Aalbers, A., “Evaluation of Ship Design Alternatives”, 34th WEGEMT School, Developments in the Design of Propulsors and Propulsion Systems, June 2000.
10. Holtrop, J. & Mennen, G.G.J., “An Approximate Power Prediction Method”, International Shipbuilding Progress, Vol. 29, pp. 166-170, July 1982.
11. Holtrop, J., «A Statistical Re-Analysis of Resistance and Propulsion Data», International Shipbuilding Progress, Vol. 31, pp.272–276, 1984.
12. 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
13. 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
14. International Maritime Organization, International Convention of Tonnage Measurement of Ships 1969.
15. International Maritime Organization, MARPOL 73/78, Consolidated Edition 2013.
16. Lamb, T. (eds), “Ship Design and Construction”, SNAME publication, revision of the book: D’Arcangelo, A.M. (eds) (1969) “Ship Design and Construction”, SNAME publication, New York, 2003.
17. MAN Diesel & Turbo, «Basic Principles of Ship Propulsion»
18. MAN Diesel & Turbo, «Marine Engine – IMO Tier II Programme 2nd edition 2014», <http://marine.man.eu>
19. Mathworks MATLAB R2014b, «Curve Fitting Toolbox – User’s Guide», <http://www.mathworks.com>
20. Mathworks MATLAB R2014b, «Optimization Toolbox – User’s Guide», <http://www.mathworks.com>

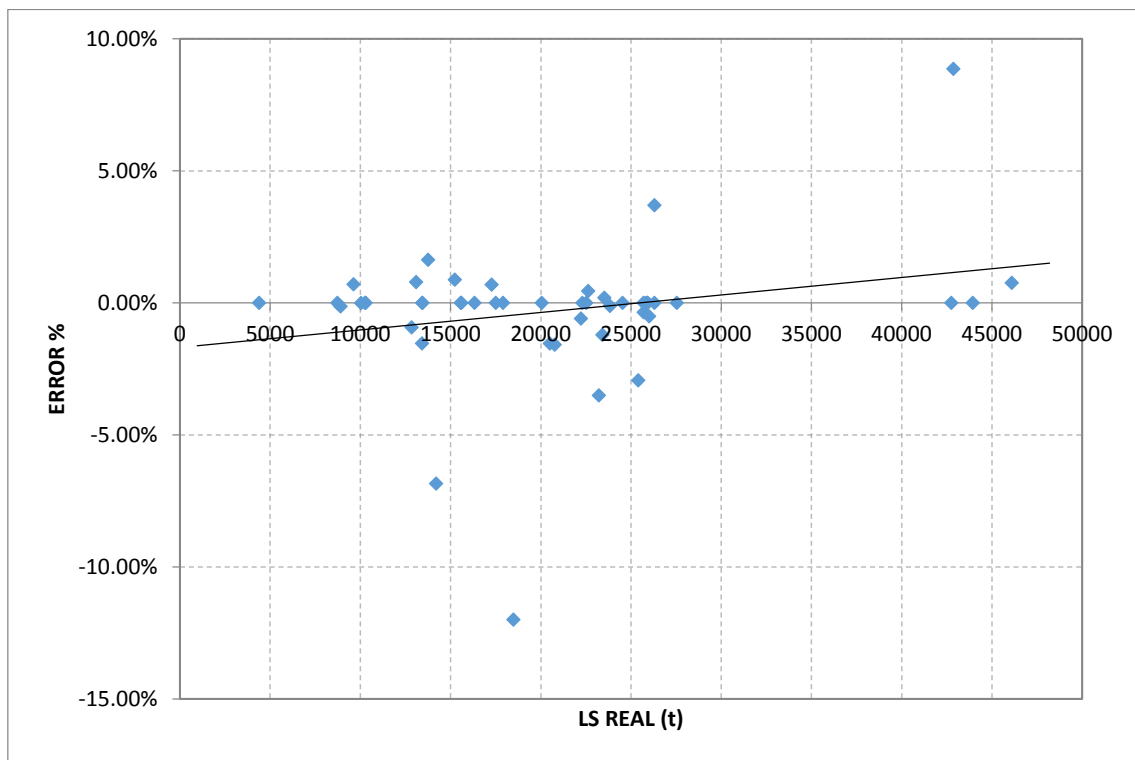
21. Nkoko Nossa Anneck, «Στατιστική Ανάλυση Τεχνικών Στοιχείων Πλοίων Μεταφοράς Πετρελαίου», Διπλωματική εργασία, Επιβλέπων Καθηγητής κ. Γ. Ζαραφωνίτης, Εργαστήριο Μελέτης Πλοίου ΕΜΠ, Αθήνα 2013.
22. Oosterveld, Oossanen, “Further Computer-Analysed Data of the Wagenigen B-Screw Series”, ISP, Vol. 22, July 1975.
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., “Ship Design”.Entwerfen von Schiffen, Koehler Verl., Herford 1985
26. Schneekluth, H. and Bertram, V., “Ship Design For Efficiency and Economy”, 2nd edition, 1998 (Butterworth– Heinemann, Oxford).
27. Taggart, R. (eds), “Ship Design and Construction”, SNAME Publication, New York, 1980.
28. Wärtsila, «Wärtsila Solutions for Marine and Oil & Gas Markets», 2014, <http://www.wartsila.com>
29. Watson, D.G.M., Gilfillan, A.W., “Some Ship Design Methods”, Trans. RINA pp. 279-324, 1976.
30. Watson, D. G. M., “Practical Ship Design”, Elsevier Science Ltd, Oxford, 1988.
31. Zaraphonitis, G., Papanikolaou, A., Oestvik, I., Eliopoulou, E., Georgantzi, N., Karayannis, T., “Review of Technoeconomic Characteristics of Fast Marine Vehicles”, Proc. Int. Conf. on High Speed Marine Vehicles, HSMV’02, Sept. 2002, Naples (Italy).
32. Zaraphonitis, G., “A Statistical Analysis of Technical Characteristics of Fast Marine Vehicles”, Proc. ICMRT’05, Sept. 2005, Ischia (Italy).
33. IHS World Shipping Encyclopaedia version 12.01, IHS Fairplay Eds.
34. IHS Sea-Web Online Database, <http://www.sea-web.com>

## 7. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α – ΔΙΑΣΤΑΥΡΩΣΗ ΜΕ IHS FAIRPLAY

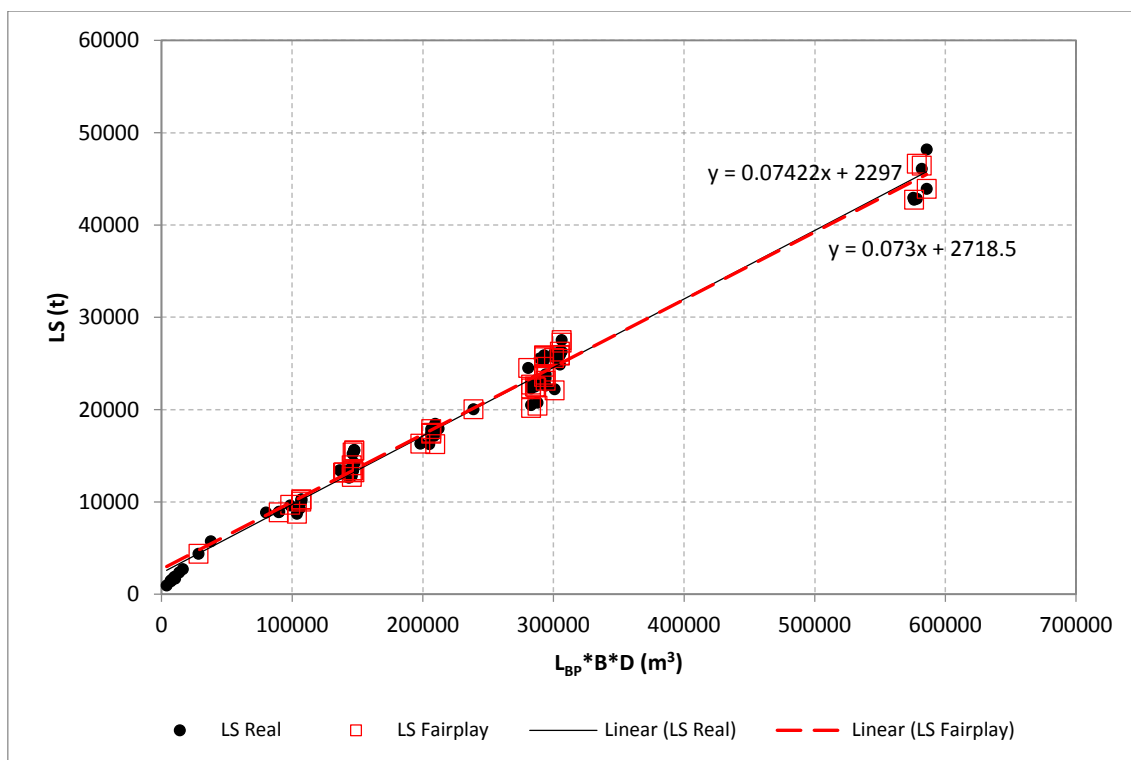
Λόγω των διαφόρων πηγών προέλευσης των συλλεγέντων στοιχείων, κρίθηκε σκόπιμο η διασταύρωση αυτών με τα αντίστοιχα στοιχεία της βάσης δεδομένων του IHS Fairplay World Shipping Encyclopedia version 12.01 που είναι διαθέσιμη στο Εργαστήριο Μελέτης Πλοίου της ΣΝΜΜ/ΕΜΠ.

Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνεται η ποσοστιαία διαφορά (ERROR %) των στοιχείων της βάσης δεδομένων του IHS Fairplay από τα δικά μας συλλεγέντα στοιχεία (REAL). Επίσης παρουσιάζονται διαγράμματα με προσεγγιστικούς τύπους που προκύπτουν τόσο από τα στοιχεία του δείγματός μας όσο και από τα στοιχεία της βάσης δεδομένων του IHS Fairplay ώστε να συγκρίνουμε την απόκλιση των προσεγγιστικών τύπων που θα προκύψει αν λάβουμε υπόψη μόνο τα στοιχεία της IHS Fairplay.

### ✓ Lightship



Σχήμα 69 Ποσοστιαία διαφορά του Lightship (t)

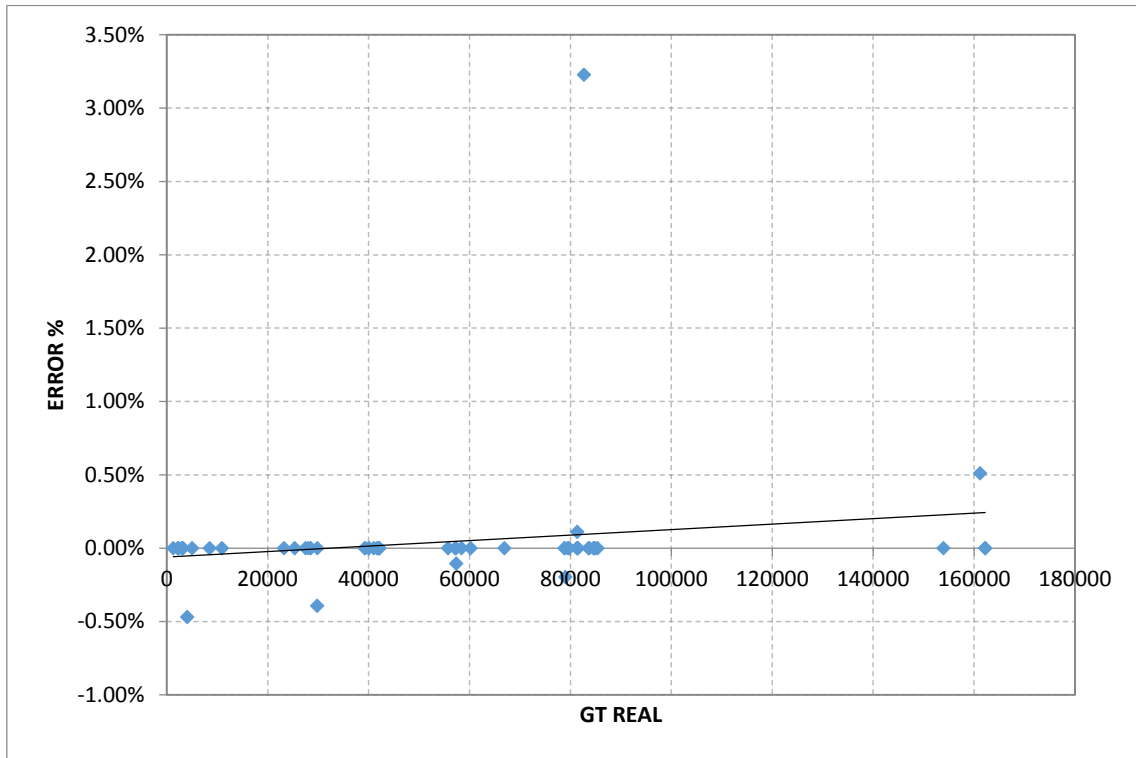


Σχήμα 70  $LS_{REAL}$  και  $LS_{FAIRPLAY}$  συναρτήσεις του  $L_{BP}$ ,  $B$ ,  $D$

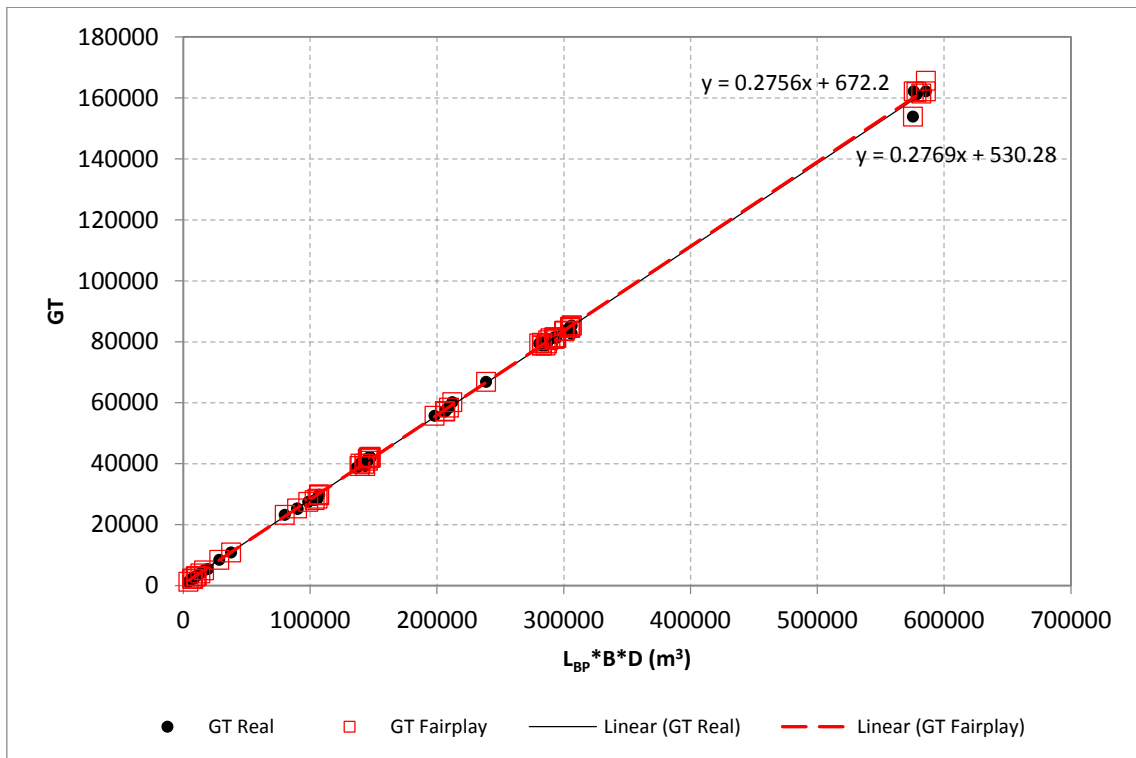
### Παρατηρήσεις

- Στοιχεία δείγματος:  $LS = 0.07422 * L_{BP} * B * D + 2297$
- Στοιχεία IHS Fairplay:  $LS = 0.073 * L_{BP} * B * D + 2718.5$

✓ Ολική Χωρητικότητα (Gross Tonnage)



Σχήμα 71 Ποσοστιαία διαφορά του Gross Tonnage (GT)

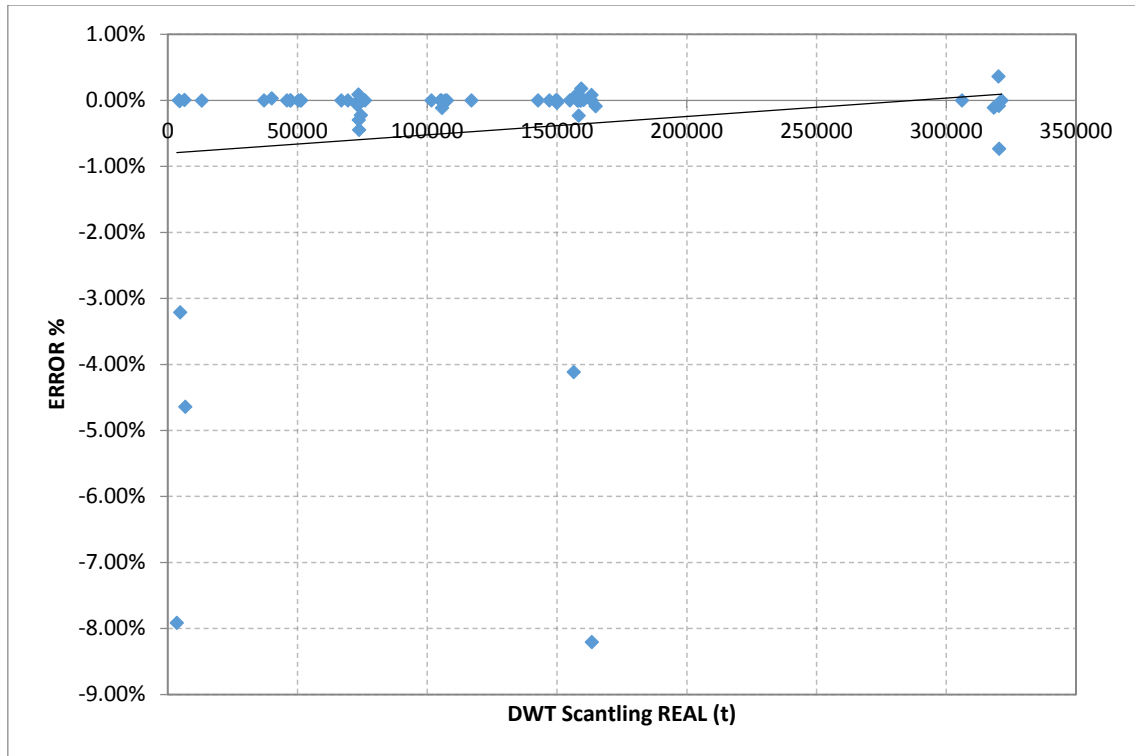


Σχήμα 72  $GT_{REAL}$  και  $GT_{FAIRPLAY}$  συναρτήσεσι των  $L_{BP}$ ,  $B$ ,  $D$

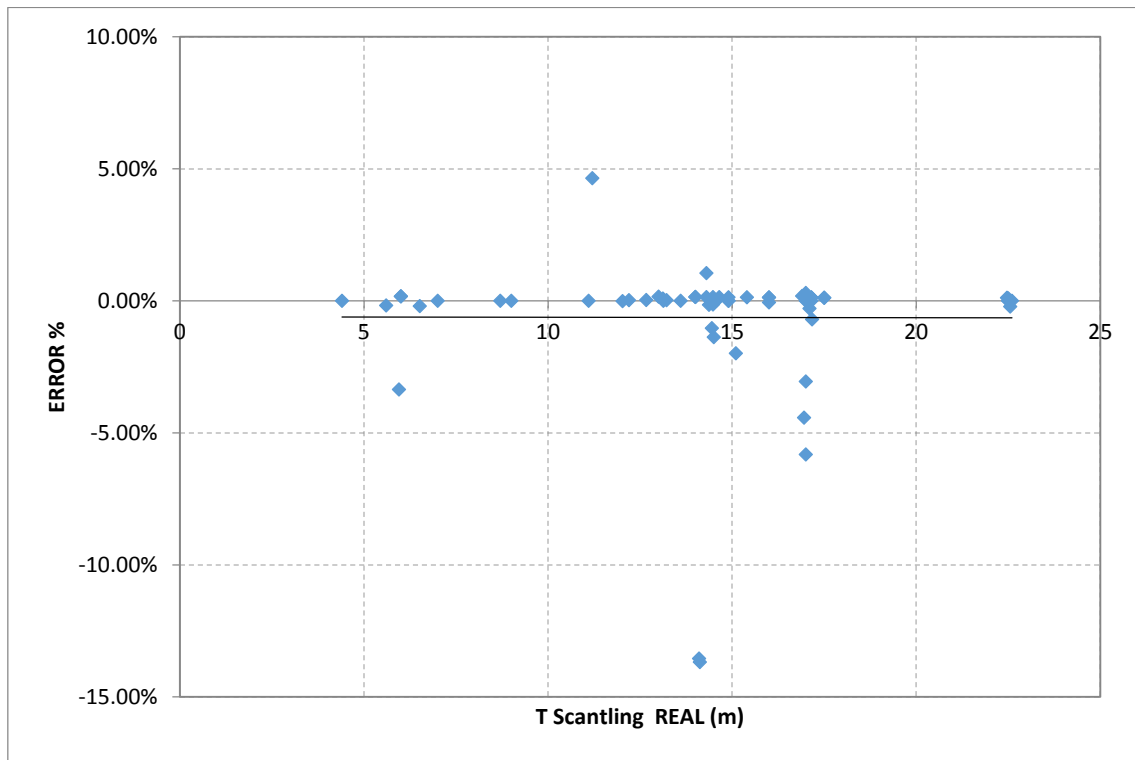
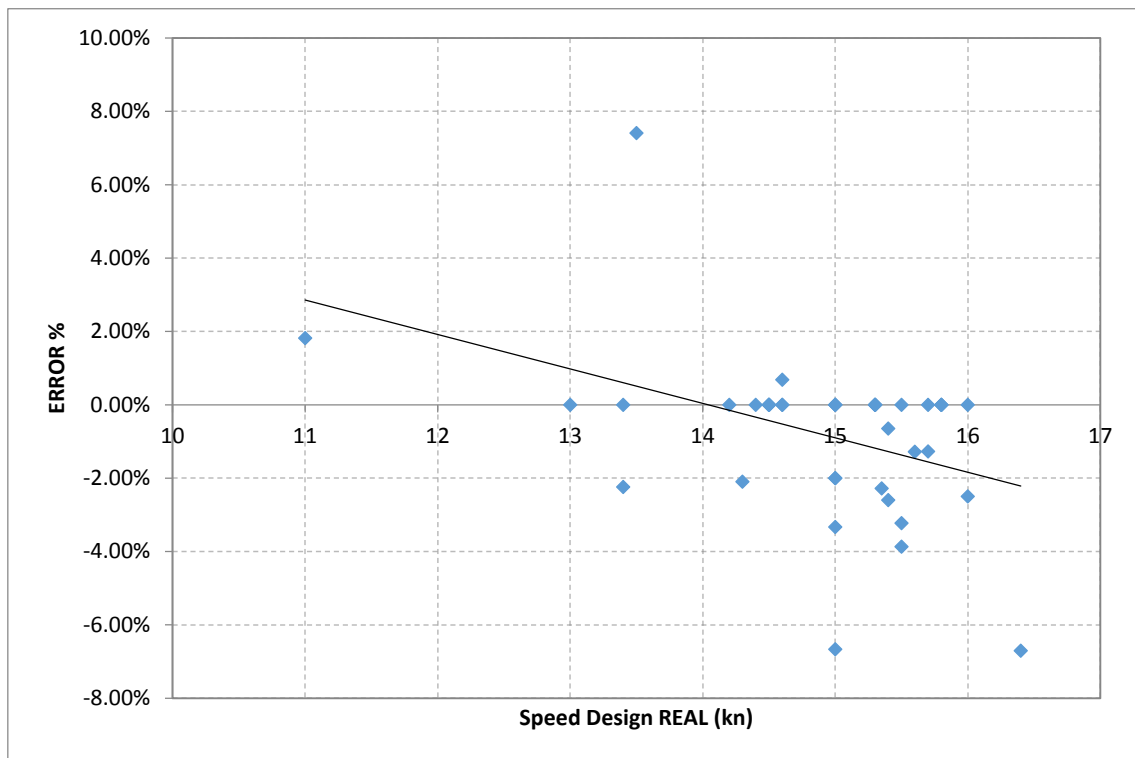


Παρατηρήσεις

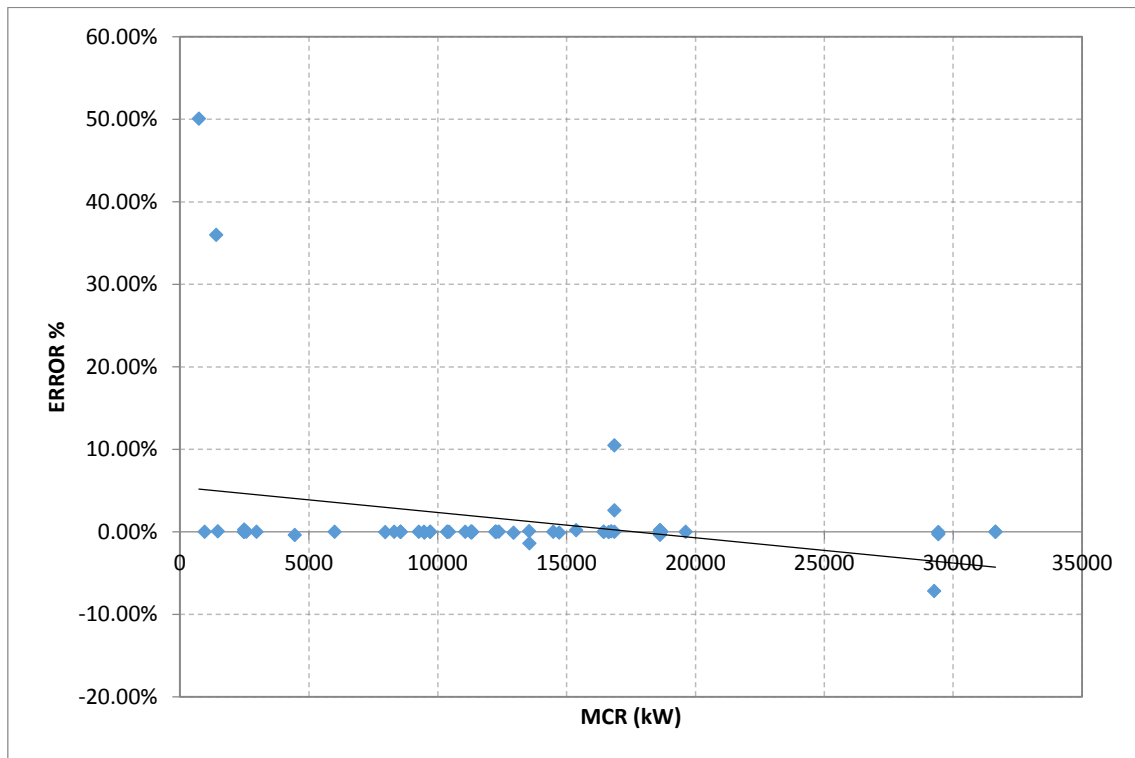
- Στοιχεία δείγματος:  $GT = 0.2756 * L_{BP} * B * D + 672.2$
- Στοιχεία IHS Fairplay:  $GT = 0.2769 * L_{BP} * B * D + 530.28$

✓ Deadweight (DWT)

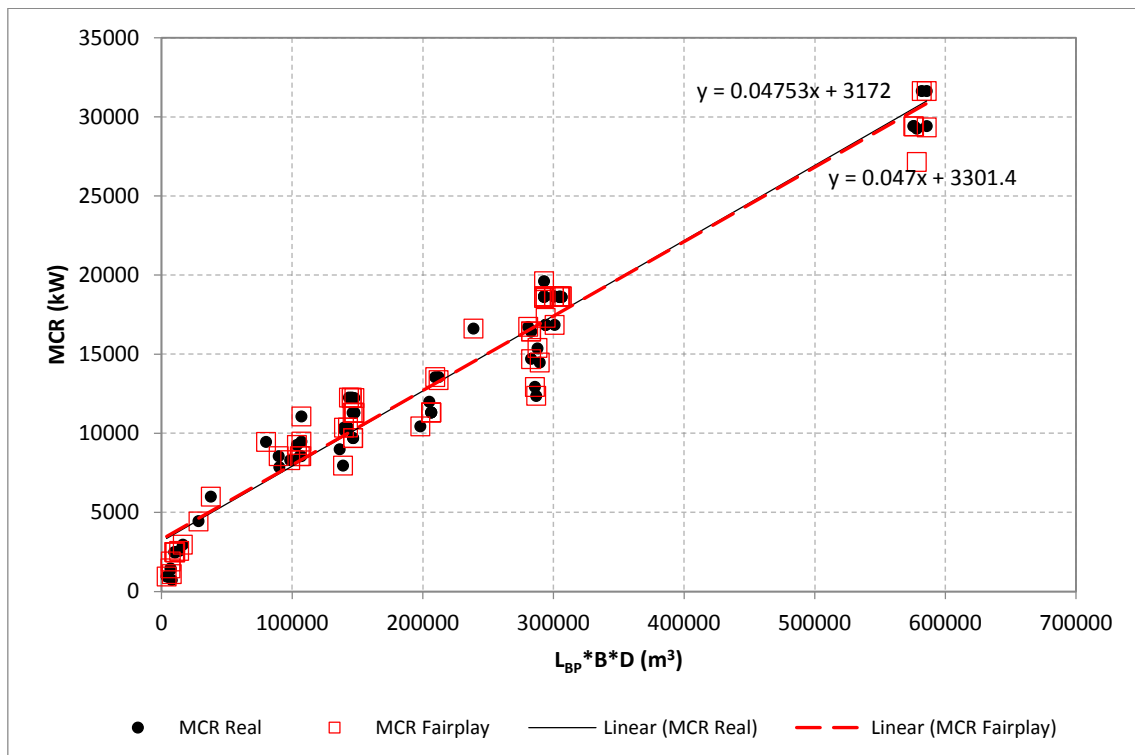
Σχήμα 73 Ποσοστιαία διαφορά του DWT Scantling (t)

✓ Βύθισμα (Draft)Σχήμα 74 Ποσοστιαία διαφορά του  $T_{SCANTLING}$  (m)✓ Ταχύτητα (Speed)

Σχήμα 75 Ποσοστιαία διαφορά της ταχύτητας (kn)

✓ Μέγιστη Συνεχής Ισχύς (Max Continuous Rating, MCR)

Σχήμα 76 Ποσοστιαία διαφορά της MCR (kW)

Παρατηρήσεις

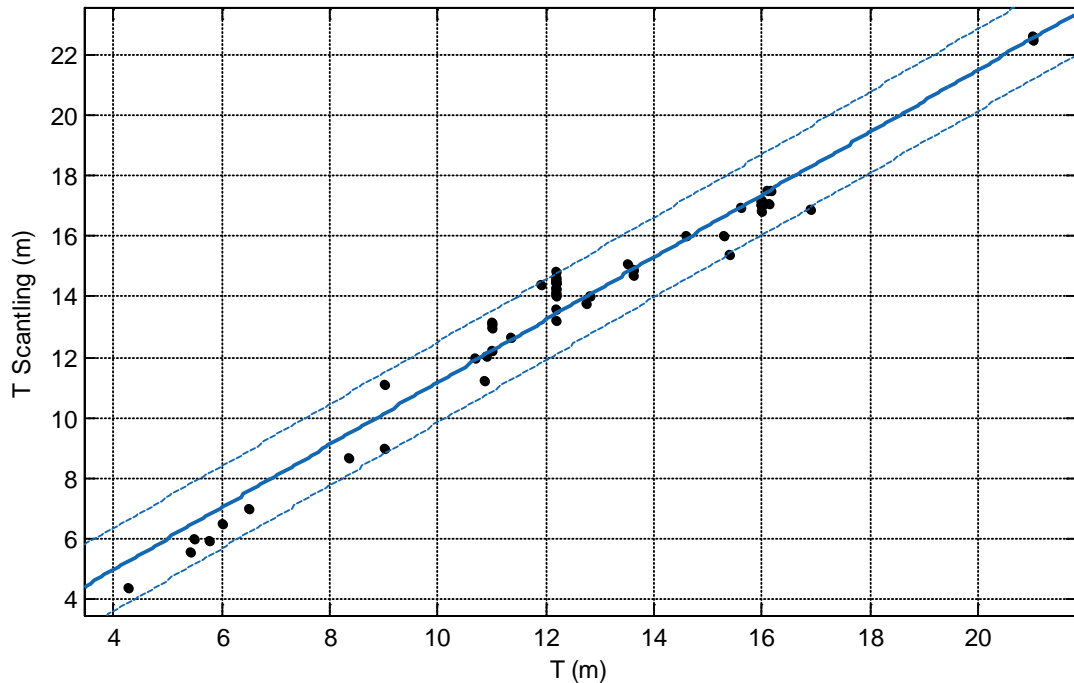
- Στοιχεία δείγματος:  $MCR = 0.04753 * L_{BP} * B * D + 3172$
- Στοιχεία IHS Fairplay:  $MCR = 0.047 * L_{BP} * B * D + 3301.4$

## 8. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β – ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

Στο Κεφάλαιο 2 της διπλωματικής εργασίας παρουσιάστηκαν τα σημαντικότερα διαγράμματα που παρήχθησαν από τη στατιστική ανάλυση. Ωστόσο, παρακάτω παρατίθενται τα υπόλοιπα διαγράμματα που προέκυψαν για τα διάφορα μεγέθη του πλοίου.

### 8.1. Κύριες Διαστάσεις

#### 8.1.1. Scantling



Σχήμα 77  $T_{SCANTLING}$  συναρτήσει του  $T$

#### Αποτελέσματα προσέγγισης

Linear model Poly1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 1.031$$

$$p2 = 0.8677$$

Goodness of fit:

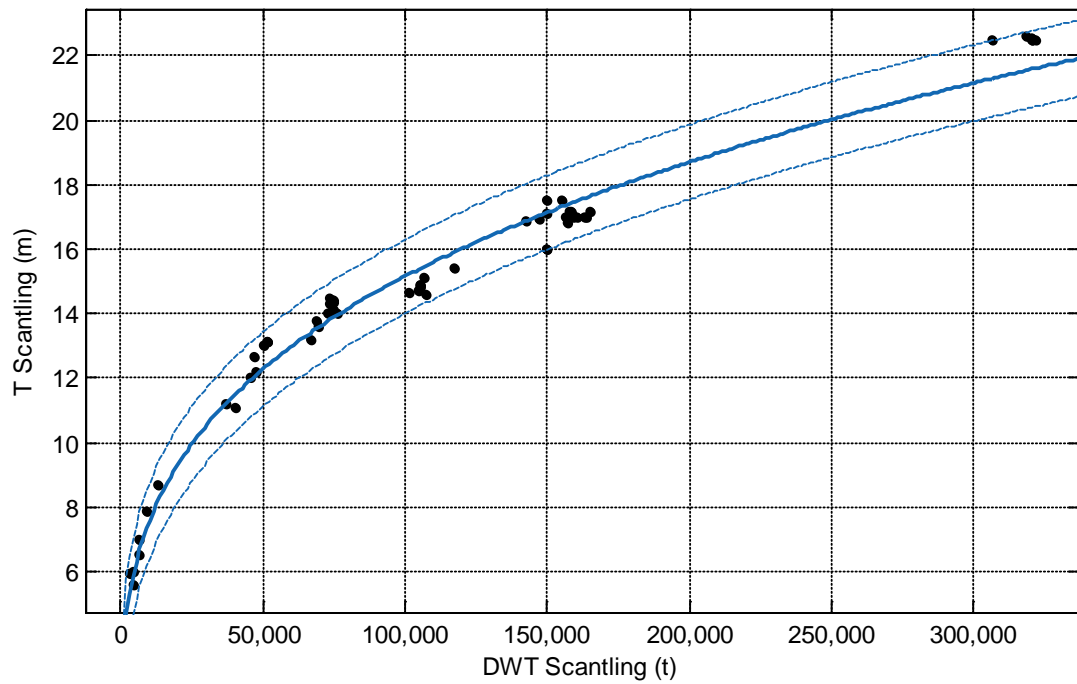
SSE: 29.11

R-square: 0.9734

Adjusted R-square: 0.973

RMSE: 0.6591

$$T_{SCANT} = 1.031 * T + 0.8677$$



Σχήμα 78  $T_{SCANTLING}$  συναρτήσσει του  $DWT_{SCANTLING}$

#### Αποτελέσματα προσέγγισής

General model Power1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.4601$$

$$b = 0.3035$$

Goodness of fit:

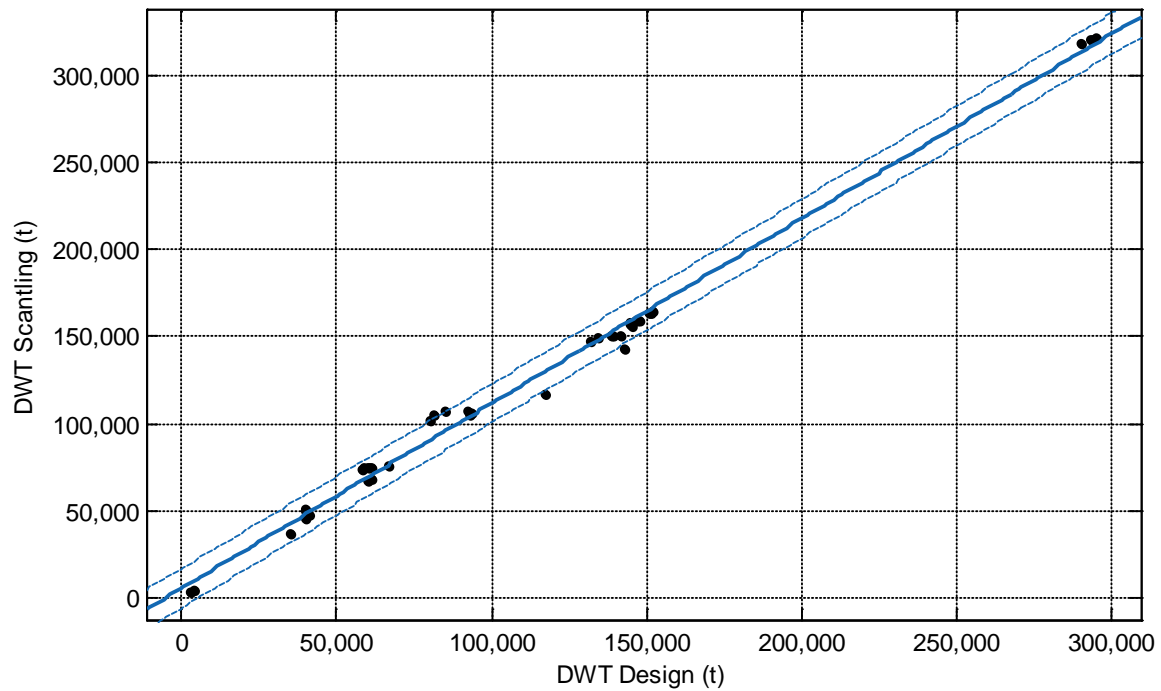
SSE: 21.83

R-square: 0.9795

Adjusted R-square: 0.9792

RMSE: 0.5708

$$T_{SCANT} = 0.4601 * (DWT_{SCANT})^{0.3035}$$



Σχήμα 79  $DWT_{SCANTLING}$  συναρτήσεως του  $DWT$

Αποτελέσματα προσέγγισης

Linear model Poly1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 1.062$$

$$p2 = 5514$$

Goodness of fit:

SSE: 1.282e+09

R-square: 0.9951

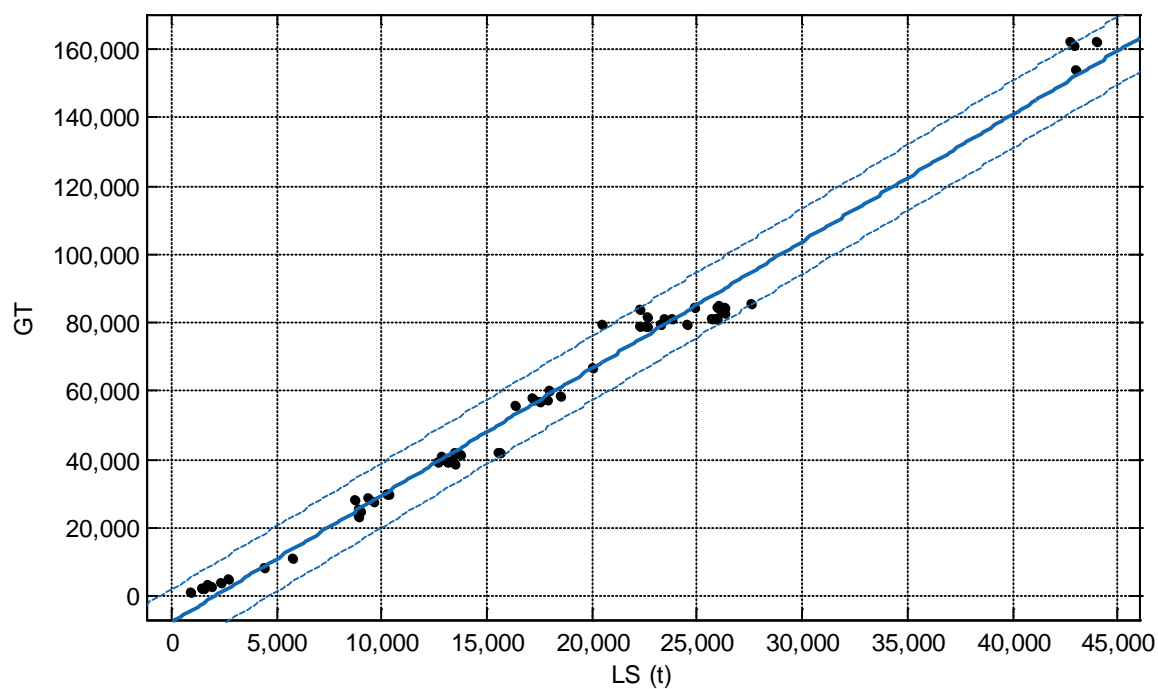
Adjusted R-square: 0.995

RMSE: 5398

$$DWT_{SCANT} = 1.062 * DWT + 5514$$

## 8.2. Χωρητικότητα Δεξαμενών

### 8.2.1. Ολική Χωρητικότητα (Gross Tonnage)



Σχήμα 80 GT συναρτήσεσι του LS

#### Αποτελέσματα προσέγγισης

Linear model Poly1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 3.714$$

$$p2 = -7601$$

Goodness of fit:

SSE: 1.336e+09

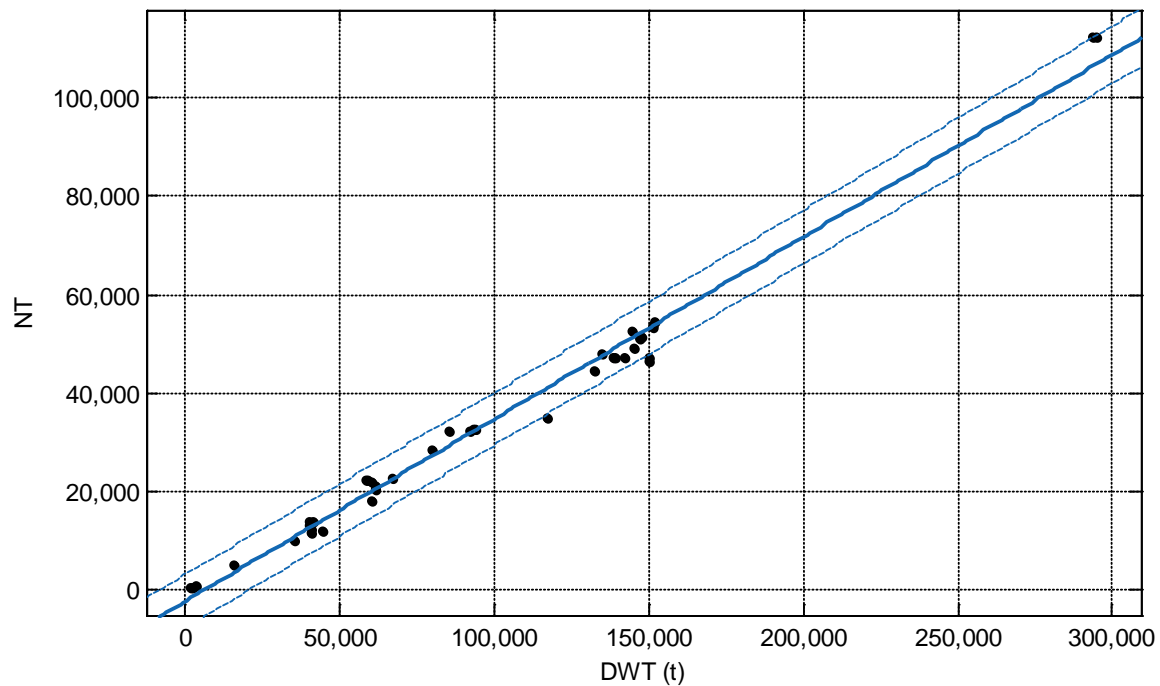
R-square: 0.9857

Adjusted R-square: 0.9855

RMSE: 4681

$$GT = 3.714 * LS - 7601$$

## 8.2.2. Καθαρή Χωρητικότητα (Net Tonnage)



Σχήμα 81 NT συναρτήσει του DWT

Αποτελέσματα προσέγγισης

Linear model Poly1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.3692$$

$$p2 = -2115$$

Goodness of fit:

SSE: 2.753e+08

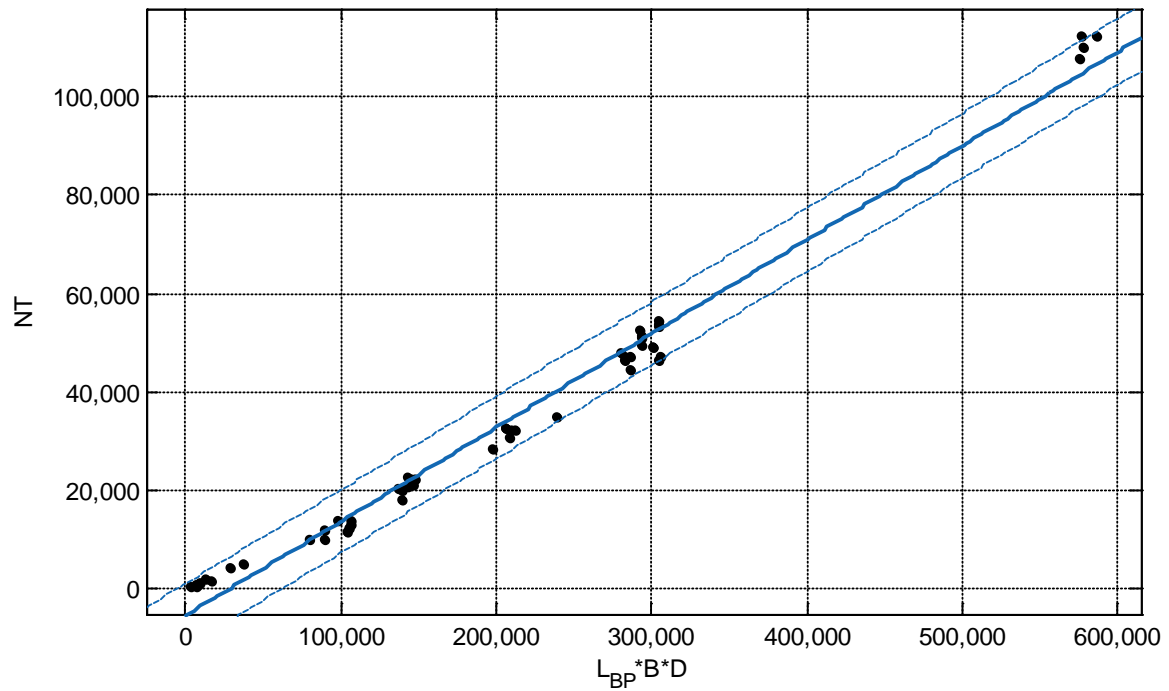
R-square: 0.9894

Adjusted R-square: 0.9891

RMSE: 2591

$$NT = 0.3692 * DWT - 2115$$





Σχήμα 82 NT συναρτήσεσι των  $L_{BP}$ ,  $B$ ,  $D$

Αποτελέσματα προσέγγισης

Linear model Poly1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.1906$$

$$p2 = -5321$$

Goodness of fit:

SSE: 5.755e+08

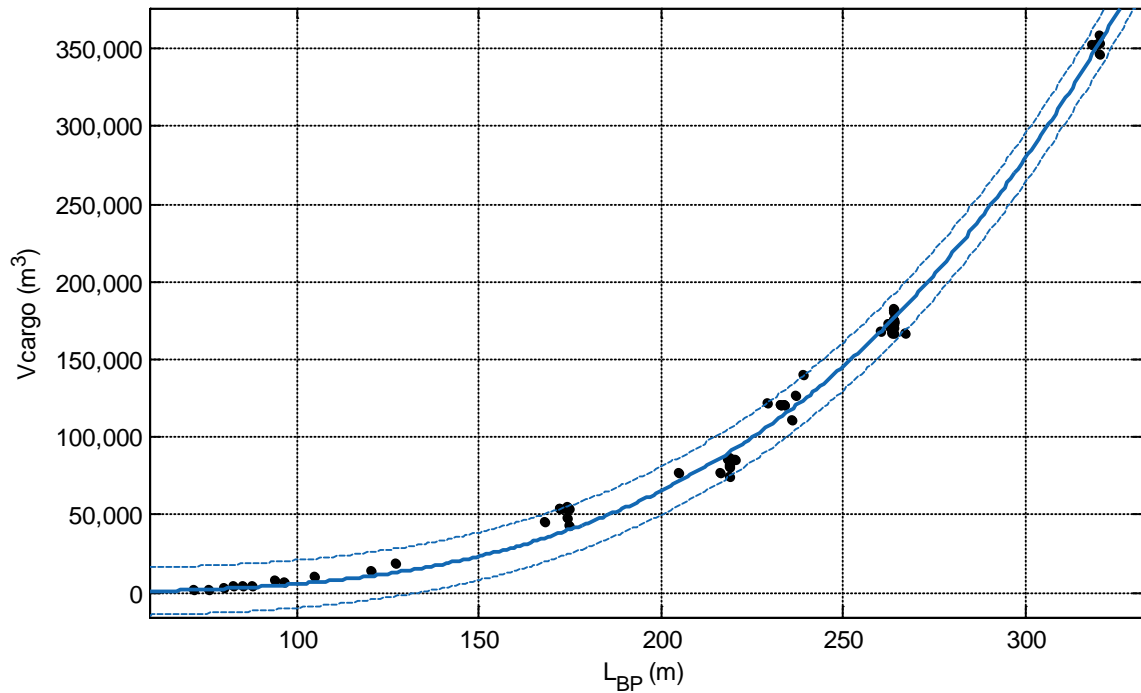
R-square: 0.9867

Adjusted R-square: 0.9865

RMSE: 3150

$$NT = 0.1906 * L_{BP} * B * D - 5321$$

## 8.2.3. Όγκος δεξαμενών φορτίου (Cargo Oil)

Σχήμα 83  $V_{CARGO}$  συναρτήσει του  $L_{BP}$ Αποτελέσματα προσέγγισης

General model Power1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.0003724$$

$$b = 3.583$$

Goodness of fit:

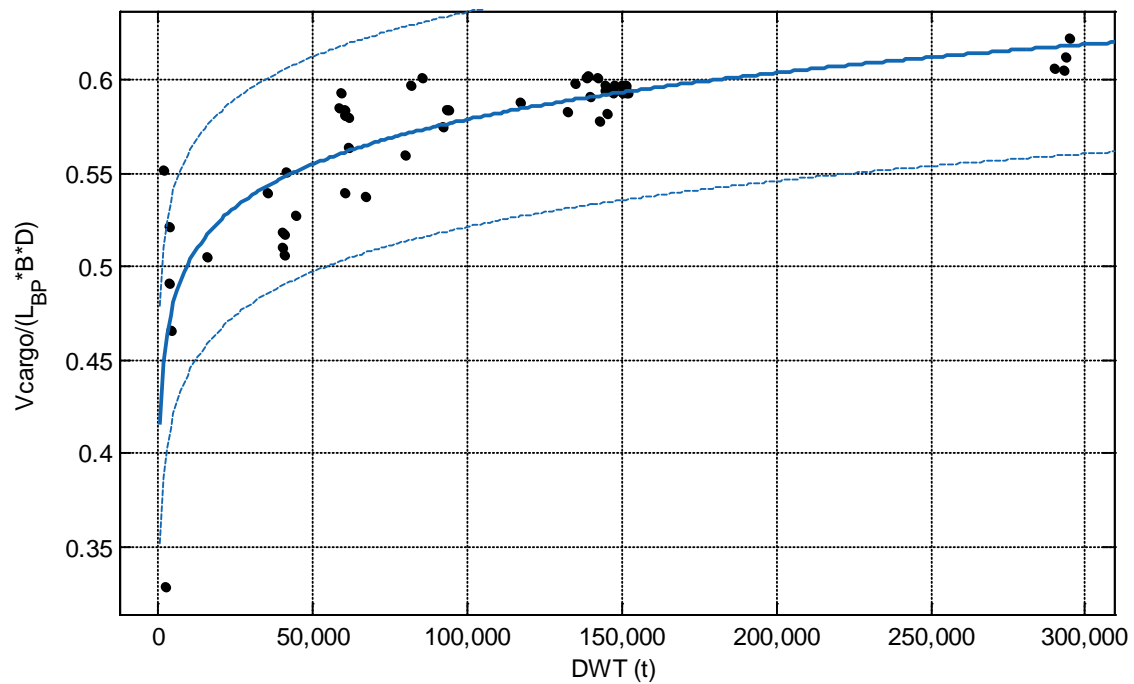
$$\text{SSE: } 4.374\text{e}+09$$

$$\text{R-square: } 0.9929$$

$$\text{Adjusted R-square: } 0.9928$$

$$\text{RMSE: } 7688$$

$$V_{CARGO} = 0.0003724 * (L_{BP})^{3.583}$$



Σχήμα 84  $V_{CARGO}/(L_{BP} * B * D)$  συναρτήσει του DWT

Αποτελέσματα προσέγγισης

General model Power1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.2873$$

$$b = 0.06087$$

Goodness of fit:

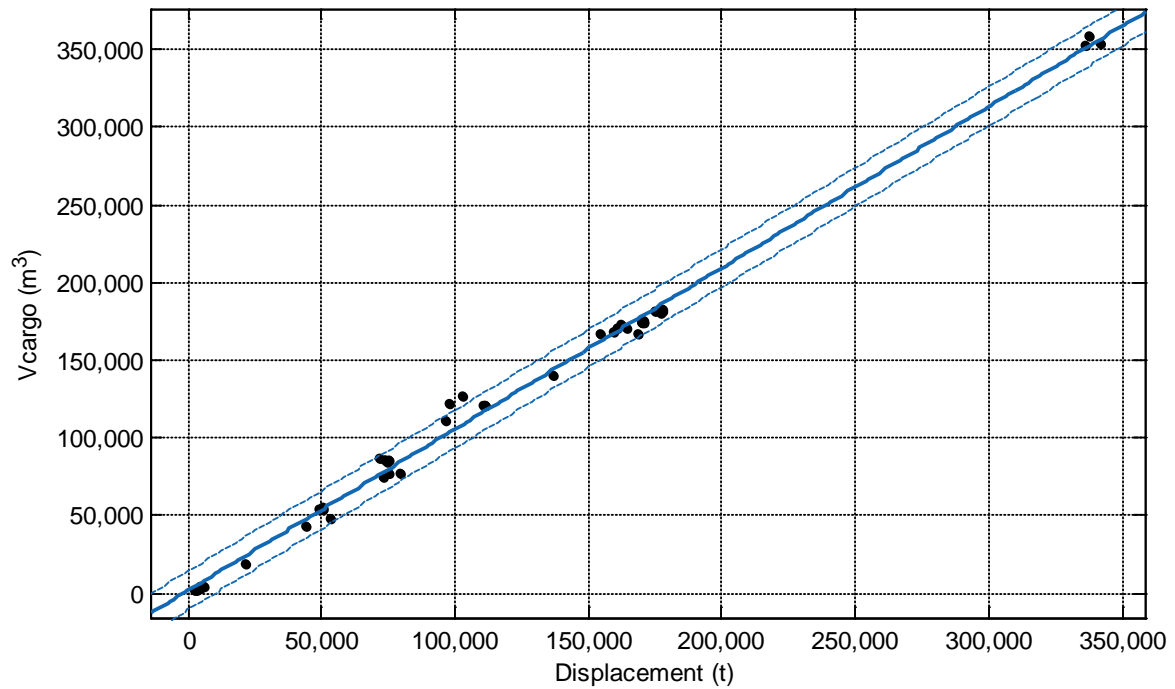
SSE: 0.04184

R-square: 0.6602

Adjusted R-square: 0.6537

RMSE: 0.02837

$$\frac{V_{CARGO}}{L_{BP} * B * D} = 0.2873 * (DWT)^{0.06087}$$



Σχήμα 85  $V_{CARGO}$  συναρτήσει του  $\Delta$

Αποτελέσματα προσέγγισης

Linear model Poly1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 1.039$$

$$p2 = 1808$$

Goodness of fit:

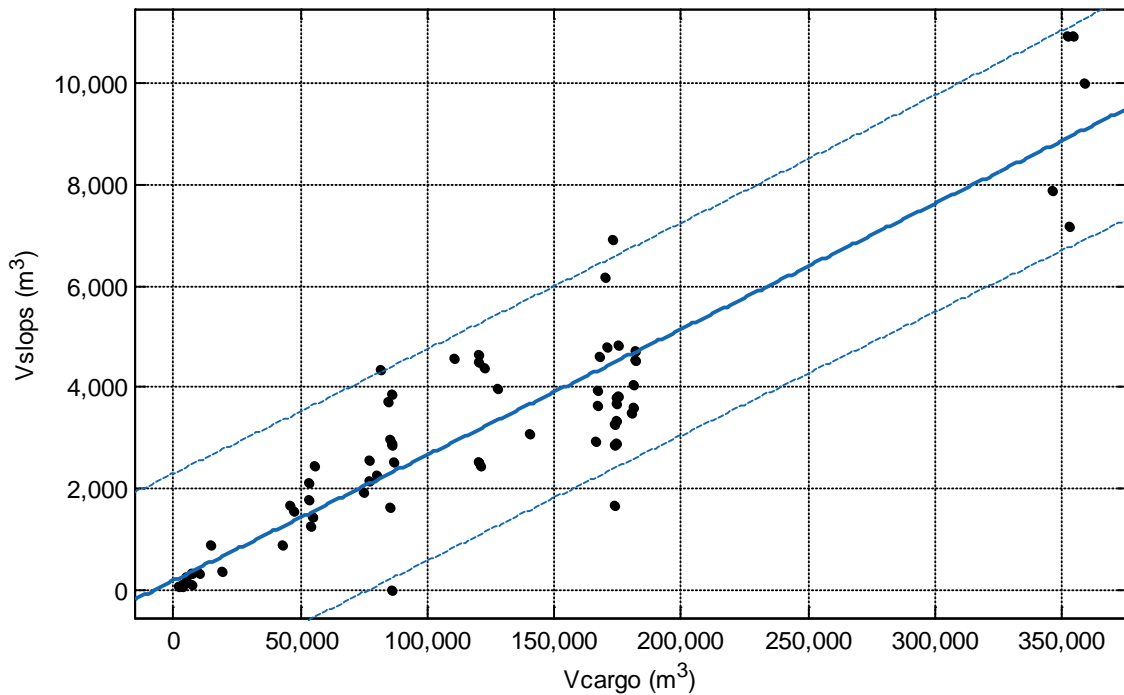
SSE: 1.841e+09

R-square: 0.9954

Adjusted R-square: 0.9953

RMSE: 6007

$$V_{CARGO} = 1.039 * \Delta + 1808$$



Σχήμα 86  $V_{SLOPS}$  συναρτήσσει του  $V_{CARGO}$

Αποτελέσματα προσέγγισης

Linear model Poly1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.0248$$

$$p2 = 187.3$$

Goodness of fit:

SSE: 7.9e+07

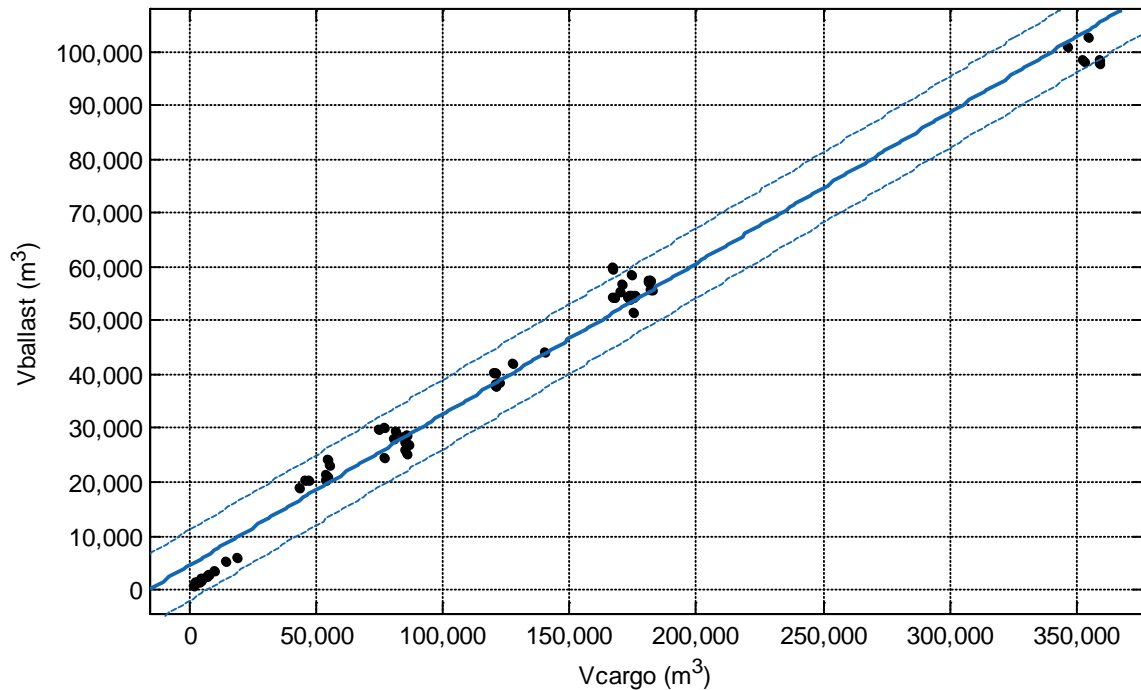
R-square: 0.8247

Adjusted R-square: 0.8223

RMSE: 1040

$$V_{SLOPS} = 0.0248 * V_{CARGO} + 187.3$$

## 8.2.4. Όγκος δεξαμενών έρματος (Ballast Water)

Σχήμα 87  $V_{BALLAST}$  συναρτήσεϊ του  $V_{CARGO}$ Αποτελέσματα προσέγγισης

Linear model Poly1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.281$$

$$p2 = 4475$$

Goodness of fit:

SSE: 7.591e+08

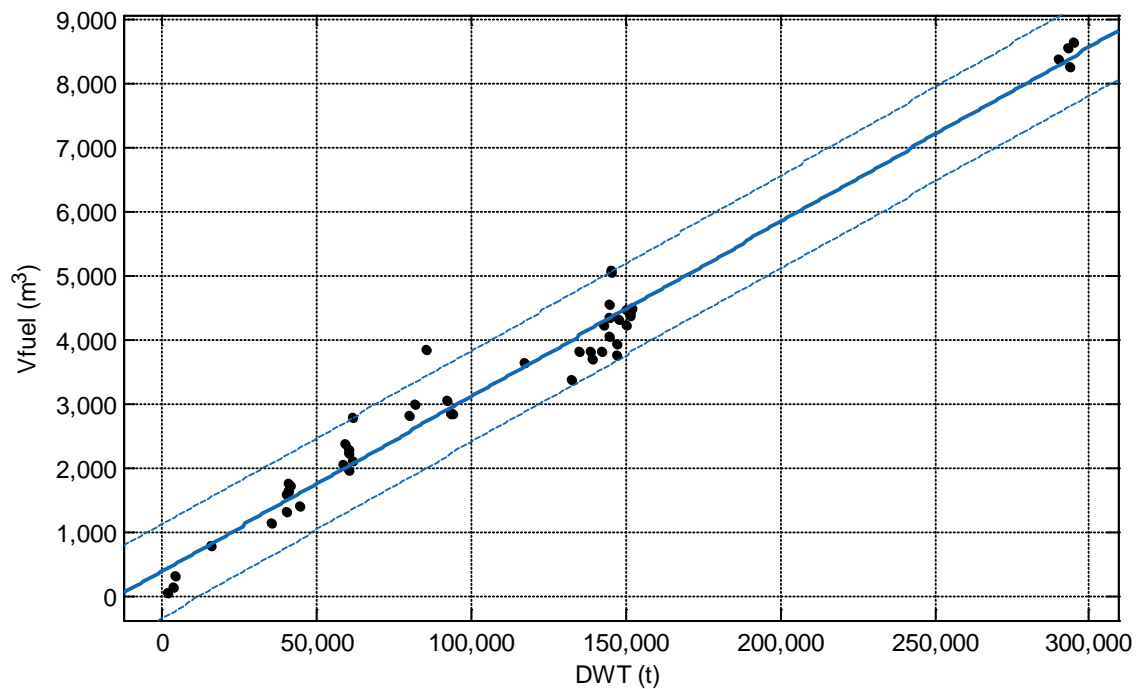
R-square: 0.9847

Adjusted R-square: 0.9845

RMSE: 3225

$$V_{BALLAST} = 0.281 * V_{CARGO} + 4475$$

## 8.2.5. Όγκος δεξαμενών καυσίμων (Fuel Oil)

Σχήμα 88  $V_{FUEL}$  συναρτήσεως του DWTΑποτελέσματα προσέγγισης

Linear model Poly1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.02722$$

$$p2 = 411.8$$

Goodness of fit:

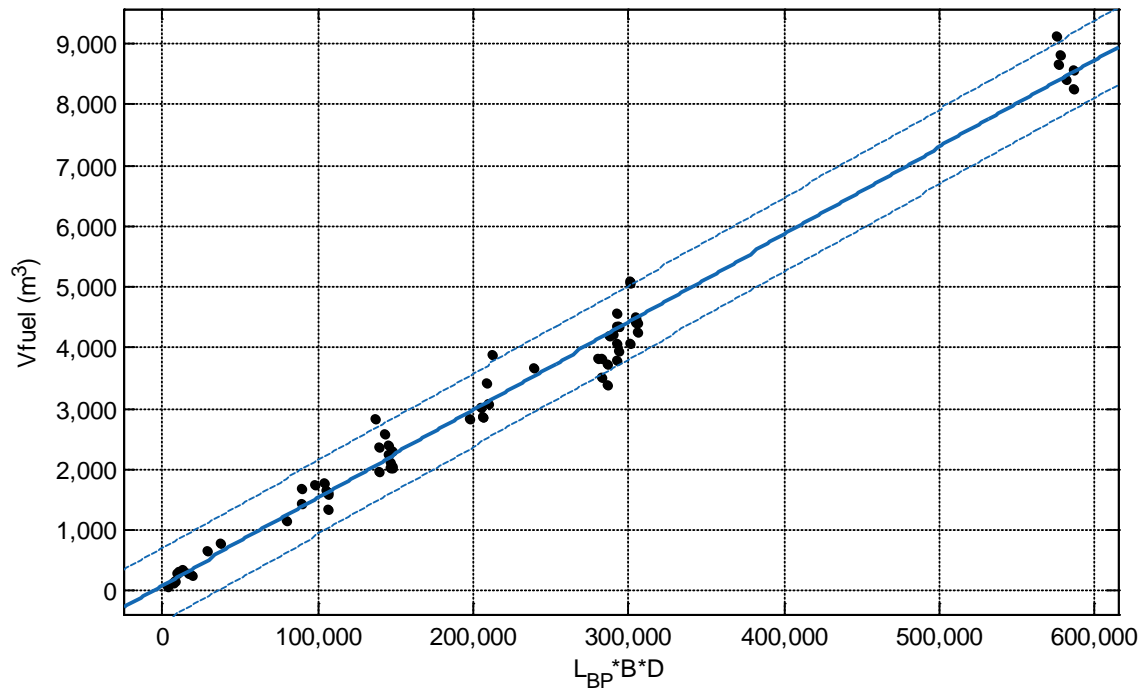
SSE: 6.043e+06

R-square: 0.9707

Adjusted R-square: 0.9701

RMSE: 351.2

$$V_{FUEL} = 0.02722 * DWT + 411.8$$



Σχήμα 89  $V_{FUEL}$  συναρτήσεως των  $L_{BP}$ ,  $B$ ,  $D$

Αποτελέσματα προσέγγισης

Linear model Poly1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.01442$$

$$p2 = 92.21$$

Goodness of fit:

SSE: 6.517e+06

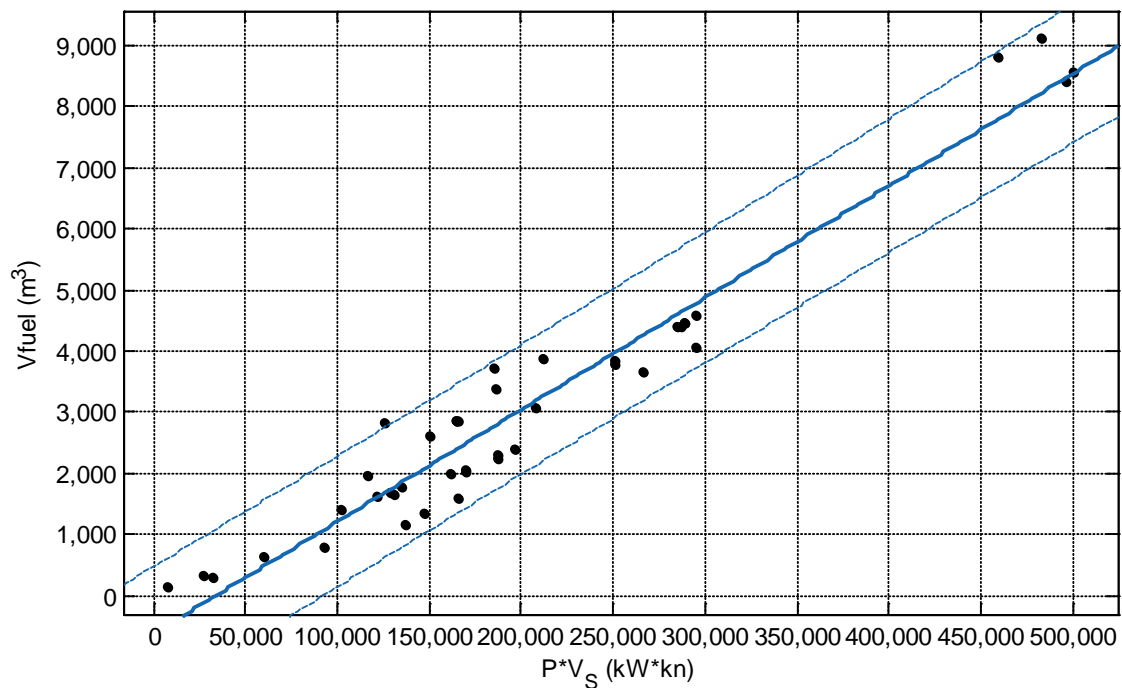
R-square: 0.9807

Adjusted R-square: 0.9805

RMSE: 300.9

$$V_{FUEL} = 0.01442 * L_{BP} * B * D + 92.21$$





Σχήμα 90  $V_{FUEL}$  συναρτήσει των  $MCR$ ,  $V_s$

Αποτελέσματα προσέγγισης

Linear model Poly1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.01832$$

$$p2 = -619.7$$

Goodness of fit:

SSE: 1.132e+07

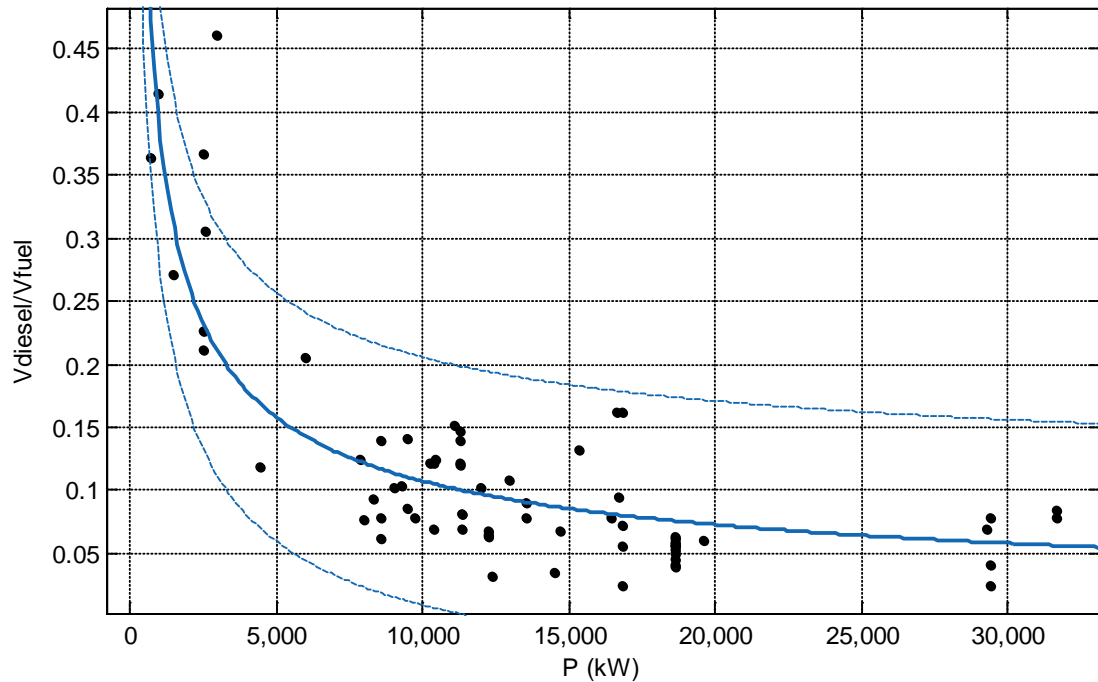
R-square: 0.945

Adjusted R-square: 0.9437

RMSE: 519.2

$$V_{FUEL} = 0.018382 * P * V_s - 619.7$$

## 8.2.6. Όγκος δεξαμενών Diesel (Diesel Oil)

Σχήμα 91  $V_{DIESEL}/V_{FUEL}$  συναρτήσεως της MCRΑποτελέσματα προσέγγισης

General model Power1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 18.36$$

$$b = -0.5581$$

Goodness of fit:

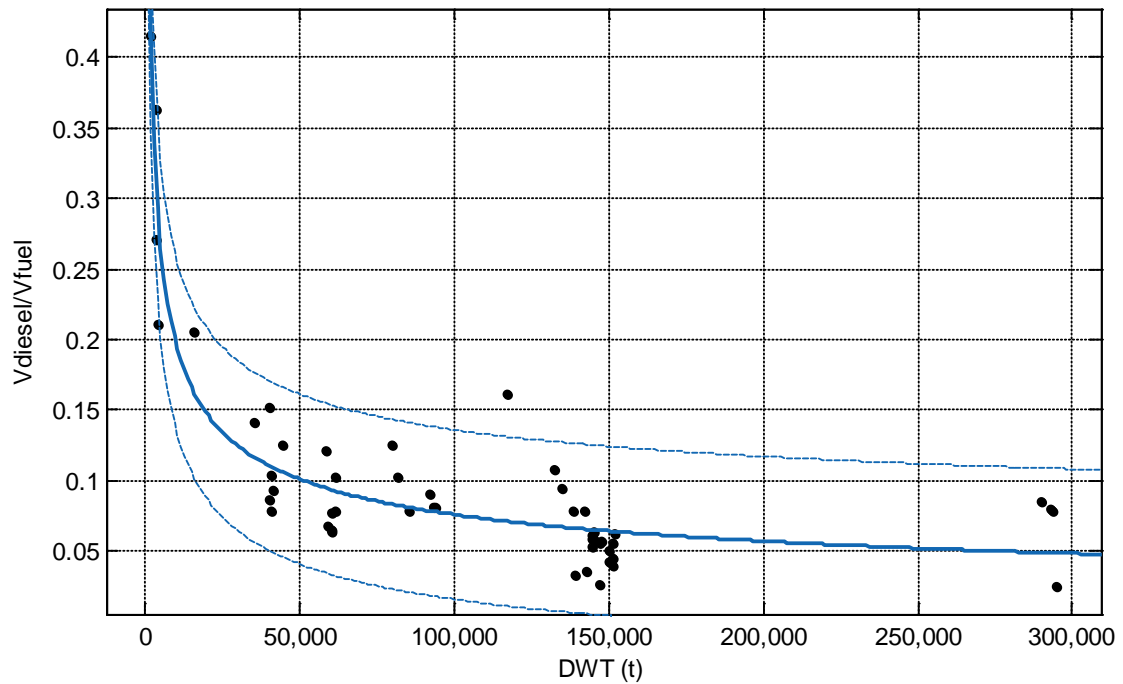
SSE: 0.1668

R-square: 0.703

Adjusted R-square: 0.6988

RMSE: 0.04882

$$\frac{V_{DIESEL}}{V_{FUEL}} = 18.36 * P^{-0.5581}$$



Σχήμα 92  $V_{DIESEL}/V_{FUEL}$  συναρτήσεως του DWT

Αποτελέσματα προσέγγισης

General model Power1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 8.748$$

$$b = -0.4127$$

Goodness of fit:

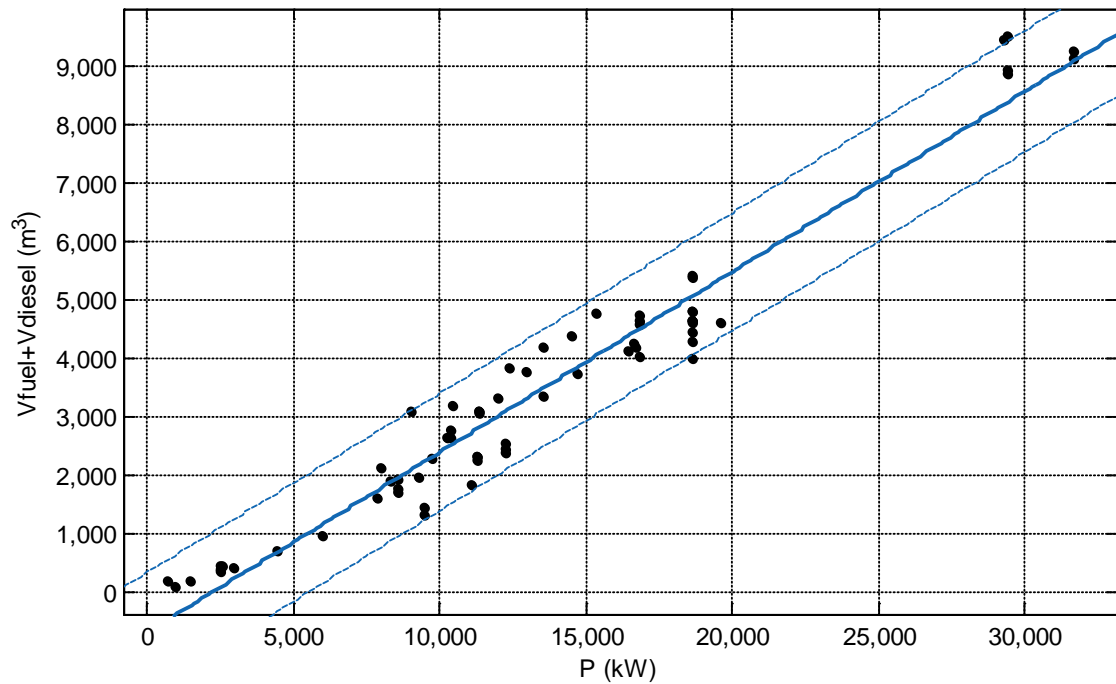
SSE: 0.043

R-square: 0.8514

Adjusted R-square: 0.8483

RMSE: 0.02962

$$\frac{V_{DIESEL}}{V_{FUEL}} = 8.748 * DWT^{-0.4127}$$



Σχήμα 93  $V_{DIESEL} + V_{FUEL}$  συναρτήσει της MCR

Αποτελέσματα προσέγγισης

Linear model Poly1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.3079$$

$$p2 = -683.8$$

Goodness of fit:

SSE: 1.739e+07

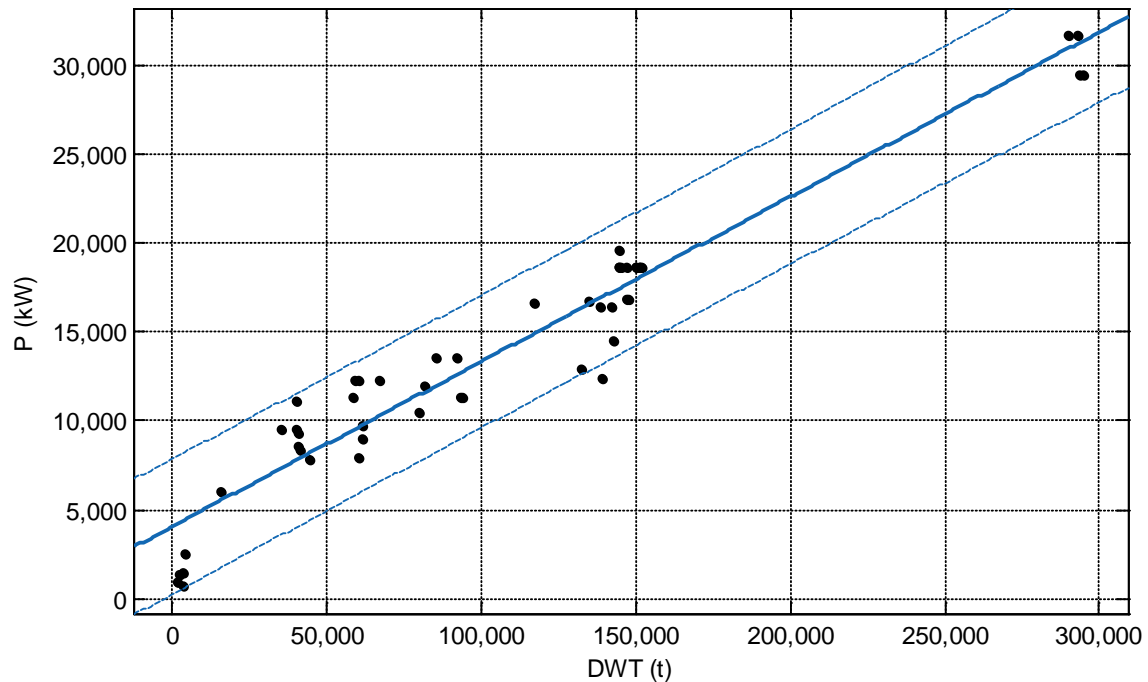
R-square: 0.9522

Adjusted R-square: 0.9516

RMSE: 498.5

$$V_{FUEL} + V_{DIESEL} = 0.3079 * P - 683.8$$

### 8.3. Εκτίμηση Ισχύος Πρόωσης



Σχήμα 94 MCR συναρτήσεως του DWT

#### Αποτελέσματα προσέγγισης

Linear model Poly1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.09252$$

$$p2 = 4089$$

Goodness of fit:

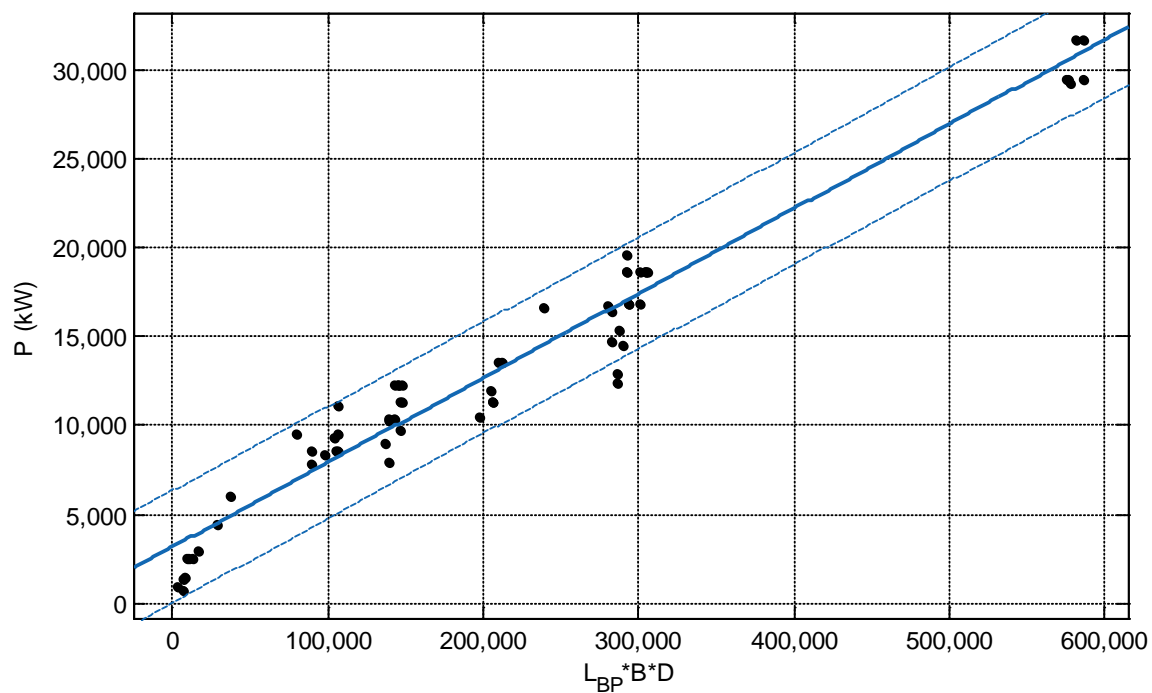
SSE: 1.724e+08

R-square: 0.9335

Adjusted R-square: 0.9321

RMSE: 1839

$$P = 0.09252 * DWT + 4089$$



Σχήμα 95 MCR συναρτήσει των  $L_{BP}$ ,  $B$ ,  $D$

Αποτελέσματα προσέγγισης

Linear model Poly1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.04753$$

$$p2 = 3172$$

Goodness of fit:

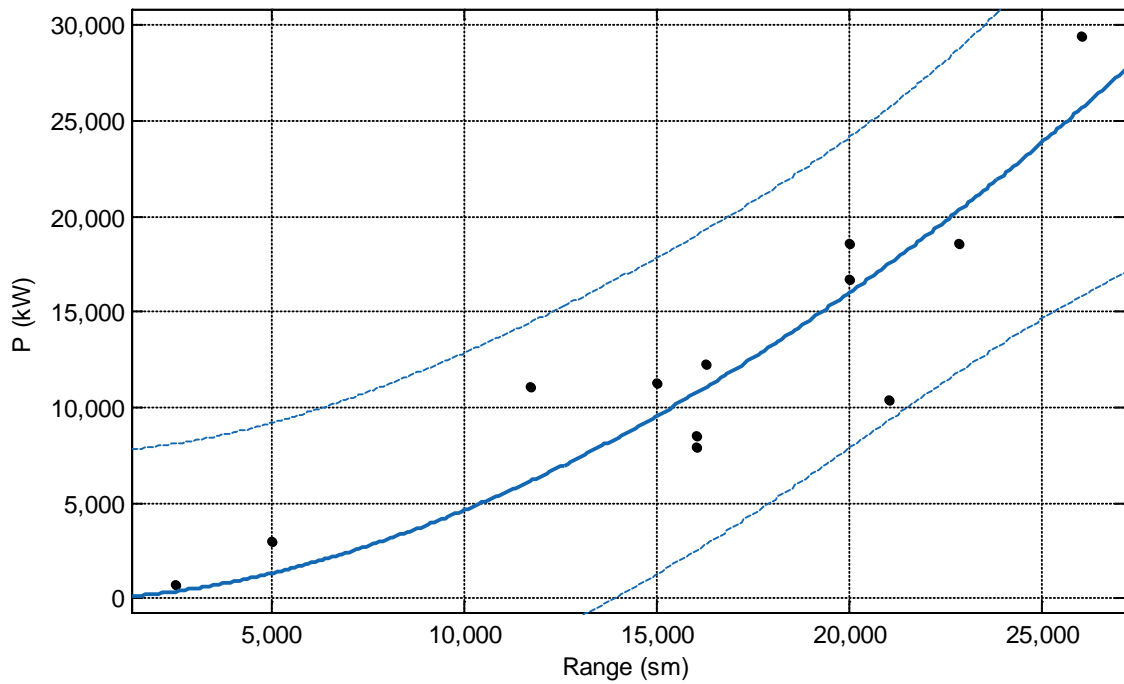
SSE: 1.748e+08

R-square: 0.954

Adjusted R-square: 0.9534

RMSE: 1558

$$P = 0.04753 * L_{BP} * B * D + 3172$$



Σχήμα 96 MCR συναρτήσει της ακτίνας ενέργειας

#### Αποτελέσματα προσέγγισης

General model Power1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.0003325 \quad (-0.002399, 0.003064)$$

$$b = 1.786 \quad (0.961, 2.612)$$

Goodness of fit:

SSE: 1.193e+08

R-square: 0.8172

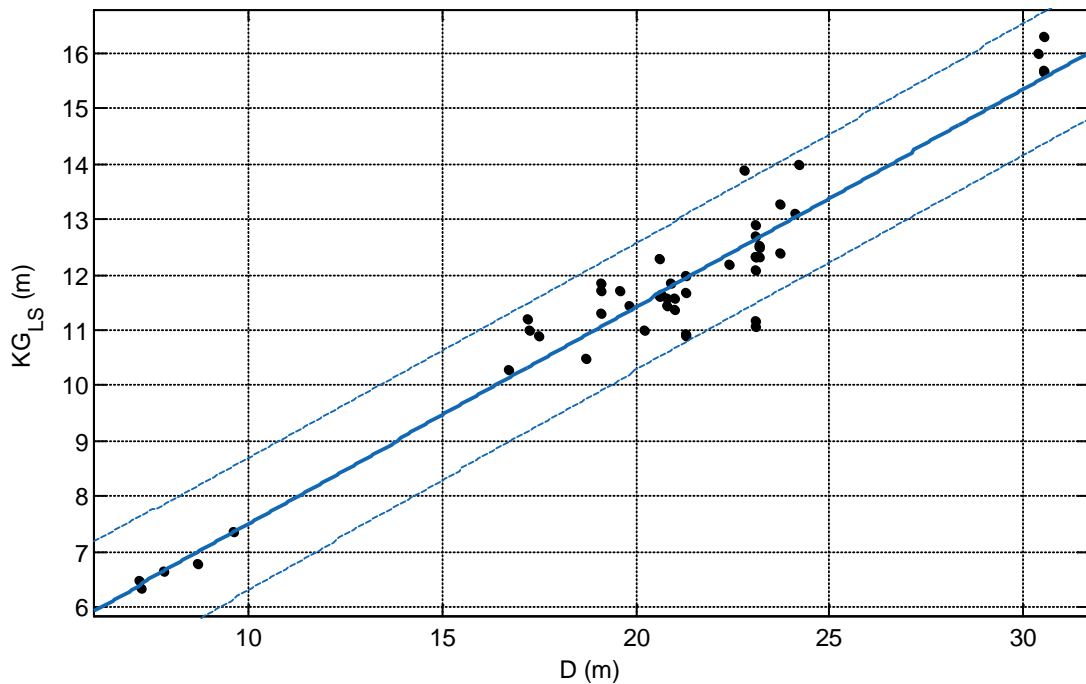
Adjusted R-square: 0.7989

RMSE: 3454

$$P = 0.0003325 * Range^{1.786}$$

## 8.4. Κέντρα βάρους για Full Load Departure

### 8.4.1. Lightship



Σχήμα 97  $KG_{LS}$  συναρτήσει του  $D$

#### Αποτελέσματα προσέγγισης

Linear model Poly1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.3927$$

$$p2 = 3.571$$

Goodness of fit:

SSE: 15.83

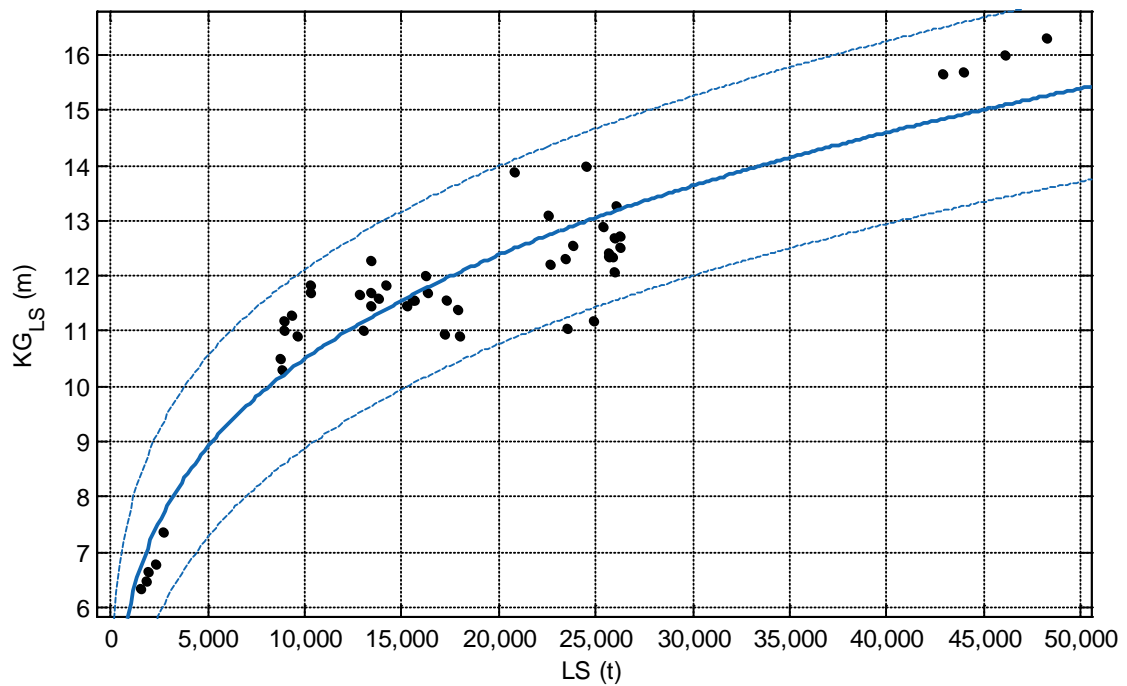
R-square: 0.9298

Adjusted R-square: 0.9283

RMSE: 0.5683

$$KG_{LS} = 0.3927 * D + 3.571$$





Σχήμα 98  $KG_{LS}$  συναρτήσει του  $LS$

Αποτελέσματα προσέγγισης

General model Power1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 1.176$$

$$b = 0.2377$$

Goodness of fit:

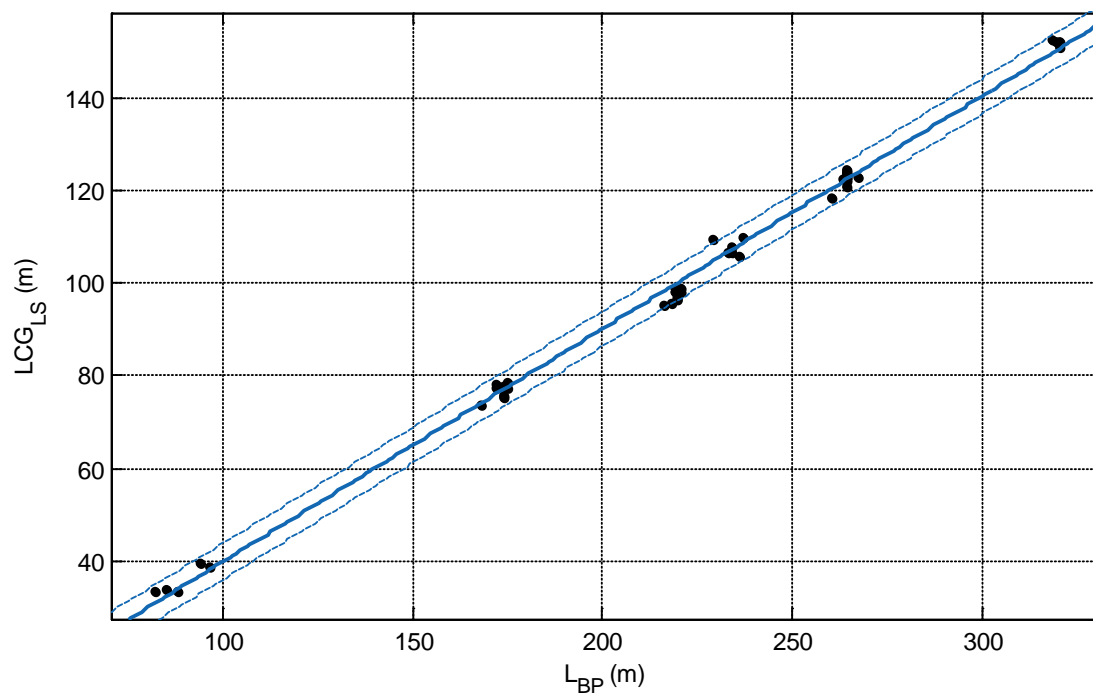
SSE: 30.8

R-square: 0.8633

Adjusted R-square: 0.8606

RMSE: 0.7928

$$KG_{LS} = 1.176 * LS^{0.2377}$$



Σχήμα 99  $LCG_{LS}$  συναρτήσει του  $L_{BP}$

Αποτελέσματα προσέγγισης

Linear model Poly1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.5025$$

$$p2 = -10.36$$

Goodness of fit:

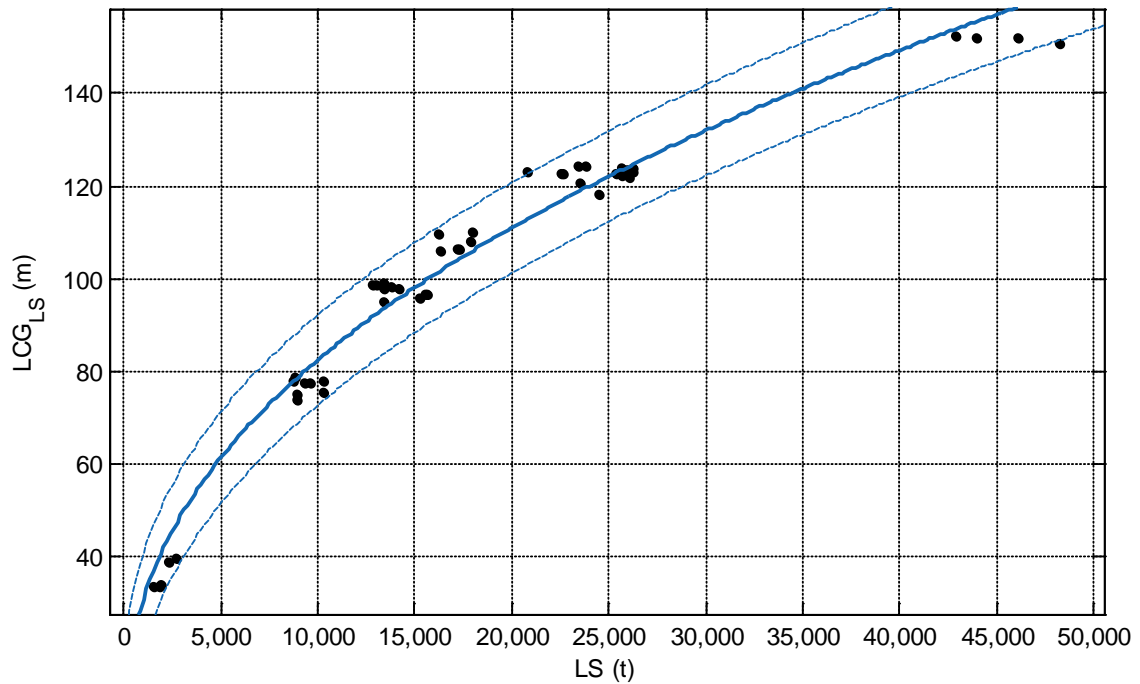
SSE: 164.7

R-square: 0.9963

Adjusted R-square: 0.9962

RMSE: 1.852

$$LCG_{LS} = 0.5025 * L_{BP} - 10.36$$



Σχήμα 100  $LCG_{LS}$  συναρτήσεως του  $LS$

Αποτελέσματα προσέγγισης

General model Power1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 1.592$$

$$b = 0.4285$$

Goodness of fit:

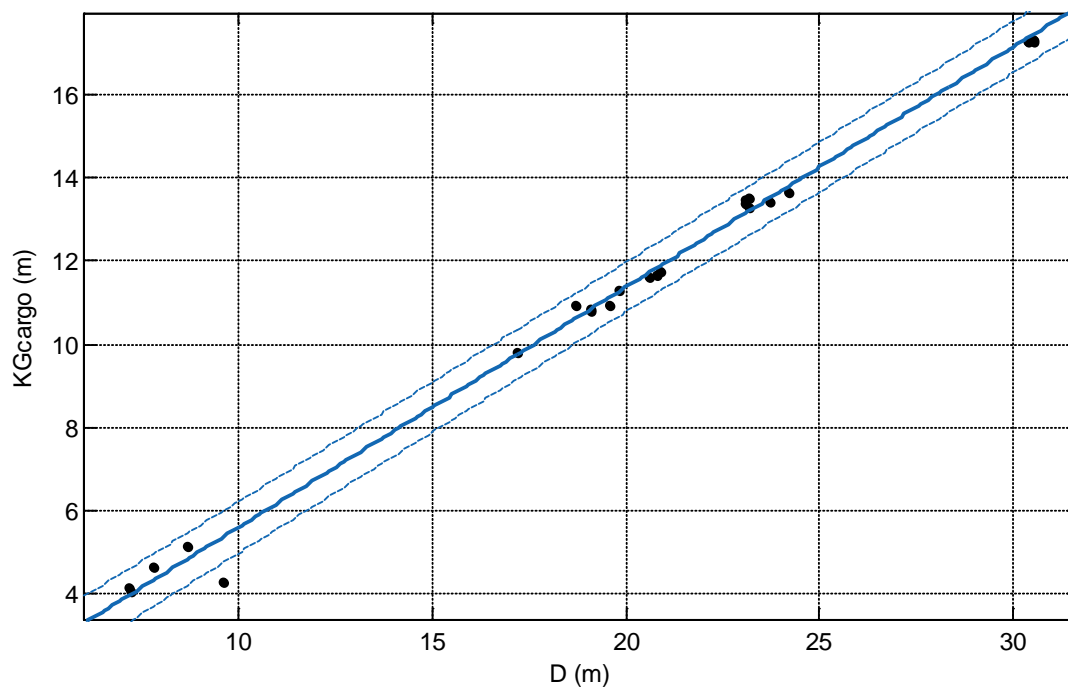
SSE: 1095

R-square: 0.9752

Adjusted R-square: 0.9747

RMSE: 4.776

$$LCG_{LS} = 1.592 \cdot LS + 0.4285$$

8.4.2. Cargo Oil

Σχήμα 101  $KG_{CARGO}$  συνάρτησι του  $D$  για Full Load Departure

Αποτελέσματα προσέγγισης

Linear model Poly1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.5765$$

$$p2 = -0.1577$$

Goodness of fit:

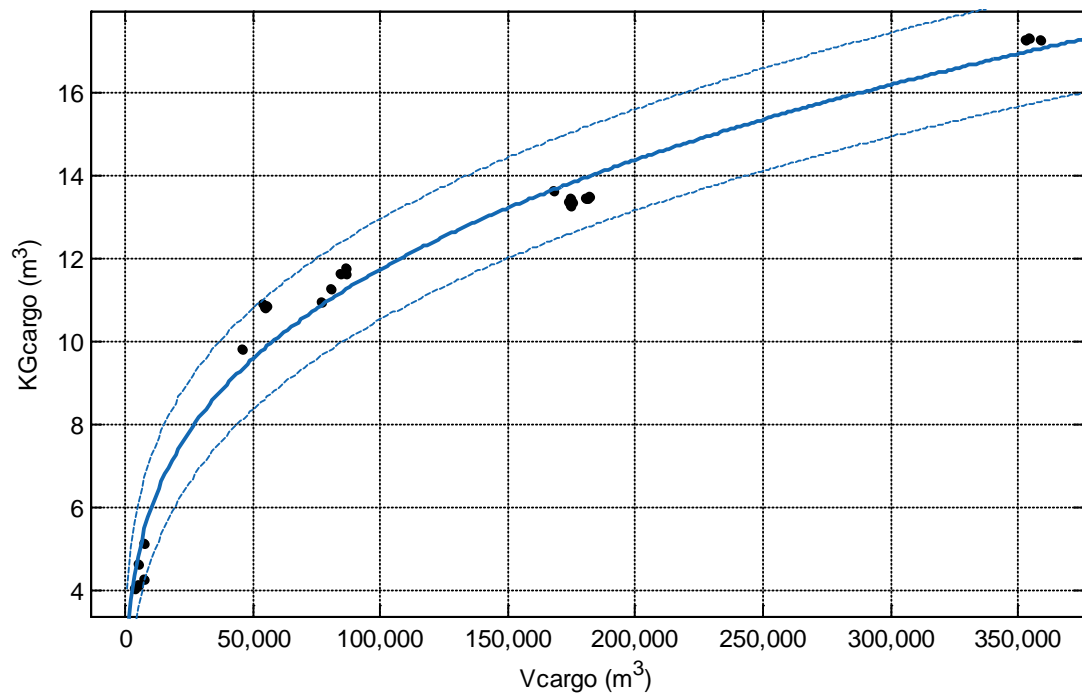
SSE: 2.098

R-square: 0.9946

Adjusted R-square: 0.9944

RMSE: 0.2841

$$KG_{CARGO} = 0.5765 * D - 0.1577$$



Σχήμα 102  $KG_{CARGO}$  συνάρτησεί του  $V_{CARGO}$  για Full Load Departure

#### Αποτελέσματα προσέγγισής

General model Power1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.4098$$

$$b = 0.2914$$

Goodness of fit:

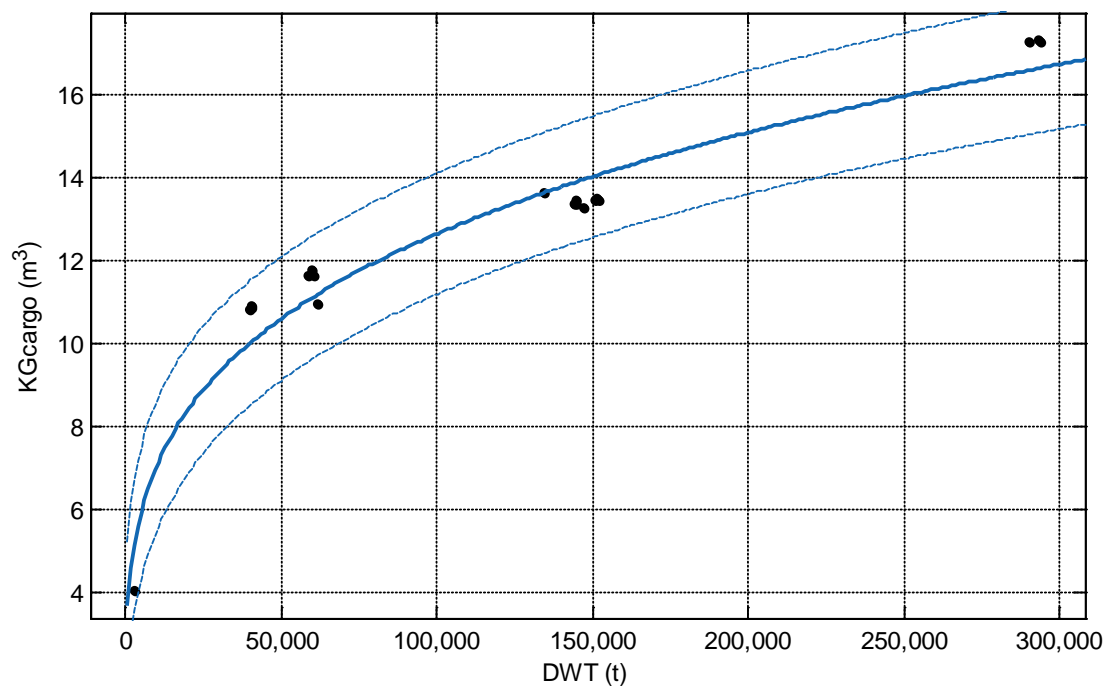
SSE: 8.602

R-square: 0.9779

Adjusted R-square: 0.9771

RMSE: 0.5752

$$KG_{CARGO} = 0.4098 * (V_{CARGO})^{0.2914}$$



Σχήμα 103 KG<sub>CARGO</sub> συναρτήσει του DWT για Full Load Departure

#### Αποτελέσματα προσέγγισης

General model Power1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.6767$$

$$b = 0.2543$$

Goodness of fit:

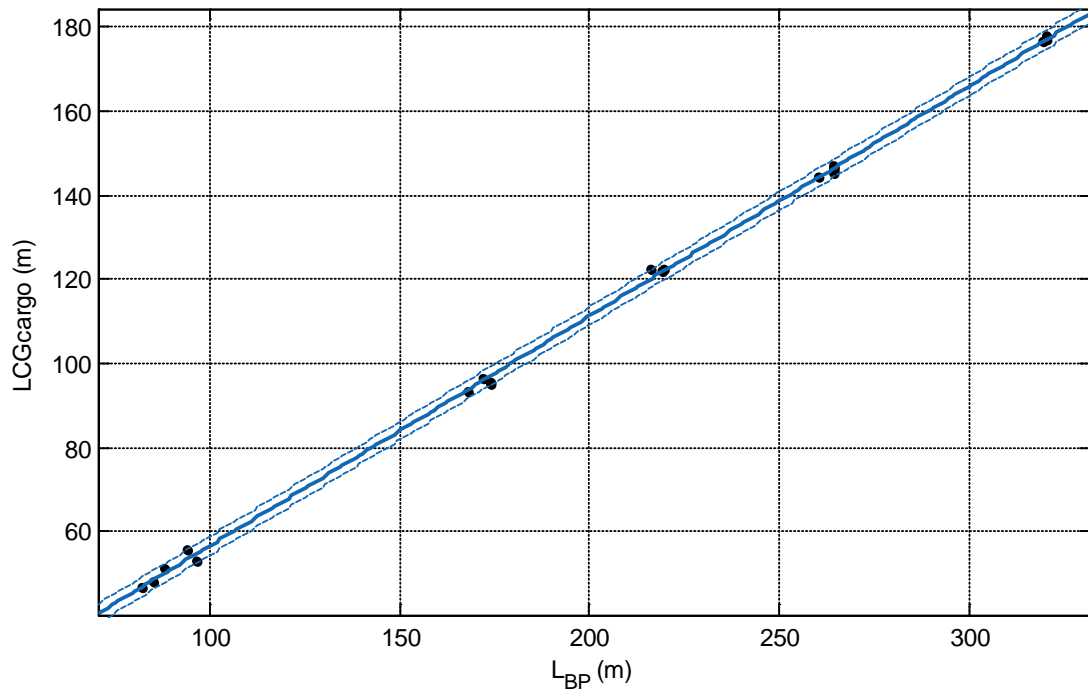
SSE: 8.74

R-square: 0.945

Adjusted R-square: 0.9421

RMSE: 0.6782

$$KG_{CARGO} = 0.6767 * DWT^{0.2543}$$



Σχήμα 104  $LCG_{CARGO}$  συναρτήσεως του  $L_{BP}$  για Full Load Departure

Αποτελέσματα προσέγγισης

Linear model Poly1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.5469$$

$$p2 = 1.905$$

Goodness of fit:

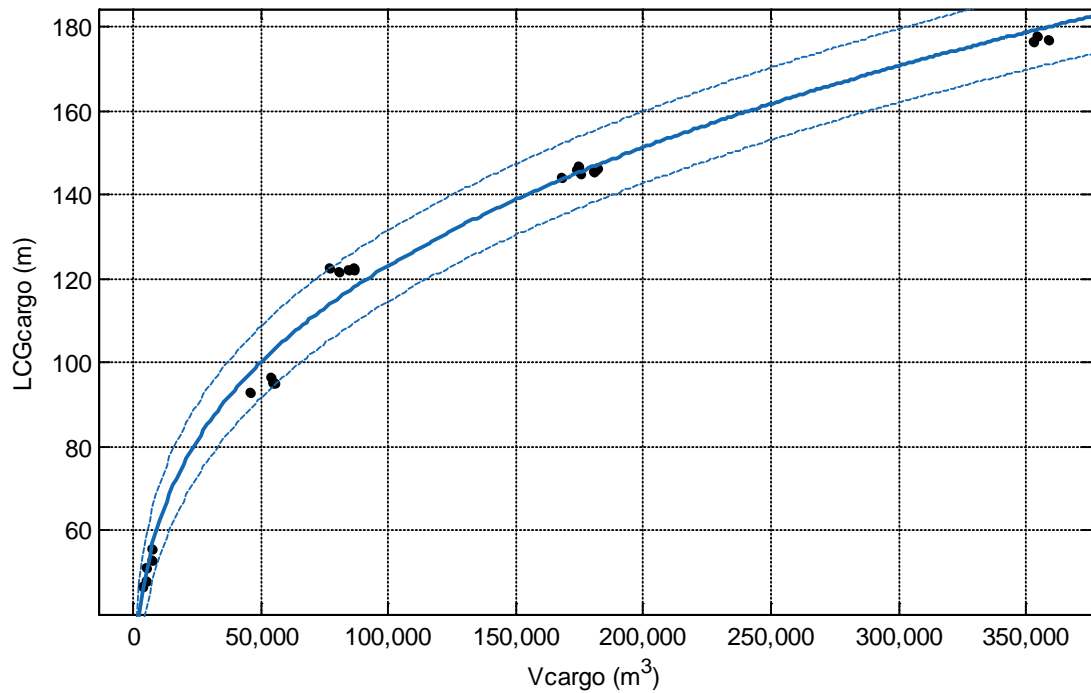
SSE: 27.47

R-square: 0.9994

Adjusted R-square: 0.9993

RMSE: 1.028

$$LCG_{CARGO} = 0.5469 * L_{BP} + 1.905$$



Σχήμα 105  $LCG_{CARGO}$  συναρτήσεϊ του  $V_{CARGO}$  για Full Load Departure

Αποτελέσματα προσέγγισης

General model Power1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 4.028$$

$$b = 0.2971$$

Goodness of fit:

SSE: 422.5

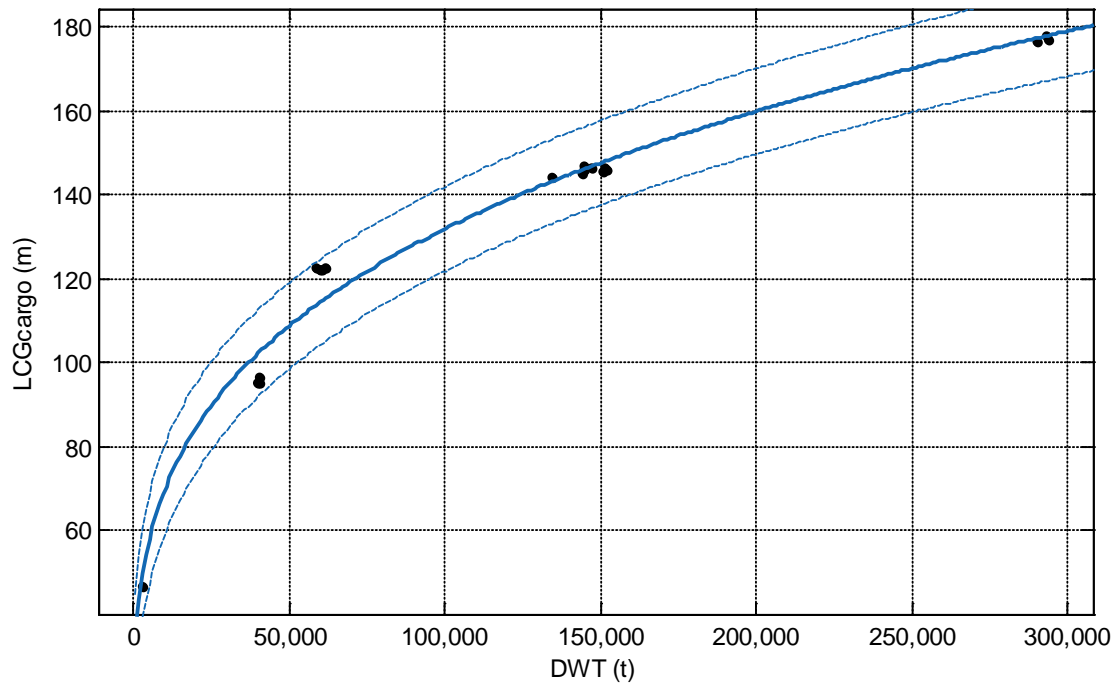
R-square: 0.9901

Adjusted R-square: 0.9898

RMSE: 4.031

$$LCG_{CARGO} = 4.028 * (V_{CARGO})^{0.2971}$$





Σχήμα 106  $LCG_{CARGO}$  συνάρτηση του DWT για Full Load Departure

#### Αποτελέσματα προσέγγισης

General model Power1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 5.37$$

$$b = 0.278$$

Goodness of fit:

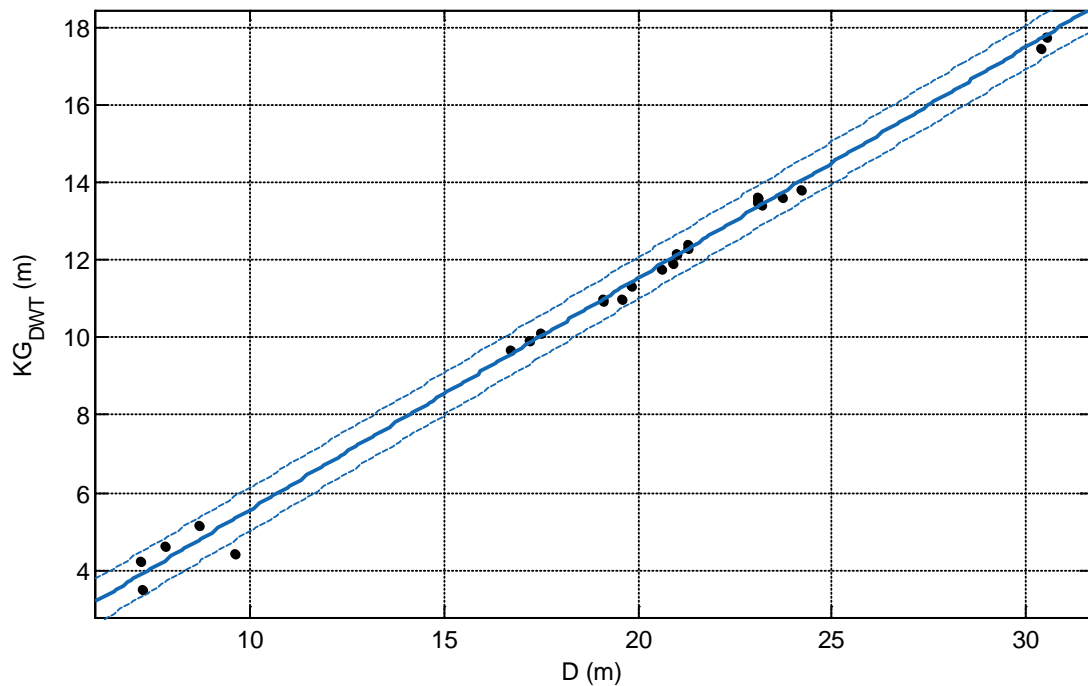
SSE: 416.7

R-square: 0.9786

Adjusted R-square: 0.9775

RMSE: 4.683

$$LCG_{CARGO} = 5.37 * DWT^{0.278}$$

8.4.3. Deadweight

Σχήμα 107 KG<sub>DWT</sub> συναρτήσει του D για Full Load Departure

Αποτελέσματα προσέγγισης

Linear model Poly1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.5957$$

$$p2 = -0.3888$$

Goodness of fit:

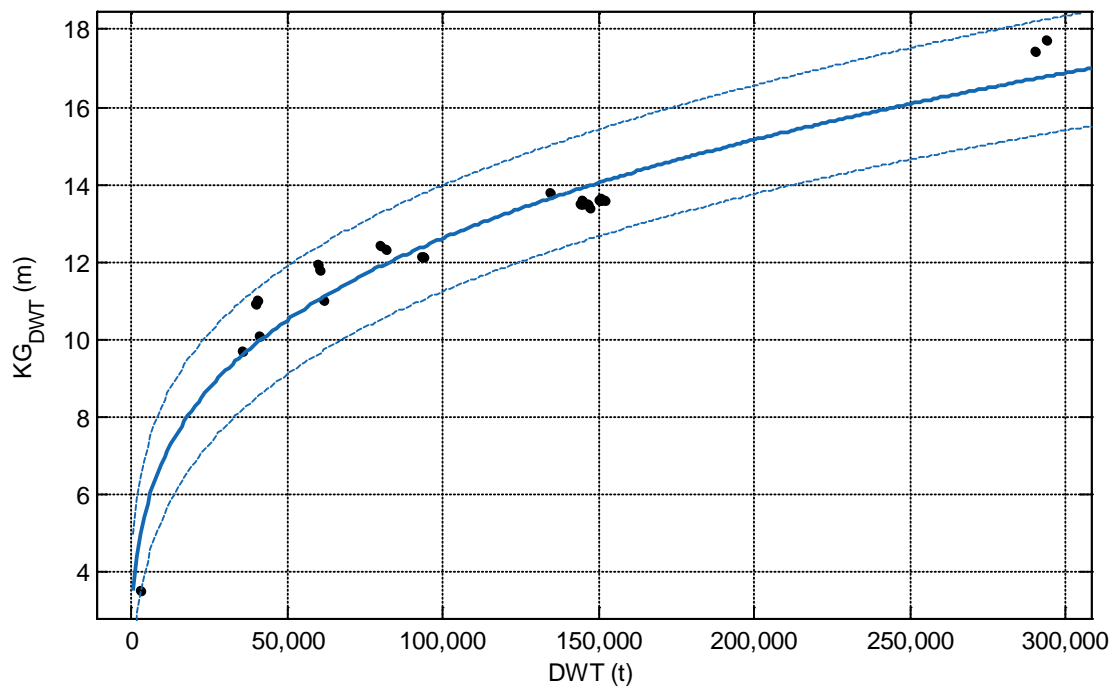
SSE: 2.023

R-square: 0.9948

Adjusted R-square: 0.9946

RMSE: 0.2597

$$KG_{DWT} = 0.5957 * D - 0.3888$$



Σχήμα 108  $KG_{DWT}$  συναρτήσει του  $DWT$  για Full Load Departure

Αποτελέσματα προσέγγισης

General model Power1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.5919$$

$$b = 0.2657$$

Goodness of fit:

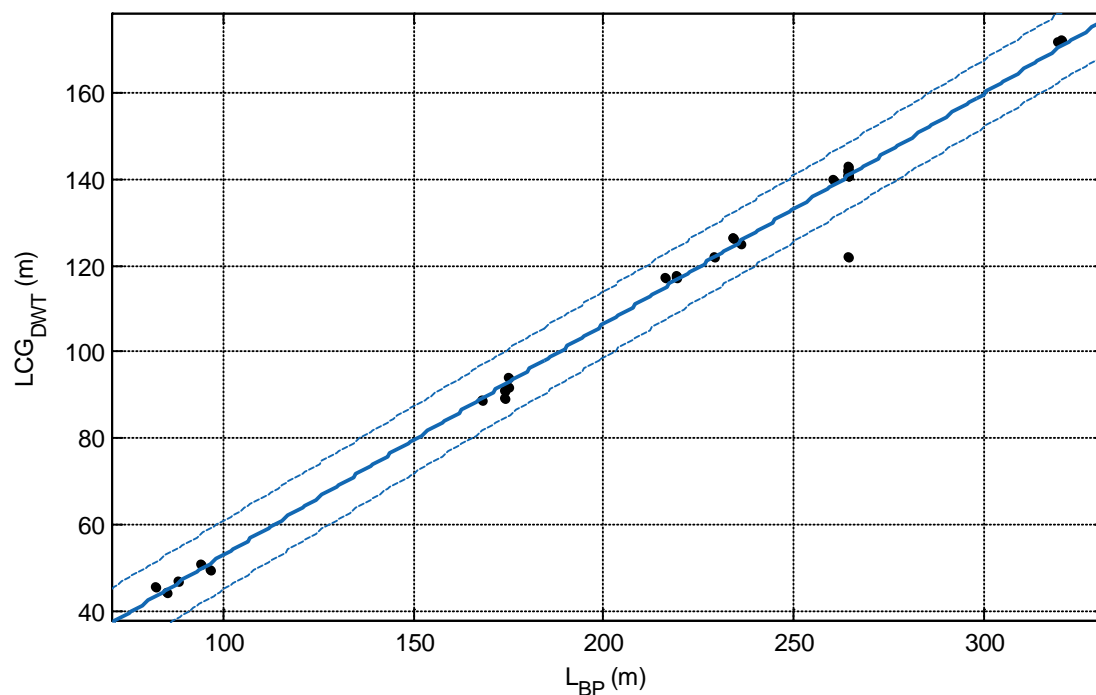
SSE: 10.19

R-square: 0.9394

Adjusted R-square: 0.9369

RMSE: 0.6514

$$KG_{DWT} = 0.5919 * DWT^{0.2657}$$



Σχήμα 109  $LCG_{DWT}$  συναρτήσει του  $L_{BP}$  για Full Load Departure

#### Αποτελέσματα προσέγγισης

Linear model Poly1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.5352$$

$$p2 = -0.6353$$

Goodness of fit:

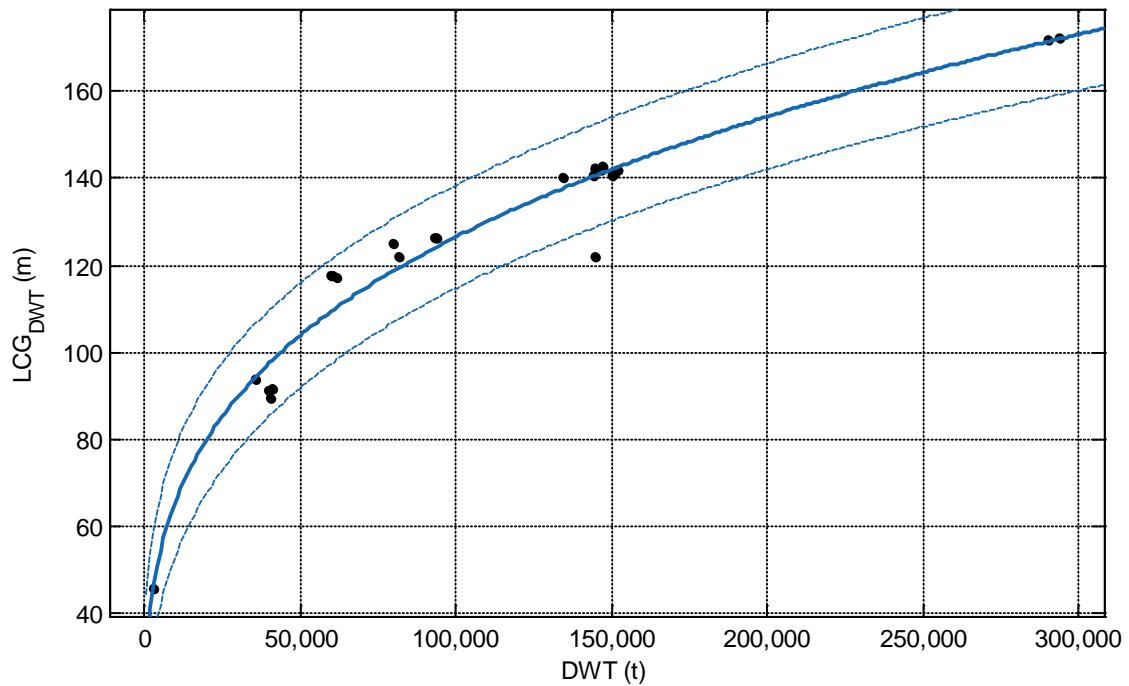
SSE: 405.9

R-square: 0.99

Adjusted R-square: 0.9896

RMSE: 3.678

$$LCG_{DWT} = 0.5352 * L_{BP} - 0.6353$$



Σχήμα 110  $LCG_{DWT}$  συναρτήσεσι του  $DWT$  για Full Load Departure

Αποτελέσματα προσέγγισης

General model Power1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 4.758$$

$$b = 0.285$$

Goodness of fit:

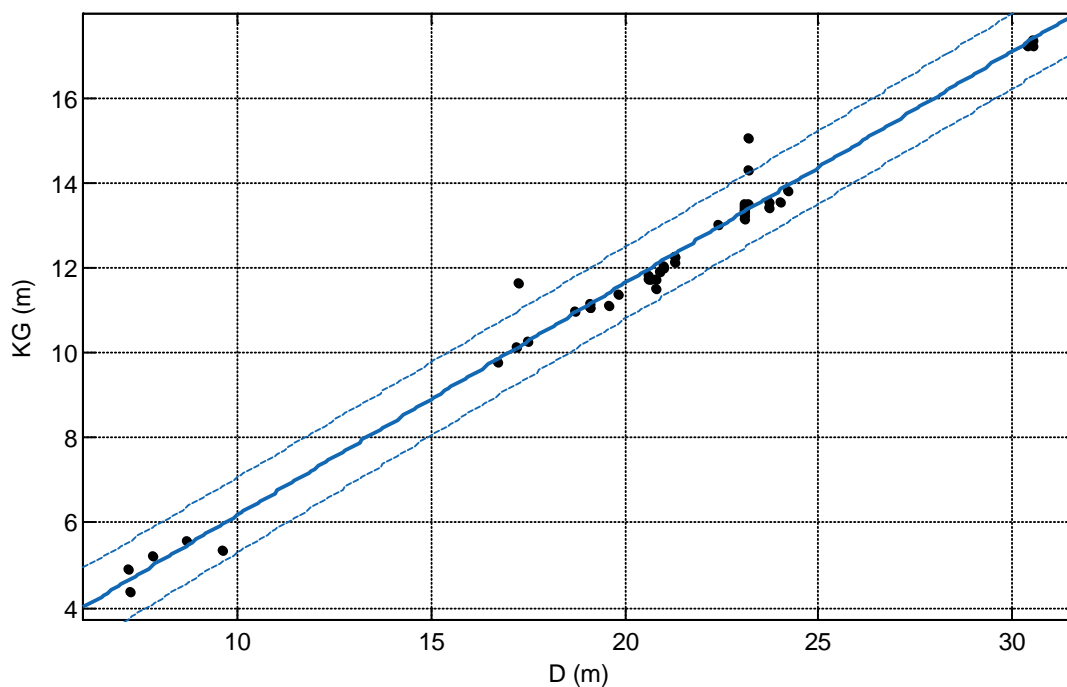
SSE: 758.4

R-square: 0.9586

Adjusted R-square: 0.9568

RMSE: 5.621

$$LCG_{DWT} = 4.758 * DWT^{0.285}$$

8.4.4. Εκτόπισμα

Σχήμα 111 KG συναρτήσει του D για Full Load Departure

Αποτελέσματα προσέγγισης

Linear model Poly1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.5455$$

$$p2 = 0.7278$$

Goodness of fit:

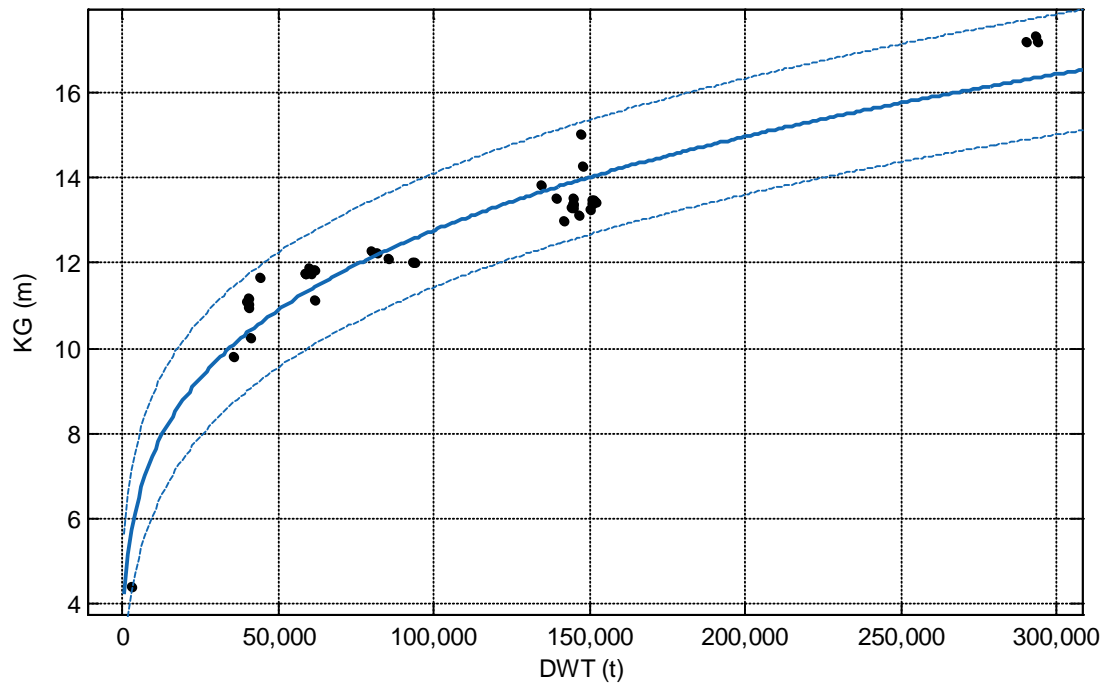
SSE: 7.648

R-square: 0.9799

Adjusted R-square: 0.9795

RMSE: 0.4169

$$KG = 0.5455 * D + 0.7278$$



Σχήμα 112 KG συναρτήσει του DWT για Full Load Departure

Αποτελέσματα προσέγγισης

General model Power1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.9037$$

$$b = 0.2301$$

Goodness of fit:

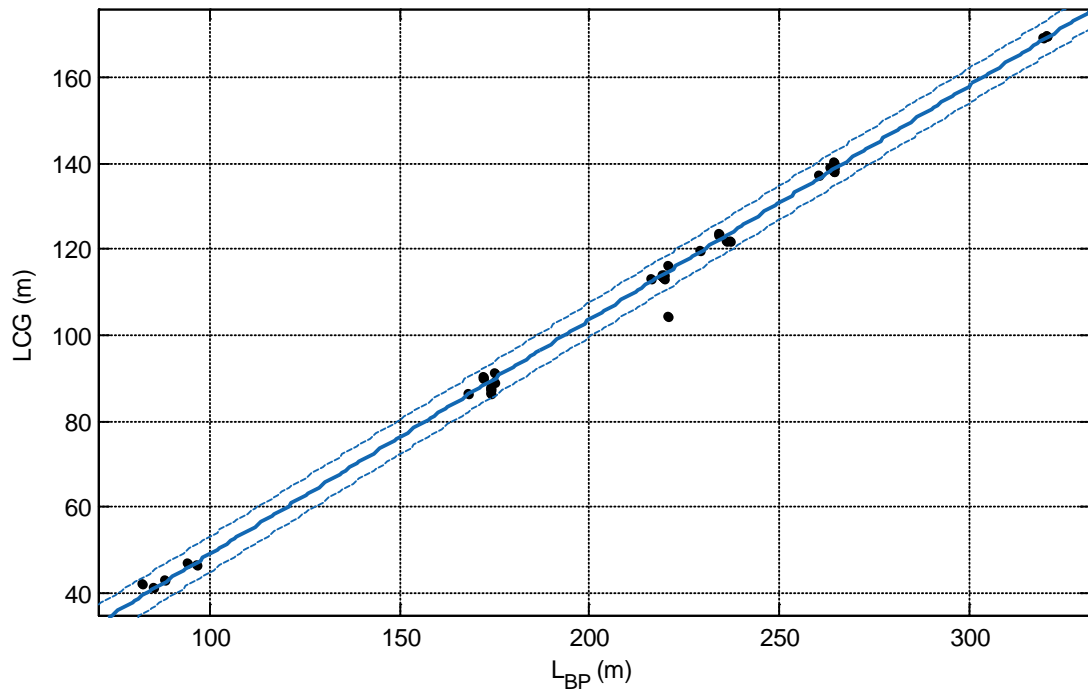
SSE: 15.82

R-square: 0.9131

Adjusted R-square: 0.9107

RMSE: 0.6539

$$KG = 0.9037 * DWT^{0.2301}$$



Σχήμα 113 LCG συναρτήσει του  $L_{BP}$  για Full Load Departure

Αποτελέσματα προσέγγισης

Linear model Poly1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.5456$$

$$p2 = -5.582$$

Goodness of fit:

SSE: 162.9

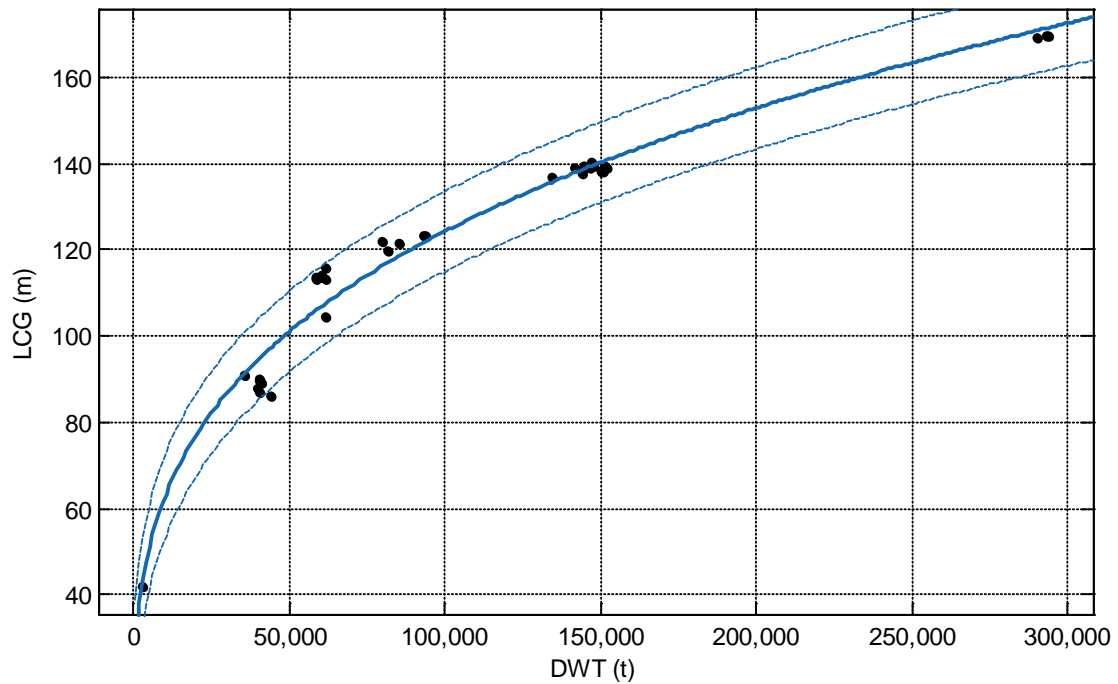
R-square: 0.9967

Adjusted R-square: 0.9966

RMSE: 1.947

$$LCG = 0.5456 * L_{BP} - 5.582$$





Σχήμα 114 LCG συναρτήσει του DWT για Full Load Departure

Αποτελέσματα προσέγγισης

General model Power1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 3.978$$

$$b = 0.2989$$

Goodness of fit:

SSE: 731.4

R-square: 0.9717

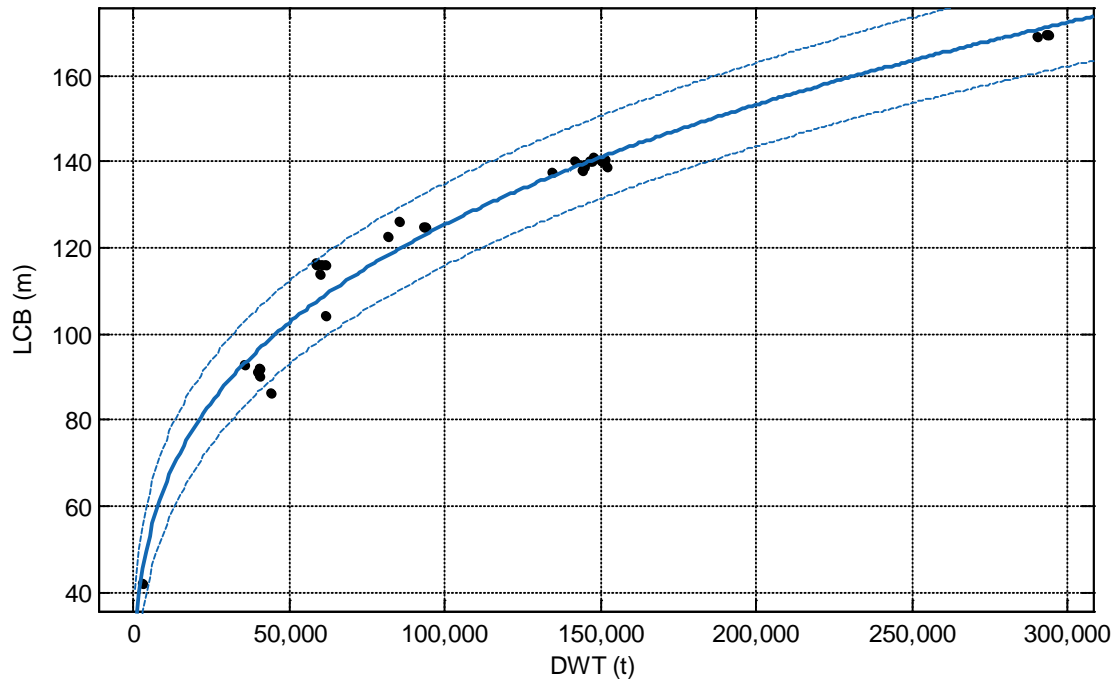
Adjusted R-square: 0.9709

RMSE: 4.507

$$LCG = 3.978 * DWT^{0.2989}$$

## 8.5. Υδροστατικά μεγέθη για Full Load Departure

### 8.5.1. LCB



Σχήμα 115 LCB συναρτήσει του DWT για Full Load Departure

#### Αποτελέσματα προσέγγισης

General model Power1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 4.459$$

$$b = 0.2898$$

Goodness of fit:

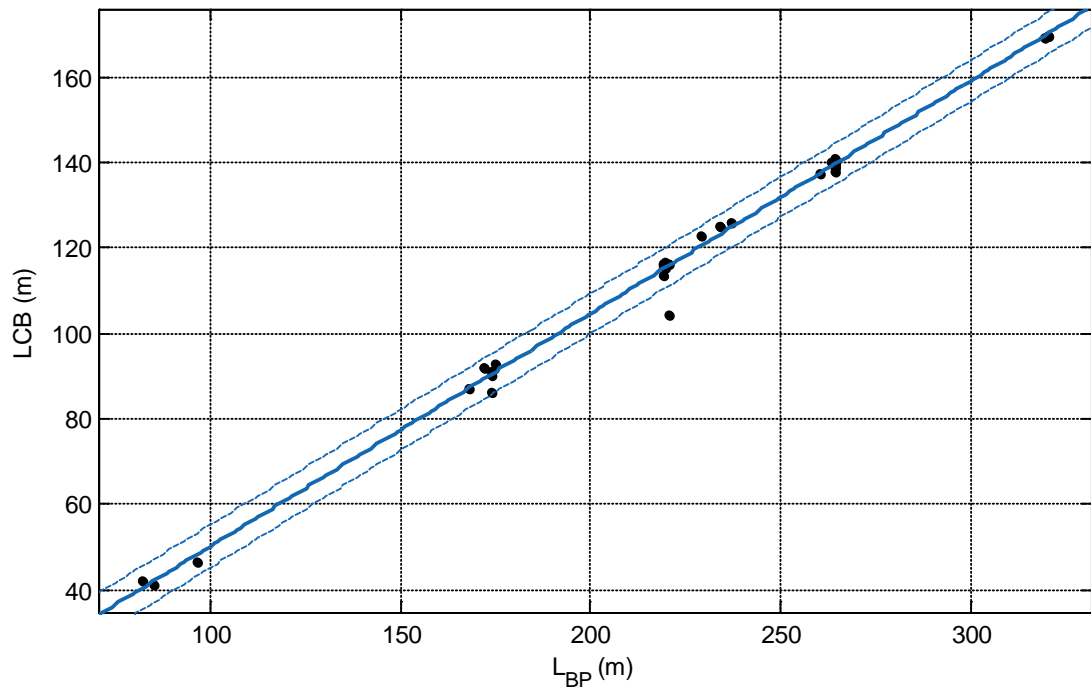
SSE: 706.3

R-square: 0.9705

Adjusted R-square: 0.9696

RMSE: 4.626

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



Σχήμα 116 LCB συναρτήσει του  $L_{BP}$  για Full Load Departure

Αποτελέσματα προσέγγισης

Linear model Poly1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.5447$$

$$p2 = -4.263$$

Goodness of fit:

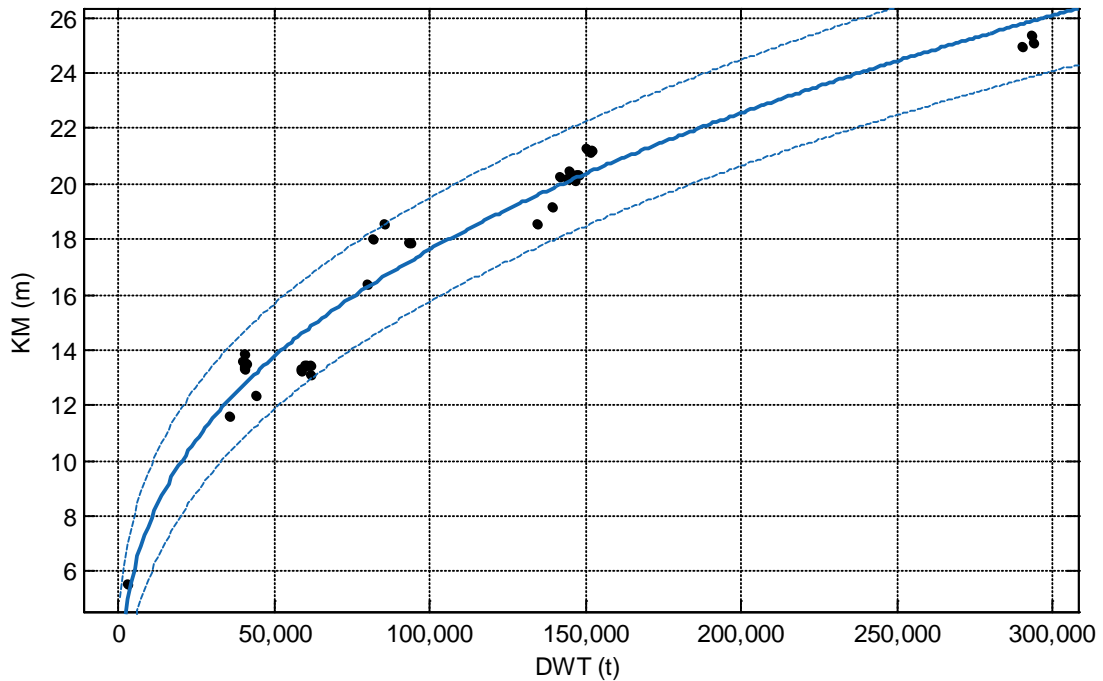
SSE: 200.4

R-square: 0.9946

Adjusted R-square: 0.9945

RMSE: 2.297

$$LCB = 0.5447 * L_{BP} - 4.263$$

8.5.2. KM

Σχήμα 117 KM συναρτήσει του DWT για Full Load Departure

Αποτελέσματα προσέγγισης

General model Power1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.2898$$

$$b = 0.3568$$

Goodness of fit:

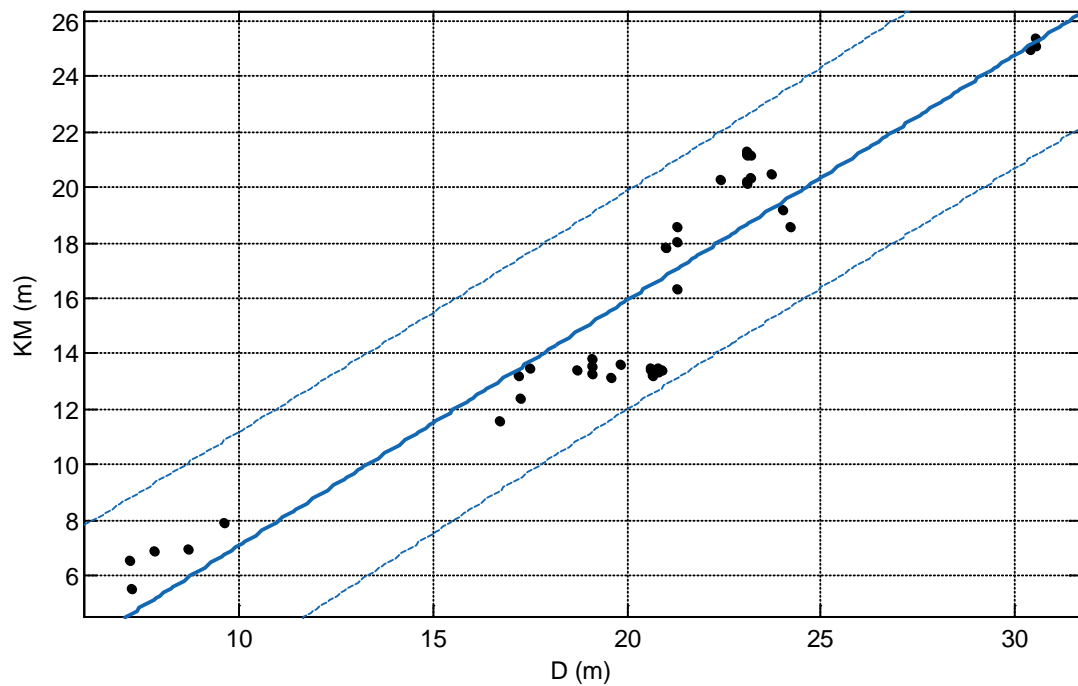
SSE: 30.93

R-square: 0.9573

Adjusted R-square: 0.9561

RMSE: 0.9143

$$KM = 0.2898 * DWT^{0.3568}$$



Σχήμα 118 KM συναρτήσει του D για Full Load Departure

Αποτελέσματα προσέγγισης

Linear model Poly1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.8835$$

$$p2 = -1.739$$

Goodness of fit:

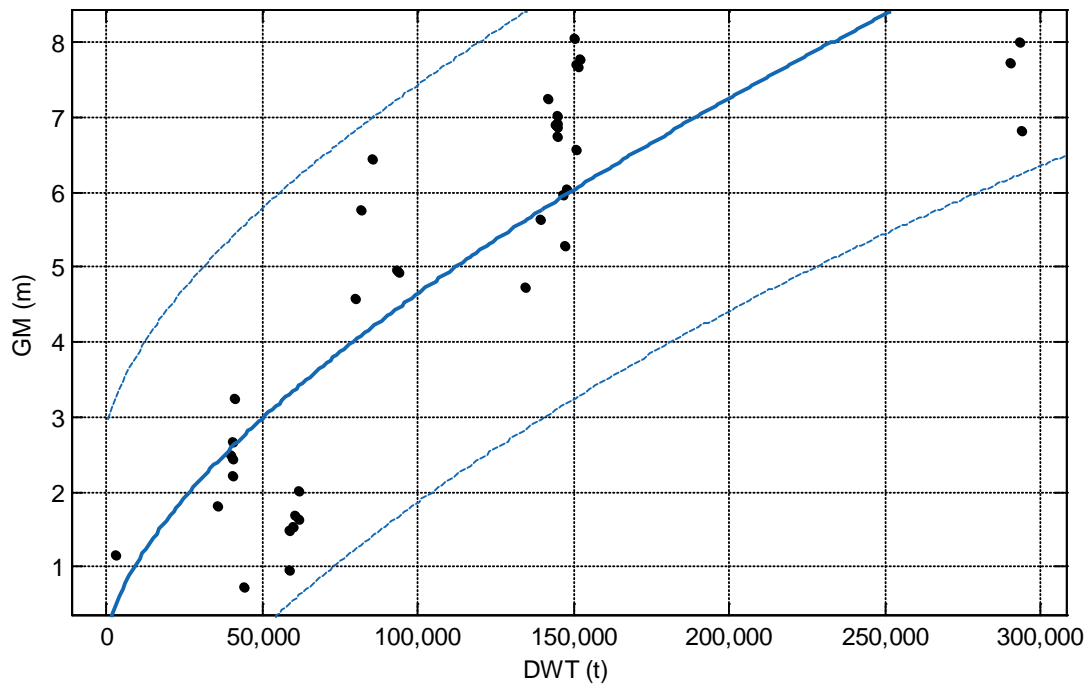
SSE: 164

R-square: 0.8565

Adjusted R-square: 0.8532

RMSE: 1.931

$$KM = 0.8835 * D - 1.739$$

8.5.3. GM

Σχήμα 119 GM συναρτήσεσι του DWT για Full Load Departure

Αποτελέσματα προσέγγισης

General model Power1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.002856$$

$$b = 0.6424$$

Goodness of fit:

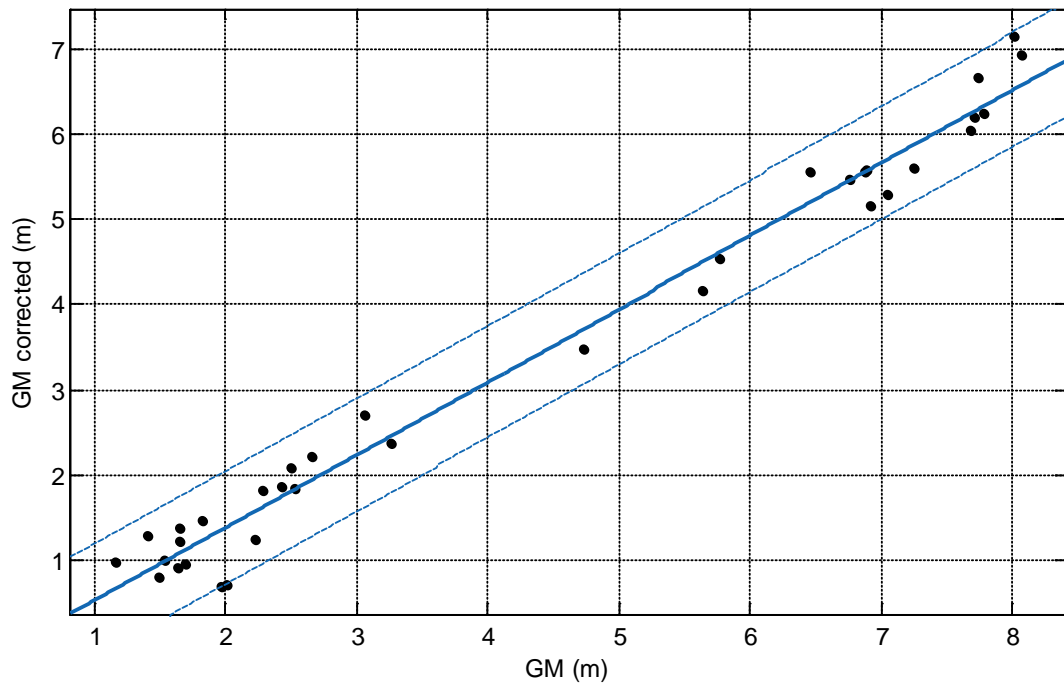
SSE: 68.04

R-square: 0.7104

Adjusted R-square: 0.7025

RMSE: 1.356

$$GM = 0.002856 * DWT^{0.6424}$$



Σχήμα 120  $GM_{COR}$  συναρτήσει του  $GM$  για Full Load Departure

#### Αποτελέσματα προσέγγισης

Linear model Poly1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.8572$$

$$p2 = -0.337$$

Goodness of fit:

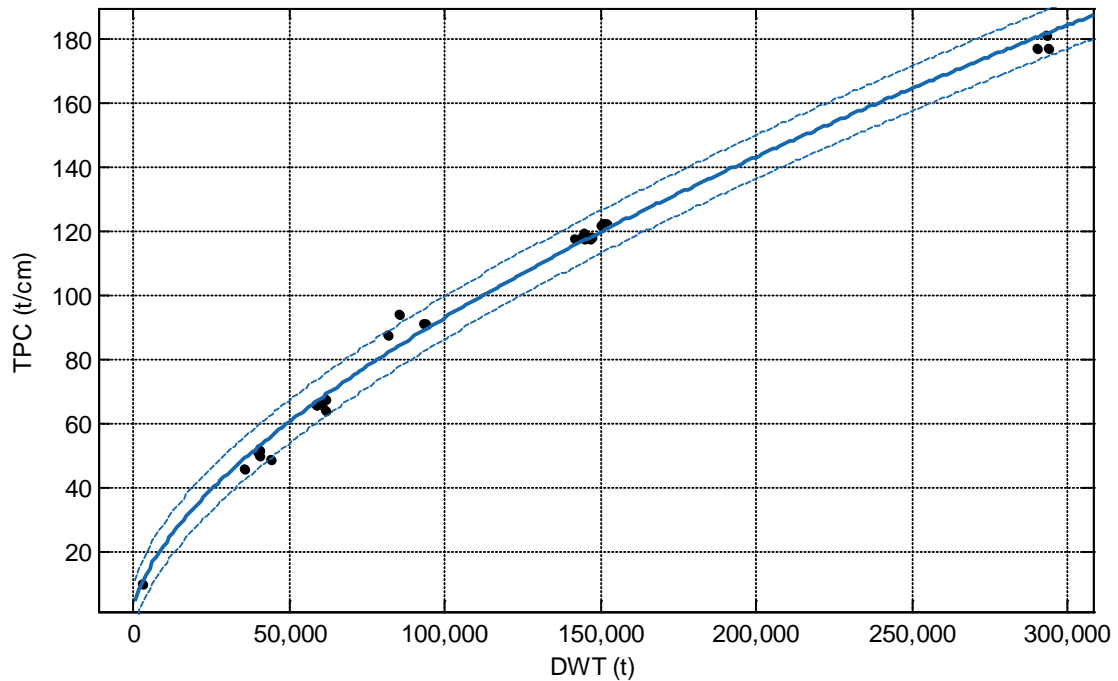
SSE: 3.333

R-square: 0.9805

Adjusted R-square: 0.9799

RMSE: 0.3178

$$GM_{COR} = 0.8572 * GM - 0.337$$

8.5.4. TPC

Σχήμα 121 TPC συναρτήσει του DWT για Full Load Departure

Αποτελέσματα προσέγγισης

General model Power1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.07142$$

$$b = 0.623$$

Goodness of fit:

SSE: 299.5

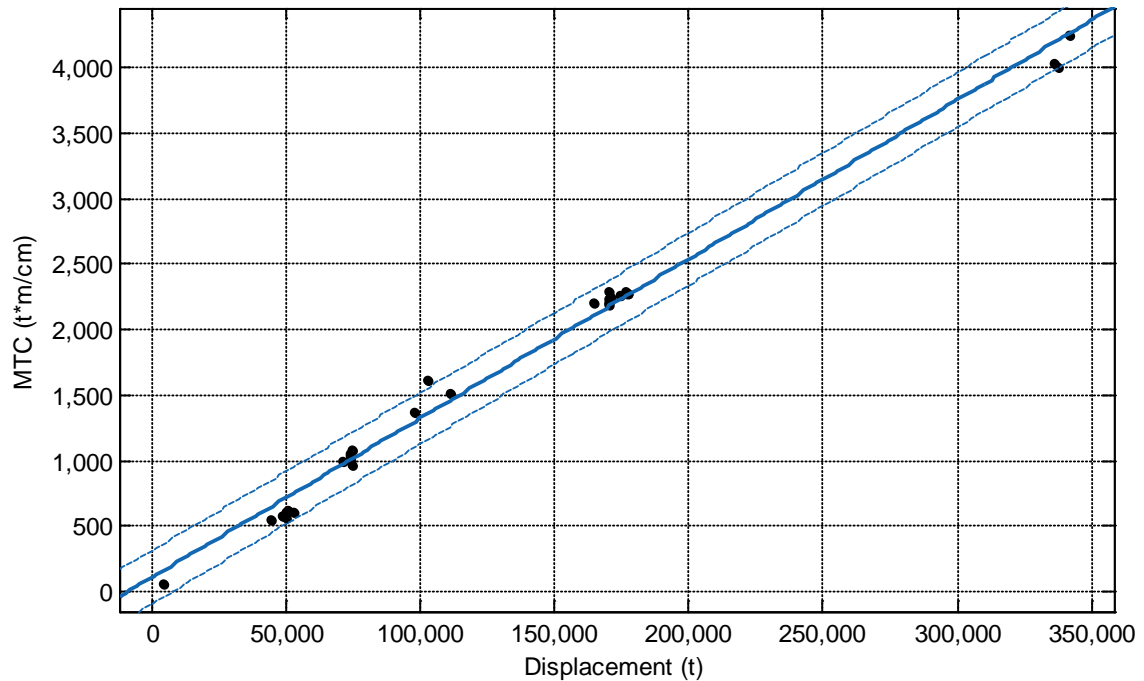
R-square: 0.9942

Adjusted R-square: 0.9939

RMSE: 3.214

$$TPC = 0.07142 * DWT^{0.623}$$



8.5.5. MTCΣχήμα 122 MTC συναρτήσεως του  $\Delta$  για Full Load DepartureΑποτελέσματα προσέγγισης

Linear model Poly1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.01218$$

$$p2 = 105.1$$

Goodness of fit:

SSE: 3.03e+05

R-square: 0.9913

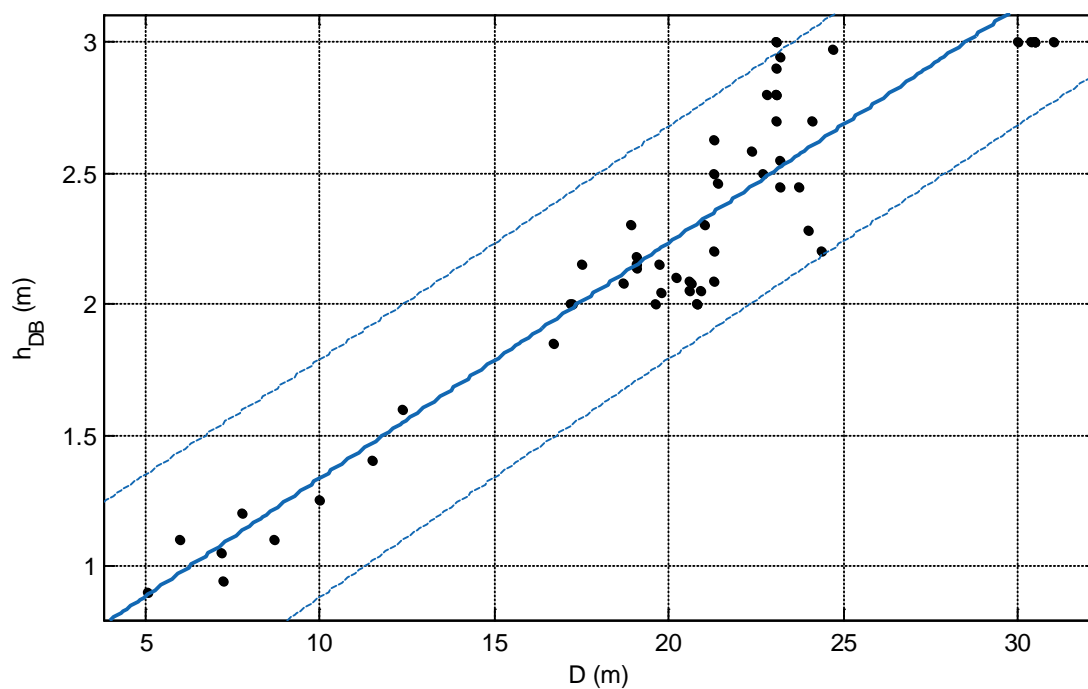
Adjusted R-square: 0.9911

RMSE: 95.83

$$MTC = 0.01218 * \Delta + 105.1$$

## 8.6. Λοιπές Παράμετροι Σχεδίασης

### 8.6.1. Ύψος διπυθμένου (Double Bottom)



Σχήμα 123 Ύψος διπυθμένου ( $h_{DB}$ ) συναρτήσει του  $D$

#### Αποτελέσματα προσέγγισης

Linear model Poly1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.09003$$

$$p2 = 0.4333$$

Goodness of fit:

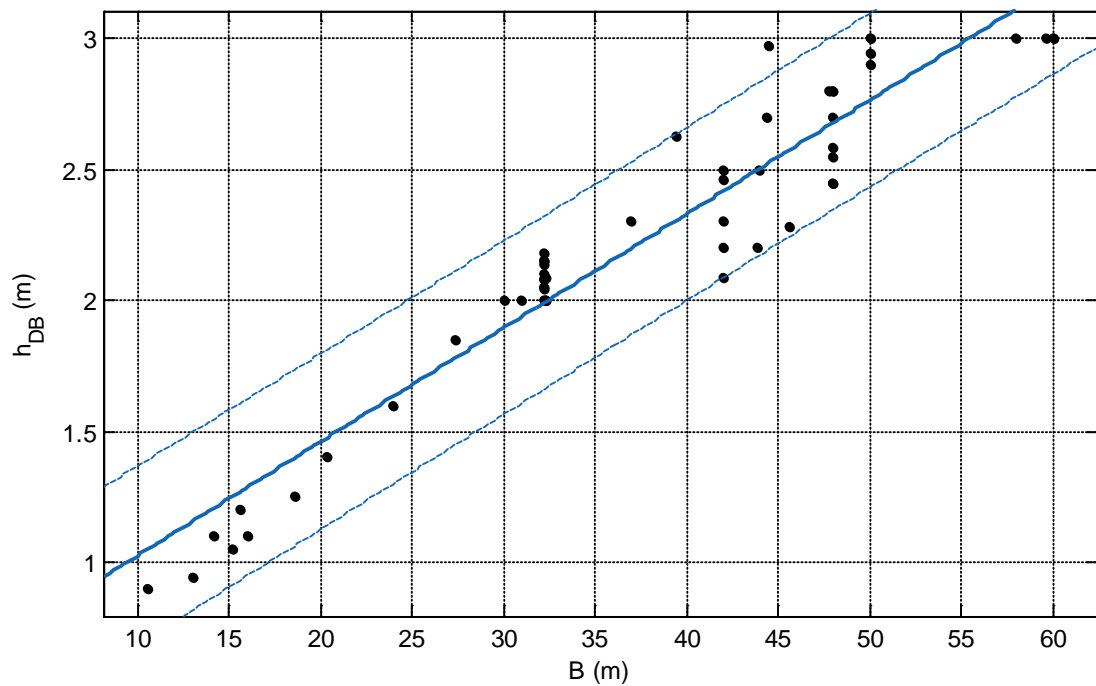
SSE: 3.418

R-square: 0.8492

Adjusted R-square: 0.847

RMSE: 0.221

$$h_{DB} = 0.09003 * D + 0.4333$$



Σχήμα 124 Ύψος διπυθμένου ( $h_{DB}$ ) συναρτήσει του  $B$

Αποτελέσματα προσέγγισης

Linear model Poly1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.04346$$

$$p2 = 0.591$$

Goodness of fit:

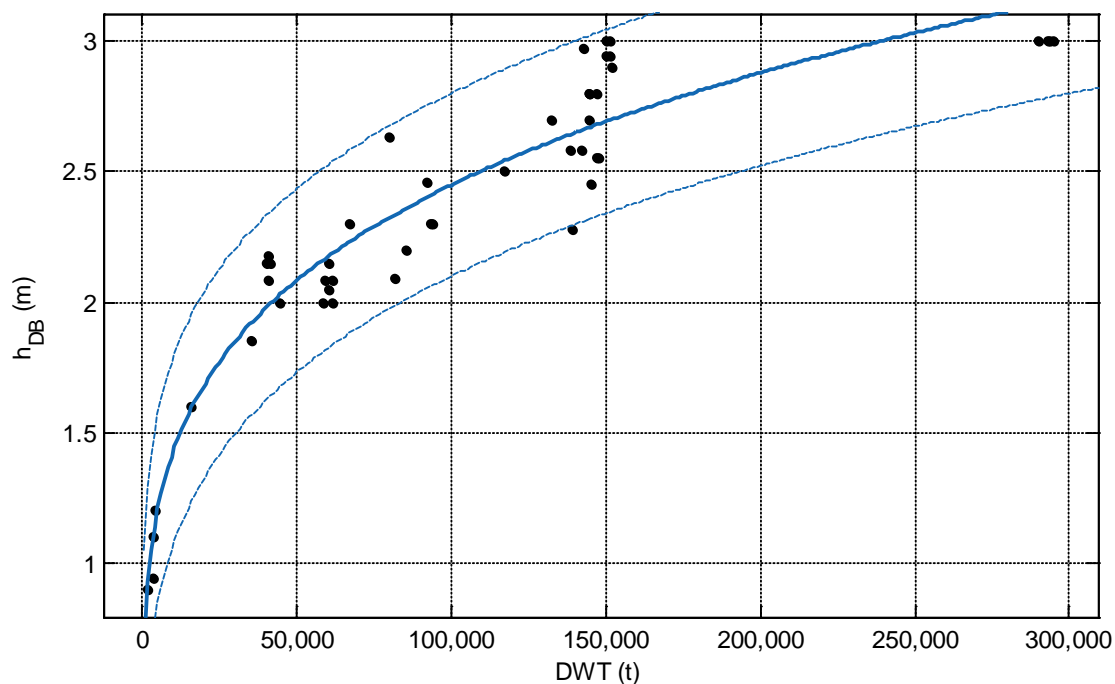
SSE: 1.892

R-square: 0.9165

Adjusted R-square: 0.9153

RMSE: 0.1644

$$h_{DB} = 0.04346 * B + 0.591$$



Σχήμα 125 Ύψος διπυθμένου ( $h_{DB}$ ) συναρτήσει του DWT

#### Αποτελέσματα προσέγγισης

General model Power1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.1682$$

$$b = 0.2326$$

Goodness of fit:

SSE: 1.457

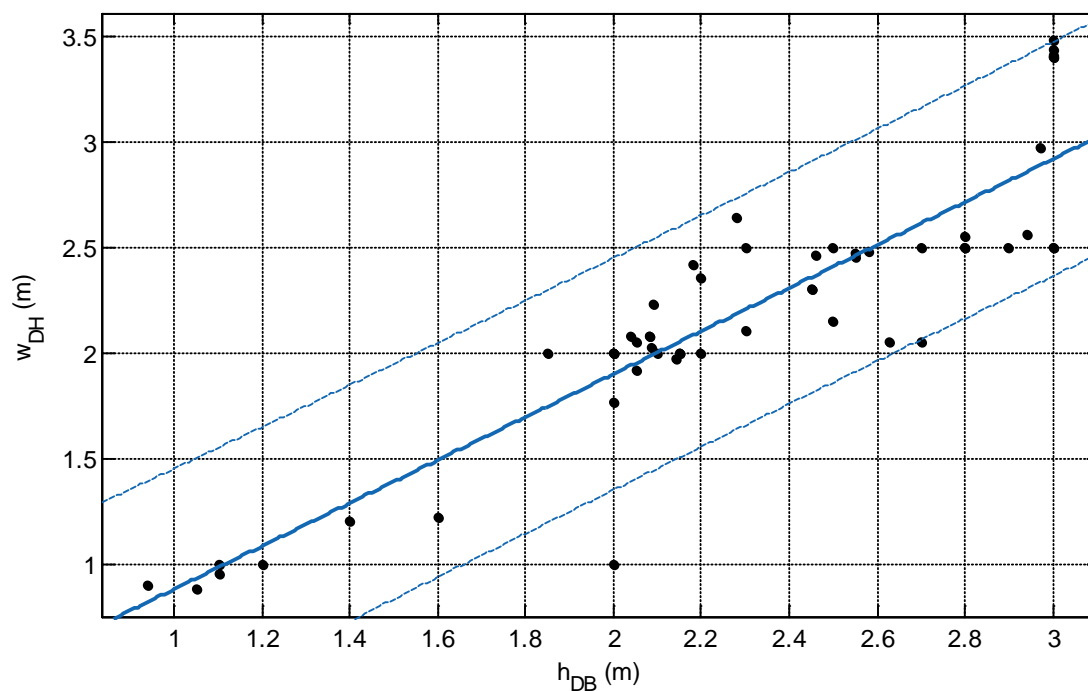
R-square: 0.899

Adjusted R-square: 0.8969

RMSE: 0.1724

$$h_{DB} = 0.1682 * DWT^{0.2326}$$

## 8.6.2. Απόσταση διπλού τοιχώματος (Double Hull)



Σχήμα 126 Απόσταση διπλού τοιχώματος ( $w_{DH}$ ) συναρτήσει του ύψους διπυθμένου ( $h_{DB}$ )

Αποτελέσματα προσέγγισης

Linear model Poly1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 1.018$$

$$p2 = -0.1371$$

Goodness of fit:

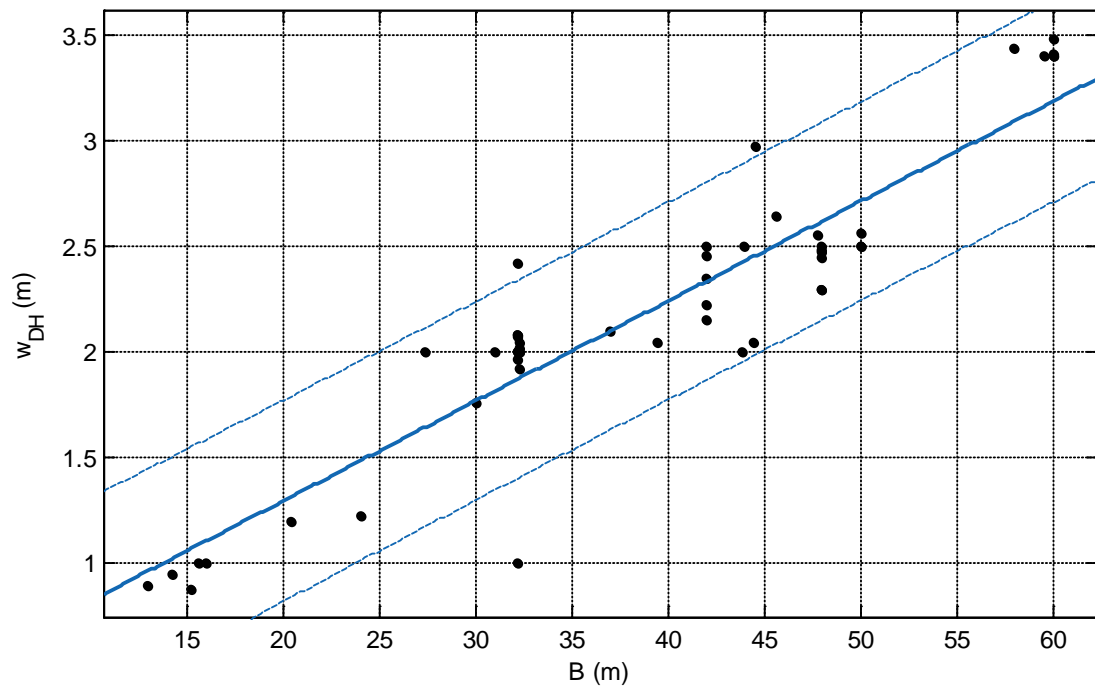
SSE: 5.063

R-square: 0.8013

Adjusted R-square: 0.7984

RMSE: 0.2729

$$w_{DH} = 1.018 * h_{DB} - 0.1371$$



Σχήμα 127 Απόσταση διπλού τοιχώματος ( $w_{DH}$ ) συναρτήσει του  $B$

ας γίνει σύγκριση actual-required με κανονισμό...

#### Αποτελέσματα προσέγγισης

Linear model Poly1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.04719$$

$$p2 = 0.3536$$

Goodness of fit:

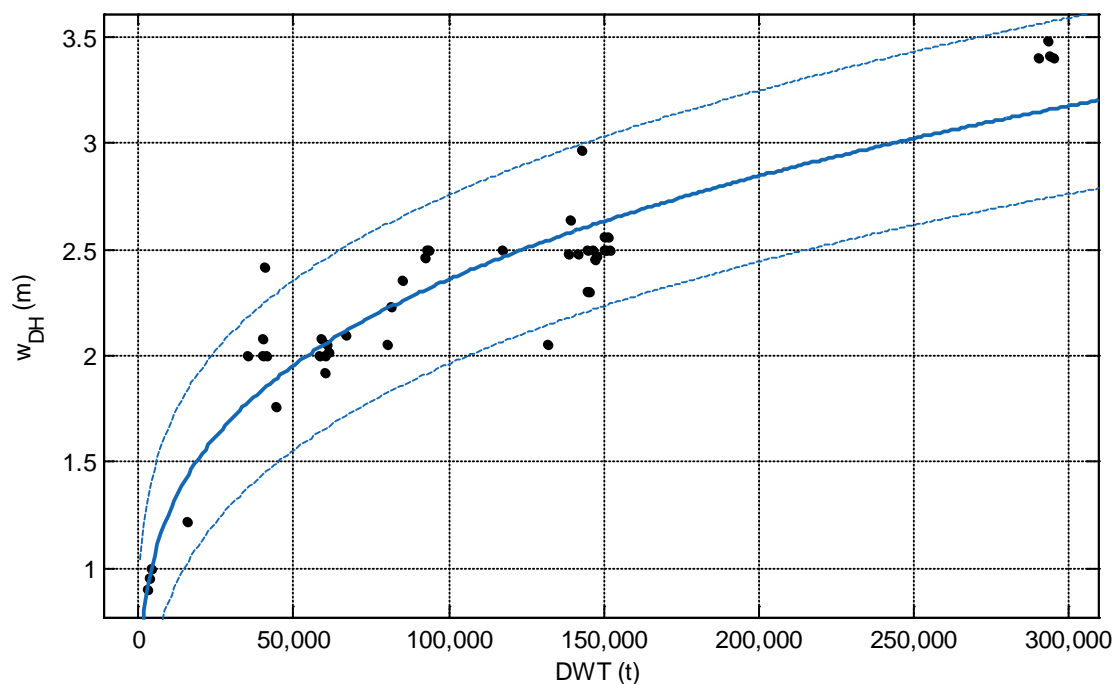
SSE: 3.673

R-square: 0.8558

Adjusted R-square: 0.8537

RMSE: 0.2324

$$w_{DH} = 0.04719 * B + 0.3536$$



Σχήμα 128 Απόσταση διπλού τοιχώματος ( $w_{DH}$ ) συναρτήσει του DWT

#### Αποτελέσματα προσέγγισης

General model Power1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.1043$$

$$b = 0.2708$$

Goodness of fit:

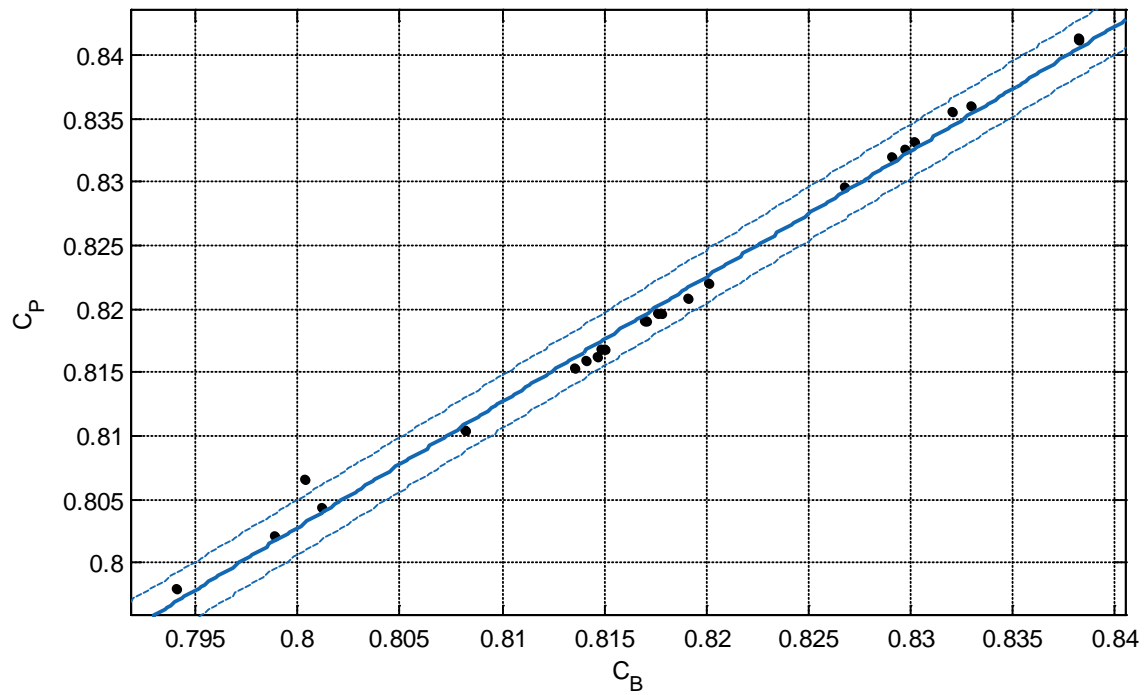
SSE: 1.793

R-square: 0.8757

Adjusted R-square: 0.8731

RMSE: 0.1953

$$w_{DH} = 0.1043 \cdot DWT^{0.2708}$$

8.6.3. Συντελεστής προσιματικής διατομής  $C_P$ Σχήμα 129  $C_P$  συναρτήσει του  $C_B$ Αποτελέσματα προσέγγισης

Linear model Poly1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.985$$

$$p2 = 0.01485$$

Goodness of fit:

SSE: 2.485e-05

R-square: 0.9928

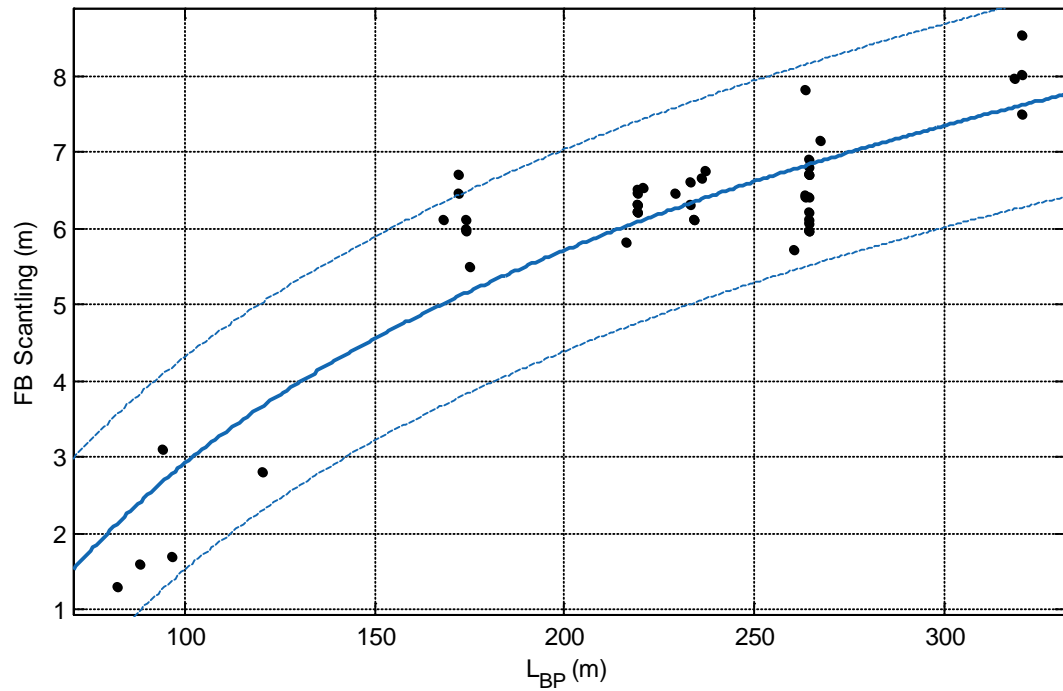
Adjusted R-square: 0.9925

RMSE: 0.0009969

$$C_P = 0.985 * C_B + 0.01485$$



## 8.6.4. Ύψος εξάλων (Freeboard)

Σχήμα 130  $FB_{SCANT}$  συναρτήσει του  $L_{BP}$ Αποτελέσματα προσέγγισης

General model:

$$f(x) = a \cdot \log(x) + b$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 4.035$$

$$b = -15.66$$

Goodness of fit:

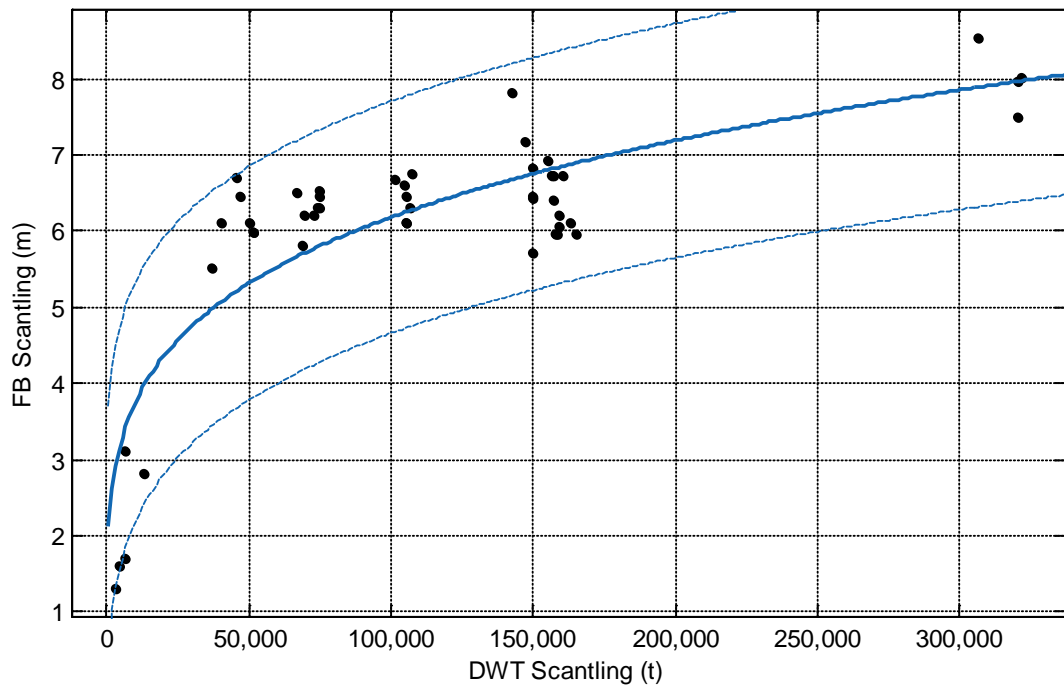
SSE: 22.12

R-square: 0.7936

Adjusted R-square: 0.7896

RMSE: 0.6522

$$FB_{SCANT} = 4.035 \cdot \ln(L_{BP}) - 15.66$$



Σχήμα 131  $FB_{SCANT}$  συναρτήσεως του  $DWT_{SCANT}$

Αποτελέσματα προσέγγισης

General model Power1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.5038$$

$$b = 0.2178$$

Goodness of fit:

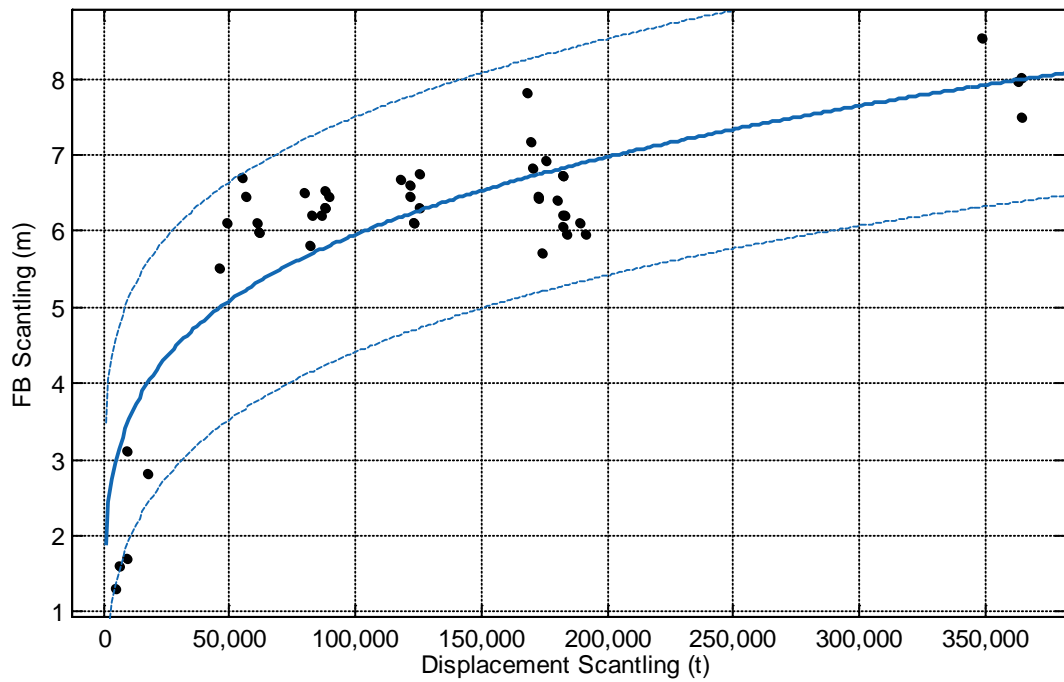
SSE: 29.39

R-square: 0.7258

Adjusted R-square: 0.7205

RMSE: 0.7518

$$FB_{SCANT} = 0.5038 * (DWT_{SCANT})^{0.2178}$$



Σχήμα 132  $FB_{SCANT}$  συναρτήσει του  $\Delta_{SCANT}$

Αποτελέσματα προσέγγισης

General model Power1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.4357$$

$$b = 0.2272$$

Goodness of fit:

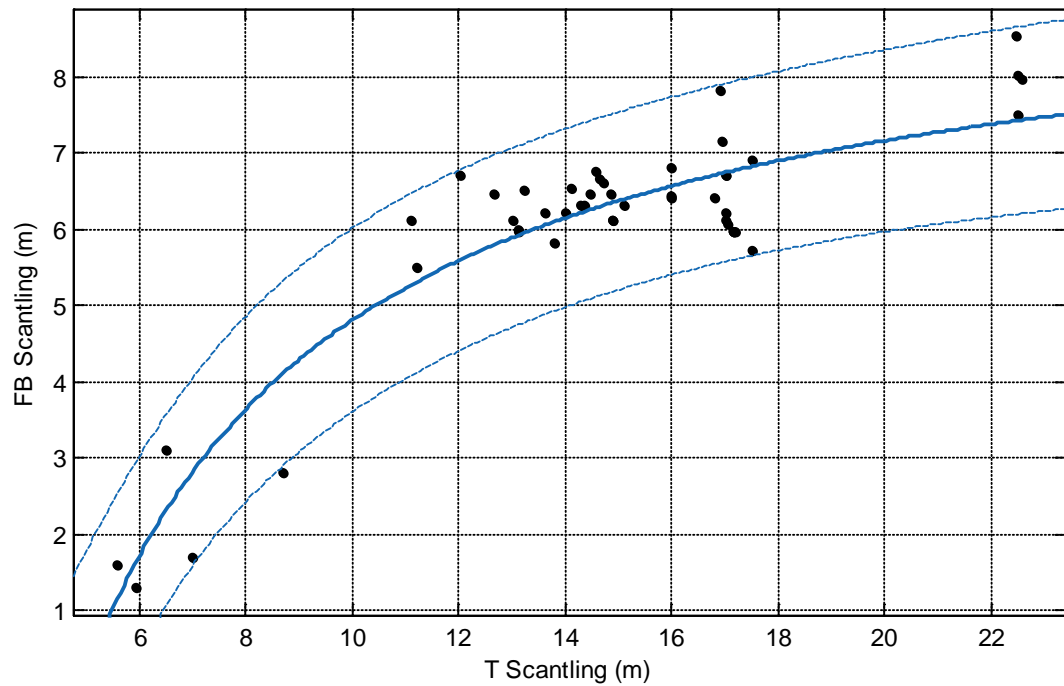
SSE: 30.18

R-square: 0.7184

Adjusted R-square: 0.713

RMSE: 0.7618

$$FB_{SCANT} = 0.4357 * (\Delta_{SCANT})^{0.2272}$$



Σχήμα 133  $FB_{SCANT}$  συναρτήσεως του  $T_{SCANT}$

Αποτελέσματα προσέγγισης

General model Power2:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$\begin{aligned} a &= -45.25 \\ b &= -0.9759 \\ c &= 9.598 \end{aligned}$$

Goodness of fit:

SSE: 16.82

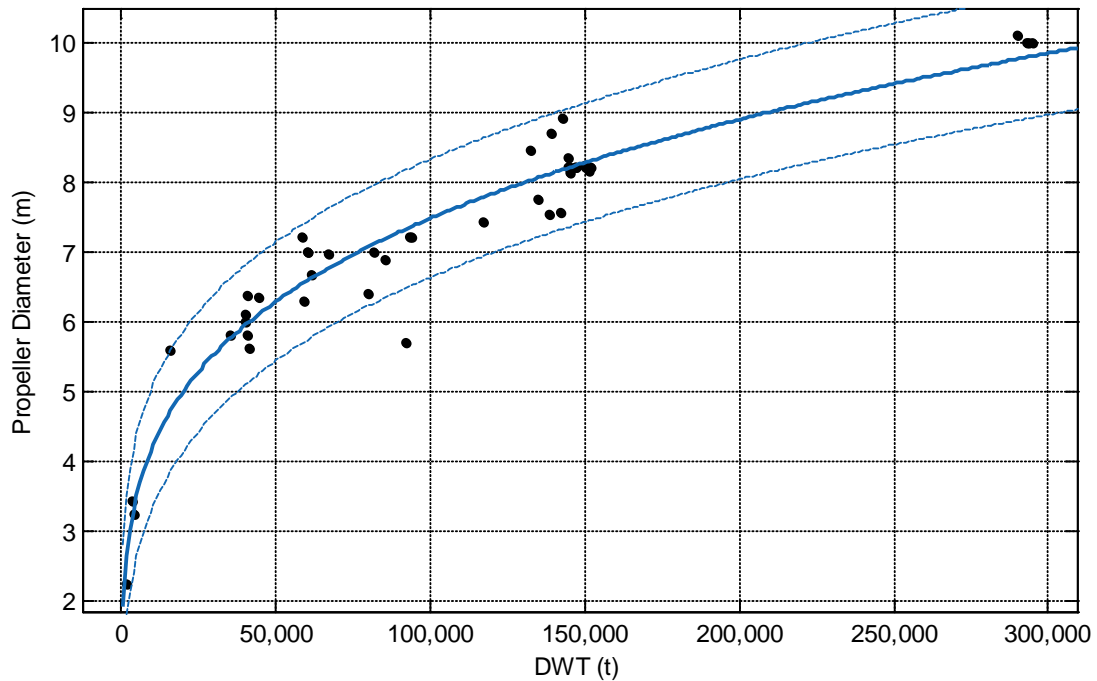
R-square: 0.843

Adjusted R-square: 0.8369

RMSE: 0.5743

$$FB_{SCANT} = -45.25 * (T_{SCANT})^{-0.9759} + 9.598$$

## 8.6.5. Διάμετρος έλικας



Σχήμα 134 Διάμετρος έλικας συναρτήσει του DWT

Αποτελέσματα προσέγγισης

General model Power1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.4212$$

$$b = 0.2499$$

Goodness of fit:

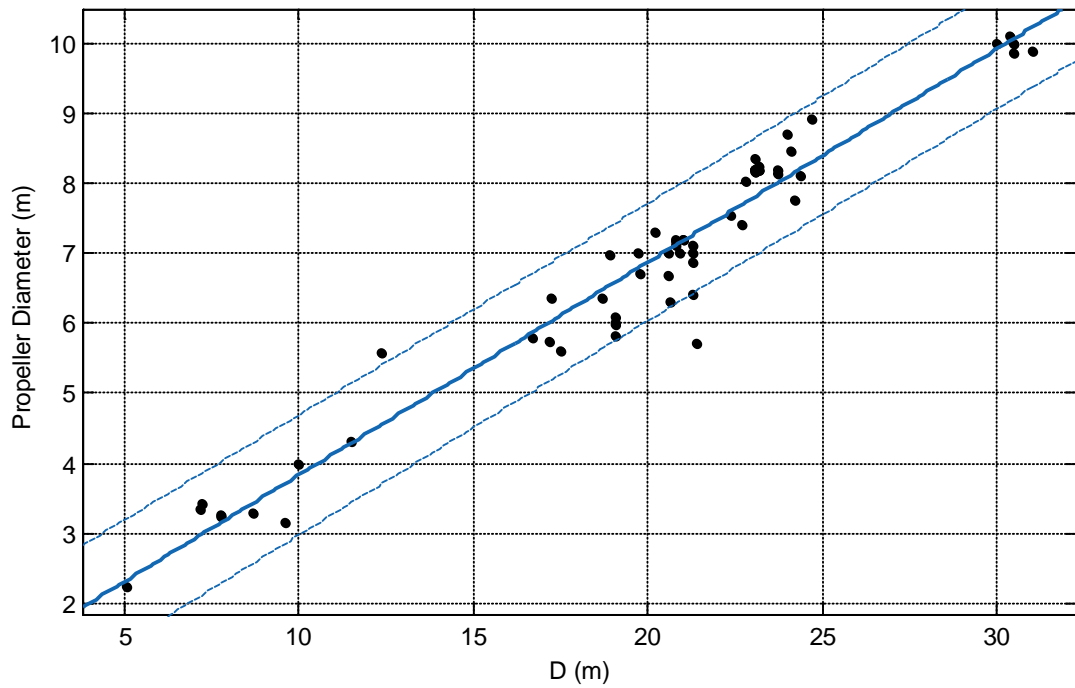
SSE: 8.146

R-square: 0.9346

Adjusted R-square: 0.9332

RMSE: 0.4163

$$D_{PROP} = 0.4212 * DWT^{0.2499}$$



Σχήμα 135 Διάμετρος έλικας συναρτήσει του  $D$

Αποτελέσματα προσέγγισης

Linear model Poly1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.3044$$

$$p2 = 0.7846$$

Goodness of fit:

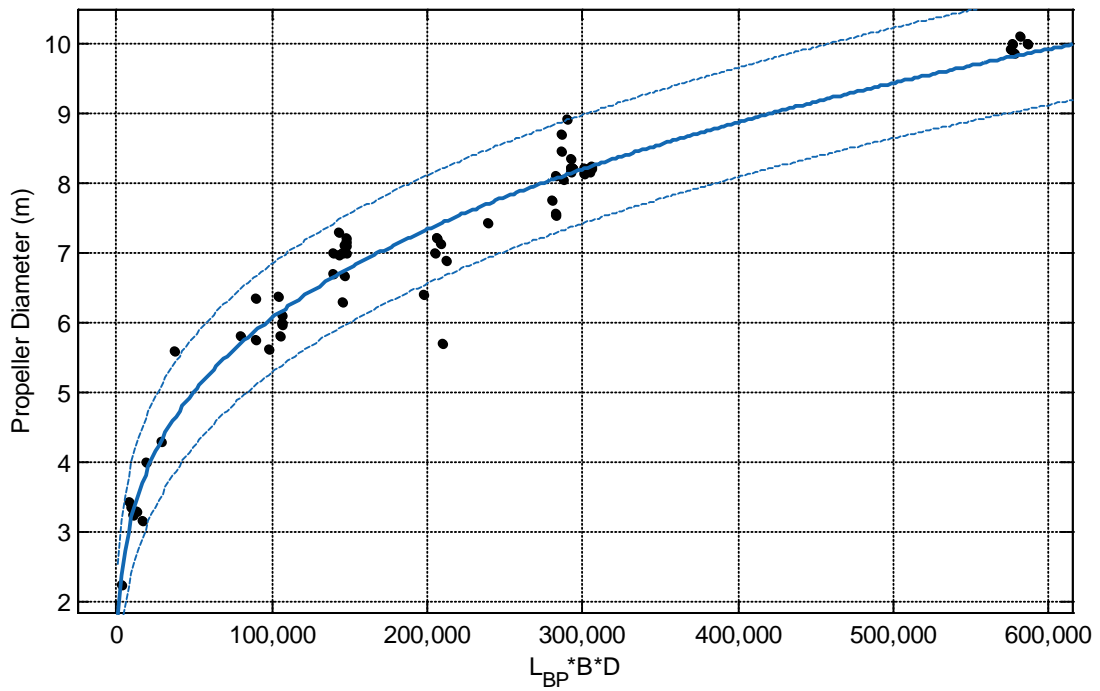
SSE: 12.03

R-square: 0.9464

Adjusted R-square: 0.9456

RMSE: 0.4175

$$D_{PROP} = 0.3044 * D + 0.7846$$



Σχήμα 136 Διάμετρος έλικας συναρτήσει των  $L_{BP}$ ,  $B$ ,  $D$

Αποτελέσματα προσέγγισης

General model Power1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.2559$$

$$b = 0.2749$$

Goodness of fit:

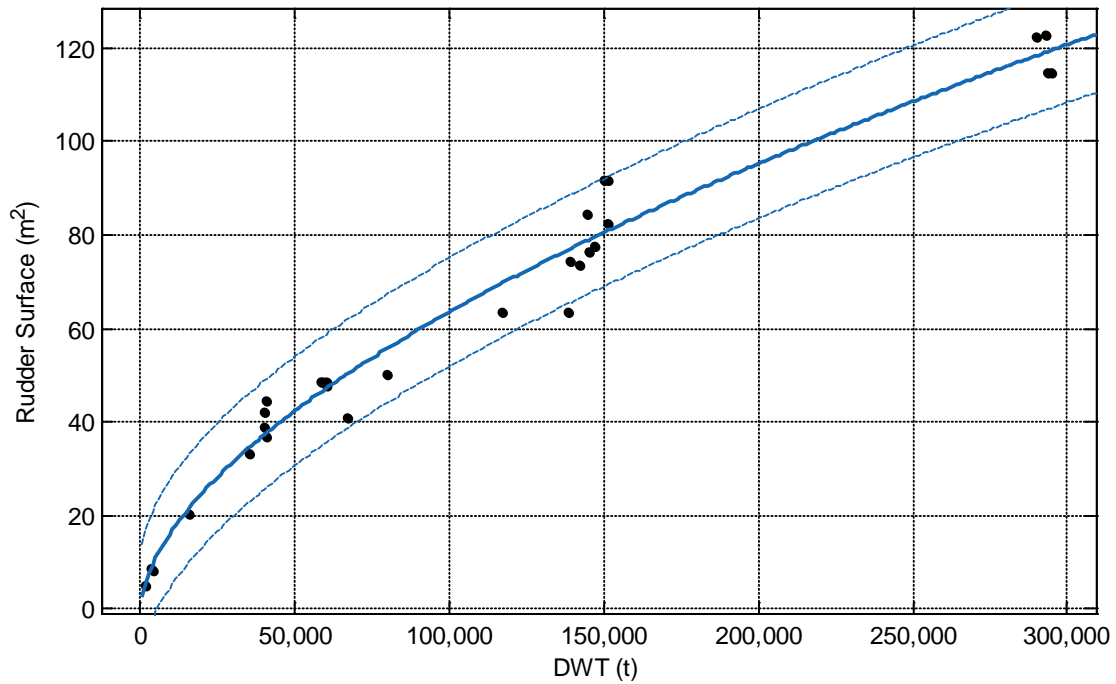
SSE: 10.3

R-square: 0.9541

Adjusted R-square: 0.9534

RMSE: 0.3864

$$D_{PROP} = 0.2559 * (L_{BP} * B * D)^{0.2749}$$

8.6.6. Επιφάνεια πηδαλίου

Σχήμα 137 Επιφάνεια πηδαλίου συναρτήσεως του DWT

General model Power1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.07641$$

$$b = 0.584$$

Goodness of fit:

SSE: 852

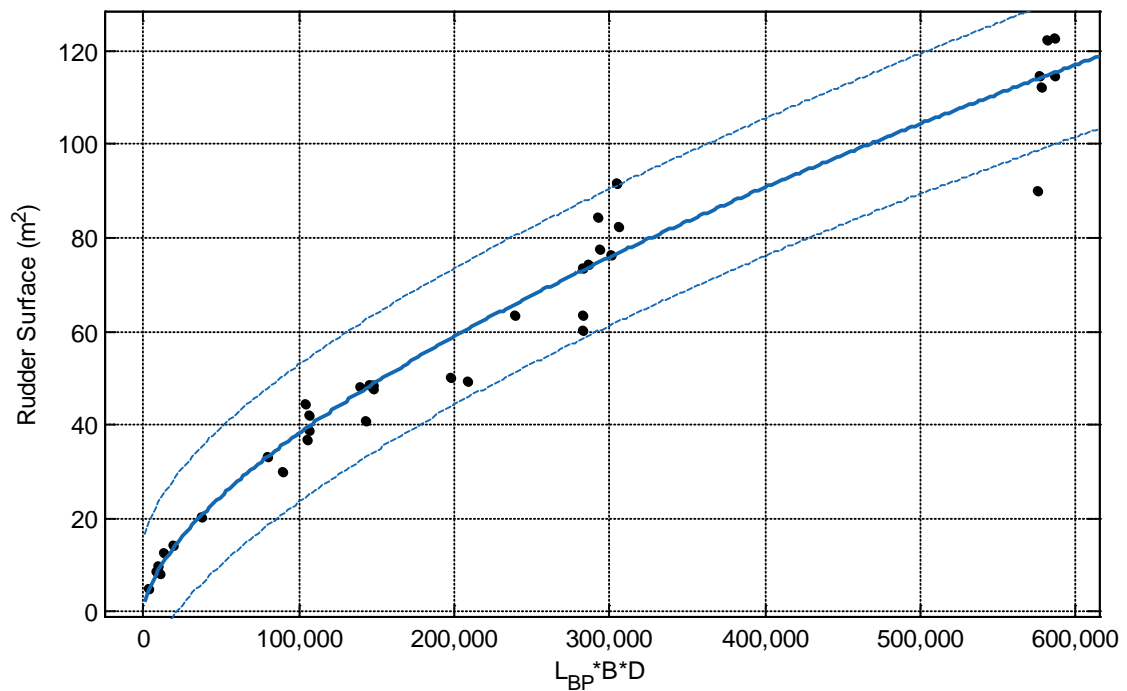
R-square: 0.973

Adjusted R-square: 0.9721

RMSE: 5.516

$$A_{RUDDER} = 0.07641 \cdot DWT^{0.584}$$





Σχήμα 138 Επιφάνεια πηδαλίου συναρτήσει των  $L_{BP}$ ,  $B$ ,  $D$

General model Power1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.02849$$

$$b = 0.6254$$

Goodness of fit:

SSE: 1974

R-square: 0.957

Adjusted R-square: 0.9559

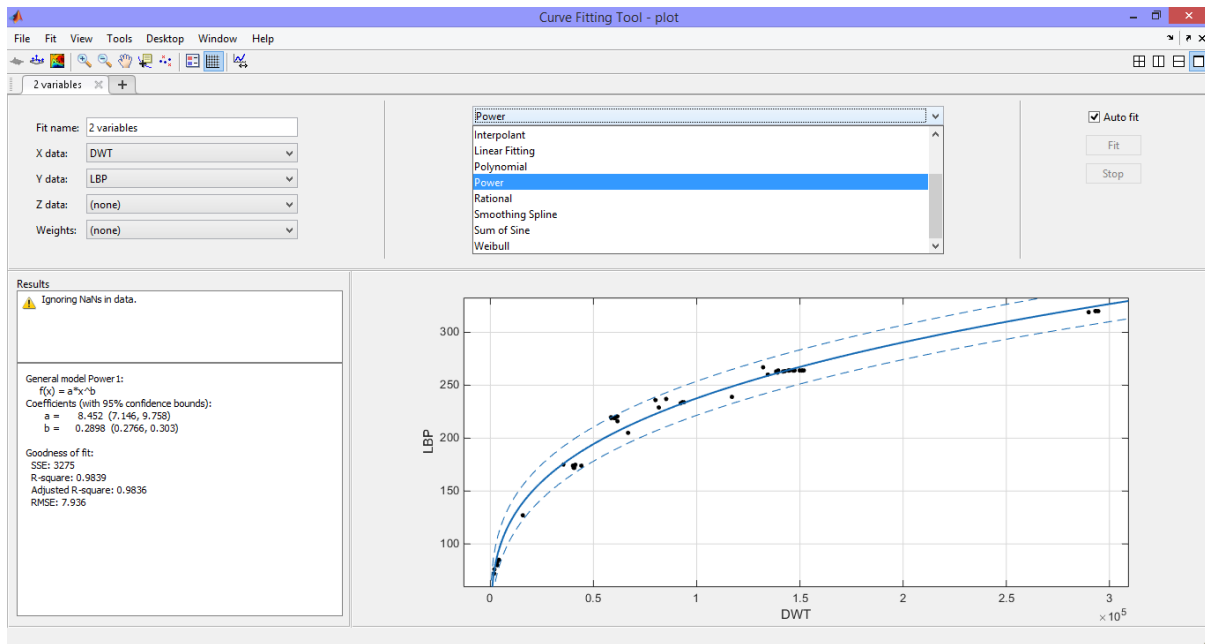
RMSE: 7.114

$$A_{RUDDER} = 0.02849 * (L_{BP} * B * D)^{0.6254}$$

## 9. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ – MATLAB CURVE FITTING TOOL

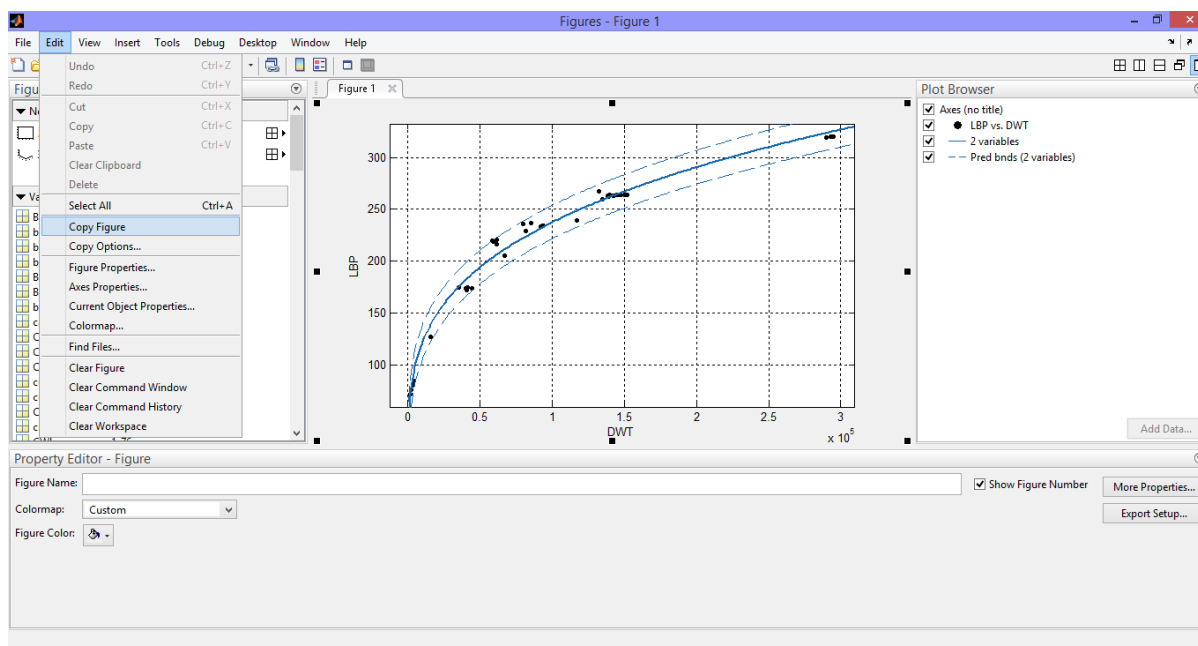
Στο σημείο αυτό κρίνεται χρήσιμο να παρατεθεί συνοπτικά η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την παραγωγή των διαγραμμάτων της στατιστικής ανάλυσης.

Αφού πρώτα δημιουργηθεί στο MATLAB αρχείο που εισάγει όλες τις τιμές των μεγεθών της βάσης δεδομένων και τις αντιστοιχεί σε μεταβλητές, μπορούμε με τη χρήση του Curve Fitting Tool να κάνουμε την επεξεργασία των δεδομένων μας. Το περιβάλλον εργασίας του Curve Fitting Tool του MATLAB φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Σχήμα 139 Περιβάλλον εργασίας του Curve Fitting Tool στο MATLAB

Στο παράθυρο εργασίας φαίνονται οι μεταβλητές τις οποίες επιλέγουμε για να δημιουργήσουμε το διάγραμμα. Αφού επιλέξουμε από τη λίστα των μεταβλητών τις επιθυμητές, στη συνέχεια επιλέγουμε τη μορφή της καμπύλης από μια λίστα διαθέσιμων μοντέλων (Polynomial, Power, κλπ.). Τα αποτελέσματα φαίνονται στο διάγραμμα και αριστερά του διαγράμματος φαίνονται όλες οι παράμετροι της προσεγγιστικής καμπύλης. Έχοντας επιλέξει το διάγραμμα που θέλουμε να παρουσιάσουμε, με την εντολή File→Print to Figure εμφανίζεται ένα νέο παράθυρο όπου μπορούμε να κάνουμε περαιτέρω επεξεργασία του διαγράμματος (μορφή, άξονες, ετικέτες αξόνων κλπ.).



Σχήμα 140 Παράθυρο επεξεργασίας διαγράμματος στο MATLAB

Αφού έχουμε προβεί στην κατάλληλη επεξεργασία του προγράμματος μπορούμε πλέον με την εντολή `Edit`→`Copy Figure` να το αντιγράψουμε και να το χρησιμοποιήσουμε στην έκθεση.